

交通部中央氣象局

委託研究計畫期末成果報告

臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究(1/3)

計畫類別：☐氣象 ☒海象 ☐地震

執行期間：110 年 03 月 31 日至 110 年 12 月 31 日

計畫主持人：吳祚任

執行機構：國立中央大學

中華民國 110 年 12 月 28 日

政府研究計畫（期末）報告摘要資料表

計畫中文名稱	臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究(1/3)		
主管機關	交通部中央氣象局		
執行機構	國立中央大學		
年度	110	執行期間	110.03.31 至 110.12.31
本期經費 (單位：千元)	2,700 千元		
執行進度	預定 (%)	實際 (%)	比較 (%)
	100 %	100 %	0 %
經費支用	預定 (千元)	實際 (千元)	支用率 (%)
	2700 千元	2320 千元	86%
研究人員	計畫主持人	協同主持人	研究助理
	吳祚任		林君蔚
			莊淑君
			楊天瑋
			許家鈞
			曾博森

			莊美惠
			曹瑤
報告頁數	317 頁	使用語言	中文
中英文 關鍵詞	COMCOT 風暴潮溢淹預報模式、COMCOT 暴潮系集預報系統、港內外潮汐分析、調和分析、精進模式；COMCOT Storm Surge and Associated Inundation Forecasting System, COMCOT Storm Surge ensemble prediction system, Tidal analysis, Harmonic analysis, Model Improvement		
研究目的	在未來全球暖化暨潛在強烈颱風生成機率提高之情境下，世界各國更加重視風暴潮科學之研究，中央氣象局已主動建立一套功能完整、計算快速且精準之風暴潮溢淹預報速算系統，並為因應未來潛在強烈颱風強度變動、路徑和相關物理因子之不確定因素，成功發展暴潮系集預報作業系統及相關機率預報產品。針對現有已開發之暴潮預報系統，本計畫預計透過更新系統設備硬體及模式理論方法，包含調教理想風場模式、發展二代系集預報模式、執行潮位站所在位置對暴潮預報準確度影響等之分析與研究，以求更加提升現有預報系統之精準度與效率，為沿海區域之民眾提供詳細且精準之暴潮預報資訊，以期達到減災和防災之目的，降低生命財產損失。		
研究成果	1. 發展第二代暴潮系集預報系統，分析過往颱風預報強度誤差分佈情形，包含颱風中心氣壓、近中心最大風速、颱風半徑等，並利用歷史案例進行颱風強度系集成員案例分析。 2. 以港堤外之潮汐水位資料或 TPXO 潮汐預報資料，進行港內觀測資料與港外之潮汐比對，以分析港灣之遮蔽效應。 3. 將理想風場暴潮預報模式建置於中央氣象局超級電腦上並上線運		

	作。 4. 收集測站風速及壓力場等觀測資料，整理出適用臺灣之理想風場參數。
具體落實應用情形	1. 本研究提出依據氣象局颱風最佳路徑資料庫及歷史預報資料，統計過往颱風強度預報誤差，取得誤差分布機率曲線，並依靠誤差分布搭配颱風警報單內紀錄之決定性預報資料，產生對應的系集成員。研究中利用 2019 年有登陸台灣紀錄的颱風白鹿進行案例分析，發現目前採用的理想風場模式中，氣壓參數組成的系集預報結果影響水位變動範圍較風速參數成員組合的結果大，而風速成員的預報較氣壓成員有機會產生負暴潮偏差。若採用同樣的成員產生方法分析路徑誤差與強度誤差對測站水位的影響，強度參數對測站水位影響主要集中在原本決定性預報路徑影響該測站期間，影響水位的極值振幅變化。路徑參數變化除了可能影響水位極值振幅變化外，亦會改變颱風接近測站的對應時間，造成峰值在該測站發生的時間可能較決定性預報提前或延後。若同時考量強度及路徑成員的組合，成員數會提升至原本考量數量的平方倍，並且在暴潮歷線中得到較大的偏差極值。在決定性預報就已經取得相對準確的測站而言，考量如次大量的系集成員反而可能造成過度預報的現象。 2. 為降低潮位站觀測水位與調和分析殘差值之週期性震盪，以提升分析颱風暴潮時可校驗資料之品質，首先利用潮汐調和分析模式 Utide 模式 (Codiga, 2011)，分析各潮位站觀測水位取得分潮組成及天文潮水位，利用各項統計參數，與氣象局現有作業中調和分析預報水位進行比較兩者之分析結果。研究過程中發現，若採用 Utide 模式分析兩年觀測資料所得之調和分析參數，在部分測站如淡水、箔子寮等站將有機會降低天氣平緩時天文潮預報水位與觀測水位之間的誤差，將有助

	於分析颱風來臨時，風暴潮實際對沿岸造成的影響。 執行調和分析後，研究透過氣象局現有的港內外潮位站觀測資料，以比對小區域的港內外潮汐差異，分析若需要探討沿海細部地形結構對潮汐水位的影響，所需要的網格解析度門檻。研究中發現，以淡海/淡水測站為例，兩點相距約 2.0 公里便有分潮振幅與相位角間之不同，因此在暴潮模式預報中，的確有可能因為預報系統網格解析度不足，造成模式潮汐水位與觀測水位之間的差異產生分潮振幅及潮時的誤差，進而造成水位偏差值的震盪情形。 3. 本研究透過蒐集國內外可供分析之風場及壓力場觀測資料，搭配國外各項理想風場模式及參數統計模型，以推估適合台灣現地之風場參數。研究中利用 ECMWF ERA5 再分析風場資料取得近中心最大風速及最大風速半徑並代入各項理想風場模式，得出適用不同強度之熱帶氣旋的最佳理想風場模式並非唯一一種，後續針對暴潮溢淹預報模式的精進或許可以考慮依據不同的颱風強度選用較為合適的理想風場模式。 4. 本研究於執行「暴潮溢淹預報模式精準度提升研究」工作項目期間亦成功將理想風場暴潮預報模式建置於中央氣象局超級電腦（PCC）並進行作業化測試。透過 2021 年下半年之烟花（IN-FA）、盧碧（LUPIT）、燦樹（CHANTHU）、圓規（KOMPASU）四個颱風事件，本研究提出作業化報告及效能比較報告。現有作業紀錄中，建置於 PCC 之版本執行時間在總時長平均減少約 19.83 分鐘，與現行作業版本之執行時長進行比對，得出執行效能約提升 21.34%，其中在預報產品輸出的部分，PCC 版本可節省約 22.03 分鐘，執行效益與現有作業版本相比可提升高達 71.84%，可謂十分顯著的提升。而在現階段作業流程中，預報員只需於第一報預報時啟動指定 bash 腳本，並輸入預報起始時
--	---

	間與颱風事件，即可執行暴潮預報系統。後續預報可透過工作排程定時執行預報，大幅降低作業員負擔。
計畫變更說明	無
落後原因	無
檢討與建議（變更或落後之因應對策）	無

目錄

¹ 第一章、緒論	1
1.1. 計畫摘要	1
1.2. 計畫背景與目的	1
1.3. 文獻回顧	3
理想風場模式	3
台灣潮汐觀測與預報	9
颱風暴潮系集預報技術	11
² 第二章、計畫重點工作項目及規劃	15
2.1. 計畫重點工作項目	15
2.2. 計畫執行期間可能遭遇之困難及解決途徑	17
2.3. 預計獲得成果	18
2.4. 交付項目及驗收標準	19
³ 第三章、暴潮系集預報系統發展與研究	21
3.1. 颱風暴潮預報模式	21
線性淺水波方程式	23
非線性淺水波方程式	24
3.2. 颱風大氣模式	26
HOLLAND MODEL 參數化颱風模式	26
CWB MODEL 參數化大氣模式	27
風剪力和風阻力係數	28

3.3.	地形與網格設置	30
3.4.	暴潮模式指定預報潮位站	32
3.5.	TPXO 天文潮模式結合	34
3.6.	暴潮系集預報成員產出方法－誤差機率分布法	35
⁴	<u>第四章、系集預報成員分析與比較－2019 年颱風白鹿</u>	<u>42</u>
4.1.	颱風事件介紹	43
4.2.	決定性預報結果校驗	47
4.3.	強度參數對系集預報影響	56
4.4.	路徑系集與強度系集對預報之影響	65
⁵	<u>第五章、潮汐資料觀測比對</u>	<u>79</u>
5.1.	UTIDE 模式介紹	81
5.2.	測站分布	84
5.3.	各潮位站潮汐分析與與作業中調和分析比較結果	101
5.4.	港內外測站潮汐資料比較	175
5.5.	暴潮預報與觀測資料之誤差來源分析	183
⁶	<u>第六章、以觀測資料整理理想風場參數</u>	<u>185</u>
6.1.	風速/壓力觀測資料之選用	186
6.2.	再分析氣象場與理想風場模式比對	197
6.3.	RMAX 統計模型比較	205
	VICKERY ET AL., 2000A	205
	VICKERY ET AL., 2000B	205

KATO, 2005	206
POWELL ET AL., 2005	206
KNAFF ET AL., 2007	206
JIANG, 2008	207
LIN AND FANG, 2013	207
FANG ET AL., 2017	207
FANG ET AL., 2020	208
⁷ <u>第七章、理想風場模式於氣象局超級電腦上線運作</u>	<u>211</u>
7.1. 預報員手動執行預報	212
7.2. 排程執行預報	214
7.3. 預報紀錄檔	215
7.4. 2021 年颱風季預報系統於 PCC 作業化紀錄	221
烟花	222
盧碧	226
燦樹	228
圓規	231
7.5. 效能比較報告	234
⁸ <u>第八章、結論</u>	<u>237</u>
⁹ <u>參考文獻</u>	<u>240</u>
¹⁰ <u>附錄 A 會議紀錄</u>	<u>246</u>
¹¹ <u>附錄 B 維護紀錄</u>	<u>268</u>

¹²	<u>附錄 C 強度參數對系集預報影響對測站水位影響</u>	<u>275</u>
¹³	<u>附錄 D 路徑與強度參數對系集預報對測站水位影響</u>	<u>287</u>
¹⁴	<u>附錄 E 績效報告書</u>	<u>305</u>

圖目錄

圖 3—1 (左) 現中央氣象局採用之 COMCOT 風暴潮溢淹模式第一層巢狀網格計算域，範圍東經 110 度至 134 度，北緯 10 度至 35 度，解析度為 4 弧分 (8 公里)，資料來源為 ETOPO 1。(右) 現中央氣象局採用之 COMCOT 風暴潮溢淹模式第二層巢狀網格計算域，並區分為 4 個不同區域，編號分別為 A 至 D。-----	31
圖 3—2 34 處指定預報潮位站分布。-----	32
圖 3—3 全球潮汐模式 TPXO 模式示意圖 (TPXO 官網) -----	34
圖 3—4 颱風預報路徑誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。 -----	37
圖 3—5 颱風預報氣壓值誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。-----	37
圖 3—6 颱風預報七級風半徑誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。-37	
圖 3—7 颱風預報近中心最大風速誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。-----	37
圖 3—8 機率密度分布函數產生系集預報路徑成員之示意圖。圖左一至左三為依序將曲線下面積均分為二、四、六等分，最右圖為自圖左一至左三中產生之無重複之系集成員分布。-----	39
圖 4—1 颱風白鹿於生命期間路徑與強度圖，資料間隔每 6 小時一筆。顯示時間為 UTC (資料來源：中央氣象局颱風資料庫)。-----	45
圖 4—2 颱風白鹿於警報發布期間各測站最大風速與最大陣風分布圖。警報發布期間為 2019 年 08 月 23 日 05 時 30 分至 08 月 25 日 11 時 30 分。單位為公尺/秒，藍色表最大平均風速，綠色表最大陣風風速。-----	45
圖 4—3 颱風白鹿於警報發布期間各測站總雨量分布圖。警報發布期間為 2019 年 08 月 23 日 05 時 30 分至 08 月 25 日 11 時 30 分。總雨量單位為毫米 (mm)。-----	46
圖 4—4 颱風白鹿於警報發布期間各測站最大 24 小時累積雨量分布圖。警報發布期間為 2019 年 08 月 23 日 05 時 30 分至 08 月 25 日 11 時 30 分。最大 24 小時累積雨量單位為毫米 (mm)。-----	46
圖 4—5 2019 年 08 月 23 日 15 時之颱風白鹿決定性預報路徑 黑點虛線為路徑分布，黑色實線為地形海岸線-----	49
圖 4—6 暴潮預報系統決定性預報之結果—暴潮偏差 (潮位站觀測值扣除調和分析潮汐預報值)。-----	50
圖 4—7 暴潮預報系統決定性預報之結果—暴潮偏差 (潮位站觀測值扣除調和分析潮汐預報值)。-----	51

圖 4—8 暴潮預報系統決定性預報之結果—暴潮偏差（潮位站觀測值扣除調和分析潮汐預報值）。-----	52
圖 4—9 暴潮預報系統決定性預報之結果—暴潮總水位-----	53
圖 4—10 暴潮預報系統決定性預報之結果—暴潮總水位-----	54
圖 4—11 暴潮預報系統決定性預報之結果—暴潮總水位-----	55
圖 4—12 強度參數系集成員預報之結果—暴潮偏差（左）中心氣壓誤差成員、（右）近中心最大風速誤差成員-----	61
圖 4—13 強度參數系集成員預報之結果—暴潮偏差（左）中心氣壓誤差成員、（右）近中心最大風速誤差成員-----	62
圖 4—14 強度參數系集成員預報之結果—暴潮總水位（左）中心氣壓誤差成員、（右）近中心最大風速誤差成員-----	63
圖 4—15 強度參數系集成員預報之結果—暴潮總水位（左）中心氣壓誤差成員、（右）近中心最大風速誤差成員-----	64
圖 4—16 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差（左）路徑誤差成員、（中）強度誤差成員、（右）強度及路徑誤差成員-----	71
圖 4—17 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差（左）路徑誤差成員、（中）強度誤差成員、（右）強度及路徑誤差成員-----	72
圖 4—18 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差（左）路徑誤差成員、（中）強度誤差成員、（右）強度及路徑誤差成員-----	73
圖 4—19 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差（左）路徑誤差成員、（中）強度誤差成員、（右）強度及路徑誤差成員-----	74
圖 4—20 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位（左）路徑誤差成員、（中）強度誤差成員、（右）強度及路徑誤差成員-----	75
圖 4—21 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位（左）路徑誤差成員、（中）強度誤差成員、（右）強度及路徑誤差成員-----	76
圖 4—22 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位（左）路徑誤差成員、（中）強度誤差成員、（右）強度及路徑誤差成員-----	77
圖 4—23 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位（左）路徑誤差成員、（中）強度誤差成員、（右）強度及路徑誤差成員-----	78
圖 5—1 淡水潮位站（現行站碼 1102）所在位置（淡水河油車口）-----	86
圖 5—2 龍洞潮位站（現行站碼 1226）所在位置（龍洞南口遊艇港內）-----	86
圖 5—3 麟山鼻潮位站（現行站碼 1206）所在位置（石門區麟山鼻漁港）----	87
圖 5—4 福隆潮位站（現行站碼 1826）所在位置（福隆漁港碼頭）-----	87

圖 5—5 淡海潮位站（現行站碼 11006）所在位置（漁人碼頭第 3 泊地外提）	88
圖 5—6 基隆潮位站（現行站碼 1516）所在位置（基隆港西 33 號碼頭）（地圖比例尺 500 公尺）	88
圖 5—7 長潭里潮位站（現行站碼 12191）所在位置（北寧路 369 巷）	89
圖 5—8 竹圍潮位站（現行站碼 1116）所在位置（桃園竹圍漁港）	89
圖 5—9 新竹潮位站（現行站碼 112）所在位置（新竹南寮漁港）	90
圖 5—10 外埔潮位站（現行站碼 113）所在位置（後龍鎮海埔里外埔漁港）	90
圖 5—11 臺中港潮位站（現行站碼 1436）所在位置（臺中港 4 號碼頭）（地圖比例尺 500 公尺）	91
圖 5—12 鹿港福隆潮位站所在位置（彰化縣鹿港鎮崙尾灣漁港）（地圖比例尺 500 公尺）	91
圖 5—13 箔子寮潮位站（現行站碼 1156）所在位置（雲林箔子寮漁港）	92
圖 5—14 塭港潮位站（現行站碼 1366）所在位置（嘉義塭港漁港近海 2 公里觀測樁）（地圖比例尺 500 公尺）	92
圖 5—15 東石潮位站（現行站碼 1166）所在位置（嘉義東石漁港）	93
圖 5—16 將軍潮位站（現行站碼 1176）所在位置（臺南將軍漁港）	93
圖 5—17 高雄潮位站（現行站碼 1486）所在位置（高雄港）（地圖比例尺 500 公尺）	94
圖 5—18 東沙島潮位站（現行站碼 198）所在位置（東沙島內）（地圖比例尺 500 公尺）	94
圖 5—19 小琉球潮位站（現行站碼 1386）所在位置（屏東琉球漁港）	95
圖 5—20 東港潮位站（現行站碼 1186）所在位置（屏東東港漁港）	95
圖 5—21 後壁湖潮位站（現行站碼 1196）所在位置（恆春後壁湖港海巡隊前方）	96
圖 5—22 蘭嶼潮位站（現行站碼 1396）所在位置（蘭嶼開元漁港）	96
圖 5—23 成功潮位站（現行站碼 1276）所在位置（臺東成功漁港）	97
圖 5—24 花蓮潮位站（現行站碼 1256）所在位置（花蓮港內）（地圖比例尺 500 公尺）	97
圖 5—25 蘇澳潮位站（現行站碼 1246）所在位置（蘇澳港內貯木池）（地圖比例尺 500 公尺）	98
圖 5—26 烏石潮位站（現行站碼 1236）所在位置（宜蘭烏石港）	98

圖 5—27 馬祖潮位站（現行站碼 1926）所在位置（南竿福澳港）	99
圖 5—28 澎湖馬公潮位站（現行站碼 1356）所在位置（澎湖馬公港）（地圖比例尺 500 公尺）	99
圖 5—29 七美潮位站（現行站碼 13606）所在位置（七美漁港南防波堤近紅燈塔）	100
圖 5—30 吉貝潮位站（現行站碼 13406）所在位置（吉貝碼頭）	100
圖 5—31 淡水測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位（HAR），中圖為 Utide 分析水位（UT），下圖為兩者與觀測資料之殘差值。	109
圖 5—32 龍洞測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位（HAR），中圖為 Utide 分析水位（UT），下圖為兩者與觀測資料之殘差值。	110
圖 5—33 麟山鼻測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位（HAR），中圖為 Utide 分析水位（UT），下圖為兩者與觀測資料之殘差值。	111
圖 5—34 福隆測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位（HAR），中圖為 Utide 分析水位（UT），下圖為兩者與觀測資料之殘差值。	112
圖 5—35 淡海測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位（HAR），中圖為 Utide 分析水位（UT），下圖為兩者與觀測資料之殘差值。	113
圖 5—36 基隆測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位（HAR），中圖為 Utide 分析水位（UT），下圖為兩者與觀測資料之殘差值。	114
圖 5—37 長潭里測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位（HAR），中圖為 Utide 分析水位（UT），下圖為兩者與觀測資料之殘差值。	115
圖 5—38 竹圍測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位（HAR），中圖為 Utide 分析水位（UT），下圖為兩者與觀測資料之殘差值。	116
圖 5—39 新竹測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位（HAR），中圖為 Utide 分析水位（UT），下圖為兩者與觀測資料之殘差值。	117
圖 5—40 外埔測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位（HAR），中圖為 Utide 分析水位（UT），下圖為兩者與觀測資料之殘差值。	118

- 圖 5—41 台中測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。-----119
- 圖 5—42 鹿港測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。-----120
- 圖 5—43 箔子寮測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。-----121
- 圖 5—44 塹港測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。-----122
- 圖 5—45 東石測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。-----123
- 圖 5—46 將軍測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。-----124
- 圖 5—47 高雄測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。-----125
- 圖 5—48 東沙島測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。-----126
- 圖 5—49 小琉球測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。-----127
- 圖 5—50 東港測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。-----128
- 圖 5—51 後壁湖測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。-----129
- 圖 5—52 蘭嶼測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。-----130
- 圖 5—53 成功測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參

- 數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。----- 131
- 圖 5—54 花蓮測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。----- 132
- 圖 5—55 蘇澳測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。----- 133
- 圖 5—56 烏石測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。----- 134
- 圖 5—57 馬祖測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。----- 135
- 圖 5—58 澎湖馬公測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。----- 136
- 圖 5—59 七美測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。----- 137
- 圖 5—60 吉貝測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。----- 138
- 圖 5—61 淡水測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。----- 139
- 圖 5—62 龍洞測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。----- 140
- 圖 5—63 麟山鼻測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。----- 141
- 圖 5—64 福隆測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。----- 142
- 圖 5—65 淡海測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。----- 143

- 用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 143
- 圖 5—66 基隆測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 144
- 圖 5—67 長潭里測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 145
- 圖 5—68 竹圍測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 146
- 圖 5—69 新竹測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 147
- 圖 5—70 外埔測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 148
- 圖 5—71 台中測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 149
- 圖 5—72 鹿港測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 150
- 圖 5—73 箔子寮測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 151
- 圖 5—74 塭港測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 152
- 圖 5—75 東石測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 153
- 圖 5—76 將軍測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 154
- 圖 5—77 高雄測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 155

- 圖 5—78 東沙島測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 156
- 圖 5—79 小琉球測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 157
- 圖 5—80 後壁湖測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 158
- 圖 5—81 蘭嶼測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 159
- 圖 5—82 成功測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 160
- 圖 5—83 花蓮測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 161
- 圖 5—84 蘇澳測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 162
- 圖 5—85 烏石測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 163
- 圖 5—86 馬祖測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 164
- 圖 5—87 澎湖馬公測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 165
- 圖 5—88 七美測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 166
- 圖 5—89 吉貝測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。 ----- 167
- 圖 5—90 淡海潮位站 (圖左紅圈) 及淡水潮位站 (圖右紅圈) 相對位置。 兩

站相距約 2.02 公里，地圖比例尺為 200 公尺。-----	177
圖 5—91 塭港潮位站（圖左紅圈）及東石潮位站（圖右紅圈）相對位置。兩站相距約 2.58 公里，地圖比例尺為 200 公尺。-----	177
圖 5—92 2020 年颱風白鹿預報案例分析（章節 4.1）部分測站之決定性預報與觀測資料校驗值之比對結果-----	184
圖 6—1 2015 颱風蘇迪勒生命期間路徑分布圖-----	190
圖 6—2 海象浮標氣壓（左）與風速（右）觀測資料沿與颱風中心距離之剖面分布，選用資料為浮標氣壓觀測，選用期間由上至下依序為 2015 年颱風蘇迪勒、2016 至 2020 年及 2010 至 2020 年。空心圓為觀測資料，虛線採 PCHIP(Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial)內插資料。-----	191
圖 6—3 浮標氣壓分布。藍線為 ERA5 再分析場資料，黑色十字為觀測資料，紅色虛線為颱風登陸時間。-----	193
圖 6—4 浮標風速分布。藍線為 ERA5 再分析場資料，黑色十字為觀測資料，紅色虛線為颱風登陸時間。浮標風速資料依 Hsu et al. (1993)的公式進行換算。-----	194
圖 6—5 浮標風向分布。藍線為 ERA5 再分析場資料，黑色十字為觀測資料，紅色虛線為颱風登陸時間。-----	195
圖 6—6 ERA 5 2016 年 09 月 25 日 18 時 (UTC) 颱風梅姬於太平洋海面上之 10 米平均風速分布，單位為公尺/秒。本圖中擷取之 R_{max} 為 115.5863 公里， V_{max} 為 26.6940 公尺/秒。-----	199
圖 6—7 對應 ERA 5 2016 年 09 月 25 日 18 時 (UTC) 取得之 R_{max} 及 V_{max} 計算之理想風場模式剖面分布。色線表示各模式沿與颱風中心距離之風速分布，黑色虛線為 0 值基準線，藍色虛線為 R_{max} 對應處，紅色虛線為 V_{max} 對應處。-----	200
圖 6—8 對應 ERA 5 2016 年 09 月 25 日 18 時 (UTC) 取得之 R_{max} 及 V_{max} 計算之理想風場模式二維分布。標題縮寫表示各理想風場模式，色階為風速，單位為公尺/秒。方均根誤差為理想風場之 250 公里內資料與 ERA5 資料之統計結果。-----	201
圖 6—8 對應 ERA 5 2016 年 09 月 25 日 18 時 (UTC) 取得之 R_{max} 及 V_{max} 計算之理想風場模式二維分布。標題縮寫表示各理想風場模式，色階為風速，單位為公尺/秒。方均根誤差為理想風場之 250 公里內資料與 ERA5 資料之統計結果。-----	202
圖 6—8 對應 ERA 5 2016 年 09 月 25 日 18 時 (UTC) 取得之 R_{max} 及 V_{max} 計算之理想風場模式二維分布。標題縮寫表示各理想風場模式，色階為風速，單位為公尺/秒。方均根誤差為理想風場之 250 公里內資料與 ERA5 資料之統計結果。-----	203

圖 7—1 PCC-COMCOT 暴潮預報系統作業流程圖	211
圖 7—2 執行 run_fcst_tyinfo.sh 時指令視窗畫面截圖	212
圖 7—3 run_fcst_tyinfo.sh 檔案內環境變數內容截圖	212
圖 7—4 run_fcst_tyinfo.sh 輸入起始時間畫面截圖	213
圖 7—5 run_fcst_tyinfo.sh 選擇颱風事件畫面截圖	213
圖 7—6 run_fcst_tyinfo.sh 腳本輸入必要訊息後之顯示畫面截圖	213
圖 7—7 Qstat 指令查看執行情況畫面截圖	213
圖 7—8 check_tyinfo_nextrun.sh 檔案內環境變數內容截圖	214
圖 7—9 startup_log 資料夾內容截圖（2021 年 6 月紀錄）	215
圖 7—10 手動執行預報紀錄內容截圖 （2021.0603.22h14m.bash_fcst.comcot_tyinfo）	216
圖 7—11 排程執行預報紀錄內容截圖 （2021.0604.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo）	216
圖 7—12 排程執行預報紀錄內容截圖 （2021.0605.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo）	217
圖 7—13 排程執行預報紀錄內容截圖 （2021.0605.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo）	217
圖 7—14 qsub_log 資料夾內容截圖（2021 年 6 月紀錄）	218
圖 7—15 暴潮預報詳細執行內容之紀錄檔內容截圖 （2021.0603.22h14m.qsub_fcst.comcot_tyinfo）	218
圖 7—16 暴潮預報詳細執行內容之紀錄檔內容截圖 （2021.0604.21h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo）	218
圖 7—17 暴潮預報系統執行期間副程式紀錄檔 LOGFILE 內容截圖（剛啟動 預報系統，2021 年 6 月 3 日 20 時彩雲颱風）	219
圖 7—18 暴潮預報系統執行期間副程式紀錄檔 LOGFILE 內容截圖（預報系 統執行中，已完成預報，正在輸出預報產品）	219
圖 7—19 暴潮預報系統執行期間副程式紀錄檔 LOGFILE 內容截圖（預報系 統執行中，2021 年 6 月 3 日 23 時彩雲颱風）	220
圖 7—20 啟動預報紀錄截圖	223
圖 7—21 預報執行紀錄截圖（qsub）	223
圖 7—22 颱風警報單上傳至 PCC 紀錄截圖	224

圖 7—23 預報執行紀錄內容截圖 (2021.0722.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo)	224
圖 7—24 作業中 MATLAB 版本預報系統產品紀錄截圖	225
圖 7—25 啟動預報紀錄截圖	226
圖 7—26 預報執行紀錄截圖 (qsub)	226
圖 7—27 颱風警報單上傳至 PCC 紀錄截圖	227
圖 7—28 作業中 MATLAB 版本預報系統產品紀錄截圖	227
圖 7—29 啟動預報紀錄截圖	229
圖 7—30 預報執行紀錄截圖 (qsub)	229
圖 7—31 颱風警報單上傳至 PCC 紀錄截圖	230
圖 7—32 作業中 MATLAB 版本預報系統產品紀錄截圖	230
圖 7—33 啟動預報紀錄截圖	232
圖 7—34 預報執行紀錄截圖 (qsub)	232
圖 7—35 颱風警報單上傳至 PCC 紀錄截圖	233
圖 7—36 作業中 MATLAB 版本預報系統產品紀錄截圖	233

表目錄

表 3—1 現中央氣象局採用之 COMCOT 暴潮溢淹預報模式 計算域網格範圍與解析度.....	31
表 3—2 34 處指定預報潮位站資訊.....	33
表 3—3 重建各項機率密度函數分布曲線所需之參數.....	40
表 3—4 切割 T 位置尺度分布曲線下面積所得之誤差成員分布情形	41
表 5—1 現存潮汐分析軟體工具比較表.....	83
表 5—2 中央氣象局潮位觀測站列表.....	85
表 5—3 各潮位站分析天文潮水位與觀測水位比較之統計參數列表（分析資料時段：2019 年至 2020 年）	168
表 5—4 各潮位站觀測值扣除分析天文潮水位之殘差值分布統計參數列表（資料時段：2019 年至 2020 年）	169
表 5—5 各潮位站分析天文潮水位與觀測水位比較之統計參數排行.....	170
表 5—6 各潮位站觀測值扣除分析天文潮水位之殘差值分布統計參數排行.....	170
表 5—7 不同資料長度所得參數預報所得 2021 年潮汐預報水位之統計參數分布	171
表 5—8 不同資料長度所得參數預報所得 2021 年潮汐預報水位之統計參數分布	172
表 5—9 不同資料長度所得參數預報所得 2021 年偏差水位之統計參數分布...	173
表 5—10 不同資料長度所得參數預報所得 2021 年偏差水位之統計參數分布.....	174
表 5—11 淡水潮位站（1102）分潮分析列表.....	178
表 5—12 淡海潮位站（11006）分潮分析列表.....	179
表 5—13 塭港潮位站（1366）分潮分析列表.....	180
表 5—14 東石潮位站（1166）分潮分析列表.....	181
表 5—15 淡水/淡海潮位站主要分潮比較表	182
表 5—16 塭港/東石潮位站主要分潮比較表	182
表 6—1 海氣象浮標資訊.....	190
表 6—2 各國再分析場比較表.....	191
表 6—3 蔡(2021)研究選用浮標測站	192

表 6—4 浮標資料與再分析場之誤差統計分析。包含海表氣壓、10 米平均風速、風向，統計參數含方均根誤差、相關係數及資料點數。	196
表 6—5 理想風場公式統整.....	198
表 6—6 理想風場模式在不同颱風強度下與 ERA5 整體風場之方均根誤差（公尺/秒）	204
表 6—7 各統計模型與 JMA、ECMWF 紀錄之最大風速半徑比對結果.....	210
表 7—1 2021 年 7 月至 10 月有發警報颱風列表.....	221
表 7—2 預報系統現行作業版本執行時間（單位：分鐘）	235
表 7—3 預報系統 PCC 版本執行時間（單位：分鐘）	236
表 7—4 平均執行效能比較（單位：分鐘）	236

第一章、緒論

1.1. 計畫摘要

在未來全球暖化暨潛在強烈颱風生成機率提高之情境下，世界各國更加重視風暴潮科學之研究，中央氣象局已主動建立一套功能完整、計算快速且精準之風暴潮溢淹預報速算系統，並為因應未來潛在強烈颱風強度變動、路徑和相關物理因子之不確定因素，成功發展暴潮系集預報作業系統及相關機率預報產品。針對現有已開發之暴潮預報系統，本計畫預計透過更新系統設備硬體及模式理論方法，包含調教理想風場模式、發展二代系集預報模式、執行潮位站所在位置對暴潮預報準確度影響等之分析與研究，以求更加提升現有預報系統之精準度與效率，為沿海區域之民眾提供詳細且精準之暴潮預報資訊，以期達到減災和防災之目的，降低生命財產損失。

1.2. 計畫背景與目的

未來氣候變遷所導致之全球暖化暨海平面上升之情境下，潛在強烈颱風生成機率將會提高，深受風暴潮威脅所苦之世界各國，更加重視風暴潮科學之相關研究，針對颱風暴潮預報技術之發展，更是不遺餘力。

近年來，西太平洋地區造成的災難性風暴潮事件不斷，2013 年強烈颱風海燕（Typhoon Haiyan）以接近巔峰狀態登陸菲律賓，而其猛烈風力及引起的大規模風暴潮則在菲律賓中部造成毀滅性破壞。2016 年強烈颱風莫蘭蒂（Typhoon Meranti）在墾丁南灣掀起疊加強烈風暴潮和天文大潮的 5 公尺高巨浪，一輛救護車經過時險遭巨浪捲走。2017 年中度颱風天鴿（Typhoon Hato）不但為中國港澳地區帶來極具破壞性的風力，導致澳門境內測得破紀錄的持續風速，而且其風暴潮疊加天文大潮更引致珠江口地區多處嚴重淹水，珠海和澳門的災情尤其嚴峻，成為該兩地超過半個世紀最慘重的風災。2018 年颱風燕子為自 1993 年颱風 13

號以來，時隔 25 年再度為西日本帶來嚴重災情的颱風，造成關西國際機場自 1994 年 9 月 4 日啟用以來最嚴重的災情。2018 年強烈颱風山竹除了在菲律賓造成嚴重災情外，山竹亦在中國廣東沿岸造成巨大損失，於香港造成該地記錄最嚴重的風暴潮。

臺灣位於西北太平洋和南中國海交界，此處為颱風生成頻率高且行經路徑密度稠密之區域，臺灣政府應當更為重視潛在強烈颱風及其所造成之暴潮威脅，特別是與沿海地區居民生命安全和財產息息相關之暴潮溢淹範圍。因此建立一套功能完整、計算快速且精準之風暴潮預報系統，實刻不容緩；建置之風暴潮預報系統，除了必須快速且準確地預報未來臺灣地區暴潮水位外，亦需提供潛在暴潮溢淹範圍（Potential Suge Inundation Area）和沿海地區之潛在暴潮（Maximum Storm Surge）等資訊予民眾或相關權責單位。

一套發展成熟之風暴潮預報系統，需要良好的氣象場進行驅動，氣象局現已有開發之颱風暴潮溢淹預報系統，可分別利用大氣預報模式產品或颱風警報預報參數，針對台灣沿岸地區水位執行作業化預報。有鑑於近來氣候變化越趨極端，局內作業化中的大氣預報模式日新月異，與之相對具有較低計算成本且效率較高的理想風場模式亦應隨著氣候變遷，利用現有先進觀測技術所得之觀測數據精進理想風場模式，以利未來精準之暴潮模擬和暴潮位預報。

於暴潮預報模式校驗中，與觀測資料驗證模式準確性是必不可少的步驟。由於現有資料潮位站大都設置在港內半封閉型水域之內，部分國內研究發現，若以港內的潮位預測值代替外海的預測潮位，時常有潮時預測失準之情形，且數值模式亦會受地形與人為結構物等影響而有不規律之模擬誤差，因此本研究預計更新模式內數值地形資料，利用高解析度之地形資料與數值網格，了解港灣內潮位計受港口地形效應影響之程度，從而瞭解應如何在有限的模式預報時效中使模式結果與觀測資料更進一步減少差距。

即使如此，由於颱風為中尺度天氣現象，本身具有高度之不確定性，例如颱

風強度和颱風路徑於預報中是否符合颱風未來動向和強度趨勢，均為大氣預報模式所困擾之處，於此條件下導入單一氣象場或單一颱風預報之強度和路徑，暴潮預報亦直接受颱風強度和颱風路徑等因子所產生之不確定因素所影響，預報結果可能會與實際觀測現象有顯著差異。因此，國際間除採用決定性預報 (Deterministic Forecasting) 外，亦漸漸採納機率性預報 (Probabilistic Forecasting)，以涵蓋不同特性之系集成員 (Ensemble Members) 方式，進行暴潮系集預報系統技術 (Storm Surge Ensemble Forecasting System) 之發展，藉此暴潮預報中涵蓋颱風多種變動因素影響。中央氣象局除追隨國際趨勢外，本研究亦將針對台灣特有之颱風結構，特別是颱風受中央山脈影響後之發展進行分析。以現有暴潮預報模式為基礎，發展相關暴潮系集預報技術。現有暴潮系集預報系統分別利用局內大氣系集預報模式及颱風警報單過往資料，採納多種颱風路徑變動條件下之系集成員以執行預報，後續預計持續發展暴潮系集預報系統，透過路徑分布、颱風強度、與理想風場類型等資訊，為沿海區域之民眾提供更加詳細之暴潮機率預報資訊，以期達到減災和防災之目的，降低生命財產之損失。

1.3. 文獻回顧

理想風場模式

與熱帶氣旋相關的數值模擬已為一種被廣泛接受的估算風速的方法，常被用於結構設計和颶風風險評估。其中，理想風場模式已在全球範圍內廣泛用於保險風險承保、海岸規劃和風暴潮預報等領域，提供高風險的財務管理，沿岸土地發展和緊急決策所需之相關資訊。但是，各界對於潛在的“最佳”參數風場決定方法仍然沒有達成共識，在眾多已發布模型中，也沒有關於如何選擇最佳參數風場的建議或指導。

現今數值大氣模式已被廣泛的運用於針對風暴潮預測和沿海危險評估研究 (Lin et al., 2003, Hsiao et al., 2012, Powers et al., 2017, Lakshmi et al., 2017)，但

僅透過部分輸入參數（颱風中心位置、中心低氣壓、最大風速、颱風半徑等）便可得到的理想風場模式，具備簡潔、效率、彈性及相對較低需求的計算成本（Mattocks et al.,2008，Lin et al.,2016，Orton et al.,2016，Krien et al.,2017，Shao et al.,2018），對於利用統計方法調查風暴潮危害，或是在製造大量假想合成的熱帶氣旋時頗具優勢（Niedoroda et al.,2010，Haigh et al.,2014，Krien et al.,2015、2017），使其在各項研究及保險界中被廣泛使用。

Fujita (1952)最早開始使用參數化模式計算颶風風場，他假設颶風氣壓 $P(r)$ 隨半徑方向的距離 r 衰減，如下式：

$$\frac{P_a - P(r)}{P_a - P_c} = \left[1 + \left(\frac{r}{R_{mw}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{式1-1})$$

式中 P_c 為近海平面高度處的中心氣壓， P_a 為近海平面高度處的外圍氣壓， R_{mw} 為最大風速半徑。

Schloemer (1954)研究美國佛羅里達海上之颶風中心氣壓隨半徑方向之變化，發現式(1)的中心氣壓衰減太快，於是 Schloemer (1954)建議：氣壓 $P(r)$ 隨半徑方向的距離 r 以指數率衰減較符合實際颶風中心氣壓衰減的形式，如下式：

$$\frac{P(r) - P_c}{P_a - P_c} = \exp \left[- \left(\frac{R_{mw}}{r} \right) \right] \quad (\text{式1-2})$$

Holland (1980)使用式(2)研究侵襲澳大利亞的三場颶風，發現式(2)並不是每一場颶風都能模擬的很好，於是改良 Schloemer (1954)的研究成果，使用尺度參數 B 值(Scaling parameters)來描述颶風氣壓場的衰減，如下式：

$$\frac{P(r) - P_c}{P_a - P_c} = \exp \left[- \left(\frac{R_{mw}}{r} \right)^B \right] \quad (\text{式1-3})$$

式中 P_c 為近海平面高度處的中心氣壓， P_a 為近海平面高度處的外圍氣壓， R_{mw} 為最大風速半徑， B 為尺度參數。在不考慮地表摩擦阻力的狀況下，在距離中心 r 處的風速 $V(r)$ 與氣壓梯度 dP/dr 的關係為：

$$\frac{V^2}{r} + fV = \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} \quad (\text{式1-4})$$

式中 ρ 為空氣密度， f 為柯氏力(Coriolis)係數：

$$f = 2\Omega \sin(LA) \quad (\text{式1-5})$$

式中 $\Omega = 7.292 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 為地球自轉速度， LA 為颶風中心的緯度。上式求解可得：

$$V(r) = -\frac{rf}{2} \pm \left[-\frac{r}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{r^2 f^2}{4} \right]^{1/2} \quad (\text{式1-6})$$

將颶風氣壓場(3)式帶入(6)式可得距離颶風中心 r 公尺處的風速 $V(r)$ ：

$$V(r) = \left[B \frac{P_a - P_c}{\rho_a} \left(\frac{R_{mw}}{r} \right)^B \exp \left(- \left(\frac{R_{mw}}{r} \right)^B \right) + \frac{r^2 f^2}{4} \right]^{1/2} - \frac{rf}{2} \quad (\text{式1-7})$$

此模式中的尺度參數 B 值，最大風速半徑 R_{mw} 會影響颶風風速的準確性，但 Holland 並未說明如何決定尺度參數 B 和最大風速半徑 R_{mw} 。

Hubbert 與 Wolf(1991)研究西北太平洋的颱風，得到在不同中心氣壓下，建議尺度參數 B 與中心氣壓的關係：

$$B = 1.5 + \frac{980 - P_c}{100 \cdot \rho_a} \quad (\text{式1-8})$$

式中 P_c 為中心氣壓，單位為 hPa。

Harper & Holland (1999) 提出 B 值與颱風中心氣壓差的相關模式如下式：

$$B = 2.0 - \left(\frac{P_c - 900}{160} \right) \quad (\text{式1-9})$$

Willoughby 等人(2004)使用最大風速與緯度回歸出經驗公式：

$$B = 0.886 + 0.0177V_{\max} - 0.0049LA_t \quad (\text{式1-10})$$

Powell 等人(2005)依據觀測數據提出 B 值、最大風速半徑與中心氣壓差的經驗公式：

$$B = 1.38 - 0.00309R_{mw} + 0.00184\Delta P \quad (\text{式1-11})$$

Vickery 等人(2009)將前兩者模式整合提出一個無因次參數 A 值，此 A 值與最大風速半徑、科氏力、海溫、颶風中心氣壓差與颱風中心氣壓有關：

$$A = \frac{R_{mw} \cdot f}{\sqrt{2R_d T_s \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta P}{P_c \cdot e}\right)}} \quad (\text{式1-12})$$

B 值與 A 值的關係式如下：

$$B = 1.732 - 2.237\sqrt{A} \quad (\text{式 1-13})$$

Lin 與 Chavas (2012)使用最大風速、科氏力、空氣密度與中心氣壓規劃出經驗式，如下所示：

$$B = \rho_a \left(\frac{V_{\max}^2 + f \cdot R_{mw} \cdot V_{\max}}{P_a - P_c} \right) \quad (\text{式1-14})$$

中央氣象局(CWB)所建議的公式計算 B 值經驗相關係數(蔡育霖, 2014)與近中心最大風速 Vmax 之平方成正比關係，並與環境氣壓和颱風中心氣壓差值成反比，如下所示：

$$B = \frac{1}{P_a - P_c} \left(\frac{V_{\max}^2}{5.375^2} \right) \quad (\text{式1-15})$$

Willoughby 等人(2006)對 Holland (1980)的研究進行測試，發現考量單一颱風事件時，風速剖面的模擬結果與實際觀測結果誤差較大，因此必須修正。他們提出一套分區公式計算颱風梯度風速，如式(16)~(18)，與 Holland (1980)不同之處在於分區公式能改善原模式高估颱風眼牆至颱風中心的風速，及颱風眼牆外風速遞減過快的問題。

$$V(r) = V_i = V_{\max} \left(\frac{r}{R_{mw}} \right)^n \quad (0 \leq r \leq R_1) \quad (\text{式1-16})$$

$$V(r) = V_i(1-w) + V_0 w \quad (R_1 \leq r \leq R_2) \quad (\text{式1-17})$$

$$V(r) = V_{\max} \exp \left(-\frac{r - R_{mw}}{x_1} \right) \quad (R_2 \leq r) \quad (\text{式1-18})$$

式中 $V_{\max}$ 為最大風速， V_i 為颱風眼牆內的風速， n 為颱風眼指數，以式(17)計算。 V_0 為颱風眼牆外的風速， R_1 與 R_2 為最大風速半徑的過渡區， w 為加權係數，當 $r < R_1$ ， $w = 0$ ；當 $R_2 < r$ ， $w = 1$ ；當 $R_1 < r < R_2$ ， w 值如式(21)。作者建議過渡區大小為 10~25 km， x_1 為外圍環流的衰減長度，如式(22)。 R_{mw} 為最大風速半徑，如式(23)， R_1 使用式(24)求得。

$$V_{\max} = 2.16 \sqrt{Z_e - Z_c} \quad (\text{式1-19})$$

$$n = 0.431 + 0.136 V_{\max} - 0.006 L A_t \quad (\text{式1-20})$$

$$w(\xi) = 126\xi^5 - 420\xi^6 + 540\xi^7 - 315\xi^8 + 70\xi^9 \quad (\text{式1-21})$$

$$x_1 = 270.5 - 4.78 V_{\max} + 6.176 L A_t \quad (\text{式1-22})$$

$$R_{mw} = 46.4 \exp(-0.0155 V_{\max} + 0.0169 L A_t) \quad (\text{式1-23})$$

$$w \left(\frac{R_{\max} - R_1}{R_2 - R_1} \right) = \frac{\frac{\partial V_i}{\partial r}}{\frac{\partial V_i}{\partial r} - \frac{\partial V_0}{\partial r}} = \frac{n x_1}{n x_1 + R_{mw}} \quad (\text{式1-24})$$

式中 $Z_e - Z_c$ 為颱風外圍與颱風中心的等壓面高度差，單位 km。 L 為無因次化距離：

$$\xi = \frac{r - R_1}{R_2 - R_1} \quad (\text{式1-25})$$

Ou 等人(2002)提出：颱風在移動的過程中，颱風的風向與暴風半徑之切線方向有所偏離，如圖 2 所示，他們建議偏離角可設為定值 25° 。國外也有學者對風

向角有所研究，Phadke 等人(2003)認為實際的風向角與暴風半徑切線方向之偏角與距離颱風中心位置之遠近有關，如下式，其值介於 $10^\circ \sim 25^\circ$ 之間。

$$\beta = 10^\circ \left(1 + \frac{r}{R_{mw}} \right) \quad 0 \leq r < R_{mw} \quad (\text{式 1-26})$$

$$\beta = 20^\circ + 25^\circ \left(\frac{r}{R_{mw}} - 1 \right) \quad R_{mw} \leq r < 1.2R_{mw} \quad (\text{式 1-27})$$

$$\beta = 25^\circ \quad \geq 1.2R_{mw} \quad (\text{式 1-28})$$

MacAfee 等人(2006)則考量到實際颶風的非對稱性現象，提出了結合梯度風速、颶風移動速度之切向角模式來計算真實的颶風風速：

$$V_{gpt}(r) = \sqrt{\left(-V_g \cos \theta_r \right)^2 + \left(V_g \sin \theta_r + \frac{V_c \cdot r \cdot R_{mw}}{R_{mw}^2 + r^2} \right)^2} \quad (\text{式 1-29})$$

式中 V_g 為梯度風速， θ_r 為風速的切向角度， V_c 為颶風移動速度。

Jelesnianski 等人(1992)為美國國家海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)建立 SLOSH Model 模擬風暴潮，其風場模式為：

$$V(r) = 2V_{max} \frac{R_{mw}r}{(R_{mw}^2 + r^2)} \quad (\text{式 1-30})$$

Phadke 等人(2003)建議使用 Rankine 渦流來預測颶風在半徑方向上的風速分佈：

$$V = \begin{cases} V_{max} \left(\frac{R}{R_{mw}} \right)^B, & R < R_{mw} \\ V_{max} \left(\frac{R_{mw}}{R} \right)^B, & R > R_{mw} \end{cases} \quad (\text{式 1-31})$$

式中 B 值介於 0.4 至 0.6 之間，而 Phadke 等人(2003)使用 $B = 0.5$ 。

除了模式參數方面本身的考量，大部分研究中選用的理想風場模式只是作為軸對稱風場和均勻向量的總和而得出，以模擬由於風暴的平移運動而引起的不對

稱性。關於如何準確估計風場剖面及風向角變化等因素的最佳方法仍存在爭議，而且取決於選用的方法，推算出來的理想風場會出現很大的分歧 (Lin 與 Chavas, 2012)。此外，熱帶氣旋的不對稱性亦可能由其他許多因素造成，例如相鄰的熱帶氣旋與之交互作用、邊界層摩擦效應或地形所造成的影響等，這些因素難以用參數的形式簡單概括 (Olfateh et al., 2017)，研究中預計參考國外各項理想風場模式，搭配風速觀測資料推估適合台灣現地之風場參數，並利用所得之新理想風場模式進行颱風暴潮模擬，以期得到更加精確之暴潮模擬結果。

台灣潮汐觀測與預報

潮汐水位的預測是確定沿海和海洋地區活動或建設進度的重要問題之一，如果不通過常規方法進行長時間的潮汐測量（短則一個月多則數年），就無法獲得準確的潮汐預測。目前潮位觀測資料除來自氣象局潮位站外，其餘來源包括內政部、水利署、運輸研究所港灣技術研究中心、工業技術研究院及臺灣電力公司等單位。

台灣許多學者利用觀測資料，利用資料繪圖、統計分析、能譜分析，相關性分析及調和分析等研究方法，分析單一地區或港口的潮汐現象，如周宗仁和施士力(1981)、蔡瓊林和黃煌輝(1982)、吳建民和馮德榮(1990)、林炤圭等人(2005)、張憲國等人(2013)等等。

針對台灣環島沿岸潮汐的相關研究，陳、黃(1990)則收集台灣環島及澎湖32個測站的潮汐資料，利用頻譜分析及調和分析後，討論潮汐運動在台灣海域的特性。劉(1999)系統地整理臺灣環島沿岸實測之潮汐資料。李等人(2005)利用POM潮流數值模式對台灣沿海進行潮汐資料推算，以模擬潮位站的潮汐資料，進行以主成分分析及群集分析，發現西部海岸的潮汐特性較東部海岸較不具空間均勻性。

針對台灣海峽地區及台灣西南海域，Hwung 等人(1986)以調和分析針對臺

灣西海岸潮位站之實測潮汐資料，應用頻譜分析求各測站的主要分潮，提出臺灣西海岸，北自淡水、南至臺西，其潮型皆屬半日潮型，且 M2 分潮為最重要分潮的論點。王玉懷(1998, 1999) 依據實測潮汐資料之調和分析結果，並依據凱爾文波 (Kelvin wave)之理論，說明臺灣海峽潮波運動方向是由北而南傳遞行進。張等人 (2001) 於台南縣中心漁港、高雄縣興達漁港及屏東縣枋寮漁港設置臨時潮位測站實施十個月的觀測，認為以潮時來看，潮波自台灣南部進入台灣海峽，由南往北傳遞。

Lin 等人(2001)通過匯總全島範圍的潮汐數據，指出台灣西海岸有半日潮異常放大的情形，並利用線性淺水波方程對其發生機制進行了理論和數值研究，從理論上可以識別出被大陸棚捕獲的波浪和潮汐共振。該研究中提出，半日潮的異常放大的現象可以透過陷波理論 (trapped waves, Mei, 1983) 和共振盪潮的共振理論 (Dean 和 Dalrymple, 1984) 解釋，而且地形 (包括幾何形狀和水深) 在影響潮汐方面起著非常重要的作用。詹等人(2004a, 2004b)則利用數值模擬方法進一步提出台灣海峽南部突然加深的地形阻礙潮汐向南的傳播，隨後的反射在海峽東側產生了部分駐波，說明臺灣海峽的潮差特性的原因。Wu et al (2018)為台灣海峽中的 M2 分潮提供了分析研究，海峽被理想化為具有均勻深度的矩形盆地，在北部和南部開口處觀察到的潮汐被用作開放邊界條件，並且在控制方程式中保留了科里奧利力和底部摩擦力，數學模型上得到的結果與現有觀測到的潮汐傳播現象相似。

針對潮汐數值預報的部分，先有劉肖孔 (1983)建立中國海域三度空間模式，李賢文(1989)開發了台灣鄰近海域潮汐預報數值模式，而蘇青和、江中權 (1992) 則針對台灣各港口潮汐相關性與預報模式研究。Yen et al (1996) 提出了使用短時間 (幾天) 的潮汐觀測值，在已知角頻率的前提下使用高雄港幾天的潮汐記錄，通過卡爾曼濾波技術進行調和分析及後續短期水位的預測。Jan et al. (2001) 針對台灣海峽區域開發了高解析度 (網格 3X3 公里) 的三維數值模式，並為計算出

的台灣海峽 M2 潮汐提供了等潮時圖、等潮位向圖和深度平均潮汐橢圓。Zhu et al (2009) 是利用二維有限差分模型計算台灣海峽及其附近地區的日潮和半日潮，並依據模式結果提供了 8 種分潮的等潮時圖及等潮位向圖。Hu et al (2010) 則發展了涵蓋東亞海域，解析度為 $1/12^\circ$ 的二維潮汐模式，並建立了一個正壓潮汐海平面和十五個潮汐成分的潮流的諧波常數數據庫。

潮汐模擬中一個普遍接受的概念是，用全球或流域尺度的潮汐模型很難準確模擬沿海地區的潮汐。造成模式與觀測數據之間有落差的原因是由於模式網格解析度不足，導致模式地形資料有截位誤差。近年林等人(2019, 2020)分析小琉球與龍洞兩處港內外潮汐觀測資料之差異，發現港、內外各分潮之振幅一致，但有一部分分潮潮時不同，可見港內潮位無法完全代表港外潮位，且港內、外潮位之相位差導致兩者潮位差值呈週期性震盪，以龍洞觀測資料為例，港內外資料記錄位置僅相隔 0.4 公里。由於上述的比較與疑慮，我們認為有必要使用更高解析度的區域潮汐模型，以更精確地模擬台灣沿海的潮汐。因此本研究預計更新現有暴潮預報模式內數值地形資料，利用高解析度之地形資料與數值網格，了解港灣內潮位計受港口地形效應影響之程度，從而瞭解應如何在有限的模式預報時效中使模式結果與觀測資料更進一步減少差距。

颱風暴潮系集預報技術

受颱風、颶風或氣旋所帶來風暴潮潛在災害之國家，針對暴潮系集預報技術之發展已行之有年，日本、英國、美國、義大利、加拿大和中國大陸等國家，相關氣象單位和學者已投入暴潮系集預報技術研究，部分國家亦完成區域性暴潮系集作業化預報；於臺灣地區，國家實驗研究院所屬之颱風洪水研究中心亦致力於颱風暴潮系集預報技術之相關研究；針對上述國家和研究單位，進行暴潮系集預報技術發展之文獻回顧，以了解各國家現今之暴潮預報發展或作業化預報現況。

對於暴潮系集預報技術，日本氣象廳 (Japan Meteorological Agency, JMA) 委

託學者進行相關研究與暴潮系集預報技術之發展；Saito 等人(2010) 於日本氣象廳採用暴潮系集預報技術，進行日本指定潮位站之暴潮預報，由日本氣象廳非靜壓大氣模式 JMA Nonhydrostatic Model (NHM) 所發展之中尺度系集預報系統 (Mesoscale Ensemble Prediction System, EPS) 提供各系集成員之海表面風場和氣壓場，基於普林斯頓海洋模式 (Princeton Ocean Model, POM) 下進行暴潮系集預報，普林斯頓海洋模式於系集預報所採用 3.5 公里解析度以及垂直方向 sigma 座標 12 層，系集預報過程中包含 21 個不同系集成員，並以 2008 年納吉斯氣旋 (Cyclone Nargis) 作為研究案例。

英國為了避免決定性預報 (Deterministic Forecasting) 所造成之暴潮預報誤差，Flowerdew 等人(2013)採納了全球和區域系集預報系統 (Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System, MOGREPS) 提供之 23 個系集成員作為不同氣象場條件輸入，研究中以 CS3X 暴潮模式作為基礎，發展英國專屬暴潮系集預報系統，暴潮系集模式所採用正交網格座標系統，但解析度於緯度和經度方向均有所不同，模式解析度於緯度方向設定為 $1/9$ 度 (約 13 公里)，經度方向則設定為 $1/6$ 度 (約 20 公里)。

美國國家海洋暨大氣總署 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 基於發展已久的 SLOSH 暴潮模式 (Sea Lakes and Overland Surges from Hurricanes, SLOSH) 下，發展美國近岸暴潮系集預報系統，並以 2012 年發生之珊迪颶風 (Hurricane Sandy) 為案例，分析珊迪颶風於預報中造成之系集最大水位 (Ensemble Maximum Envelope of Water)，於珊迪颶風研究個案過程中，採用了 64 個不同的系集成員，驅動 SLOSH 風暴潮模式進行近岸暴潮水位之推算 (Forbes et al., 2014)。

義大利亦透過暴潮系集預報之方式，分析 2010 年期間的不同的 10 組暴潮事件，以非線性淺水波方程之 HYPSE (Hydrostatic Padua Sea Elevation) 暴潮模式為基礎，發展暴潮系集預報技術，並導入歐洲天氣系集預報系統 ECMWF EPS

(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Ensemble Prediction System) 所產出之 50 個系集成員資料，HYPSE 暴潮系集預報系統之解析，分佈自 3.3 公里至 7 公里不等 (Mel 與 Lionello, 2014)。

位處於北美州的加拿大，亦漸採用系集方式的暴潮預報技術與決定性暴潮預報並行；由 Bernier 與 Thompson (2015) 所發表之結果，在加拿大位於大西洋沿海地區，採用區域決定性預報 (Regional Deterministic Surge Prediction System, RDSPS) 和區域系集暴潮預報 (Regional Ensemble Surge Prediction System, RESPS) 兩者並行，RDSPS 和 RESPS 均採用非線性深度積分數值模式作為暴潮預報之基礎，區域決定性預報和系集預報系統兩者解析度不同，區域決定性預報 RDSPS 解析度為 2 弧分 (4 公里)，而區域系集暴潮預報 RESPS 解析度則為 5 弧分 (10 公里)。

中國大陸亦有學者採納暴潮系集預報技術，進行暴潮機率預報，以中國大陸沿岸為研究區域，於暴潮系集預報系統中採納 15 個不同的系集成員，並以 2013 年發生之菲特颱風 (Typhoon Fitow) 為研究案例進行討論 (Ding et al., 2016)，除分析 15 個系集成員各別於中國沿岸地區所造成之暴潮水位外，亦計算 2013 年菲特颱風所產生之風暴潮超過 0.6 公尺之發生機率圖 (Occurrence Possibility Map of Storm Surge Exceeding 0.6 m)。

國家實驗研究院所屬之臺灣颱風洪水研究中心亦致力於颱風暴潮系集預報技術之研究，林等人 (2016) 利用普林斯頓海洋模式 (Princeton Ocean Model, POM) 作為暴潮系集預報之基礎，配合 WRF (Weather Research and Forecasting) 大氣模式之輸出結果，於暴潮系集預報中，共採納 12 個不同的系集成員，普林斯頓海洋模式 POM 之解析度於預報中設定為 15 公里，並以 2009 年莫拉克颱風 (Morakot)、2010 年凡那比颱風 (Fanapi)、2012 年蘇拉颱風 (Saola)、2013 年蘇力颱風 (Soulik)、2014 年颱風麥德姆 (Matmo) 與鳳凰颱風 (Fungwong) 作為研究案例。

然暴潮系集預報除採用不同之大氣模式條件之系集成員，亦可探討路徑分歧之暴潮偏差不確定性，美國國家大氣研究中心 (NCAR) 為研究橫向颱風路徑誤差，使用機率密度分佈函數 (Probability Density Function, PDF) 探討颱風登陸點和移動方向對於暴潮預報之影響。美國國家颶風研究中心 (NHC) 亦統計 2004 至 2006 年北大西洋颶風官方預報 OFCL (Official NHC Forecast) 與真實颶風之 Cross-Track Error (橫向路徑誤差) 及 Along-Track Error (徑向路誤差) 進行分析研究 (Taylor 與 Glahn, 2008)。

由文獻回顧可知，國內外針對暴潮系集預報系統之發展已行之有年，各領域專家和學者們投身於此研究；但綜觀各國或國內所建置之暴潮系集預報系統，部分模式解析度低於 2 公里，無法完整掌握風暴潮所近岸地區之溢淹行為和較為複雜且非線性之潮汐和暴潮交互作用，對於臺灣複雜水深地形和陸地高程變化無法較好地掌握，若直接採用系集成員之氣象場答案進行計算，恐無法有準確之暴潮預報結果，也無法計算由風暴潮所造成之潛在溢淹範圍。因此針對臺灣地區，建議暴潮系集預報模式應採用較高解析度之計算網格，並發展具有潛在風暴潮溢淹之預報產品，基於氣象局現有暴潮預報系統下進行發展，縮短模式建置時間，並避免因採用其他模式所導致之操作問題，延誤預報員於颱風期間進行預報之寶貴時間；待暴潮系集預報發展成熟，並且完成作業化測試上線作業後，以暴潮預報資訊協助中央氣象局或其他災防單位訂定未來風暴潮之減災或災防措施，保護沿海地區居民之生命和財產安全。

第二章、計畫重點工作項目及規劃

2.1. 計畫重點工作項目

本計畫重點預期完成之工作項目及具體成果主要分為 3 大項，皆屬提升模式精準度之相關研究，分列如下且預計分年進行：

暴潮溢淹預報模式精準度提升研究

透過測站風速及氣壓場等觀測值，調校適合臺灣之理想風場參數。進而提升風暴潮預報模式之準確度。並將預報系統之作業平臺轉移至中央氣象局之超級電腦，進行測試與提出效率報告。

港灣海堤遮蔽效應對風暴潮預報準確度之影響分析

以高解析度地形與數值網格，展現港灣之海堤遮蔽效應，以了解安裝於港灣內之潮位計受海堤遮蔽效應之影響。將以 TPXO 潮汐預報模式結果作為風暴潮數值模式之邊界進行近岸高解析度潮汐模擬，並與港灣海堤內潮位站實測資料進行比對，以分析港灣海堤之遮蔽效應。

暴潮系集預報模式精準度提升研究

配合中央氣象局資料多元之來源格式及相關資安管理，將校驗系統資料庫架接來源，自 MySQL 資料庫調整為應用程式介面（Application Programming Interface，API），本計畫擬發展第二代暴潮系集預報系統，透過路徑分布、颱風強度、與理想風場類型，分析適合臺灣之第二代系集預報模式。

各項重點工作項目於第 1 年度至第 3 年度預定進行之步驟，經本團隊整理後，於下述項目條列：

第 1 年

1. 將理想風場暴潮預報模式建置於中央氣象局超級電腦上並上線運作。
2. 以港堤外之潮汐水位資料或 TPXO 潮汐預報資料，進行港內觀測資料與港外之潮汐比對，以分析港灣之遮蔽效應。
3. 收集測站風速及氣壓場等觀測資料，整理出適用臺灣之理想風場參數。

4. 發展第二代暴潮系集預報系統，分析過往颱風預報強度誤差分佈情形，包含颱風中心氣壓、近中心最大風速、颱風半徑等，並利用歷史案例進行颱風強度系集成員案例分析。

第 2 年

1. 將颱風暴潮 TWRF 預報模式建置於中央氣象局超級電腦上並上線運作。
2. 完成第二代暴潮系集程式，以現有系集預報為基礎，提供路徑、強度與理想風場之作業選項。
3. 提供兩個以上的歷史颱風案例模擬，並分析本案新增之颱風強度及理想風場模式選項時對系集預報產品之影響。
4. 建置 python 版本之暴潮/波浪校驗系統，包含讀取指定資料庫架接來源及維持現有功能，該版本可以提供後續銜接現有 API 的可能性。
5. 透過現有最佳地形解析度資料，搭配網格收斂分析，量化分析高解析度地形與高解析度網格對暴潮預報模式結果的改良程度，以作為後續計算資源提升後模式精進的參考。

第 3 年

6. 透過第二代暴潮系集預報系統進行系集計算，量化分析適合臺灣之理想風場模式。
7. 進行港灣尺度之近岸高解析度暴潮預報系統模擬，以模式潮位計與港灣內觀測資料或 TPXO 潮汐預報資料進行比對，以分析港灣遮蔽效應對潮汐或風暴潮模擬之影響。
8. 比較舊有平台與轉移後平台上之暴潮預報作業系統兩者間的效能提升率。

2.2. 計畫執行期間可能遭遇之困難及解決途徑

本專案為中央氣象局委託進行，重點工作項目包含：「暴潮溢淹預報模式精準度提升研究」、「暴潮系集預報模式精準度提升研究」、「港灣海堤遮蔽效應對風暴潮預報準確度之影響分析」等3項重點工作項目，經本團隊審慎評估後，條列本案執行期間，可能遭遇之困難及解決途徑和方法：

目前評估，暴潮溢淹預報模式精準度提升研究可能遭遇之困難為，針對理想風場之調整，包含更換現有理想風場模式，或修改現有參數模式之參數。不論往何種方向進行，收集測站風速及氣壓場等長年觀測資料並從資料中過濾出可供參數模式參考之颱風事件將會是非常耗時且必不可少之要素，透過局內業務單位協助及研究團隊適當的時程規劃，應可順利克服此困難。

暴潮系集預報系統可能遭遇之困難為，系集成員於專案後期，為包含颱風強度和路徑等變動因子，數量可能會超過單台計算機器所能負擔，造成計算效能較大的負擔，可透過購買計算資源、建立資料傳遞界面或程式平行化修改等方式，預期可順利地解決此困難。

港灣海堤遮蔽效應對風暴潮預報準確度之影響分析可能遭遇之困難為，針對港內外之潮汐差異，只要能夠取得長時間的港內、外潮汐觀測資料互相比較，便可直接得到兩者之間的不同之處，惟現有相關研究中，即使潮位觀測資料可來自多方單位，也並非所有港區皆有複數潮位站的觀測資料可供比較。為解決此困難，除了積極收集各單位之潮汐觀測資料外，本研究預計利用其他模式或數值方法求得調和分析參數，並與氣象局現有之調和分析結果進行比較，試圖以近年資料取得較好之數值潮汐結果，以求後續研究颱風暴潮案例時能夠擷取更為精確的暴潮偏差訊號。除了比較兩模式所得之潮汐預報結果與觀測水位資料之差異，亦會透過開源程式分析港內外測站之分潮組成是否確有不同。後續將更新現有暴潮預報模式內數值地形資料，利用高解析度之地形資料與數值網格，優先重現現有針對港內外潮汐差異之相關研究成果再更進一步提供其他潮位站之模擬案例。

2.3. 預計獲得成果

統整工作項目後預期可完成之整體效益如列：

1. 提供暴潮溢淹預報模式解析度提升時效報告，增進計算效能。
2. 配合中央氣象局新增資料庫架接來源（API），維持預報系統穩定運作。
3. 透過大氣風場之測站風速及壓立場等觀測資料，找出適合臺灣之理想風場模式。
4. 進行第二代暴潮系集預報模式之發展，提供更具代表性之系集成果。將於校驗系統累積資料，期待為相關作業單位爭取相關政策之決策緩衝時間。
5. 以港口潮位計資料或 TPXO 潮位預報資料與風暴潮預報模式數值潮位計進行比對，提供港灣遮蔽效應量化分析結果。
6. 測試本局超級電腦軟體環境與模式效能，期待藉由叢集電腦性能使預報系統之計算加速，並提出系統轉移機器之計算效能差異。
7. 持續精進暴潮預報模式、暴潮系集預報模式、暴潮校驗模式及波浪校驗模式，提供民眾穩定之風暴潮資訊，做為政府災防政策之依據。

2.4. 交付項目及驗收標準

	交付項目	初稿日期	完成日期	驗收標準
	1.依合約規定，至政府研究資訊(GRB)系統完成相關填報工作。		決標次日起3工作天內	依合約規定之工作時程上網登入政府研究資訊系統(GRB)，登錄本計畫相關資料。
期中	2.配合本局不定期之查訪	110/07/06 (含)	110/08/03 (含)	本局將不定期對本計畫進行工作進度查訪，廠商至少應於110年4月、6月各進行1次工作進度報告(簡報或會議型式)。
	3.理想風場暴潮預報模式於中央氣象局超級電腦上線運作	110/07/06 (含)	110/08/03 (含)	將理想風場暴潮預報模式建置於中央氣象局超級電腦上並上線運作。(第七章、理想風場模式於氣象局超級電腦上線運作，第211頁)
	4.進行港內觀測資料與港外之潮汐比對	110/07/06 (含)	110/08/03 (含)	潮汐預報水位與觀測資料間之週期性水位差異偏差來源分析。(第五章、潮汐資料觀測比對，第79頁)
	5.分析過往颱風預報強度誤差分佈情形	110/07/06 (含)	110/08/03 (含)	1.提供颱風預報強度誤差分佈情形系集分析。 2.進行颱風強度系集成員歷史案例。(第四章、系集預報成員分析與比較—2019年颱風白鹿，第42頁)
	6.期中報告修正版		110/08/03 (含)	繳交期中報告修正版
期末	7.配合本局不定期之查訪	110/12/03 (含)	110/12/31 (含)	本局將不定期對本計畫進行工作進度查訪，廠商至少應於110年8月、10月各進行1次工作進度報告(簡報或會議型式)。
	8.以觀測資料整理未來系集分析用之理想風場參數	110/12/03 (含)	110/12/31 (含)	提供未來系集分析用新版之適用於臺灣之理想風場參數。(第六章、以觀測資料整理理想風場參數，第185頁)
	9.理想風場暴潮預報模式之作業化報告	110/12/03 (含)	110/12/31 (含)	提供中央氣象局超級電腦上運作之理想風場暴潮預報模式之作業化報告。(第七章、理想風場模式於氣象局超級電腦上線運作，第211頁)
	10.進行暴潮模式更新版本之個案模擬與分析	110/12/03 (含)	110/12/31 (含)	(1)暴潮預報模式操作手冊。 (2)暴潮系集預報模式操作手冊。 (3)暴潮校驗模式操作手冊。 (4)波浪校驗模式操作手冊。

	11.廠商於期末報告需附上績效報告 1 份。	110/12/03 (含)	110/12/31 (含)	期末績效報告 1 份（依照科技部格式）。
	12.伺服器弱點修復		110/12/31 (含)	依照本局作業需求，協助暴潮相關主機資安弱點修復。
	13.期末報告修正版		110/12/31 (含)	繳交期末報告修正版

第三章、暴潮系集預報系統發展與研究

3.1. 颱風暴潮預報模式

本研究所發展之暴潮系集預報模式，基於中央氣象局現有採用之 COMCOT 暴潮模式為基礎，而 COMCOT 暴潮模式之前身為國際知名之海嘯模式 COMCOT (Cornell Mutli-grid Coupled Tsunami Model)，導過颱風氣象力（氣壓梯度力及風剪力）之加入，使模式具備以非線性之淺水波方程式計算並分析風暴潮生成、傳播以及近岸溯上之完整歷程。

COMCOT 暴潮模式之特點如下：

1. 可同時求解卡氏座標 (Cartesian Coordinate) 與球座標 (Spherical Coordinate) 系統下之淺水波傳遞過程。
2. 結合線性與非線性之淺水波方程式。海嘯波為標準之淺水波，因此適合以淺水波方程式描述。其中，深海地區適用線性淺水波方程式，而當海嘯波傳遞至近海或上岸後則適用非線性淺水波方程式。
3. 具備移動邊界法 (Moving Boundary Scheme)，可處理海嘯波上溯時之乾濕邊界之問題，並以非線性淺水波方程式同時計算溢淹範圍 (Inundation Range)。
4. 具有動態連結之巢狀網格系統，可同時計算不同尺度下之海嘯波傳遞。
5. 隨著計算機之蓬勃發展，數值模式之執行效能也相對應地獲得提升，但許多從 1990 年代即開始發展之數值模式，因其原始程式碼之限制，使得計算機之效能無法獲得發揮。特別是對於一般單一執行緒 (Single Thread) 之數值程式，多核心之處理器並沒有辦法提升它的處理效能。

OpenMp (Open Multi-Processing) 提供多執行緒之編程，能使用單台機器不同核心之不同執行緒 (multi thread) 達到加速之效果，將迴圈中所需之計算量分配於不同執行緒中，將可完全發揮計算機之效能，而且程式修改後可於單台計算機中獨立運作，避免多台機器彼此交換資料之時間消耗，同時適用於預報模式之開發。

本研究所使用之 COMCOT 暴潮模式與中央研究院網格與科學計算中心（Grid and Scientific Computing Center, Academia Sinica）合作後，修改 COMCOT 模式使其具備單機高速平行之計算效能，其速度為原始版本速度之 10 倍以上，因此被中央氣象局採用，為目前官方暴潮預報模式之一。

風暴潮（Storm Surge）與海嘯波（Tsunami Wave）相同，波長遠大於海水深度，因此在深海區域中可視為淺水波（Shallow Water Wave）。至於判斷是否為淺水波，則由頻散係數（Dispersion Coefficient）所決定，其定義為水深除以波長，若其值小於 1/20，則視為淺水波，其值若大於 1/2，則視為深水波（Deep Water Wave），其值介於兩者中間者，則視為中間波（Intermediate Depth Wave）。頻散係數如下所列：

$$\mu = \frac{h}{L} \quad (\text{式 3-1})$$

其中， μ 為頻散係數， h 為海水深度， L 為波長。

當風暴潮之振幅遠小於海水深度時，可以微小振幅波理論（Small Amplitude Wave Theory）進行假設，忽略非線性之對流項（Convective Term）部分，此線性理論僅於海水深度深且風暴潮振幅小時成立。當風暴潮傳遞至近岸後，非線性強度（Nonlinearity）增加，且其值超過 0.1 時，線性淺水波方程將不再適合，必須改以非線性淺水波方程式描述風暴潮傳遞及近岸溯上過程。非線性強度如下所列：

$$\varepsilon = \frac{A}{h} \quad (\text{式 3-2})$$

其中， ε 為非線性強度， h 為海水深度， A 為振幅。

線性淺水波方程式

當風暴潮振幅相對於海水深度很小時，可以微小振幅波理論（Small Amplitude Wave Theory）進行假設，忽略非線性之對流項部分；海水深度較深時，底部摩擦（Bottom Friction）也可以忽略不計。COMCOT 風暴潮模式與原始 COMCOT 海嘯模式不同之處，在於統御方程式中加入了颱風氣象力之影響，可由氣壓梯度項（Pressure Gradient Term）和風剪力項（Wind Shear Stress Term）等來描述風暴潮之傳遞行為。

因此，卡氏座標之線性淺水波中連續方程式（Continuity Equation）及動量方程式（Momentum Equation）分別如下述所列：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (\text{式 3-3})$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{H}{\rho_w} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{F_x^s}{\rho_w} \quad (\text{式 3-4})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\frac{H}{\rho_w} \frac{\partial P_a}{\partial y} + \frac{F_y^s}{\rho_w} \quad (\text{式 3-5})$$

其中， t 為時間， P, Q 分別為 x, y 方向之體積通量（Volume Flux）， η 為自由液面高程， h 為靜水深， H 為總水深（ $H = h + \eta$ ）， F_x^s, F_y^s 分別為 x, y 方向之風剪力， g 為重力加速度， ρ_w 為海水密度及 P_a 為大氣氣壓。

球座標系統下，必須額外考慮地球之科氏力與不同緯度之距離變化影響，因此，球座標之線性淺水波中連續方程式（Continuity Equation）及動量方程式（Momentum Equation）分別如下述所列：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi \cdot Q) \right\} = 0 \quad (\text{式 3-6})$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ = -\frac{H}{\rho_w R \cos \psi} \frac{\partial P_a}{\partial \psi} + \frac{F_\psi^s}{\rho_w} \quad (\text{式 3-7})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fP = -\frac{H}{\rho_w R} \frac{\partial P_a}{\partial \varphi} + \frac{F_\varphi^s}{\rho_w} \quad (\text{式 3-8})$$

其中， t 為時間， φ 為緯度， ψ 經度， P, Q 為體積通量， η 為自由液面高程， h 為靜水深， H 為總水深， R 為地球半徑， f 為科氏力係數， F_ψ^s, F_φ^s 為風剪力， ρ_w 為海水密度及 P_a 為大氣氣壓。

非線性淺水波方程式

當風暴潮傳遞至近岸，水深變淺且波長變短時，風暴潮高度增加，非線性強度增強，此時，非線性對流項以及底床摩擦對風暴潮影響增大，必須列入考慮，非線性淺水波方程式較適用。

卡座標系統下之非線性淺水波方程式，受限於區域性範圍，因此忽略科氏力之影響，其連續方程式(Continuity Equation)及動量方程式(Momentum Equation)分別如下述所列：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} = 0 \quad (\text{式 3-9})$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{H} \right) + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + F_x = -\frac{H}{\rho_w} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{F_x^s}{\rho_w} \quad (\text{式 3-10})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + F_y = -\frac{H}{\rho_w} \frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{F_y^s}{\rho_w} \quad (\text{式 3-11})$$

其中， t 為時間， P, Q 分別為 x, y 方向之體積通量 (Volume Flux)， η 為自由液面高程， h 為靜水深， H 為總水深 ($H = h + \eta$)， F_x^s, F_y^s 分別為 x, y 方向之風剪力， F_x, F_y 分別為 x, y 方向之底床摩擦剪應力， g 為重力加速度， ρ_w 為海水密度及 P_a 為大氣氣壓。

球座標之非線性淺水波中連續方程式 (Continuity Equation) 及動量方程式 (Momentum Equation)，必須額外考慮地球之科氏力與不同緯度之距離變化影響，分別如下述所列：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi \cdot Q) \right\} = 0 \quad (\text{式 3-12})$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{PQ}{H} \right) \\ & + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ + F_{\psi}^b = - \frac{H}{\rho_w R \cos \varphi} \frac{\partial P_a}{\partial \psi} + \frac{F_{\psi}^s}{\rho_w} \end{aligned} \quad (\text{式 3-13})$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{Q^2}{H} \right) \\ & + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fP + F_{\varphi}^b = - \frac{H}{\rho_w R} \frac{\partial P_a}{\partial \psi} + \frac{F_{\varphi}^s}{\rho_w} \end{aligned} \quad (\text{式 3-14})$$

其中， t 為時間， φ 為緯度， ψ 經度， P, Q 為體積通量， η 為自由液面高程， h 為靜水深， H 為總水深 ($H = h + \eta$)， R 為地球半徑， f 為科氏力係數， $F_{\psi}^s, F_{\varphi}^s$ 為風剪力， F_x, F_y 分別為底床摩擦剪應力， ρ_w 為海水密度及 P_a 為大氣氣壓。

模式中之底床摩擦剪應力以曼寧公式 (Manning's Formula) 假設，可表示為：

$$F_x = \frac{gn^2}{H^{\frac{7}{3}}} P \sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad (\text{式 3-15})$$

$$F_y = \frac{gn^2}{H^{\frac{7}{3}}} Q \sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad (\text{式 3-16})$$

其中， n 為曼寧粗糙係數 (Manning's Roughness Coefficient)，為一經驗常數，由流體所通過之不同底床所決定。

3.2. 颱風大氣模式

Holland Model 參數化颱風模式

根據 Holland (1980) 所提出的理想風場之氣壓模式為：

$$P_a = P_c + (P_n - P_c) \exp \left[- \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^B \right] \quad (\text{式 3-17})$$

式中， P_c 為颱風中心之大氣氣壓、 $R_{\max}$ 為最大暴風半徑、 B 為峰值參數 (peakness parameter) 和 P_n 為環境大氣氣壓 (ambient pressure)。

$$V_w = \sqrt{\frac{B(P_n - P_c) \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^B \exp \left[- \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^B \right] + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{rf}{2}} \quad (\text{式 3-18})$$

式中， V_w 為風速、 P_c 為風暴中心之大氣氣壓、 $R_{\max}$ 為最大暴風半徑、 B 為峰值參數 (peakness parameter)、 f 為科氏力、 ρ_a 為空氣密度 r 為距暴風中心半徑和 P_n 為環境大氣氣壓 (ambient pressure)。

Harper 與 Holland (1999) 建議峰值參數 B 值的經驗關係如下：

$$B = 2 - \frac{P_c - 900}{160} \quad (\text{式 3-19})$$

氣象局所提供資訊為七級風半徑和近中心最大風速，需經轉換成為最大暴風半徑 (Radius of Maximum Wind)，公式如下：

$$R_{\max} = R_7 \cdot \left(\frac{V_7}{V_{\max}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{式 3-20})$$

其中， $R_{\max}$ 為最大暴風半徑、 $V_{\max}$ 為近中心最大風速、 R_7 為七級風半徑、 V_7 為七級風風速。

CWB Model 參數化大氣模式

臺灣本島地勢起伏差異大，其颱風結構往往易受高山地形影響，風場和氣壓場隨之改變，目前使用之 Holland Model 參數化公式，於臺灣區域之適用性仍有待評估，因此參考氣象局所發展之參數化公式，冀望找出適用於臺灣近海區域之參數化公式。由氣象局所提供之大氣氣壓公式：

$$P_a = P_c + (P_n - P_c) \exp\left[-\left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^B\right] \quad (\text{式 3-21})$$

其中， P_c 為颱風中心之大氣氣壓、 R_w 為最大暴風半徑、 B 為峰值參數（peakness parameter）和 P_n 為環境大氣氣壓（ambient pressure）。建議峰值參數 B 值的經驗關係如下：

$$B = \frac{1}{P_n - P_c} \left(\frac{V_{\max}}{5.375}\right)^2 \quad (\text{式 3-22})$$

最大暴風半徑 $R_{\max}$ 則依據颱風中心氣壓而有相對應值，如下：

$$R_{\max} = \begin{cases} 42.6 - 0.86 \cdot (P_c - 990) & P_c \geq 990 \\ 51.0 - 0.84 \cdot (P_c - 980) & 980 \leq P_c < 990 \\ 58.4 - 0.74 \cdot (P_c - 970) & 970 \leq P_c < 980 \\ 63.0 - 0.46 \cdot (P_c - 960) & 960 \leq P_c < 970 \\ 70.0 - 0.234 \cdot (P_c - 930) & 930 \leq P_c < 960 \\ 80.0 - 0.167 \cdot (P_c - 870) & 870 \leq P_c < 930 \\ 80.0 & P_c < 870 \end{cases} \quad (\text{式 3-23})$$

其中，最大暴風半徑 $R_{\max}$ 單位為公里， P_c 單位為毫巴。由氣象局所定義之理想風場為：

$$V_w = 2 \cdot V_{\max} \cdot \frac{R_{\max} \cdot r}{R_{\max}^2 + r^2} \quad (\text{式 3-24})$$

其中 $V_{\max}$ 為最近中心最大風速、 $R_{\max}$ 為最大暴風半徑、 r 為距暴風中心半徑。

風剪力和風阻力係數

目前由模式所計算的風剪力所產生的暴潮偏差分量的大小與風剪力的計算，可採用 Smith 與 Banke (1975) 所建議之公式，為：

$$F^s = \rho_a C_d |\overline{V}_w| \overline{V}_w \quad (\text{式 3-25})$$

其中， $\overline{V}_w$ 為平面上 10 公尺處風速、 ρ_a 為空氣密度、 C_d 為剪力係數 (Drag Coefficient)。 C_d 的值將隨不同 $|\overline{V}_w|$ 值而改變 (Large 與 Pond, 1981, Powell, 2003)，如下：

$$10^3 C_d = \begin{cases} 2.16 & |\overline{V}_w| \geq 26 \text{ms}^{-1} \\ 0.49 + 0.065 |\overline{V}_w| & 10 \text{ms}^{-1} \leq |\overline{V}_w| < 26 \text{ms}^{-1} \\ 1.14 & 3 \text{ms}^{-1} \leq |\overline{V}_w| < 10 \text{ms}^{-1} \\ 0.62 + \frac{1.56}{|\overline{V}_w|} & 1 \text{ms}^{-1} \leq |\overline{V}_w| < 3 \text{ms}^{-1} \\ 2.18 & |\overline{V}_w| < 1 \text{ms}^{-1} \end{cases} \quad (\text{式 3-26})$$

理想風場之風場向量為對稱風場型式，公式如下：

$$\begin{aligned} V_{wx} &= V_w \cdot \cos(\theta + 90^\circ) \\ V_{wy} &= V_w \cdot \sin(\theta + 90^\circ) \end{aligned} \quad (\text{式 3-27})$$

其中， V_x 和 V_y 為網格點 x 方向和 y 方向分量， θ 為網格點與颱風中心之交角。

颱風緩慢移動條件下，會造成風場之不對稱性，可透過颱風移動速度對風場向量進行修改。最大暴風半徑內，風場向量修正如下：

$$\begin{aligned} V_{wx} &= V_{wx} + U_{storm} \times \frac{r}{r + R_{\max}} \\ V_{wy} &= V_{wy} + V_{storm} \times \frac{r}{r + R_{\max}} \end{aligned} \quad (\text{式 3-28})$$

最大暴風半徑外，風場向量修正如下：

$$V_{wx} = V_{wx} + U_{storm} \times \frac{R_{max}}{r + R_{max}}$$

$$V_{wy} = V_{wy} + V_{storm} \times \frac{R_{max}}{r + R_{max}}$$

(式 3-29)

3.3. 地形與網格設置

本研究為完整涵蓋颱風之生命週期，即颱風微弱之熱帶性低氣壓之「發生期」，威力漸增之「發展期」，颱風中心氣壓最低，風速最強之「極盛期」，乃至颱風威力漸弱之「衰弱期」都涵蓋在內，因此選用大範圍之計算域；當風暴潮傳遞至沿海地區時，與潮汐產生非線性之交互作用以及地形深淺所造成之折射效應，應當使用較小範圍之計算域進行模擬，並以此計算域導入潮汐效應；風暴潮受氣象力影響，使得海水位較原本潮汐水位更高，適逢高潮或漲潮時，海水將越過海岸線溢淹上岸，導致海水倒灌。

本研究目前以中央氣象局現採用之 COMCOT 暴潮預報模式為基礎，發展暴潮系集預報模式，其預報作業所採用之網格為 2 層巢狀網格，可見於圖 3—1；圖 3—1（左）為現 COMCOT 風暴潮預報模式 LAYER 01 之計算範圍，範圍為介於東經 110 度到東經 134 度及北緯 10 度到北緯 35 度；在此模擬區域中，台灣東部地帶為太平洋海域，水深較深，平均深度約為 5000 公尺，西部介於中國大陸與台灣之間的台灣海峽為近岸地區，水深較淺，平均水深約在 80 公尺左右。地形資料取自 ETOPO 1 並外插之結果，網格間距為 4 弧分，網格解析度約為 8 公里；圖 3—1（右）為現 COMCOT 暴潮模式 LAYER 02 之計算範圍，該範圍區分為 4 個不同之區域，編號由 A 區至 D 區，並且依據不同海岸線和島嶼地形調整個別之解析度，臺灣本島區為 A 區，解析度均為 1 弧分，約為 2 公里；非臺灣本島之澎湖、金門和馬祖編號為 B 區、C 區和 D 區，解析度為 0.5 弧分，約為 1 公里，上述地形分別使用 ETOPO 1 和 GEBCO 地形。

表 3—1 列出目前 COMCOT 暴潮系集模式採預報用途時之相對應網格編號計算域範圍和解析度。

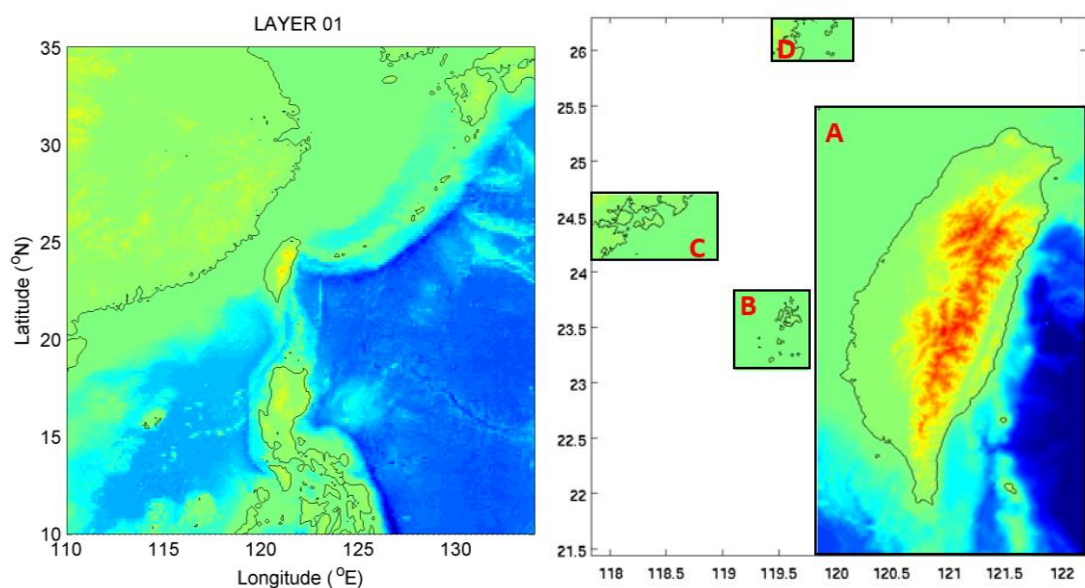


圖 3—1（左）現中央氣象局採用之 COMCOT 風暴潮溢淹模式第一層巢狀網格計算域，範圍東經 110 度至 134 度，北緯 10 度至 35 度，解析度為 4 弧分（8 公里），資料來源為 ETOPO 1。（右）現中央氣象局採用之 COMCOT 風暴潮溢淹模式第二層巢狀網格計算域，並區分為 4 個不同區域，編號分別為 A 至 D。

表 3—1 現中央氣象局採用之 COMCOT 暴潮溢淹預報模式
計算域網格範圍與解析度

計算網格編號	經度方向範圍 (°E)	緯度方向範圍 (°N)	解析度
01	110.00 – 134.00	10.00 – 35.00	4 弧分（約 8 公里）
02-A	119.80 - 122.25	21.40 - 25.50	1 弧分（約 2 公里）
02-B	119.09 - 119.80	23.05 - 23.89	0.5 弧分（約 1 公里）
02-C	117.80 - 118.99	24.09 - 24.70	0.5 弧分（約 1 公里）
02-D	119.39 - 120.19	25.84 - 26.35	0.5 弧分（約 1 公里）

3.4. 暴潮模式指定預報潮位站

為研究台灣近岸海域之風暴潮歷時記錄，根據氣象局海象測報中心所提供之實際潮位站資訊，於本研究所開發之暴潮系集預報模式中分別設置 34 處數值潮位計（Numerical Tide Gauge），可輸出風暴潮模式中各時間步所模擬之風暴潮、氣壓值和風速值等歷時資料。

圖 3—2 表示數值潮位計之設置圖，顏色表示地形高程，紅色三角形表示數值潮位計之位置。

表 3—2 為氣象局所提供 34 處潮位站中之編號、潮位站名稱、代碼、英文名稱以及經緯度座標等資訊。

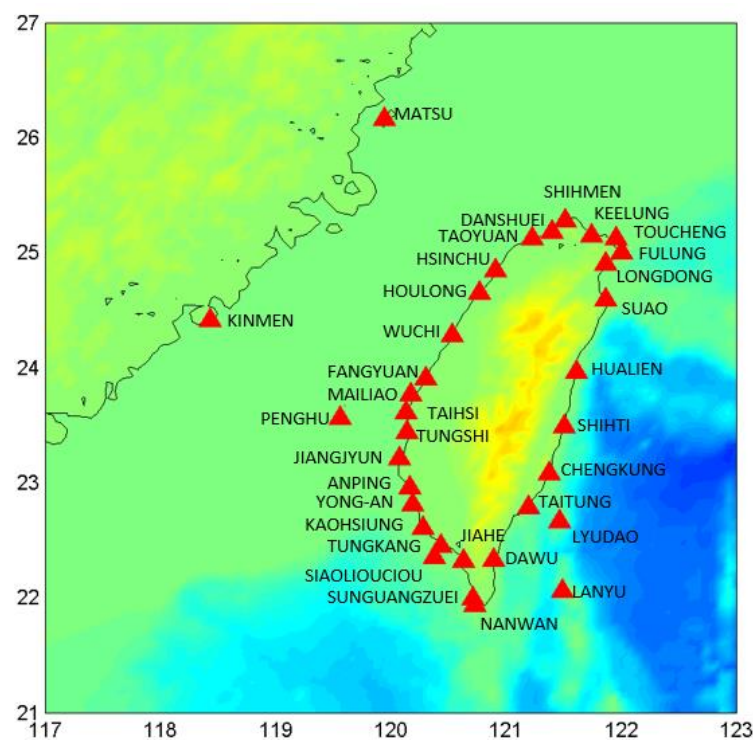


圖 3—2 34 處指定預報潮位站分布。

表 3—2 34 處指定預報潮位站資訊

編號	對應潮位測站	潮位站代碼	英文名稱	經度	緯度
1	龍洞	1226	LONGDONG	121.95	25.12
2	基隆	1516	KEELUNG	121.75	25.16
3	福隆	1821	FULONG	121..95	25.02
4	頭城	1236	TOUCHENG	121.86	24.90
5	蘇澳	1246	SUAO	121.86	24.59
6	花蓮	1256	HUALIEN	121.61	23.96
7	石梯	1566	SHITI	121.50	23.49
8	成功	1276	CHENGKUNG	121.37	23.08
9	台東	1586	TAITUNG	121.19	22.79
10	大武	1596	DAWU	120.89	22.33
11	綠島	1676	LUDAO	121.46	22.66
12	蘭嶼	1396	LANYU	121.49	22.06
13	石門	1206	SHIHMEN	121.51	25.28
14	淡水	1102	DANSHUEI	121.42	25.18
15	桃園	1116	TAOYUAN	121.23	25.12
16	新竹	112	HSINCHU	120.91	24.85
17	後龍	113	HOULONG	120.77	24.65
18	梧棲	1436	WUCHI	120.53	24.29
19	芳苑	1446	FANGYUAN	120.30	23.91
20	麥寮	1456	MAILIAO	120.16	23.79
21	台西	1156	TAISI	120.14	23.62
22	東石	1162	TUNGSHI	120.14	23.44
23	將軍	1176	JIANGJUN	120.08	23.21
24	安平	1471	ANPING	120.18	22.98
25	永安	1786	YONGAN	120.20	22.82
26	高雄	1486	KAOHSIUNG	120.29	22.61
27	東港	1186	TUNGKANG	120.44	22.46
28	嘉和	N/A (9999)	JIAHE	120.63	22.32
29	蟬廣嘴	1496	SUNGUANGZUEI	120.71	21.99
30	南灣	1196	NANWAN	120.75	21.95
31	小琉球	1386	SIAOLIOUCHIOU	120.38	22.35
32	澎湖	1356	PENGHU	119.58	23.56
33	金門	1956	KINMEN	118.43	24.41
34	馬祖	1926	MATSU	119.94	26.16

3.5. TPXO 天文潮模式結合

TPXO 天文潮模式由俄勒岡州立大學 (Oregon State University, OSU) 所研發建置，是以拉普拉斯潮汐方程式 (Laplace's tidal equations) 搭配水位測高數據 (altimetry data) 及最小平方法 (least squares method) 所得之全球海洋潮汐模式。對於平均厚度為 D 的流體薄片，垂直方向的潮汐水位 ζ ，水平速度分量 u 、 v (分別位於緯度 φ 與經度 λ 方向)，拉普拉斯潮汐方程式可以表示如下：

$$\begin{aligned}\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{a \cos(\varphi)} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} (uD) + \frac{\partial}{\partial \varphi} (uD \cos(\varphi)) \right] &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} - v(2\Omega \sin(\varphi)) + \frac{1}{a \cos(\varphi)} \frac{\partial}{\partial \lambda} (g\zeta + U) &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u(2\Omega \sin(\varphi)) + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} (g\zeta + U) &= 0\end{aligned}$$

其中， Ω 為行星旋轉的角頻率、 g 為行星在平均海表面作用的重力加速度、 a 為行星半徑、 U 為外部重力位能。模式中考慮八個主要分潮位 (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1)、兩個長週期分潮位 (Mf, Mm) 和 3 個非線性分潮位 (M4, MS4, MN4)，以 0.25 弧分之解析度進行運算 (Dushaw et al., 1997)；本研究所採用之 COMCOT 暴潮模式之潮汐邊界條件，均由 TPXO 天文潮模式所提供，目前採用版本為 8.0 版。

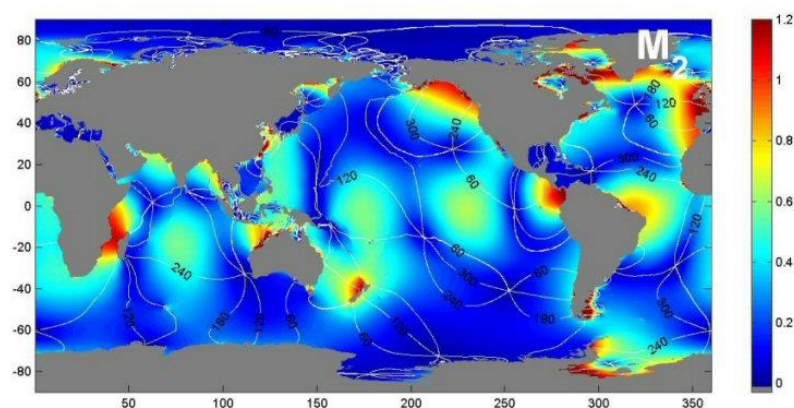


圖 3—3 全球潮汐模式 TPXO 模式示意圖 (TPXO 官網)

3.6. 暴潮系集預報成員產出方法—誤差機率分布法

氣象局現有作業化之 COMCOT 暴潮預報模式中，可以選用參數化氣象場或 TWRF 氣象場作為颱風輸入條件。若選擇採用理想風場，便需要颱風路徑、颱風中心氣壓、七級風半徑、最大風速之時間序列以計算颱風氣象環境隨時間變化情形，且以上資訊皆可透過氣象局所發布之颱風警報單取得。其中，海上颱風警報之發布時機為預測颱風之 7 級風暴風範圍可能侵襲臺灣本島或澎湖、金門、馬祖 100 公里以內海域時之前 24 小時，陸上颱風警報之發布時機為預測颱風之 7 級風暴風範圍可能侵襲臺灣本島或澎湖、金門、馬祖陸上之前 18 小時。颱風警報發布期間，發布時間間隔為三小時一筆。

美國 NOAA 的暴潮機率預報系統 (Probabilistic Hurricane Storm Surge Model, P-surge) 即是採用類似的方式。為了創建一個假想的暴潮系集成員組合，P-surge 需要美國國家颶風中心 (National Hurricane Center, NHC) 預報各項相關參數的誤差分佈以及建議路徑。Taylor 等人 (2008) 提出垂直於颱風運動之路徑誤差 (cross-track error)、沿著颱風運動之路徑誤差 (along-track error) 及強度誤差，並假設這些誤差為常態分佈，以計算三項參數組合而成的颱風路徑系集成員。透過分析過去幾年颱風預報的平均誤差，將 NHC 建議路徑作為參考，利用誤差分佈函數將單一建議路徑分散為涵蓋重點區域、颱風登陸點皆不相同的多條路徑，並產生相關系集預報產品。

台灣曾統計颱風預報路徑誤差者，有鄭等人 (2016) 提出 TWRF 颱風數值預報系統的之 24/48/72 小時颱風路徑預報誤差分佈，依據颱風真實路徑計算所得。根據鄭等人 (2016)，TWRF 在 2013 年、2014 年、2015 年之 24/48/72 小時颱風路徑預報誤差分別為 91/152/210、91/147/223、84/133/197 公里，已具有不錯之預測技術。2016 年，TWRF 之水平解析度更將由 45/15/5 公里提高為 15/3 公里，該研究針對 2015 年 10 個颱風共 166 個案進行測試，24/48/72 小時颱風路徑預報誤差為 60/106/170 公里。鄭等人 (2016) 針對 TWRF 颱風路徑之預報誤

差不同於 Taylor 等人(2008),對於垂直於颱風運動之路徑誤差(cross-track error)及沿著颱風運動之路徑誤差(along-track error)並無分量敘述。曾涉及路徑誤差分量統計的研究,有李(1988)、葉等人(1998)對於台灣附近地區颱風路徑之預報分析提出之預報誤差以及標準差數據,且葉等人(1998)亦提出統計方法之應用,但兩者對於路徑預報誤差以及標準差的研究紀錄分別止於1987年及1995年,若能取得近年颱風預報路徑資料,則可透過類似前人之前就方法計算並取得垂直於颱風運動之路徑誤差(cross-track error)及沿著颱風運動之路徑誤差(along-track error),以及路徑標準差以求得路徑誤差機率分布。於颱風強度預報方面,黃與呂(2007)曾經針對JTWC及JMA之颱風強度比較及統計預報校驗進行相關分析,而針對台灣颱風強度預報誤差之相關研究,鮮少針對過往預報誤差進行統計分析。

本研究取得自2015年起至2020年止之颱風警報單紀錄,以及颱風資料庫內相同時間區段內之颱風最佳資料。兩者皆存有颱風預報路徑、颱風中心氣壓、七級風半徑及近中心最大風速等資料,其中颱風警報單發布時間間隔為三小時一筆,預報發布總時長可達120小時,其中前72小時預報資料點以12小時為間隔。

從資料推算所得之颱風參數誤差分布如圖3—4至圖3—7所示,由左至右依據為預報第12、24、36、48小時之誤差分布情形。圖中灰色條狀圖顯示所得誤差樣本分布,橫軸為誤差值,圖3—5中單位為公里,圖3—5中單位為百帕,圖3—6單位為公里,圖3—7中單位為公尺/秒;縱軸依機率密度函數繪製分布。

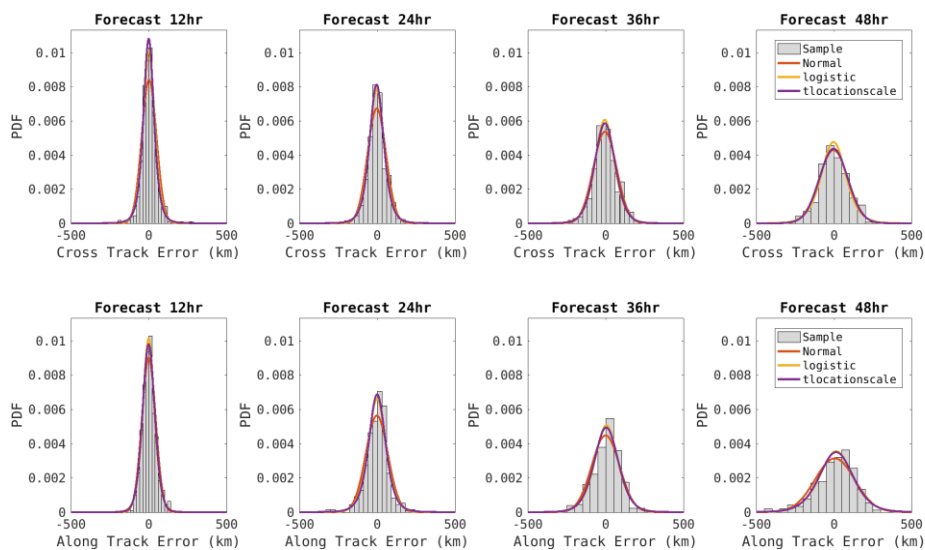


圖 3—4 颱風預報路徑誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。
上排為垂直路徑誤差、下排為平行路徑誤差。

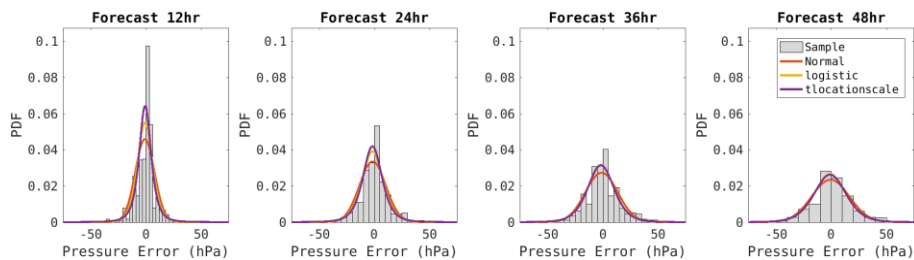


圖 3—5 颱風預報氣壓值誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。

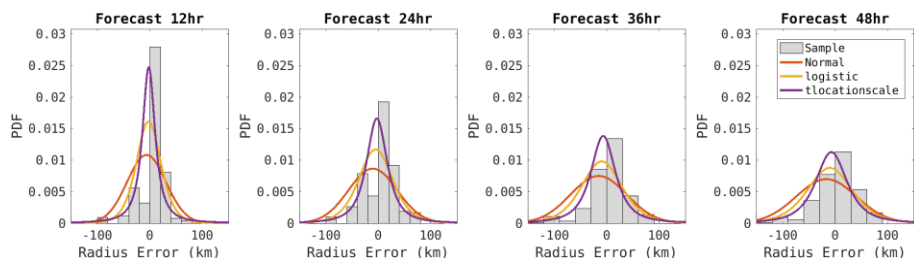


圖 3—6 颱風預報七級風半徑誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。

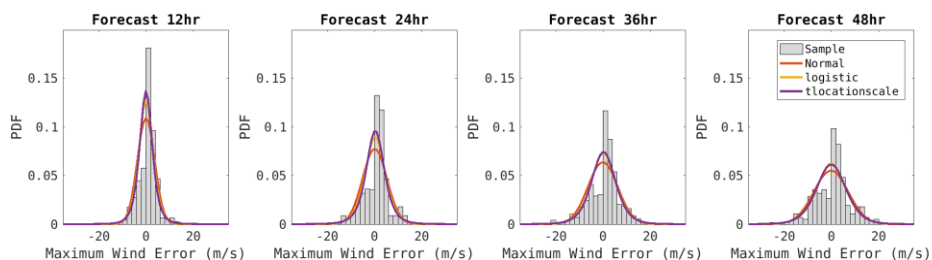


圖 3—7 颱風預報近中心最大風速誤差分布及各項機率密度函數擬合資料情形。

在取得樣本分布之後，我們可以透過不同的機率密度函數(Probability density function)擬合樣本分布情形，取得颱風參數誤差的機率分布。本研究選中選用常態分佈 (Normal Distribution，又名高斯分布，Gaussian Distribution)、羅吉斯分布 (Logistic Distribution) 及 t 位置尺度分布 (t Location-Scale Distribution) 三種機率密度分布函數，並比較三者中何者較為符合現有颱風預報參數誤差樣本分布情形，決定何者作為後續產生暴潮系集預報成員的依據。

其中，常態分佈 (Normal Distribution) 被相當廣泛的運用，常態分布有兩個參數，分別為位置參數 (location) μ 、尺度參數 (scale) σ 。其機率密度函數可以表示如下式：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{式 3-30})$$

羅吉斯分布 (Logistic Distribution) 具有比常態分佈更長的尾部和更高的峰度 (kurtosis)，具有兩個參數，分別為位置參數 (location) μ 及尺度參數 (scale) σ ，其機率密度函數可以表示如下式：

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{e^{\frac{(x-\mu)}{\sigma}}}{\sigma \left(1 + e^{\frac{(x-\mu)}{\sigma}}\right)^2}, \begin{cases} -\infty < x < \infty \\ -\infty < \mu < \infty \\ \sigma \geq 0 \end{cases} \quad (\text{式 3-31})$$

T 位置尺度分布 (T Location-Scale Distribution) 通常適用於比常態分佈更容易出現異常值的資料分佈情形，亦適用於根據小樣本來估計呈常態分布且變異數 (Variance) 未知的母體均值。T 位置尺度分布有三個參數，分別為位置參數 (location) μ 、尺度參數 (scale) σ 及形狀參數 (shape) ν 。當 ν 接近無窮大時，t 位置尺度分布接近常態分佈，而較小的 ν 值產生較重的尾部。T 位置尺度分布之機率密度函數可以表示如下式：

$$\frac{\Gamma(\frac{\nu+1}{2})}{\sigma\sqrt{\nu\pi}\Gamma(\frac{\nu}{2})} \left[\frac{\nu + \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}{\nu} \right]^{-\frac{\nu+1}{2}}, \begin{cases} \Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt \\ -\infty < \mu < \infty \\ \sigma > 0 \\ \nu > 0 \end{cases} \quad (\text{式 3-32})$$

三種機率密度分布函數擬合颱風預報參數誤差樣本後所得之圖形分布如圖 3—4 至圖 3—7 所示。其中，紅色曲線為常態分佈、桃紅色表示羅吉斯分布 (Logistic Distribution)、藍色線為 T 位置尺度分布(t Location-Scale Distribution)。從圖中可以看出，於所有樣本分布情形中，常態分佈機率密度函數擬合峰值時皆有比羅吉斯分布及 T 位置尺度分布低，且曲線鐘形分布較另二者寬的情形。羅吉斯分布與 T 位置尺度分布於大部分樣本分類中，擬合圖形相近，且 T 位置尺度分布峰值皆大於或等於羅吉斯分布曲線峰值，繪製圖 3—4 至圖 3—7 中各項機率密度函數分布曲線所需之參數詳列於表 3—3。

為求選取系集成員的方式統一，後續研究皆採取 T 位置尺度分布之機率密度分布函數作為產生系集預報路徑成員之依據。透過均分機率密度分布函數曲線下面積為數等分，可以得到橫軸上相對應點作為誤差分布之參考成員，示意圖如圖 3—8。為保持誤差成員於機率密布分布曲線峰值處有代表值，研究中於切割曲線下面積時皆平分為偶數份，以機率密度曲線下面積切割為 N 等分時，可於曲線下得到 N+1 個端點，以代表所產生之系集成員所對應之誤差組成。

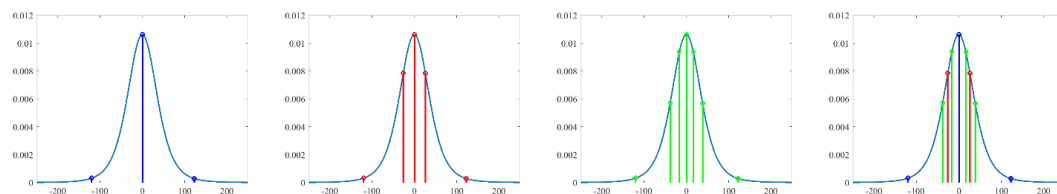


圖 3—8 機率密度分布函數產生系集預報路徑成員之示意圖。

圖左一左三為依序將曲線下面積均分為二、四、六等分，最右圖為自圖左一左三中產生之無重複之系集成員分布。

表 3—3 重建各項機率密度函數分布曲線所需之參數

誤差 種類	預 報 小 時	Normal Distribution		Logistic Distribution		T Location-scale Distribution		
參數		μ	σ	μ	σ	μ	σ	ν
垂直 路徑 誤差 (CTE)	12	2.588	47.458	1.404	24.831	0.000	34.798	4.220
	24	-2.564	59.366	-3.350	31.915	-3.526	46.715	5.039
	36	-4.470	74.335	-5.608	41.215	-4.985	66.362	9.623
	48	-1.699	93.067	-2.288	52.490	-1.686	90.902	46.718
平行 路徑 誤差 (ATE)	12	0.408	44.343	-0.683	24.655	-0.413	39.710	9.956
	24	-2.285	70.817	-0.588	37.844	-0.211	55.290	5.057
	36	0.052	89.040	4.956	49.355	4.077	78.602	8.995
	48	6.371	127.278	15.611	70.365	14.860	110.509	8.003
氣壓 誤差	12	-0.752	8.707	-0.626	4.545	-0.511	5.694	2.922
	24	-1.410	11.910	-1.538	6.399	-1.559	8.962	4.105
	36	-0.942	14.631	-1.559	8.004	-1.629	12.157	6.089
	48	-0.489	17.037	-0.948	9.389	-0.936	14.748	7.674
七級風 半徑 誤差	12	-5.864	36.956	-1.943	15.553	-1.634	13.672	1.418
	24	-9.954	46.232	-4.702	21.418	-2.342	21.269	1.953
	36	-15.015	53.398	-9.244	25.580	-6.420	25.530	1.942
	48	-16.464	57.299	-9.942	28.603	-6.978	31.939	2.315
近中心 最大 風速 誤差	12	0.134	3.664	0.128	1.962	0.122	2.748	4.117
	24	0.241	5.168	0.405	2.794	0.475	3.908	4.066
	36	0.085	6.280	0.345	3.426	0.380	5.156	5.779
	48	-0.025	7.266	0.073	4.005	0.054	6.319	7.940

若將機率密度函數曲線下面積平分為兩等分，則可於座標橫軸得到極左、極右和中間之誤差值，意即得到三個誤差成員。圖 3—8 由左一至左三依序將曲線下面積切割為二、四、六等分，分別得到三、五、七組成員分布，扣除重複者後留下的成員如最右圖所示，共計九組成員，所得之新增誤差成員值詳列於表 3—4。表中路徑誤差之正負符號表示相對於觀測位置的方向，於垂直路徑誤差中，以觀測位置右側為正，左側為負；平行路徑誤差中，以觀測位置前方為正，後方為負。氣壓、七級風半徑、近中心最大風速等誤差之正負符號表是相對於觀測值

的參數調整，正號為增加，負號為減少。

表 3—4 切割 T 位置尺度分布曲線下面積所得之誤差成員分布情形

誤差類別	預報小時	面積均分數								
		2			4		6			
垂直路徑誤差 CTE (km)	12	0.0	-126.7	126.7	-25.6	25.6	-38.0	-16.1	16.1	38.0
	24	-3.5	-160.2	153.2	-37.5	30.4	-53.5	-24.9	17.8	46.4
	36	-5.0	-189.7	179.8	-51.5	41.5	-72.6	-34.5	24.5	62.6
	48	-1.7	-220.7	217.3	-63.5	60.1	-90.5	-41.1	37.7	87.2
平行路徑誤差 ATE (km)	12	-0.4	-110.3	109.4	-28.2	27.4	-40.8	-18.0	17.2	40.0
	24	-0.2	-185.4	185.0	-40.4	39.9	-59.3	-25.5	25.1	58.9
	36	4.1	-217.7	225.9	-51.2	59.3	-76.3	-30.9	39.1	84.4
	48	14.9	-305.1	335.0	-63.2	92.9	-98.9	-34.5	64.3	128.6
氣壓誤差	12	-0.5	-26.9	25.9	-4.9	3.9	-7.1	-3.2	2.2	6.1
	24	-1.6	-34.7	31.6	-8.2	5.1	-11.4	-5.7	2.6	8.3
	36	-1.6	-39.7	36.4	-10.3	7.1	-14.4	-7.1	3.9	11.1
	48	-0.9	-44.1	42.2	-11.4	9.5	-16.2	-7.5	5.7	14.3
七級風半徑	12	-1.6	-163.9	181.0	-13.7	10.5	-21.1	-8.8	5.7	18.0
	24	-2.3	-153.4	153.0	-19.8	15.1	-29.4	-13.0	8.3	24.8
	36	-6.4	-187.9	182.7	-27.3	14.6	-38.9	-19.2	6.4	26.2
	48	-7.0	-190.8	180.5	-32.3	18.4	-45.8	-22.6	8.7	31.9
近中心最大風速	12	0.1	-10.0	10.3	-1.9	2.2	-2.9	-1.2	1.4	3.1
	24	0.5	-14.0	15.0	-2.4	3.4	-3.8	-1.3	2.3	4.8
	36	0.4	-16.0	16.8	-3.3	4.1	-5.1	-2.0	2.7	5.8
	48	0.1	-18.3	18.4	-4.4	4.5	-6.5	-2.8	2.9	6.6

在利用過往預報誤差之機率分布取得系集成員路徑偏移的參考之後，便可以於後續實際預報作業中，依據將颱風警報單（即決定性預報）及事先取得之預報誤差之機率分布曲線，搭配不同的誤差成員組合產生系集成員路徑。本研究將會採用歷史個案搭配不同颱風參數的誤差成員進行分析，以比較各項參數對颱風系集預報結果所產生的影響。預報產品示意圖與各項颱風參數產生之系集成員組合對於系集預報產品的影響將以 2019 年颱風白鹿(BAILU)作為範例進行展示。

第四章、系集預報成員分析與比較—2019 年颱風白鹿

本研究於章節 3.6 發展颱風強度系集成員以誤差機率法產出的方法，於本章節中，選用近年有登陸台灣本島紀錄之 2019 年颱風白鹿作為分析不同系集成員組合對系集預報產品影響的研究分析案例。本次分析選用該颱風案例於登陸台灣前 24 小時的颱風警報作為示範模擬案例，以期能夠在模擬期間觀察到登陸區域較完整之暴潮水位起伏歷線。

研究中定義模式預報之暴潮偏差，為模式耦合潮汐預報與氣象風場驅動水動力模式後之水位起伏，扣除模式單純耦合潮汐預報所得水位之結果，如此便可在暴潮偏差水位中保留潮汐與颱風暴潮可能之非線性效應。模式預報暴潮水位則為前述暴潮偏差加上氣象局作業中調和分析潮汐預報水位所得之結果，因為對於單點而言，在具備品質良好及完整的歷史資料時，調和分析法產出的潮汐預報結果通常要比依據動量和質量守衡的流體力學方程式構成的數值模式數值方法準確，採用此方法可以避免潮汐模式產生之預報誤差影響暴潮預報結果。於模式校驗中，暴潮偏差之校驗對象則為潮位站觀測值扣除氣象局作業中之調和分析潮汐預報水位，暴潮總水位之校驗對象為各潮位站之觀測資料。

研究中先透過作業中決定性預報結果展示模式尚未採用系集預報時模式本身之準確度，然後透過每次僅採用颱風強度之單一參數變化產生系集成員，檢視暴潮預報模式對於各項颱風強度參數的敏感性變化，後續研究亦考量在採用相同系集成員產生法時，僅考量強度成員分散、僅考量路徑成員分散及同時考慮強度與路徑變化之系集成員組合對於颱風暴潮水位歷線之影響。

4.1. 颱風事件介紹

輕度颱風白鹿（Severe Tropical Storm Bailu）為 2019 年太平洋颱風季第 11 個被命名的熱帶氣旋，其生命期間路徑與強度分布圖如圖 4—1 所示，資料來源為中央氣象局颱風資料庫，資料間隔每 6 小時一筆，顯示時間為世界協調時間 UTC 資料點顏色為颱風近中心最大風速值，颱風強度依此分類，風速單位為公尺/秒。

於 8 月 20 日上午 8 時，日本氣象廳將其升為熱帶性低氣壓，同時臺灣中央氣象局將其升格為熱帶性低氣壓。8 月 21 日下午 2 時，日本氣象廳將其升格為熱帶風暴並命名。

颱風在菲律賓東方海面生成後向西北移動，朝巴士海峽方接近，隨著白鹿逼近臺灣東南方海面，中央氣象局在 8 月 23 日凌晨 5 時 30 分發布海上颱風警報。並在下午 2 時 30 分發布陸上颱風警報。8 月 24 日 13 時颱風於屏東滿州附近登陸，成為自 2017 年熱帶風暴海棠以來第一個登陸臺灣本島的熱帶氣旋，並於當日下午 4 時 10 分於高雄市楠梓區出海。隨著颱風白鹿逐漸遠離，氣象局表示其暴風圈已脫離臺灣本島，並在當日晚間 11 時 30 分解除本島上的陸上颱風警報。8 月 25 日，氣象局表示白鹿已於上午 7 時登陸福建，並在上午 8 時 30 分解除陸上颱風警報，隨後在上午 11 時 30 分解除海上颱風警報。

根據中央氣象局颱風資料庫之記錄，颱風白鹿屬於第四類侵台路徑，近中心最大風速高達 30 公尺/秒，中心氣壓最低時為 985 毫巴，強度達到臺灣中央氣象局定義之輕度颱風。

受颱風影響，花蓮及屏東地區有超大豪雨發生，據各部會調查資料，白鹿颱風期間全臺有 11 筆淹水資料、25 處坡地災害，全臺累積逾 11 萬戶停電，3,454 人需疏散撤離；全臺計有 1 人死亡，9 人受傷；農委會統計至 8 月 27 日止，農業災情逾 1 億 7,469 萬元。另外，颱風橫掃後，富岡漁港內堆滿漂流木，造成港區船舶動彈不得。

圖 4—2 為 2019 年颱風白鹿於警報發布期間各測站最大風速與最大陣風分布圖。警報發布期間為 2019 年 08 月 23 日 05 時 30 分至 08 月 25 日 11 時 30 分。藍色表最大平均風速，綠色表最大陣風風速，單位為公尺/每秒。玉山測站則測得本島最大陣風風速 46.4 公尺/秒，平均風速亦為 26.8 公尺/秒。離島以蘭嶼測得之最大陣風與最大平均風速為最高，分別為 44.8 公尺/秒及 24.9 公尺/秒。

圖 4—3 及圖 4—4 分別為 2019 年颱風白鹿於警報發布期間各氣象站最大 24 小時累積雨量與總雨量分布圖，雨量單位為毫米（mm）。兩張圖表比對後可以看出，由颱風事件貢獻之雨量於時間分布集中於 24 小時內。於空間分布上，雨量集中於颱風行經路線之台灣南部及東部，其中成功氣象站測得之最大 24 小時累積雨量超過 250 毫米，於颱風警報期間總雨量超過 300 毫米，為全台測站測得最大值。最接近颱風登陸地點之恆春測站，於颱風警報期間測得累積雨量為 238.5 毫米，最大 24 小時累積雨量為 225.5 毫米。

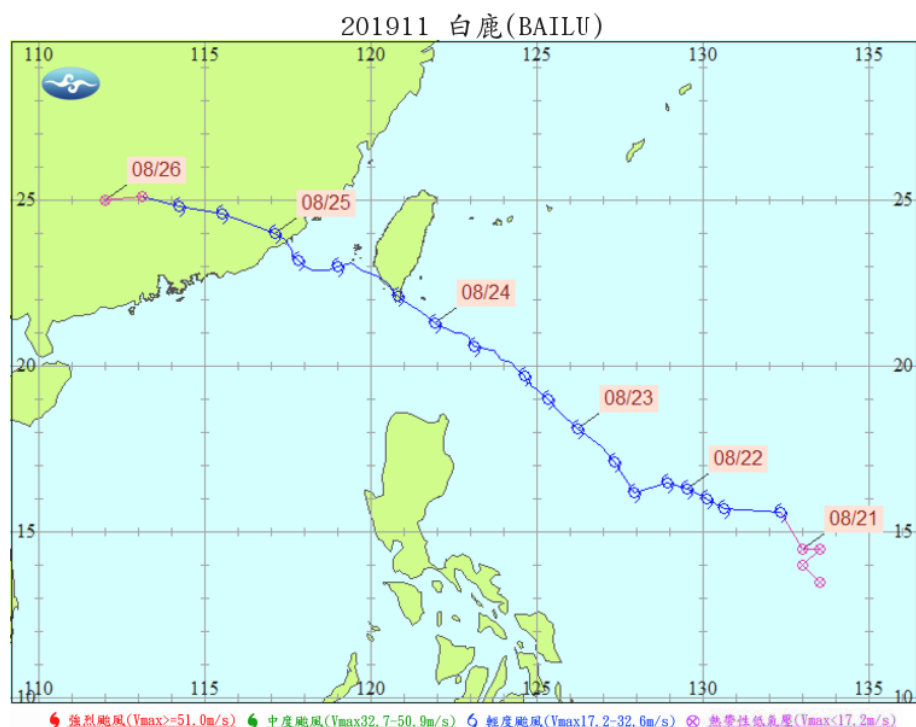


圖 4—1 颱風白鹿於生命期間路徑與強度圖，資料間隔每 6 小時一筆。
顯示時間為 UTC（資料來源：中央氣象局颱風資料庫）。

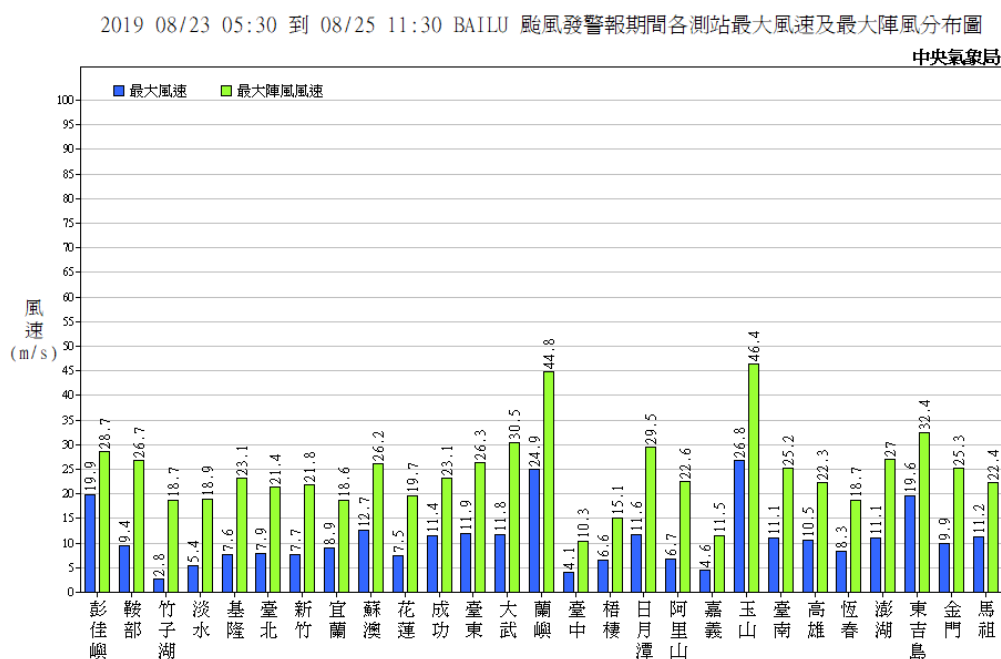


圖 4—2 颱風白鹿於警報發布期間各測站最大風速與最大陣風分布圖。
警報發布期間為 2019 年 08 月 23 日 05 時 30 分至 08 月 25 日 11 時 30 分。
單位為公尺/秒，藍色表最大平均風速，綠色表最大陣風風速。

2019 08/23 05:30 到 08/25 11:30 BAILU 颱風發警報期間各測站總雨量分布圖

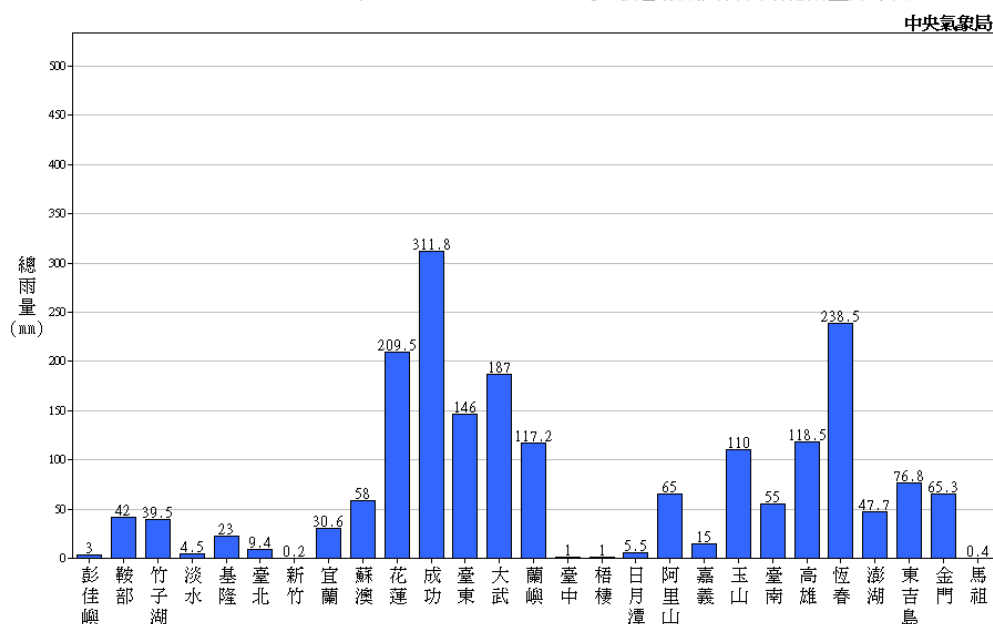


圖 4—3 颱風白鹿於警報發布期間各測站總雨量分布圖。

警報發布期間為 2019 年 08 月 23 日 05 時 30 分至 08 月 25 日 11 時 30 分。

總雨量單位為毫米 (mm)。

2019 08/23 05:30 到 08/25 11:30 BAILU 颱風發警報期間各測站最大24小時累積雨量分布圖

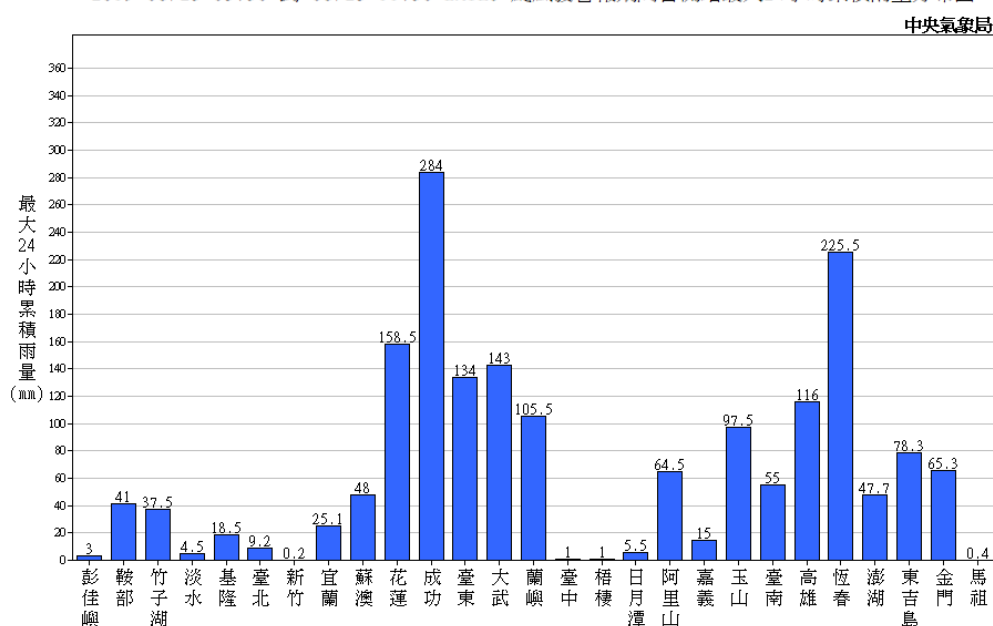


圖 4—4 颱風白鹿於警報發布期間各測站最大 24 小時累積雨量分布圖。

警報發布期間為 2019 年 08 月 23 日 05 時 30 分至 08 月 25 日 11 時 30 分。

最大 24 小時累積雨量單位為毫米 (mm)。

4.2. 決定性預報結果校驗

圖 4—5 為 2019 年 08 月 23 日 15 時之颱風白鹿決定性預報路徑。黑點虛線為路徑分布，黑色實線為地形海岸線，圖中資料點時間間隔為三小時，為颱風警報單內 12 小時間隔資料線性內插所得。颱風於 8 月 24 日 13 時於屏東滿州附近登陸，因此本報為颱風登陸前約 24 小時之預報。圖中預報路徑與後續分析路徑（圖 4—1）比對後可發現路徑有些許偏移。

本次颱風預報期間，指定預報 34 個測站具有觀測資料之測站有以下：龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、成功、蘭嶼、石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、台西、東石、將軍高雄、東港、南灣、小琉球、澎湖、馬祖等站，合計 23 個測站。依據颱風路徑及強度，可能受其影響之潮位觀測站應以台灣中南部及部分離島如蘭嶼、小琉球、澎湖等站。

圖 4—6 至圖 4—8 為暴潮預報系統決定性預報之暴潮偏差預報結果，橫軸為時間，時區為 UTC+8，縱軸為暴潮偏差水位，單位為公尺（m）。亮藍色線為模式採用決定性預報路徑與颱風參數所得之暴潮偏差預報水位，黑色圓圈為潮位站觀測水位扣除調和分析預報水位之殘差值。

測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮等站，預報水位與觀測資料相近且水位變化微小，顯示颱風影響以上測站水位變化有限。成功站於觀測資料中可以看到 24 日 15 時左右記錄到約 0.5 公尺之暴潮偏差，但於預報結果中並未看到明顯水位起伏。蘭嶼站之預報結果與觀測結果比對良好。

石門站於觀測水位中有約-0.3 公尺之水位變化，淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲等站則有週期性的水位起伏，振幅在淡水及梧棲測站甚至高達 0.3 至 0.4 公尺，但這些測站在預報水位偏差的變化時皆不明顯。考量颱風實際路徑自台灣南部經過，對北部測站影響應有限，本次觀測到之水位變化除了可能源自其他天氣現象，或觀測水位扣除調和分析潮汐預報水位後仍有其他原因如地形效應或非源自潮汐之物理機制等造成該水位變化。台西側站於 24 日 15 時左右記錄到約 0.4

公尺之暴潮偏差，但預報偏差水位無觀測到明顯正暴潮。東石與將軍測站在暴潮偏差觀測水位中有部分週期性起伏，導致無法判讀該測站是否具有受暴潮影響。

高雄與東港測站在觀測資料與預報水位中皆有約 0.3 公尺之暴潮偏差，但觀測資料與預報中極值發生的時機並不一致，顯示模式對該測站之預報上有進步的空間。南灣與小琉球測站之觀測資料與預報結果比對良好，兩測站於預報與觀測中可見之暴潮偏差約為 0.3 公尺。澎湖測站之觀測水位偏差雖有些微不穩定起伏，但仍可觀測到與預報結果趨勢相符之正偏差訊號，於 24 日 23 時觀測到之正偏差約為 0.4 公尺，而預報約為 0.2 公尺，有略為低估情形。馬祖測站之觀測水位中有高達 0.6 公尺之正偏差，但預報水位變化並不明顯。考量颱風實際路徑自台灣南部經過，對該測站影響應有限，本次觀測到之水位變化除了可能源自其他天氣現象，或觀測水位扣除調和分析潮汐預報水位後仍有其他原因如地形效應或非源自潮汐之物理機制等造成該水位變化。

圖 4—9 至圖 4—11 為暴潮預報系統決定性預報之暴潮總水位預報結果，橫軸為時間，時區為 UTC+8，縱軸為暴潮水位，單位為公尺 (m)。亮藍色線為模式暴潮偏差預報水位與調和分析預報水位之總和，黑色圓圈為潮位站觀測水位值。

測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、蘭嶼等站，預報水位與觀測資料相符，顯示比對結果良好。成功站於觀測資料中可以看到 24 日 11 時至 15 時左右明顯高於預報水位，顯示模式於本次預報中對該測站預報能力有限。

石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、台西、東石、將軍等站於觀測水位及模式預報水位中有明顯的潮汐振幅及潮時差，考量颱風實際路徑自台灣南部經過，對北部測站影響應有限，因此本次預報中上述測站預報與觀測資料間之誤差應屬調和分析預報水位與觀測水位間之誤差。

高雄、南灣、小琉球等測站於本次預報中之預報水位與觀測資料相符，顯示比對結果良好。成功站於觀測資料中可以看到 25 日 03 時至 07 時左右明顯高於預報水位，顯示模式於本次預報中對該測站預報能力仍有進步空間。澎湖、馬祖

等站於觀測水位及模式預報水位中有明顯的潮汐振幅差，於總水位中不易判讀颱風對於兩測站之影響。考量颱風實際路徑自台灣南部經過，對馬祖測站影響應有限，因此該測站預報與觀測資料間之誤差應屬調和分析預報水位與觀測水位間之誤差。

透過本次預報，可以得知模式現有之決定性預報結果，有一定程度的準確性，而其中預報偏差的部份，誤差來源可能源自水動力模式模擬誤差、氣象參數預報誤差等。基於沿岸警報需求，我們期待可以透過系集預報來補足於決定性預報中低估實際觀測水位導致無法提出警告的部分區域預報。

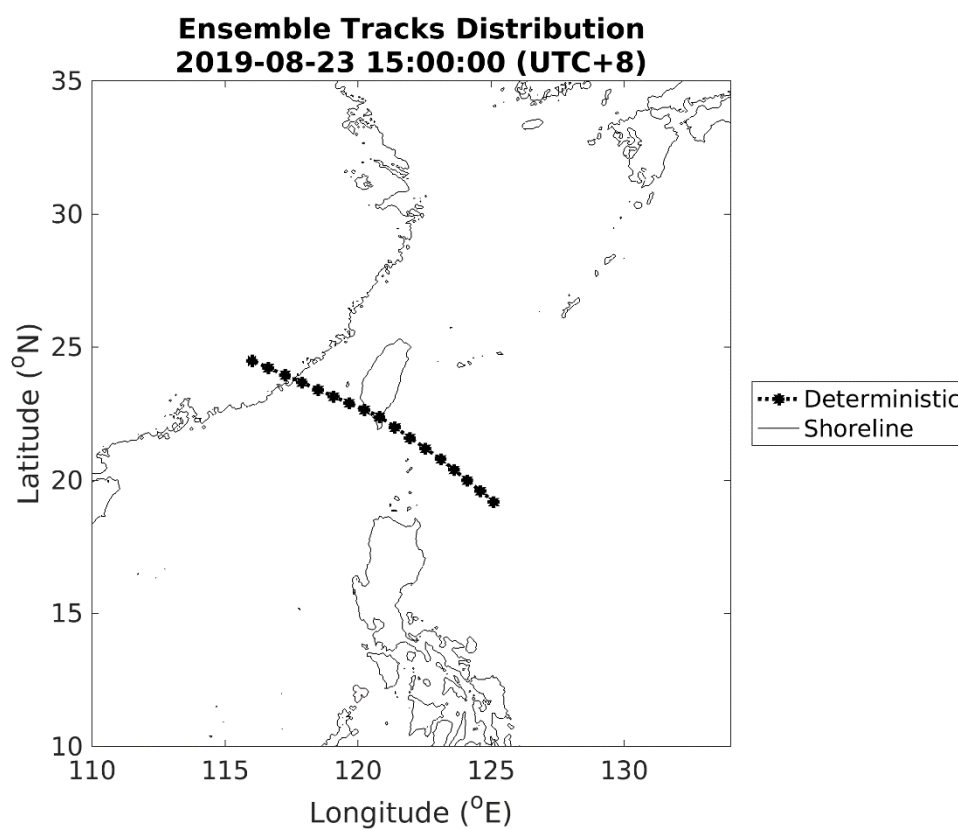


圖 4—5 2019 年 08 月 23 日 15 時之颱風白鹿決定性預報路徑
黑點虛線為路徑分布，黑色實線為地形海岸線



圖 4—6 暴潮預報系統決定性預報之結果—暴潮偏差
(潮位站觀測值扣除調和分析潮汐預報值)。



圖 4—7 暴潮預報系統決定性預報之結果—暴潮偏差
(潮位站觀測值扣除調和分析潮汐預報值)。

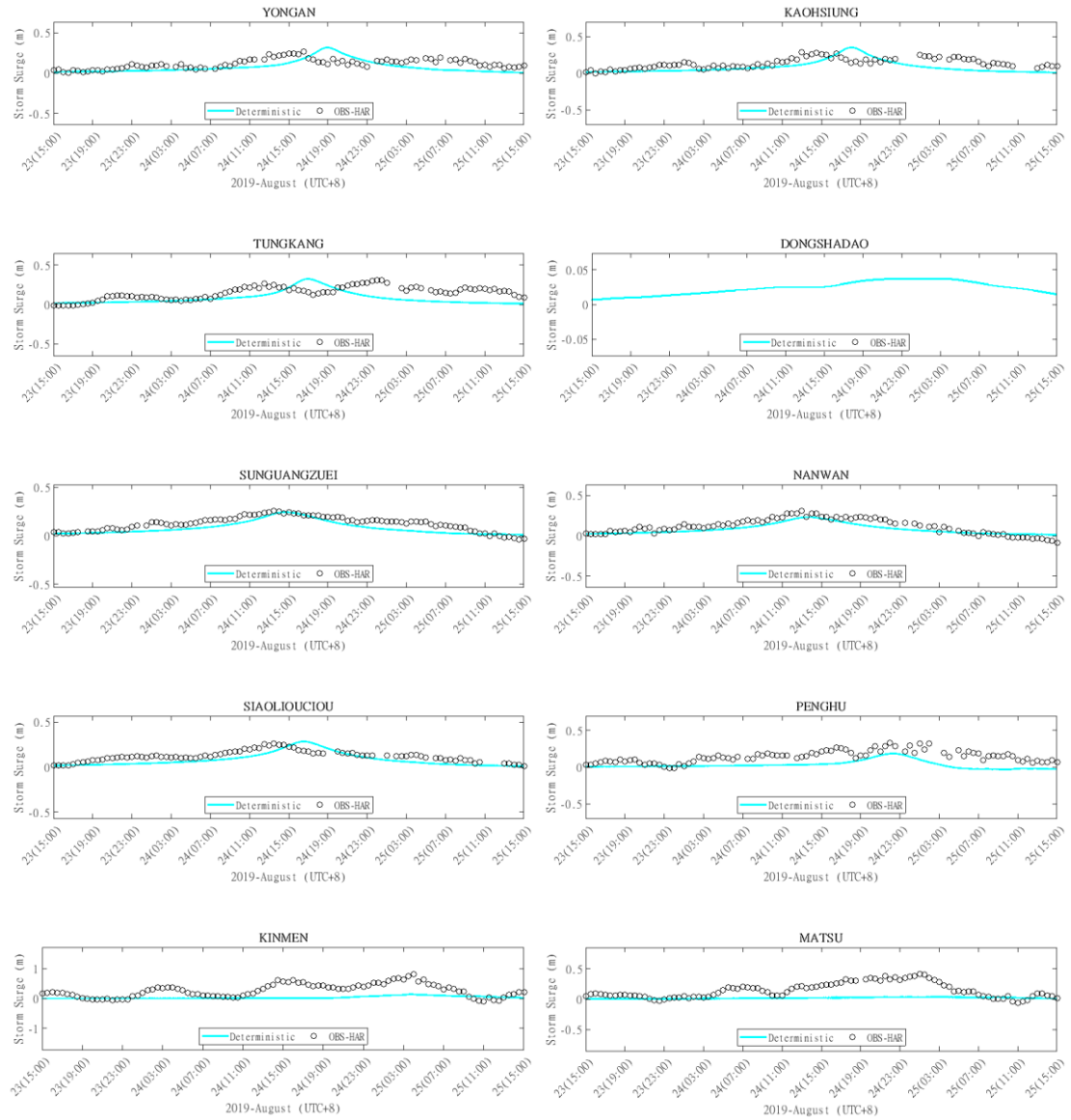


圖 4—8 暴潮預報系統決定性預報之結果—暴潮偏差
(潮位站觀測值扣除調和分析潮汐預報值)。

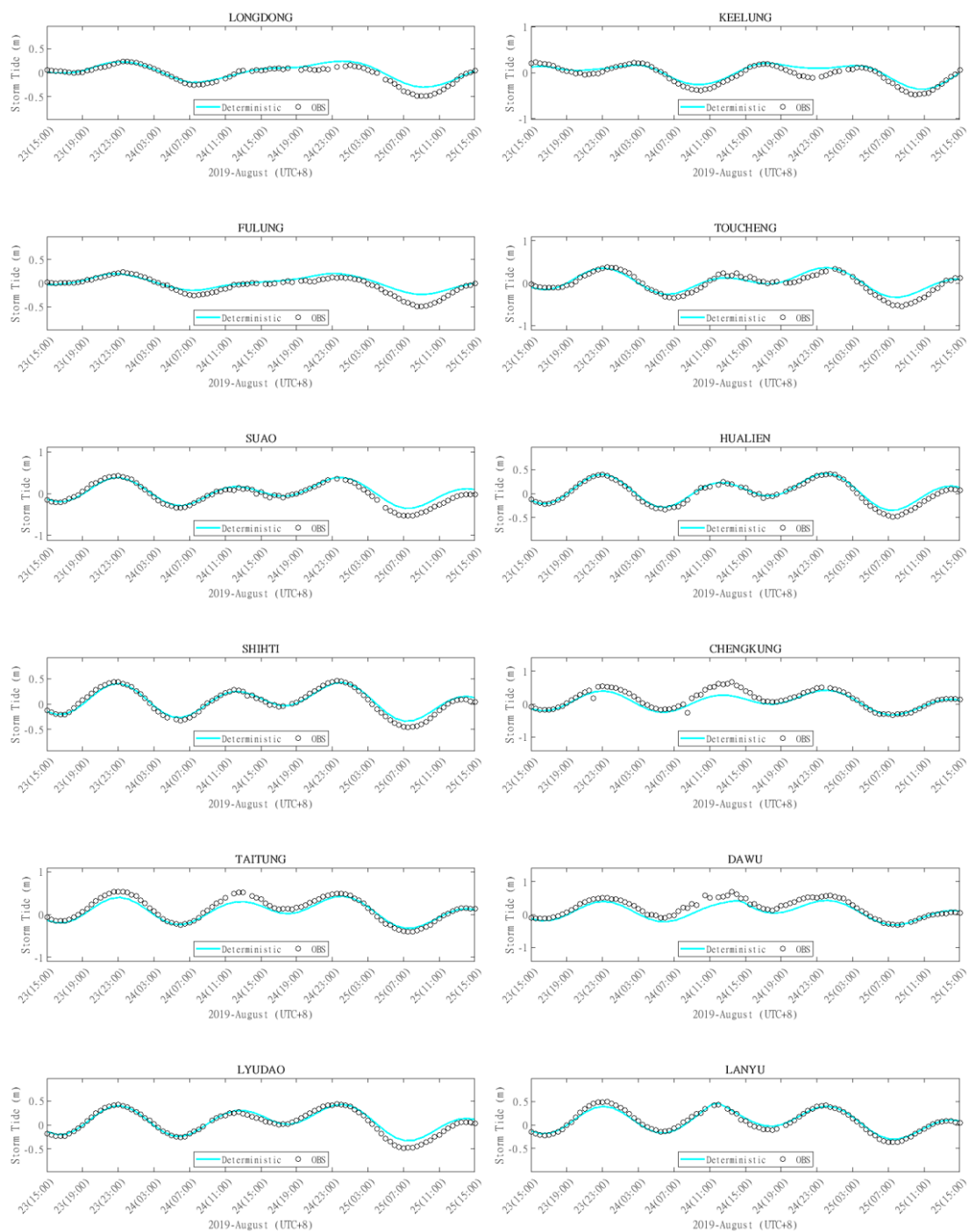


圖 4—9 暴潮預報系統決定性預報之結果—暴潮總水位

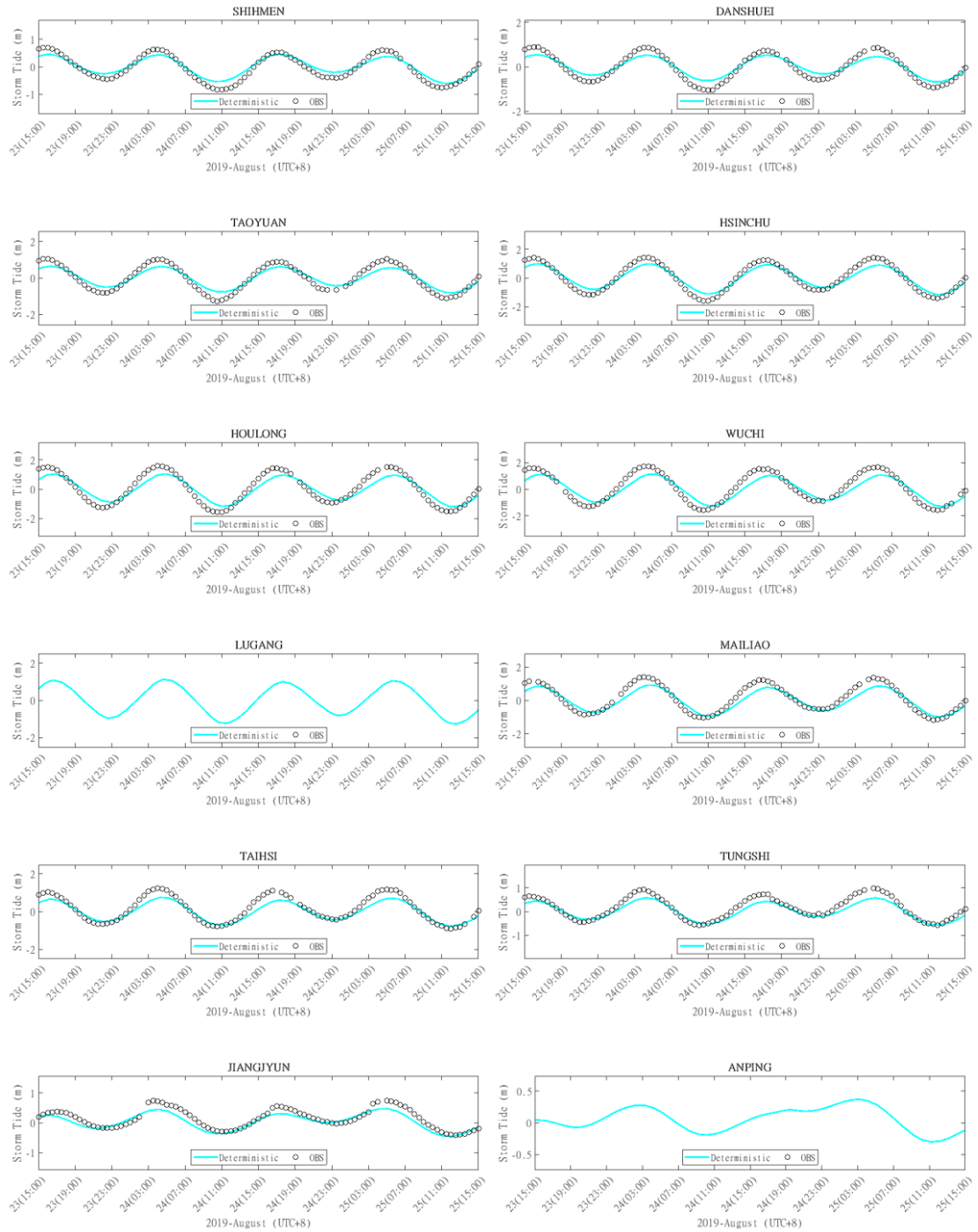


圖 4—10 暴潮預報系統決定性預報之結果—暴潮總水位



圖 4—11 暴潮預報系統決定性預報之結果—暴潮總水位

4.3. 強度參數對系集預報影響

本研究於前一章節先透過作業中決定性預報結果展示模式尚未採用系集預報時模式本身之準確度，於本節中利用章節中取得之強度誤差分布區線及相對應之各參數誤差值產生系集成員進行系集預報分析，並過每次僅採用颱風強度之單一參數變化產生系集成員，檢視暴潮預報模式對於各項颱風強度參數的敏感性變化。於暴潮系集預報模式校驗方面，本研究將系集預報水位時序資料與中央氣象局所提供之潮位觀測值進行直接比對，以判斷何種系集路徑組成能較完整的涵蓋觀測值。

本研究對應颱風警報單可提供之強度參數，中心氣壓、七級風半徑及近中心最大風速等參考表 3-4 產生系集成員組合，各組參考決定性預報僅變動單一強度參數，產生九個系集成員並進行系及預報，共計三組系集成員組合，並產生三組對應的系集預報結果，以互相比較各強度參數對颱風系集預報的影響。

由於作業中系集預報模式採用氣象局內理想風場模式（章節 0），於判斷颱風最大風速半徑時與中心氣壓相關聯（式 3-23），而非七級風半徑，因此系集成員預報中變動七級風半徑時並不會影響到模式輸入風場的變動，故在預報結果中，七級風半徑誤差成員所得的系集預報結果皆與決定性預報結果相同，於本次案例分析中將展示颱風氣壓參數及近中心最大風速變動時對系集預報之影響。

圖 4—12 至圖 4—13 為暴潮系集預報系統強度參數系集成員預報之暴潮偏差水位與觀測資料比較圖。圖 4—14 至圖 4—15 為暴潮系集預報系統強度參數系集成員預報之暴潮總水位結果與觀測資料比較圖。組圖左側僅考慮調整颱風中心氣壓變化產出之系集成員，組圖右側則為僅考慮調整近中心最大風速變化產出之系集成員。於變動單一颱風參數時，每組模擬皆包含 9 組成員，以統一比較預報模式對各參數之敏感程度。圖中不同色線分別對應系集成員預報之各項統計參數：藍、紅、黃、紫、綠、亮藍色分別代表下四分位（Q25）、中位數（Q50）、上四分位（Q75）、最小值（MIN）、最大值（MAX）、平均值（MEAN）；紅色虛線

為決定性預報之結果，黑色圓圈則表示校驗對象，在比較暴潮偏差時，校驗對象為觀測總水位扣除調和分析後殘差值；比較暴潮總水位時，校驗對象為觀測站紀錄之總水位。水位時序圖橫軸為時間，預報時間起於 2019 年 08 月 23 日 15 時，往後預報 48 小時；縱軸為水位，單位為公尺。

圖 4—12 及圖 4—13 依序展示成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、台西、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球、澎湖等站在強度參數系集成員預報之暴潮偏差水位結果。

成功站於觀測資料中可以看到 24 日 15 時左右記錄到約 0.5 公尺之暴潮偏差，但於氣壓及風速系集預報結果中看到的水位起伏無法涵蓋到觀測值，顯示本次預報中颱風強度在預報上的變化對該測站而言仍有改進空間。台東與大武測站之預報暴潮偏差在決定性預報中之最大偏差水位值有略為低估的情形，誤差小於 0.1 公尺。在氣壓系集成員之模擬中，系集最大值有更接近觀測資料的情形，而在風速系集成員中，系集最大值的曲線分布與決定性預報相近。綠島站之預報最大暴潮偏差值與觀測資料相近，而預報發生時間較觀測資料延遲約 6 小時，在氣壓系集與風速系集預報結果中可以看到在變動氣壓與風速參數時並不會影響到最大暴潮偏差發生的時間，僅會影響到水位變化。蘭嶼站於決定性預報結果中便與觀測結果比對良好，可以透過系集預報看到其他可能的水位變化，在氣壓系集成員中，暴潮峰值可達 0.5 公尺；在風速成員中，峰值可達 0.4 公尺。台西側站於 24 日 15 時左右記錄到約 0.4 公尺之暴潮偏差，但於氣壓及風速系集預報結果中看到的水位起伏無法涵蓋到觀測值，顯示本次預報中颱風強度在預報上的變化對該測站而言仍有改進空間。

永安測站在決定性預報中所得之最大暴潮偏差與觀測資料相近，但發生時間較實際情況延遲 4 小時，在氣壓系集與風速系集預報結果中可以看到在變動氣壓與風速參數時並不會影響到最大暴潮偏差發生的時間，僅會影響到水位變化。高雄與東港測站在觀測資料與預報水位中皆有約 0.3 公尺之暴潮偏差，但觀測資料

與預報中極值發生的時機並不一致，由於強度參數系集預報中並未調整颱風路徑，因此系集預報中對於暴潮偏差極值發生的時機影響有限。蟬廣嘴與南灣測站之觀測資料與決定性預報結果比對良好，可以透過系集預報看到其他可能的水位變化，在氣壓系集成員中，暴潮峰值可達 0.4 公尺；在風速成員中，系集預報峰值約為 0.3 公尺，與觀測及決定性預報相當。

小琉球測站之觀測資料與預報結果比對良好，可以透過系集預報看到其他可能的水位變化，在氣壓系集成員中，暴潮峰值可達 0.4 公尺；在風速成員中，系集預報峰值約為 0.3 公尺。澎湖測站之觀測水位偏差雖有些微不穩定起伏，但仍可觀測到與預報結果趨勢相符之正偏差訊號，於 24 日 23 時觀測到之正偏差約為 0.4 公尺，而氣壓成員系集預報峰值約為 0.2 公尺，有略為低估情形；氣壓成員之系集預報峰值則有 0.4 公尺，與觀測峰值相當。

其他測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮及石梯等站，在氣壓成員與風速成員預報之暴潮偏差中可以看到系集預報水位變化範圍小於 0.2 公尺，顯示颱風強度在預報強度上的變化在本次預報中影響以上測站水位的程度有限。石門站於觀測水位中有約 -0.3 公尺之水位變化，淡水、桃園、新竹，振幅約 0.2 至 0.4 公尺不等，後龍、梧棲、東石等站亦有週期性的水位起伏，但這些測站不論在何種系集組合中，系集預報水位偏差的變化時皆不明顯。考量颱風實際路徑自台灣南部經過，顯示颱風強度在預報強度上的變化在本次預報中影響以上測站水位的程度有限。本次觀測到之水位變化除了可能源自其他天氣現象，或觀測水位扣除調和分析潮汐預報水位後仍有其他原因如地形效應或非源自潮汐之物理機制等造成該水位變化。將軍測站在暴潮偏差觀測水位中有部分週期性起伏，導致無法判讀該測站是否具有受暴潮影響。在氣壓成員預報中，可以看到隨颱風中心氣壓增減，該測站水位極值可達 0.3 公尺或有負暴潮之現象發生，而在風速成員預報中，近中心最大風速的變化對該測站水位影響較不明顯。馬祖測站之觀測水位中有高達 0.6 公尺之正偏差，但各種強度參數之系集預報水位變化在該測站並

不明顯，顯示颱風強度在預報強度上的變化在本次預報中影響該測站的程度有限。本次觀測到之水位變化除了可能源自其他天氣現象，或觀測水位扣除調和分析潮汐預報水位後仍有其他原因如地形效應或非源自潮汐之物理機制等造成該水位變化。上述測站系集預報之水位時序變化圖收錄於附錄 C。

圖 4—14 及圖 4—15 依序展示成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、台西、永安、高雄、東港、蟳廣嘴、南灣、小琉球、澎湖等站在強度參數系集成員預報之系集預報總水位結果。

成功站於觀測資料中可以看到 24 日 11 時至 15 時左右明顯高於所有系集預報水位的峰值，顯示模式於本次預報中對該測站預報能力有限。台東與大武測站之預報暴潮總水位在決定性預報中之最大偏差水位值有略為低估的情形，而在氣壓系集成員之模擬中，系集最大值有更接近觀測資料的情形，而在風速系集成員中，系集最大值的曲線分布與決定性預報相近。綠島、蘭嶼站之預報水位與觀測資料相符，顯示比對結果良好。自氣壓成員系集預報中可以看到颱風影響水位幅度較風力成員大。台西站於觀測水位及模式預報水位中有明顯的潮汐振幅差，於總水位中不易判讀颱風對於兩測站之影響。

永安站受颱風影響時間在預報中較實際情況延遲，在預報總水位中亦可以看到水位峰值變化與實際情況有所不同。高雄、東港站於觀測資料中可以看到 25 日 03 時至 07 時左右明顯高於各系集成員預報水位最大值，顯示模式於本次預報中對該測站預報能力仍有進步空間。蟳廣嘴、南灣、小琉球等測站於本次預報中之預報水位與觀測資料相符，顯示比對結果良好，自氣壓成員系集預報中可以看到颱風影響水位幅度較風力成員大。澎湖站於觀測水位及模式預報水位中有明顯的潮汐振幅差，於總水位中不易判讀颱風對於兩測站之影響。

其他測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳、花蓮、等站預報水位與觀測資料相符，顯示比對結果良好，而在系集強度參數系集預報結果中，氣壓參數與風速參數對於水位的影響在上述測站中無法觀察到明顯變化，相關統計參數區線也

趨於集中，顯示颱風強度在預報強度上的變化在本次預報中影響以上測站水位的程度有限。石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、台西、東石等站於觀測水位及模式系集預報水位中有明顯的潮汐振幅及潮時差，但各項系集強度參數對於水位的影響在上述測站中無法觀察到明顯變化，相關統計參數區線也趨於集中。考量颱風實際路徑自台灣南部經過，顯示颱風強度在預報強度上的變化在本次預報中影響以上測站水位的程度有限，因此本次預報中上述測站預報與觀測資料間之誤差應屬調和分析預報水位與觀測水位間之誤差。馬祖站於觀測水位及模式預報水位中有明顯的潮汐振幅差，於總水位中不易判讀颱風對於該站之影響。考量颱風實際路徑自台灣南部經過，對馬祖測站影響應有限，因此該測站預報與觀測資料間之誤差應屬調和分析預報水位與觀測水位間之誤差，且系集預報成員預報之水位無法涵蓋此誤差。上述測站系集預報之水位時序變化圖收錄於附錄 C。

以本次系集預報結果來看，對單一地點而言，氣壓參數組成的系集預報結果影響水位變動範圍較風速參數成員組合的結果大，而風速成員的預報較氣壓成員有機會產生負暴潮偏差。

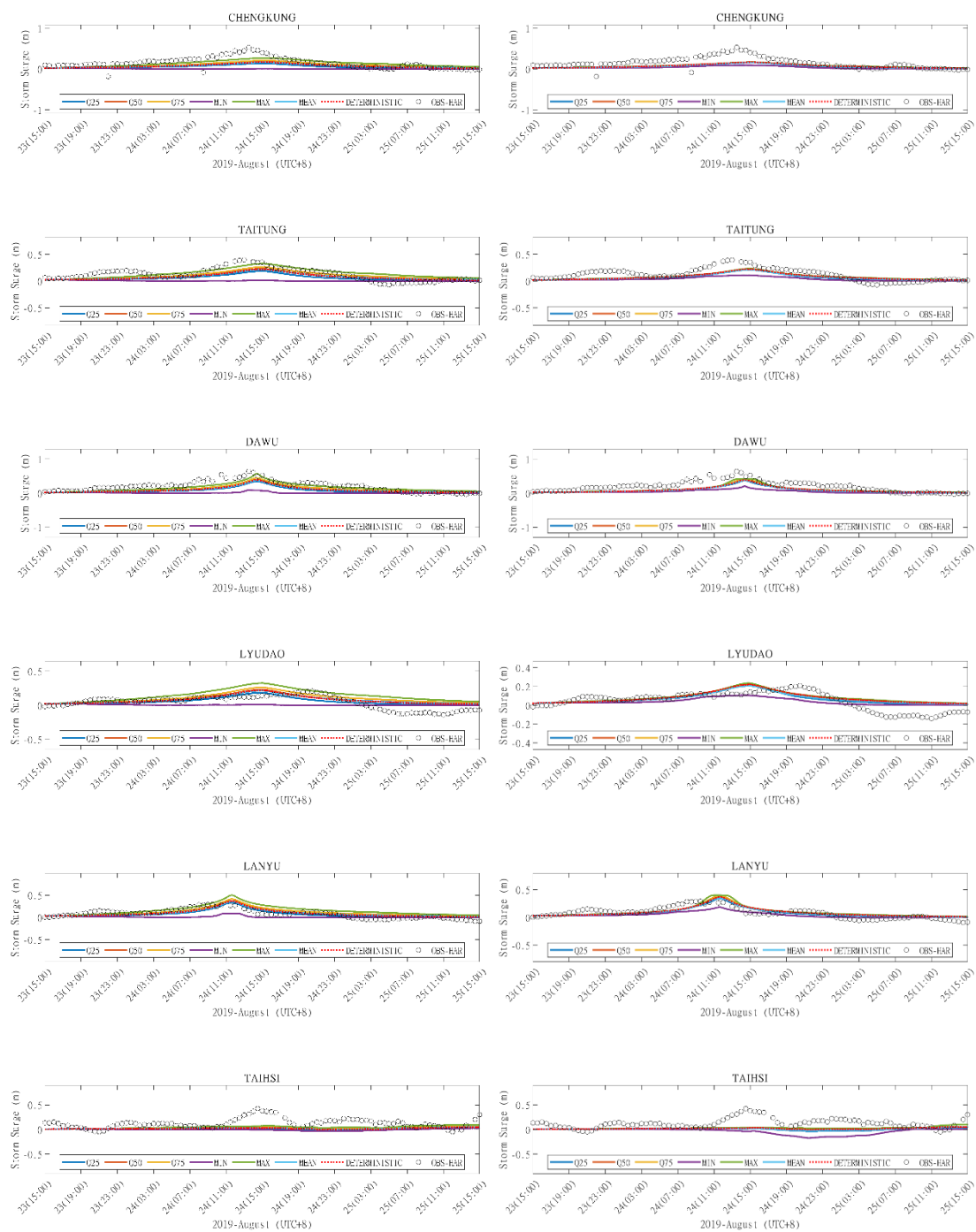


圖 4—12 強度參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員

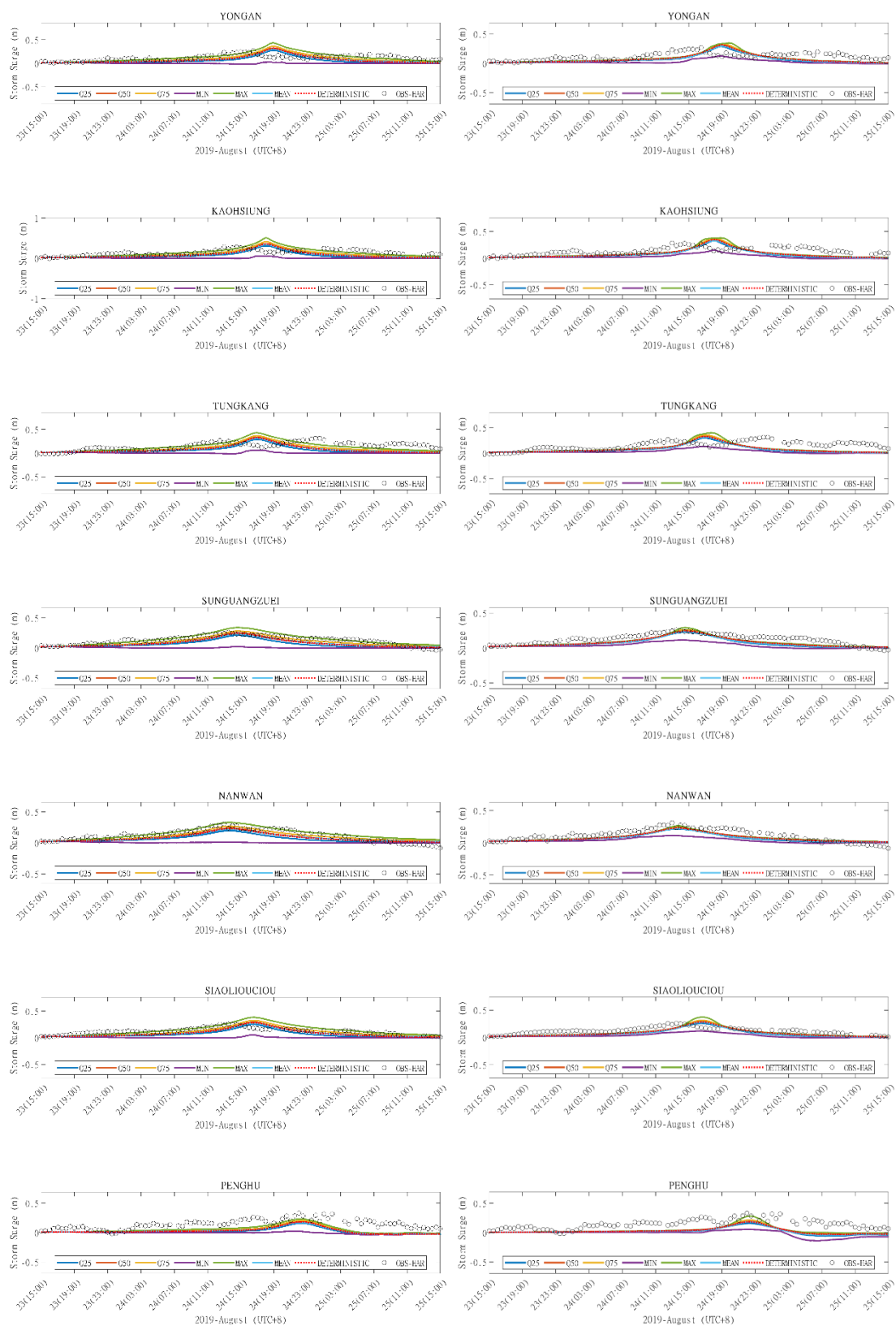


圖 4—13 強度參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員

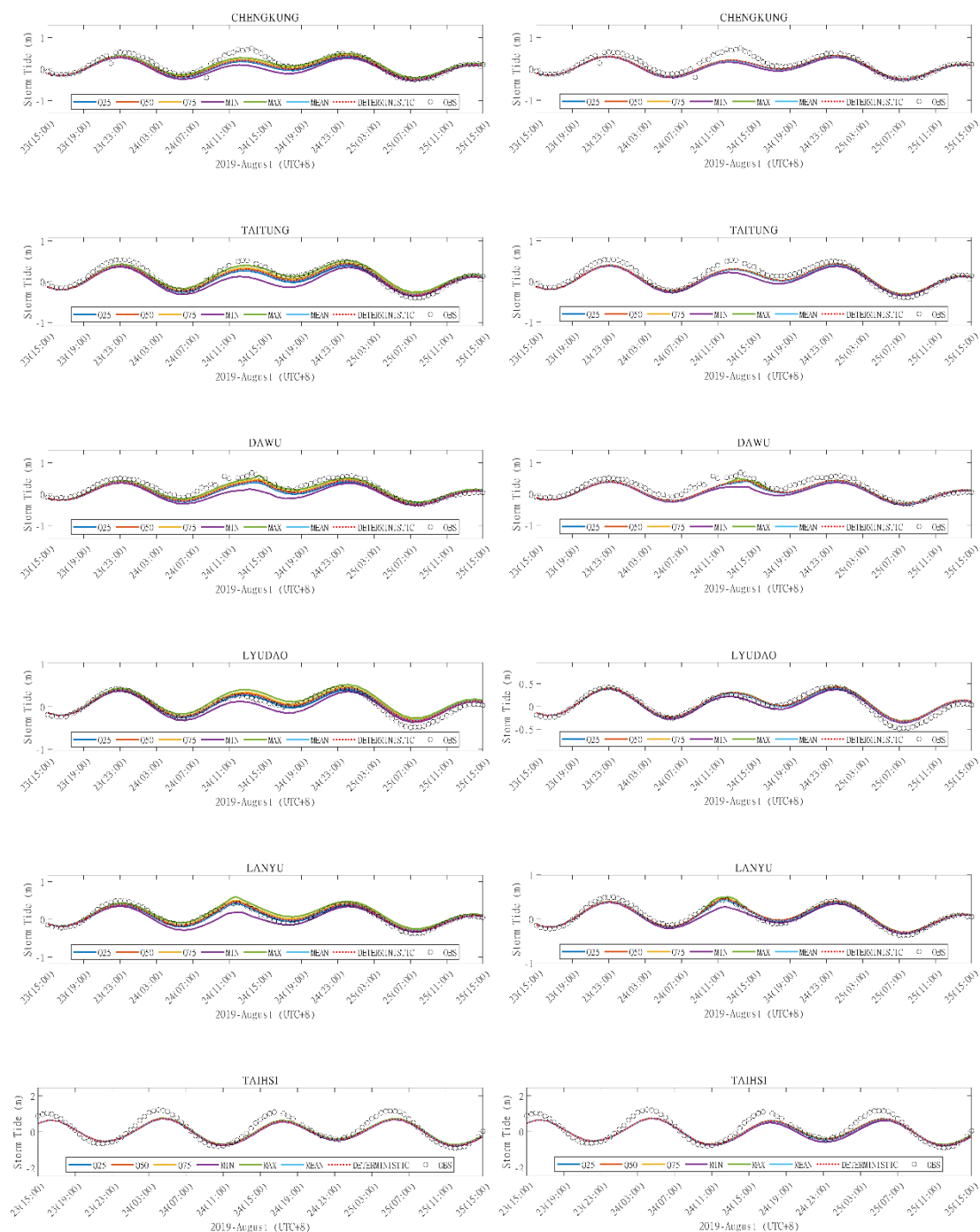


圖 4—14 強度參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員

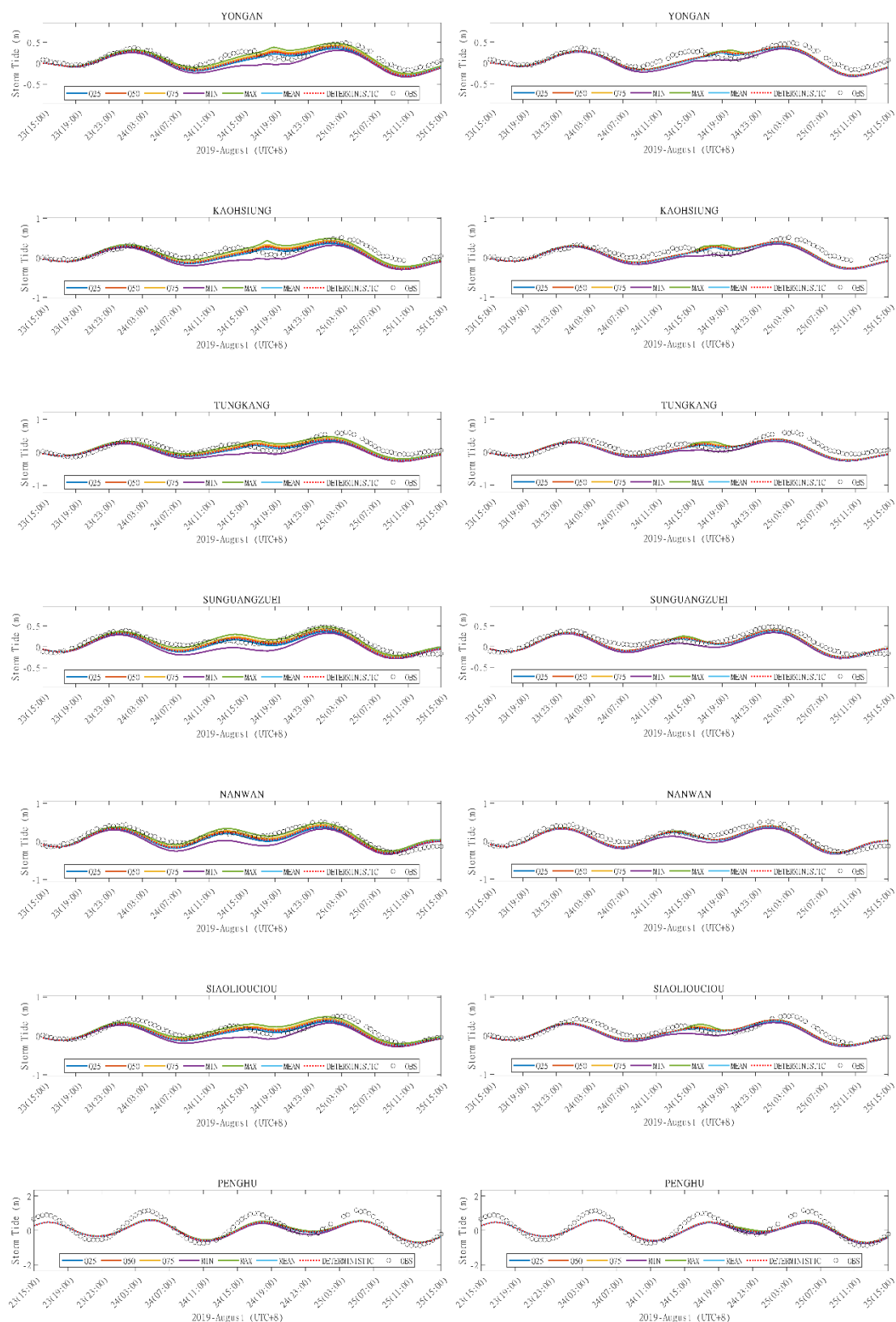


圖 4—15 強度參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員

4.4. 路徑系集與強度系集對預報之影響

本章節分析重點在於比較考量強度變化、路徑變化及同時考量強度與路徑變化對系集預報結果的影響。各項颱風參數部分，皆選用誤差機率曲線下面積均分 2 等分時可得之誤差成員，分別為最接近決定性預報者 1 組、最偏離決定性預報者 2 組，即颱風決定性預報之強度及路徑搭配參數表 3—4 內前三欄之誤差值，各項參數分別取得三組數值作為系集成員。強度系集內，採壓力誤差 3 組成員與近中心最大風速誤差 3 組成員互相搭配，可得 9 組成員；路徑系集內，考量垂直路徑誤差與平行路徑誤差的變化，亦可得 9 組成員。若將強度及路徑參數總和考量，則在各項參數皆取 3 個誤差成員的情況下，可得 $3^4 = 81$ 組系集成員。

圖 4—16 至圖 4—19 暴潮系集預報系統強度參數系集成員預報之暴潮偏差水位與觀測資料比較圖。圖 4—20 至圖 4—23 暴潮系集預報系統強度參數系集成員預報之暴潮總水位結果與觀測資料比較圖。各組圖由左至右分別考慮路徑系集成員、強度系集成員及綜合考量強度及路徑之系集成員，依序展示成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、台西、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球、澎湖等站之系集預報結果。

其中，單考慮強度或路徑成員者，每組模擬皆包含 9 組成員；而綜合考量強度及路徑之系集中內含 81 組成員，以更全面的考量輸入風場及路徑誤差可能為暴潮預報模式帶來的變化。圖中不同色線分別對應系集成員預報之各項統計參數：藍、紅、黃、紫、綠、亮藍色分別代表下四分位 (Q25)、中位數 (Q50)、上四分位 (Q75)、最小值 (MIN)、最大值 (MAX)、平均值 (MEAN)；紅色虛線為決定性預報之結果，黑色圓圈則表示校驗對象，在比較暴潮偏差時，校驗對象為觀測總水位扣除調和分析後殘差值；比較暴潮總水位時，校驗對象為觀測站紀錄之總水位。水位時序圖橫軸為時間，預報時間起於 2019 年 08 月 23 日 15 時，往後預報 48 小時；縱軸為水位，單位為公尺。

圖 4—16 至圖 4—19 依序展示不同系集組合在成功、台東、大武、綠島、

蘭嶼、台西、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球、澎湖等站之暴潮偏差水位與觀測資料比較圖。

成功站於觀測資料中可以看到 24 日 15 時左右記錄到約 0.5 公尺之暴潮偏差，強度系集預報所得之暴潮偏差最大值曲線在本次預報中與觀測資料相符，但於路徑系集預報中仍無法有效捕捉觀測水位的變化情形。在同時考量路徑與強度變化的情況下，系集預報最大值曲線可以有效的包覆預報期間所有的觀測資料，但在觀測峰值到達時間前後有過度預報水位的情形。台東及大武測站在路徑系集預報中之系集最大值曲線中可以看到最大/最小值包絡線皆無法涵蓋該站之觀測資料分布情形，而強度系集預報之系集最大值曲線峰值以測站觀測最大值相當。

綠島站於路徑系集預報中之系集最大值曲線峰值與觀測峰值相當，但最大值曲線之峰值發生時間無法涵蓋實際發生時間。強度系集成員之最大值曲線可以涵蓋觀測極值。但若同時考量路徑與強度的變化，系集預報最大值曲線與觀測資料相比實為大幅的過度預報。蘭嶼站於決定性預報結果中便與觀測結果比對良好，可以透過系集預報看到其他可能的水位變化，在強度系集成員中，暴潮峰值可達 0.75 公尺；在路徑成員中，峰值可達 0.4 公尺，但依路徑影響測站的時間，峰值的預報時間分散為 24 日 7 時、11 時及 20 時。但若同時考量路徑與強度的變化，系集預報最大值曲線與觀測資料相比實為大幅的過度預報。台西測站於 24 日 15 時左右記錄到約 0.4 公尺之暴潮偏差，這些測站不論在強度或路徑系集組合中，系集預報水位偏差的變化時皆小於 0.2 公尺，且於強度或路徑系集預報之系集的最大/最小值包絡線皆無法涵蓋該站之觀測資料分布情形，直到同時考量強度及路徑成員之系集組成，其預報最大值曲線才足以涵蓋預報觀測資料之極值。

永安測站於路徑系集預報中之系集最大值曲線峰值與觀測峰值相當，但最大值曲線之峰值發生時間無法涵蓋實際發生時間。但在強度系集成員中最大值曲線有過度預報的情形，類似的情況也發生在同時考量強度及路徑成員之系集組成中。高雄與東港測站在強度成員及路徑成員之最大值預報曲線皆能較好的涵蓋觀測

資料，但在同時考慮路徑及強度的情況下，模式最大值過度預報的情形則相對嚴重，極值可達 0.8 公尺。

蟬廣嘴及南灣測站之觀測資料與決定性預報結果比對良好，可以透過系集預報看到其他可能的水位變化，在強度系集成員中，暴潮峰值可達 0.5 公尺，而在路徑成員中，個成員造成該測站的極值與決定性預報相當，但極值發生時間或有提前或延後；在同時考量強度及路徑成員的情況下，則有過度預報的情形。小琉球測站之觀測資料與預報結果比對良好，可以透過系集預報看到其他可能的水位變化，在強度系集成員中，暴潮峰值可達 0.5 公尺；在路徑成員中，個成員造成該測站的極值與決定性預報相當，但極值發生時間或有提前或延後。在同時考量強度及路徑成員的情況下，則有過度預報的情形，最大值曲線發生極值的時間分成三個時段，且都超過 0.5 公尺。澎湖測站之觀測水位偏差雖有些微不穩定起伏，但仍可觀測到正偏差訊號，且強度系集成員預報的極值及其發生時間與觀測資料相當。路徑系集成員預報方面有部分最大值水位預報與觀測極值前期的水位上升相符，整體涵蓋觀測資料範圍較廣的仍屬同時考慮強度及路徑之系集成員，但該系及預報之最大值曲線極值發生時機較觀測資料提前。

其他測站如龍洞、基隆、福隆、頭城、蘇澳及花蓮等站，在強度成員與路徑成員預報之暴潮偏差中可以看到系集預報水位變化範圍小於 0.2 公尺，顯示颱風強度在預報強度上的變化在本次預報中影響以上測站水位的程度有限。但若同時考量路徑與強度的變化，頭城的水位極值可以高達 0.4 公尺，蘇澳及花蓮站分別可以在 25 日 03 時的預報中達到 0.5 及 0.7 公尺的暴潮偏差水位，與觀測資料相比實為大幅的過度預報。石門站於觀測水位中有約 -0.3 公尺之水位變化，淡水、桃園、新竹，振幅約 0.2 至 0.4 公尺不等，但這些測站不論在強度或路徑系集組合中，系集預報水位偏差的變化時皆不明顯，若同時考量強度及路徑成員，則部分系集成員在以上測站中可能有負暴潮產生。考量颱風實際路徑自台灣南部經過，顯示颱風強度在預報強度上的變化在本次預報中影響以上測站水位的程度有限。

測站中呈現週期性震盪的偏差訊號，除了可能源自其他天氣現象，或觀測水位扣除調和分析潮汐預報水位後仍有其他原因如地形效應或非源自潮汐之物理機制等造成該水位變化，並不一定來自颱風參數的預報誤差。後龍、梧棲、東石等站之暴潮偏差觀測資料中有週期性的水位起伏，這些測站不論在強度或路徑系集組合中，系集預報水位偏差的變化時皆小於 0.2 公尺。若同時考量強度及路徑成員，則系集的最大/最小值包絡線在颱風影響期間可以涵蓋梧棲及東石的週期性震盪資料，且以上測站中有部分成員有負暴潮產生。考量颱風實際路徑自台灣南部經過，顯示颱風強度在預報強度上的變化在本次預報中影響以上測站水位的程度有限。將軍測站在暴潮偏差觀測水位中有部分週期性起伏，導致無法判讀該測站是否具有受暴潮影響。在強度成員預報中，可以看到隨颱風強度變化，該測站水位於受颱風影響期間變動範圍在-0.2 至 0.3 公尺，極值與觀測資料相當，而在路徑成員預報中期最大值曲線無法涵蓋觀測資料分布範圍。馬祖測站之觀測水位中有高達 0.6 公尺之正偏差，但單考慮強度或路徑之系集成員預報水位變化在該測站並不明顯，直到同時考量強度及路徑成員之系集組成，其預報最大值曲線才足以預報觀測資料之極值。上述測站系集預報之水位時序變化圖收錄於附錄 D。

圖 4—16 至圖 4—19 依序展示不同系集組合在成功、台東、大武、綠島、蘭嶼、台西、永安、高雄、東港、蟬廣嘴、南灣、小琉球、澎湖等站之暴潮總水位與觀測資料比較圖。

成功站於觀測資料中可以看到 24 日 11 時至 15 時左右明顯高於強度成員及路徑成員系集預報水位的峰值，而同時考量強度及路徑成員的系及預報最大值曲線可以完整描述成功站的觀測水位資料。台東及大武測站在路徑系集預報中之系集最大值曲線中可以看到最大/最小值包絡線皆無法涵蓋該站之觀測資料分布情形，而強度系集預報之系集最大值曲線峰值以測站觀測最大值相當。

綠島、蘭嶼等站之強度成員與路徑成員的系集預報水位基本與觀測資料相符，顯示比對結果良好，可以看到同時考量強度及路徑變化時，預報水位最大值明顯

偏離其他統計參數曲線及決定性預報結果，顯示可能有過度預報的情形。台西站之觀測水位及模式系集預報水位中有明顯的潮汐振幅及潮時差，但各項系集強度參數對於水位的影響在上述測站中無法觀察到明顯變化，相關統計參數區線也趨於集中。考量颱風實際路徑自台灣南部經過，顯示颱風強度在預報強度上的變化在本次預報中影響以上測站水位的程度有限。

永安測站於路徑系集預報中之系集最大值曲線無法完整涵蓋觀測水位資料，但在強度系集成員中之系集預報最大值曲線則能夠涵蓋觀測水位，且在 24 日 19 時有明顯過度預報的情形。高雄、東港站於觀測資料中可以看到 25 日 03 時至 07 時左右明顯高於強度成員及路徑成員之系集預報水位最大值，但在同時考量強度及路徑的情況下，系集最大值曲線可以完整涵蓋觀測資料。

蟬廣嘴、南灣等測站於本次預報中之預報水位與觀測資料相符，顯示比對結果良好。小琉球測站於本次預報中之預報水位與觀測資料相符，顯示比對結果良好，自強度成員系集預報中可以看到颱風影響水位幅度較路徑成員大，在同時考量強度及路徑的情況下，系集最大值曲線在該測站會有過度預報的情形。澎湖站於觀測水位及模式預報水位中有明顯的潮汐振幅差，於總水位中不易判讀颱風對於該測站之影響，且各種系集成員組成所造成的變化皆不足以涵蓋這樣的差距。

其他測站如龍洞、基隆、福隆、頭城等站預報水位與觀測資料相符，顯示比對結果良好。颱風強度或路徑的變化，對於上述測站中無法觀察到對觀測水位有相對明顯的影響，相關統計參數區線也趨於集中，顯示颱風強度在預報強度上的變化在本次預報中影響以上測站水位的程度有限。蘇澳、花蓮等站之強度成員與路徑成員的系集預報水位基本與觀測資料相符，顯示比對結果良好，可以看到同時考量強度及路徑變化時，預報水位最大值明顯偏離其他統計參數曲線及決定性預報結果，顯示可能有過度預報的情形。石門、淡水、桃園、新竹、後龍、梧棲、東石等站於觀測水位及模式系集預報水位中有明顯的潮汐振幅及潮時差，但各項系集強度參數對於水位的影響在上述測站中無法觀察到明顯變化，相關統計參數

區線也趨於集中。考量颱風實際路徑自台灣南部經過，顯示颱風強度在預報強度上的變化在本次預報中影響以上測站水位的程度有限，因此本次預報中上述測站預報與觀測資料間之誤差應屬調和分析預報水位與觀測水位間之誤差。將軍站於觀測水位及模式預報水位中有明顯的潮汐振幅及潮時差，在強度成員預報中，可以看到隨颱風強度變化，該測站水位於 24 日 19 時至 23 時各系集成員預報水位有些許差異，而在路徑成員系集預報中，路徑變化對該測站水位影響較不明顯，在同時考量強度及路徑的情況下，系集最大值曲線可以涵蓋較多觀測資料。馬祖站於觀測水位及模式預報水位中有明顯的潮汐振幅差，於總水位中不易判讀颱風對於該測站之影響，且各種系集成員組成所造成的變化皆不足以涵蓋這樣的差距。考量颱風實際路徑自台灣南部經過，對馬祖測站影響應有限，因此該測站預報與觀測資料間之誤差應屬調和分析預報水位與觀測水位間之誤差，且系集預報成員預報之水位無法涵蓋此誤差。上述測站系集預報之水位時序變化圖收錄於附錄 D。

以本次系集預報結果來看，對單一地點而言，強度參數對測站水位影響主要集中在原本決定性預報路徑影響該測站期間，影響水位的極值振幅變化。路徑參數變化除了可能影響水位極值振幅變化外，亦會改變颱風接近測站的對應時間，造成峰值在該測站發生的時間可能較決定性預報提前或延後。若同時考量強度及路徑成員的組合，成員數會提升至原本考量數量的平方倍，並且在暴潮歷線中得到較大的偏差極值。在決定性預報就已經取得相對準確的測站而言，考量如次大量的系集成員反而可能造成過度預報的現象。

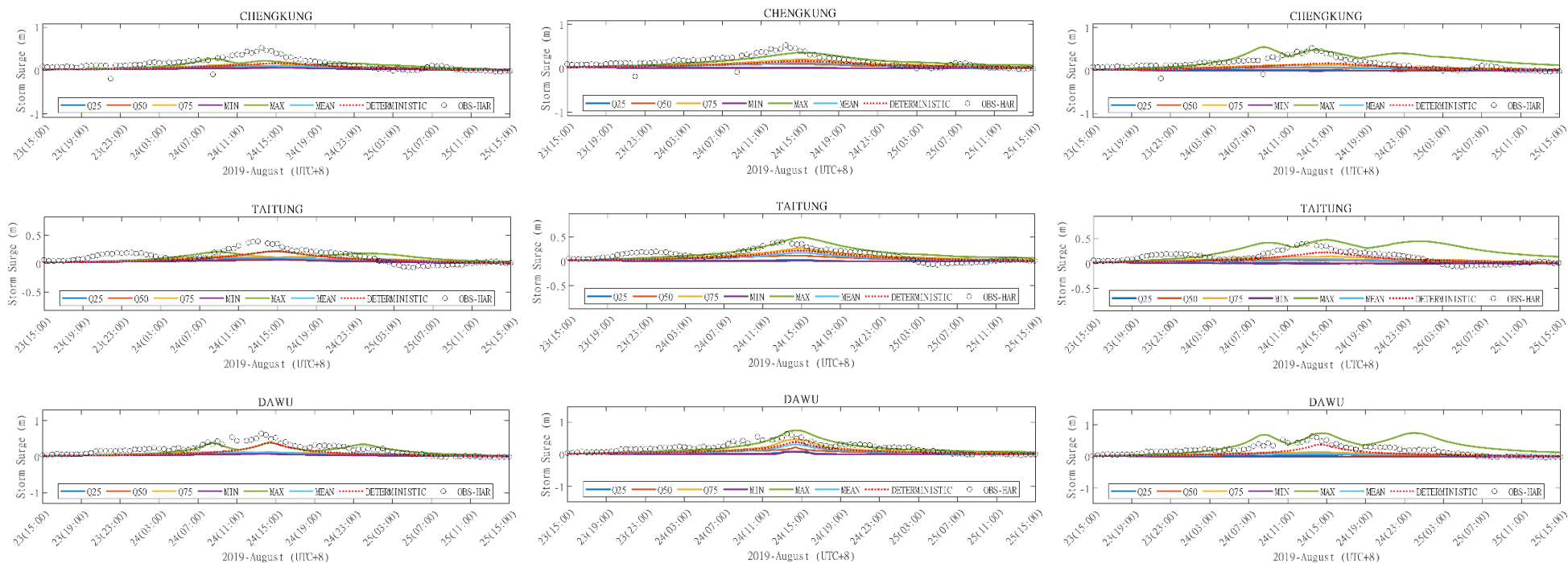


圖 4—16 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員

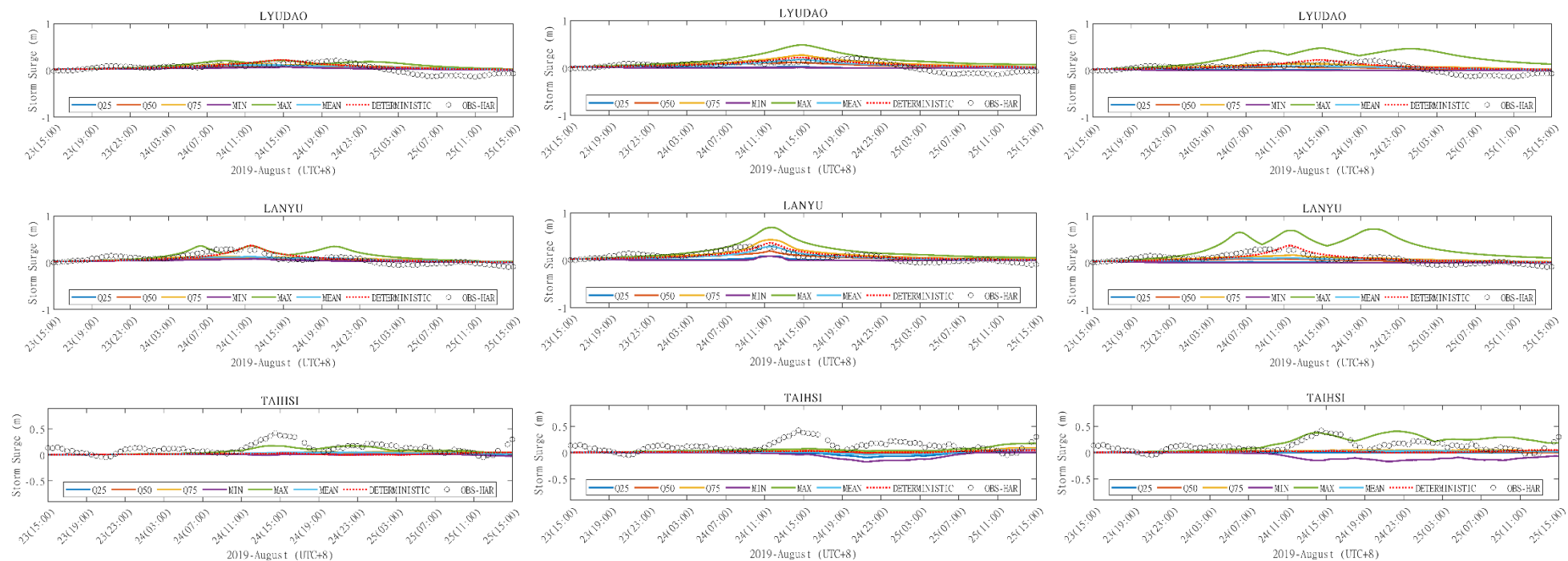


圖 4—17 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員

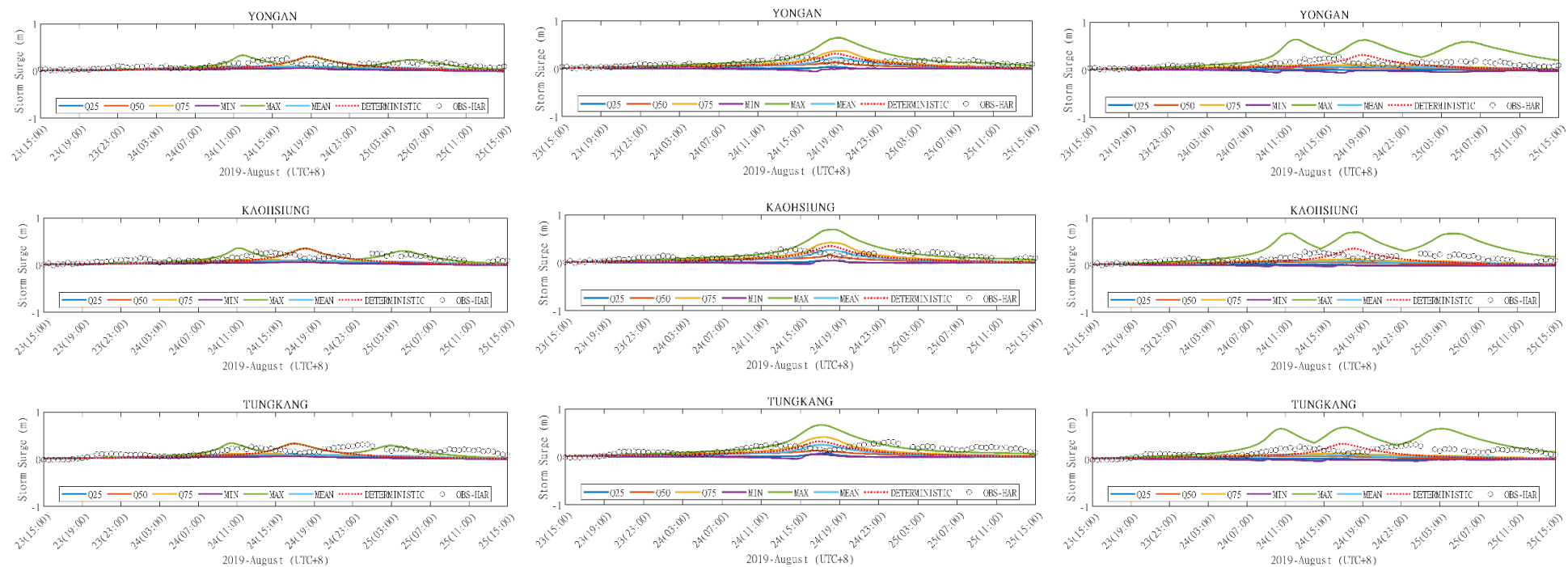


圖 4—18 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員

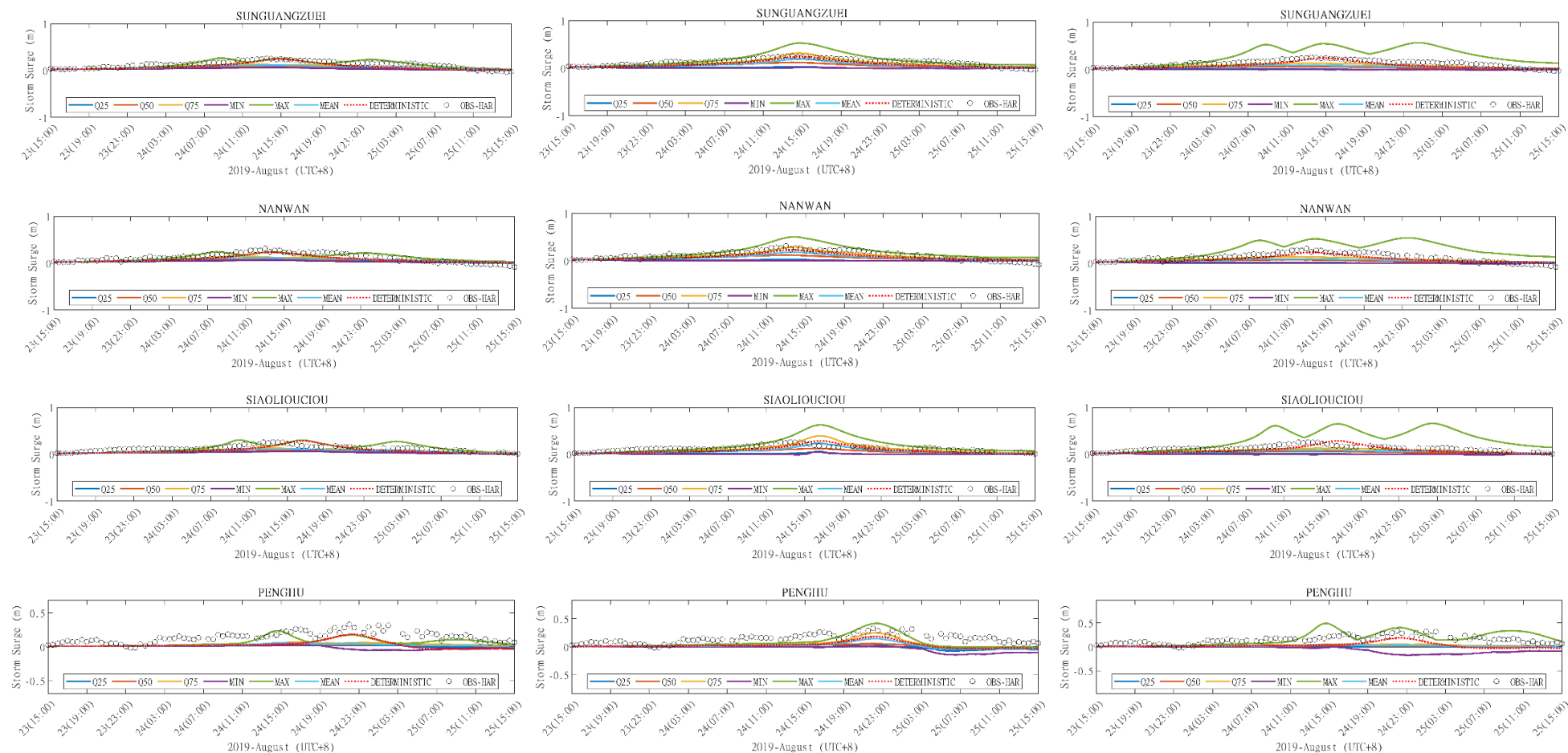


圖 4—19 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員

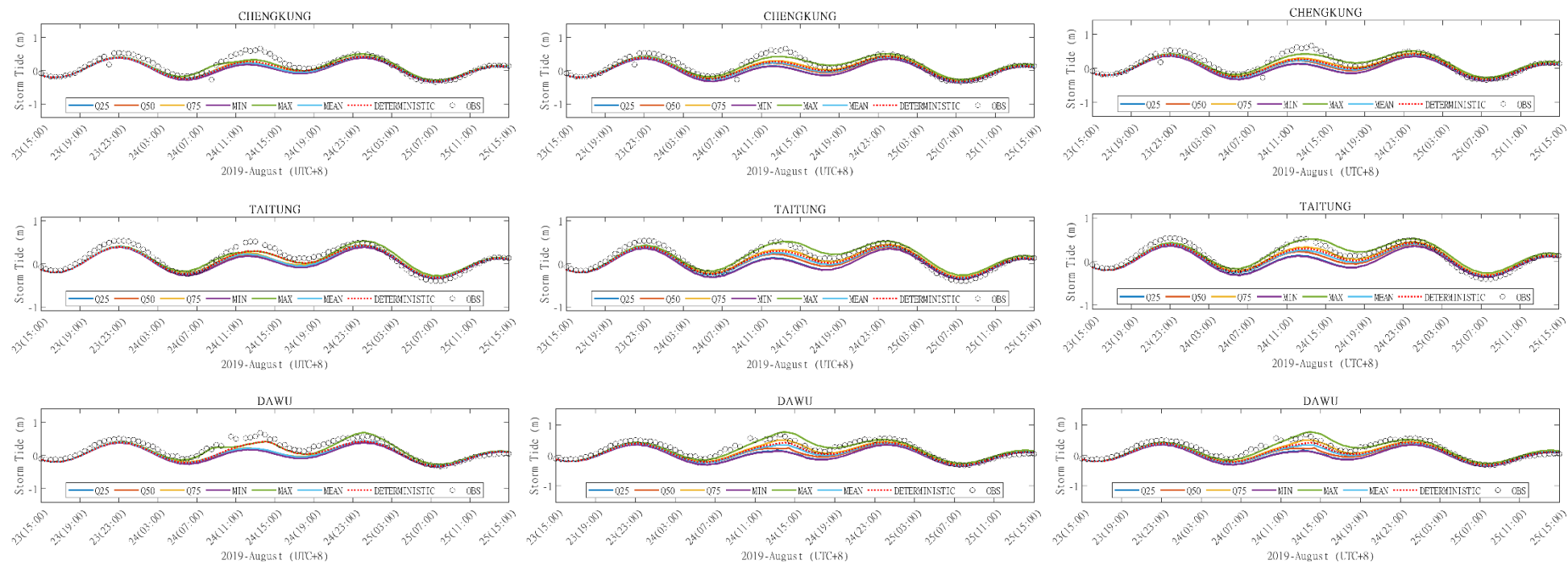


圖 4—20 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員

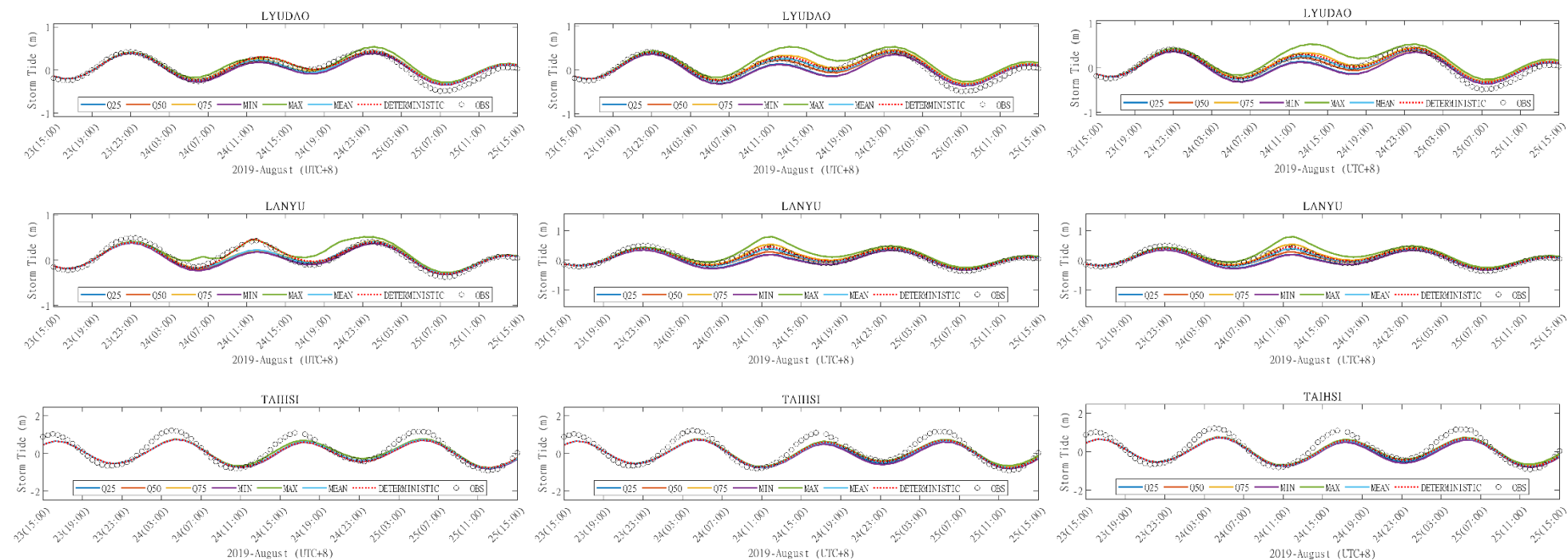


圖 4—21 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
(左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員

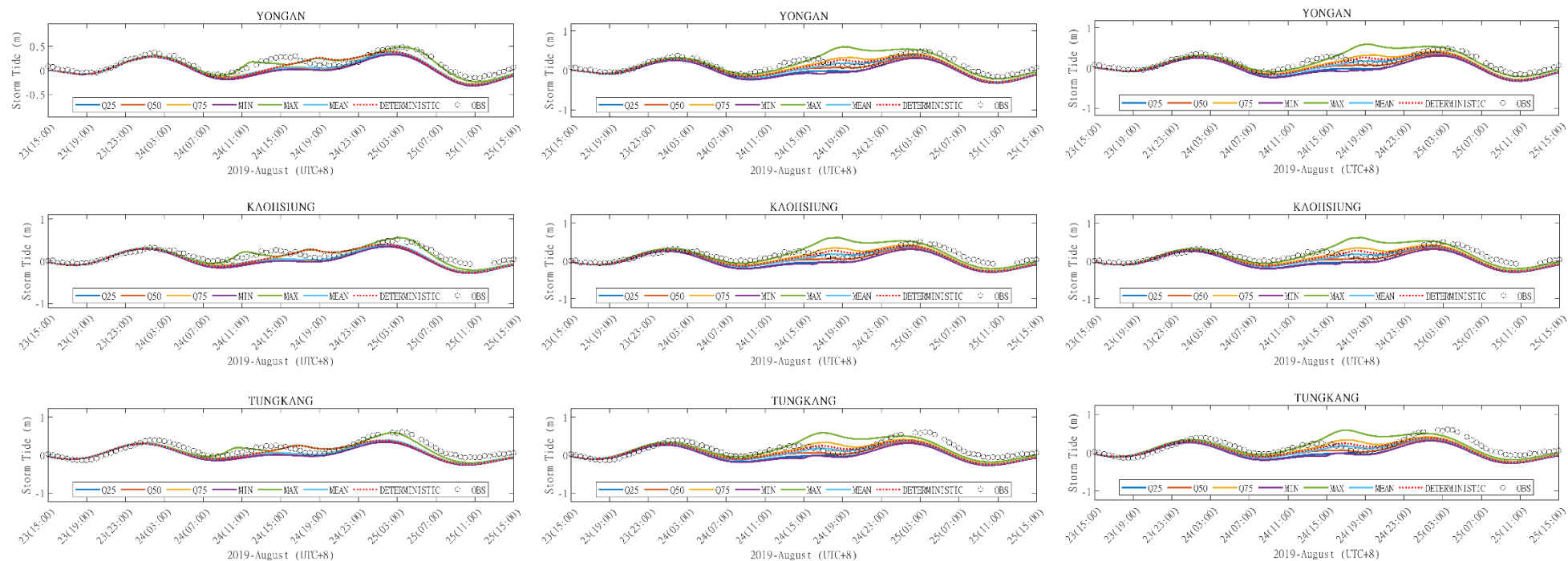


圖 4—22 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員

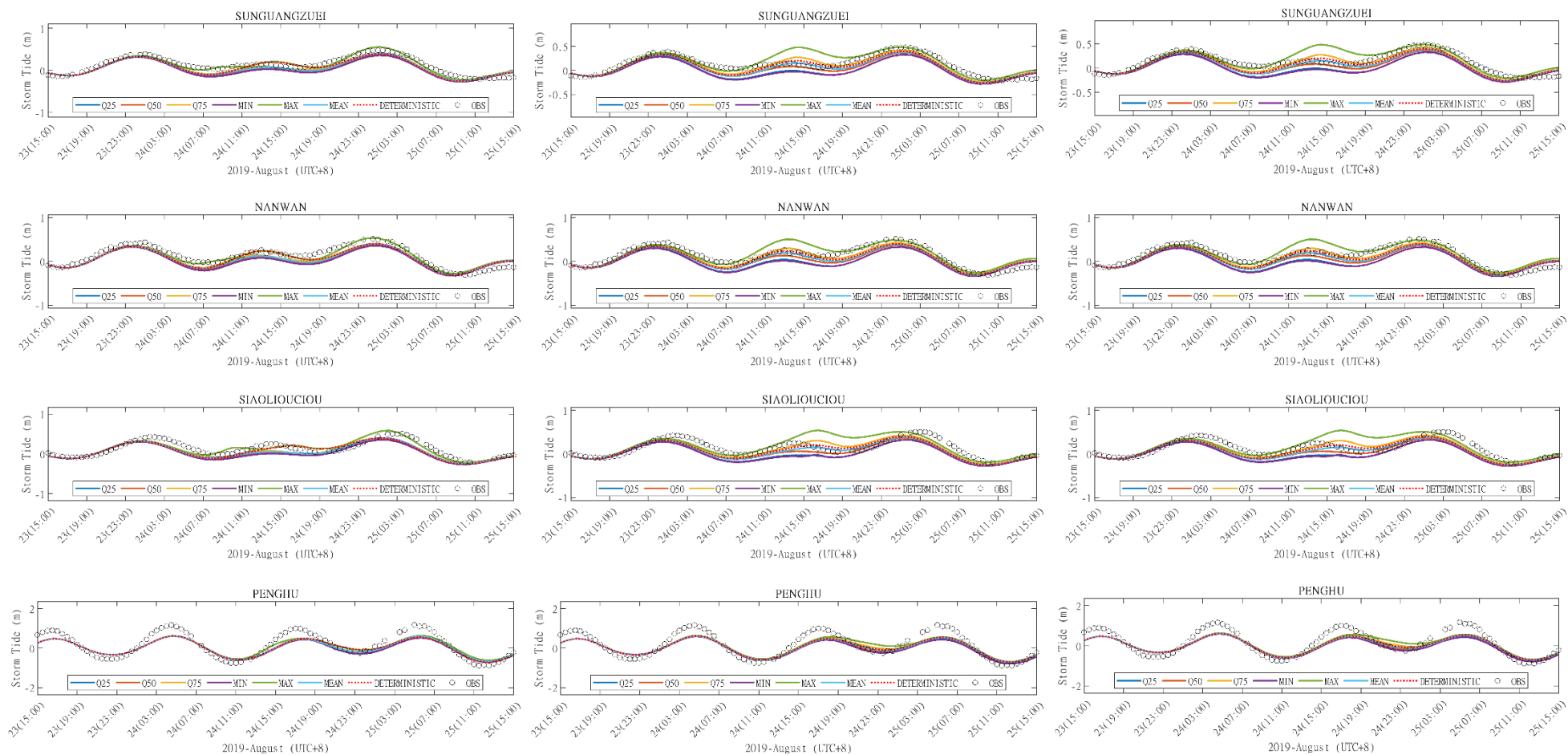


圖 4—23 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員

第五章、潮汐資料觀測比對

本團隊於過往關於風暴潮的研究中，通常利用模式預報水位變化與實際觀測資料進行比對以探討極端天氣對於水位的影響。研究中為探討單純由氣象造成的水位變化，常將觀測資料扣除調和分析預報水位，並將其作為模式預報時校驗暴潮偏差的對象。

在校驗過程中，常可見部分潮位站資料在扣除調和分析預報水位後，殘差值仍然存在週期性震盪的情形，且不論是否有颱風事件，這樣週期性震盪的現象皆持續存在，導致分析時，訊號隱藏在這些週期震盪之中而無法辨識極端天氣對沿岸造成的影響程度。

本研究目的為降低潮位站觀測水位與調和分析殘差值之週期性震盪，以提升分析颱風暴潮時可校驗資料之品質。其中，潮位站觀測到的水位起伏，主要為平均海面、潮汐與其他氣象影響因素的集合。而潮汐起因於天體與地球間之相對運動，其作動機制在可預見的時間尺度內幾乎不變。若依據調和分析法求得之不同頻率分潮振幅和相位後，便可再建構回近似原水位之時間序列，即不含氣象因素之純天文潮。對於單點而言，在具備品質良好及完整的歷史資料時，調和分析法產出的潮汐預報結果通常要比依據動量和質量守衡的流體力學方程式構成的數值模式數值方法準確。

研究中將首先利用潮汐調和分析模式 Utide 模式 (Codiga, 2011)，分析 2019 年至 2020 年各潮位站觀測水位取得分潮組成及天文潮水位，利用方均根誤差、平均絕對誤差、決定係數、相關係數等統計參數，與氣象局現有作業中調和分析預報水位進行比較兩者之分析結果。除了用模式計算調和分析水位外，研究中亦利用平均值、中位數、平均絕對偏差及標準差等統計參數觀察兩者預報與觀測水位殘差值之統計特性。

於分析近兩年觀測水位所得之調和分析參數，將被用於預報 2021 年之天文

潮水位，並與局內作業中調和分析水位一同透過前述統計參數，檢視預報 2021 年潮位站觀測水位之成效。

在完成近兩年資料分析後，研究更進一步探討調和分析採用不同資料長度(3 年/2 年/1 年)所得之調和分析參數，對於下一年度水位預報之影響，以求在往後時間中能夠固定取得最有效率或結果最佳之調和分析天文潮水位。

此外，由於國內各單位基於業務職掌需要而進行潮位觀測，為能維持長期運作，大多選擇於港內穩固的結構物處架設儀器，而非外海。氣象局內作業中暴潮預報模式為顧及預報時效，數值網格計算域並不足以解析港口尺度的地形細節，故本研究將接著透過氣象局現有的港內外潮位站觀測資料，以比對小區域的港內外潮汐差異，以分析暴潮預報系統與觀測資料校驗時可能的誤差來源。

5.1. Utide 模式介紹

傳統潮汐分析方法對多年記錄的適用性常受到限制，其中一個原因是，用於節點/衛星校正的標準方法對於超過一年或兩年的線性時間記錄（例如 Foreman 與 Henry,1989）會變得不準確。這需要將記錄分成持續時間約為一年的段落，對每個段落進行單獨的分析，然後在最後一步中組合分析結果，但這似乎沒有標準做法。

另一個限制是，幾乎所有標準方法都需要資料有均勻的時間採樣分布。雖然 Foreman 等人(2009)針對不規則時間採樣的一維資料（單點水位時序資料）開發了一種有效的方法，但選擇潮汐組成的方法仍然不太明確，表明需要新的診斷方法。此外，由於求解潮汐成分的方法及信賴區間的計算，皆依賴於自頻譜密度和/或交叉譜密度，因此某些標準方法所依賴的快速傅立葉變換 (FFT) 在不規則時間取樣的情況下將會成效不彰甚至無法應用。

本研究中選用 Utide 模式 (Codiga, 2011) 作為潮汐分析的軟體工具，該軟體將數種現有的潮汐分析方法集大成（如表 5—1 所示），並利用部分專門設計的增強功能以實現對不規則時間間隔紀錄的資料處理。模式的主要基礎是 Godin (1972)提出的諧波分析理論，然後由 Foreman (1977; 1978)和隨附的 Fortran 程序擴展到實際應用。氣象局內業務單位所使用的調和分析工具即為該程序，最多可分析出 146 個分潮，其中包含 45 個主要天文分潮(main astronomical constituents) 與 101 個淺水分潮(shallow water constituents)。這個程序隨後被 Pawlowicz 等人 (2002)以 Matlab 編碼作為“t_tide”程式，且已成為物理海洋學界廣泛接受的標準實用程序。t_tide 中添加了一種信賴區間的估計方法，該方法可以看到殘差的頻譜特徵，而不是假設白噪音(white noise)為訊號基底。模式中還增加了從餘弦和正弦模型係數的不確定性中產生四個潮流橢圓參數的信賴區間的能力，使用非線性基礎關係的線性化形式或蒙特卡洛不確定性傳播。Leffler 與 Jay (2009)則提出了較為穩定的求解方法，並證明迭代重新加權最小二乘法 (iteratively-reweighted least squares, IRLS) 方法可以最大限度地減少資料中異常值的影響，相對於標準

普通最小二乘法 (ordinary least squares , OLS)，縮小了其信賴區間，對選擇分潮過程有重要的幫助。Foreman 等人 (2009) 提出了一種處理不規則分佈的時間採樣的方法和附帶的 Fortran 代碼。此外，他們的方法包括節點/衛星校正、格林威治相位計算等修正，這樣的修正在多年的時間段內是準確的，修正的資料長度上限高達 18.6 年。他們的方法還允許從一個參考分潮中推斷出多個分潮。

UTide 由一對易於理解和操作的 Matlab 函數組成，其中 `ut_solv()` 用於分析，`ut_reconstr()` 使用分析結果重建時間序列以進行後報或預測。它們旨在幫助簡化最典型潮汐分析的各分潮組成，包括選擇分潮和信賴區間估計，適用於二維（例如潮汐流）和一維（例如海平面）情況。模式的分析功能接受時間分佈規則或不規則的資料，可以為持續時間長達 18.6 年的記錄提供準確的節點校正結果，而重建函數則使用分析出的分潮組合重建使用者指定時間區段中的擬合潮汐水位，其中包含 68 組分潮。雖然這些函數包含一組最佳默認選項，有助於讓不太熟悉潮汐方法細節的用戶更直接地進行分析，但它們也接受可以方便地使用不同方法選擇進行實驗的選項。

表 5—1 現存潮汐分析軟體工具比較表

	Foreman 1977;1978	Pawlowicz et al. 2002	Leffler and Jay (2009)	Foreman et al. 2009	UTide (Codiga, 2011)
節點/衛星 校正	後擬合(Post-fit) 線性時間	後擬合(Post-fit) 線性時間	後擬合(Post-fit) 線性時間	矩陣求解 精確時間	矩陣求解； 預設為精確時間，可選線性 時間
格林威治相的 天文參數	後擬合(Post-fit) 線性時間	後擬合(Post-fit) 線性時間	後擬合(Post-fit) 線性時間	矩陣求解 精確時間	矩陣求解； 預設為精確時間，可選線性 時間
分潮推斷	後擬合(Post-fit) 數學近似	後擬合(Post-fit) 數學近似	後擬合(Post-fit) 數學近似	矩陣求解 精確推斷	矩陣求解； 預設為精確推斷，可選數學 近似
缺失資料 處理方式	線性內插	線性內插	線性內插	矩陣求解 省略缺失點	預設為矩陣求解，不規則時 間區段會對其以固定時間間 隔取樣，可選線性內插
不定間隔數據	無法處理	無法處理	無法處理	矩陣求解	矩陣求解
信賴區間法	餘弦/正弦係數 推算白噪殘值 頻譜	潮流橢圓參數；非線 性潛在關係的線性化 形式；蒙特卡羅不確 定性傳播；白噪音/ 殘值的頻譜分析；簡 化協方差矩陣	潮流橢圓參數；非線性潛 在關係的線性化形式；蒙 特卡羅不確定性傳播；白 噪音/殘值的頻譜分析； 簡化協方差矩陣	餘弦/正弦係數； 推算的白噪殘值頻 譜	潮流橢圓參數；非線性潛 在關係的線性化形式；蒙特 卡羅不確定性傳播；白噪音 或殘差值的頻譜分析；簡 化協方差矩陣
求解方法	普通 最小二乘法	普通 最小二乘法	迭代重新加權 最小二乘法	普通 最小二乘法	預設為迭代重新加權最小二 乘法，可選普通最小二乘法
二維資料	是	是	是	否	是

5.2. 測站分布

於中央氣象局開放資料平台之 API 介面中可取得之潮位觀測站列表如表 5—2 所示，表內依序列出現行測站代碼、中英文站名、資料記錄起始日期、資料結束日期、觀測站所在位置（經度、緯度）及其他備註說明。

其中，蘭嶼、馬祖、澎湖馬公等站，內政部已於 2018 年重新公告各離島水準高程起算正高，基準面有所改動，故後續研究選用潮位資料將以 2018 年至 2020 年之調和分析資料與潮位站觀測資料為最大選用資料區段。

本研究所用之觀測資料最後擷取時間為 2021 年 6 月 2 日，因此表格內部紀錄資料結束日期為 2021 年 6 月 1 日者皆為即時運作正常之測站，部分測站如東沙島（198），於官方說明備註欄中便載明由於通訊不良，資料時常缺漏，因此當日擷取資料時最後可取得之資料時間為 2021 年 4 月 16 日。東港最後資料紀錄時間為 2020 年 9 月 2 日。

圖 5—1 至圖 5—30 為各測站之所在位置截圖，依據表 5—2 排序，資料來源為 Google Map，測站位置點以紅點標示，地圖比例尺多為 100 公尺。其中，基隆、臺中、鹿港、、高雄、東沙島、花蓮、蘇澳、澎湖馬公等地，因港口規模較大，地圖比例尺設為 500 公尺以觀察港口外形。塭港潮位站離岸較遠，故地圖比例尺亦為 500 公尺以觀察沿岸海岸線分布情形。

從表 5—2 搭配圖 5—1 至圖 5—30 可以確認，國內所設之潮位站大多位漁港或港側，如龍洞、麟山鼻、福隆、淡海、基隆、長潭里、竹圍、新竹、外埔、臺中、鹿港、箔子寮、東石、將軍、高雄、小琉球、東港、後壁湖、成功、花蓮、蘇澳、烏石、馬祖、澎湖馬公、吉貝等站皆位於港內。蘭嶼潮位站位於蘭嶼開元漁港，地圖上無法判別港內或港外，七美潮位站位於七美漁港南防波堤近紅燈塔。淡水潮位站位於河口沿岸，塭港潮位站位於嘉義塭港漁港近海 2 公里觀測樁，東沙島潮位站位於東沙島內。

表 5—2 中央氣象局潮位觀測站列表

現行 站碼	站名	英文站名	資料 起始日期	資料 結束日期	經度	緯度	備註
1102	淡水	Tamsui	1949/3/2	2021/6/1	121.42	25.18	淡水河油車口 常因淤積量測不到低潮位
1226	龍洞	Longdong	2001/5/10	2021/6/1	121.92	25.10	龍洞南口遊艇港內
1206	麟山鼻	Linshanbi	2003/11/1	2021/6/1	121.51	25.28	石門區麟山鼻漁港
1826	福隆	Fulong	2011/9/30	2021/6/1	121.95	25.02	福隆漁港碼頭
11006	淡海	Danhai	2017/3/15	2021/6/1	121.41	25.18	漁人碼頭第 3 泊地外提
1516	基隆	Keelung	1946/5/1	2021/6/1	121.75	25.16	基隆港西 33 號碼頭
12191	長潭里	ZhangTanLi	2017/2/22	2021/6/1	121.80	25.14	北寧路 369 巷
1116	竹圍	Zhuwei	1976/8/1	2021/6/1	121.24	25.12	桃園竹圍漁港
112	新竹	Hsinchu	1992/5/27	2021/6/1	120.92	24.85	新竹南寮漁港
113	外埔	Waipu	2003/6/27	2021/6/1	120.77	24.65	後龍鎮海埔里外埔漁港 基準面有逐漸偏移情形， 且有淤積
1436	臺中港	Taichung Port	1971/3/1	2021/6/1	120.53	24.29	臺中港 4 號碼頭
1146	鹿港	Lukang	2016/2/1	2021/6/1	120.42	24.08	彰化縣鹿港鎮崙尾灣漁港 常因淤積量測不到低潮位
1156	箔子寮	Boziliao	2004/8/2	2021/6/1	120.14	23.62	雲林箔子寮漁港
1366	塭港	Wengang	1963/2/2	2021/6/1	120.12	23.47	嘉義塭港漁港近海 2 公里 觀測樁
1166	東石	Dongshi	1992/5/27	2021/6/1	120.14	23.45	嘉義東石漁港
1176	將軍	Jiangjun	1979/10/12	2021/6/1	120.08	23.21	臺南將軍漁港
1486	高雄	Kaohsiung	1947/5/16	2021/6/1	120.29	22.61	高雄港
198	東沙島	Dongshadao	2009/8/23	2021/4/16	116.73	20.70	東沙島內 通訊不良，資料時常缺漏
1386	小琉球	Xiao Liuqiu	2002/1/1	2021/6/1	120.38	22.35	屏東琉球漁港
1186	東港	Donggang	2003/12/10	2020/9/2	120.43	22.47	屏東東港漁港
1196	後壁湖	Houbihu	2007/1/1	2021/6/1	120.75	21.95	恆春後壁湖港海巡隊前方
1396	蘭嶼	Lanyu	1992/7/23	2021/6/1	121.51	22.06	蘭嶼開元漁港
1276	成功	Chenggong	1993/3/1	2021/6/1	121.38	23.10	臺東成功漁港
1256	花蓮	Hualien	1950/6/1	2021/6/1	121.62	23.98	花蓮港內
1246	蘇澳	Su-ao	1981/1/1	2021/6/1	121.87	24.59	蘇澳港內貯木池
1236	烏石	Wushi	2006/1/14	2021/6/1	121.84	24.87	宜蘭烏石港
1926	馬祖	Matsu	2004/1/19	2021/6/1	119.94	26.16	南竿福澳港
1356	澎湖 馬公	Penghu	1955/3/1	2021/6/1	119.58	23.56	澎湖馬公港
13606	七美	Cimei	2017/2/22	2021/6/1	119.42	23.19	七美漁港南防波堤燈塔
13406	吉貝	JiBei	2018/1/23	2021/6/1	119.61	23.74	吉貝碼頭

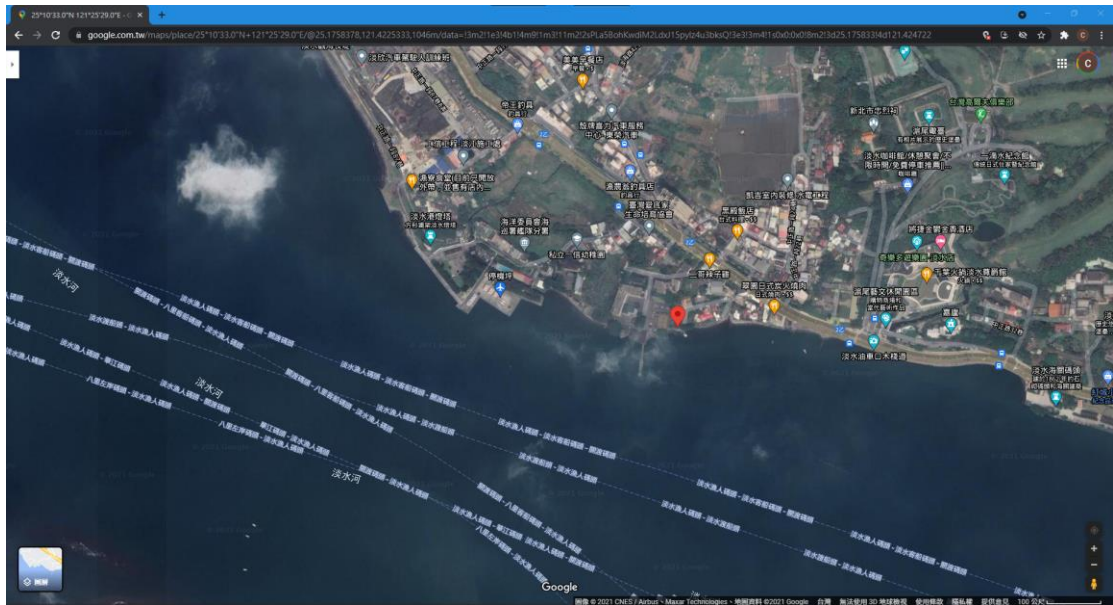


圖 5—1 淡水潮位站（現行站碼 1102）所在位置（淡水河油車口）

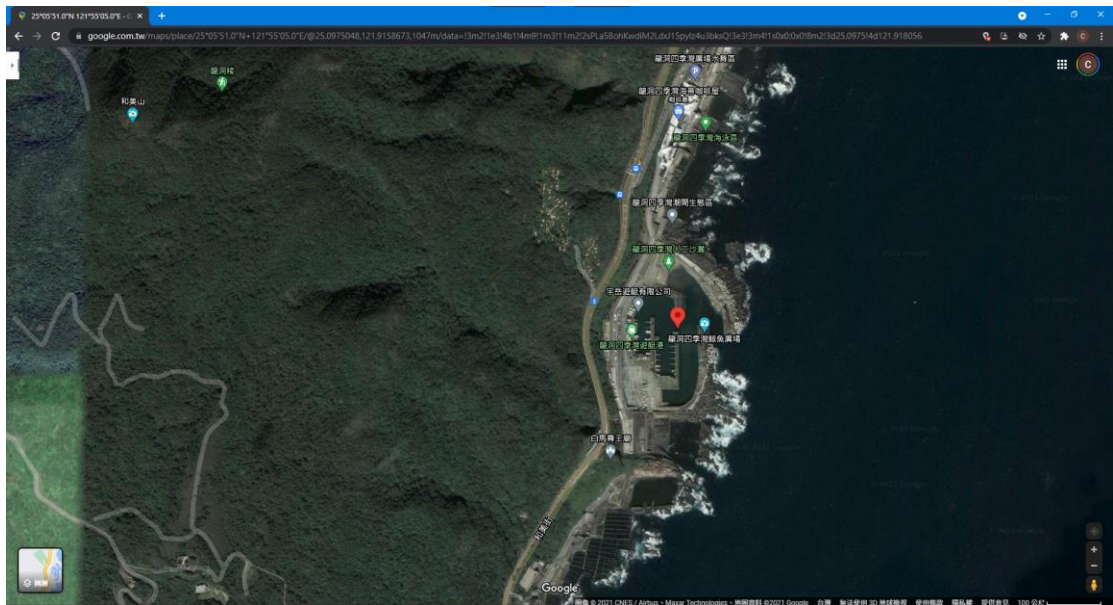


圖 5—2 龍洞潮位站（現行站碼 1226）所在位置（龍洞南口遊艇港內）

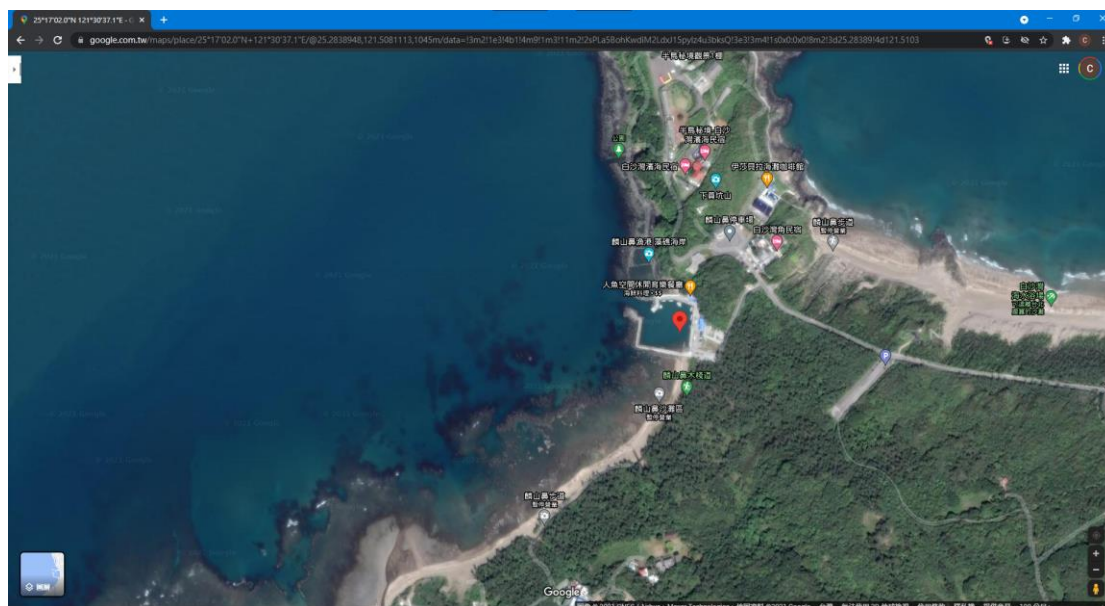


圖 5—3 麟山鼻潮位站（現行站碼 1206）所在位置（石門區麟山鼻漁港）

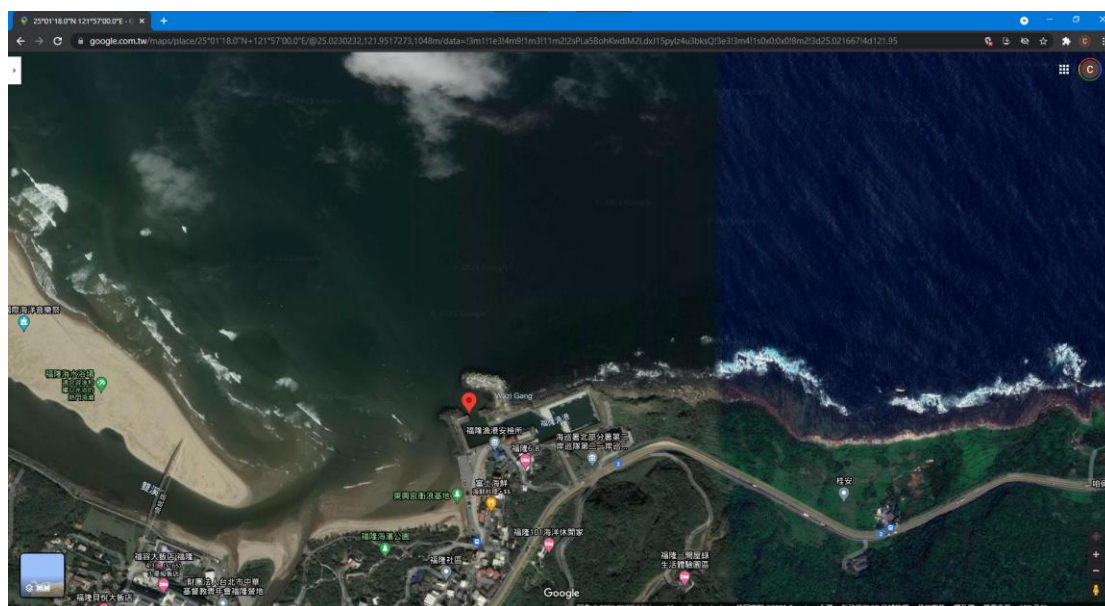


圖 5—4 福隆潮位站（現行站碼 1826）所在位置（福隆漁港碼頭）

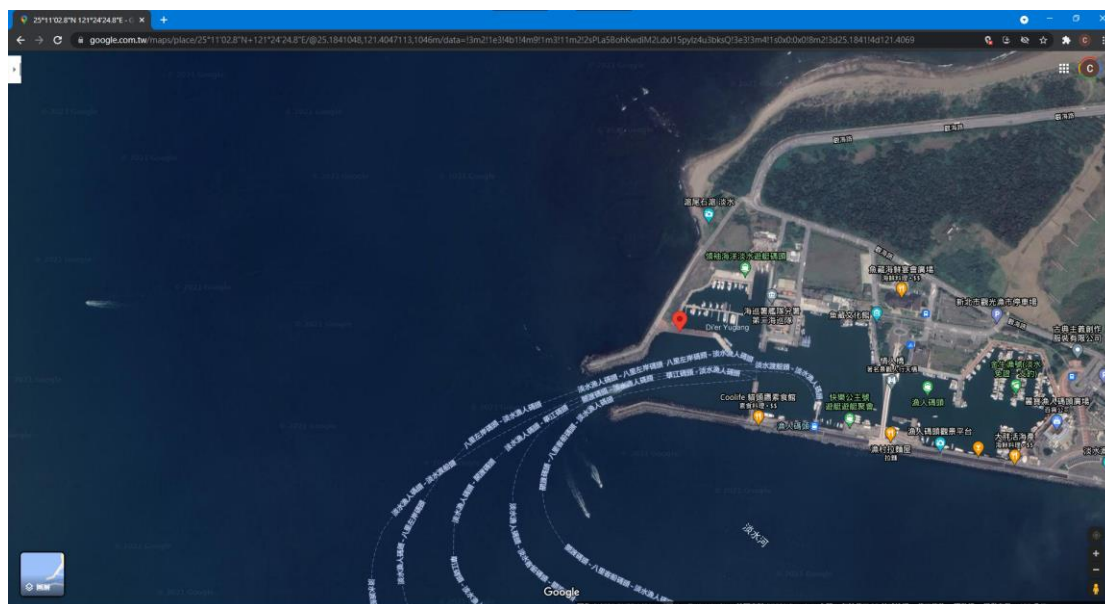


圖 5—5 淡海潮位站（現行站碼 11006）所在位置（漁人碼頭第 3 泊地外提）

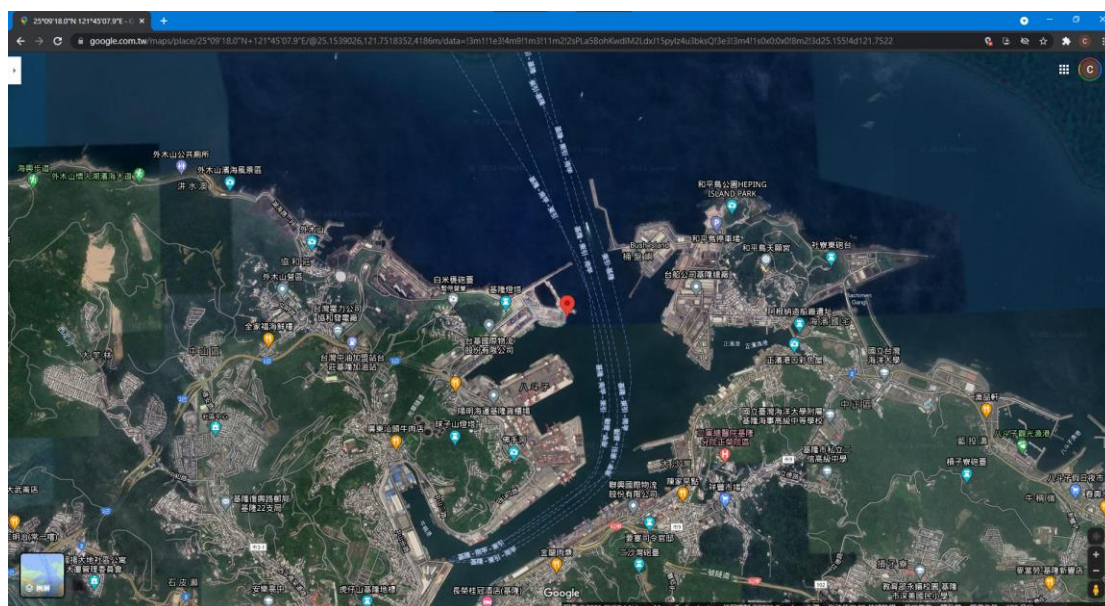


圖 5—6 基隆潮位站（現行站碼 1516）所在位置（基隆港西 33 號碼頭）
（地圖比例尺 500 公尺）

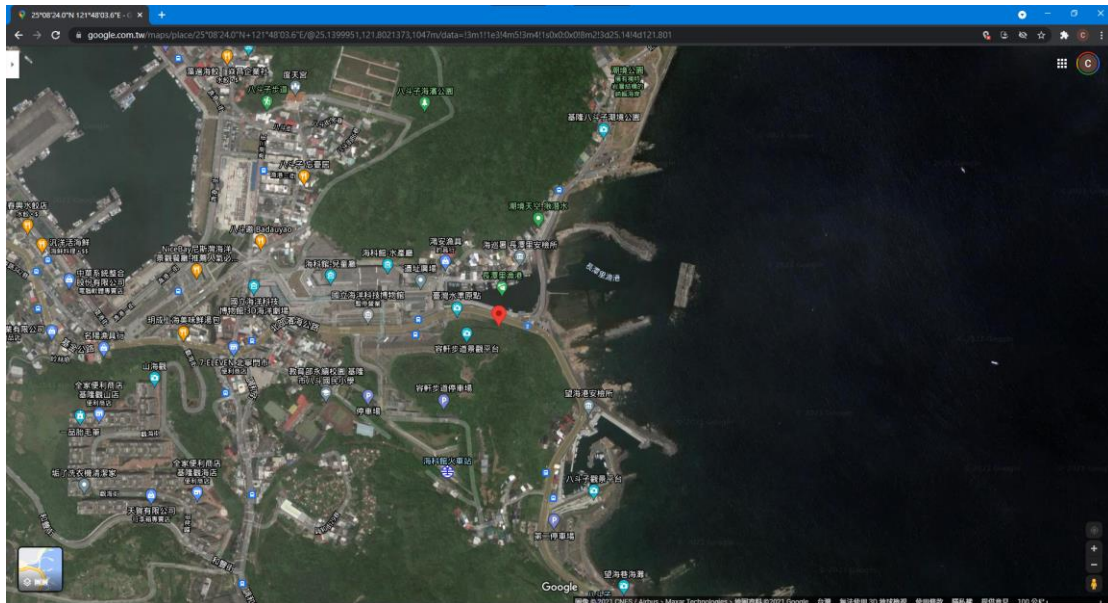


圖 5—7 長潭里潮位站（現行站碼 12191）所在位置（北寧路 369 巷）

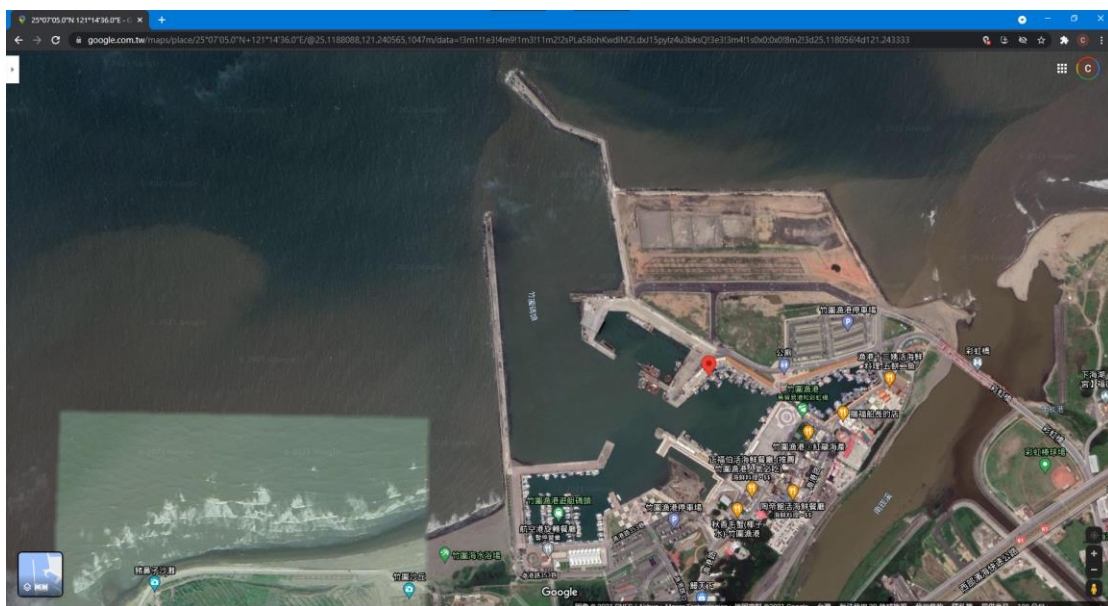


圖 5—8 竹圍潮位站（現行站碼 1116）所在位置（桃園竹圍漁港）

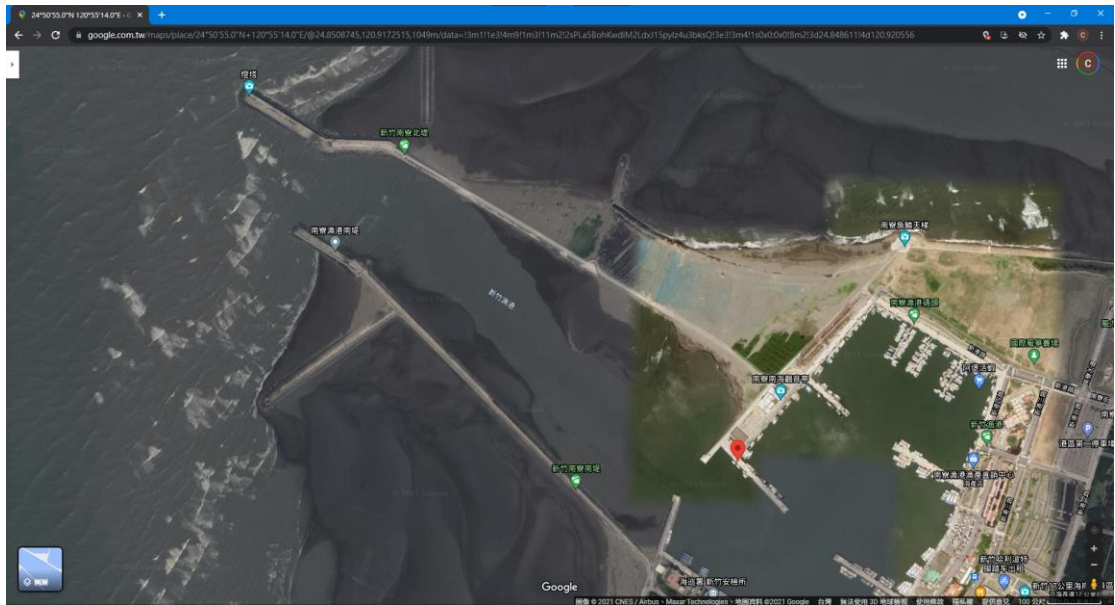


圖 5—9 新竹潮位站（現行站碼 112）所在位置（新竹南寮漁港）

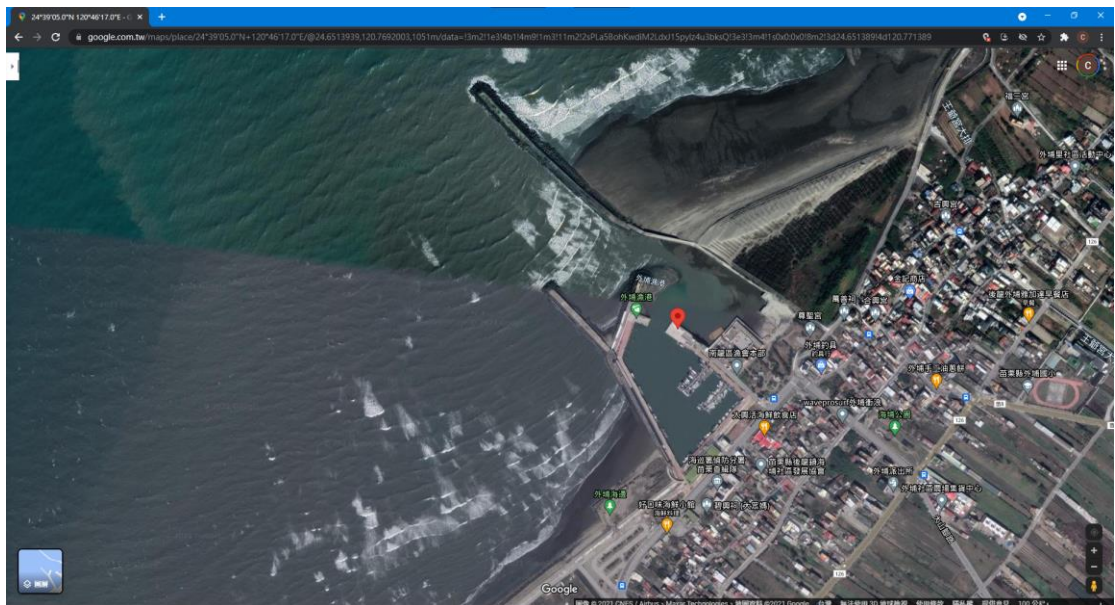


圖 5—10 外埔潮位站（現行站碼 113）所在位置（後龍鎮海埔里外埔漁港）

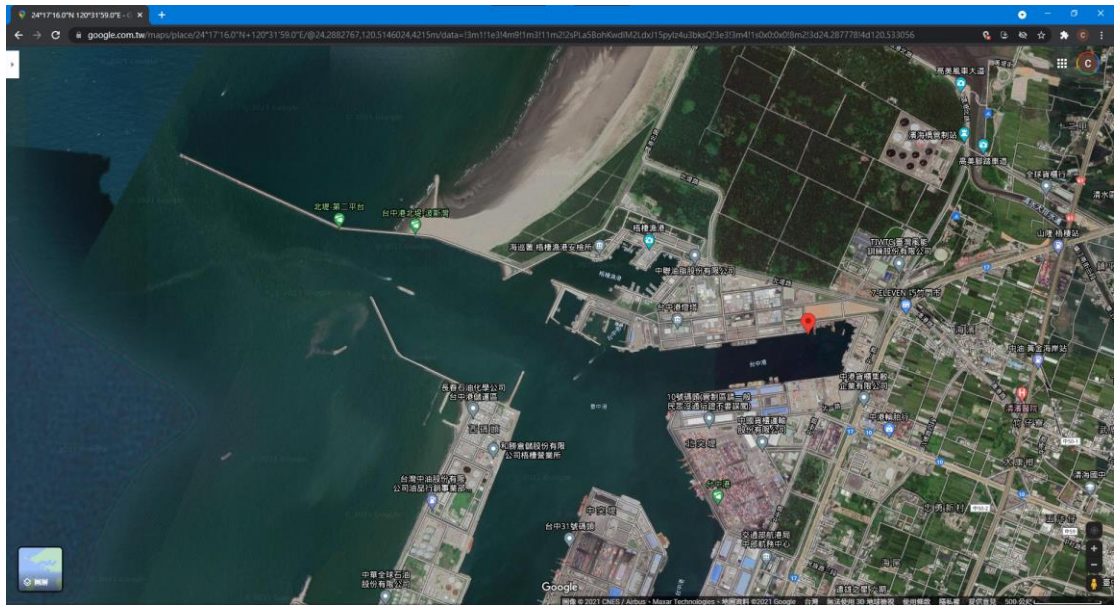


圖 5—11 臺中港潮位站（現行站碼 1436）所在位置（臺中港 4 號碼頭）
（地圖比例尺 500 公尺）

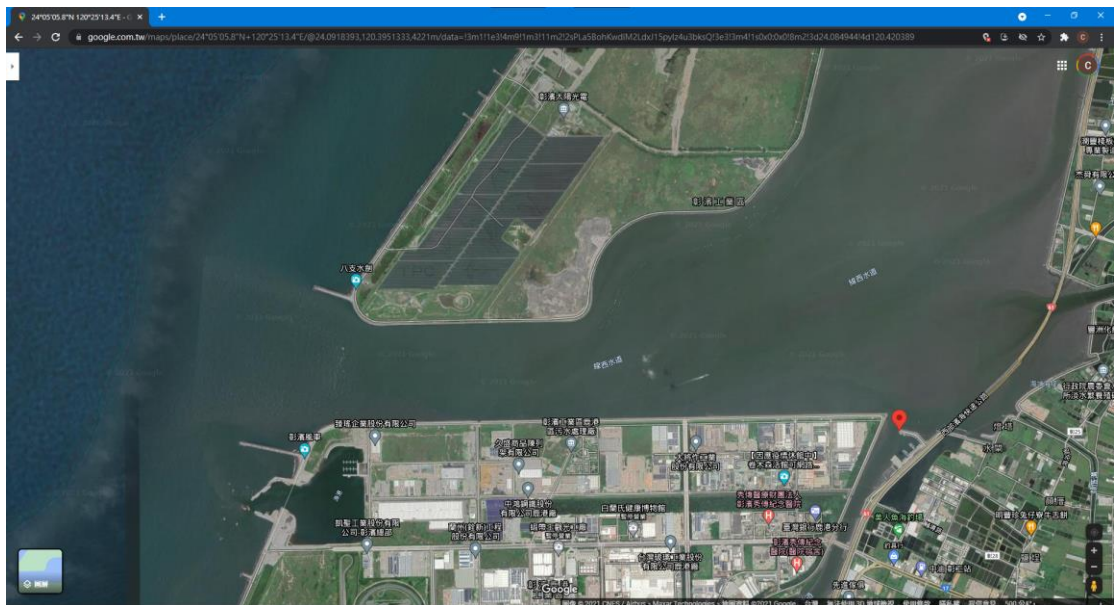


圖 5—12 鹿港福隆潮位站所在位置（彰化縣鹿港鎮崙尾灣漁港）
（地圖比例尺 500 公尺）

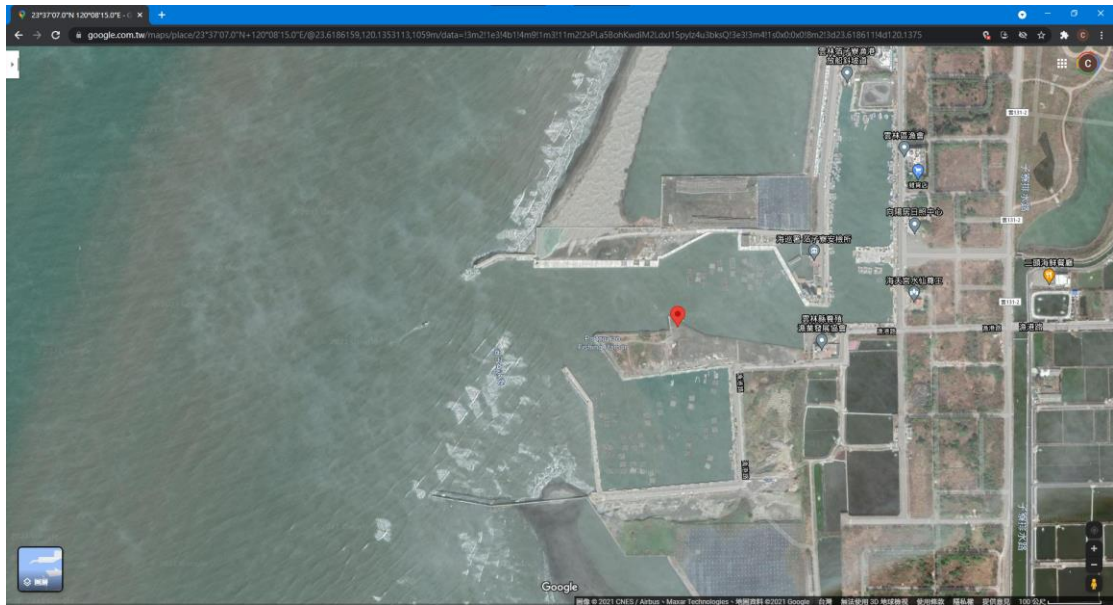


圖 5—13 箔子寮潮位站（現行站碼 1156）所在位置（雲林箔子寮漁港）

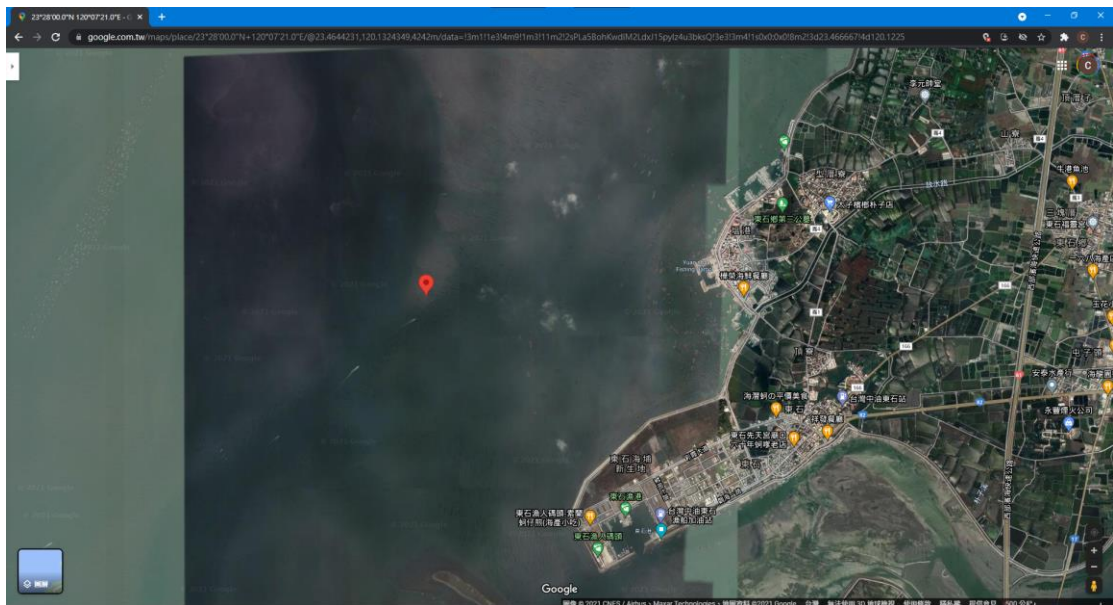


圖 5—14 塭港潮位站（現行站碼 1366）所在位置
（嘉義塭港漁港近海 2 公里觀測樁）（地圖比例尺 500 公尺）

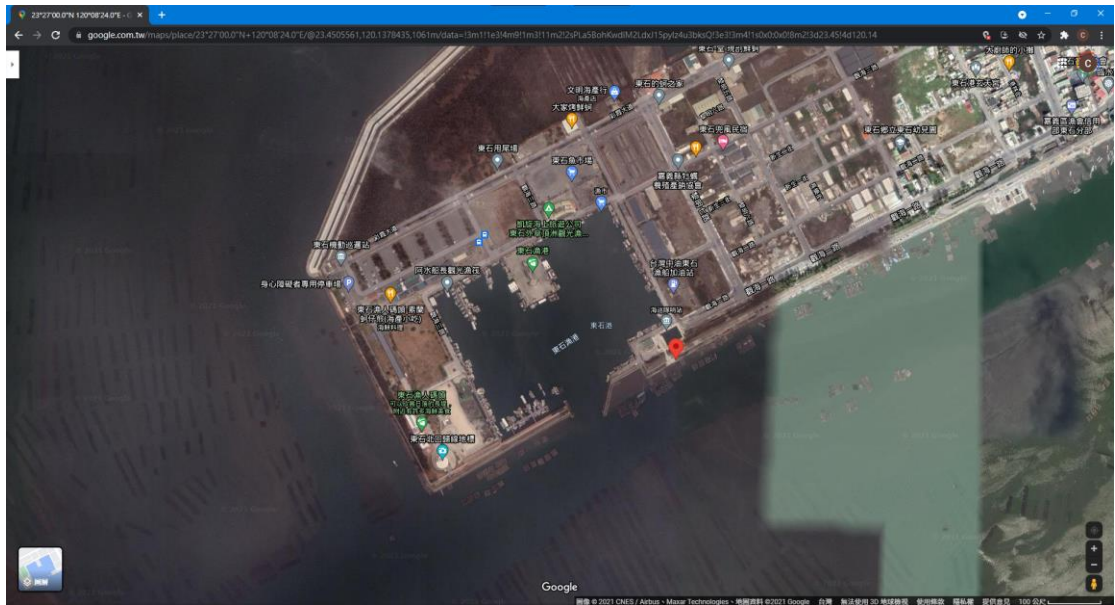


圖 5—15 東石潮位站（現行站碼 1166）所在位置（嘉義東石漁港）

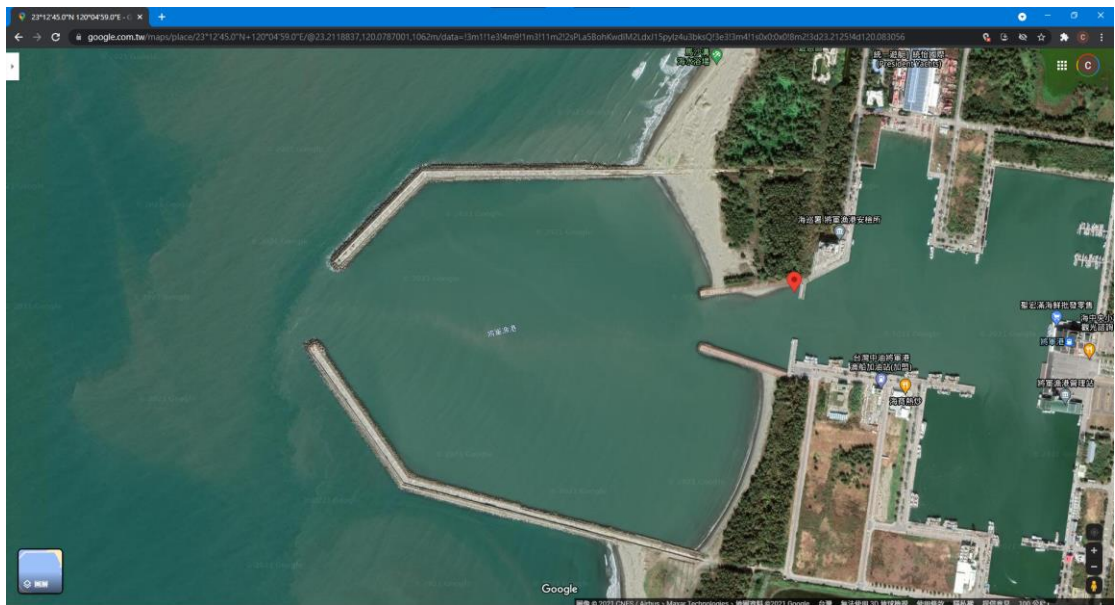


圖 5—16 將軍潮位站（現行站碼 1176）所在位置（臺南將軍漁港）

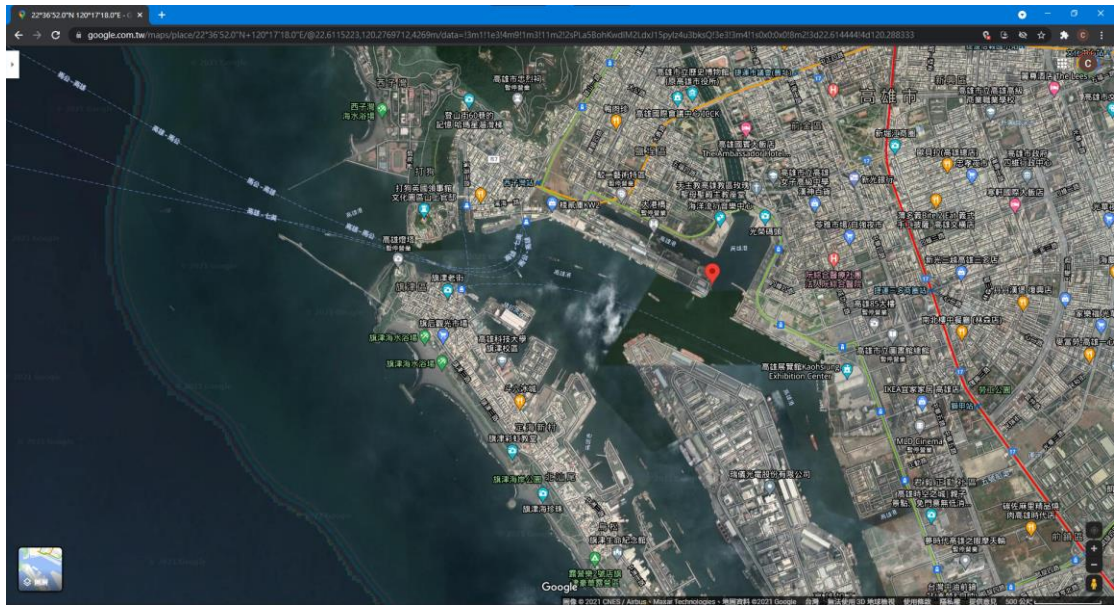


圖 5—17 高雄潮位站（現行站碼 1486）所在位置（高雄港）
（地圖比例尺 500 公尺）

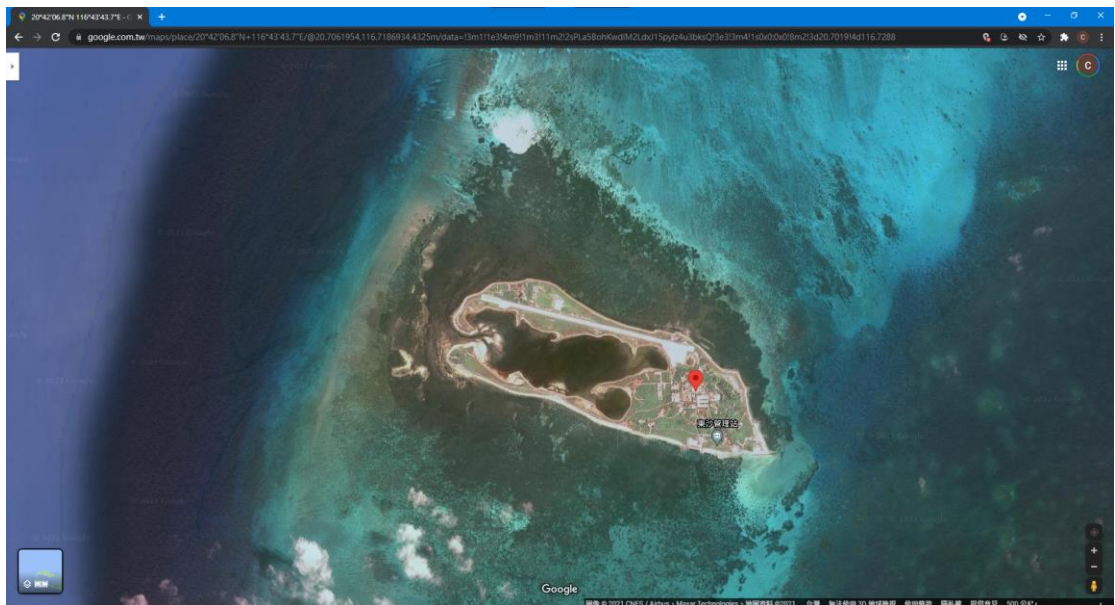


圖 5—18 東沙島潮位站（現行站碼 198）所在位置（東沙島內）
（地圖比例尺 500 公尺）

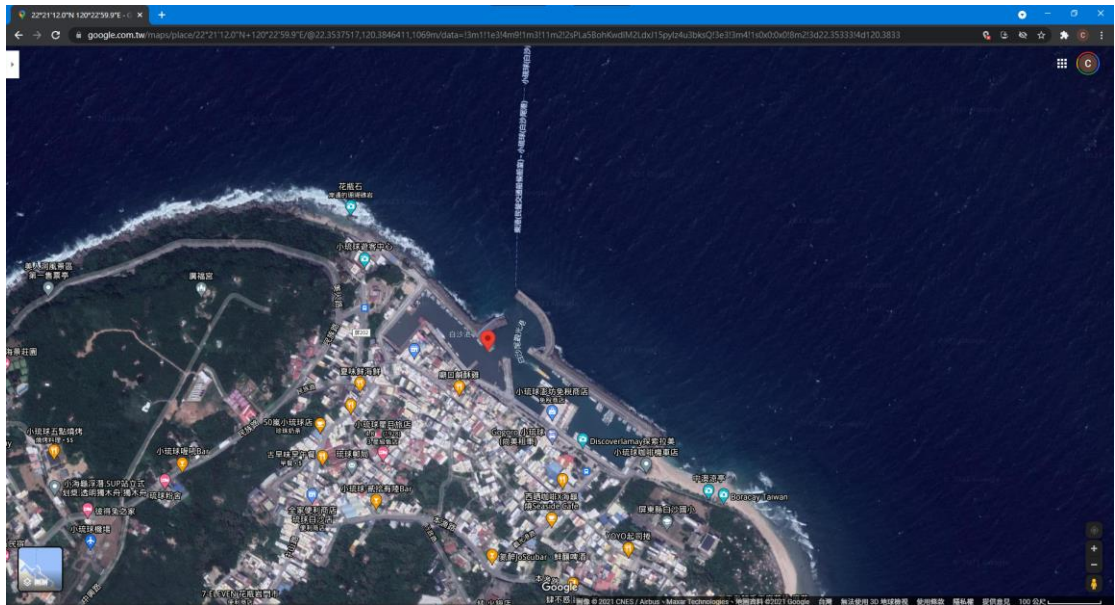


圖 5—19 小琉球潮位站（現行站碼 1386）所在位置（屏東琉球漁港）

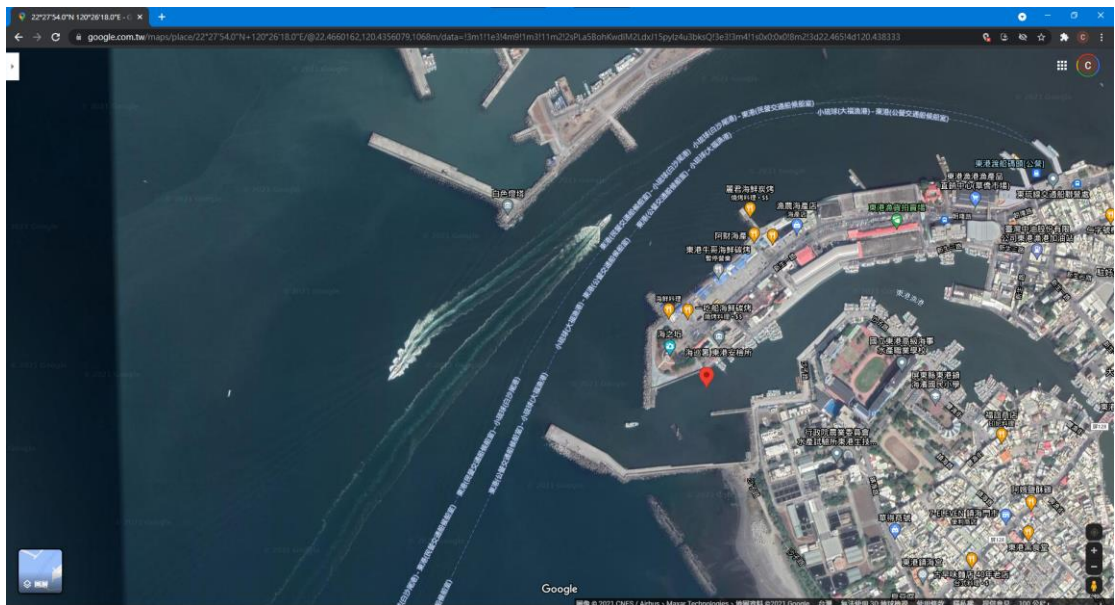


圖 5—20 東港潮位站（現行站碼 1186）所在位置（屏東東港漁港）

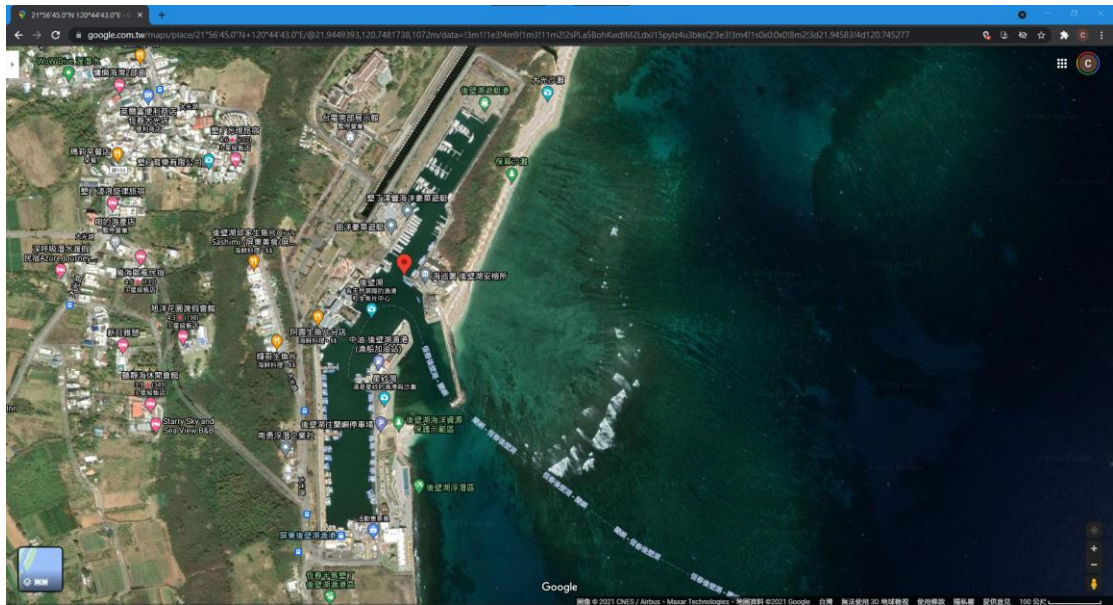


圖 5—21 後壁湖潮位站（現行站碼 1196）所在位置
（恆春後壁湖港海巡隊前方）

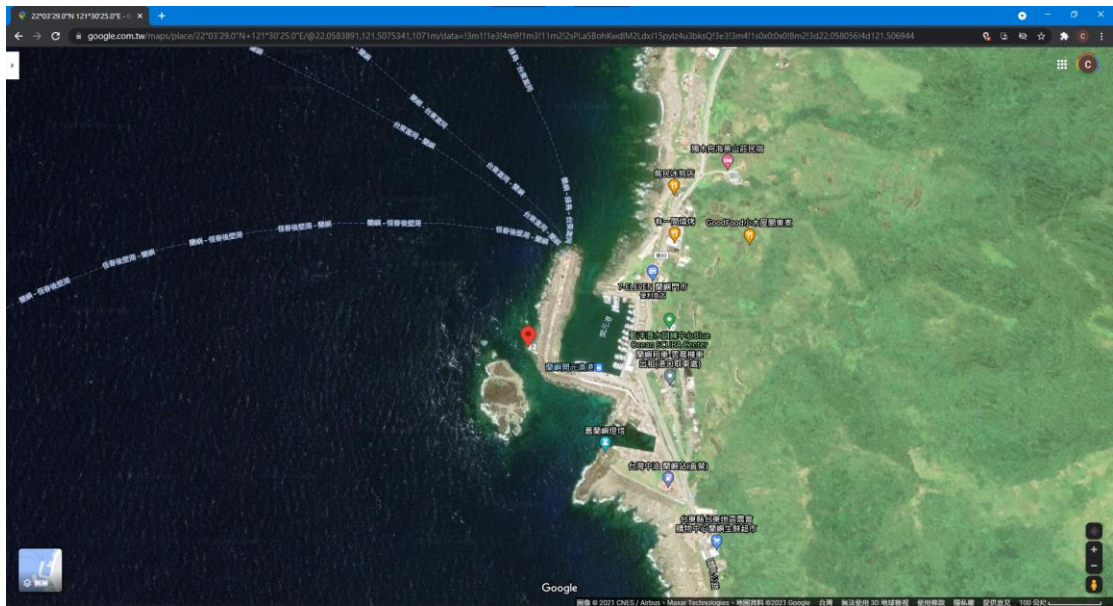


圖 5—22 蘭嶼潮位站（現行站碼 1396）所在位置（蘭嶼開元漁港）

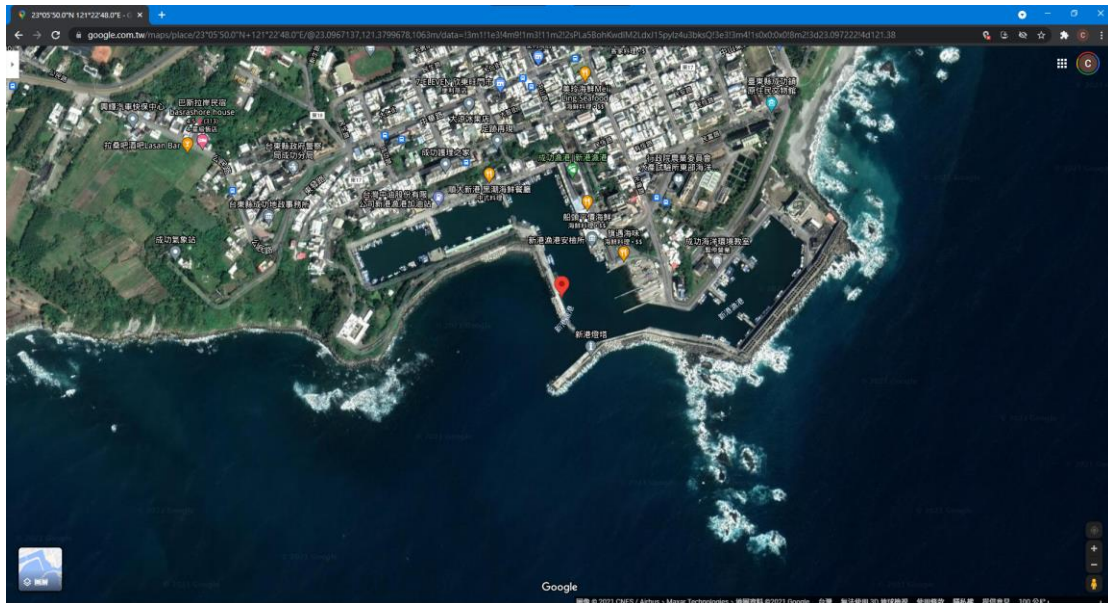


圖 5—23 成功潮位站（現行站碼 1276）所在位置（臺東成功漁港）

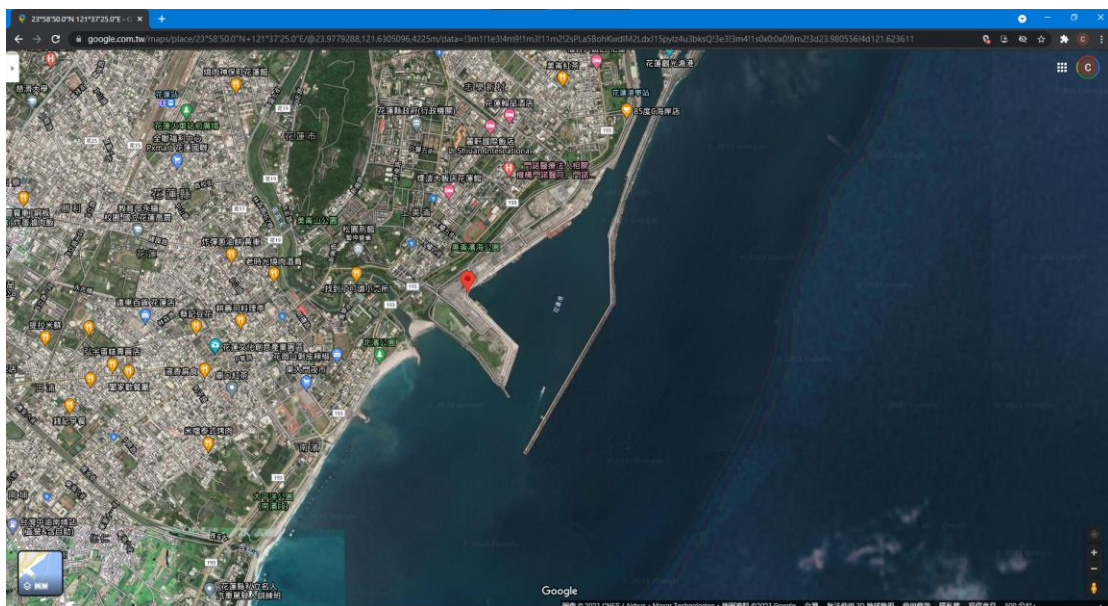


圖 5—24 花蓮潮位站（現行站碼 1256）所在位置（花蓮港內）
（地圖比例尺 500 公尺）

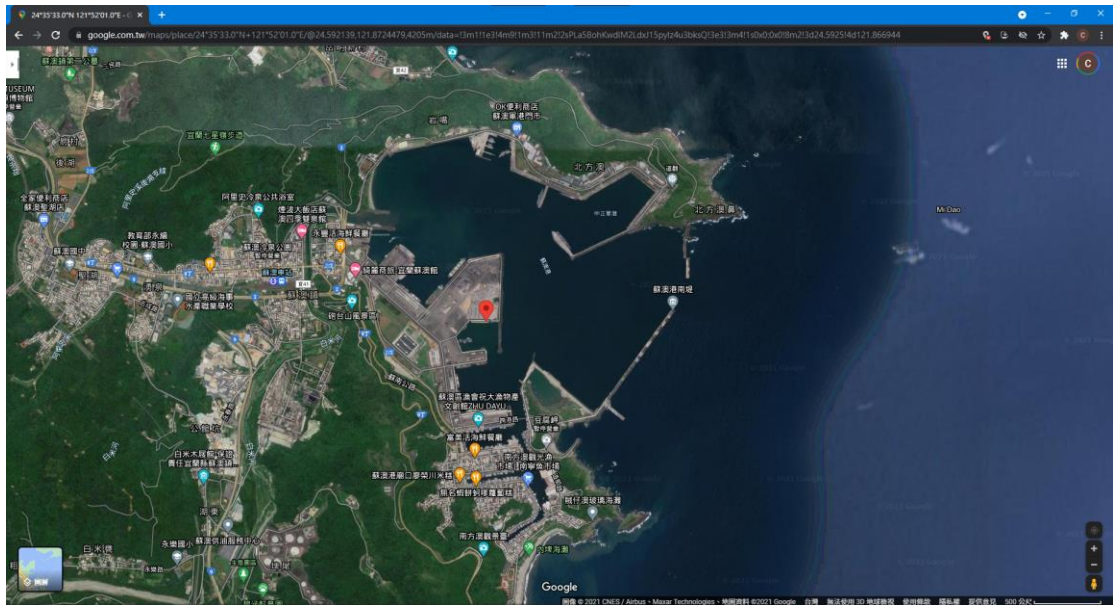


圖 5—25 蘇澳潮位站（現行站碼 1246）所在位置（蘇澳港內貯木池）
（地圖比例尺 500 公尺）

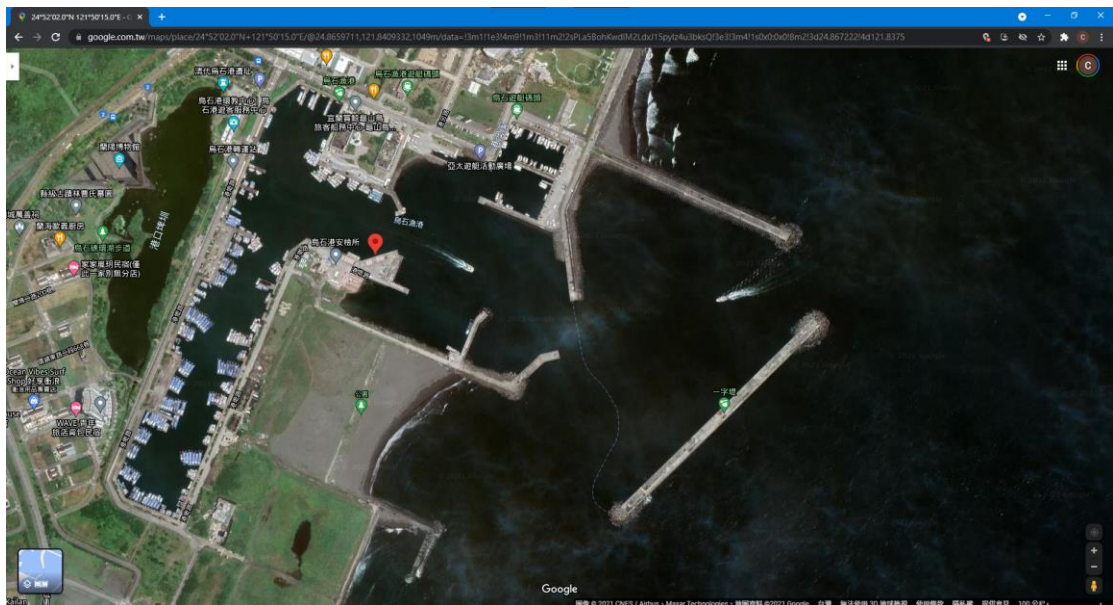


圖 5—26 烏石潮位站（現行站碼 1236）所在位置（宜蘭烏石港）

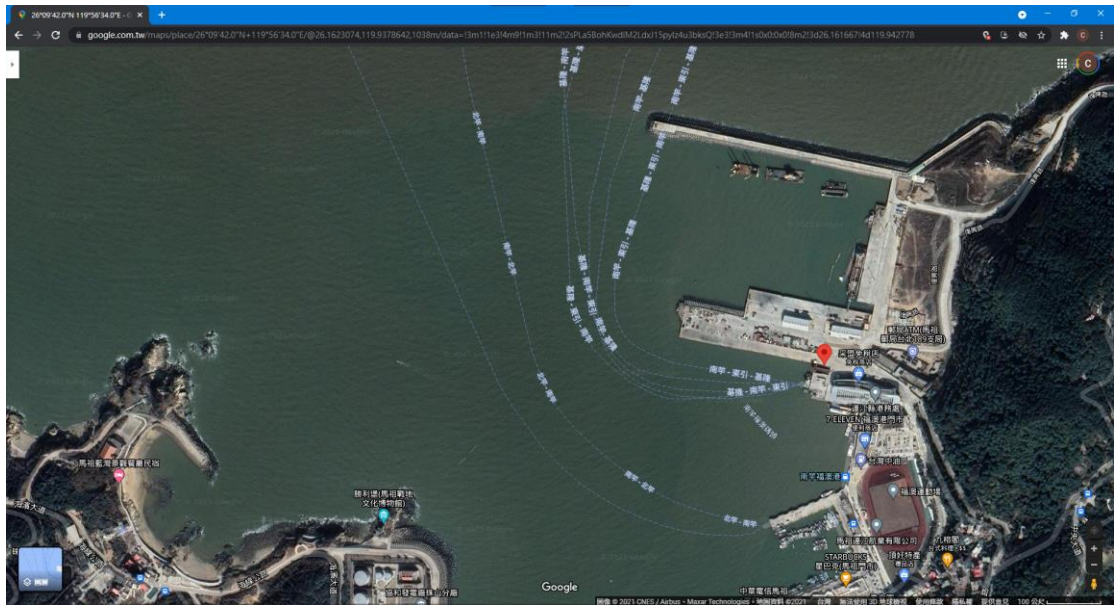


圖 5—27 馬祖潮位站（現行站碼 1926）所在位置（南竿福澳港）

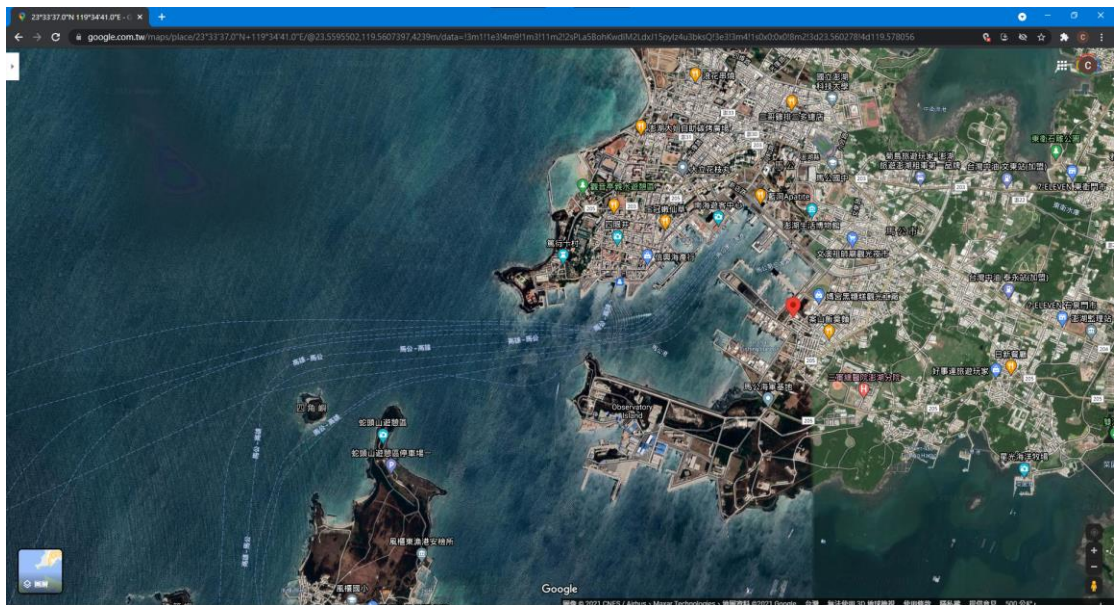


圖 5—28 澎湖馬公潮位站（現行站碼 1356）所在位置（澎湖馬公港）
（地圖比例尺 500 公尺）

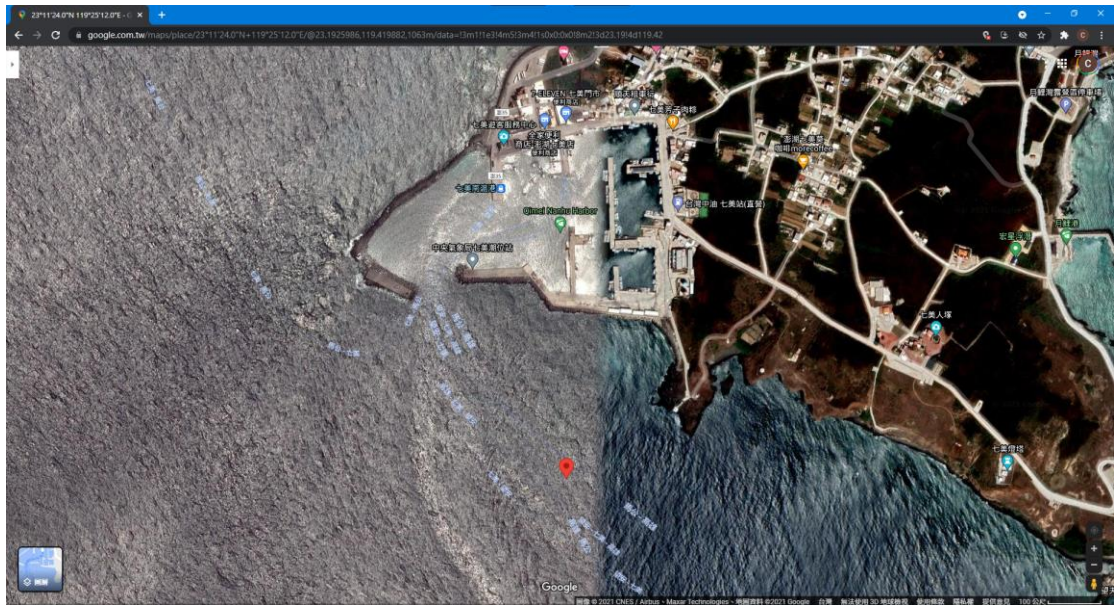


圖 5—29 七美潮位站（現行站碼 13606）所在位置
（七美漁港南防波堤近紅燈塔）

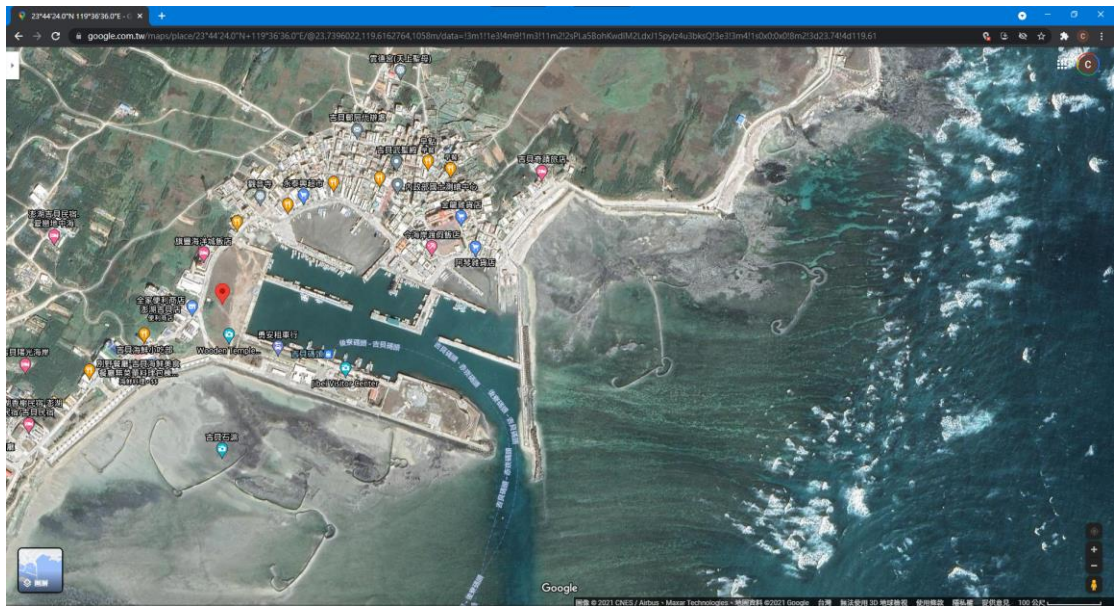


圖 5—30 吉貝潮位站（現行站碼 13406）所在位置（吉貝碼頭）

5.3. 各潮位站潮汐分析與與作業中調和分析比較結果

研究風暴潮時，極端氣象所引起之水位偏差是暴潮預報時主要的校驗對象，因此盡可能降低天氣平緩時天文潮預報水位與觀測水位之間的誤差，將有助於分析颱風來臨時風暴潮實際對沿岸造成的影響。

本章節研究目的在於利用其他模式或數值方法求得調和分析參數，並與氣象局現有之調和分析結果進行比較，試圖以近年資料取得較好之數值潮汐結果，以求後續研究颱風暴潮案例時能夠擷取更為精確的暴潮偏差訊號。

研究中將首先利用潮汐調和分析模式 Utide 模式 (Codiga, 2011)，對近兩年潮位站觀測水位進行資料處理，與現有作業中調和分析預報水位進行比較，以求能透過更新參數降低潮汐預報誤差。於分析近兩年觀測水位所得之天文潮參數，將被用於預報 2021 年之天文潮水位，並與局內作業中調和分析水位一同透過前述統計參數，檢視預報 2021 年潮位站觀測水位之成效。

於資料輸入部分，局內業務單位於標準作業操作流程下，會於當年度中選用前兩年度之水位觀測資料及參考潮位站附近的氣壓觀測值，將較容易辨識出的大氣壓力影響先予以扣除，也就是所謂的氣壓修正(inverted barometer correction)。觀測水位資料在執行氣壓修正後才會進入調和分析作業，並採用該參數結果執行下一年度之潮汐預報。本研究中選用之資料皆源於氣象局潮位觀測站列表中於 2019 年至 2020 年擁有公開資料之測站，對其進行調和分析，測站資訊、位置及周圍區域圖請參考 5.2 節。

本研究於 Utide 模式設定中，皆不對觀測資料進行預濾波校正 (prefiltering correction) 或氣壓校正程序，並將水位長期起伏趨勢包含在內一併考慮。模式中的求解分潮選項採用迭代重新加權最小二乘法 (iteratively-reweighted least squares, IRLS)，求解 68 個分潮數，而加權函數採用 Cauchy weight function，參考 Leffler 與 Jay (2009) 的研究成果。

研究中利用方均根誤差、平均絕對誤差、決定係數、相關係數等統計參數，比較兩種分析天文潮水位與觀測水位間之差異。除了分析天文潮水位外，研究中

亦利用平均值、中位數、平均絕對偏差及標準差等統計參數觀察兩種分析天文潮水位與觀測水位殘差值之統計特性。

其中，方均根誤差（root-mean-square error，RMSE）是所有誤差的平方均值的平方根。方均根誤差的使用非常普遍，它被認為是用於數值預測時優秀且通用的誤差度量，但由於方均根誤差與尺度相關，因此僅適用於比較特定變量的不同模型或模型設置的預測誤差。其計算公式為：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (\text{式5-1})$$

其中 O_i 是觀測值， S_i 是變量的預測值， n 是可用於分析的觀測值數量。

平均絕對誤差（Mean Absolute Error，MAE）是所有預測值與觀測值的偏差絕對值取平均。與平均誤差相比，平均絕對誤差由於離差被絕對值化，不會出現正負相抵消的情況，因而，平均絕對誤差能更好地反映預測值誤差的實際情況。其計算公式為：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \quad (\text{式5-2})$$

其中 O_i 是觀測值， S_i 是變量的預測值， n 是可用於分析的觀測值數量。

決定係數（coefficient of determination， R^2 ）在統計學中用於度量應變數的變異中可由自變數解釋部分所占的比例，以此來判斷迴歸模型的解釋力。其計算公式為：

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (\text{式5-3})$$

其中， SS_{res} 為殘差平方和， SS_{tot} 為總平方和，表示如下：

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2, SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2, \bar{O} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i \quad (\text{式5-4})$$

R^2 數值介於 0 至 1 之間，當 $R^2 = 0$ 時，表示迴歸直線為水平線，斜率 0，X 軸與 Y 軸變項間無直線關係；若 R^2 越趨近於 1，表示 X 軸與 Y 軸變項間的直線關係越強（具線性變化）。對時間序列數據而言，判定係數達到 0.9 以上相當常見。

相關係數 (correlation coefficient, r) 是一種相關程度的測量，在統計學上的意義是兩個變數之間的關係，定義為兩個變數的共變異數除以它們標準差的乘積：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (\text{式5-5})$$

其中 $\bar{S}$ 及 $\bar{O}$ 分別代表預測值平均及觀測值平均。相關係數值介於 -1 至 1 之間。係數的值為 ± 1 意味著兩項變量可以很好的由直線方程式來描述，相關係數的值為 0 意味著兩個變數之間沒有線性關係。

其中，平均值所指的是算術平均數 (Arithmetic mean)，為表徵數據集中趨勢的一個統計指標。它是一組數據之和，除以這組數據個數/項數。平均值在統計學上的優點，就是它較中位數、眾數更少受到隨機因素影響，缺點是它更容易受到極端值影響。其計算公式為：

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (\text{式 5-6})$$

中位數 (Median) 代表一個樣本、種群或機率分布中的一個數值，其可將數值集合劃分為數量相等的上下兩部分。對於有限的數集，可以通過把所有觀察值高低排序後找出正中間的一個作為中位數。如果數據的個數是奇數，則中間那個數據就是這群數據的中位數；如果數據的個數是偶數，則中間那 2 個數據的算術平均值就是這群數據的中位數。中位數在敘述統計學上和平均數、眾數並列為數據的集中趨勢。三者的位置排序亦對應著偏態係數的正負偏態意義。一般而言，平均數是最常被使用做為數據的集中趨勢，但如果有極端值存在，平均數的代表性降低，則中位數就是最佳的集中趨勢代表。

平均絕對偏差 (Mean Absolute Deviation, MAD) 是表示各個變量值之間差異程度的數值之一。指各個變量值同平均數的離差絕對值的算術平均數。

對於一個數據集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，其平均絕對偏差定義為：

$$MAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - m(X)| \quad (\text{式 5-7})$$

其中 n 為數據集的大小， $m(X)$ 是對於數據集中心趨勢 (central tendency) 的

描述函數，一般可以取平均值（mean）、中位數（median）或者眾數（mode），而選取不同的中心描述函數對 MAD 的結果是有影響的，本研究中選用平均值作為數據集中心趨勢的描述函數。

標準差（Standard Deviation，Std.）在機率統計中最常使用作為測量一組數值的離散程度之用。其定義為變異數開平方根，反映組內個體間的離散程度：

$$\text{Std.} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{式5-8})$$

圖 5—31 至圖 5—60 展示各測站近兩年（2019 年至 2020 年）之觀測資料、氣象局作業中調和分析水位（HAR）、Utide 模式分析水位（UT）、兩種天文潮分析水位與觀測水位殘差值之時序列組圖。

圖 5—61 至圖 5—89 則展示 2021 年之觀測資料、氣象局作業中調和分析預報水位（HAR）、Utide 模式採 2019 年至 2020 年觀測資料分析參數所得之預報水位（UT）、兩種天文潮分析水位與觀測水位殘差值之時序列組圖。

圖中色線為水位分布，圖軸橫軸為水位資料對應時間（年/月），縱軸為水位值，單位為公尺。組圖上圖為觀測資料與氣象局作業中調和分析水位（HAR）之比較結果。藍線為觀測水位，紅線為氣象局作業中調和分析水位，黃線為兩者殘差值；中圖為觀測資料與 Utide 調和分析水位（UT）之比較結果，藍線為觀測水位，紅線為 Utide 調和分析水位，黃線為兩者殘差值；下圖為兩種模式調和分析天文潮與觀測水位偏差值之比較結果，藍線為氣象局作業中調和分析水位與觀測資料殘差值，紅線為 Utide 調和分析水位與觀測資料殘差值。

於調和分析天文潮與觀測資料之比較圖中，標題上資訊為測站名稱、測站代號、模式代號及方均根誤差、平均絕對誤差、決定係數、相關係數等統計參數。於調和分析天文潮與觀測水位偏差值之比較圖中，標題上資訊為模式代號及平均值、中位數、平均絕對偏差及標準差等統計參數。

從圖 5—31 至圖 5—60 可以看到各測站於近兩年觀測資料、氣象局作業中調和分析水位（HAR）與 Utide 模式分析水位（UT）時序分布概況及觀測資料品

質。2019 至 2020 年間，台灣有部分時段發布海上或陸上颱風警報，如 2019 年 7 月中旬颱風丹娜絲 (DANAS)、2019 年 8 月上旬颱風利奇馬 (LEKIMA)、8 月下旬颱風白鹿 (BAILU)、9 月底颱風米塔 (MITAG)、2020 年 5 月中旬颱風黃蜂 (VONGFONG)、8 月颱風哈格比 (HAGUPIT)、米克拉 (MEKKHALA)、巴威 (BAVI) 及 2020 年 11 月上旬颱風閃電 (ATSANI) 等，可在部分測站看到對應時間內有水位偏差異於該站平均起伏情況的訊號。

其他較特殊之測站如鹿港 (圖 5—42)，該站全年觀測水位無法測量到低潮位，可能會影響到潮位調和分析結果。箔子寮 (圖 5—43) 及蘭嶼 (圖 5—52) 測站於 2020 年調和分析水位有調整水位基準面之情況，在後續與 Utide 模式分析水位的比較中可能會有較大的誤差且影響判斷模式分析結果。小琉球 (圖 5—49) 的觀測資料於 2019 年 12 月時有較大不連續情形，有可能為儀器或資料基準面異常，後續可能影響調和分析結果。

從圖 5—61 至圖 5—89 可以看到各測站於 2021 年上半年觀測資料、氣象局作業中調和分析水位 (HAR) 與 Utide 模式分析水位 (UT) 時序分布概況及觀測資料品質。東港測站於 2021 年期間無觀測資料，故無法比較 2021 年兩種模式預報水位之結果。

截至 2021 年 06 月 01 日，氣象局尚無發布海上/陸上颱風警報之紀錄，因此可以推論此區段內資料受颱風暴潮之影響較為有限。部分觀測資料有特殊起伏訊號測站，如竹圍 (圖 5—68) 於 2021 年 04 月似乎有儀器紀錄偏移水準面之情形，但已於後續月分中修復。外埔測站 (圖 5—70) 於 2021 年 05 月至 06 月期間有模式預報水位與觀測資料偏差增加情形，目前原因不明。東沙島 (圖 5—78) 於 2021 年 03 月後有模式預報水位與觀測資料偏差增加情形，截至 04 月中旬斷訊，可能為儀器異常。七美測站 (圖 5—88) 於三月上旬有明顯模式預報水位與觀測資料偏差增加情形，目前原因不明。

表 5—3 及表 5—4 分別整理出圖 5—31 至圖 5—60 中，各潮位站分析天文潮水位與觀測水位比較之統計參數列表及各潮位站觀測值扣除分析天文潮水位

之殘差值分布統計參數列表。表 5—3 中統計參數依序為方均根誤差、平均絕對誤差、決定係數、相關係數；表 5—4 中統計參數依序為平均值、中位數、平均絕對偏差及標準差。而表 5—3 及表 5—4 各項統計參數之統整排名整理如表 5—5 及表 5—6。方均根誤差、平均絕對誤差、平均值、中位數、平均絕對誤差及平均絕對偏差由小至大排序，決定係數與相關係數由大至小排序，不同模式之統計參數差距採小至大排序，便於分析兩種模式對於各測站之潮位資料解析能力。

從表 5—3 及表 5—5 中可以看出，Utide 分析天文潮水位所得之方均根誤差及平均絕對誤差在各測站中普遍較氣象局作業中調和分析水位小，而決定係數及相關係數則普遍較高。

在全測站的比較中，整體改善幅度最佳的為蘭嶼站（圖 5—52），但圖 5—52 顯示局內作業水位基準面於 2020 年初似有調整過之情形。改善次佳者為成功測站（圖 5—53），使用 Utide 分析天文潮水位在平均絕對誤差及決定係數中都能得到較好的統計結果。其次為淡水（圖 5—31）與長潭里測站（圖 5—37），Utide 分析天文潮水位在淡水測站（圖 5—31）中能得到較低的方均根誤差及平均絕對誤差，在長潭里測站（圖 5—37）中能得到較高的決定係數及相關係數。馬祖（圖 5—57）及外埔（圖 5—40）測站之分析水位與其他測站相比，在兩種模式中所得之分析天文潮水位皆仍有較大之方均根誤差及平均絕對誤差，但 Utide 分析天文潮水位在此二測站之表現仍較氣象局作業中調和分析水位為佳。

從兩種模式分析的各項統計參數之差距中可以看到，大幅改善方均根誤差的測站有箔子寮（圖 5—43）、淡水（圖 5—31）及蘭嶼（圖 5—52）測站，而兩種模式中方均根誤差差距不大者有淡海（圖 5—35）、龍洞（圖 5—32）、竹圍（圖 5—38）等測站。若從決定係數及相關係數判斷兩種模式對於觀測水位的解析能力，則兩種模式在鹿港（圖 5—42）、淡海（圖 5—35）、澎湖馬公（圖 5—58）、新竹（圖 5—39）等站的解析能力無明顯差距，但在將軍（圖 5—46）、長潭里（圖 5—37）、成功（圖 5—53）、蘭嶼（圖 5—52）等站，則在決定係數及相關係數有較顯著的提升。

表 5—4 與表 5—6 中顯示，觀測值扣除 Utide 分析天文潮水位之殘差值的平均值及中位數普遍較扣除氣象局作業中調和分析水位者更接近海平面，各測站的殘差值平均絕對偏差及標準差分布，Utide 分析所得結果亦普遍小於氣象局作業中模式的結果。

Utide 殘差值中，平均值最偏離海平面者依序為馬祖（圖 5—57）、竹圍（圖 5—38）及外埔（圖 5—40）測站，而在 HAR 殘差值中，平均值最偏離海平面者為淡水（圖 5—31）、成功（圖 5—53）及蘭嶼（圖 5—52）測站。外埔（圖 5—40）、竹圍（圖 5—38）及馬祖（圖 5—57）測站在兩種模式中與其他測站相比皆有較大之殘值標準差。

在完成近兩年資料分析後，研究更進一步探討調和分析採用不同資料長度所得之調和分析參數，對於下一年度水位預報之影響，以求在往後時間中能夠固定取得最有效率或結果最佳之調和分析天文潮水位。

表 5—7 至表 5—10 展示利用不同資料長度所得之 Utide 潮汐分析參數對 2021 年水位預報之統計參數結果，並與氣象局內作業中調和分析預報水位一同進行比對。表格內之「3 年」表示預報水位所用之 Utide 參數為分析測站 2018 年至 2020 年觀測資料所得。「2 年」表示預報用 Utide 參數來自 2019 年至 2020 年之觀測資料，即圖 5—61 至圖 5—89 圖中展示參數。「1 年」表示預報用 Utide 參數僅採用 2020 年觀測資料。「HAR」表示為氣象局內作業中調和分析預報水位。表 5—7 與表 5—8 為分析預報水位與觀測資料之比對結果，依序為方均根誤差、平均絕對誤差、決定係數及相關係數。表 5—9 與表 5—10 為分析預報水位與觀測資料殘差值之分布特性統計結果，依序列出殘差值之平均值、中位數、平均絕對偏差及標準差。

從表 5—7 中可以看出隨著調和分析所用的觀測資料年份增加，預報水位與觀測水位之間的方均根誤差並不一定隨分析資料量增加而減少。其中各測站的預報方均根誤差隨分析資料增加而減少的測站有：龍洞、麟山鼻、福隆、基隆、竹圍、台中港、將軍、高雄、小琉球、花蓮、烏石、七美、吉貝等站。以兩年份資

料分析預報水位方均根誤差最小的測站有淡水、淡海、新竹、箔子寮、蘭嶼、蘇澳、馬祖、馬公站等，利用單年資料分析預報水位有最小方均根誤差的測站有長潭里、外埔、鹿港、塭港、東石、東沙島、後壁湖、成功等站。若以各站平均之方均根誤差來比較資料長度差異所得的預報結果，則以兩年資料分析參數所得之方均根誤差為最小。若以平均絕對誤差做判斷，同樣無法看到誤差變化隨資料長度增加而明顯減少的規律，但若以各測站之平均來看，當資料長度為兩年以上時，所得的預報平均絕對誤差便可低於單年平均及現有之作業用調和分析。

表 5—8 中以決定係數及相關係數做判斷，則平均而言三年資料量所得之分析參數較能預報未來水位，但單年資料量分析所得參數預報能力不及現有之作業用調和分析；而使用 Utide 預報之水位使用的分析資料長達兩年時，相關係數普遍會優於作業中調和分析預報的統計結果。

表 5—9 與表 5—10 中，Utide 預報之水位與觀測資料偏差值以兩年份觀測資料平均最接近海平面，但在單年份資料中之偏差值平均為最偏離海平面者，顯示極有可能 Utide 模式在利用單年份資料進行分析及預報時容易有較大的誤差，這樣的現象在偏差值的中位數比較中也可以看出。以平均絕對偏差而言，在使用 Utide 模式進行分析並預報時所得之殘差值，整體測站的平均絕對偏差及標準差普遍低於作業中調和分析預報的統計結果。

研究中選用之各站觀測資料係直接選用海象中心資料課提供之各潮位站水位資料，並未針對極端天氣現象或資料離群值等進行更進一步的資料品管或資料補遺。以研究中取得之觀測資料總長度為三年，若以現有資料品質進行分析，則 30 個觀測站中，有 12 個測站（龍洞、麟山鼻、福隆、基隆、竹圍、台中港、高雄、小琉球、花蓮、烏石、七美、吉貝等站）在選用三年資料所得之分析結果來預報本年度潮汐水位時所得方均根誤差為最小。9 個測站（淡水、麟山鼻、淡海、新竹、箔子寮、蘭嶼、蘇澳、馬祖、馬公）在選用兩年資料所得之分析結果來預報本年度潮汐水位時所得方均根誤差為最小。而所有測站所得之方均根誤差平均，以 2 年資料所得之分析結果為最低。

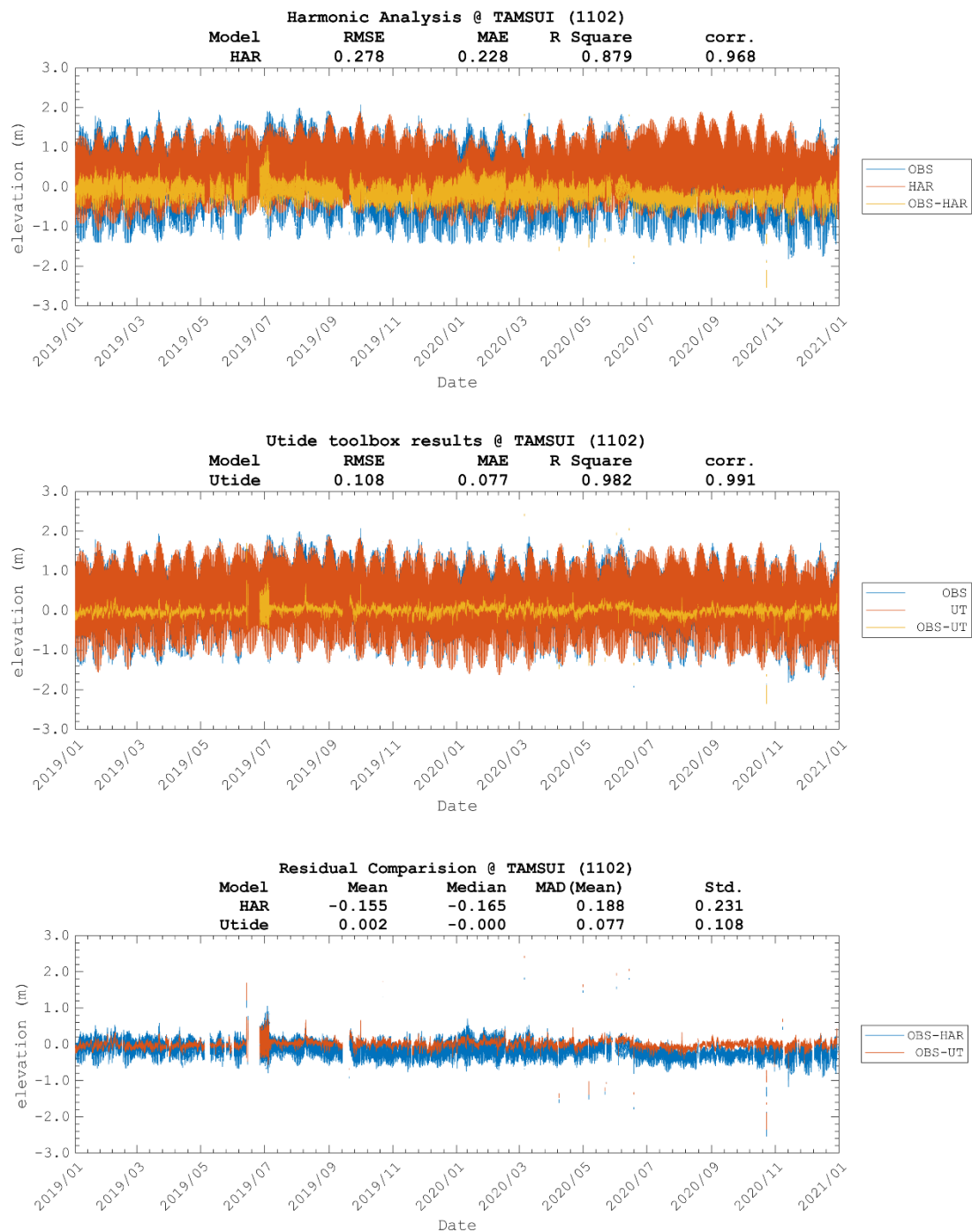


圖 5—31 淡水測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

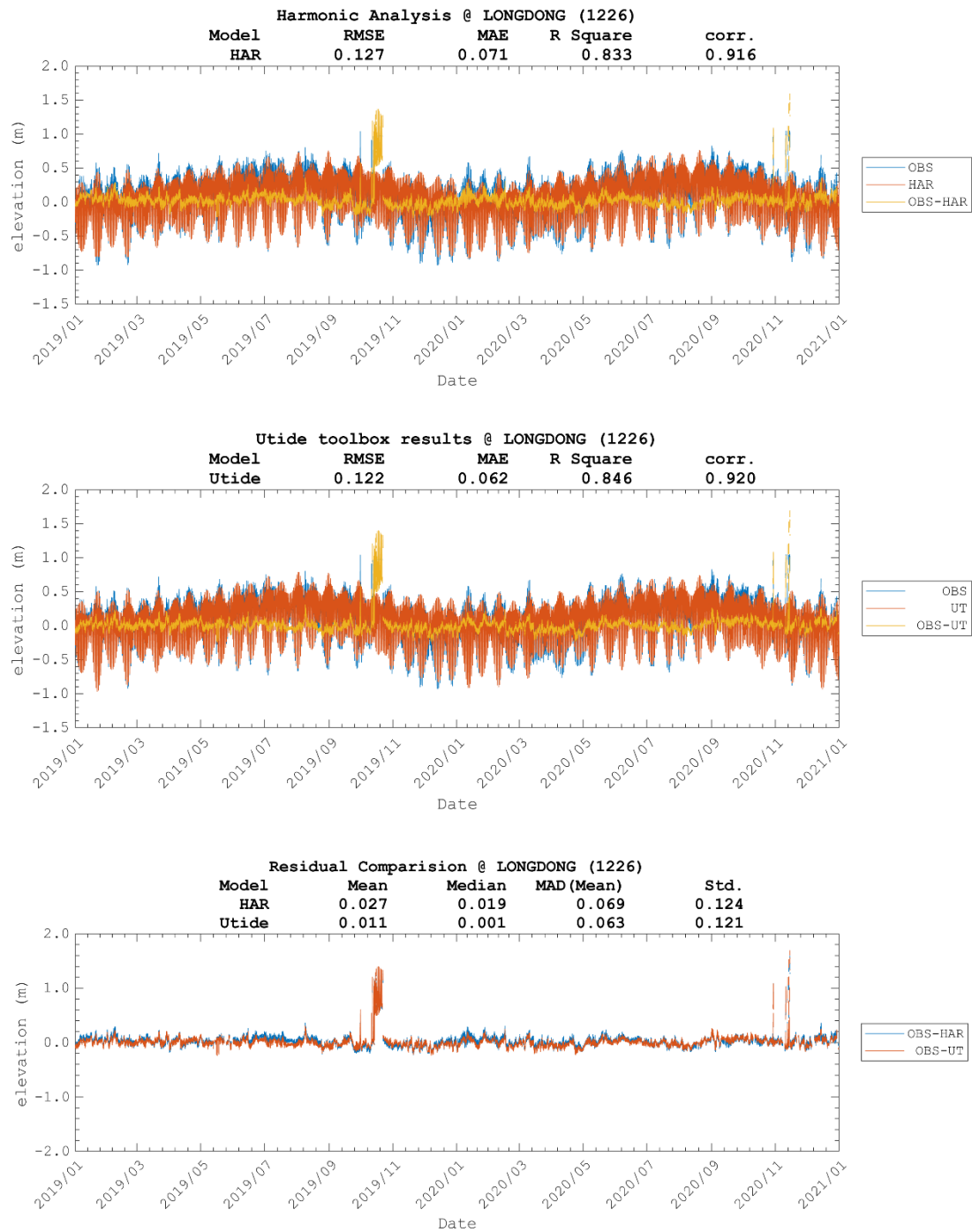


圖 5—32 龍洞測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

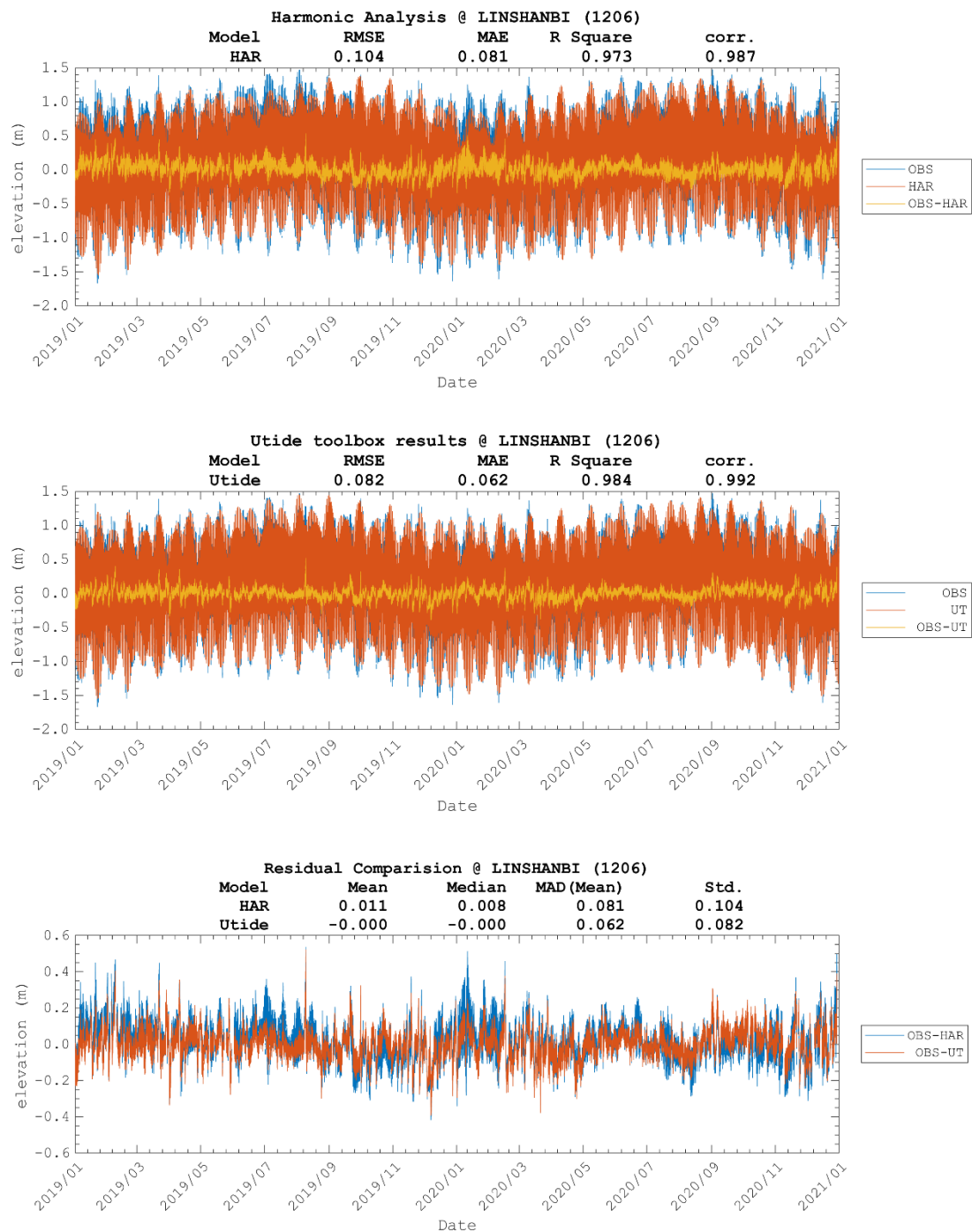


圖 5—33 麟山鼻測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

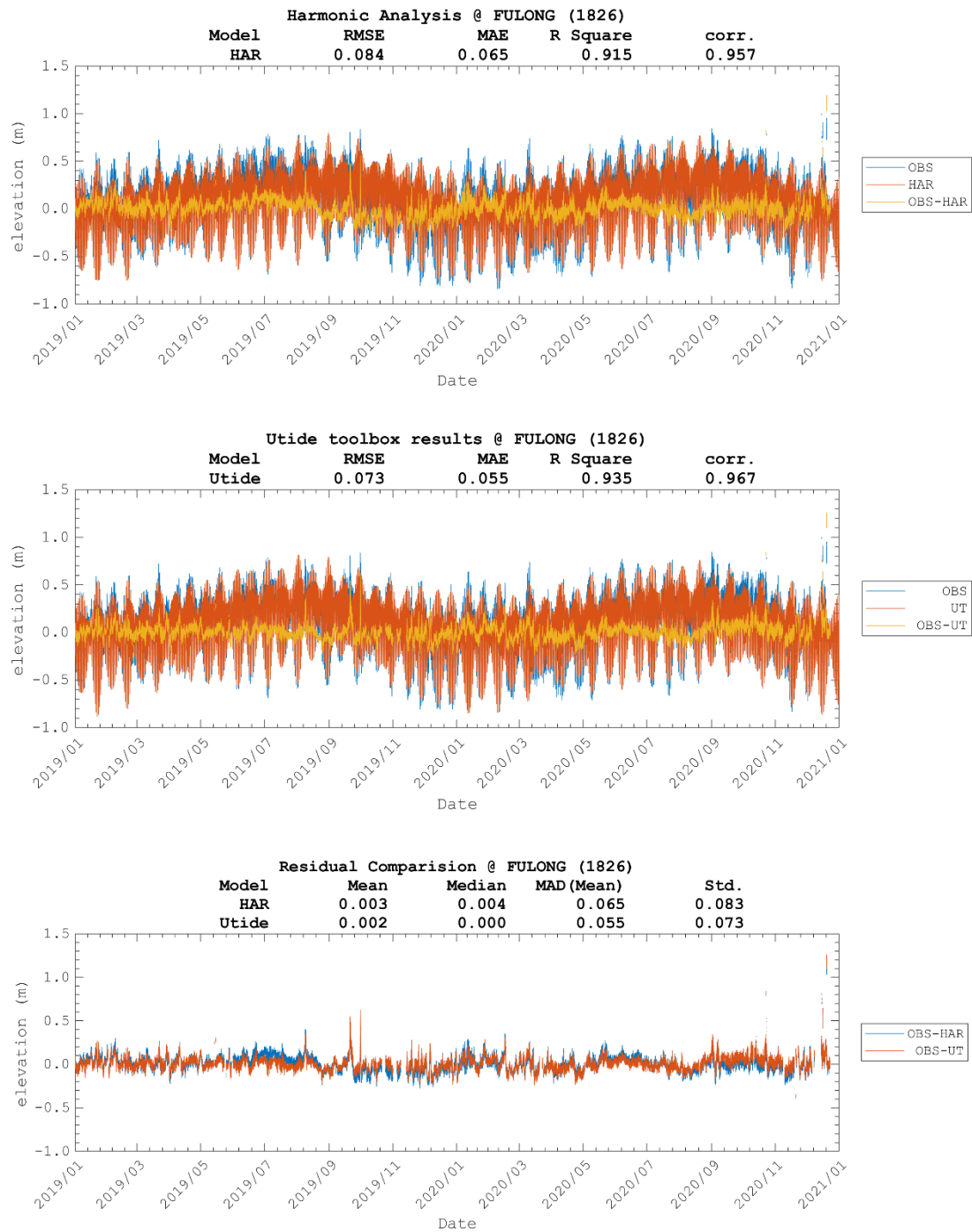


圖 5—34 福隆測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

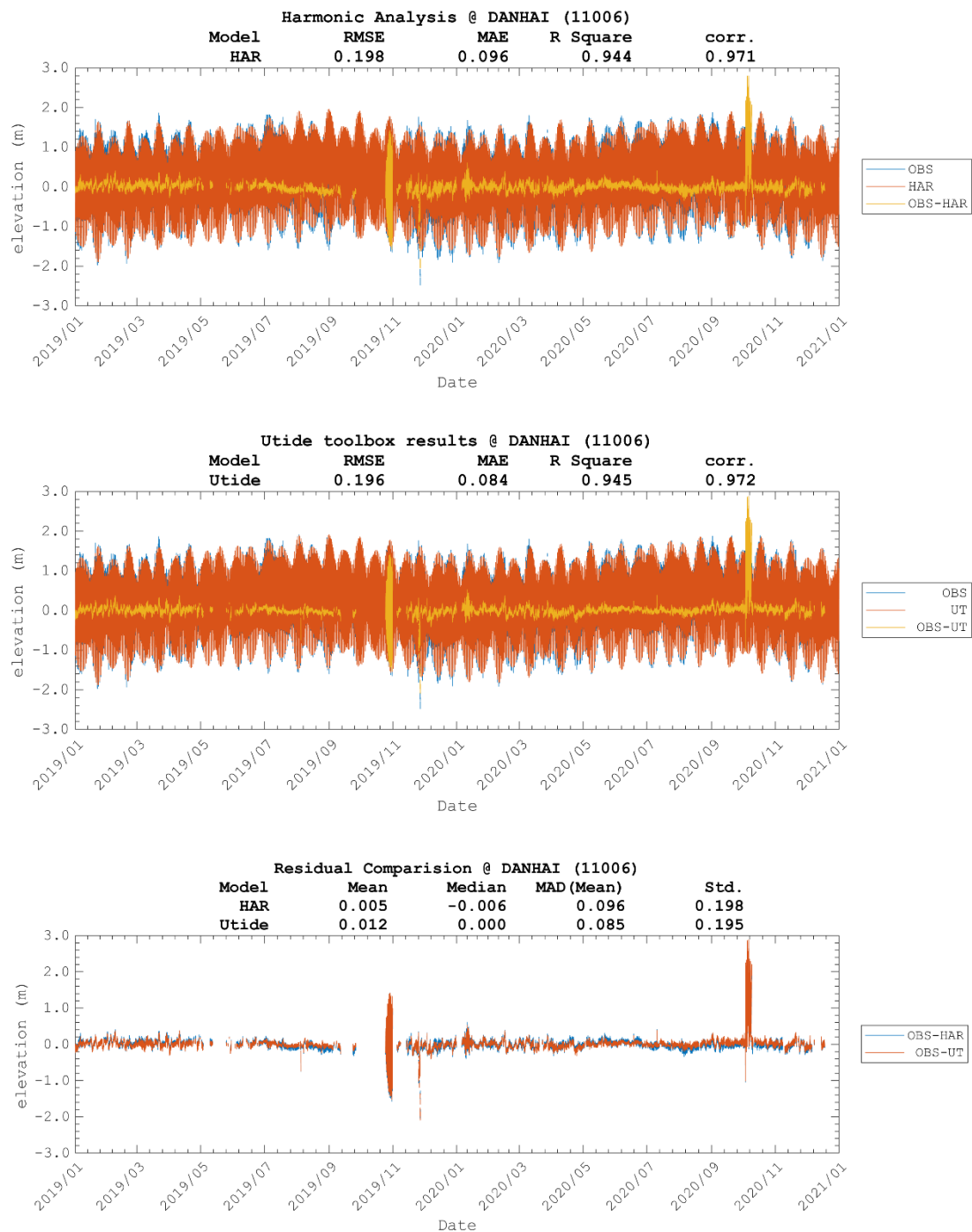


圖 5—35 淡海測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

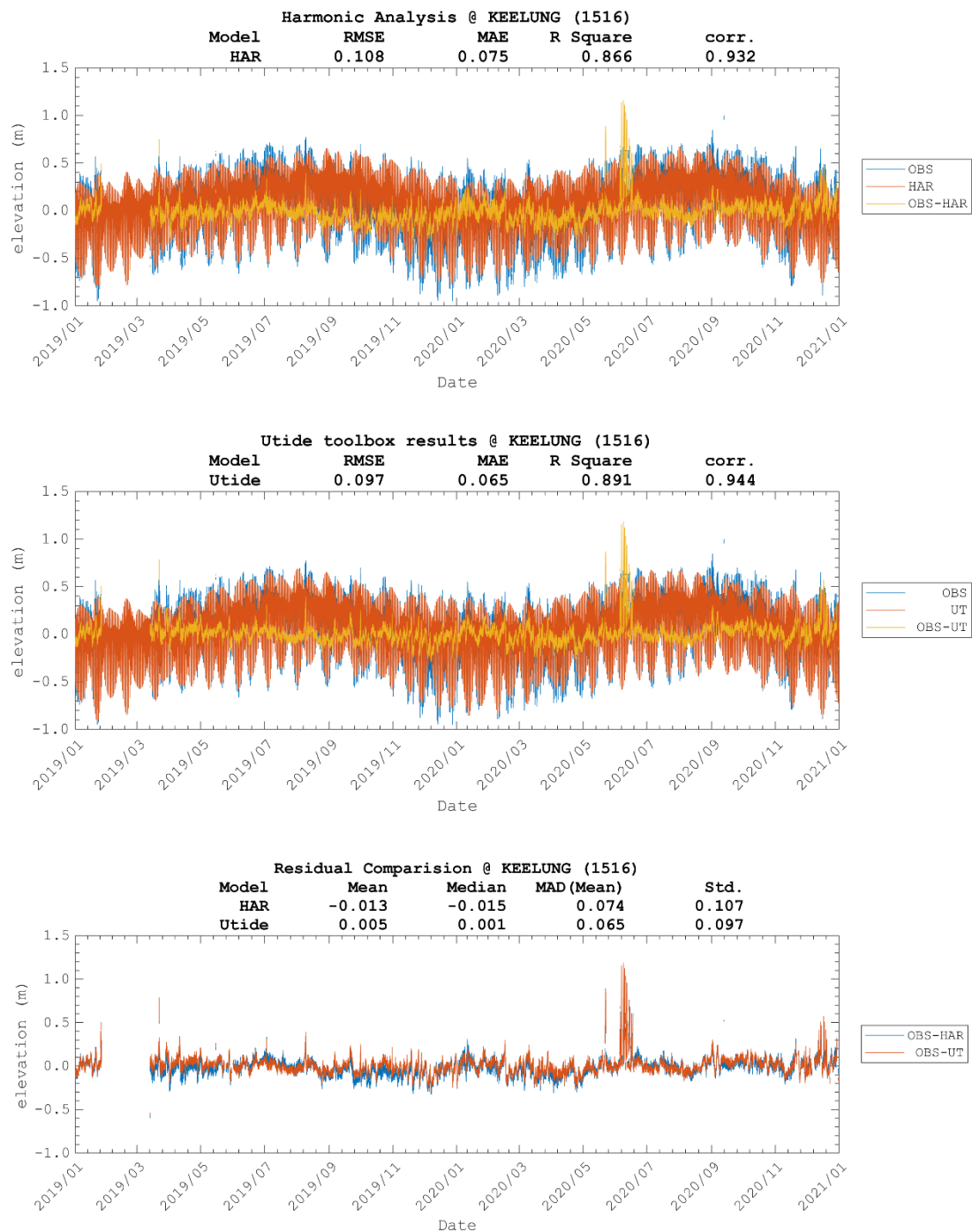


圖 5—36 基隆測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

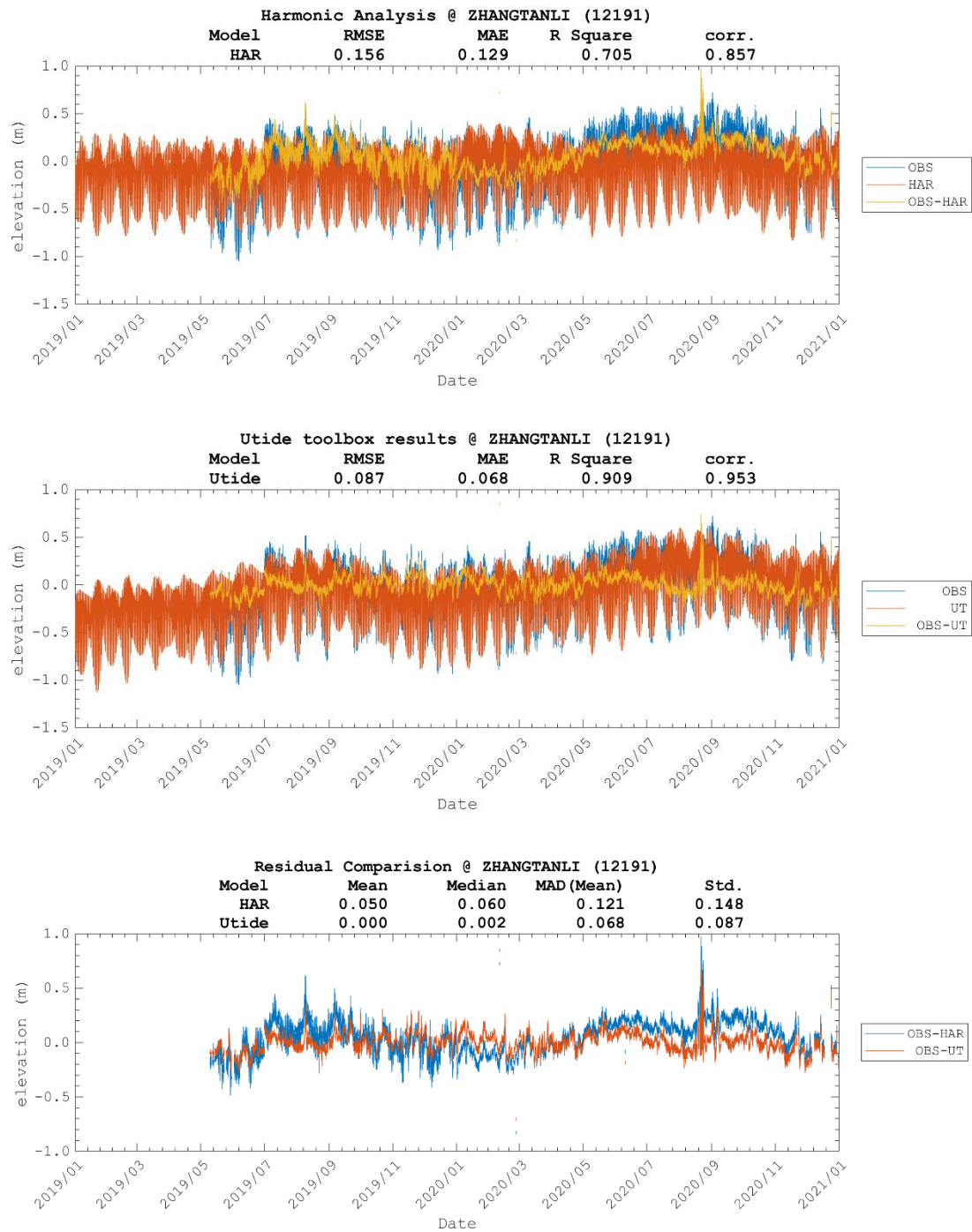


圖 5—37 長潭里測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

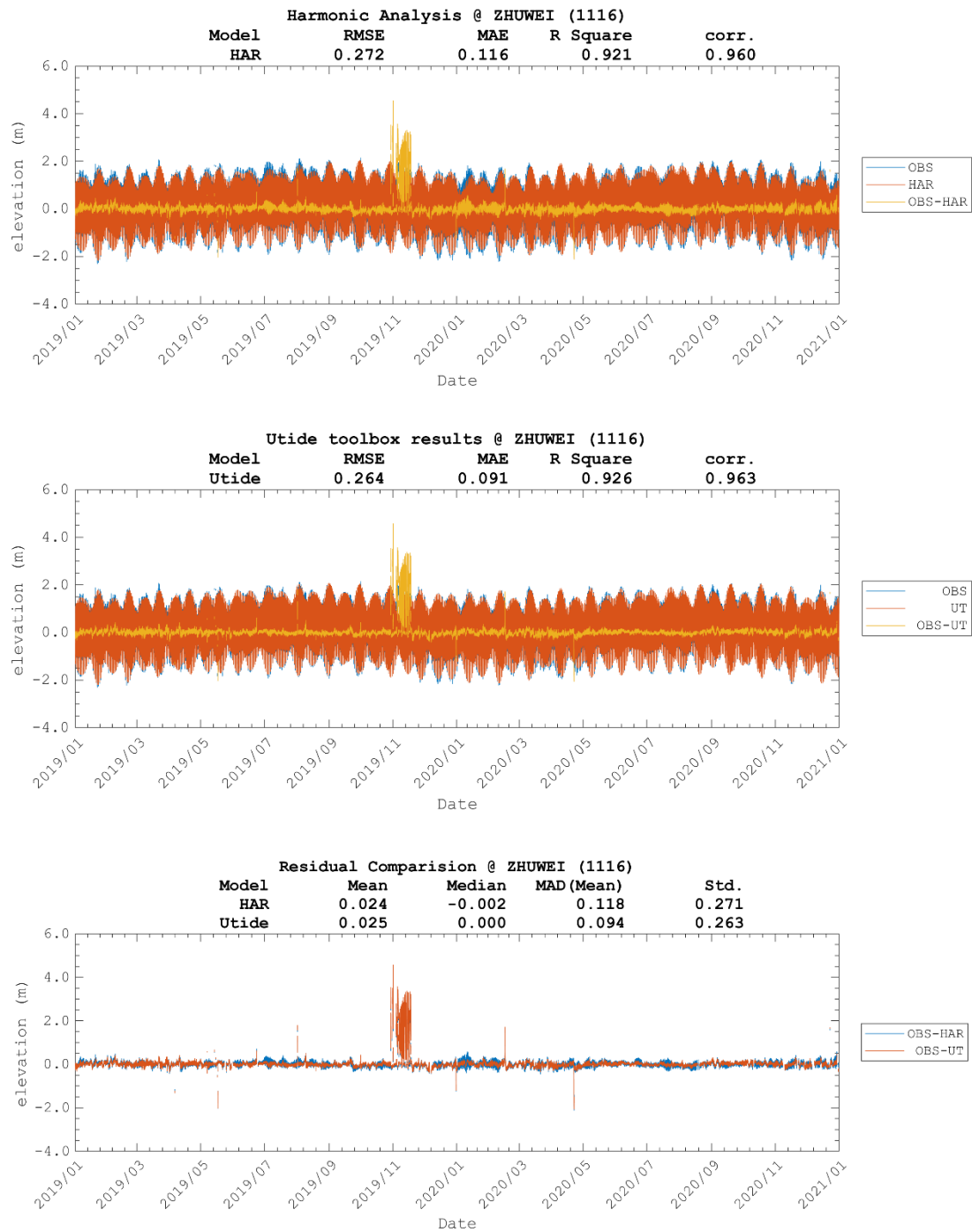


圖 5—38 竹圍測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

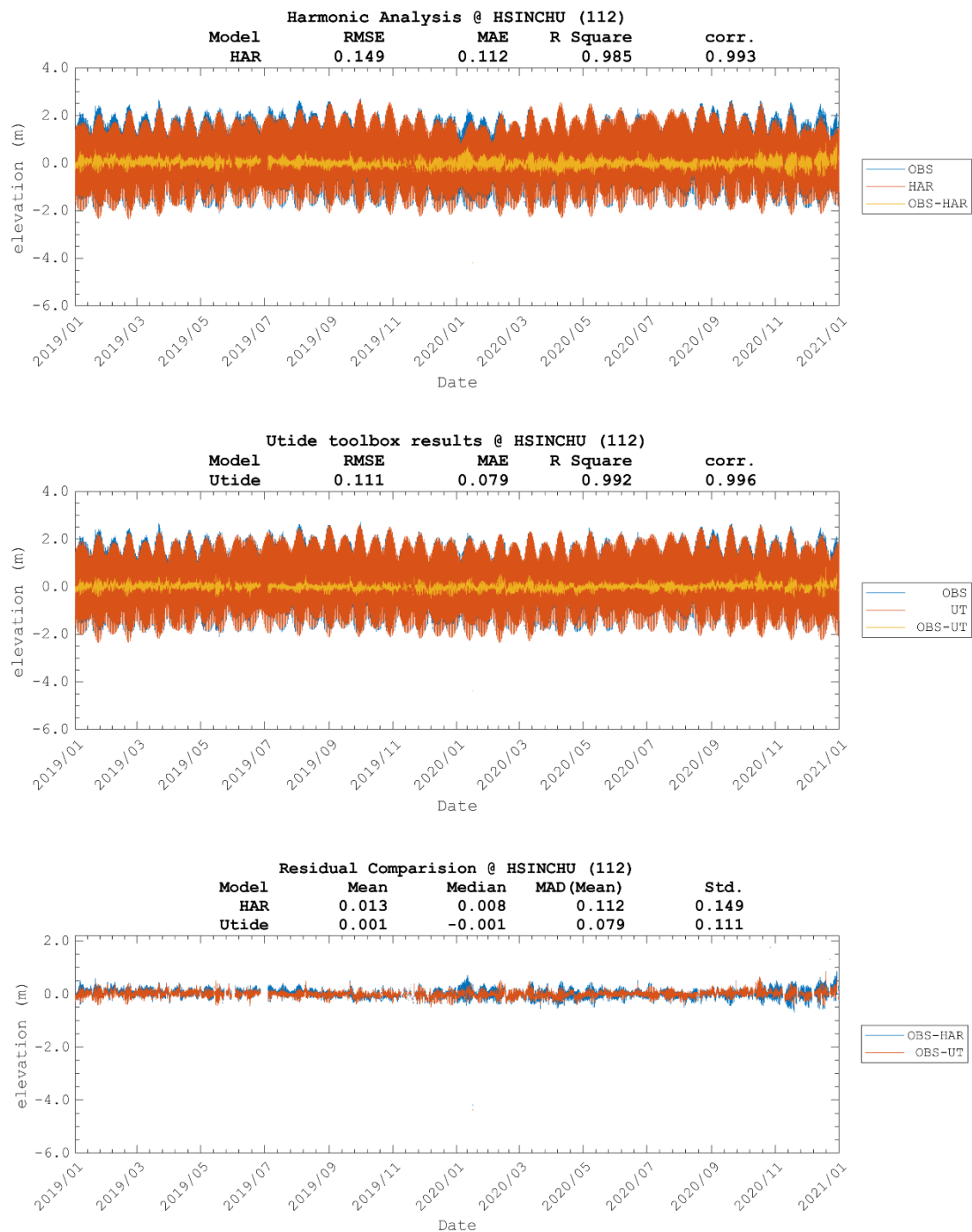


圖 5—39 新竹測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

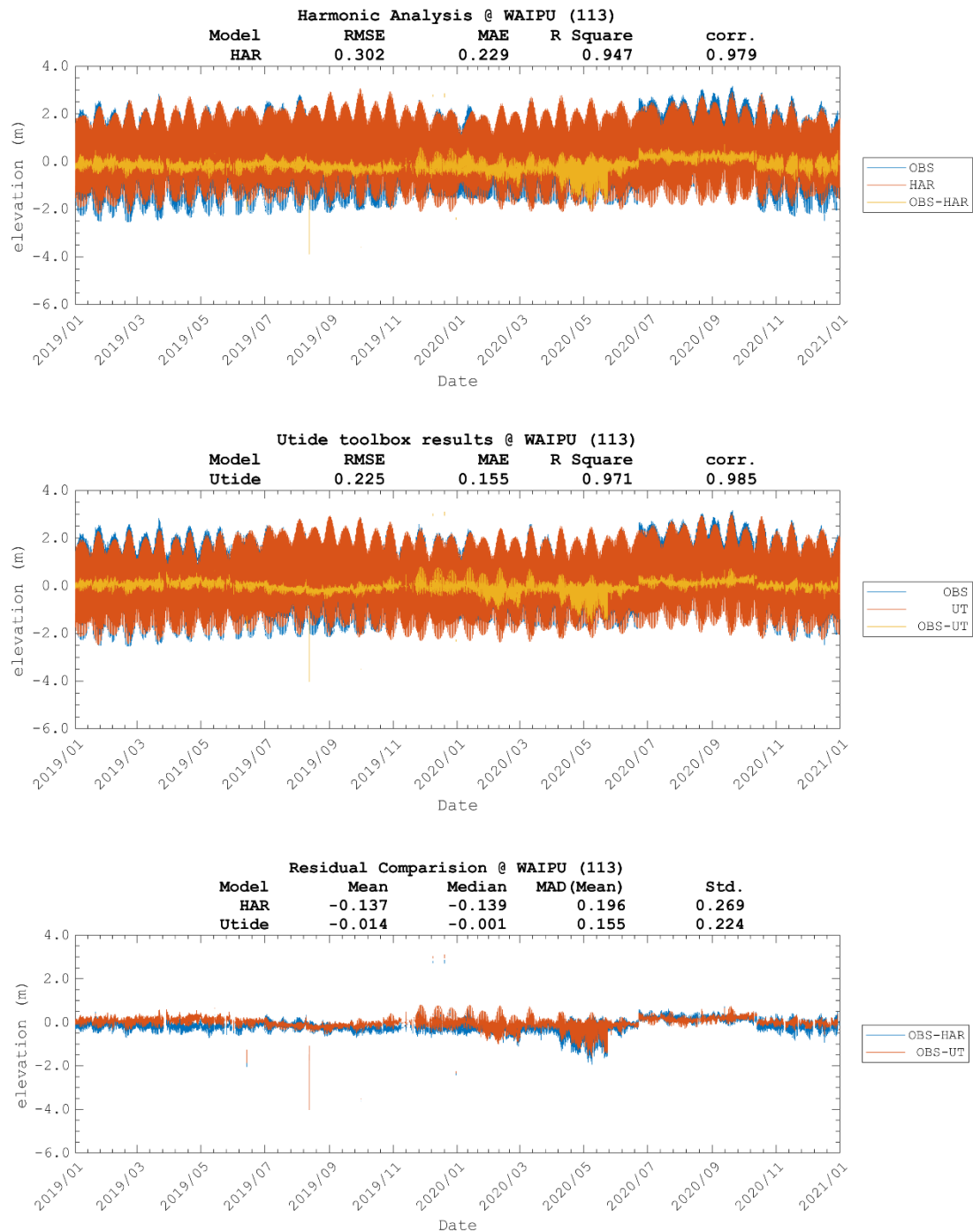


圖 5—40 外埔測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

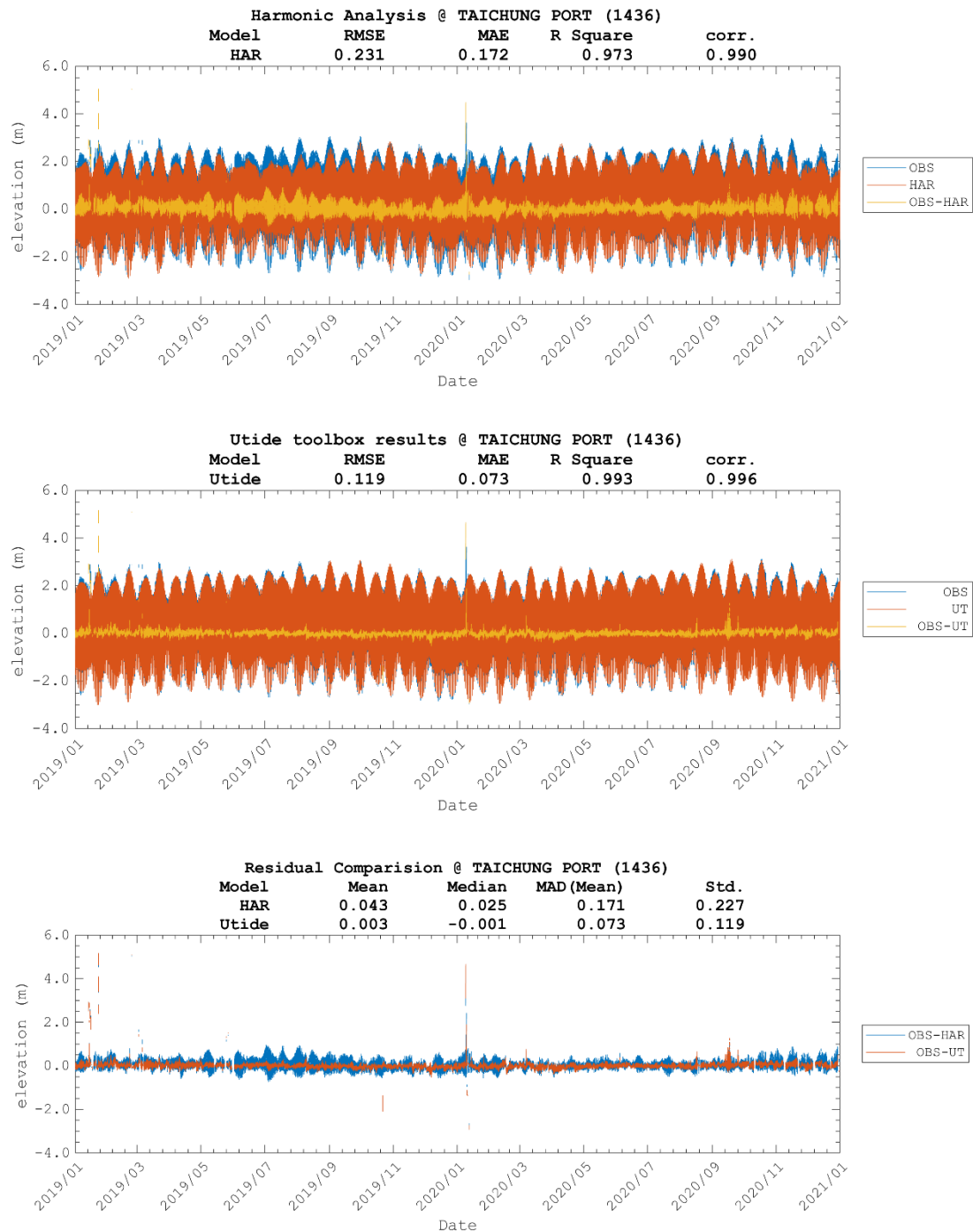


圖 5—41 台中測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

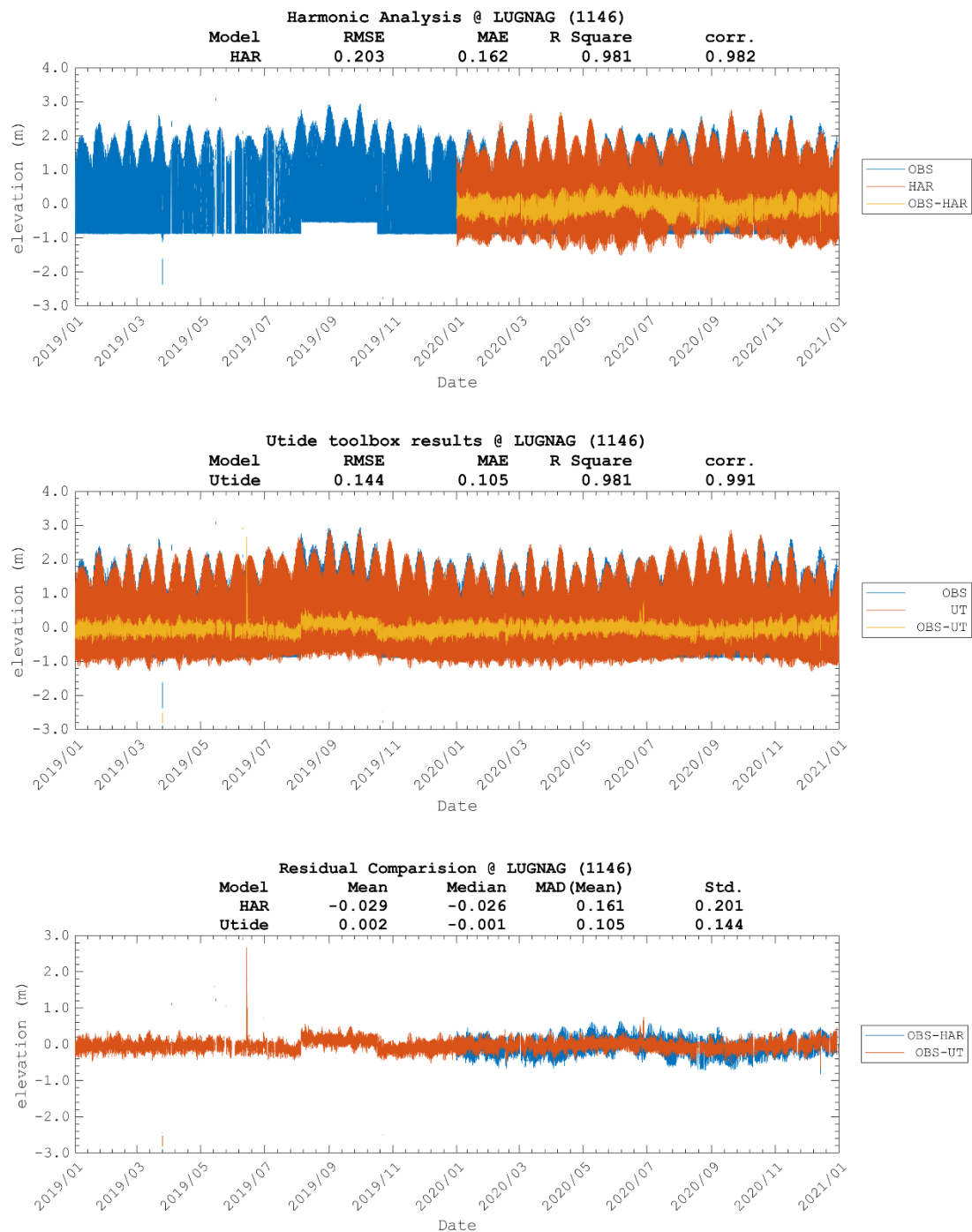


圖 5—42 鹿港測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

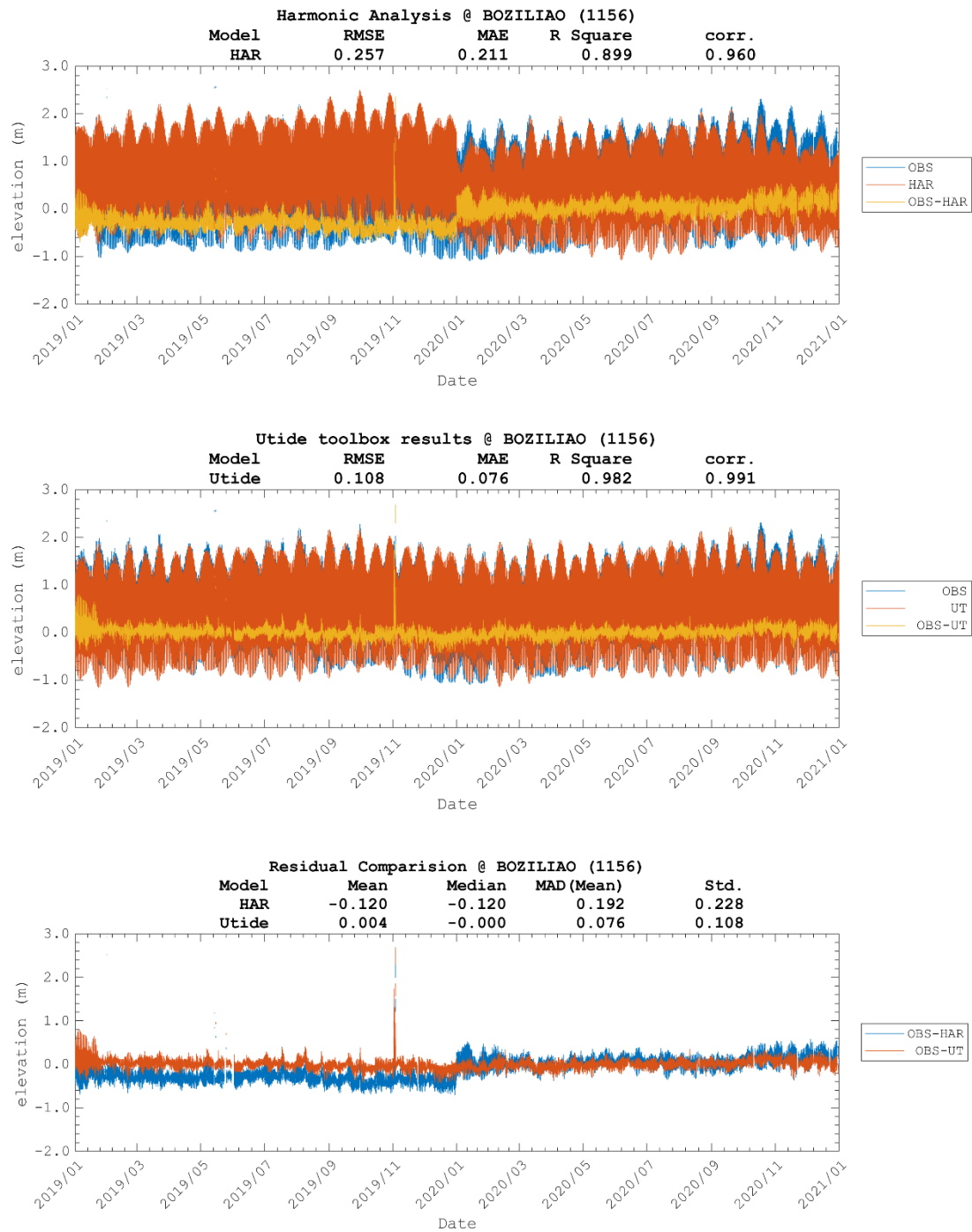


圖 5—43 箔子寮測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

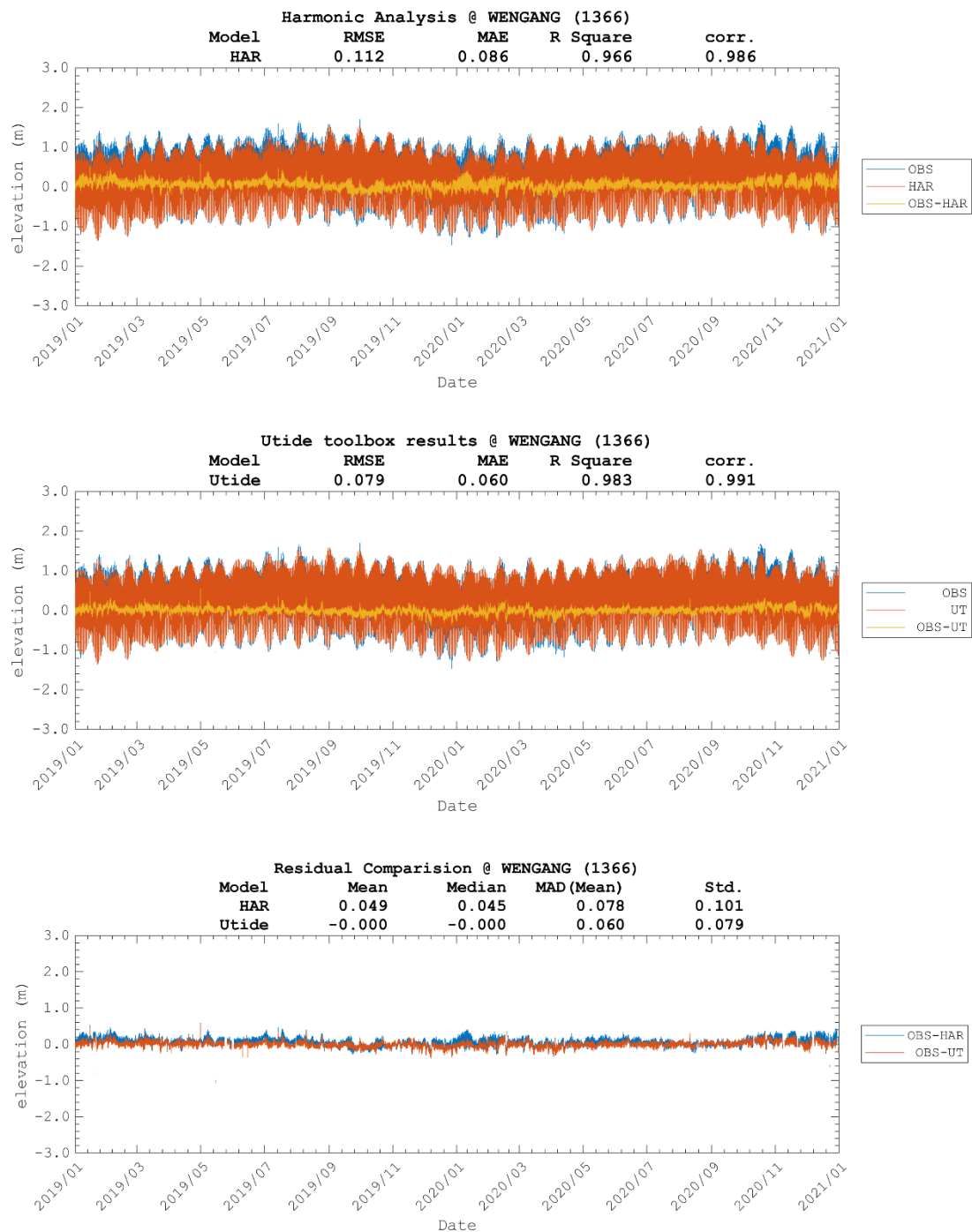


圖 5—44 塭港測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

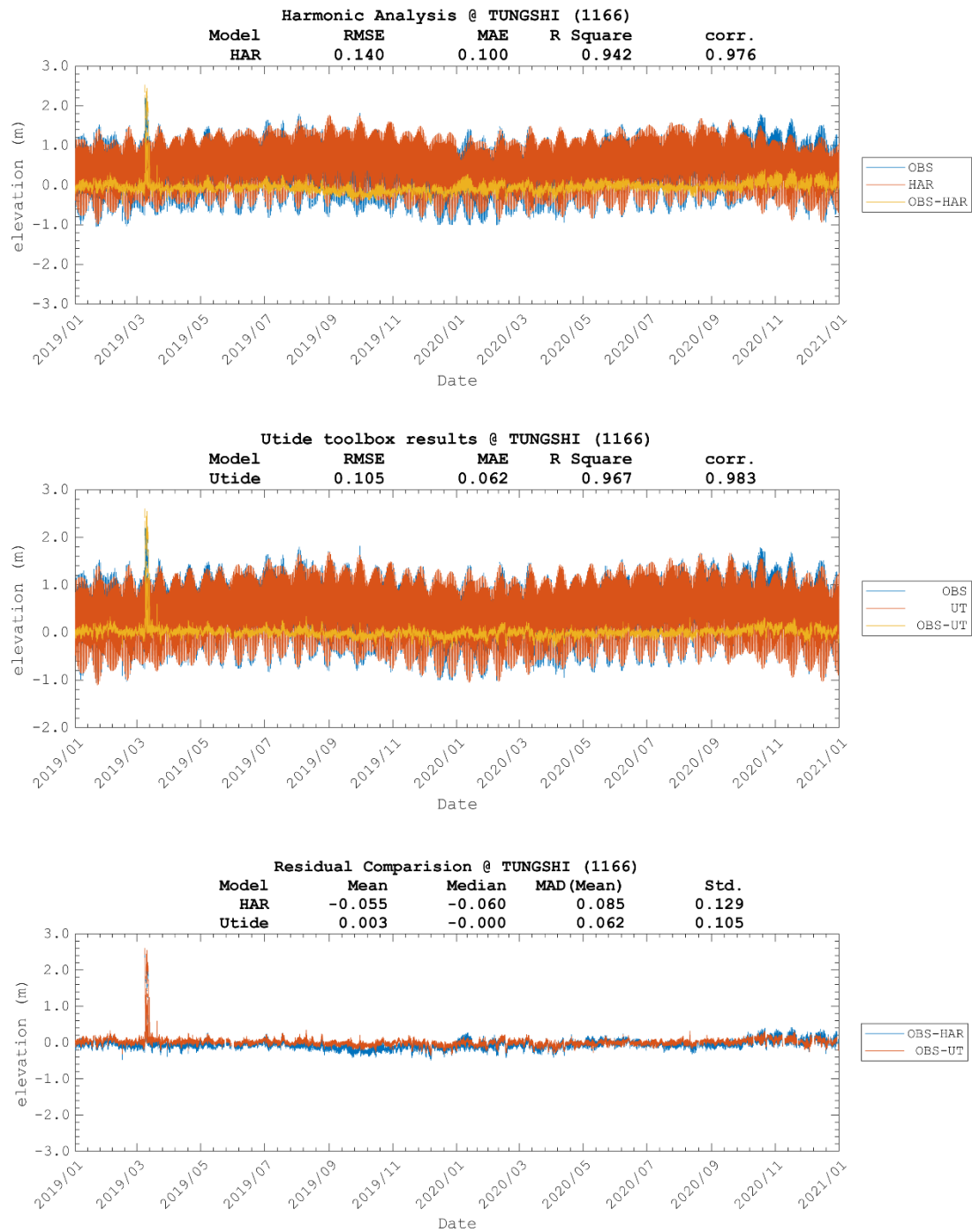


圖 5—45 東石測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

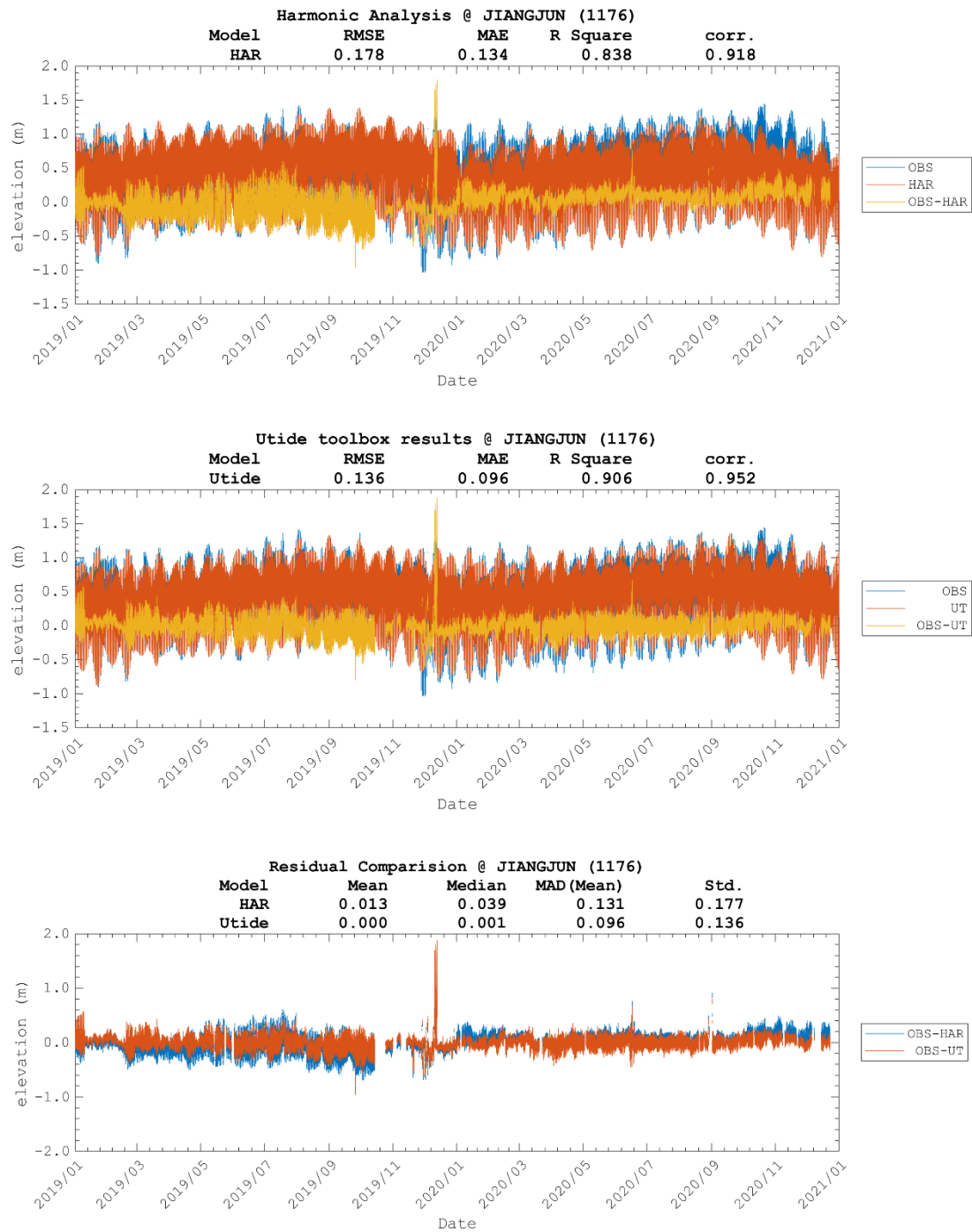


圖 5—46 將軍測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

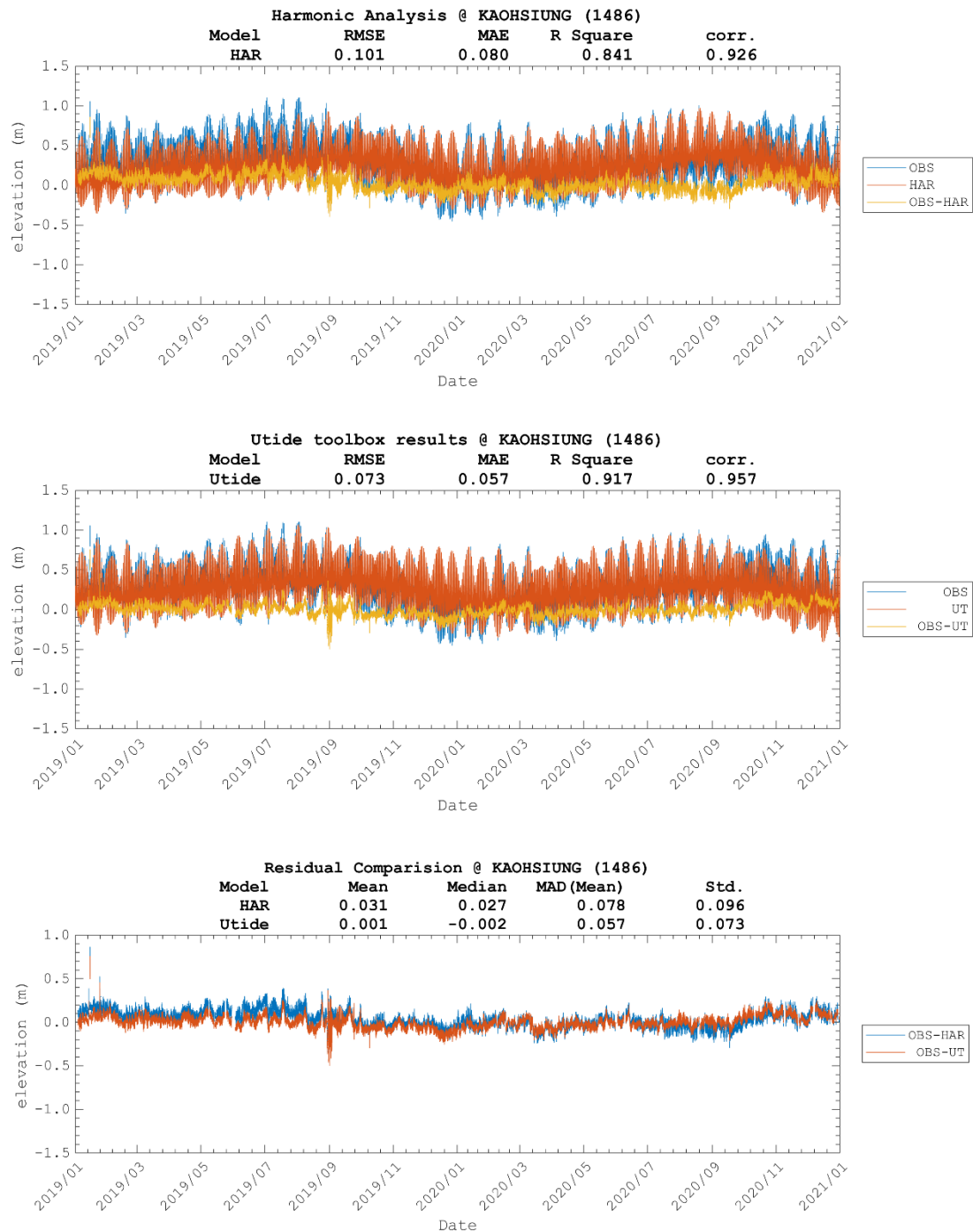


圖 5—47 高雄測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

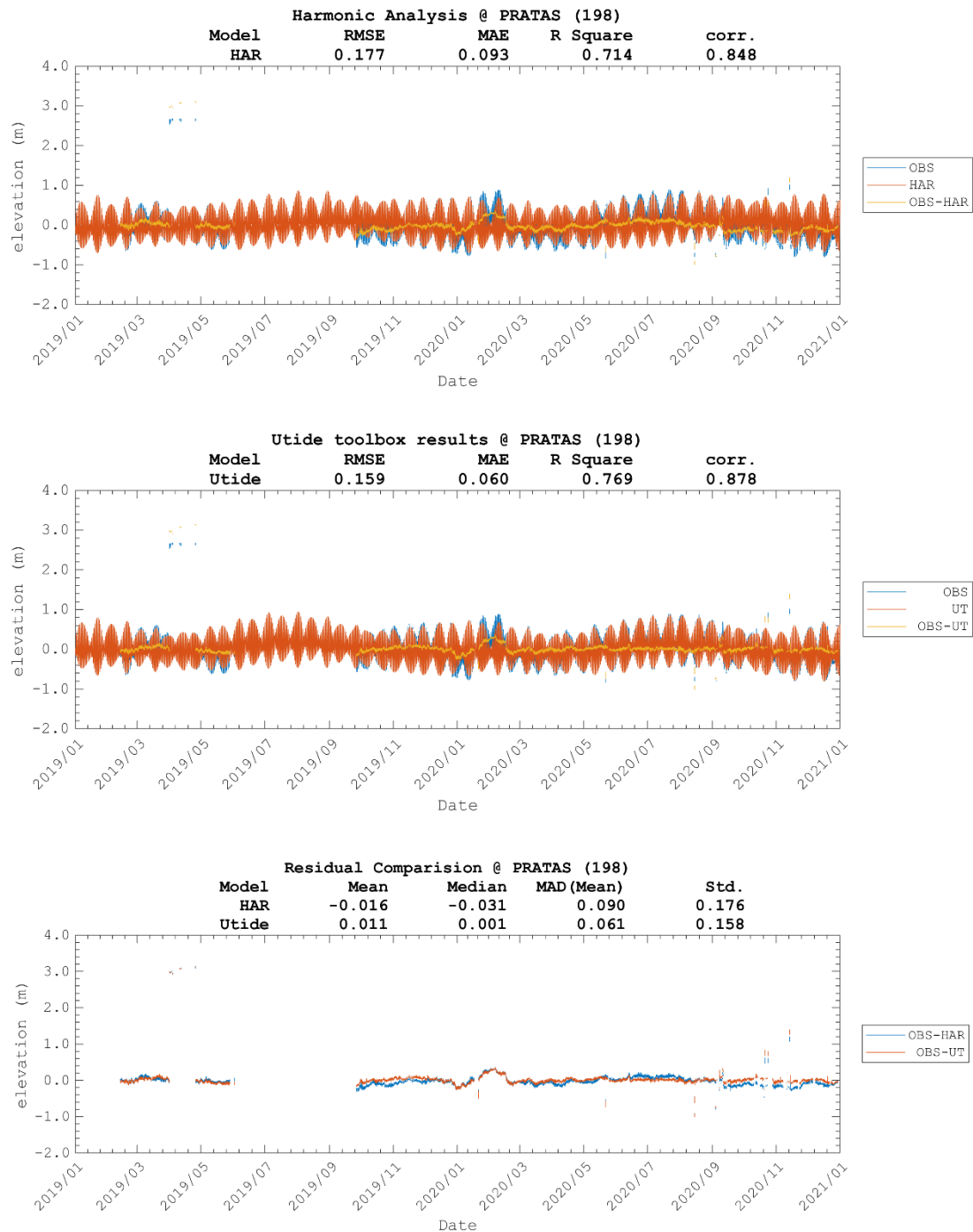


圖 5—48 東沙島測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

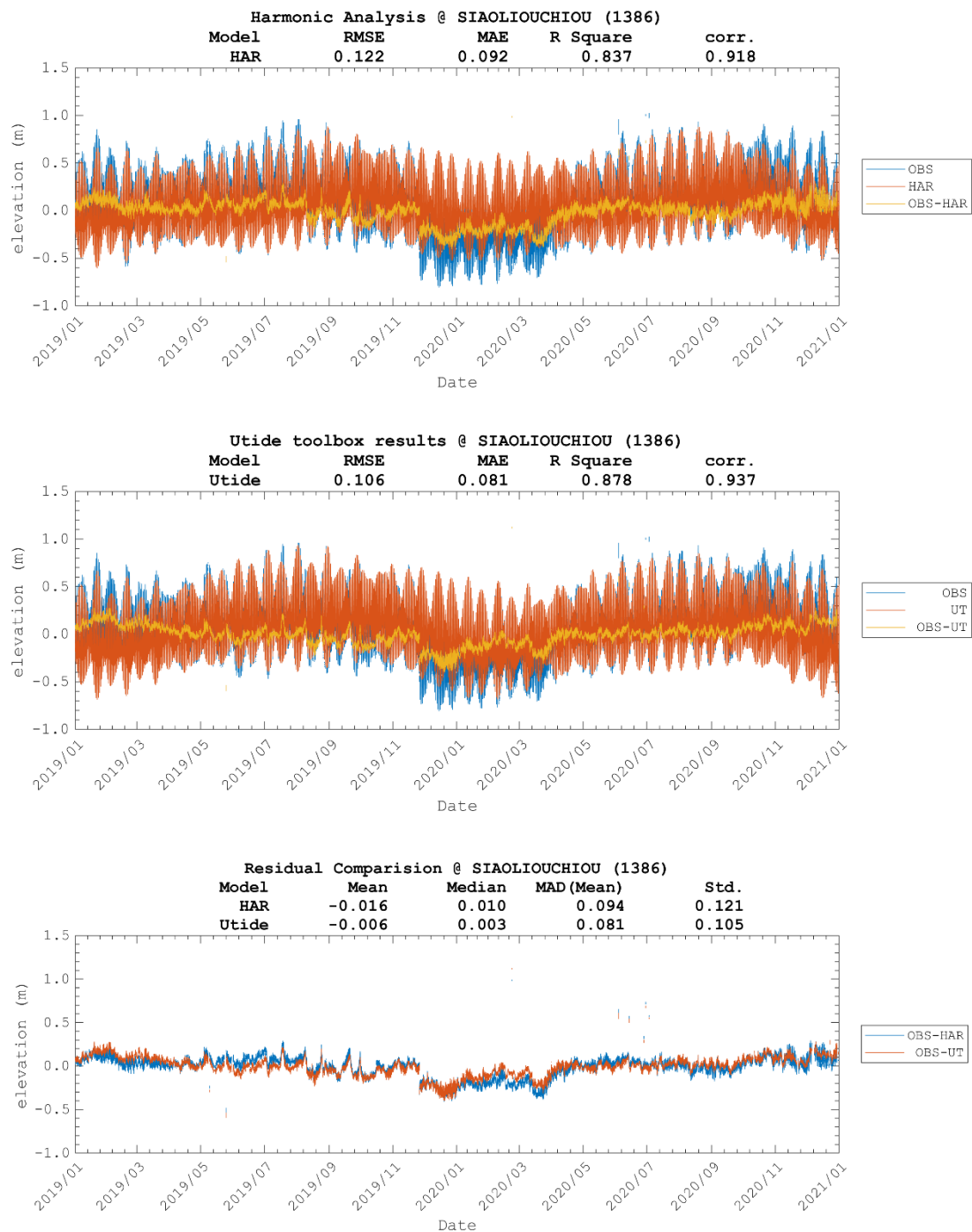


圖 5—49 小琉球測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

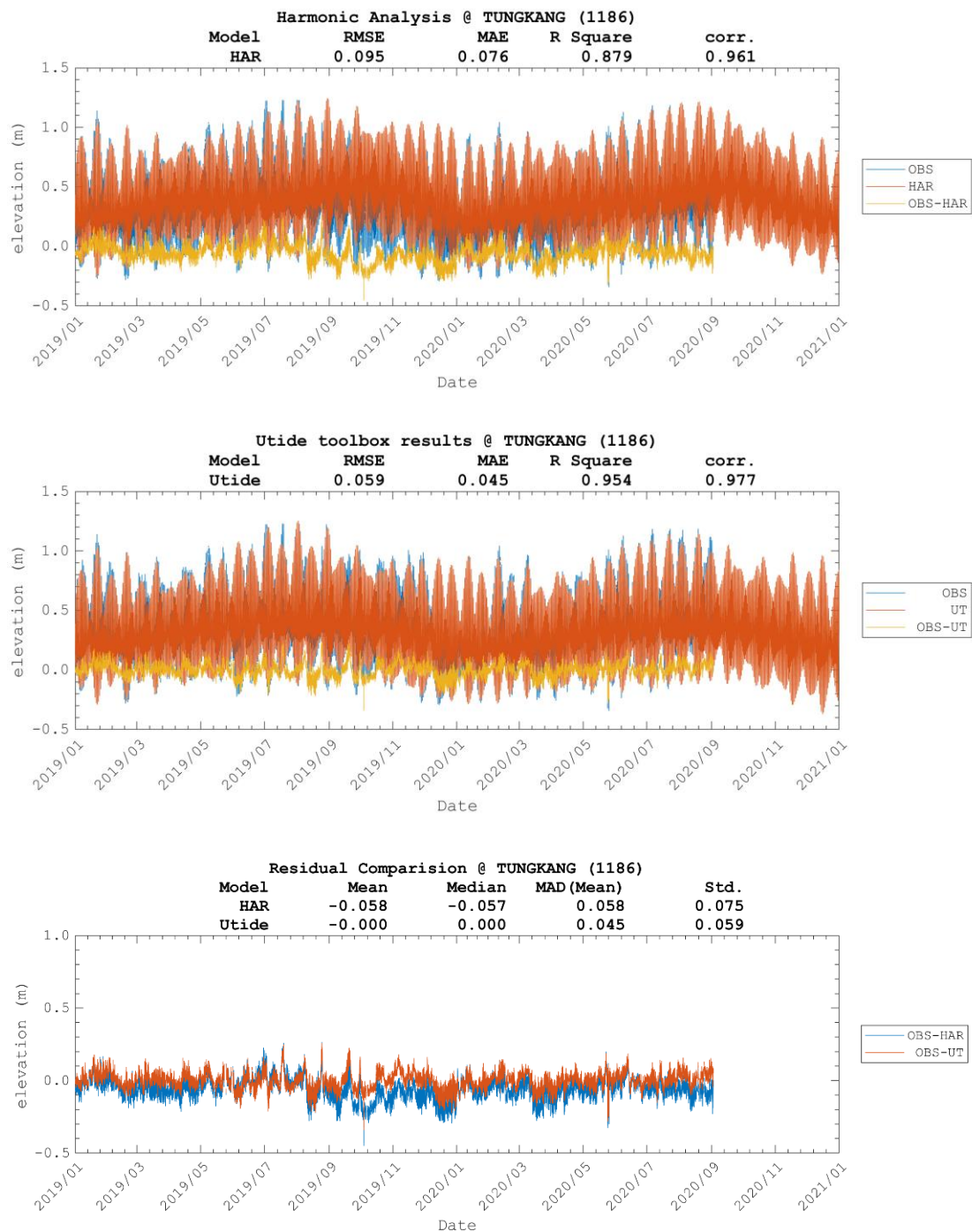


圖 5—50 東港測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

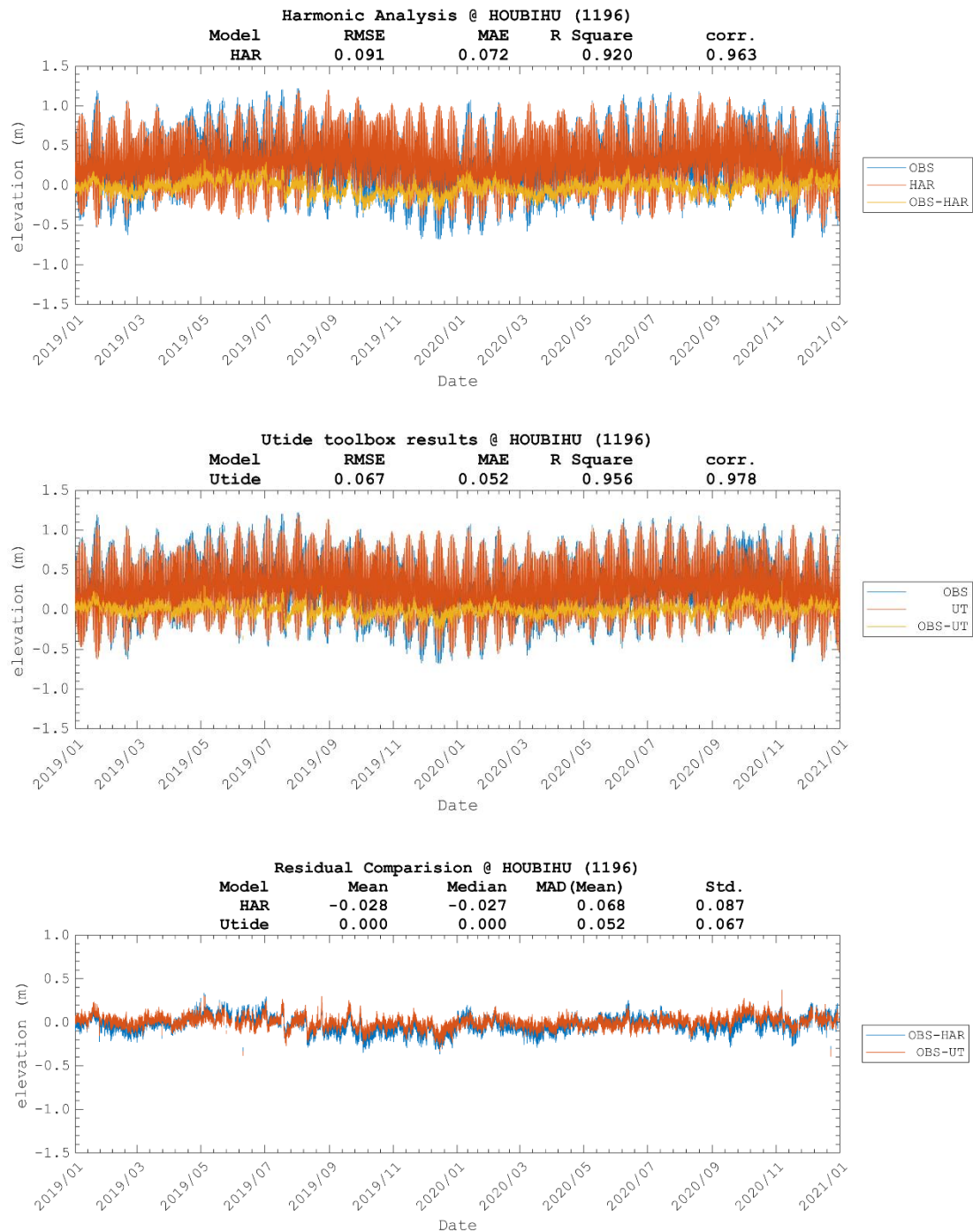


圖 5—51 後壁湖測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

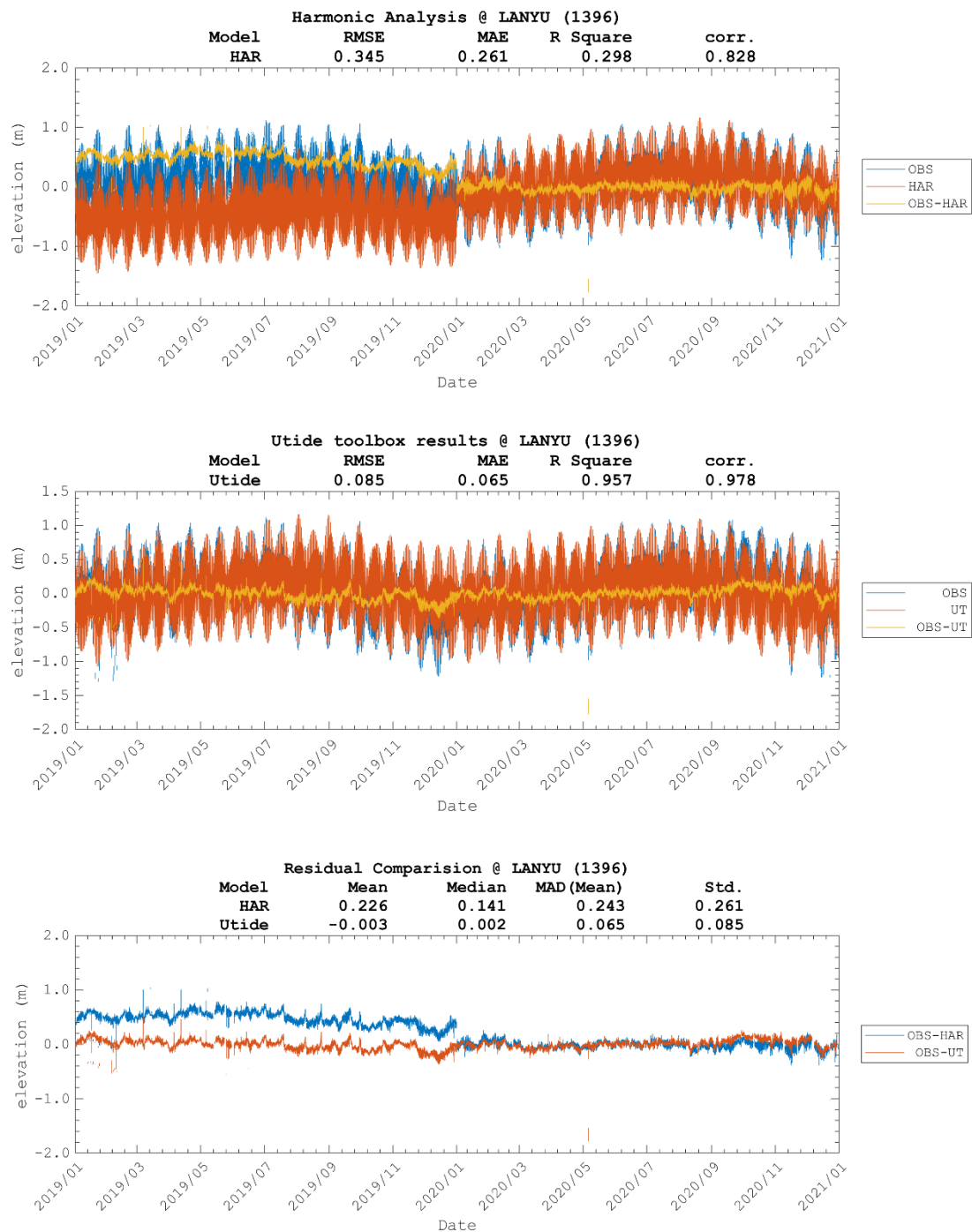


圖 5—52 蘭嶼測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

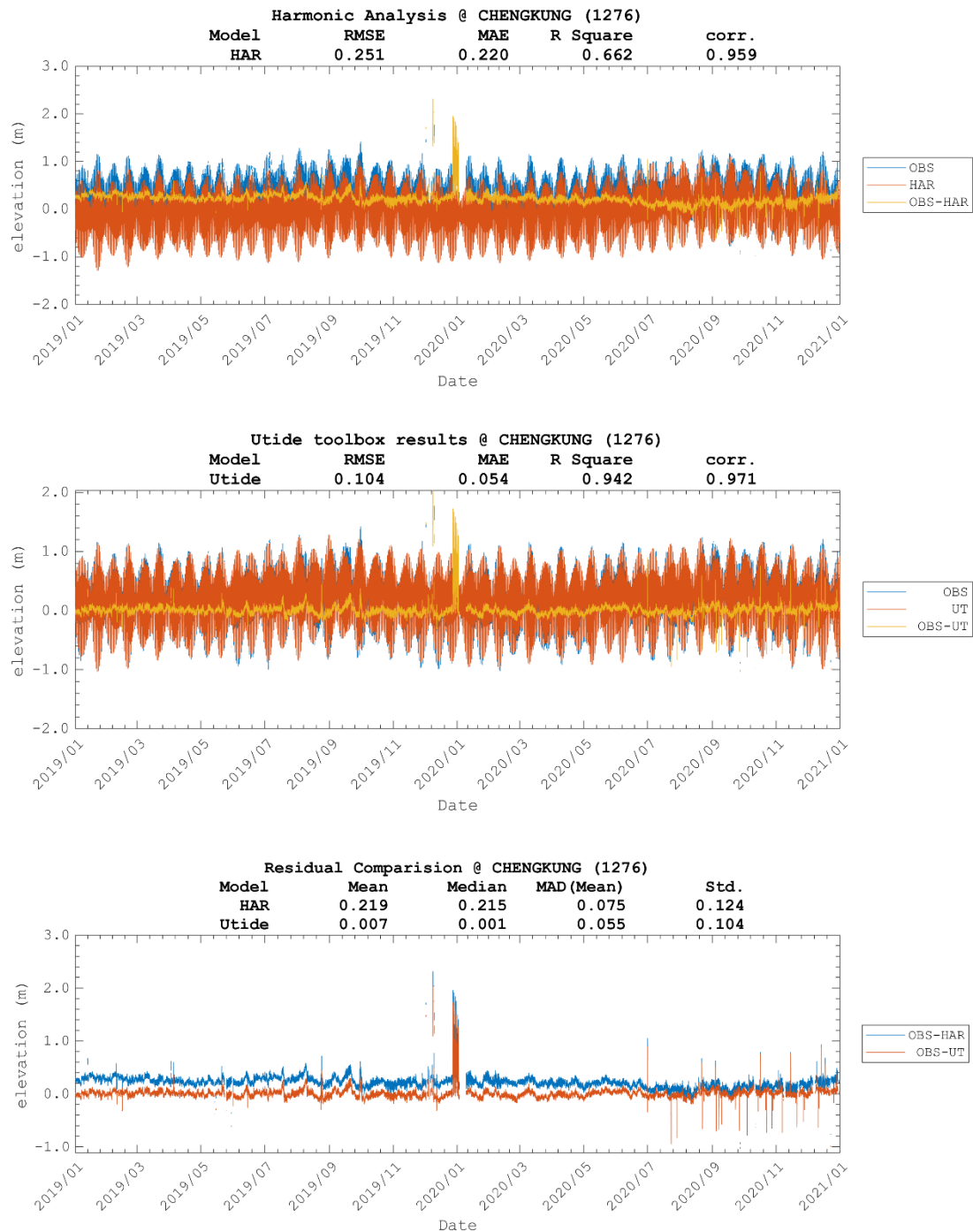


圖 5—53 成功測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

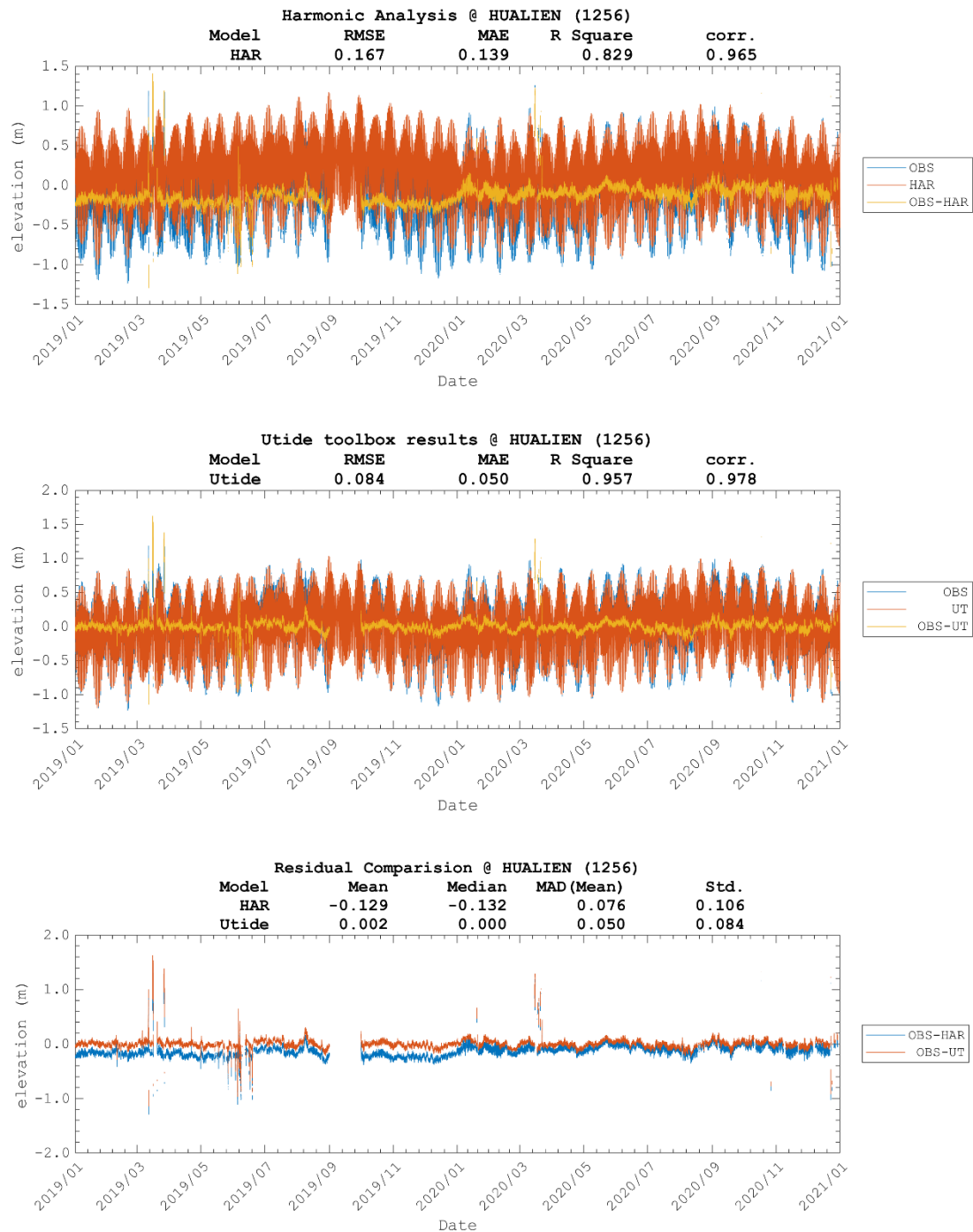


圖 5—54 花蓮測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

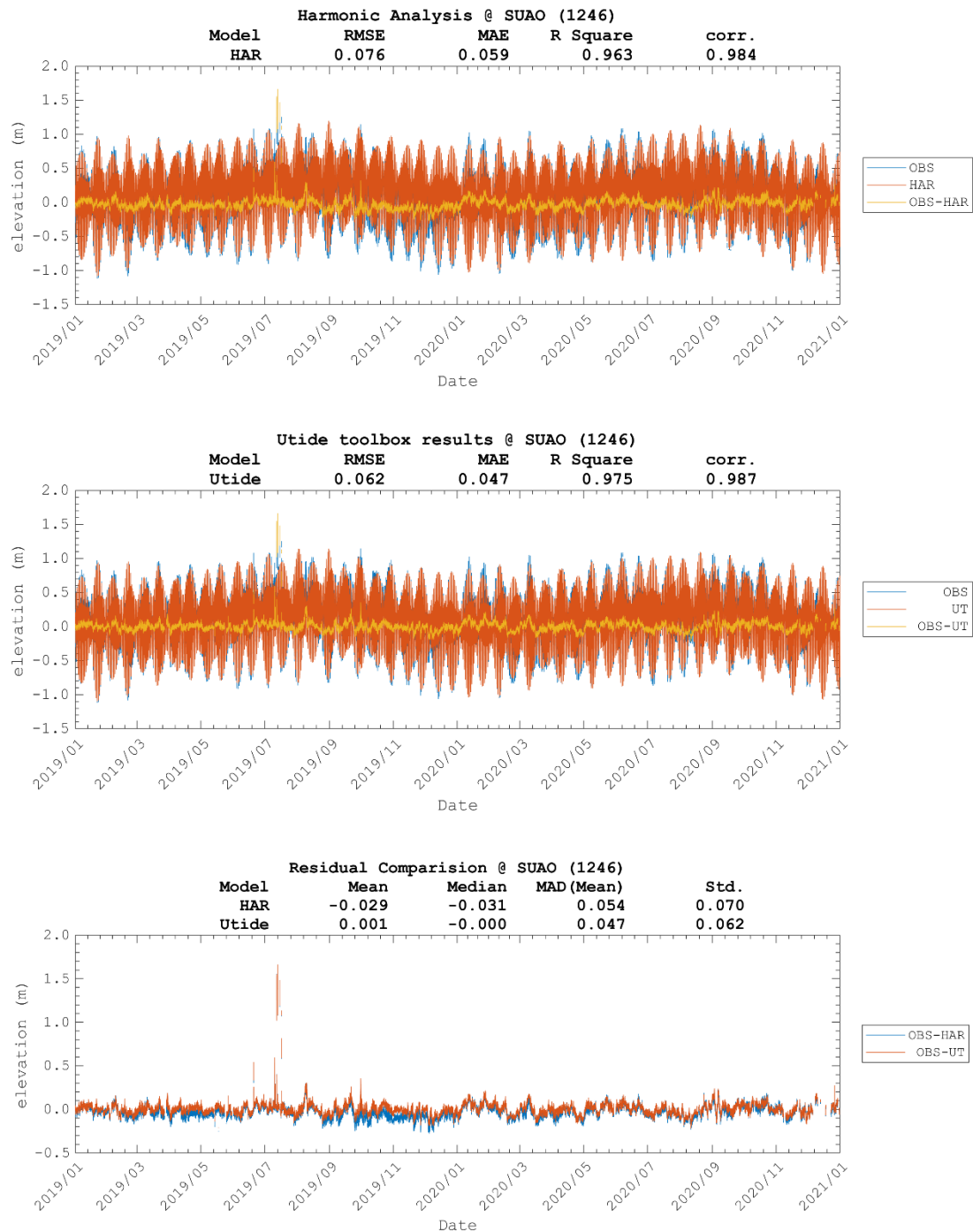


圖 5—55 蘇澳測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

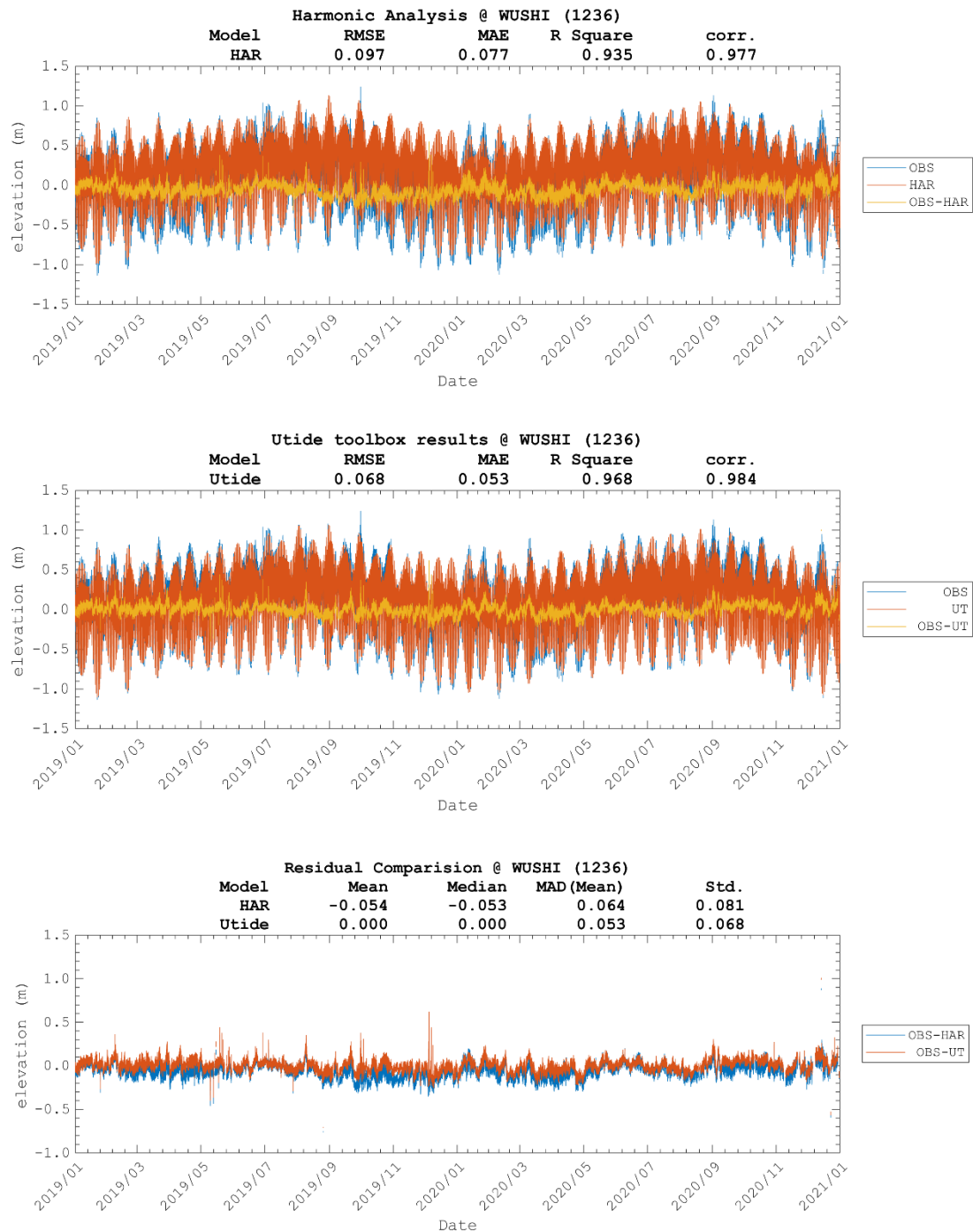


圖 5—56 烏石測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

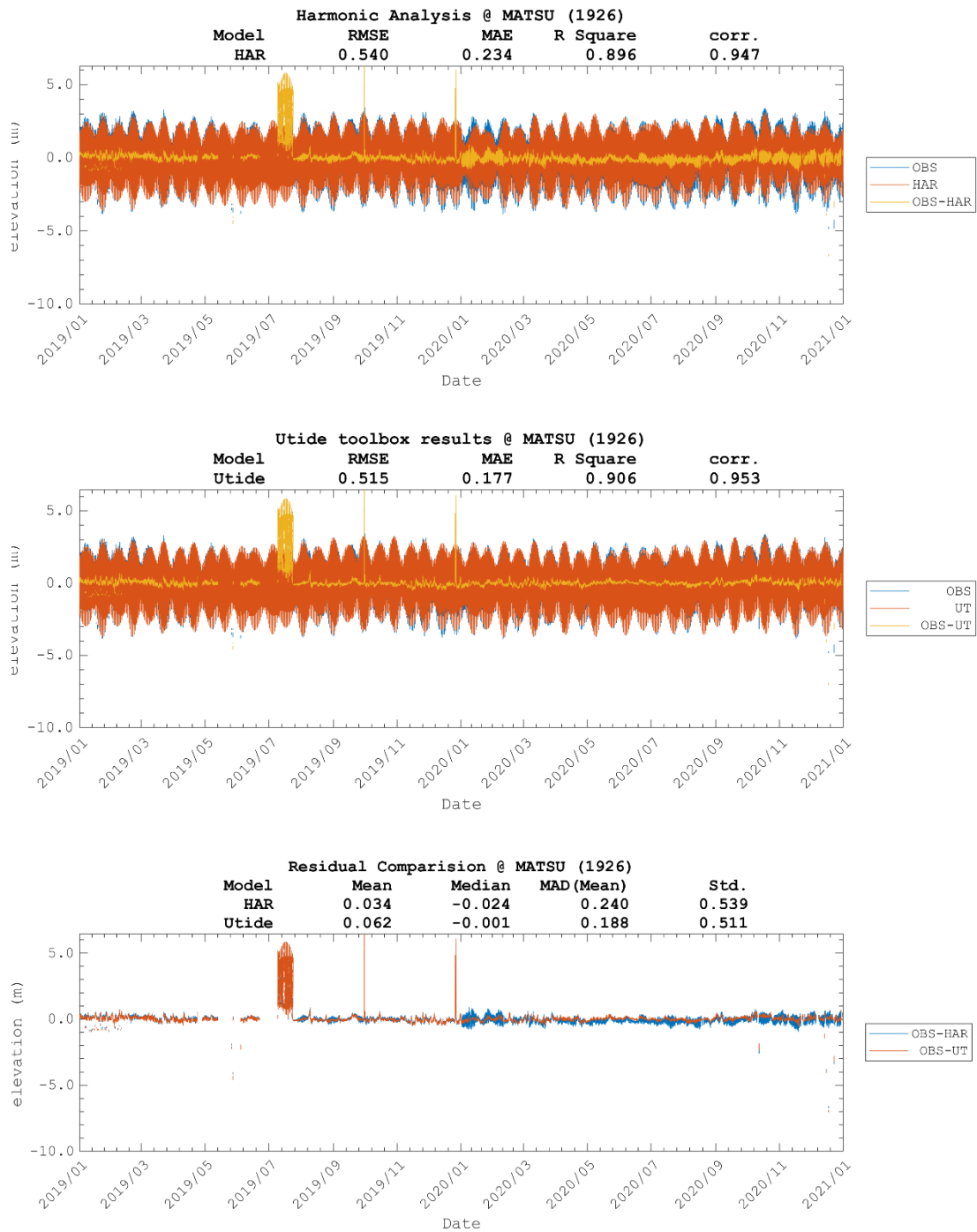


圖 5—57 馬祖測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

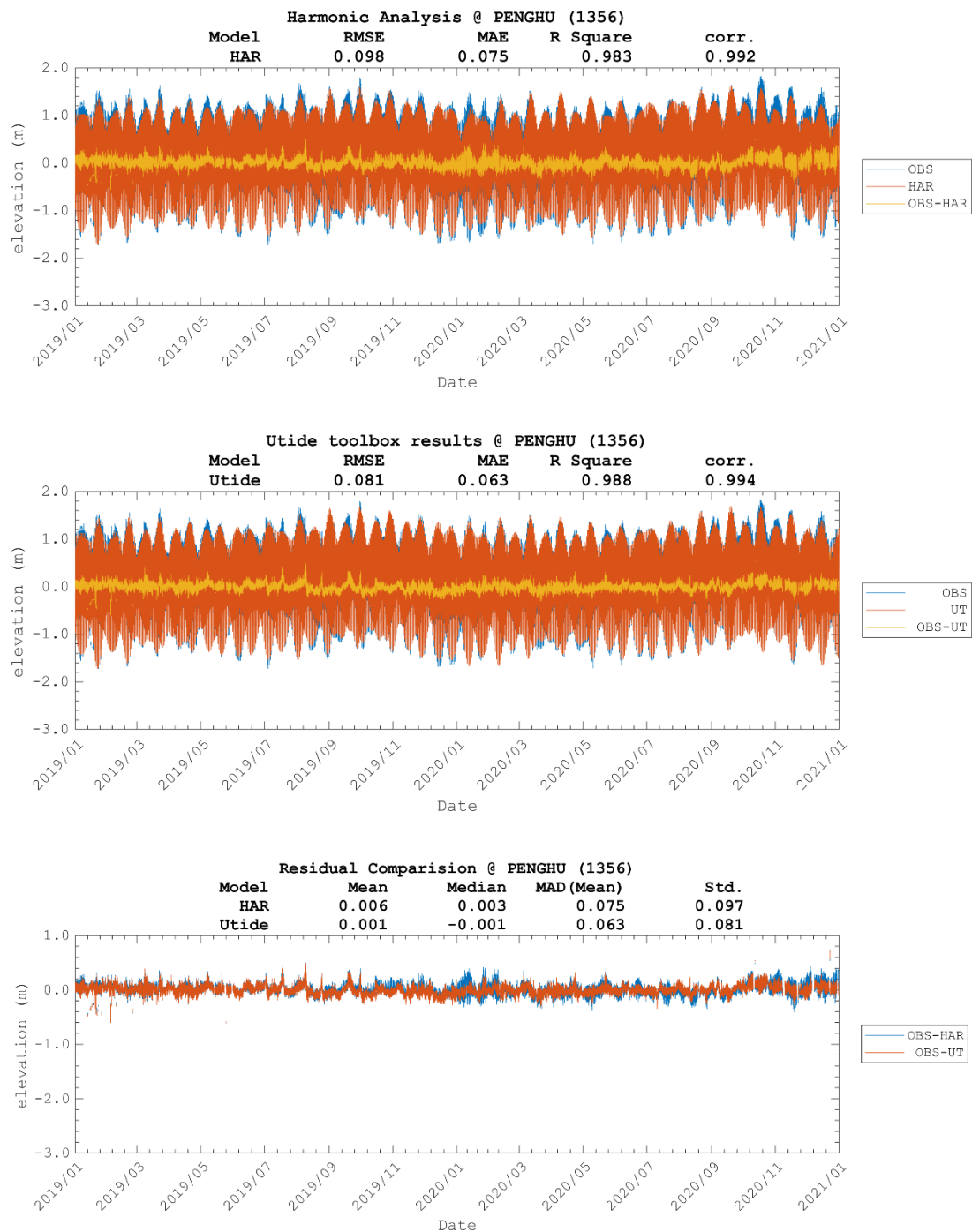


圖 5—58 澎湖馬公測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

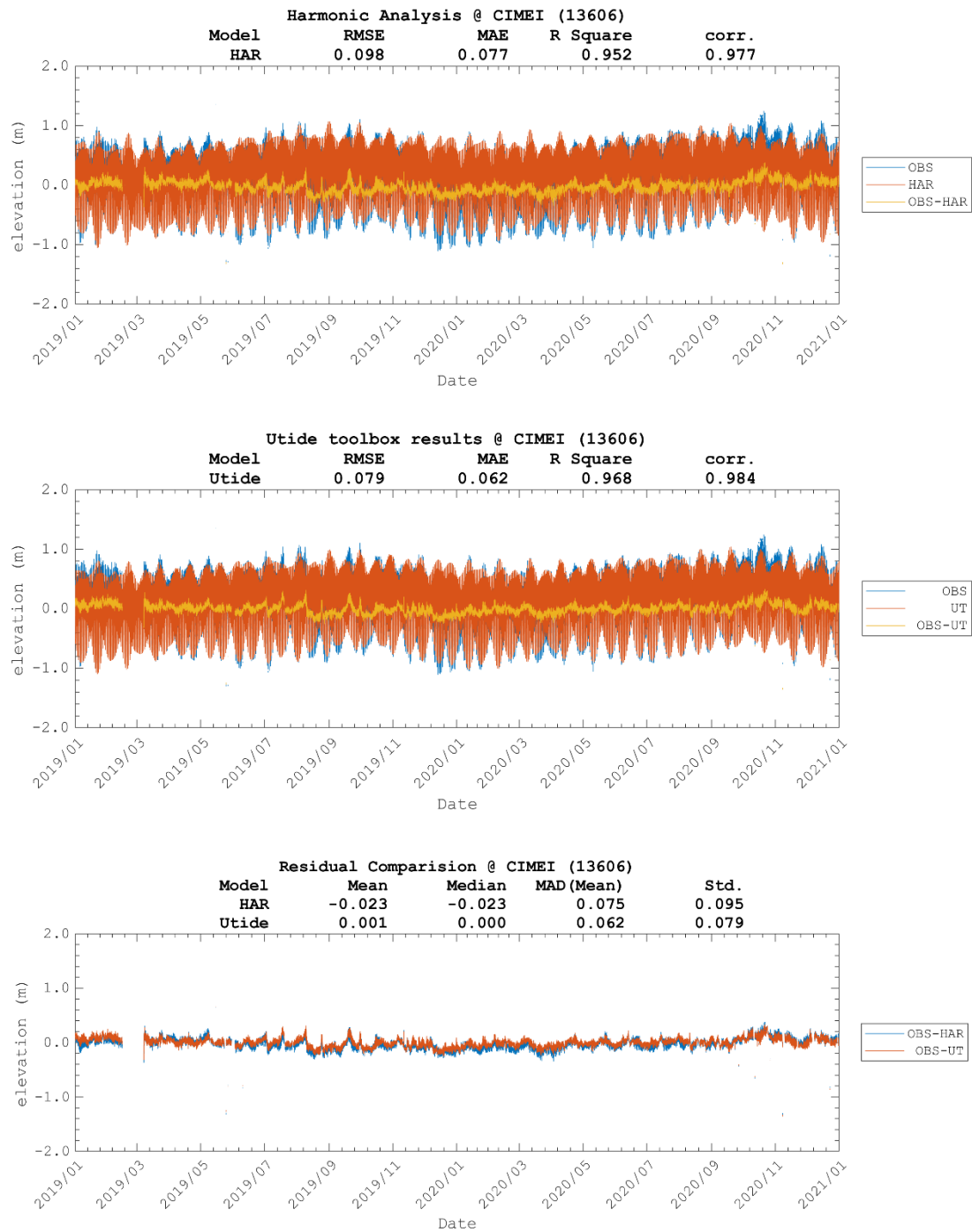


圖 5—59 七美測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

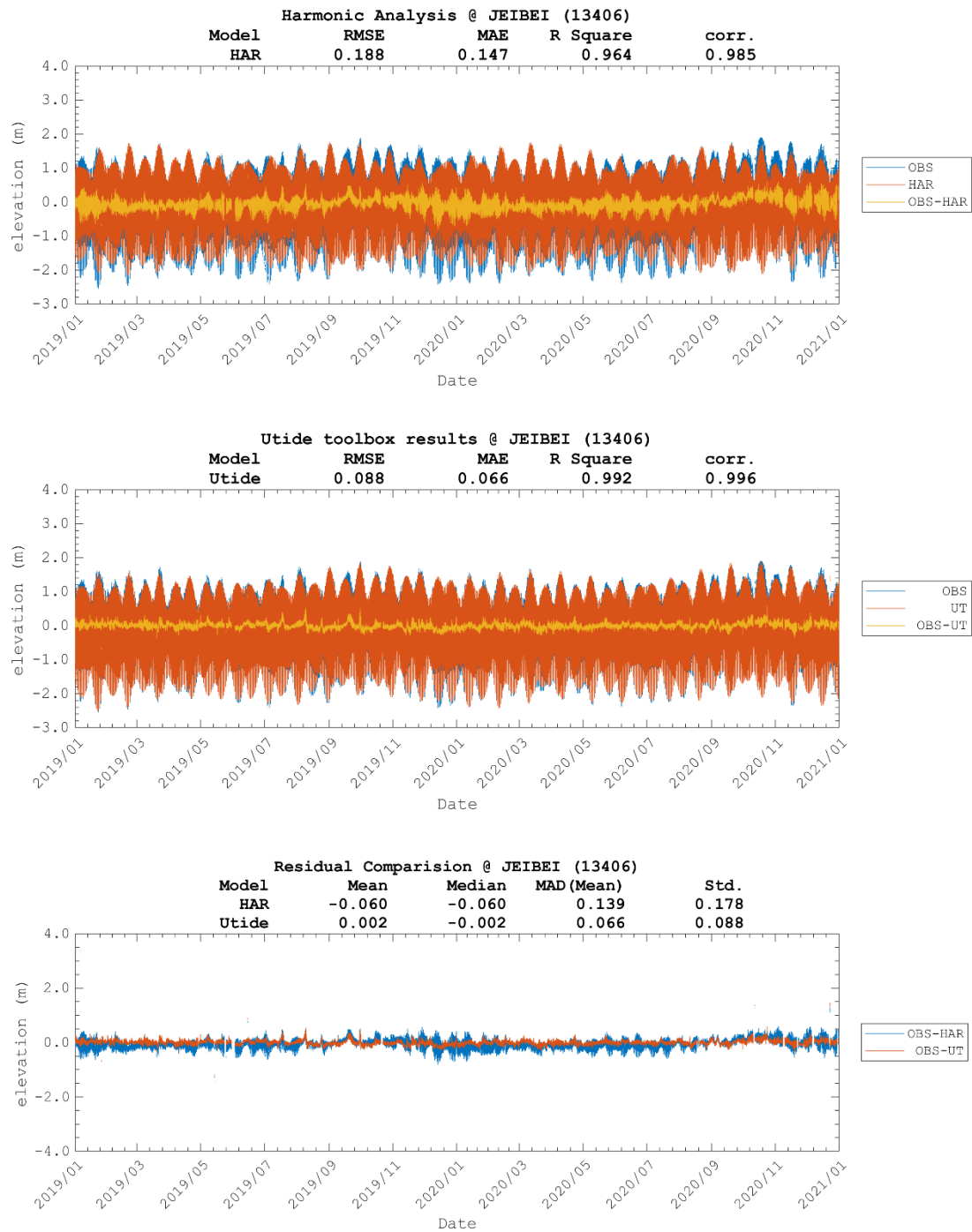


圖 5—60 吉貝測站 2019 年至 2020 年分析天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內分析水位 (HAR)，中圖為 Utide 分析水位 (UT)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

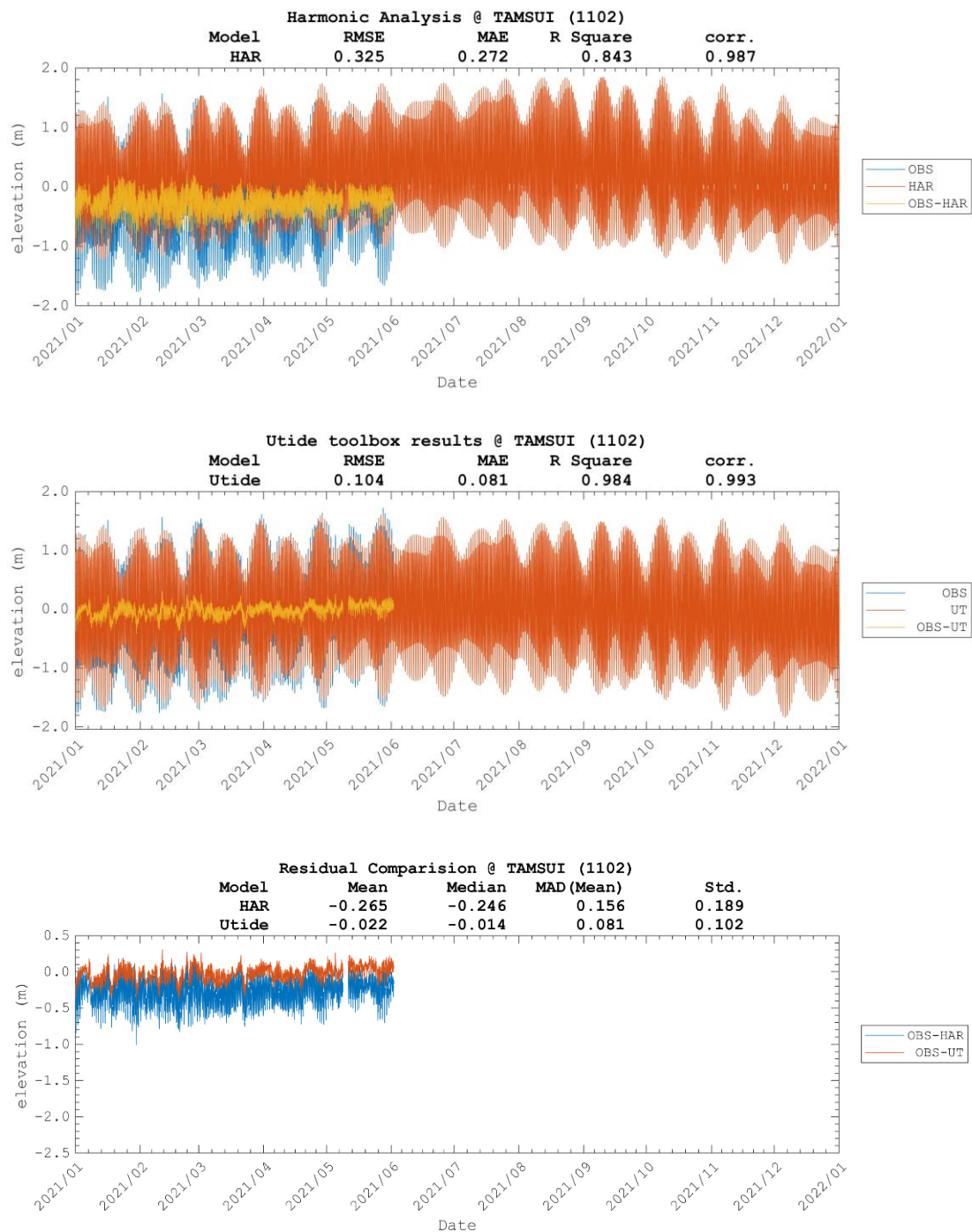


圖 5—61 淡水測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

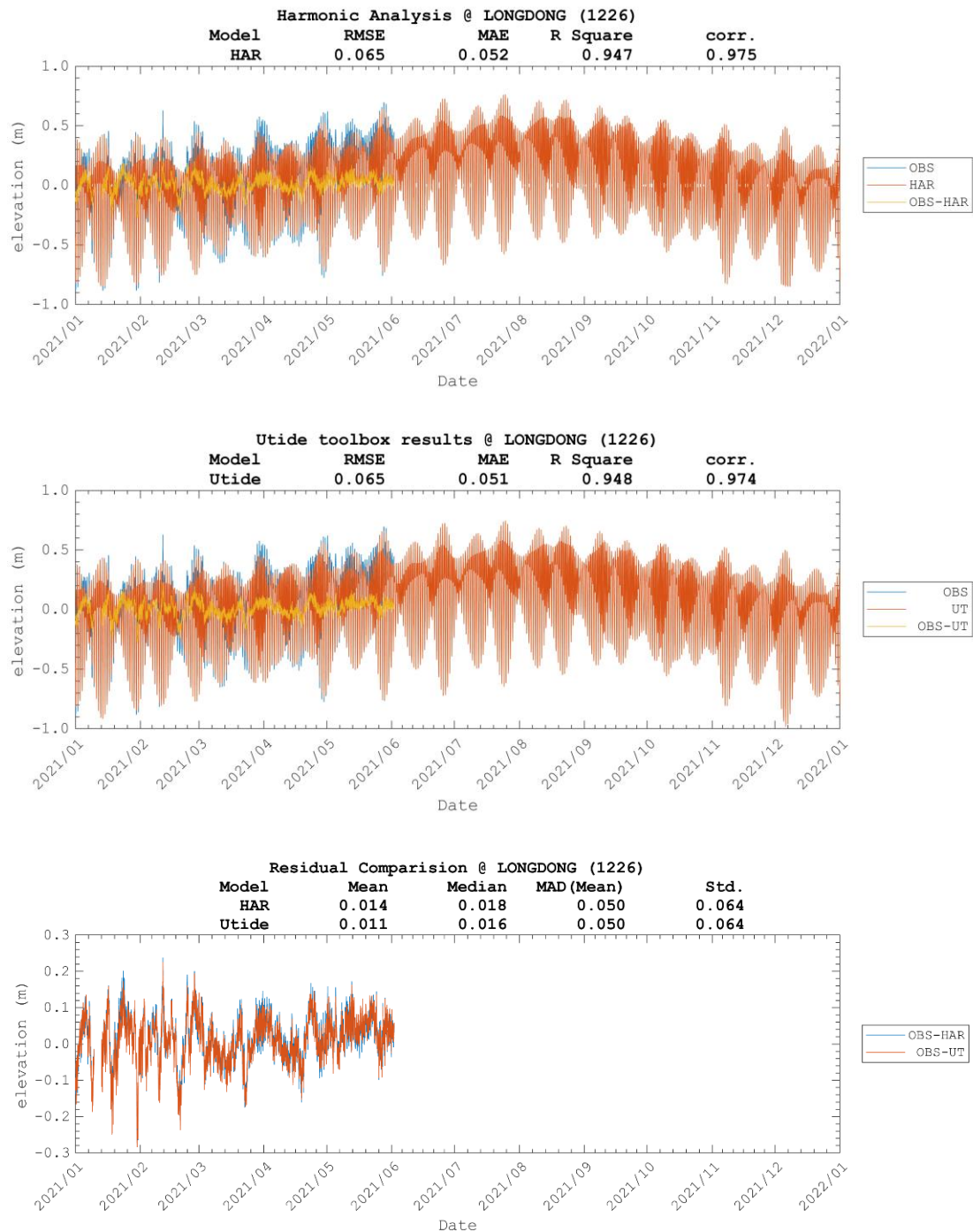


圖 5—62 龍洞測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
 上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

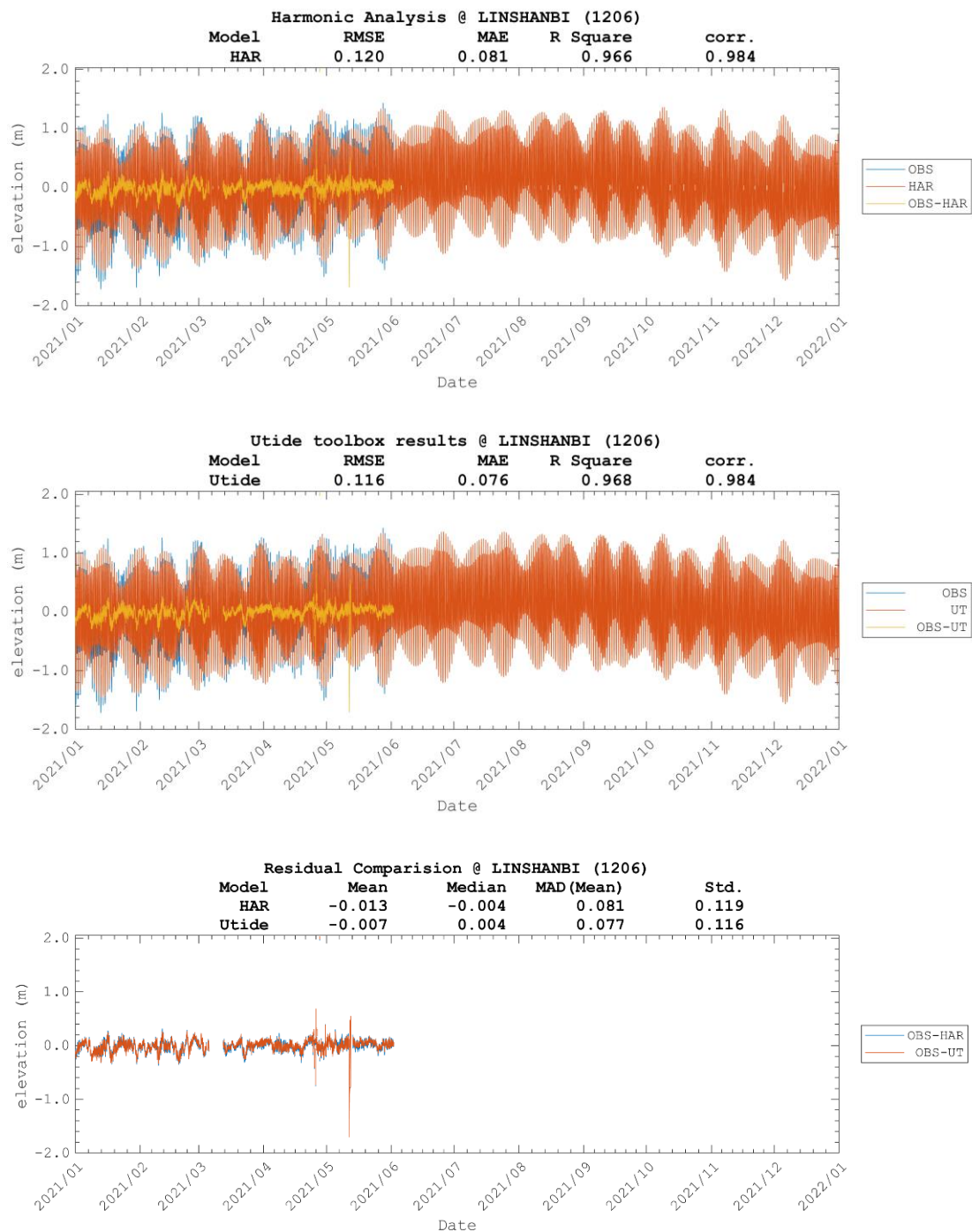


圖 5—63 麟山鼻測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

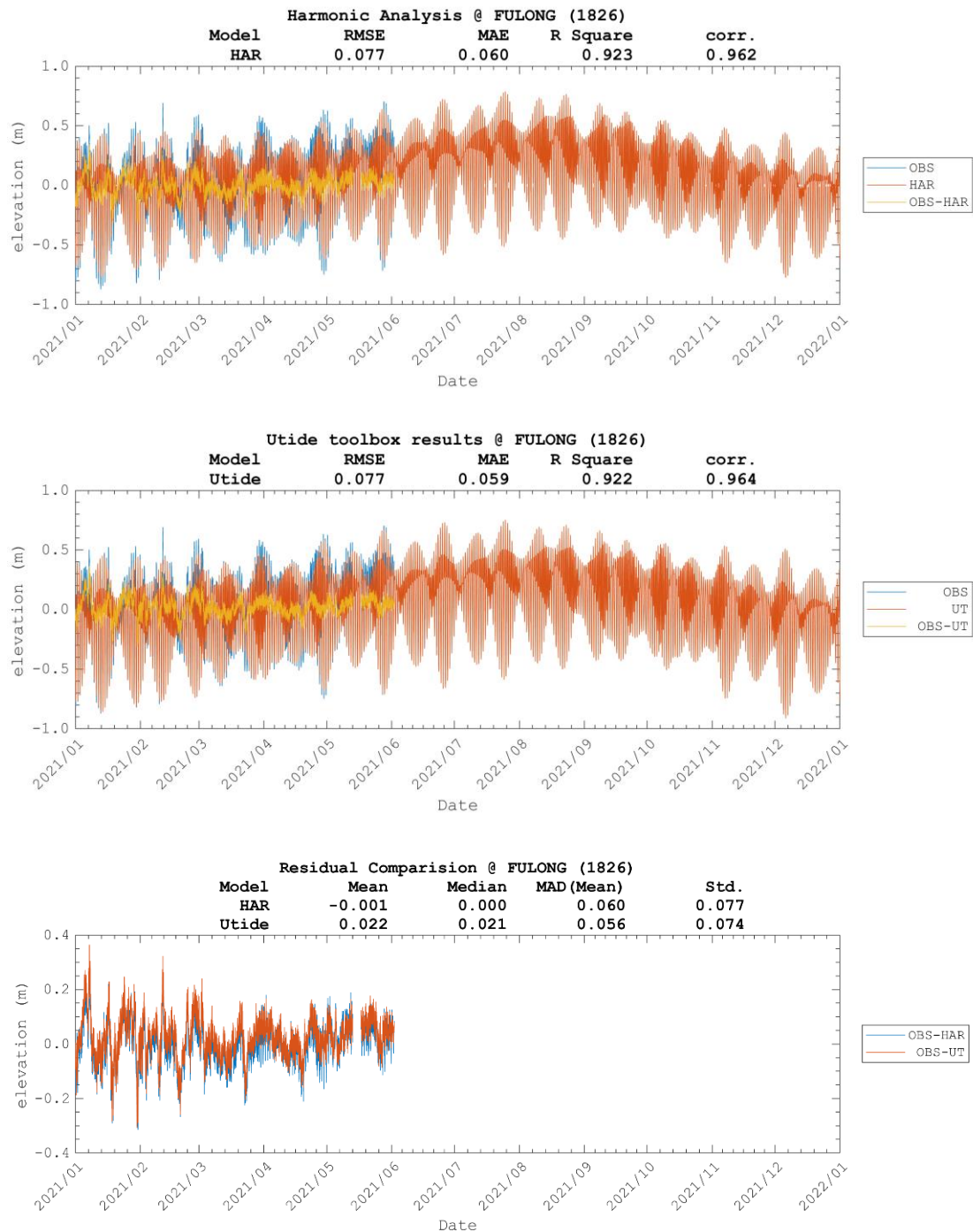


圖 5—64 福隆測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

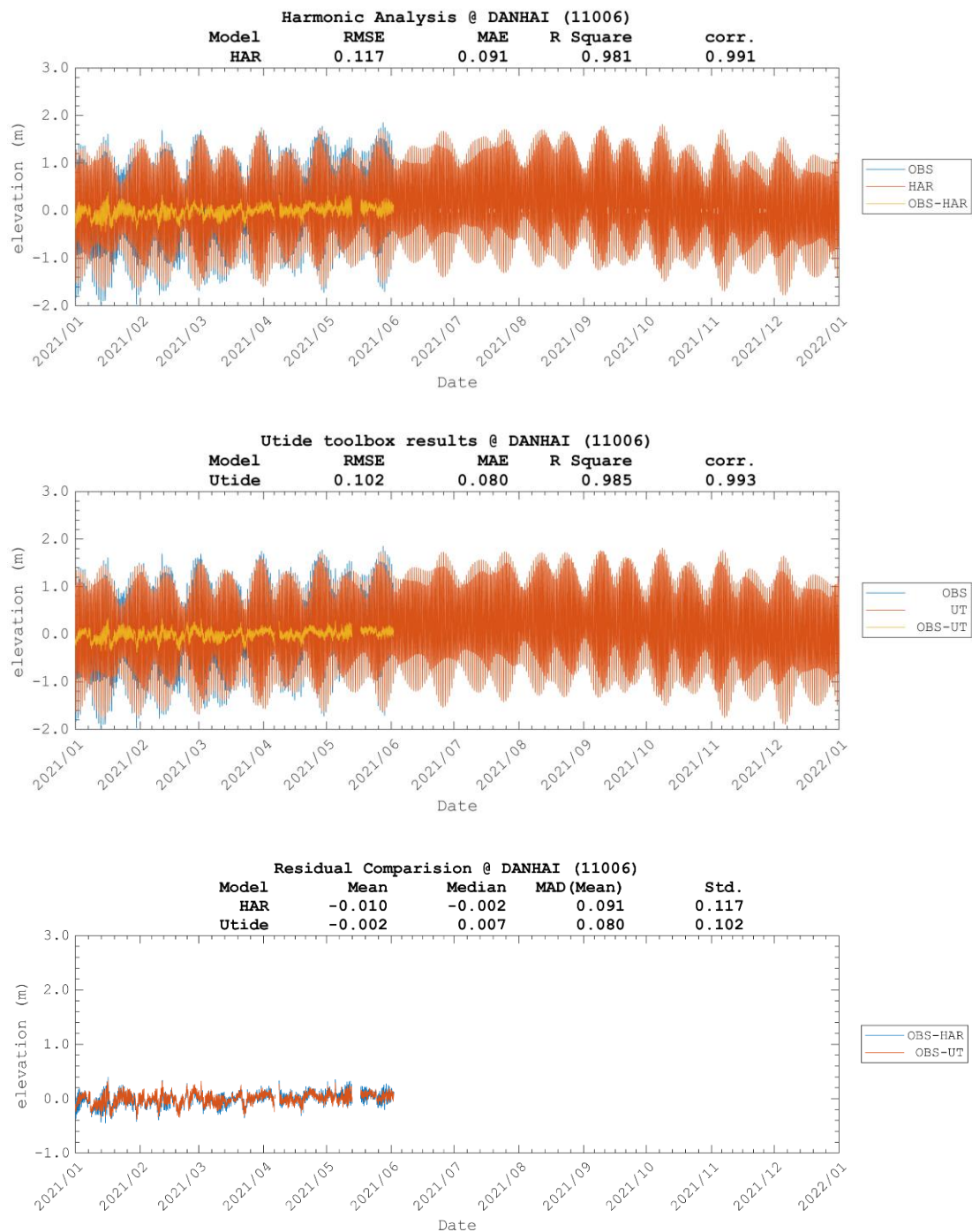


圖 5—65 淡海測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

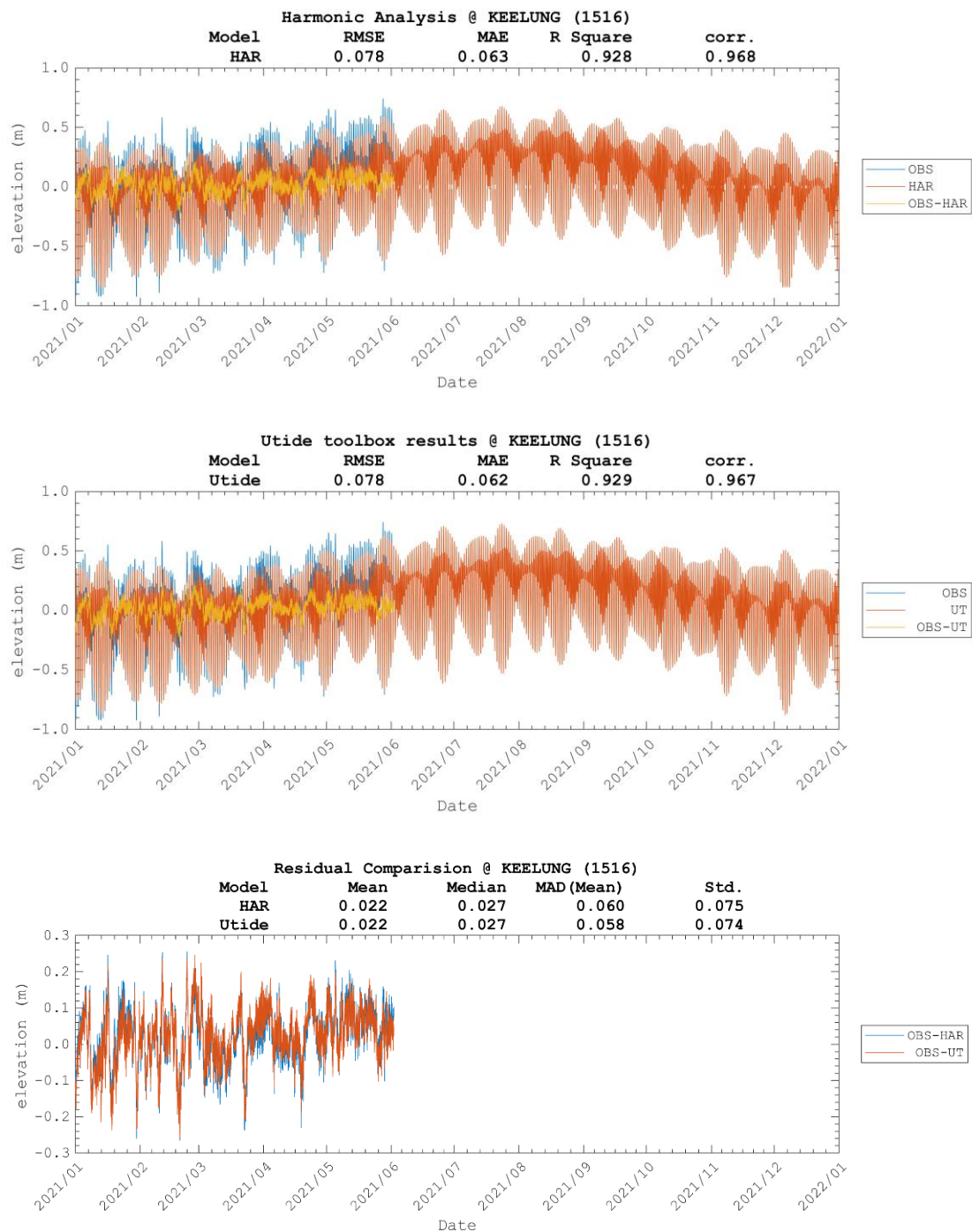


圖 5—66 基隆測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

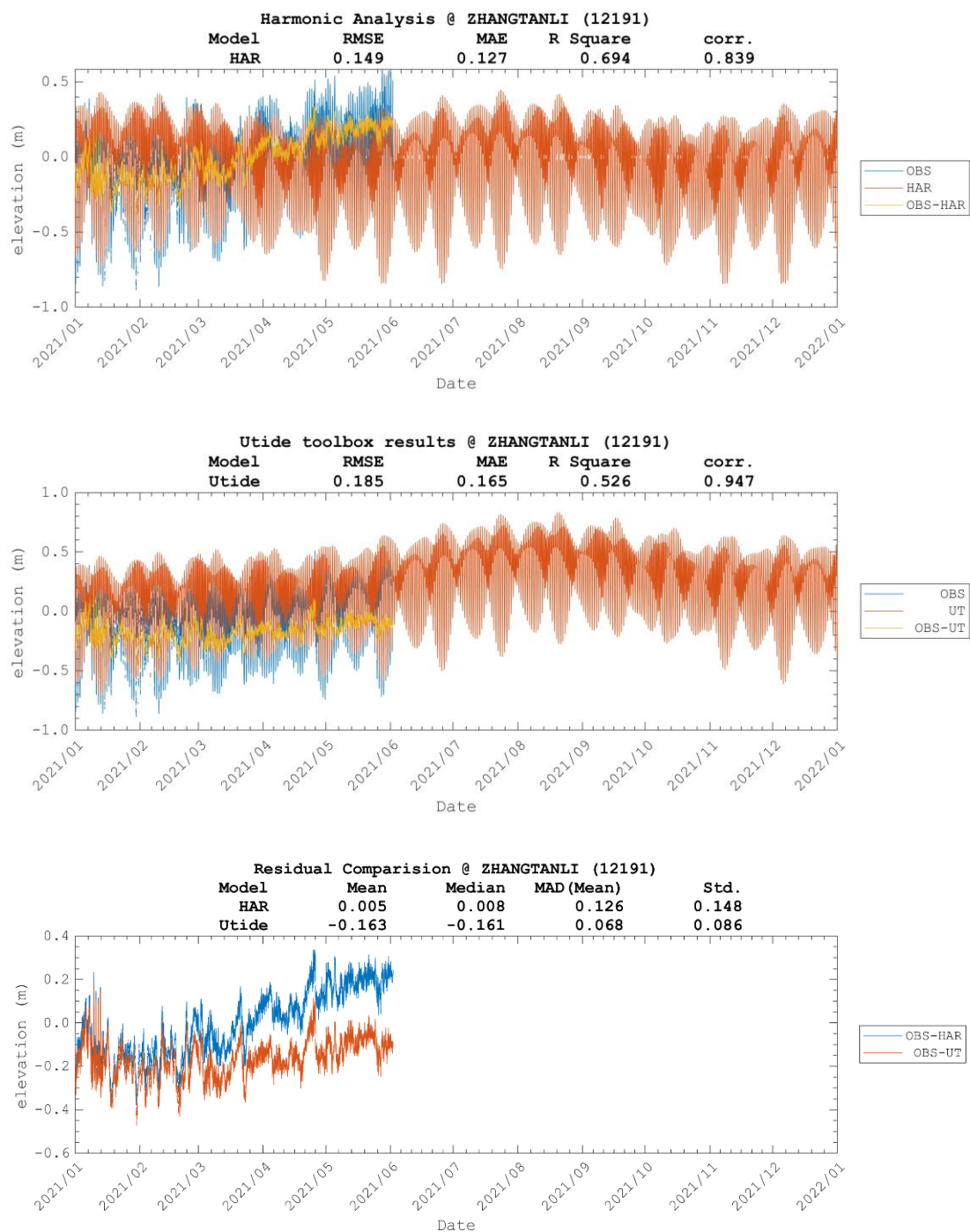


圖 5—67 長潭里測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

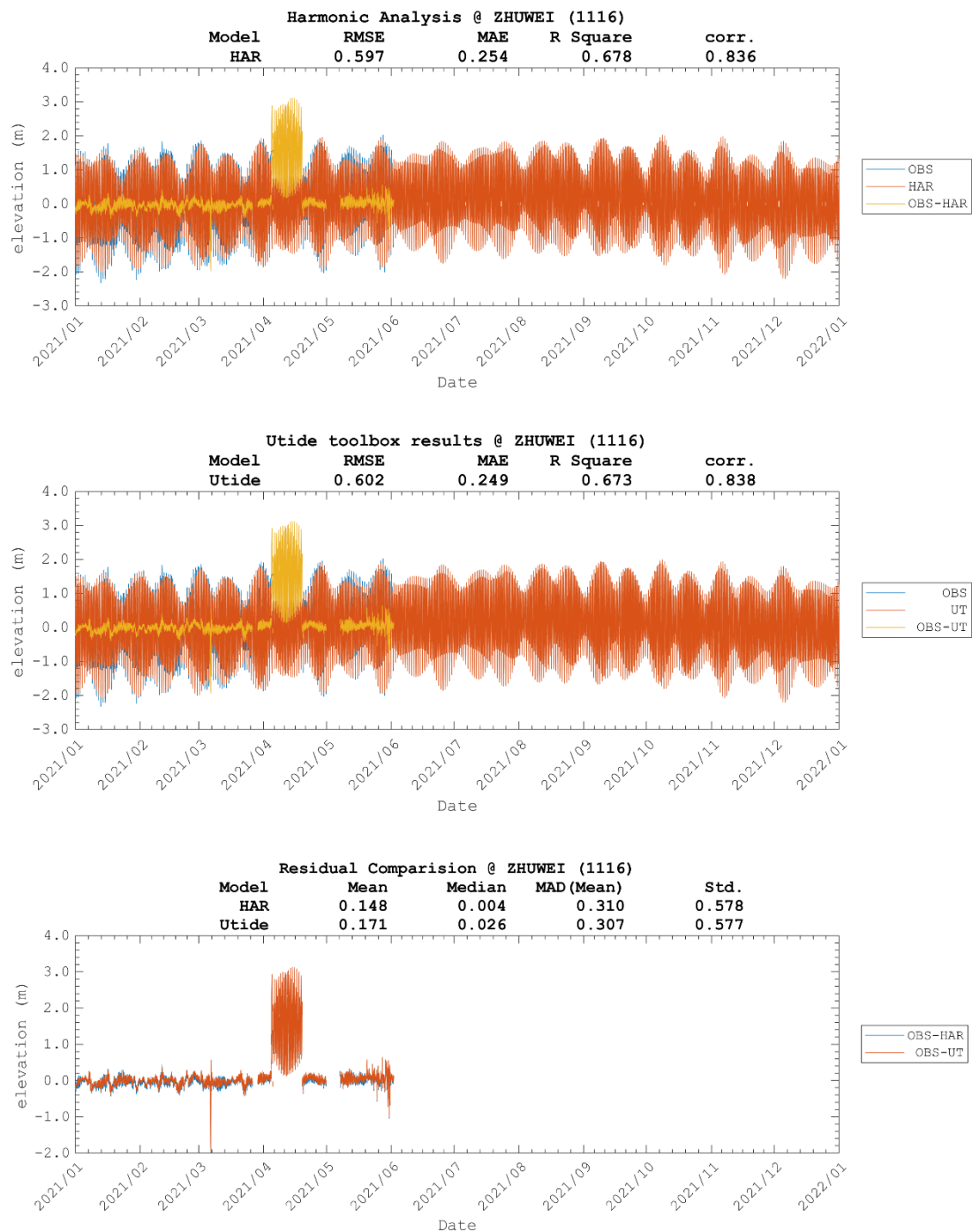


圖 5—68 竹圍測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

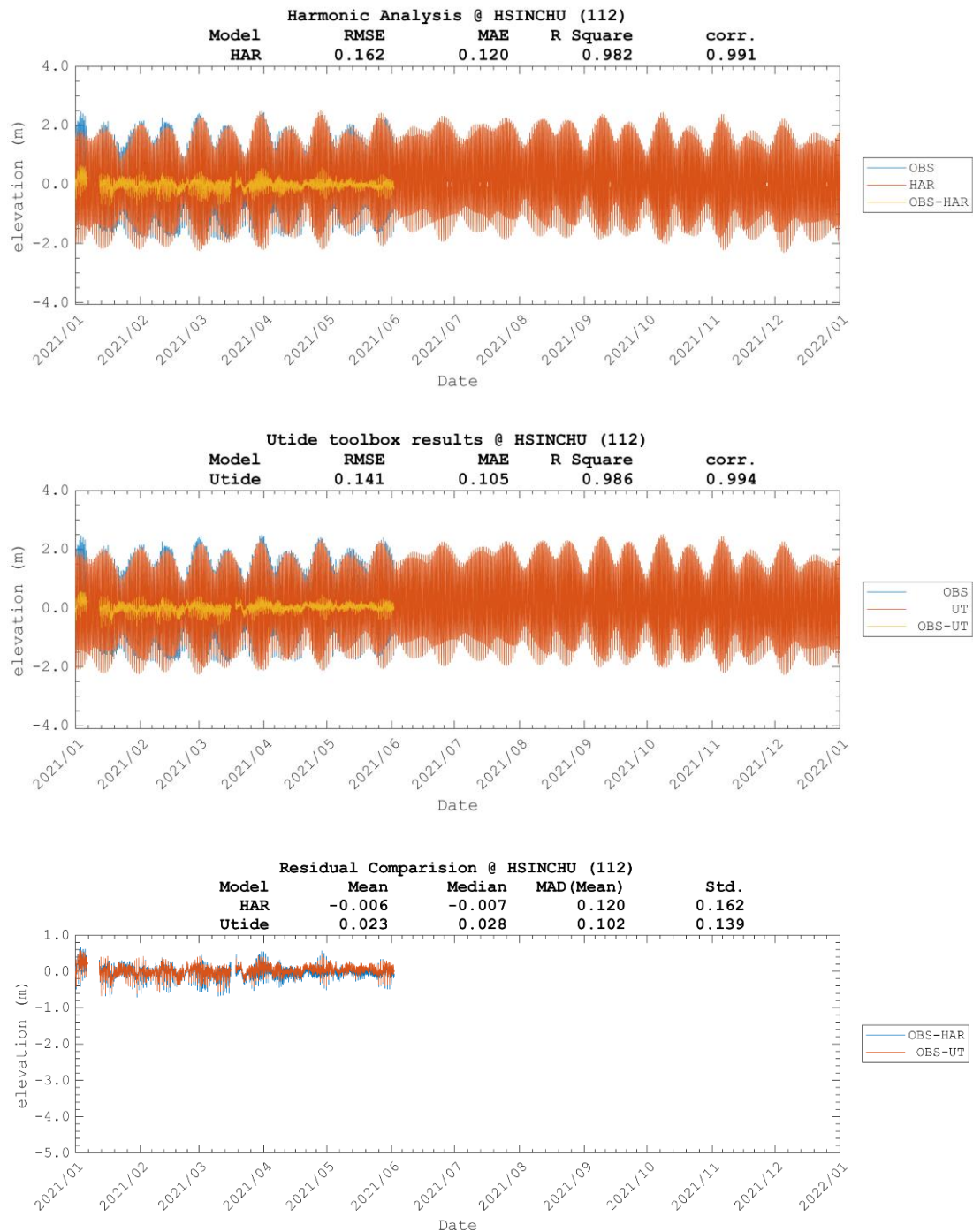


圖 5—69 新竹測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

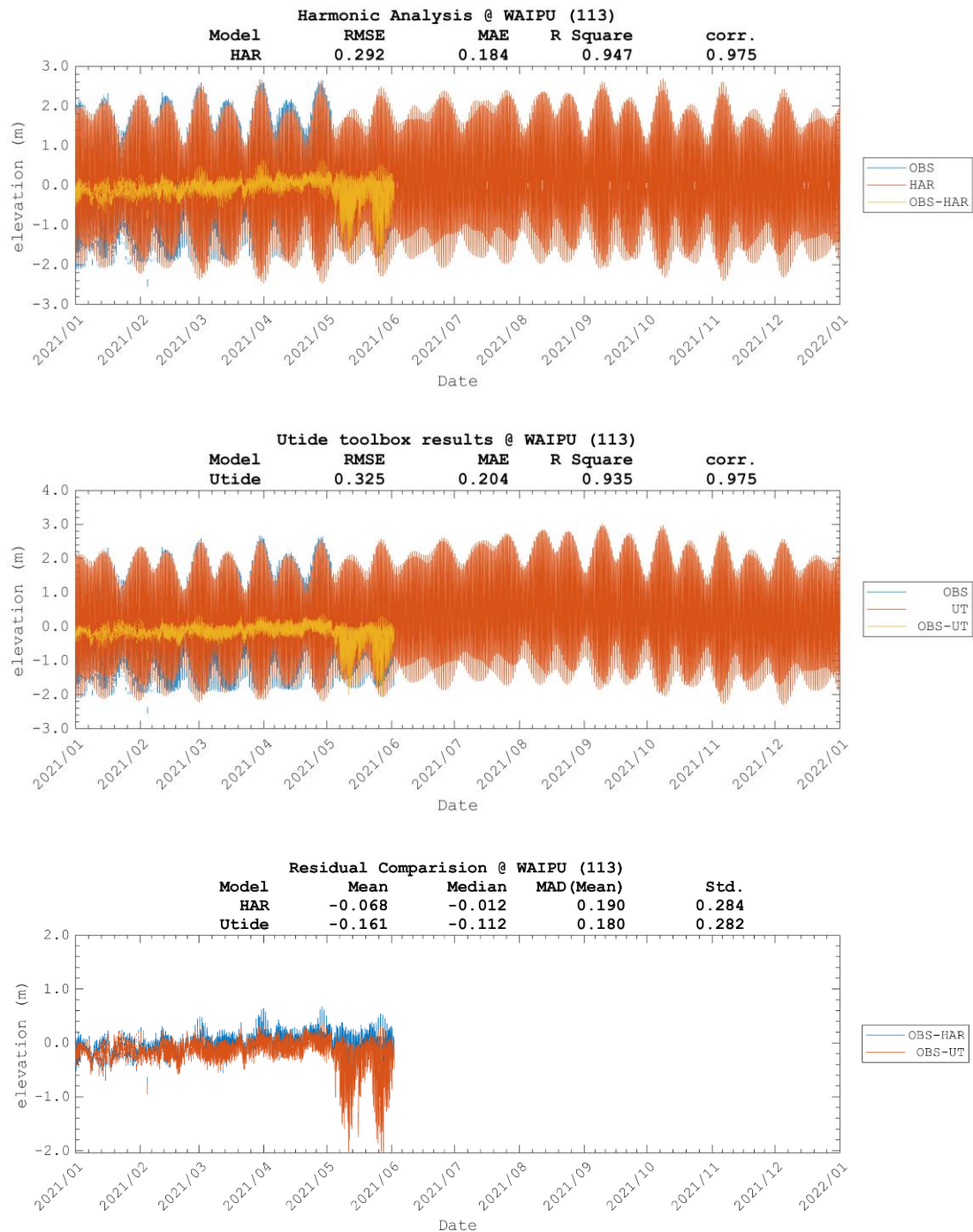


圖 5—70 外埔測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
 上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

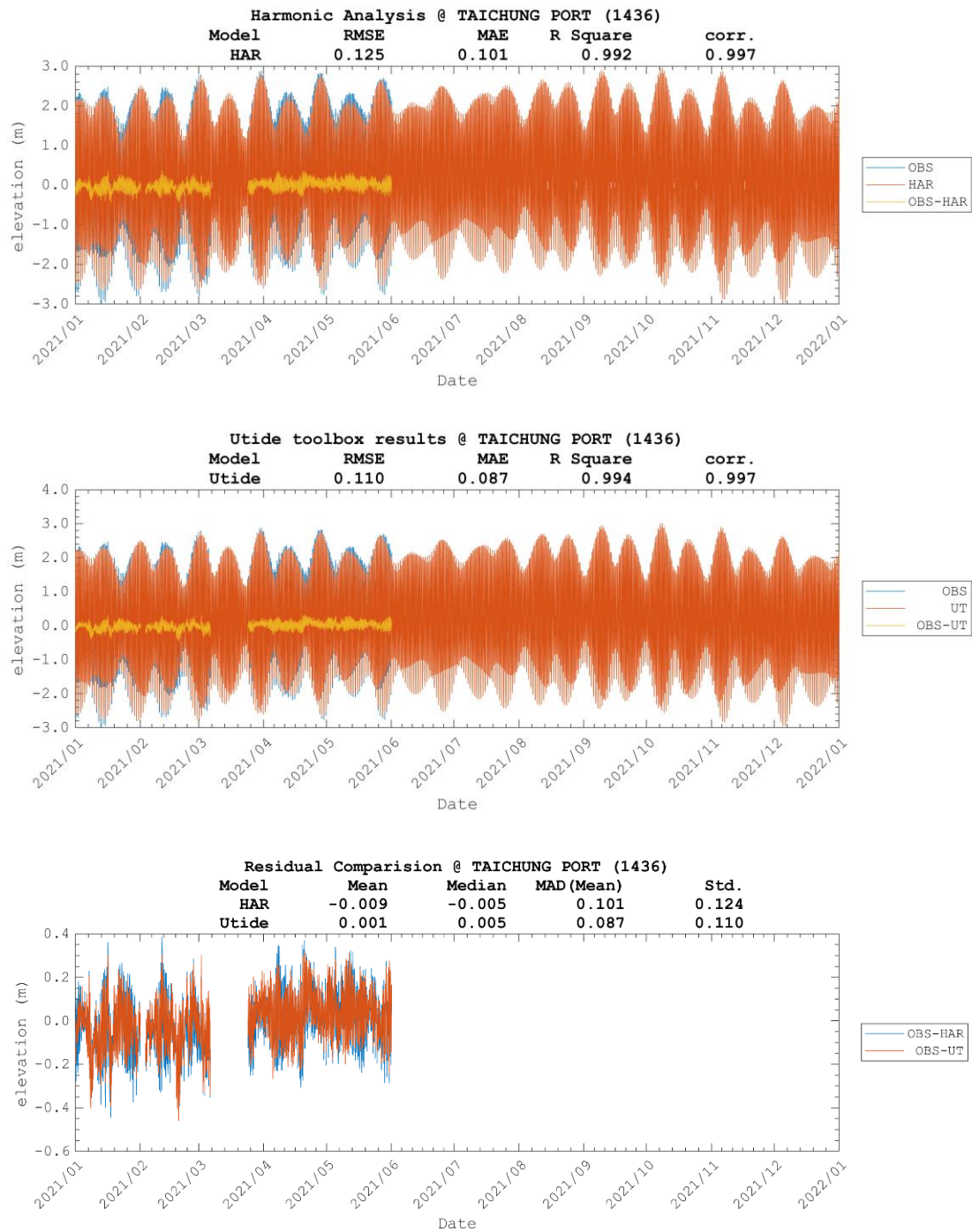


圖 5—71 台中測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

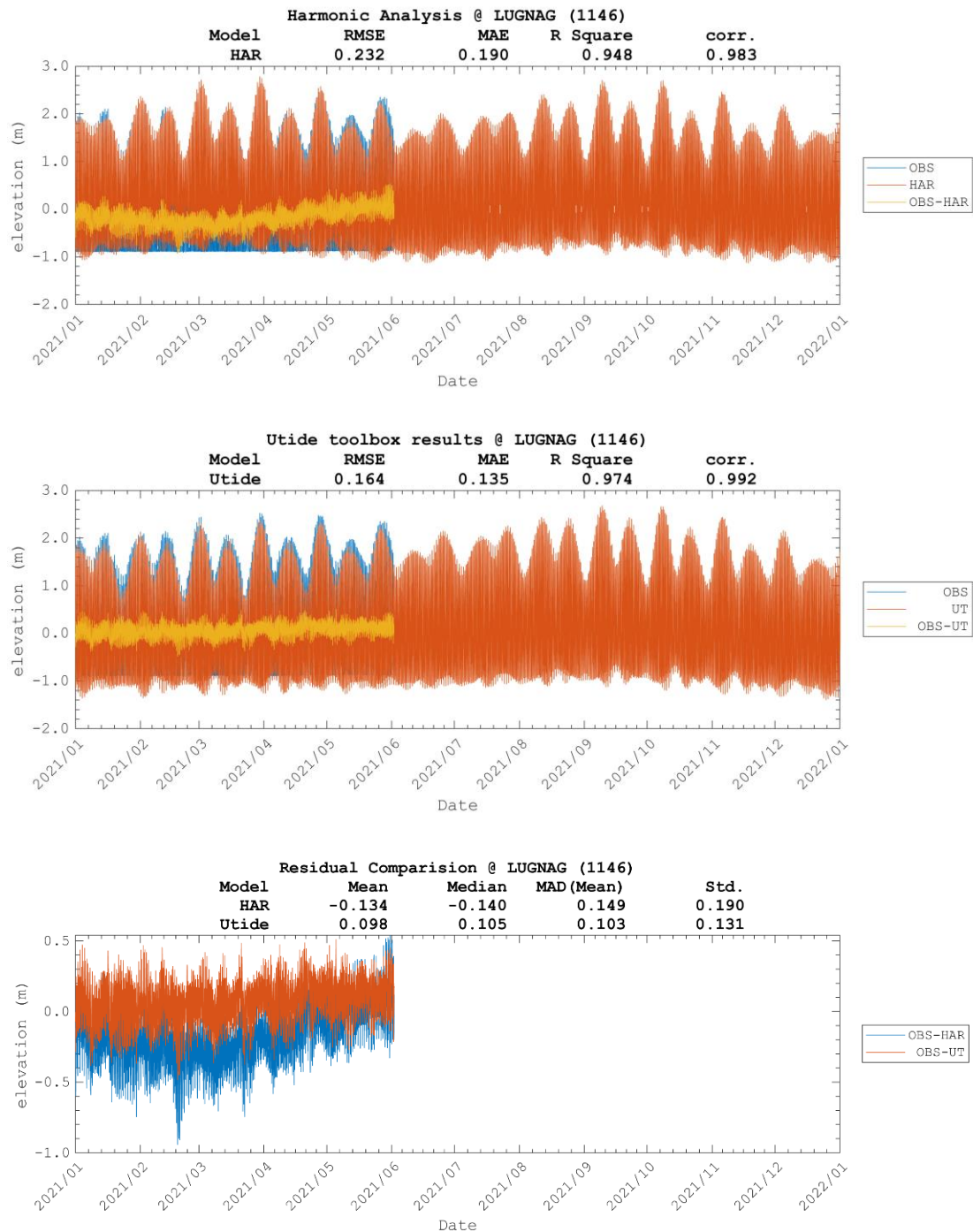


圖 5—72 鹿港測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

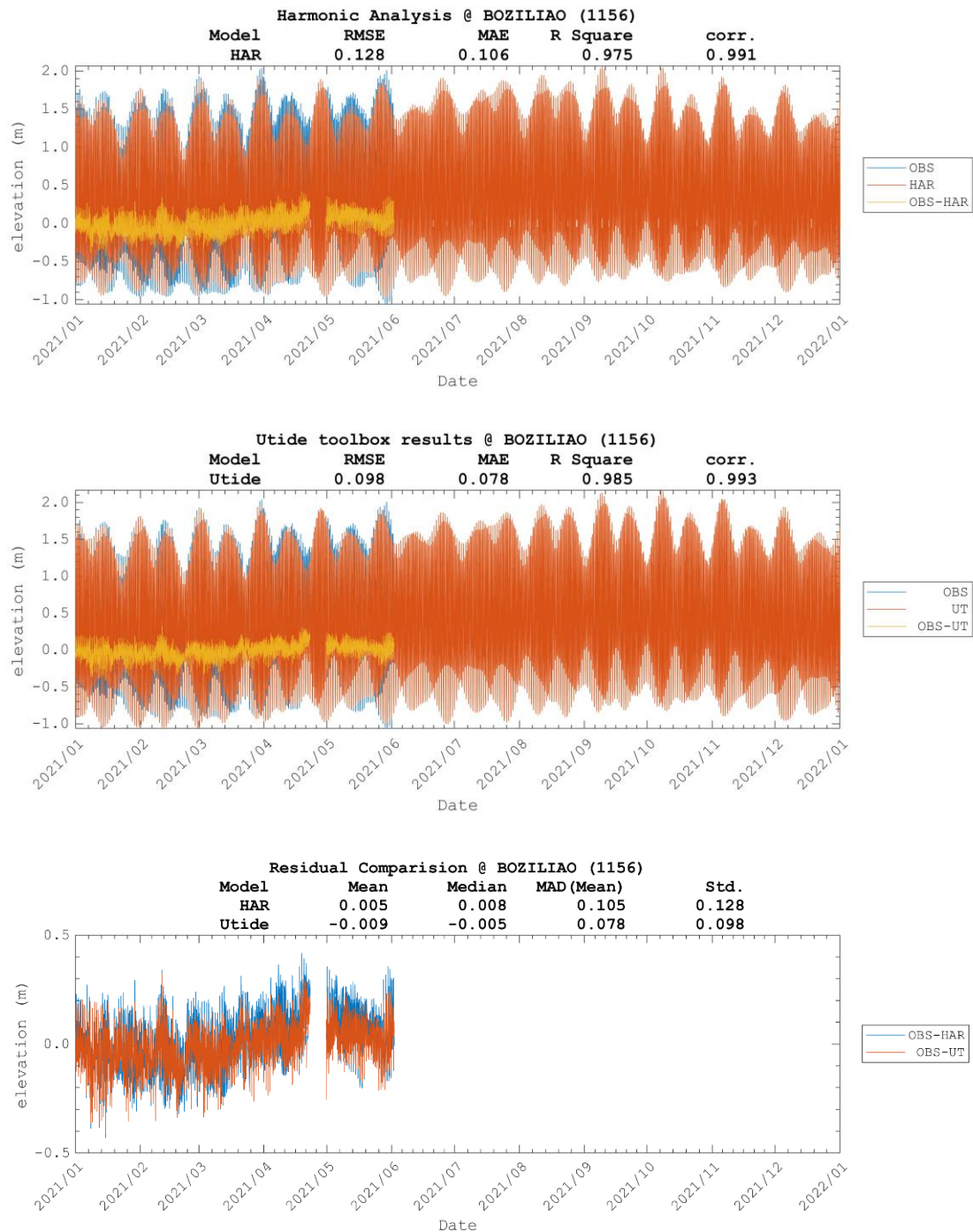


圖 5—73 箔子寮測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

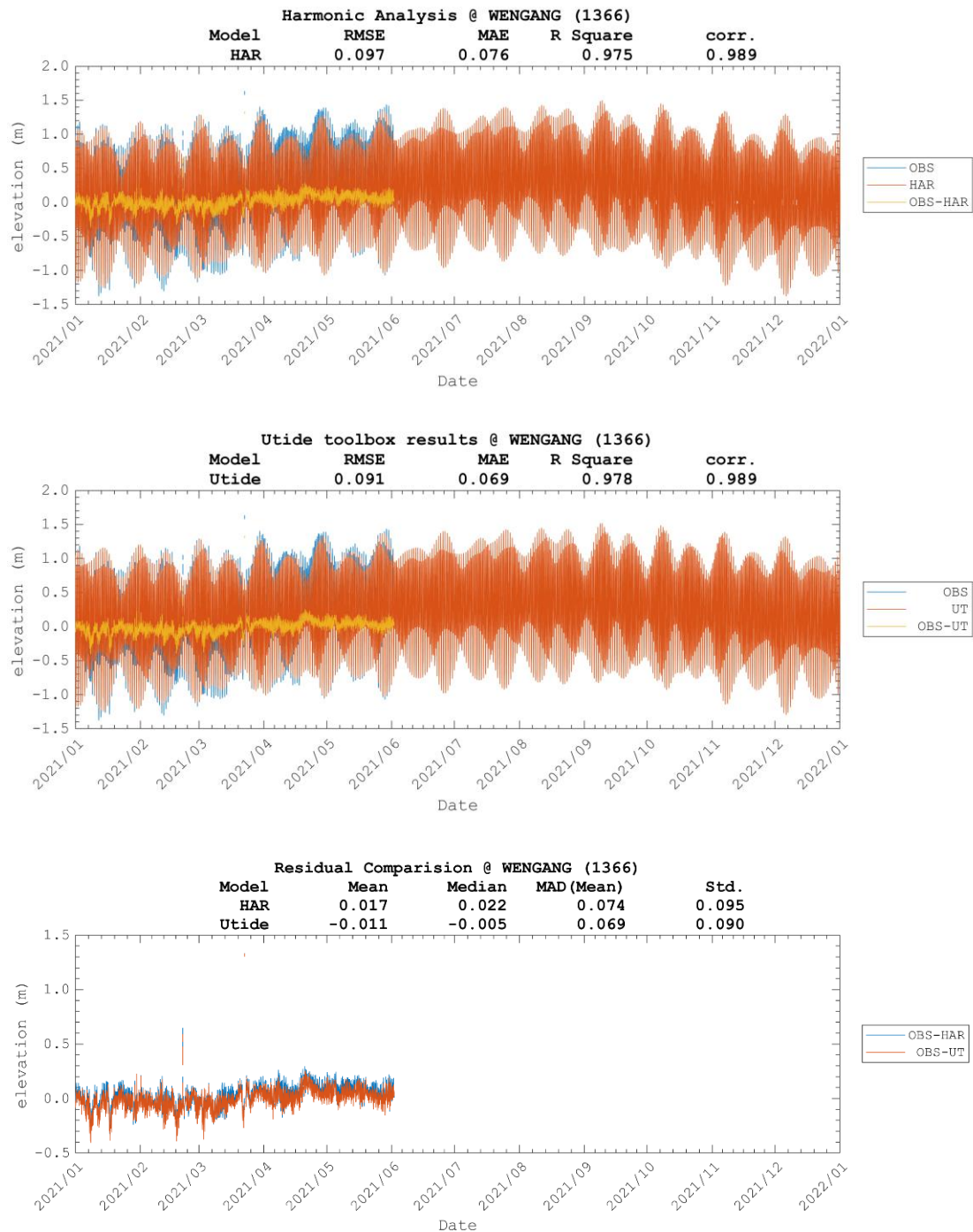


圖 5—74 塭港測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

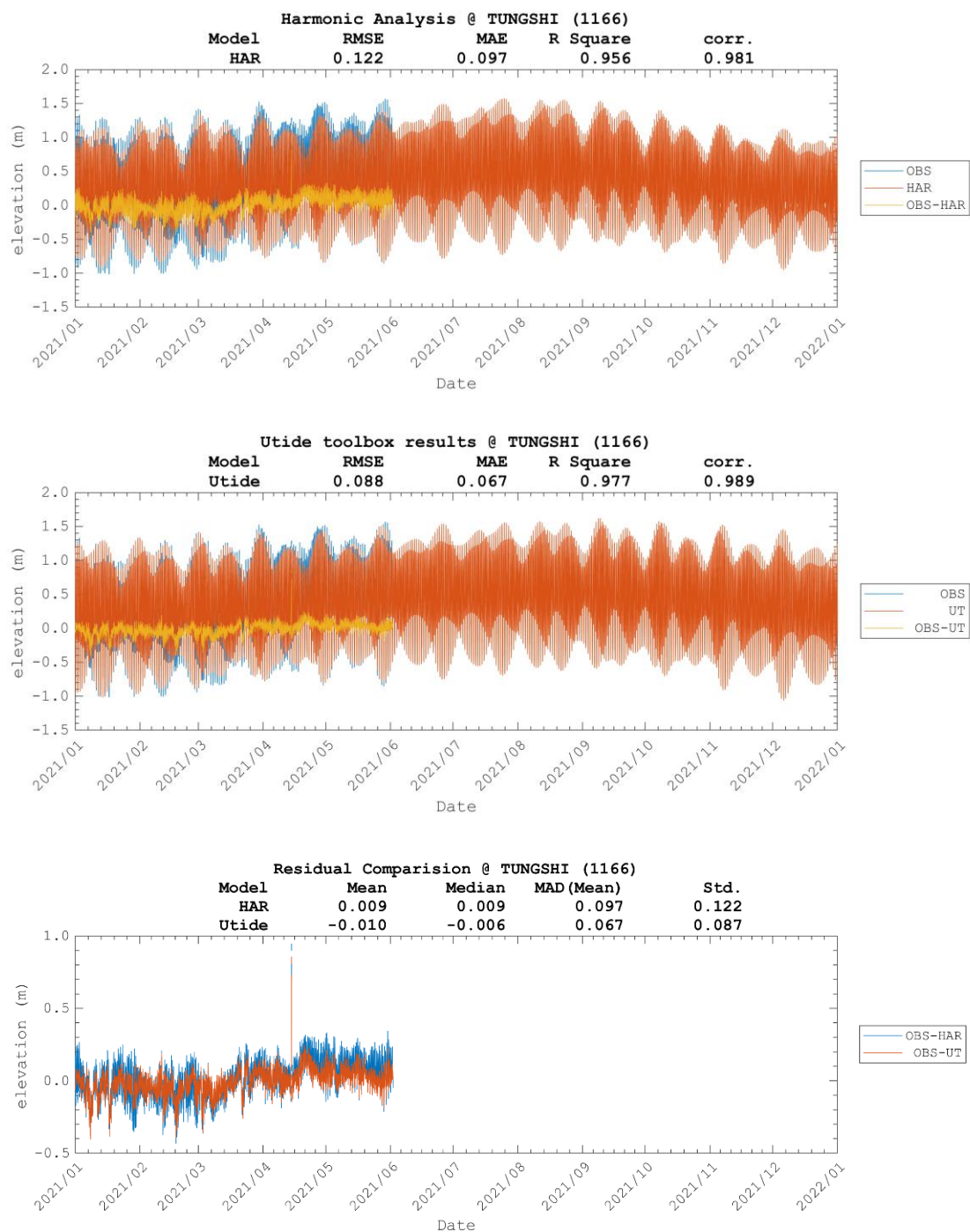


圖 5—75 東石測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

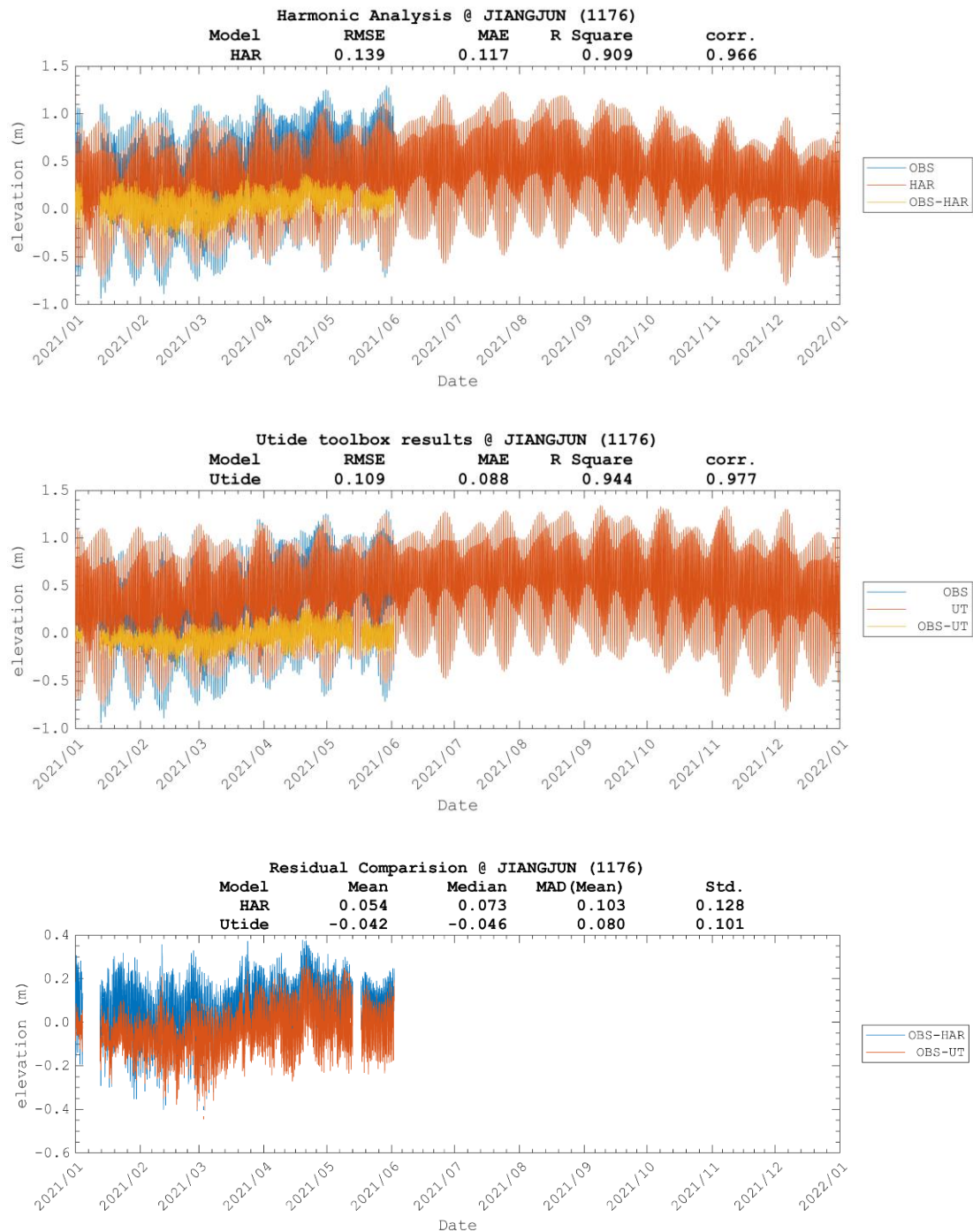


圖 5—76 將軍測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
 上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

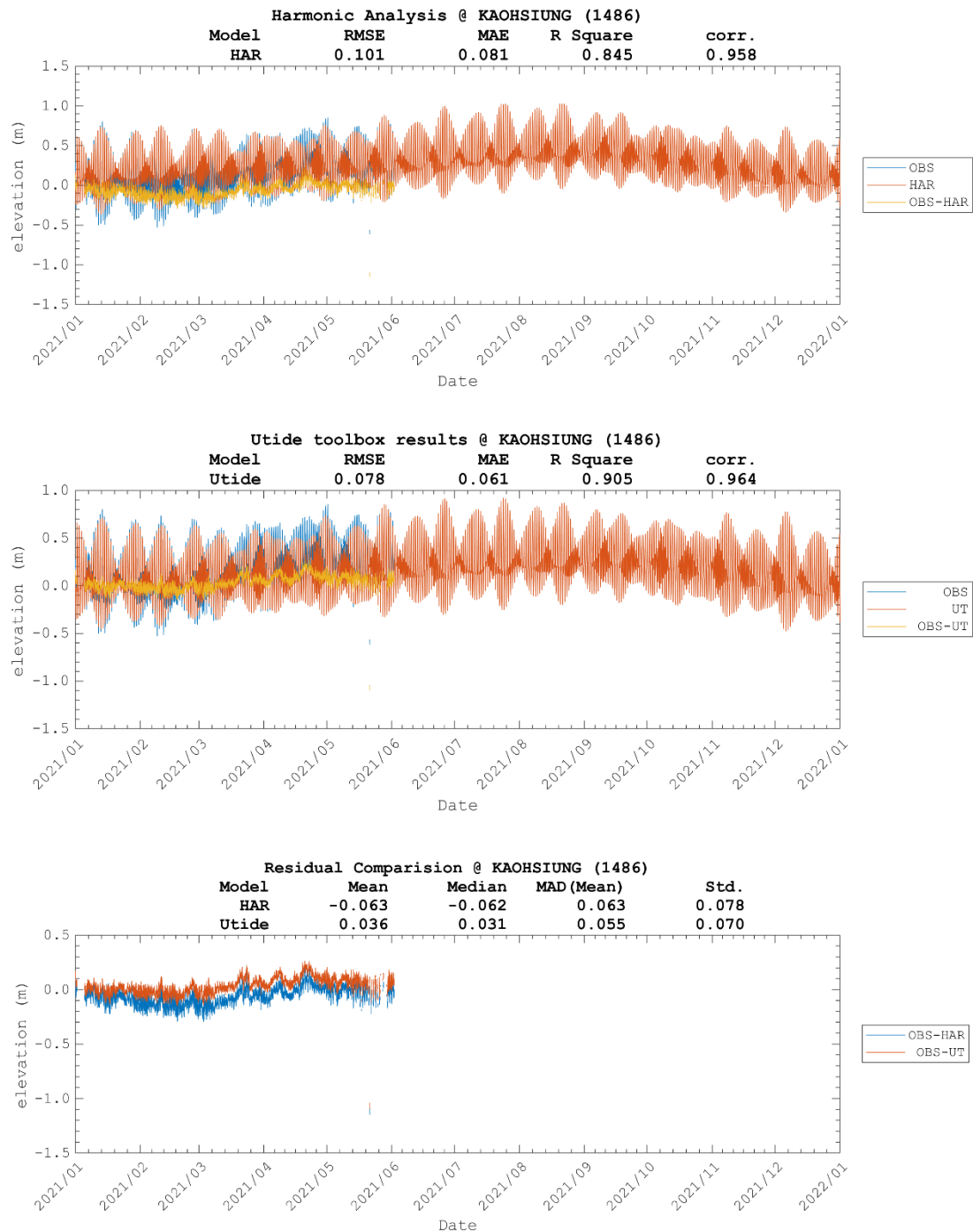


圖 5—77 高雄測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

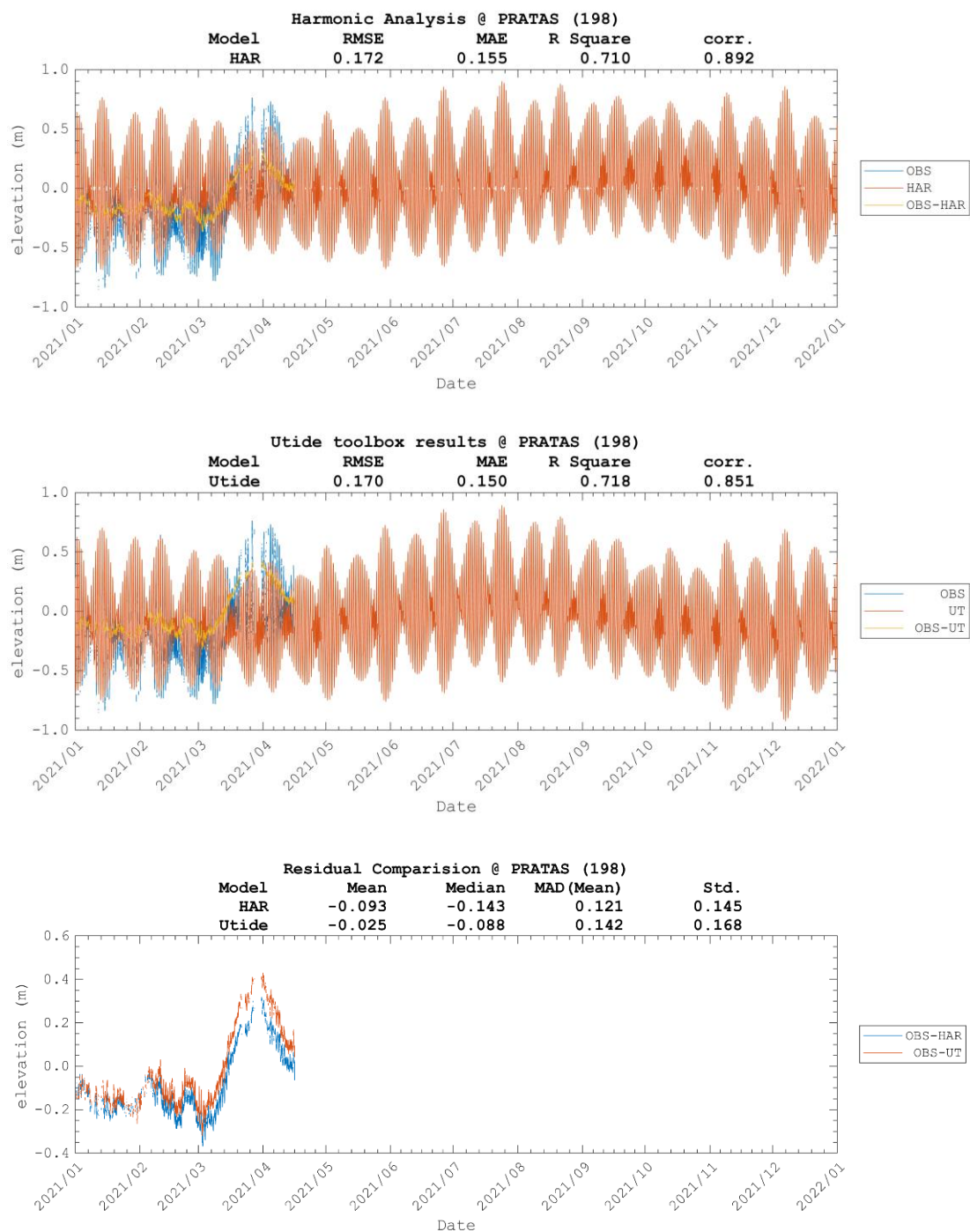


圖 5—78 東沙島測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

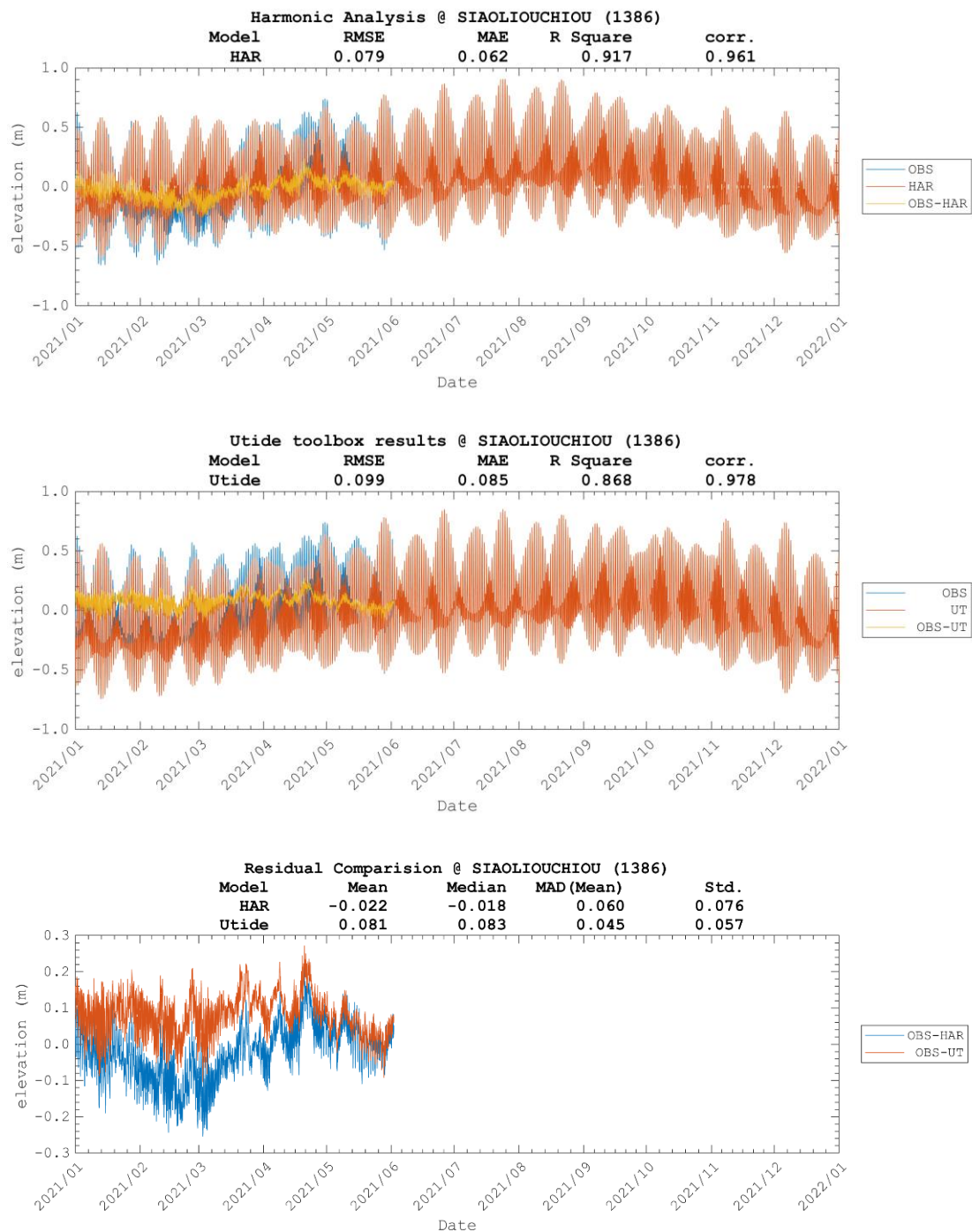


圖 5—79 小琉球測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

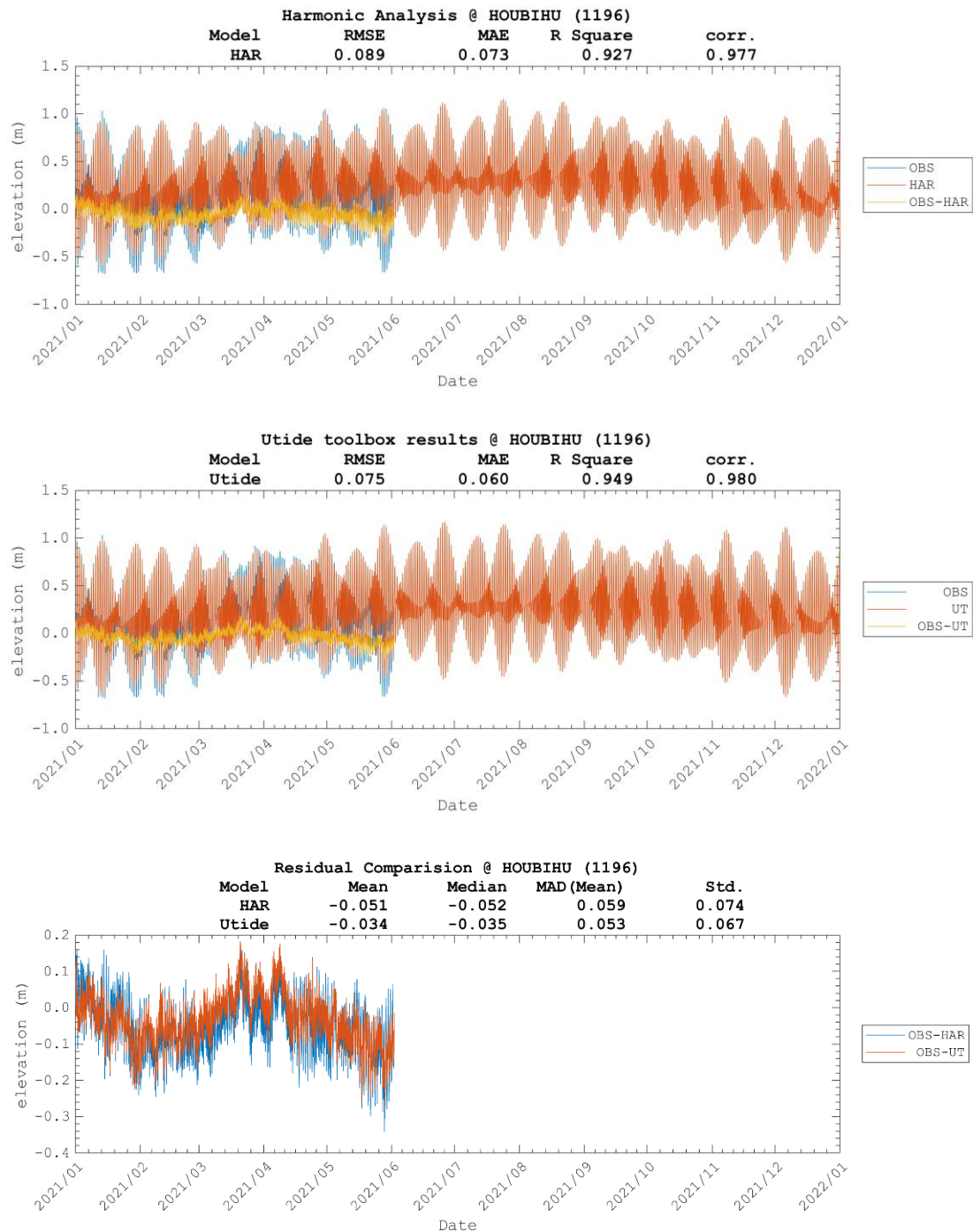


圖 5—80 後壁湖測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

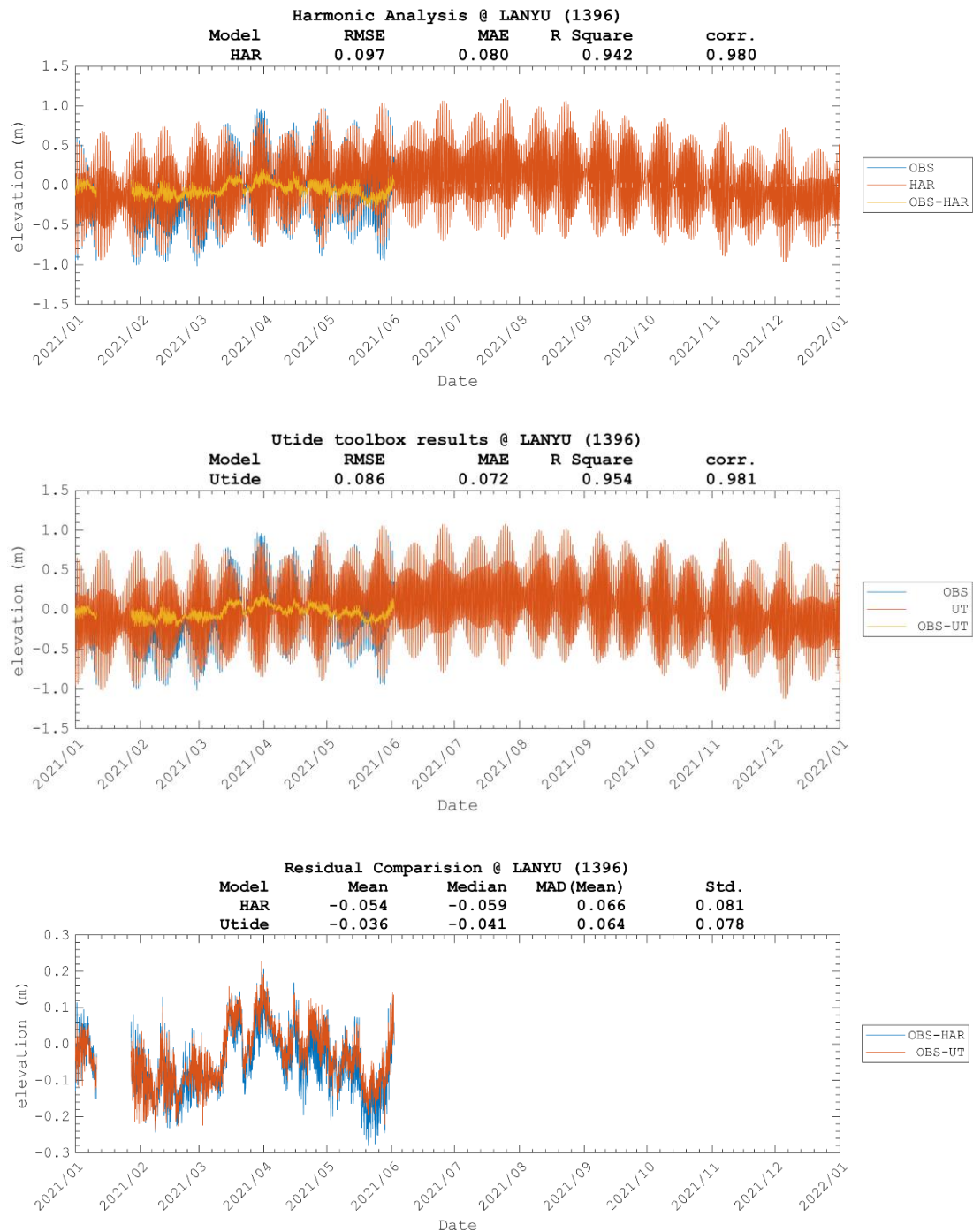


圖 5—81 蘭嶼測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

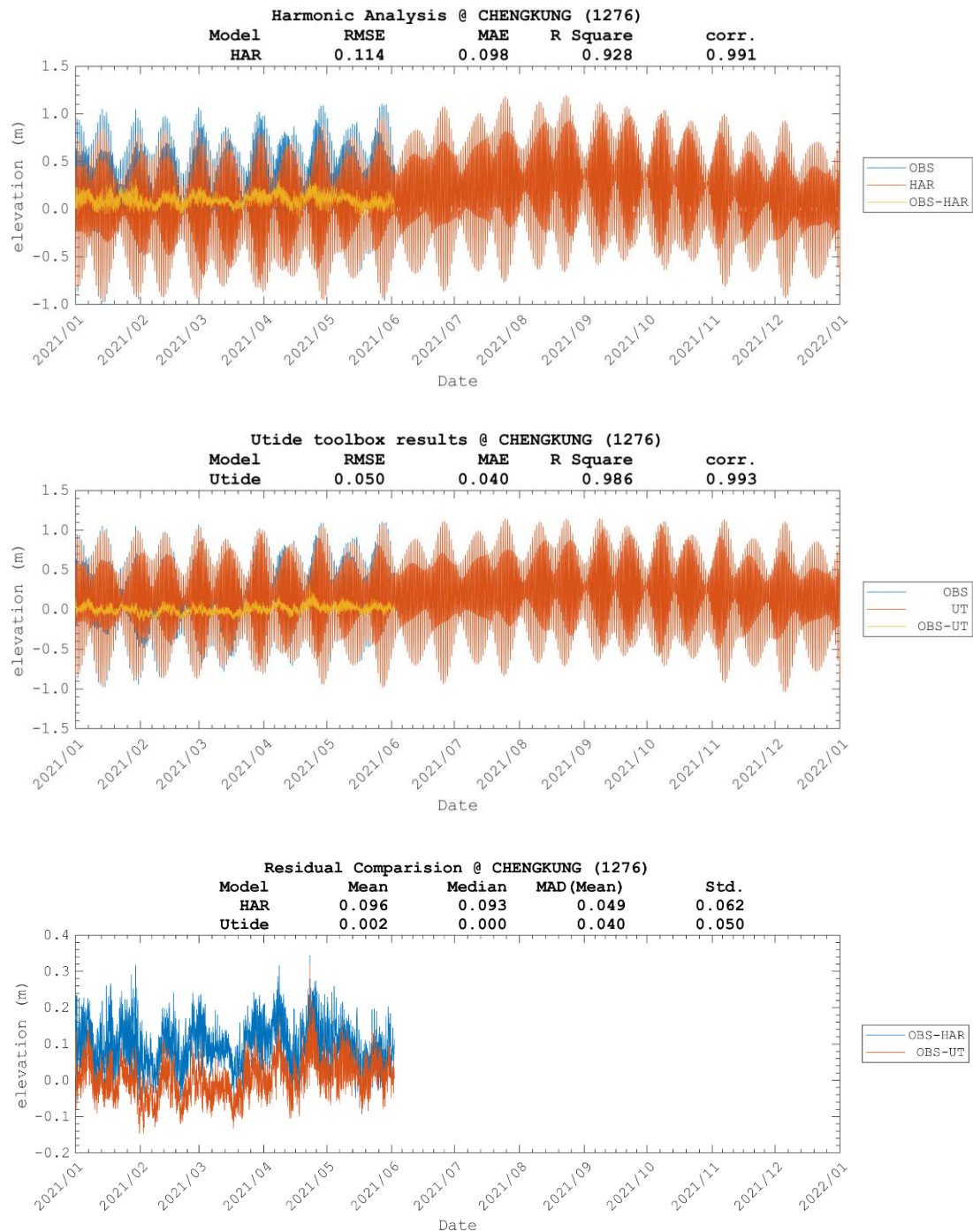


圖 5—82 成功測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

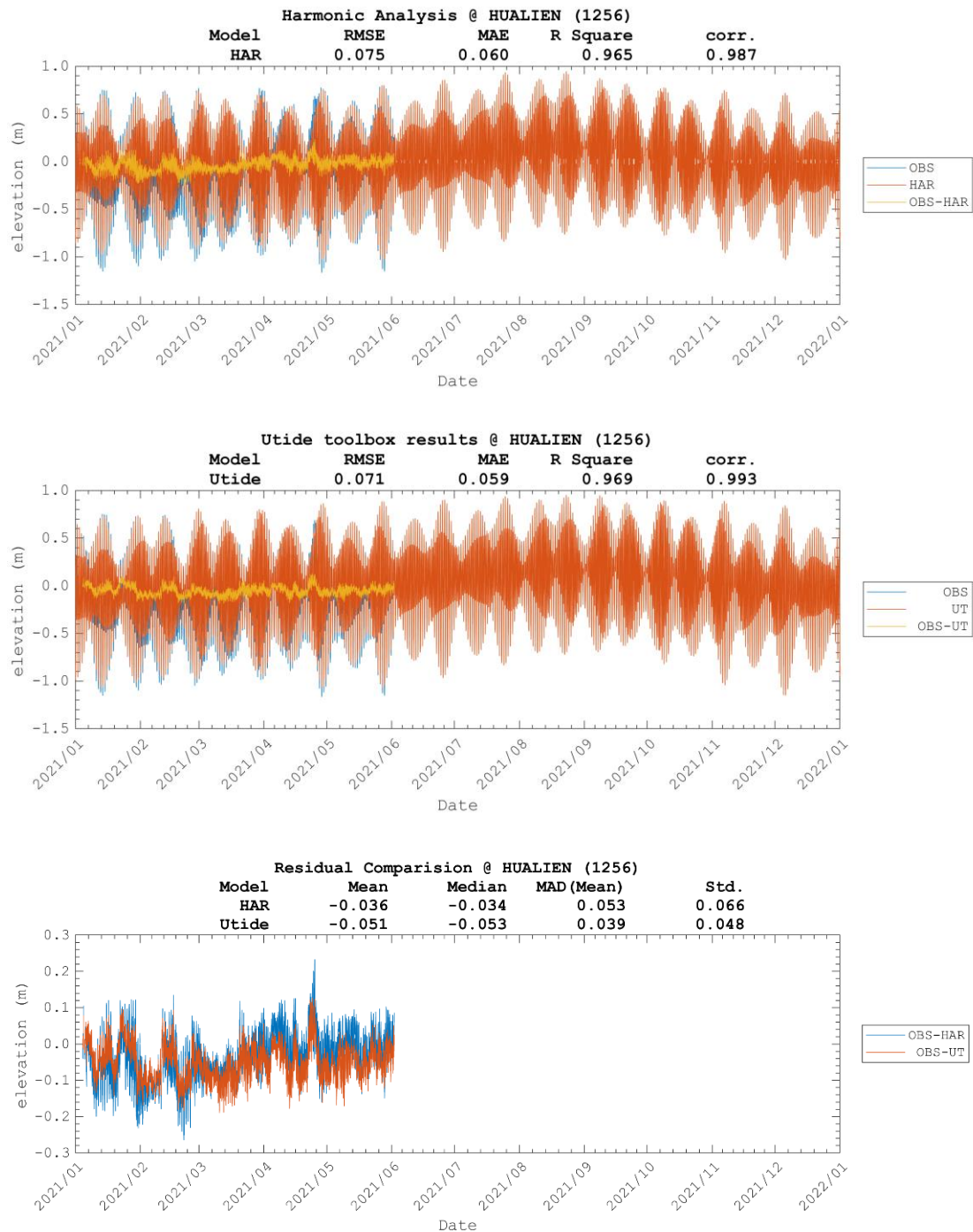


圖 5—83 花蓮測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

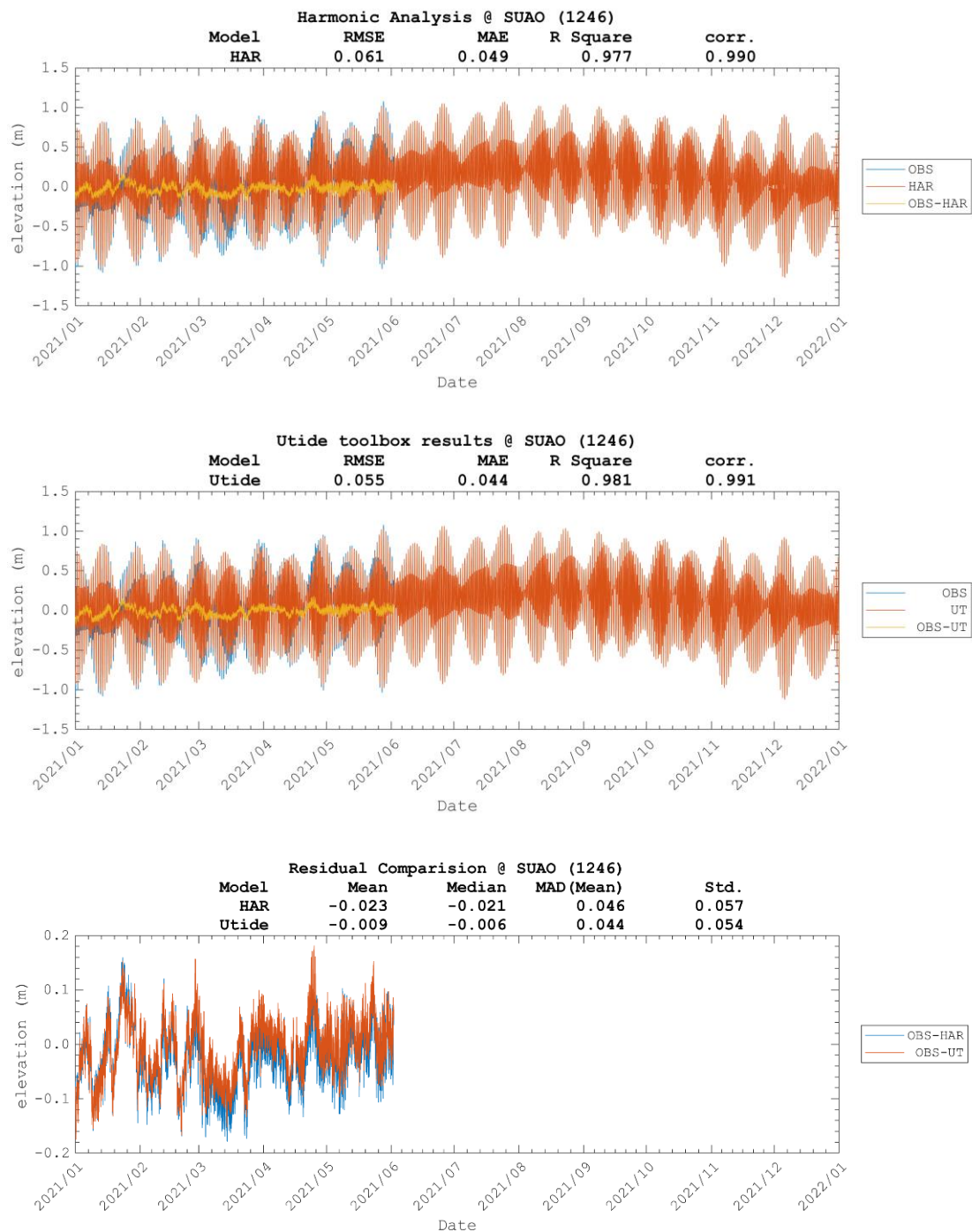


圖 5—84 蘇澳測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

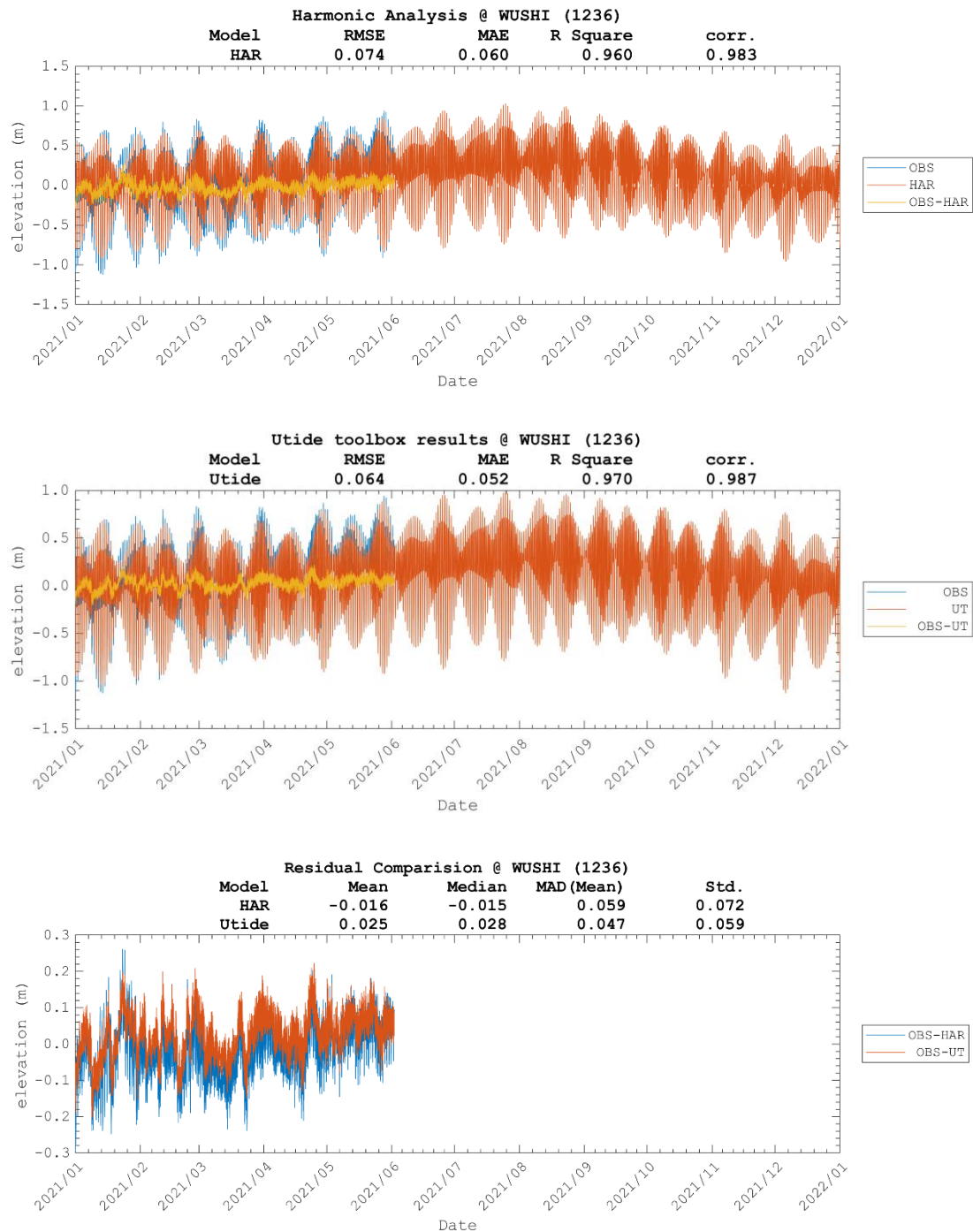


圖 5—85 烏石測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
 上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

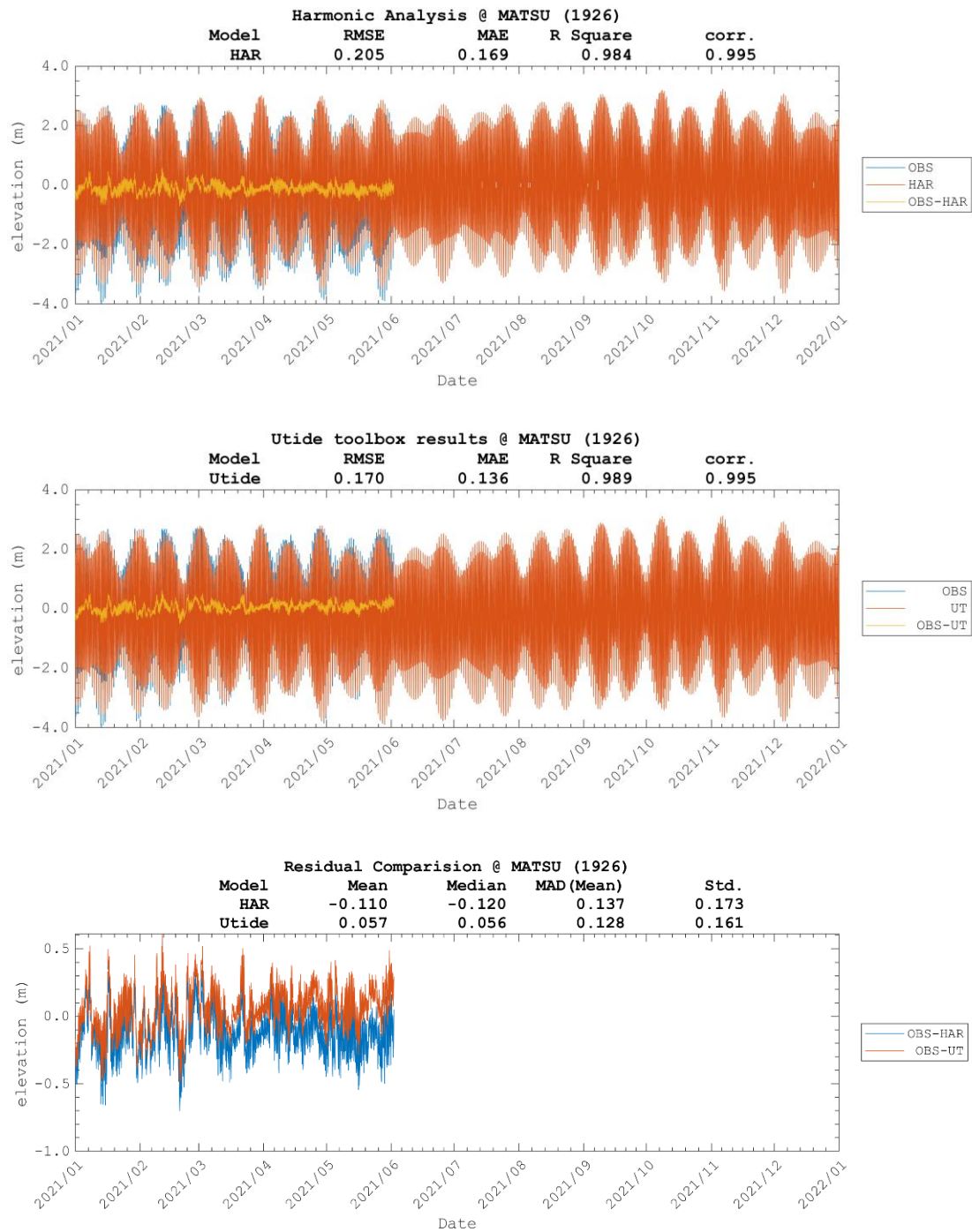


圖 5—86 馬祖測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

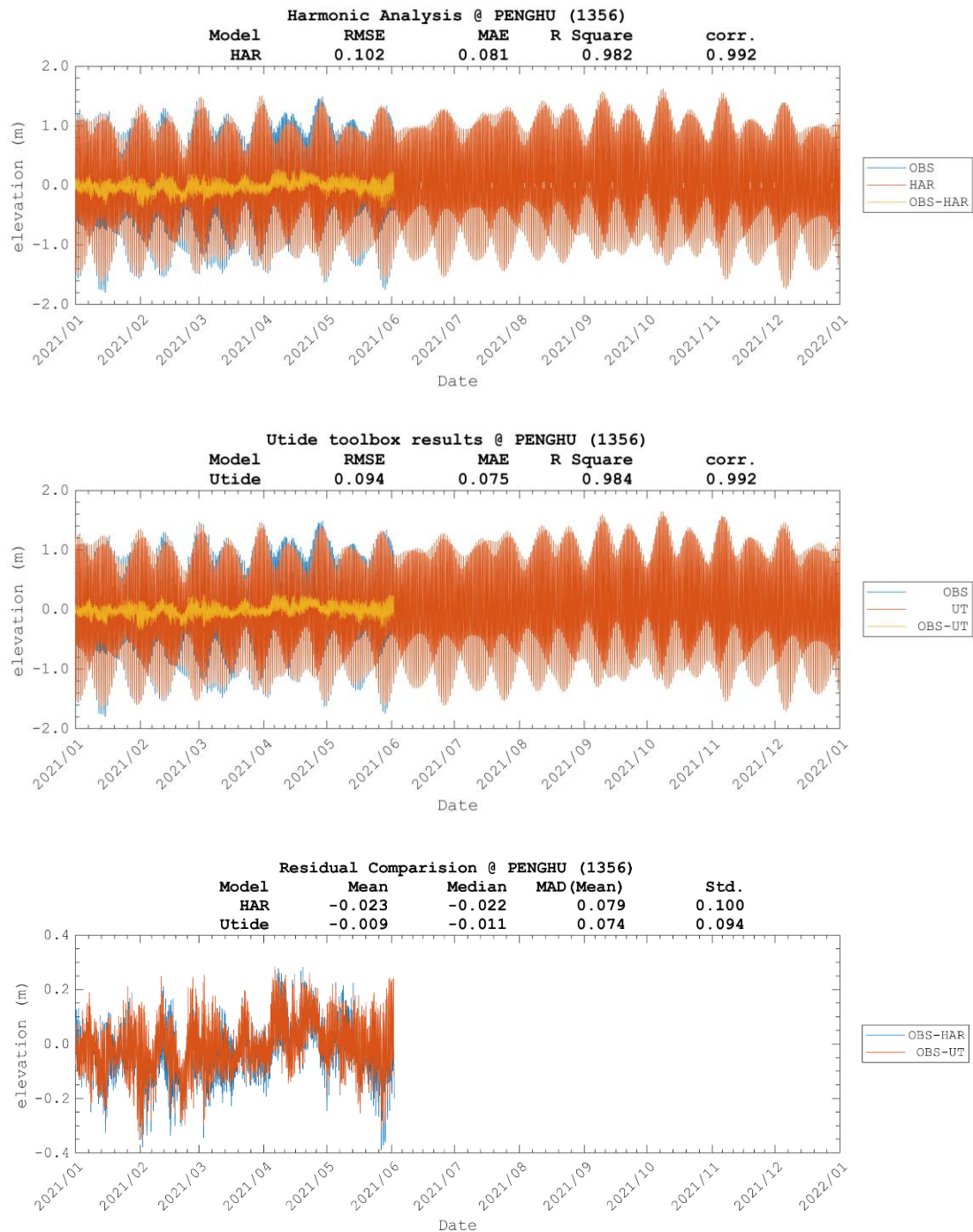


圖 5—87 澎湖馬公測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用 2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

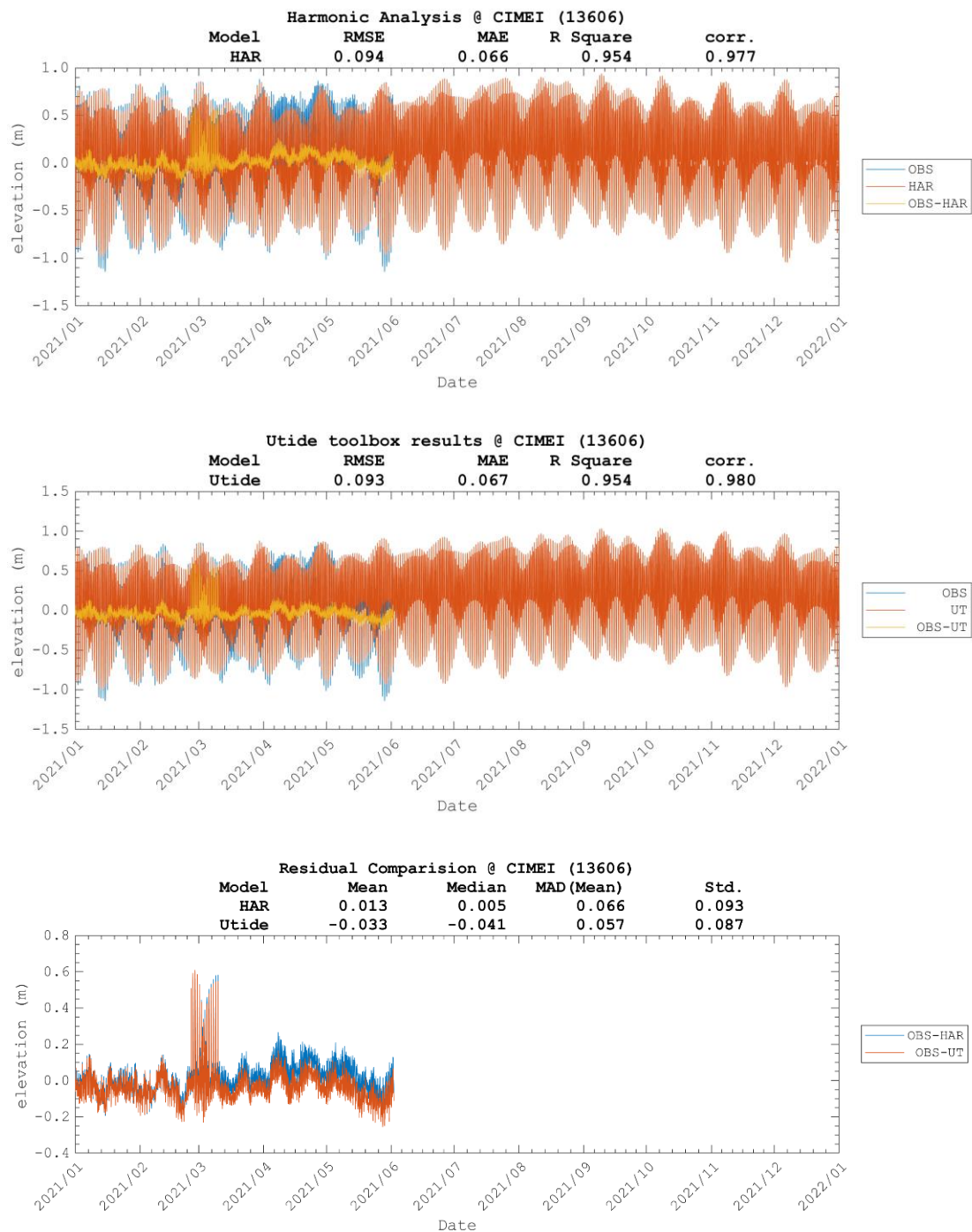


圖 5—88 七美測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

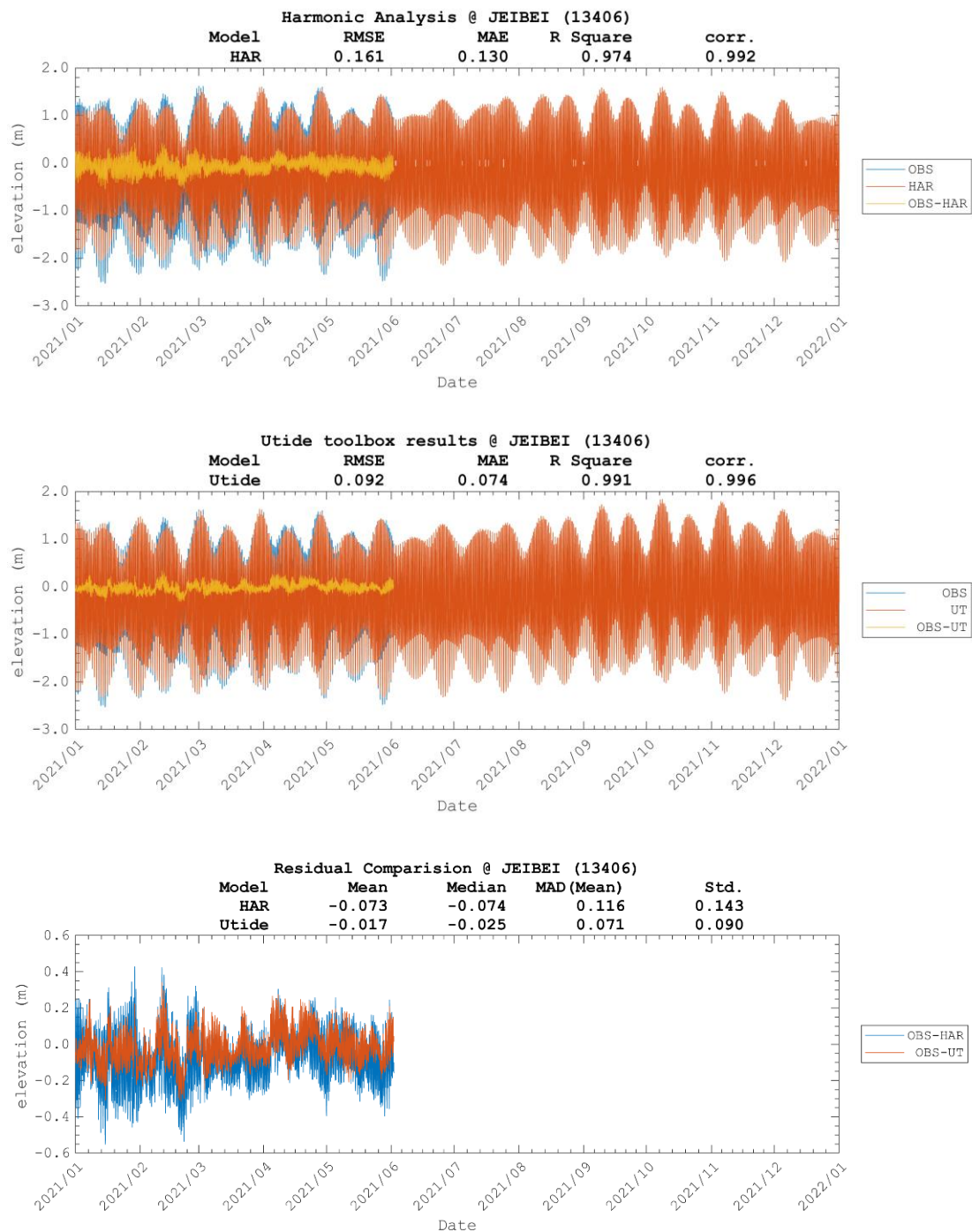


圖 5—89 吉貝測站 2021 年預報天文潮水位及殘差值時序列與統計參數比較。
上圖為局內預報水位 (HAR)，中圖為 Utide 預報水位 (UT) (分析參數採用
2019-2020 年觀測資料)，下圖為兩者與觀測資料之殘差值。

表 5—3 各潮位站分析天文潮水位與觀測水位比較之統計參數列表
(分析資料時段：2019 年至 2020 年)

現行 站碼	站名	方均根誤差		平均絕對誤差		決定係數		相關係數	
		Utide	HAR	Utide	HAR	Utide	HAR	Utide	HAR
1102	淡水	0.108	0.278	0.077	0.228	0.982	0.879	0.991	0.968
1226	龍洞	0.122	0.127	0.062	0.071	0.846	0.833	0.920	0.916
1206	麟山鼻	0.082	0.104	0.062	0.081	0.984	0.973	0.992	0.987
1826	福隆	0.073	0.084	0.055	0.065	0.935	0.915	0.967	0.957
11006	淡海	0.196	0.198	0.084	0.096	0.945	0.944	0.972	0.971
1516	基隆	0.097	0.108	0.065	0.075	0.891	0.866	0.944	0.932
12191	長潭里	0.087	0.156	0.068	0.129	0.909	0.705	0.953	0.857
1116	竹圍	0.264	0.272	0.091	0.116	0.926	0.921	0.963	0.960
112	新竹	0.111	0.149	0.079	0.112	0.992	0.985	0.996	0.993
113	外埔	0.225	0.302	0.155	0.229	0.971	0.947	0.985	0.979
1436	臺中港	0.119	0.231	0.073	0.172	0.993	0.973	0.996	0.990
1146	鹿港	0.144	0.203	0.105	0.162	0.981	0.981	0.991	0.982
1156	箔子寮	0.108	0.257	0.076	0.211	0.982	0.899	0.991	0.960
1366	塭港	0.079	0.112	0.060	0.086	0.983	0.966	0.991	0.986
1166	東石	0.105	0.140	0.062	0.100	0.967	0.942	0.983	0.976
1176	將軍	0.136	0.178	0.096	0.134	0.906	0.838	0.952	0.918
1486	高雄	0.073	0.101	0.057	0.080	0.917	0.841	0.957	0.926
198	東沙島	0.159	0.177	0.060	0.093	0.769	0.714	0.878	0.848
1386	小琉球	0.106	0.122	0.081	0.092	0.878	0.837	0.937	0.918
1186	東港	0.059	0.095	0.045	0.076	0.954	0.879	0.977	0.961
1196	後壁湖	0.067	0.091	0.052	0.072	0.956	0.920	0.978	0.963
1396	蘭嶼	0.085	0.345	0.065	0.261	0.957	0.298	0.978	0.828
1276	成功	0.104	0.251	0.054	0.220	0.942	0.662	0.971	0.959
1256	花蓮	0.084	0.167	0.050	0.139	0.957	0.829	0.978	0.965
1246	蘇澳	0.062	0.076	0.047	0.059	0.975	0.963	0.987	0.984
1236	烏石	0.068	0.097	0.053	0.077	0.968	0.935	0.984	0.977
1926	馬祖	0.515	0.540	0.177	0.234	0.906	0.896	0.953	0.947
1356	澎湖馬公	0.081	0.098	0.063	0.075	0.988	0.983	0.994	0.992
13606	七美	0.079	0.098	0.062	0.077	0.968	0.952	0.984	0.977
13406	吉貝	0.088	0.188	0.066	0.147	0.992	0.964	0.996	0.985
全測站平均		0.123	0.178	0.073	0.126	0.944	0.875	0.971	0.952

表 5—4 各潮位站觀測值扣除分析天文潮水位之殘差值分布統計參數列表
(資料時段：2019 年至 2020 年)

現行 站碼	站名	平均值		中位數		平均絕對偏差		標準差	
		Utide	HAR	Utide	HAR	Utide	HAR	Utide	HAR
1102	淡水	0.002	-0.155	0.000	-0.165	0.077	0.188	0.108	0.231
1226	龍洞	0.011	0.027	0.001	0.019	0.063	0.069	0.121	0.124
1206	麟山鼻	0.000	0.011	0.000	0.008	0.062	0.081	0.082	0.104
1826	福隆	0.002	0.003	0.000	0.004	0.055	0.065	0.073	0.083
11006	淡海	0.012	0.005	0.000	-0.006	0.085	0.096	0.195	0.198
1516	基隆	0.005	-0.013	0.001	-0.015	0.065	0.074	0.097	0.107
12191	長潭里	0.000	0.050	0.002	0.060	0.068	0.121	0.087	0.148
1116	竹圍	0.025	0.024	0.000	-0.002	0.094	0.118	0.263	0.271
112	新竹	0.001	0.013	-0.001	0.008	0.079	0.112	0.111	0.149
113	外埔	-0.014	-0.137	-0.001	-0.139	0.155	0.196	0.224	0.269
1436	臺中港	0.003	0.043	-0.001	0.025	0.073	0.171	0.119	0.227
1146	鹿港	0.002	-0.029	-0.001	-0.026	0.105	0.161	0.144	0.201
1156	箔子寮	0.004	-0.120	0.000	-0.120	0.076	0.192	0.108	0.228
1366	塭港	0.000	0.049	0.000	0.045	0.060	0.078	0.079	0.101
1166	東石	0.003	-0.055	0.000	-0.060	0.062	0.085	0.105	0.129
1176	將軍	0.000	0.013	0.001	0.039	0.096	0.131	0.136	0.177
1486	高雄	0.001	0.031	-0.002	0.027	0.057	0.078	0.073	0.096
198	東沙島	0.011	-0.016	0.001	-0.031	0.061	0.090	0.158	0.176
1386	小琉球	-0.006	-0.016	0.003	0.010	0.081	0.094	0.105	0.121
1186	東港	0.000	-0.058	0.000	-0.057	0.045	0.058	0.059	0.075
1196	後壁湖	0.000	-0.028	0.000	-0.027	0.052	0.068	0.067	0.087
1396	蘭嶼	-0.003	0.226	0.002	0.141	0.065	0.243	0.085	0.261
1276	成功	0.007	0.219	0.001	0.215	0.055	0.075	0.104	0.124
1256	花蓮	0.002	-0.129	0.000	-0.132	0.050	0.076	0.084	0.106
1246	蘇澳	0.001	-0.029	0.000	-0.031	0.047	0.054	0.062	0.070
1236	烏石	0.000	-0.054	0.000	-0.053	0.053	0.064	0.068	0.081
1926	馬祖	0.062	0.034	-0.001	-0.024	0.188	0.240	0.511	0.539
1356	澎湖馬公	0.001	0.006	-0.001	0.003	0.063	0.075	0.081	0.097
13606	七美	0.001	-0.023	0.000	-0.023	0.062	0.075	0.079	0.095
13406	吉貝	0.002	-0.060	-0.002	-0.060	0.066	0.139	0.088	0.178
全測站平均		0.005	-0.003	0.000	-0.010	0.075	0.113	0.125	0.164

表 5—5 各潮位站分析天文潮水位與觀測水位比較之統計參數排行

排名	方均根誤差			平均絕對誤差			決定係數			相關係數		
	Utide	HAR	差距	Utide	HAR	差距	Utide	HAR	差距	Utide	HAR	差距
1	東港	蘇澳	淡海	東港	蘇澳	龍洞	臺中港	新竹	鹿港	新竹	新竹	淡海
2	蘇澳	福隆	龍洞	蘇澳	福隆	基隆	新竹	澎湖馬公	淡海	臺中港	澎湖馬公	澎湖馬公
3	後壁湖	後壁湖	竹圍	花蓮	龍洞	福隆	吉貝	鹿港	澎湖馬公	吉貝	臺中港	新竹
-3	外埔	外埔	箔子寮	鹿港	外埔	淡水	小琉球	長潭里	長潭里	小琉球	長潭里	將軍
-2	竹圍	蘭嶼	淡水	外埔	馬祖	成功	龍洞	成功	成功	龍洞	東沙島	長潭里
-1	馬祖	馬祖	蘭嶼	馬祖	蘭嶼	蘭嶼	東沙島	蘭嶼	蘭嶼	東沙島	蘭嶼	蘭嶼

表 5—6 各潮位站觀測值扣除分析天文潮水位之殘差值分布統計參數排行

排名	平均值			中位數			平均絕對偏差			標準差		
	Utide	HAR	差距	Utide	HAR	差距	Utide	HAR	差距	Utide	HAR	差距
1	麟山鼻	福隆	福隆	福隆	竹圍	竹圍	東港	蘇澳	龍洞	東港	蘇澳	龍洞
2	長潭里	淡海	竹圍	竹圍	澎湖馬公	澎湖馬公	蘇澳	東港	蘇澳	蘇澳	東港	淡海
3	塭港	澎湖馬公	澎湖馬公	淡海	福隆	福隆	花蓮	烏石	基隆	後壁湖	烏石	蘇澳
-3	外埔	淡水	淡水	吉貝	蘭嶼	蘭嶼	鹿港	外埔	淡水	外埔	外埔	箔子寮
-2	竹圍	成功	成功	蘭嶼	淡水	淡水	外埔	馬祖	箔子寮	竹圍	竹圍	淡水
-1	馬祖	蘭嶼	蘭嶼	小琉球	成功	成功	馬祖	蘭嶼	蘭嶼	馬祖	馬祖	蘭嶼

表 5—7 不同資料長度所得參數預報所得 2021 年潮汐預報水位之統計參數分布

站名	方均根誤差				平均絕對誤差			
	3 年	2 年	1 年	HAR	3 年	2 年	1 年	HAR
淡水	0.138	0.104	0.135	0.325	0.108	0.081	0.113	0.272
龍洞	0.062	0.065	0.095	0.065	0.048	0.051	0.082	0.052
麟山鼻	0.116	0.116	0.152	0.120	0.076	0.076	0.122	0.081
福隆	0.073	0.077	0.141	0.077	0.056	0.059	0.126	0.060
淡海	0.104	0.102	0.249	0.117	0.080	0.080	0.228	0.091
基隆	0.077	0.078	0.125	0.078	0.062	0.062	0.109	0.063
長潭里	0.185	0.185	0.110	0.149	0.165	0.165	0.094	0.127
竹圍	0.600	0.602	0.631	0.597	0.247	0.249	0.280	0.254
新竹	0.145	0.141	0.141	0.162	0.104	0.105	0.107	0.120
外埔	0.322	0.325	0.314	0.292	0.199	0.204	0.232	0.184
臺中港	0.107	0.110	0.113	0.125	0.085	0.087	0.091	0.101
鹿港	0.164	0.164	0.131	0.232	0.135	0.135	0.104	0.190
箔子寮	0.105	0.098	0.121	0.128	0.084	0.078	0.096	0.106
塭港	0.093	0.091	0.088	0.097	0.070	0.069	0.067	0.076
東石	0.098	0.088	0.087	0.122	0.076	0.067	0.066	0.097
將軍	0.102	0.109	0.067	0.139	0.078	0.088	0.052	0.117
高雄	0.073	0.078	0.080	0.101	0.059	0.061	0.066	0.081
東沙島	0.183	0.170	0.161	0.172	0.166	0.150	0.137	0.155
小琉球	0.066	0.099	0.150	0.079	0.053	0.085	0.130	0.062
東港	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
後壁湖	0.084	0.075	0.070	0.089	0.068	0.060	0.055	0.073
蘭嶼	0.087	0.086	0.137	0.097	0.073	0.072	0.112	0.080
成功	0.049	0.050	0.047	0.114	0.040	0.040	0.037	0.098
花蓮	0.069	0.071	0.103	0.075	0.057	0.059	0.092	0.060
蘇澳	0.063	0.055	0.100	0.061	0.050	0.044	0.088	0.049
烏石	0.060	0.064	0.097	0.074	0.049	0.052	0.085	0.060
馬祖	0.174	0.170	0.173	0.205	0.136	0.136	0.136	0.169
澎湖馬公	0.098	0.094	0.097	0.102	0.077	0.075	0.077	0.081
七美	0.090	0.093	0.107	0.094	0.063	0.067	0.084	0.066
吉貝	0.089	0.092	0.098	0.161	0.070	0.074	0.080	0.130
平均	0.127	0.126	0.142	0.147	0.091	0.091	0.109	0.109

表 5—8 不同資料長度所得參數預報所得 2021 年潮汐預報水位之統計參數分布

站名	決定係數				相關係數			
	3 年	2 年	1 年	HAR	3 年	2 年	1 年	HAR
淡水	0.972	0.984	0.973	0.843	0.993	0.993	0.993	0.987
龍洞	0.951	0.948	0.888	0.947	0.976	0.974	0.973	0.975
麟山鼻	0.968	0.968	0.946	0.966	0.984	0.984	0.983	0.984
福隆	0.930	0.922	0.740	0.923	0.965	0.964	0.964	0.962
淡海	0.985	0.985	0.912	0.981	0.993	0.993	0.992	0.991
基隆	0.930	0.929	0.816	0.928	0.968	0.967	0.960	0.968
長潭里	0.525	0.526	0.831	0.694	0.947	0.947	0.959	0.839
竹圍	0.675	0.673	0.640	0.678	0.837	0.838	0.833	0.836
新竹	0.986	0.986	0.986	0.982	0.993	0.994	0.994	0.991
外埔	0.936	0.935	0.939	0.947	0.976	0.975	0.971	0.975
臺中港	0.994	0.994	0.994	0.992	0.998	0.997	0.998	0.997
鹿港	0.974	0.974	0.984	0.948	0.992	0.992	0.992	0.983
箔子寮	0.983	0.985	0.978	0.975	0.993	0.993	0.994	0.991
塭港	0.977	0.978	0.979	0.975	0.990	0.989	0.990	0.989
東石	0.972	0.977	0.978	0.956	0.987	0.989	0.989	0.981
將軍	0.951	0.944	0.979	0.909	0.982	0.977	0.990	0.966
高雄	0.918	0.905	0.901	0.845	0.962	0.964	0.966	0.958
東沙島	0.674	0.718	0.748	0.710	0.839	0.851	0.866	0.892
小琉球	0.941	0.868	0.696	0.917	0.975	0.978	0.966	0.961
東港	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
後壁湖	0.936	0.949	0.955	0.927	0.980	0.980	0.978	0.977
蘭嶼	0.953	0.954	0.883	0.942	0.982	0.981	0.977	0.980
成功	0.986	0.986	0.988	0.928	0.994	0.993	0.994	0.991
花蓮	0.970	0.969	0.933	0.965	0.993	0.993	0.993	0.987
蘇澳	0.975	0.981	0.937	0.977	0.991	0.991	0.991	0.990
烏石	0.974	0.970	0.932	0.960	0.988	0.987	0.987	0.983
馬祖	0.989	0.989	0.989	0.984	0.996	0.995	0.996	0.995
澎湖 馬公	0.983	0.984	0.984	0.982	0.992	0.992	0.992	0.992
七美	0.957	0.954	0.939	0.954	0.979	0.980	0.980	0.977
吉貝	0.992	0.991	0.990	0.974	0.996	0.996	0.996	0.992
平均	0.930	0.929	0.912	0.921	0.974	0.974	0.974	0.969

表 5—9 不同資料長度所得參數預報所得 2021 年偏差水位之統計參數分布

站名	平均值				中位數			
	3 年	2 年	1 年	HAR	3 年	2 年	1 年	HAR
淡水	-0.055	-0.022	0.083	-0.265	-0.042	-0.014	0.095	-0.246
龍洞	-0.005	0.011	0.069	0.014	0.001	0.016	0.076	0.018
麟山鼻	-0.013	-0.007	0.093	-0.013	-0.002	0.004	0.108	-0.004
福隆	-0.003	0.022	0.120	-0.001	-0.002	0.021	0.124	0.000
淡海	-0.008	-0.002	0.223	-0.010	0.004	0.007	0.235	-0.002
基隆	0.024	0.022	0.094	0.022	0.029	0.027	0.103	0.027
長潭里	-0.163	-0.163	0.080	0.005	-0.161	-0.161	0.084	0.008
竹圍	0.157	0.171	0.238	0.148	0.013	0.026	0.097	0.004
新竹	0.018	0.023	0.022	-0.006	0.018	0.028	0.030	-0.007
外埔	-0.157	-0.161	0.009	-0.068	-0.105	-0.112	0.008	-0.012
臺中港	-0.014	0.001	0.030	-0.009	-0.010	0.005	0.034	-0.005
鹿港	0.098	0.098	0.023	-0.134	0.105	0.105	0.030	-0.140
箔子寮	-0.018	-0.009	-0.074	0.005	-0.016	-0.005	-0.070	0.008
塭港	-0.025	-0.011	0.008	0.017	-0.018	-0.005	0.013	0.022
東石	-0.022	-0.010	-0.001	0.009	-0.016	-0.006	0.005	0.009
將軍	-0.049	-0.042	0.001	0.054	-0.040	-0.046	0.001	0.073
高雄	-0.017	0.036	-0.044	-0.063	-0.020	0.031	-0.048	-0.062
東沙島	-0.054	-0.025	-0.015	-0.093	-0.122	-0.088	-0.070	-0.143
小琉球	0.028	0.081	-0.130	-0.022	0.031	0.083	-0.121	-0.018
東港	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
後壁湖	-0.052	-0.034	-0.012	-0.051	-0.054	-0.035	-0.014	-0.052
蘭嶼	-0.042	-0.036	0.108	-0.054	-0.047	-0.041	0.094	-0.059
成功	-0.013	0.002	0.007	0.096	-0.015	0.000	0.004	0.093
花蓮	-0.049	-0.051	0.092	-0.036	-0.050	-0.053	0.090	-0.034
蘇澳	-0.035	-0.009	0.084	-0.023	-0.032	-0.006	0.088	-0.021
烏石	0.016	0.025	0.076	-0.016	0.019	0.028	0.081	-0.015
馬祖	0.077	0.057	0.066	-0.110	0.070	0.056	0.061	-0.120
澎湖馬公	-0.026	-0.009	-0.022	-0.023	-0.026	-0.011	-0.021	-0.022
七美	-0.012	-0.033	-0.062	0.013	-0.021	-0.041	-0.068	0.005
吉貝	0.004	-0.017	-0.039	-0.073	-0.004	-0.025	-0.045	-0.074
平均	-0.014	-0.003	0.039	-0.024	-0.018	-0.007	0.035	-0.027

表 5—10 不同資料長度所得參數預報所得 2021 年偏差水位之統計參數分布

站名	平均絕對偏差				標準差			
	3 年	2 年	1 年	HAR	3 年	2 年	1 年	HAR
淡水	0.104	0.081	0.085	0.156	0.127	0.102	0.106	0.189
龍洞	0.049	0.050	0.050	0.050	0.062	0.064	0.065	0.064
麟山鼻	0.076	0.077	0.080	0.081	0.115	0.116	0.120	0.119
福隆	0.055	0.056	0.057	0.060	0.073	0.074	0.074	0.077
淡海	0.080	0.080	0.086	0.091	0.103	0.102	0.112	0.117
基隆	0.057	0.058	0.064	0.060	0.073	0.074	0.082	0.075
長潭里	0.068	0.068	0.059	0.126	0.086	0.086	0.076	0.148
竹圍	0.308	0.307	0.311	0.310	0.579	0.577	0.584	0.578
新竹	0.103	0.102	0.104	0.120	0.143	0.139	0.140	0.162
外埔	0.178	0.180	0.232	0.190	0.281	0.282	0.313	0.284
臺中港	0.084	0.087	0.087	0.101	0.106	0.110	0.109	0.124
鹿港	0.103	0.103	0.102	0.149	0.131	0.131	0.129	0.190
箔子寮	0.083	0.078	0.076	0.105	0.103	0.098	0.095	0.128
塭港	0.068	0.069	0.066	0.074	0.089	0.090	0.088	0.095
東石	0.075	0.067	0.066	0.097	0.096	0.087	0.087	0.122
將軍	0.069	0.080	0.052	0.103	0.090	0.101	0.067	0.128
高雄	0.057	0.055	0.053	0.063	0.071	0.070	0.067	0.078
東沙島	0.147	0.142	0.133	0.121	0.174	0.168	0.160	0.145
小琉球	0.046	0.045	0.061	0.060	0.060	0.057	0.075	0.076
東港	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
後壁湖	0.051	0.053	0.054	0.059	0.065	0.067	0.069	0.074
蘭嶼	0.062	0.064	0.069	0.066	0.076	0.078	0.085	0.081
成功	0.038	0.040	0.036	0.049	0.048	0.050	0.047	0.062
花蓮	0.039	0.039	0.038	0.053	0.048	0.048	0.046	0.066
蘇澳	0.043	0.044	0.043	0.046	0.052	0.054	0.054	0.057
烏石	0.047	0.047	0.047	0.059	0.058	0.059	0.060	0.072
馬祖	0.122	0.128	0.126	0.137	0.156	0.161	0.159	0.173
澎湖 馬公	0.074	0.074	0.075	0.079	0.094	0.094	0.094	0.100
七美	0.061	0.057	0.058	0.066	0.089	0.087	0.088	0.093
吉貝	0.070	0.071	0.072	0.116	0.089	0.090	0.090	0.143
平均	0.083	0.083	0.084	0.098	0.115	0.114	0.115	0.132

5.4. 港內外測站潮汐資料比較

潮汐模擬中一個普遍接受的概念是，用全球或流域尺度的潮汐模型預測近岸淺水海域潮位，容易有較大誤差，而造成模式與觀測數據之間有落差的原因除了模式輸入地形資料解析度不足外，模式本身的網格解析度也有可能造成導入地形資料時產生截位誤差。

於觀測資料的取得方面，國內各單位基於業務職掌需要而進行潮位觀測，為能維持長期運作，大多於港內穩固的結構物處架設儀器，並非外海，氣象局現有作業中之暴潮預報模式為顧及預報時效，因此模式解析度不足以解析港口結構及細部地形。故本研究將透過氣象局現有的港內外潮位站觀測資料，以比對小區域的港內外潮汐差異，以探討若需要探討沿海細部地形結構對潮汐水位的影響，所需要的網格解析度門檻。

氣象局提供的潮位觀測站資料中，淡海測站位於漁人碼頭第 3 泊外堤，淡水測站位於淡水河油車口，兩站相距 2.02 公里，兩測站對應位置圖如圖 5—90。塭港測站位於嘉義塭港漁港近海 2 公里之觀測樁，東石測站則位於嘉義東石漁港，兩者相距 2.58 公里，兩測站對應位置圖如圖 5—91。

本研究利用 Utide 模式對指定的四個潮位站進行調和分析，於模式設定中，皆不對觀測資料進行預濾波校正（prefiltering correction），並將水位長期起伏趨勢包含在內一併考慮。模式中的求解分潮選項採用迭代重新加權最小二乘法（iteratively-reweighted least squares, IRLS），求解 68 個分潮數，而加權函數採用 Cauchy weight function，參考 Leffler 與 Jay（2009）的研究成果。

表 5—11 至表 5—14 依序為淡水、淡海、塭港、東石站以 2019 年至 2020 年觀測資料分析得到之調和分析參數。其中淡水站觀測資料平均值為 0.156 公尺，趨勢斜率為 $-3.286\text{e-}04$ 公尺/日，分析潮汐水位如圖 5—31。淡海站觀測資料平均值為 0.115 公尺，趨勢斜率為 $-2.336\text{e-}05$ 公尺/日，分析潮汐水位如圖 5—35。塭港觀測資料平均值為 0.208 公尺，趨勢斜率為 $3.843\text{e-}06$ 公尺/日，分析潮汐水位如圖 5—44。東石潮位站觀測資料平均值為 0.385 公尺，趨勢斜率為 $7.973\text{e-}06$ 公

尺/日，分析潮汐水位如圖 5—45。

表 5—15 為淡水與淡海之主要分潮比較結果，擷取自表 5—11 與表 5—12 中兩測站能量佔比順位相同之分潮。從表 5—15 中可以看出淡水與淡海測站主要以 M2 分潮為主要分潮，能量佔比超過 80%，其他相同成分之主要分潮如 S2、N2、K1、O1、SA、K2 等佔比將近 15%以上，以上主要分潮總和能量佔比在兩測站皆有 98%以上。在淡水測站中，各分潮振幅與淡海測站之差距介於 0 公分至 4 公分之間，M2 分潮差距約為 2 公分，但相位角差距 5.6 度，換算為潮時約為 11 分鐘，顯示兩測站之主要分潮在 2 公里左右即產生相位差。

表 5—16 則為塭港/東石之主要分潮比較結果，擷取自表 5—13 及表 5—14 中兩測站能量佔比順位相同之分潮。其中 M2 分潮為兩測站之主要分潮，能量佔比約為 75%，其他相同成分之主要分潮如 K1、O1、S2、SA、N2、P1、K2、L2 等分潮佔比約為 20%，以上主要分潮總和能量佔比在兩測站皆有 98%以上。在塭港測站中，各分潮振幅與東石測站差距小於 4 公分，相位角最大差距僅 1.7 度，主要分潮 M2 之相位角差距 1.4 度，換算為潮時約為 3 分鐘，與淡水/淡海測站相比，雖然兩站距離較遠但差距較小，但仍然無法完全代替彼此的潮位資料。

暴潮預報系統現作為模式邊界耦合之 TPXO 模式為例，該模式於沿岸網格解析度最高為 1/30 度，約為 3 公里，顯然無法解析沿岸潮汐 2 公里左右之潮汐振幅與相位差距。而現作業中暴潮預報系統為顧及預報時效，網格解析度於台灣本島為 2 公里，離島地區 1 公里，若需要於準確模擬沿岸港內潮汐振幅與相位，應於模式內搭配足以解析港口尺度之高解析度地形資料，於現有資料與案例比較中，已明確知道 2 公里之網格解析度尚屬不足，須留待後續取得較高解析度水下地形資料後方能進行後續分析。

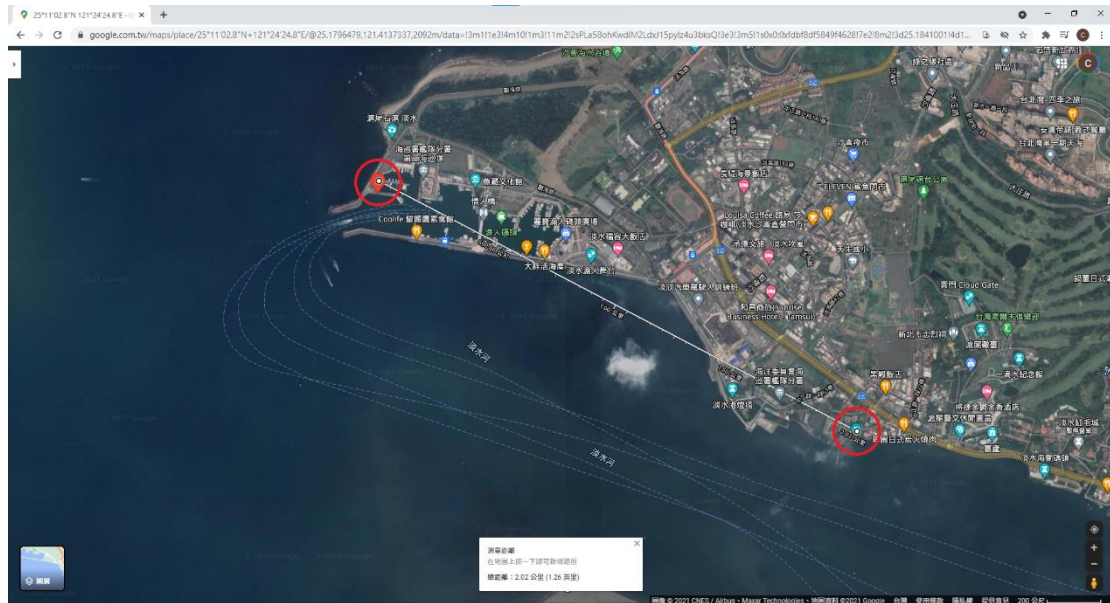


圖 5—90 淡海潮位站（圖左紅圈）及淡水潮位站（圖右紅圈）相對位置。
兩站相距約 2.02 公里，地圖比例尺為 200 公尺。

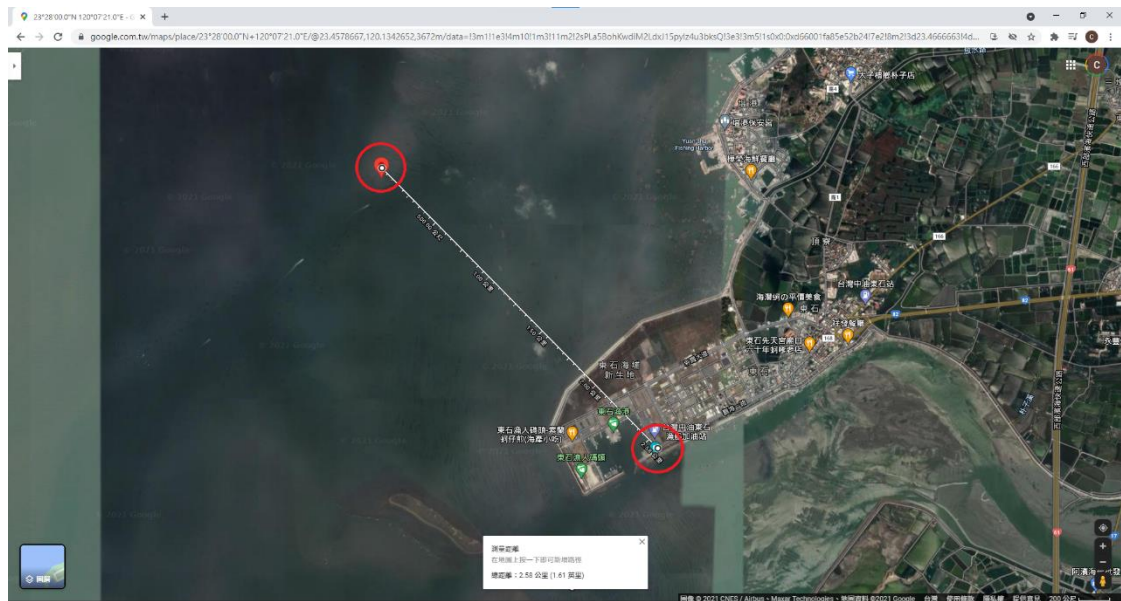


圖 5—91 塭港潮位站（圖左紅圈）及東石潮位站（圖右紅圈）相對位置。
兩站相距約 2.58 公里，地圖比例尺為 200 公尺。

表 5—11 淡水潮位站（1102）分潮分析列表

分潮	頻率 (cph)	振幅 (m)	相位角 (度)	PE(%)	分潮	頻率 (cph)	振幅(m)	相位角 (度)	PE(%)
M2	0.0805	1.013	316.8	81.977	SO1	0.0446	0.007	46.8	0.004
S2	0.0833	0.285	358.7	6.488	M6	0.2415	0.007	337.8	0.004
N2	0.0790	0.199	290.4	3.157	SSA	0.0002	0.006	29.3	0.003
K1	0.0418	0.198	247.2	3.133	PI1	0.0414	0.006	235.6	0.003
O1	0.0387	0.161	211.9	2.075	SK3	0.1251	0.006	203.8	0.003
SA	0.0001	0.117	195.7	1.097	OO1	0.0448	0.006	313.8	0.003
K2	0.0836	0.078	352.4	0.487	2MK5	0.2028	0.006	290.4	0.003
L2	0.0820	0.063	358.7	0.322	SN4	0.1623	0.006	232.5	0.003
P1	0.0416	0.061	243.6	0.297	MK4	0.1641	0.005	275.5	0.002
MU2	0.0777	0.052	92.1	0.213	S4	0.1667	0.005	301.3	0.002
NU2	0.0792	0.050	297.9	0.202	PSI1	0.0419	0.005	347.7	0.002
M4	0.1610	0.039	237.3	0.119	MSM	0.0013	0.004	213.1	0.002
Q1	0.0372	0.031	192.5	0.076	2Q1	0.0357	0.004	188.7	0.002
MS4	0.1638	0.027	269.9	0.059	SIG1	0.0359	0.004	212.7	0.002
LDA2	0.0818	0.026	349.9	0.055	PHI1	0.0420	0.004	240.8	0.001
T2	0.0832	0.019	359.7	0.029	MF	0.0031	0.004	86.3	0.001
EPS2	0.0762	0.017	51.1	0.024	R2	0.0834	0.004	154.8	0.001
MN4	0.1595	0.016	217.6	0.020	S1	0.0417	0.004	291.9	0.001
H2	0.0806	0.014	283.9	0.015	M8	0.3220	0.004	145.1	0.001
2N2	0.0775	0.014	273.9	0.015	TAU1	0.0390	0.003	30.5	0.001
MM	0.0015	0.012	64.0	0.012	BET1	0.0400	0.003	189.4	0.001
H1	0.0804	0.011	220.2	0.010	CHI1	0.0405	0.003	218.8	0.001
NO1	0.0403	0.011	222.2	0.010	2SM6	0.2472	0.003	62.1	0.001
2MS6	0.2444	0.010	13.2	0.007	3MK7	0.2833	0.003	76.2	0.001
J1	0.0433	0.009	278.1	0.007	ETA2	0.0851	0.003	352.6	0.001
MKS2	0.0807	0.009	175.3	0.007	2MN6	0.2400	0.003	299.8	0.001
GAM2	0.0803	0.009	306.9	0.007	SK4	0.1669	0.002	296.3	4.01E-04
MK3	0.1223	0.009	177.2	0.006	MSK6	0.2474	0.001	58.3	1.65E-04
RHO1	0.0374	0.008	188.7	0.005	OQ2	0.0760	0.001	331.5	1.58E-04
MSF	0.0028	0.008	40.1	0.005	2MK6	0.2446	0.001	348.6	1.40E-04
MO3	0.1192	0.008	132.6	0.005	UPS1	0.0463	0.001	325.7	1.02E-04
SO3	0.1221	0.007	180.1	0.004	ALP1	0.0344	0.001	258.0	8.75E-05
MSN2	0.0848	0.007	225.1	0.004	THE1	0.0431	0.001	107.0	7.40E-05
M3	0.1208	0.007	120.1	0.004	2SK5	0.2084	1.91E-04	31.9	2.92E-06

表 5—12 淡海潮位站（11006）分潮分析列表

分潮	頻率 (cph)	振幅 (m)	相位角 (度)	PE(%)	分潮	頻率 (cph)	振幅(m)	相位角 (度)	PE(%)
M2	0.0805	1.036	311.2	80.492	PSI1	0.0419	0.005	10.2	0.002
S2	0.0833	0.300	351.0	6.740	SO1	0.0446	0.005	357.8	0.002
K1	0.0418	0.213	243.8	3.401	MK3	0.1223	0.004	301.5	0.001
N2	0.0790	0.208	284.3	3.237	MO3	0.1192	0.004	302.2	0.001
O1	0.0387	0.176	209.1	2.325	PHI1	0.0420	0.004	222.2	0.001
SA	0.0001	0.159	206.3	1.894	PI1	0.0414	0.004	234.3	0.001
K2	0.0836	0.078	348.4	0.458	M3	0.1208	0.004	135.9	0.001
P1	0.0416	0.069	237.6	0.358	MK4	0.1641	0.004	264.7	0.001
L2	0.0820	0.064	359.4	0.311	M6	0.2415	0.004	194.9	0.001
NU2	0.0792	0.051	291.9	0.196	2MN6	0.2400	0.003	165.9	0.001
MU2	0.0777	0.044	91.9	0.146	SO3	0.1221	0.003	310.4	0.001
Q1	0.0372	0.036	190.3	0.097	MF	0.0031	0.003	69.3	0.001
M4	0.1610	0.026	245.8	0.049	CHI1	0.0405	0.003	195.2	0.001
LDA2	0.0818	0.026	352.8	0.049	SN4	0.1623	0.003	263.6	0.001
H2	0.0806	0.022	240.2	0.036	ETA2	0.0851	0.003	332.4	0.001
T2	0.0832	0.020	353.3	0.031	R2	0.0834	0.002	121.3	4.36E-04
SSA	0.0002	0.020	310.8	0.029	BET1	0.0400	0.002	181.0	3.93E-04
MS4	0.1638	0.019	282.8	0.026	S4	0.1667	0.002	317.0	3.45E-04
2N2	0.0775	0.014	260.6	0.016	2MS6	0.2444	0.002	286.1	3.29E-04
EPS2	0.0762	0.014	50.9	0.015	OQ2	0.0760	0.002	292.8	3.11E-04
NO1	0.0403	0.013	224.8	0.013	SK4	0.1669	0.002	240.1	2.35E-04
J1	0.0433	0.011	270.1	0.010	UPS1	0.0463	0.002	271.0	2.27E-04
MN4	0.1595	0.010	228.0	0.008	TAU1	0.0390	0.002	259.8	2.11E-04
MSN2	0.0848	0.010	232.4	0.007	M8	0.3220	0.002	202.8	1.97E-04
MM	0.0015	0.009	130.7	0.006	2MK5	0.2028	0.002	96.5	1.90E-04
GAM2	0.0803	0.009	269.9	0.006	2MK6	0.2446	0.001	244.9	4.32E-05
MKS2	0.0807	0.008	178.7	0.005	3MK7	0.2833	0.001	178.8	4.20E-05
RHO1	0.0374	0.008	180.0	0.004	MSF	0.0028	0.001	136.0	2.31E-05
S1	0.0417	0.006	213.0	0.003	SK3	0.1251	4.45E-04	310.8	1.49E-05
2Q1	0.0357	0.006	177.1	0.003	MSK6	0.2474	4.37E-04	90.4	1.43E-05
H1	0.0804	0.006	165.7	0.003	ALP1	0.0344	3.63E-04	51.8	9.88E-06
OO1	0.0448	0.006	304.4	0.003	THE1	0.0431	3.42E-04	310.2	8.75E-06
MSM	0.0013	0.005	142.9	0.002	2SM6	0.2472	3.28E-04	116.0	8.06E-06
SIG1	0.0359	0.005	192.5	0.002	2SK5	0.2084	5.64E-05	40.4	2.39E-07

表 5—13 塭港潮位站（1366）分潮分析列表

分潮	頻率 (cph)	振幅(m)	相位角 (度)	PE(%)	分潮	頻率 (cph)	振幅(m)	相位角 (度)	PE(%)
M2	0.0805	0.735	308.8	75.242	RHO1	0.0374	0.008	215.9	0.009
K1	0.0418	0.212	281.9	6.238	MF	0.0031	0.008	75.2	0.009
O1	0.0387	0.187	239.1	4.875	GAM2	0.0803	0.008	338.8	0.008
S2	0.0833	0.185	355.1	4.770	R2	0.0834	0.007	105.2	0.007
SA	0.0001	0.148	207.6	3.054	PI1	0.0414	0.007	259.6	0.006
N2	0.0790	0.144	283.4	2.874	MSF	0.0028	0.007	15.5	0.006
P1	0.0416	0.065	275.3	0.593	OO1	0.0448	0.006	344.3	0.004
K2	0.0836	0.056	354.2	0.436	SIG1	0.0359	0.005	220.7	0.004
L2	0.0820	0.051	345.7	0.366	2Q1	0.0357	0.005	206.5	0.004
NU2	0.0792	0.040	285.9	0.222	SK3	0.1251	0.005	237.3	0.004
MU2	0.0777	0.038	72.5	0.205	2MK6	0.2446	0.005	174.3	0.003
Q1	0.0372	0.037	221.4	0.189	SO1	0.0446	0.004	23.3	0.003
M4	0.1610	0.034	296.1	0.157	TAU1	0.0390	0.004	346.5	0.002
H2	0.0806	0.031	219.7	0.133	MSM	0.0013	0.004	105.1	0.002
MS4	0.1638	0.024	345.7	0.080	PHI1	0.0420	0.003	246.6	0.001
T2	0.0832	0.021	346.1	0.061	BET1	0.0400	0.003	230.3	0.001
H1	0.0804	0.020	97.1	0.053	THE1	0.0431	0.003	327.1	0.001
LDA2	0.0818	0.019	331.0	0.051	SN4	0.1623	0.003	340.3	0.001
S1	0.0417	0.017	172.8	0.040	MM	0.0015	0.003	335.2	0.001
M6	0.2415	0.016	133.7	0.036	PSI1	0.0419	0.003	328.7	0.001
2MS6	0.2444	0.016	194.3	0.034	OQ2	0.0760	0.003	324.8	0.001
MN4	0.1595	0.014	272.9	0.026	CHI1	0.0405	0.003	197.4	0.001
SSA	0.0002	0.013	11.7	0.025	MSK6	0.2474	0.003	251.4	0.001
NO1	0.0403	0.013	249.7	0.024	SK4	0.1669	0.003	28.5	0.001
MK3	0.1223	0.013	198.3	0.022	ETA2	0.0851	0.002	290.7	0.001
EPS2	0.0762	0.012	38.0	0.019	2SM6	0.2472	0.002	273.6	0.001
MO3	0.1192	0.011	162.5	0.018	M8	0.3220	0.002	122.8	0.001
J1	0.0433	0.010	307.8	0.013	3MK7	0.2833	0.002	346.4	4.97E-04
2N2	0.0775	0.009	267.8	0.012	M3	0.1208	0.002	68.0	3.88E-04
MSN2	0.0848	0.009	224.1	0.010	S4	0.1667	0.002	353.9	3.20E-04
2MN6	0.2400	0.008	98.1	0.010	ALP1	0.0344	0.001	230.4	2.56E-04
SO3	0.1221	0.008	207.0	0.010	2MK5	0.2028	0.001	178.2	2.47E-04
MK4	0.1641	0.008	342.8	0.010	UPS1	0.0463	0.001	243.7	7.06E-05
MKS2	0.0807	0.008	199.9	0.009	2SK5	0.2084	4.49E-04	226.8	2.80E-05

表 5—14 東石潮位站（1166）分潮分析列表

分潮	頻率 (cph)	振幅 (m)	相位角 (度)	PE(%)	分潮	頻率 (cph)	振幅 (m)	相位角 (度)	PE(%)
M2	0.0805	0.698	307.4	74.586	RHO1	0.0374	0.008	215.9	0.009
K1	0.0418	0.207	282.0	6.578	MKS2	0.0807	0.007	193.0	0.009
O1	0.0387	0.182	238.8	5.080	MF	0.0031	0.007	73.2	0.008
S2	0.0833	0.170	354.0	4.430	PI1	0.0414	0.006	249.8	0.006
SA	0.0001	0.151	206.7	3.472	R2	0.0834	0.006	97.6	0.006
N2	0.0790	0.136	281.7	2.846	GAM2	0.0803	0.006	342.1	0.006
P1	0.0416	0.064	276.5	0.619	OO1	0.0448	0.005	347.3	0.004
K2	0.0836	0.052	354.2	0.408	SIG1	0.0359	0.005	220.1	0.004
L2	0.0820	0.049	345.2	0.365	2Q1	0.0357	0.005	205.1	0.004
M4	0.1610	0.038	308.0	0.222	2MK6	0.2446	0.005	175.8	0.004
NU2	0.0792	0.038	285.4	0.220	S4	0.1667	0.005	24.2	0.003
MU2	0.0777	0.037	74.4	0.213	MSM	0.0013	0.004	105.9	0.003
Q1	0.0372	0.036	220.7	0.200	SK3	0.1251	0.004	276.9	0.002
H2	0.0806	0.028	221.4	0.124	SK4	0.1669	0.004	24.8	0.002
MS4	0.1638	0.027	353.9	0.110	MM	0.0015	0.004	1.6	0.002
LDA2	0.0818	0.019	331.4	0.055	TAU1	0.0390	0.003	350.1	0.002
T2	0.0832	0.017	340.6	0.044	BET1	0.0400	0.003	239.7	0.002
M6	0.2415	0.016	135.7	0.037	SN4	0.1623	0.003	348.0	0.002
MN4	0.1595	0.015	283.5	0.035	SO1	0.0446	0.003	15.9	0.002
H1	0.0804	0.015	93.8	0.035	PHI1	0.0420	0.003	237.3	0.002
2MS6	0.2444	0.014	194.2	0.032	CHI1	0.0405	0.003	201.5	0.001
NO1	0.0403	0.013	249.0	0.025	2MK5	0.2028	0.003	149.2	0.001
MK3	0.1223	0.012	222.9	0.021	PSI1	0.0419	0.003	314.2	0.001
MO3	0.1192	0.011	183.6	0.020	THE1	0.0431	0.003	322.9	0.001
SSA	0.0002	0.011	22.2	0.020	OQ2	0.0760	0.003	322.2	0.001
EPS2	0.0762	0.011	39.2	0.019	MSK6	0.2474	0.003	246.7	0.001
S1	0.0417	0.009	93.4	0.013	ETA2	0.0851	0.002	281.2	0.001
J1	0.0433	0.009	305.3	0.013	M8	0.3220	0.002	140.9	0.001
MK4	0.1641	0.009	341.8	0.012	2SM6	0.2472	0.002	256.2	0.001
2N2	0.0775	0.009	265.7	0.011	3MK7	0.2833	0.002	6.6	4.44E-04
SO3	0.1221	0.008	229.3	0.011	ALP1	0.0344	0.001	213.8	2.13E-04
MSF	0.0028	0.008	16.4	0.011	M3	0.1208	0.001	141.1	1.89E-04
2MN6	0.2400	0.008	101.0	0.011	2SK5	0.2084	0.001	222.1	1.85E-04
MSN2	0.0848	0.008	226.9	0.010	UPS1	0.0463	0.001	238.2	7.99E-05

表 5—15 淡水/淡海潮位站主要分潮比較表

Cnstit	Freq. (cph)	淡水潮位站 (1102)			淡海潮位站 (11006)		
		振幅(m)	相位角(度)	PE(%)	振幅 (m)	相位角 (度)	PE(%)
M2	0.0805	1.013	316.8	81.977	1.036	311.2	80.492
S2	0.0833	0.285	358.7	6.488	0.300	351.0	6.740
N2	0.0790	0.199	290.4	3.157	0.213	243.8	3.401
K1	0.0418	0.198	247.2	3.133	0.208	284.3	3.237
O1	0.0387	0.161	211.9	2.075	0.176	209.1	2.325
SA	0.0001	0.117	195.7	1.097	0.159	206.3	1.894
K2	0.0836	0.078	352.4	0.487	0.078	348.4	0.458

表 5—16 塭港/東石潮位站主要分潮比較表

分潮	頻率(cph)	塭港潮位站 (1366)			東石潮位站 (1166)		
		振幅(m)	相位角(度)	PE(%)	振幅 (m)	相位角 (度)	PE(%)
M2	0.0805	0.735	308.8	75.242	0.698	307.4	74.586
K1	0.0418	0.212	281.9	6.238	0.207	282.0	6.578
O1	0.0387	0.187	239.1	4.875	0.182	238.8	5.080
S2	0.0833	0.185	355.1	4.770	0.170	354.0	4.430
SA	0.0001	0.148	207.6	3.054	0.151	206.7	3.472
N2	0.0790	0.144	283.4	2.874	0.136	281.7	2.846
P1	0.0416	0.065	275.3	0.593	0.064	276.5	0.619
K2	0.0836	0.056	354.2	0.436	0.052	354.2	0.408
L2	0.0820	0.051	345.7	0.366	0.049	345.2	0.365

5.5. 暴潮預報與觀測資料之誤差來源分析

於本章節研究中，為降低潮位站觀測水位與調和分析殘差值之週期性震盪，以提升分析颱風暴潮時可校驗資料之品質，並減低暴潮預報模式與觀測校驗資料間的誤差，首先展示可用之各潮位觀測站之所在位置及資料概況，如章節 5.2 中所述。後續利用 Utide 模式對現有可用之觀測資料進行調和分析，並比較其與氣象局現有作業用模式結果之差異，顯示在部分測站中，若採用 Utide 輸入近兩年觀測資料所得之調和分析參數，可以取得與觀測資料間較小之方均根誤差、平均絕對誤差及較高之決定係數與相關係數。

圖 5—92 中顯示於系集預報章節案例分析中部分測站之決定性預報與觀測資料校驗值之比對結果。可以看到在淡水、後龍、梧棲站中，Utide 分析潮汐水位與潮位站觀測水位所得差值之週期性震盪較局內作業用調和分析水位差值減少許多，但在桃園、新竹、將軍等站，兩種模式所得之差值週期性震盪震幅並無明顯差別，顯示部分測站可以透過更新調和分析參數以取得較好的調和分析預報潮汐結果，但仍有其他測站之分析潮汐水位與觀測資料水位差距仍然具有週期性的誤差，且無法透過調和分析的方式來濾除，其可能源自港內外地形特徵，導致測站長期觀測資料特性並不能夠以天文潮物理完整描述。

潮汐模擬中一個普遍接受的概念是，用全球或流域尺度的潮汐模型預測近岸淺水海域潮位，容易有較大誤差，而造成模式與觀測數據之間有落差的原因除了模式輸入地形資料解析度不足外，模式本身的網格解析度也有可能造成導入地形資料時產生截位誤差。故本研究於章節 5.4 中透過氣象局現有的港內外潮位站觀測資料，以比對小區域的港內外潮汐差異。研究中發現，以淡海/淡水測站為例，兩點相距約 2.0 公里便有分潮振幅與相位角間之不同，因此在暴潮模式預報中，的確有可能因為預報系統網格解析度不足，造成模式潮汐水位與觀測水位之間的差異產生分潮振幅及潮時的誤差，進而造成水位偏差值的震盪情形。

於計畫後續研究中，預計將透過 COMCOT 模式搭配高解析度地形，探討該週期性水位偏差起伏是否可以透過提高模式內部的地形資料解析度及數值網格

解析度改善潮汐水位之模擬結果。

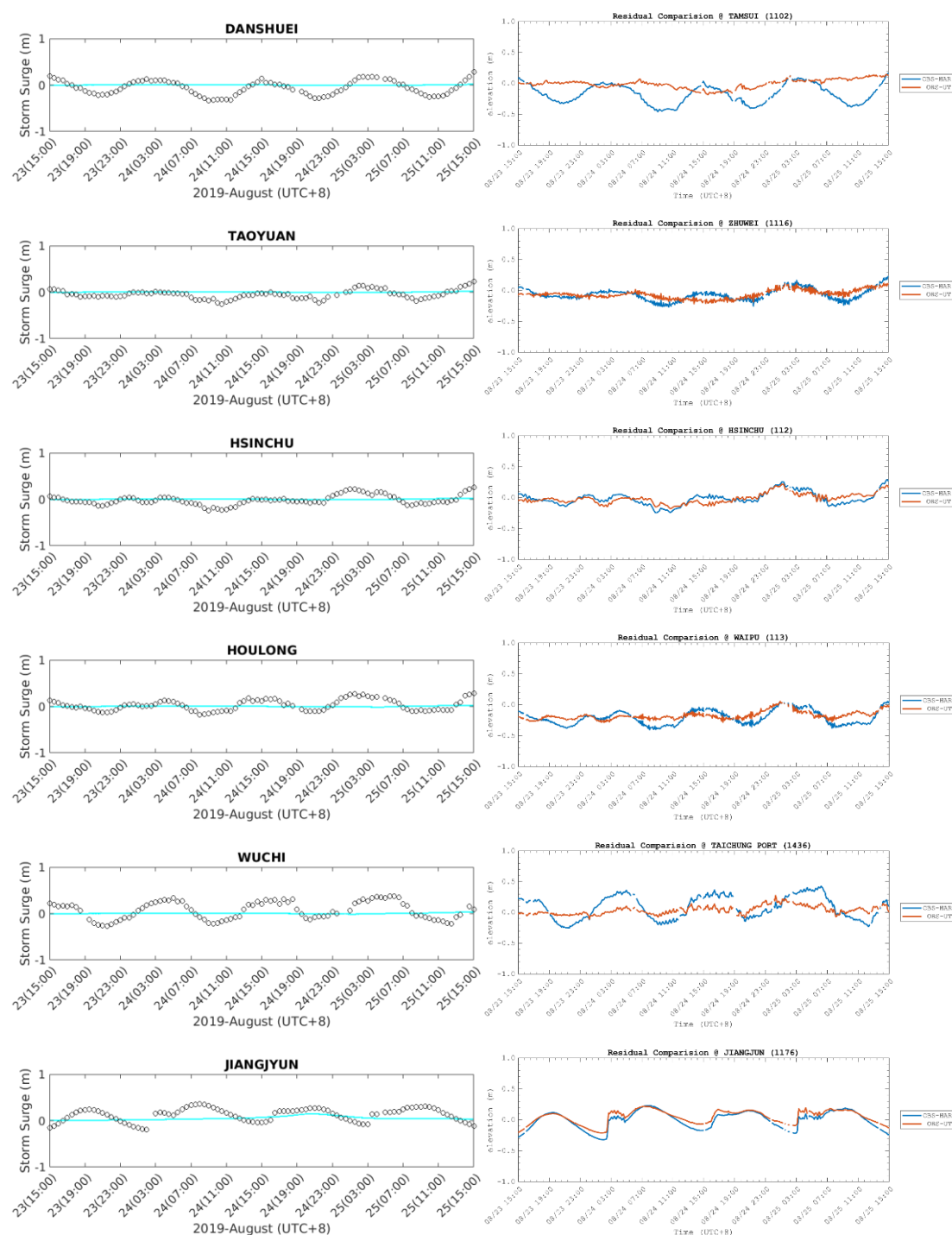


圖 5—92 2020 年颱風白鹿預報案例分析（章節 4.2）部分測站之決定性預報與觀測資料校驗值之比對結果

第六章、以觀測資料整理理想風場參數

與熱帶氣旋相關的數值模擬已為一種被廣泛接受的估算風速的方法，常被用於結構設計和颶風風險評估。其中，理想風場模式已在全球範圍內廣泛用於保險風險承保、海岸規劃和風暴潮預報等領域，提供高風險的財務管理，沿岸土地發展和緊急決策所需之相關資訊。但是，各界對於潛在的“最佳”參數風場決定方法仍然沒有達成共識，在眾多已發布模型中，也沒有關於如何選擇最佳參數風場的建議或指導。

研究中預計蒐集國內外可供分析之風場及壓力場觀測資料，搭配國外各項理想風場模式，以推估適合台灣現地之風場參數。若能取得接近觀測資料之風場參數，我們可以預期若將其用於颱風暴潮之模擬及預報，將有機會得到比現有作業化模式更精確之暴潮模擬結果。

6.1. 風速/壓力觀測資料之選用

風速以及壓力之觀測資料來源主要可以區分為兩種，其中一種為直接利用台灣現地單點觀測資料，透過擷取同一時間台灣沿海各地浮標的風速及壓力值，我們可以得到以颱風中心以外各距離之風速及壓力分布，進而利用國外各項理想風場模式擬合出理想之資料剖面；另一種則是透過國外再分析氣象場資料取得理想風場所需之參數，並比較國外各項理想風場模式與再分析風場間之誤差分布，以判斷較合適之理想風場模式及決定相關參數的方法。

在選用單點式資料前，研究已知將會遭遇以下挑戰：台灣氣象觀測站在陸地上密度極高，海氣象浮標的數量與之相比較為稀少。由於研究步驟預期選用理想風場模式擬合觀測資料，但理想模式下通常未考慮地形效應，因此研究中僅選用浮標資料以盡可能避開海陸差異及地形起伏對觀測資料的影響。再者，颱風實際影響台灣的時間長度遠小於其發展週期，導致研究中若選用現地資料進行分析，則可用之觀測資料將相對有限。

若選用再分析氣象場，其優勢在於已經透過資料同化技術整合過往觀測資料，包括觀測到的氣象參數（地表壓力、溫度、風、濕度和臭氧），並利用由預測模式生成的許多附加參數（例如降雨量、雲參數、邊界層高度等）進行資料補遺，是相對完整的二維資料，而數據同化則可以確保再分析場受到有效觀測資料的約束，其方式與預測模式所表達的物理定律一致。但再分析氣象場在經過整合資料後，將可能因為受限於模式解析度不夠精細、資料同化技術自身限制、甚至觀測資料或模式本身誤差等，導致雖然擁有二維資料但仍無法精確解析颱風結構的可能性。

研究中首先自氣象局颱風資料庫收集颱風最佳路徑資料，取得各颱風紀錄之颱風中心所在位置（經度、緯度）及海氣象浮標位置（如表 6—1），計算各浮標在颱風紀錄時間中與颱風中心之距離。透過得知浮標與颱風中心之距離，便可依據浮標距離颱風中心遠近，將其記錄之風速及氣壓值依距離排序，進而取得以觀測資料之剖面。以 2015 年颱風蘇迪勒（Soudelor）為例，圖 6—1 為其生命期間

路徑與強度分布圖。圖片資料來源為氣象局颱風資料庫，圖中路徑與強度資料為每六小時一筆，資料顯示時間為 UTC。縱使颱風蘇迪勒生命週期超過一周，實際上能將八成氣象浮標位置涵蓋進具颱風中心 500 公里內的時間仍只有 2015 年 8 月 7 日 18 時至 8 月 8 日 06 時。在此期間內由於發布陸上颱風警報，颱風位置紀錄資料間隔為 3 小時一筆，即有效之壓力與風速剖面僅有 5 組。圖 6—2 為海氣象浮標之氣壓及風速觀測資料沿與颱風中心距離之剖面分布。空心圓為有效觀測資料，虛線為採 PCHIP(Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial)內插所得之資料剖面。從圖 6—2 中，我們可以看到不論是氣壓或是風速依距離分布的觀測資料值，其剖面並非平滑的曲線，尤其風速剖面甚至有大幅度的跳動，與理想參數颱風剖面內高外低的分布區勢明顯不同，這很有可能是因為颱風接近台灣時結構已經受到地形影響並被破壞部分結構，或者是在大氣環境中的背景風造成的震盪情形，導致研究過程中執行資料品質時發生困難。這樣的現象在本研究團隊選用更長資料週期，即近五年（2016 年至 2020 年）與近十年（2010 年至 2020 年）資料區間後仍然沒有顯著改善。加上在統整資料前便已發現可用資料雖為現地但數量有限，因此很不幸地，本研究尚無法透過沿海之現地觀測資料達到原先所設定與預期之結果及目標。

若選用再分析氣象場作為精進理想風場模式的參考，其優勢在於再分析能夠利用物理定律將模式數據與來自世界各地的觀測結果結合成一個涵蓋全球、完整且一致的數據集。這種被稱為數據同化（data assimilation）的原理基於數值天氣預報中心使用的方法，其中每隔幾個小時（以 ECMWF 為例，現有作業為 12 小時），將過往預報結果與最新可用的觀測數據以最佳方式結合，以產生新的最佳估計大氣狀態，通常被稱為分析場，並利用其發布下一次的預報。再分析的工作方式與此相同，但透過降低模式解析度的方式，以允許模式得以整合跨越數十年的數據集。由於再分析並沒有發布即時預測的限制，因此得以有更充分的時間來收集各地觀測的資料來進行同化及整合。當分析再往更久遠的時間回溯時，甚至可以透過原始觀察資料的改進版本提升再分析產品的品質。

現被廣泛引用之再分析氣象場集中於兩者，分別為歐洲的 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)及美國的 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) Reanalysis，整理表格如表 6—2。其中，各種再分析氣象場之範圍皆涵蓋全球，而 ECMWF ERA5 是使用 ECMWF 整合預報系統 (Integrated Forecasting System, IFS) 的 Cycle 41r2 中的 4D-Var 數據同化和模式預報生成的，在所有再分析資料庫中擁有最高空間解析度及時間解析度，分別為 0.25 度（約 31 公里）及 1 小時，擁有涵蓋 1979 年迄今的資料，且未來將被擴展至 1950 年代。該模式在 2019 年正式取代 ECMWF ERA Interim 並作業化，因此在本研究中被優先選用。

為比較 ECMWF ERA5 再分析場與現地觀測資料的差異，並確認其是否適合應用於研究颱風結構，本研究引用蔡(2021)針對 2015 年颱風蘇迪勒之浮標觀測資料與 ECMWF ERA5 再分析之氣壓、風速及風向資料的比較結果。

圖 6—3 至圖 6—5 為浮標觀測資料與 ERA5 再分析場資料之分布情形。圖 6—3 展示氣壓比對結果，圖 6—4 展示 10 米風速比對結果，浮標風速資料依據 Hsu et al. (1993)的公式進行換算。圖 6—5 展示浮標風向分布情形比對結果。展示測站由左至右、由上而下依序為龍洞、花蓮、蘇澳、龜山島、鵝鑾鼻、台東、基隆、台東、富貴角等測站。藍線為自 ERA5 再分析場擷取之資料，時間間隔為每小時一筆；黑色十字為觀測資料，時間間隔為 6 分鐘一筆。橫軸為 2015 年颱風蘇迪勒影響台灣的主要時段，時間自 08 月 04 日起至 08 月 11 日 (UTC)，紅色虛線為颱風蘇迪勒登陸台灣花蓮秀林鄉的時間，為 08 月 07 日 22 時。

圖 6—3 至圖 6—5 中，可以看到龍洞測站及蘇澳測站在颱風登陸前便紀錄損毀的情形，但在颱風近台期間，大部分的測站皆有足夠的觀測資料用於驗證 ERA5 的再分析結果。整體而言，ERA5 與台灣東北海岸的測站（基隆、龍洞、龜山島、蘇澳等）觀測結果相當吻合。但在最靠近登陸地點的花蓮浮標，風速的觀測資料分布情形較 ERA5 的結果更為曲折，且在該測站中，即使 ERA5 的海表面氣壓與模式風向與大部分的觀測資料相符，ERA5 於颱風登陸台灣期間在花蓮

得到的最大風速與觀測資料相比較為低估，類似的情形也可以從台東外海浮標及富貴角浮標中看見，這意味著當陸地高程阻止颱風的氣旋流動時，颱風的風速跟風向可能很難預測。但在氣壓資料比對中，各測站在 ERA5 及觀測資料比對的情況皆十分吻合。表 6—4 為 ERA5 與觀測到的海平面氣壓、10 米風速與風向互相比對的統計結果，包含了方均根誤差及相關係數。在海平面氣壓的比對中，兩者的方均根誤差落在 1.03 至 2.82 百帕之間，相關係數在呈現的測站中皆高達 95% 以上。風速比對中，方均根誤差介於 1.52 至 4.73 公尺/秒，相關係數皆在 70% 以上，而除了東部的蘇澳、花蓮、台東站外，其他測站的相關係數皆在 90% 以上。而在風向比對上，ERA5 與大部分觀測數據的相關係數介於 35% 至 80% 之間，而台東站的相關係數高達 93%。從上述比對中值得注意的是，在 ERA5 再分析中，10 米風速在各測站中具有比海平面壓力更大的變化，且在台灣沿海可能受到陸地高程影響導致風向重建效果有限，這將不僅影響風暴潮建模中的風切應力計算，更有機會影響波浪模式中的風浪生成。

表 6—1 海氣象浮標資訊

浮標編號	測站名稱	Begin Date	End Date	Longitude	Latitude
46699A	花蓮 Hualien	1997-05-21	2021/7/19	121.6325	24.03111
46708A	龜山島 Guishandao	2002-05-17	2021/7/19	121.9261	24.8467
46714D	小琉球 Xiao Liuqiu	2003-10-03	2021/6/5	120.3628	22.3136
46757B	新竹 Hsinchu	1997-05-26	2021/7/19	120.8422	24.7625
C6AH2	富貴角 Fugui Cape	2015-07-29	2021/7/19	121.5336	25.3036
C6B01	彭佳嶼 Pengjiayu	2019-07-09	2021/7/19	122.0586	25.6042
C6F01	台中 Taichung	2019-08-22	2021/7/19	120.4133	24.2156
C6S62	台東外海 Taitung	2009-08-14	2017/11/21	124.07417	21.76639
C6S94	蘭嶼 Lanyu	2017-09-26	2021/7/19	121.5828	22.0753
C6V27	東沙島 Pratas	2010-05-25	2021/3/22	118.82	21.0733
C6W08	馬祖 Matsu	2010-08-01	2021/7/19	120.5153	26.3525
C6W10	七美 Chimi	2015-07-16	2020/12/6	119.6725	22.99833

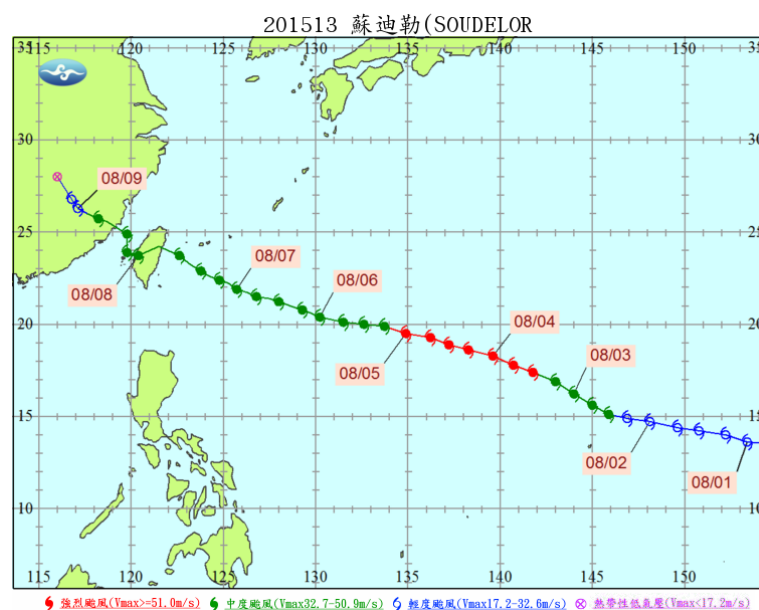


圖 6—1 2015 颱風蘇迪勒生命期間路徑分布圖

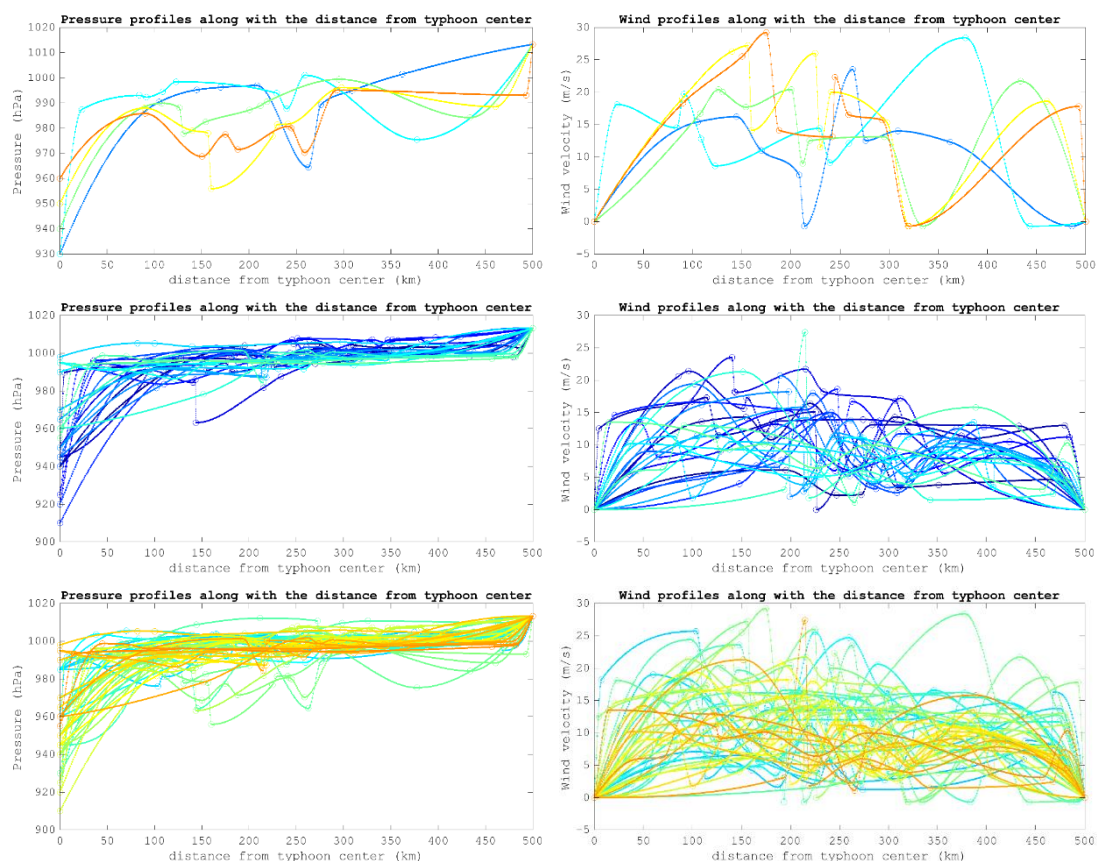


圖 6—2 海象浮標氣壓（左）與風速（右）觀測資料沿與颱風中心距離之剖面分布，選用資料為浮標氣壓觀測，選用期間由上至下依序為 2015 年颱風蘇迪勒、2016 至 2020 年及 2010 至 2020 年。空心圓為觀測資料，虛線採 PCHIP(Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial)內插資料。

表 6—2 各國再分析場比較表

Reanalysis Dataset	Organization	Spatial Resolution (Coverage)	Temporal Resolution	Temporal Coverage
ECMWF ERA5	ECMWF (Europe)	0.25°×0.25° (Global)	1 hr	1979 to present
ECMWF ERA Interim	ECMWF (Europe)	0.75°×0.75° (Global)	6 hrs	1 January 1979 to 31 August 2019
NCEP/NCAR Reanalysis 1	NCEP (USA)	2.5°×2.5° (Global)	6 hrs	1948/01/01 to present
NCEP-DOE Reanalysis 2	NCEP (USA)	2.5°×2.5° (Global)	6 hrs	1979/01 to 2021/09 (1 month delay)

表 6—3 蔡(2021)研究選用浮標測站

測站編號	測站名稱 (英)	測站名稱 (中)	緯度	經度
C6AH2	Fuguijiao	富貴角	25.30472	121.53556
COMCO7	Keelung	基隆	25.15420	121.78500
46694A	Longdong	龍洞	25.09667	121.92250
46708A	Guishandao	龜山島	24.84917	121.92556
46706A	Suao	蘇澳	24.62333	121.87667
46699A	Hualein	花蓮	24.03417	121.63083
WRA007	Taitung	臺東	22.72222	121.14000
46759A	Eluanbi	鵝鑾鼻	21.90306	120.82361
C6S62	Taitung (Offshore)	臺東外洋	21.76639	124.07417

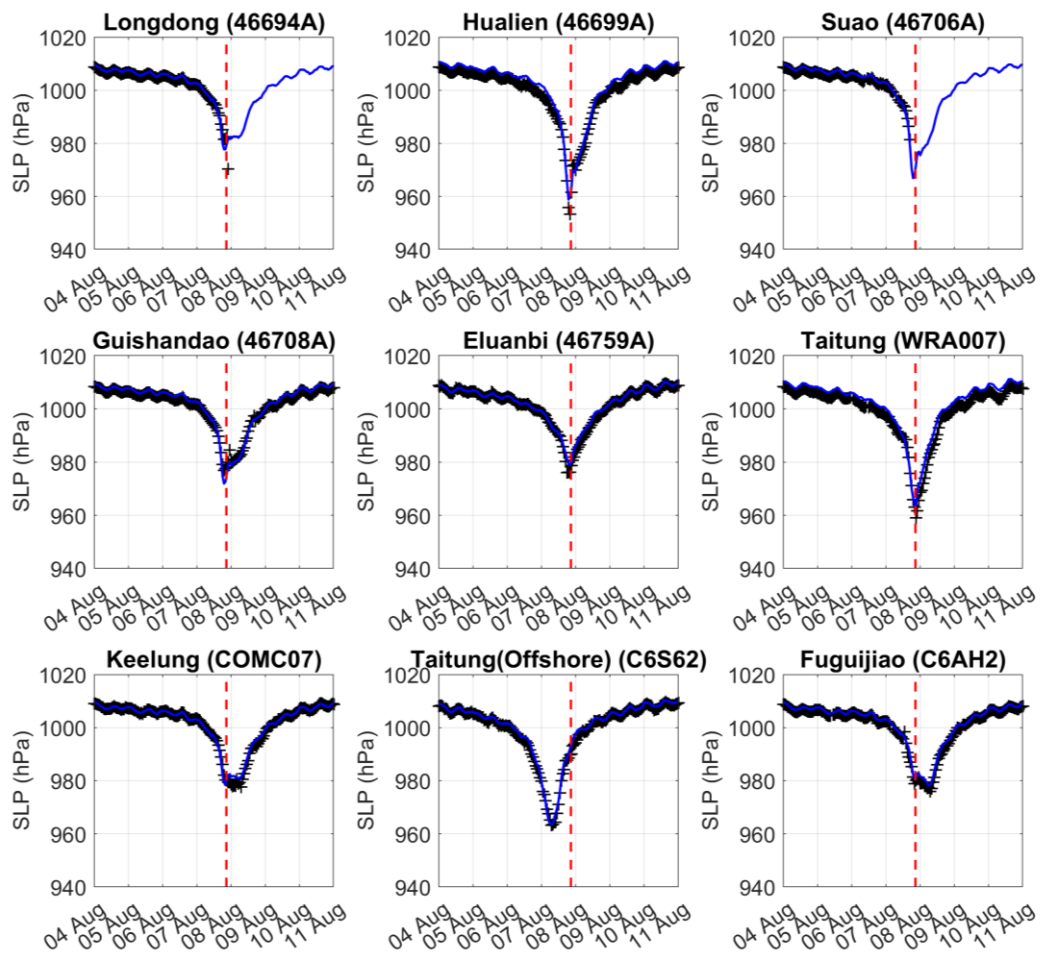


圖 6—3 浮標氣壓分布。藍線為 ERA5 再分析場資料，黑色十字為觀測資料，紅色虛線為颱風登陸時間。

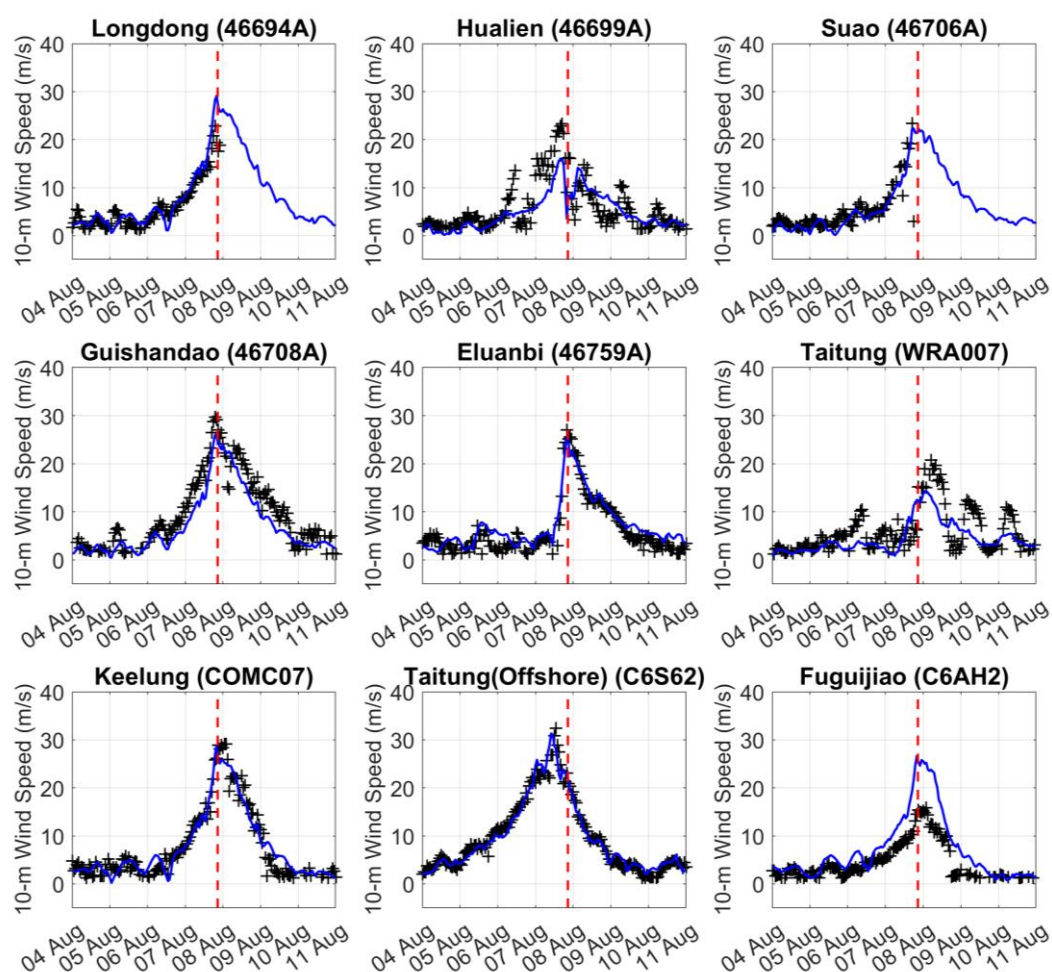


圖 6—4 浮標風速分布。藍線為 ERA5 再分析場資料，黑色十字為觀測資料，紅色虛線為颱風登陸時間。浮標風速資料依 Hsu et al. (1993) 的公式進行換算。

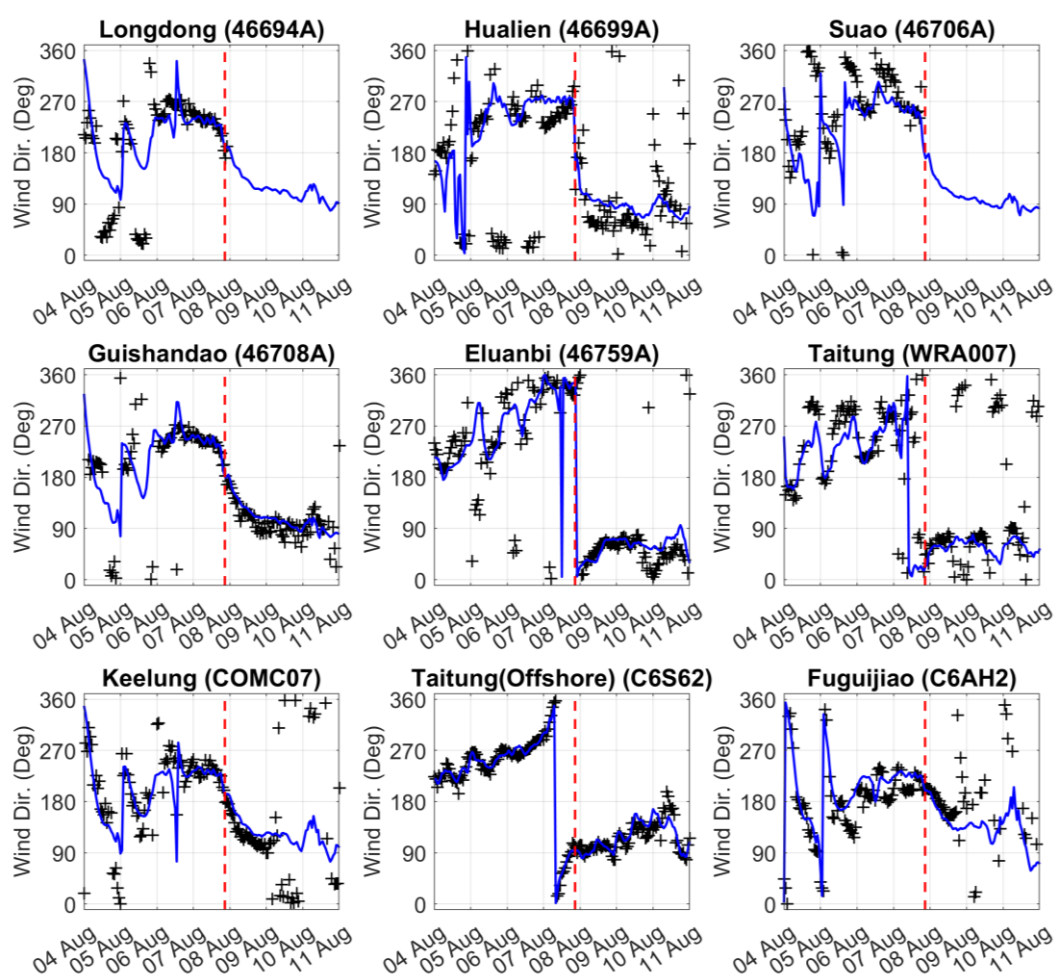


圖 6—5 浮標風向分布。藍線為 ERA5 再分析場資料，黑色十字為觀測資料，紅色虛線為颱風登陸時間。

表 6—4 浮標資料與再分析場之誤差統計分析。包含海表氣壓、10 米平均風速、風向，統計參數含方均根誤差、相關係數及資料點數。

Buoy Station Name	Sea-Level Pressure			10-m Wind Speed			Wind Direction		
	RMSE (hPa)	COEF (%)	Nd	RMSE (m/s)	COEF (%)	Nd	RMSE (deg)	COEF (%)	Nd
Keelung	1.03	99.42	169	2.11	96.28	146	72.43	58.47	146
Longdong	1.63	97.65	95	2.52	95.45	88	61.94	72.91	88
Guishandao	1.33	99.69	169	3.18	95.08	144	54.56	74.52	144
Suao	1.10	99.73	87	2.65	84.51	84	82.86	36.74	84
Hualien	2.35	99.63	169	3.54	77.63	156	104.85	38.64	156
Taitung	2.82	99.24	167	3.61	70.46	154	118.18	44.82	154
Fuguijiao	1.23	99.82	167	4.73	95.89	133	68.07	38.33	133
Eluanbi	1.08	99.67	169	2.11	94.97	153	89.88	71.56	153
Taitung (Offshore)	1.22	99.72	169	1.52	97.96	168	30.26	93.01	168

6.2. 再分析氣象場與理想風場模式比對

前一章節研究中展示了再分析氣象場與觀測資料間的差異，透過分析部分浮標測站顯示兩種資料間擁有高度相關係數及相對較小的方均根誤差，進一步展示了將再分析風場用於分析理想風場模式所需參數的可行性。

收集可用的風速及氣壓場觀測資料後，蒐集國外各項理想風場模式，並檢視各項理想風場模式中所需之參數是否可以透過 ECMWF ERA5 取得，並將自 ECMWF ERA5 取得的各項參數帶入理想風場模式中建構理想風場模型與 ECMWF ERA5 互相比對，與其有最小方均根誤差者顯示其較其他風場模式適用於本研究地區。

選用颱風案例時，本研究選用日本氣象廳 (Japan Meteorological Agency, JMA) 東京區域專業氣象中心 (Regional Specialized Meteorological Center, RSMC Tokyo) 的最佳路徑資料做為參考基準，原因是該研究單位負責北半球反子午線和東經 100 度之間的熱帶氣旋監測，且分類颱風強度的基準依據颱風委員會 (The Economic and Social Commission for Asia and the Pacific/World Meteorological Organization, ESCAP/WMO Typhoon Committee)，皆以 10 分鐘持續風速 (10-minute sustained winds) 作為分類颱風強度的基準。

颱風委員會分類颱風強度使用的最低級別是熱帶低氣壓，其 10 分鐘持續風速低於 17 公尺/秒。如果熱帶低氣壓進一步增強，它會被命名並歸類為熱帶風暴，其風速在 17-24 公尺/秒之間。如果該系統繼續加強，那麼它將被歸類為嚴重的熱帶風暴，風速在 25 至 32 公尺/秒之間，而颱風委員會針對熱帶氣旋分類的最高級別是颱風，10 分鐘持續風速高於風速 33 公尺/秒便符合該級別，日本氣象廳則對於颱風更加細分為「強(33-43 公尺/秒)」、「非常強(44-54 公尺/秒)」及「猛烈的(>54 公尺/秒)」三種強度。雖然中央氣象局在中文發布颱風消息時有自己的颱風分類 (17.5~32.7 公尺/秒屬輕颱、32.8~50.7 公尺/秒屬中颱、50.8 公尺/秒以上為強颱)，但在發布英文版颱風消息時乃採用颱風委員會的分類方法。

依據 RSMC Tokyo 提供的熱帶氣旋最佳路徑資料，我們可以從中取得 1951

年至 2021 年間的颱風相關參數，包含颱風名稱、紀錄期間其中心所在位置、強度分類、中心氣壓（百帕）、最大持續風速（節）、最大持續風速與颱風中心的距離（海里）及所在象限、30 節風與颱風中心的最長/最短距離（海里）等。

表 6—5 整理前人對於熱帶氣旋理想風場之相關公式，所需參數通常有 R_m （近中心最大風速半徑）、 V_m （近中心最大風速），皆可以透過 ECMWF ERA5 取得。研究中採用近五年（2016-2020 年）ECMWF ERA5 中颱風級別以上之二維風場資料，取得近中心最大風速半徑及近中心最大風速後，利用兩項參數及表 6—5 中之參數化模式重新建構理想風場，並將之與再分析風場相互比對，以檢視現有研究中何者相對適用近年侵（近）台之颱風案例。

表 6—5 理想風場公式統整

文獻	公式
Holland 1980 (H80)	$V(r) = \sqrt{\left(\frac{R_m}{r}\right)^B \frac{B\Delta P}{\rho} \exp\left[-\left(\frac{R_m}{r}\right)^B\right] + \frac{r^2 f^2}{4} - \frac{fr}{2}}$ $B = \frac{V_m^2 e \rho + f V_m R_m e \rho}{\Delta P}, \rho = 1.15, e = \exp(1)$
Jelesnianski et al, 1992 (J92)	$V(r) = \frac{2rR_m V_m}{R_m^2 + r^2}$
Willoughby et al, 2006 (W06)	For $0 \leq r \leq R_m: V(r) = V_m \left(\frac{r}{R_m}\right)^n$ with $n = 0.79$ For $r > R_m: V(r) = V_m \exp\left(-\frac{r - R_m}{X}\right)$ with $X = 243 \text{ km}$
Emanuel and Rotunno 2011 (E11)	$V(r) = \frac{2r(R_m V_m + 0.5fR_m^2)}{R_m^2 + r^2} - \frac{fr}{2}$
Murty et al., 2016 (M16)	$V(r) = V_m \left(\frac{2rR_m}{R_m^2 + r^2}\right)^n, n = 0.6$

圖 6—6 為 ECMWF ERA 5 2016 年 09 月 25 日 18 時 (UTC) 颱風梅姬 (MEGI) 於太平洋海面上之 10 米平均風速分布，單位為公尺/秒。左圖繪製範圍同暴潮預報系統母層之計算域，右圖繪製範圍以颱風中心向東西南北拓展 10 度經緯度，色階表示 10 米平均風速分布，範圍為 0 至 50 公尺。右圖黃圈為颱風中心位置，為 JMA 最佳路徑紀錄，藍圈為 ECMWF 於本時間步近颱風中心最大風速所在位置。圖片標題顯示擷取資料之對應時間，擷取之最大風速值及其所在經緯度。圖中可以看到近中心最大風速在本時間步為 26.6940 公尺/秒，最大風速

半徑透過經緯度換算後為 115.5863 公里。

圖 6—7 為對應 ERA 5 2016 年 09 月 25 日 18 時 (UTC) 取得之最大風速半徑 (Rmax) 及最大風速值 (Vmax) 計算之各理想理想風場模式之剖面分布。色線表示各模式沿與颱風中心距離之風速分布，黑色虛線為 0 值基準線，藍色虛線為 Rmax 對應處，紅色虛線為 Vmax 對應處。可以看到各理想風場模式受制於該兩項參數，故最大風速所在位置皆相近。而最大風速半徑往颱風中心之風速剖面分布，除了 H80 及 W06 外，其他模式的分布情形皆非常相似。自最大風速半徑向外之風速剖面，以 E11 向外衰減的速度最快，其次為 W06、J92/CWB、H80，並以 M16 的風速衰減情形最為緩和。

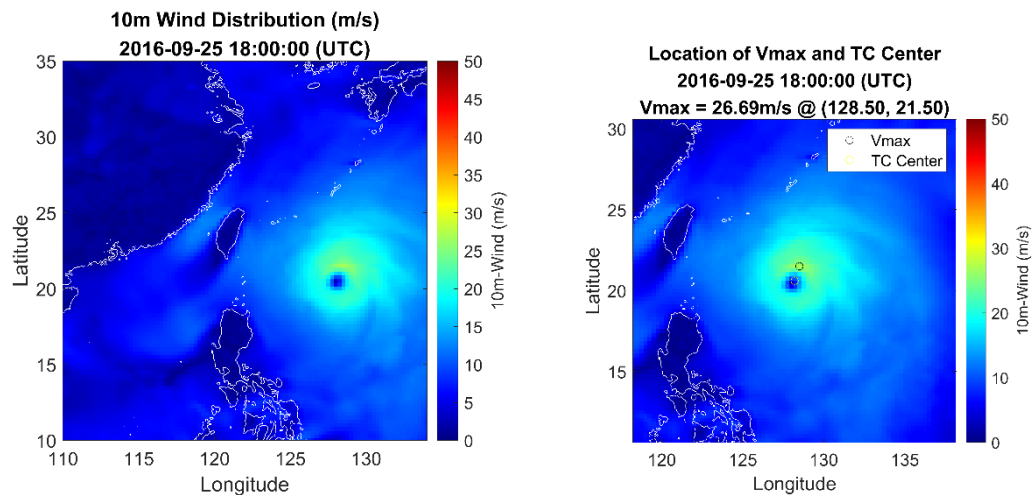


圖 6—6 ERA 5 2016 年 09 月 25 日 18 時 (UTC) 颱風梅姬於太平洋海面上之 10 米平均風速分布，單位為公尺/秒。本圖中擷取之 Rmax 為 115.5863 公里，Vmax 為 26.6940 公尺/秒。

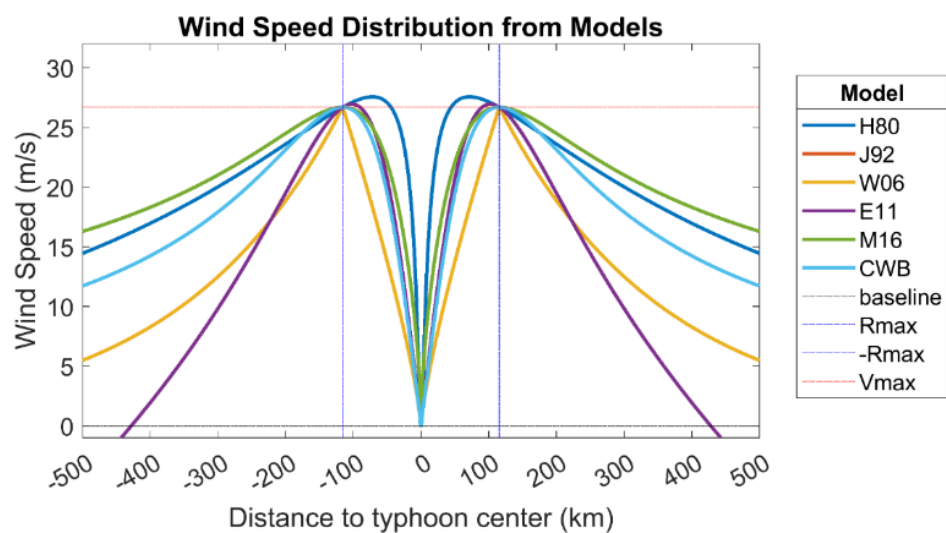


圖 6—7 對應 ERA 5 2016 年 09 月 25 日 18 時 (UTC) 取得之 Rmax 及 Vmax 計算之理想風場模式剖面分布。色線表示各模式沿與颱風中心距離之風速分布，黑色虛線為 0 值基準線，藍色虛線為 Rmax 對應處，紅色虛線為 Vmax 對應處。

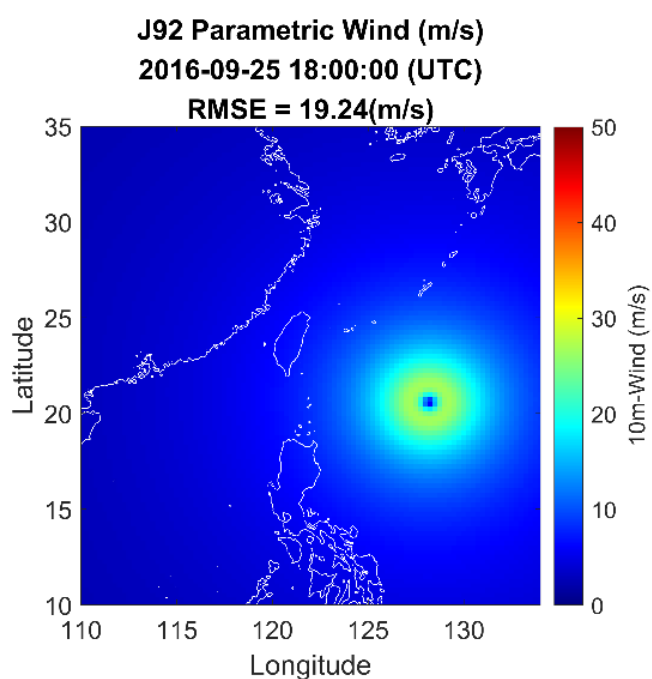
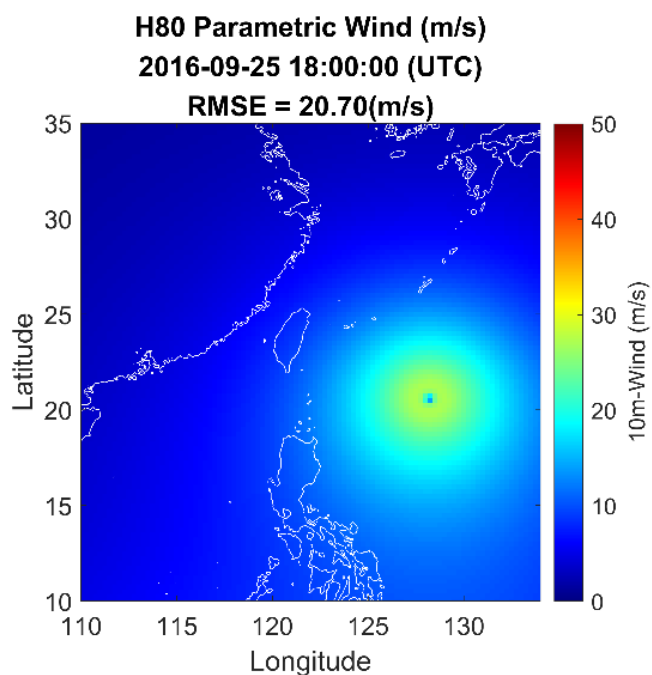


圖 6—8 對應 ERA5 2016 年 09 月 25 日 18 時 (UTC) 取得之 Rmax 及 Vmax 計算之理想風場模式二維分布。標題縮寫表示各理想風場模式，色階為風速，單位為公尺/秒。方均根誤差為理想風場之 250 公里內資料與 ERA5 資料之統計結果。

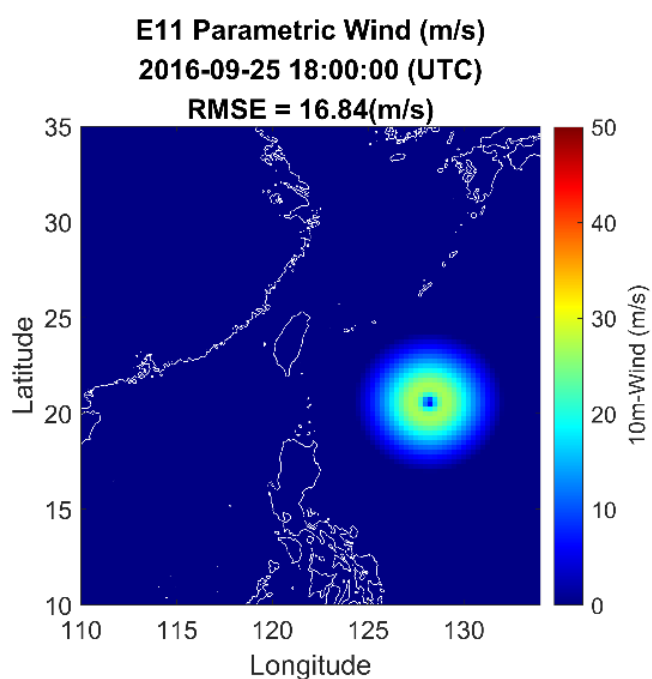
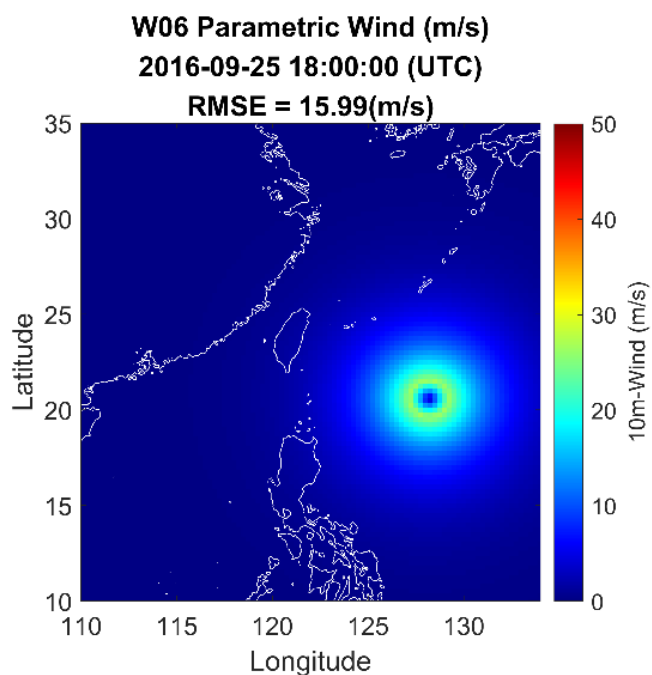


圖 6—9 對應 ERA5 2016 年 09 月 25 日 18 時 (UTC) 取得之 Rmax 及 Vmax 計算之理想風場模式二維分布。標題縮寫表示各理想風場模式，色階為風速，單位為公尺/秒。方均根誤差為理想風場之 250 公里內資料與 ERA5 資料之統計結果。

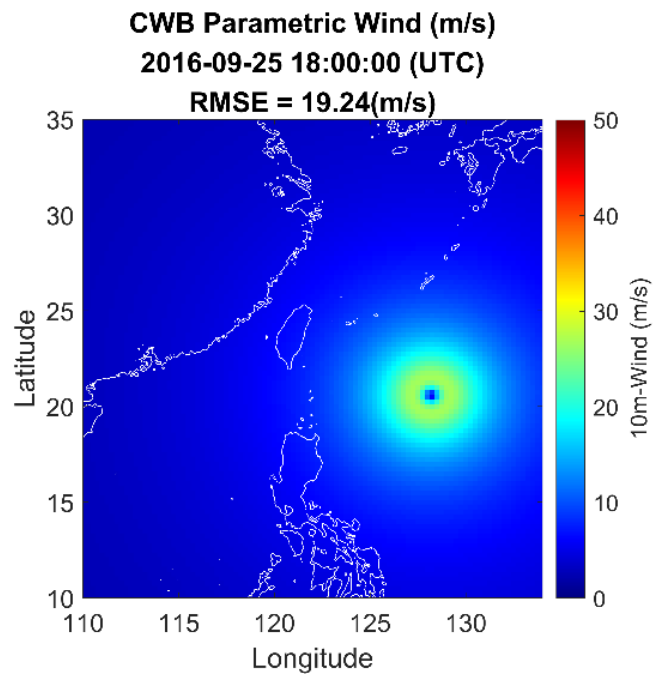
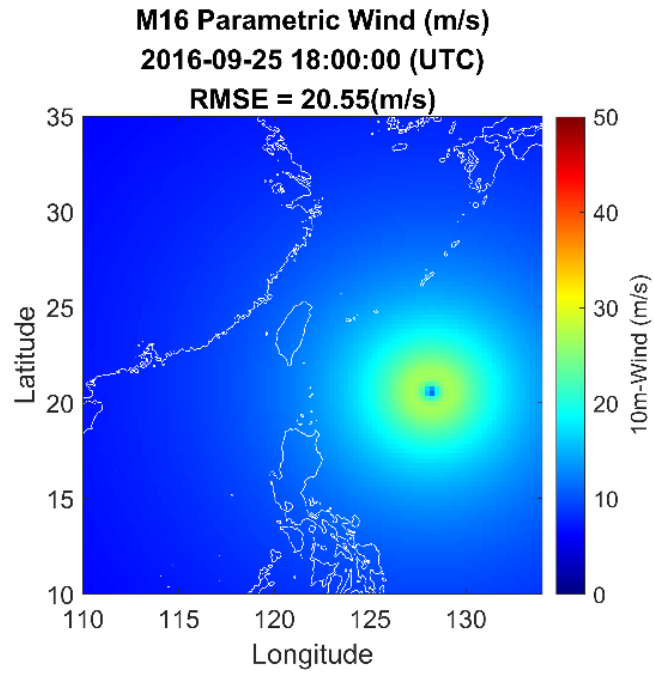


圖 6—10 對應 ERA5 2016 年 09 月 25 日 18 時 (UTC) 取得之 Rmax 及 Vmax 計算之理想風場模式二維分布。標題縮寫表示各理想風場模式，色階為風速，單位為公尺/秒。方均根誤差為理想風場之 250 公里內資料與 ERA5 資料之統計結果。

表 6—6 理想風場模式在不同颱風強度下與 ERA5 整體風場之方均根誤差（公尺/秒）

	H80	J92	W06	E11	M16	CWB	Nd
熱帶低氣壓 (<17 公尺/秒)	-	-	-	-	-	-	0
熱帶風暴 (17-24 公尺/秒)	9.184	8.304	6.801	8.812	9.116	8.304	244
嚴重的熱帶風暴 (25-32 公尺/秒)	12.909	11.613	9.798	10.582	12.631	11.613	276
颱風(強) (33-43 公尺/秒)	15.435	13.415	11.409	11.841	14.678	13.415	482
颱風(非常強) (44-54 公尺/秒)	18.968	15.816	13.759	13.660	17.525	15.816	328
颱風(猛烈的) (>54 公尺/秒)	19.315	15.508	13.538	13.114	17.366	15.508	48
all	14.831	12.838	10.945	11.538	14.104	12.838	1378

6.3. Rmax 統計模型比較

研究中為減少估算近中心最大風速與颱風中心距離所需之參數，蒐集以下經驗公式，各項公式所需之參數皆可透過颱風警報單提供，包含颱風中心氣壓、環境氣壓及颱風中心所在緯度等。本研究將探討在現存公式中較合適之最大風速半徑推估公式，以作為後續調整理想風場模式之參考。下述公式中， R_m 表示最大風速半徑、 P_n 表示環境氣壓、 P_c 表示颱風中心氣壓、 ϕ 表示颱風中心所在緯度、 v_m 為近中心最大風速。

Vickery et al., 2000a

Vickery et al., (2000a) 在介紹一種評估美國颶風風險的新技術時，重建每個颶風穿越海洋並登陸時的整個路徑進行模擬。該方法將颶風中心氣壓視為海面溫度的函數，並利用觀測到的颶風數據（中央氣壓、沿美國海岸線的平移速度、行進方向和距離等）互相驗證，選用的案例皆為薩菲爾-辛普森颶風風力等級 (Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale, SSHWS) 3 級以上之颶風。研究中以 Holland (1980) 的理想風場模式提出了三種計算最大風速半徑的經驗公式，分別適用於大西洋北緯 30 度以南、以北，其中在北緯 30 度以南，有最小標準差及最小方均根誤差之經驗式如下：

$$R_m = \exp(2.097 + 0.0187793(P_n - P_c) - 1.8672 \times 10^{-4}(P_n - P_c)^2 + 0.0381328\phi)$$

Vickery et al., 2000b

Vickery et al., (2000b) 利用行星邊界層 (Planetary Boundary Layer, PBL) 的動力學模式來計算颶風風場，這些風場由飛機檢測和美國 NOAA 颶風研究部 (Hurricane Research Division, HRD) 觀測數據校準。除此之外，他們也對颶風的特徵參數進行了統計分析，並使用有限差分巢狀網格求解穩態風場。研究中利用 Holland (1980) 的理想風場模式模擬了 1560 場颶風，B 值參數範圍從 0.5 到 2.5，氣壓降在 1 到 150 毫巴之間，最大風速半徑在 8 到 150 公里之間，平移速度在 0 到 40 m/s 之間。研究在最後透過傅立葉擬合以上模擬的颶風，並給出建

議的 R_m 公式如下：

$$R_m = \exp(3.015 - 6.291 \times 10^{-5}(P_n - P_c)^2 + 0.0337\phi)$$

Kato, 2005

Kato (2005) 利用日本測量到的颱風風場數據評估了最大風速半徑的平均值和標準偏差，並評估了相關的日本沿海風暴潮影響。研究中觀察到，當中心氣壓低於 950 百帕時，最大風速半徑與颱風中心氣壓的關係式可以表示為：

$$R_m = 0.769P_c - 650.55$$

而當中心氣壓高於 950 百帕時，最大風速半徑與颱風中心氣壓的關係式可以表示為：

$$R_m = 1.633P_c - 1471.35$$

兩項關係式可以簡化如下：

$$R_m = 80 - 0.769(950 - P_c)$$

Powell et al., 2005

Powell et al. (2005) 收集了 1900 年至 1983 年收集的風暴檔案數據、HDR 1984-1987 年美國西海岸和墨西哥的飛機觀測檔案、美國國家颶風中心 1988-1999 年的最佳路徑資料、NOAAHRD 1995-2002 年的地表風實時分析數據檔案等進行了多變量分析，發現觀察到的最大風速半徑的對數屬於常態分佈。研究中提出了將最大風速半徑與颱風中心氣壓與中心所在緯度相關聯的經驗公式如下：

$$R_m = \exp[2.0633 + 0.0182(P_n - P_c) - 1.9008 \times 10^{-4}(P_n - P_c)^2 + 7.336 \times 10^{-4}\phi]$$

Knaff et al., 2007

Knaff et al. (2007) 假設修正後的阮肯渦旋 (Rankine vortex) 方程中的自由參數是最佳路徑資料中可用參數的函數，即緯度、旋風平移速度、最大風速等，用於在不同緯度連續計算熱帶氣旋得最大風速半徑，並與美國國家颶風中心 (NHC) 和聯合颱風預警中心 (JTWC) 針對各熱帶氣旋事件所紀錄的最大風速半徑互相比對。研究建議的公式包含三個常數，它們隨颱風中心所在的緯度而變化，適用

於此處研究區域的公式為：

$$R_m = [38 - 0.1167v_m - 0.004(\phi - 25)]$$

其中的近中心最大風速 v_m 單位為節，最大風速半徑單位為海里。若將經驗式中最大風速半徑的單位轉換為公里，最大風速單位轉換為公尺/秒，則經驗式可被改寫如下：

$$R_m = [38 - 0.1167 \times 0.5144v_m - 0.004(\phi - 25)] \times 1.8520$$

Jiang, 2008

Atkinson and Holiday (1977) 分析在北太平洋西部沿海和島嶼站測量的 28 年最大風速記錄，並提出了中心壓力和最大風速之間的指數關係。Jiang et al (2008) 參考了其公式結構，並調查了中國國家颱風年鑑中 1949 年至 2002 年的熱帶氣旋事件，提出了與修正參數類似的冪指數形式的經驗式如下：

$$R_m = 1.119 \times 10^3 (P_n - P_c)^{-0.805}$$

Lin and Fang, 2013

Lin and Fang (2013) 利用中國海南省地面氣象站監測的 26 次歷史颱風事件的觀測記錄，確定了計算 Holland (1980) 的理想風場模式的最佳經驗式，然後分析了其在西北太平洋的空間分佈特徵。於最大風速半徑方面，他們整理了聯合颱風警報中心 (JTWC) 2001 年至 2009 年的熱帶氣旋最佳路徑資料，利用迴歸分析發現最大風速半徑和颱風中心氣壓的之間的關係式可表示如下：

$$R_m = -18.04 \ln(P_n - P_c) + 110.22$$

Fang et al., 2017

Fang et al. (2017) 以聯合颱風警報中心 (Joint Typhoon Warning Center, JTWC) 發布的 2001 年至 2015 年西北太平洋熱帶氣旋的最佳路徑資料庫，排除熱帶低氣壓和已登陸之氣旋資料後，參考 Lin and Fang (2013) 的研究，進一步探討最大風速半徑、颱風中心氣壓及其所在緯度之間的關係。研究中將數值模式之結果與東海 5 次颱風事件的風、浪和衛星高度計觀測結果進行比較，統計得出 95% 信賴區間的最大風速經驗式為

$$R_m = -37.82 + 0.11\phi \ln[(2.86 - 0.0029\phi)(P_n - P_c)^{0.7}] + 178.2$$

Fang et al., 2020

Fang et al., (2020) 研究了西北太平洋地區歷史颱風的最大風速半徑和 Holland-B 參數等關鍵參數的特徵，並總結了關於阻力係數的最新發現。還利用再分析數據研究了颱風渦旋的移動速度與大尺度環境轉向流速度之間的關係。在決定最大風速半徑時，研究參考了 Vickery and Wadhera (2008) 針對大西洋及墨西哥灣地區所提出的經驗公式，利用 JTWC 提供的 2001 年至 2016 年最佳路徑資料中的颱風中心氣壓及颱風中心所在緯度提出以下統計模型：

$$R_m = \exp[4.0441 - 1.2090 \times 10^{-2}(P_n - P_c) + 7.2694 \times 10^{-3}\phi]$$

本研究利用各項前人提出的統計模型帶入 JMA 最佳路徑紀錄之參數進行運算，得到對應的最大風速半徑後，將分別與 JMA 最佳路徑記錄及從 ECMWF 中取得的最大風速半徑進行比較，計算各項統計模式與兩種資料來源的方均根誤差與決定係數。

其中，方均根誤差是一種常用的測量數值之間差異的量度，用來衡量觀測值同真值之間的偏差。方均根誤差對測量樣本中的特大或特小誤差反映非常敏感，所以其能夠很好地反映出測量的精密度，公式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}$$

其中 x_i 為預測值， y_i 為基準值（真值或觀測資料）， n 為樣本數。

決定係數在統計學中用於度量應變數的變異中可由自變數解釋部分所占的比例，以此來判斷迴歸模型的解釋力。對於簡單線性迴歸而言，決定係數為樣本相關係數的平方，在學術研究上最通俗的觀念是 R^2 愈接近 1.0 愈好。

$$R^2 = \frac{SS_{\text{Reg}}}{SS_{\text{Total}}} = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

其中， SS_{Reg} 被稱為迴歸模式的變異量， SS_{Total} 被稱為 y_i 值之變異量。 $\hat{y}_i$ 為迴

歸模式在 y_i 點的預測值， $\bar{y}$ 為所有 y_i 值的平均值。

表 6—7 展示各參數模式與 JMA 或 ECMWF 所得之最大風速半徑的統計參數比對結果，包含方均根誤差及決定係數。現有收集的所有參數公式中，以 Jiang (2008)的統計模型與 JMA 紀錄的最大風速半徑有最小的方均根誤差（46.404 公里）及最大的決定係數（0.212），其次為 Lin and Fang (2013)，方均根誤差為 46.504 公里，決定係數為 0.208。若將統計模型所得之最大風速半徑與 ECMWF 相比對，則 Fang et al. (2020) 及 Lin and Fang (2013)皆可得到與其他統計模式相比最高的決定係數（0.048），最低方均根誤差分別為 41.514 公里及 41.518 公里。

本研究中可以從表中看到，即使大部分前人研究選用以發展經驗式的資料來源及選用時段不盡相同，但除了 Kato (2005)使用日本氣象廳的觀測資料作為推估參數的基準外，大部分研究選用的資料仍以 JTWC 最佳路徑資料或北美觀測資料為主，因此若直接套用 JMA 最佳路徑參數至各項統計模型後與 ECMWF 及 JMA 的最大風速半徑互相比對，導致模式所得之決定係數偏低的結果，是可被預期有改善空間的。舉例而言，若選用 JMA 最佳路徑中紀錄的颱風中心所在緯度、中心氣壓與環境氣壓差、近中心最大風速等參數對 JMA 之最大風速半徑線性回歸，則可以得到以下初步結果：

$$R_m = 23.543 + 2.0057\phi + 1.2928(P_n - P_c) - 0.67795V_m$$

其中 ϕ 為颱風中心所在緯度、 P_n 為環境氣壓、 P_c 中心氣壓、 V_m 為最大風速。線性回歸模型與 JMA 所得最大風速半徑相比之方均根誤差為 45.1 公里，決定係數為 0.256，明顯優於前面各項統計模型所得之結果。而若將上述參數對 ECMWF 中取得之最大風速半徑做線性回歸，亦可得到以下結果：

$$R_m = 179.74 - 0.16337\phi + 0.47005(P_n - P_c) - 2.4978V_m$$

其中該模型與 ECMWF 最大風速半徑之方均根誤差為 41.3 公里，決定係數為 0.06，同樣優於前面各項統計模型所得之結果。此外，本研究提出的比對結果僅適用於 2016 年至 2020 年西北太平洋的颱風事件，而參數調整後對於颱風暴潮的預報能力仍有待後續研究評估。

表 6—7 各統計模型與 JMA、ECMWF 紀錄之最大風速半徑比對結果

前人研究	JMA		ECMWF	
	方均根誤差 (RMSE)	決定係數 (R^2)	方均根誤差 (RMSE)	決定係數 (R^2)
Vickery et al., 2000a	52.262	0.000	42.337	0.010
Vickery et al., 2000b	52.251	0.000	42.217	0.016
Kato, 2005	47.168	0.185	41.549	0.047
Powell et al., 2005	50.559	0.064	42.062	0.023
Knaff et al., 2007	50.796	0.055	42.544	0.000
Jiang, 2008	46.404	0.212	41.593	0.045
Lin and Fang, 2013	46.504	0.208	41.518	0.048
Fang et al., 2017	49.244	0.112	42.540	0.001
Fang et al., 2020	48.064	0.154	41.514	0.048

第七章、理想風場模式於氣象局超級電腦上線運作

中央氣象局現有之 COMCOT 暴潮預報系統，擁有兩種版本之系統軟體程式，其中一種為現行作業版本，以 Matlab 程式語言銜接 COMCOT 暴潮模式以及預報作業系統，並於指定機器運作；另一種為 109 年度委託研究計畫「氣象局暴潮預報溢淹模式精進」計畫中，以 Python 程式語言重新撰寫之暴潮預報系統。本年度計畫重點工作項目之一為導入理想風場模式之預報系統，並使其於中央氣象局之 PC-Cluster（以下簡稱 PCC）中完成作業化。

建置於 PCC 之 COMCOT 暴潮預報系統，作業流程如圖 7—1。預報員只需於第一報預報時啟動指定 bash 腳本，並輸入預報起始時間與颱風事件，即可執行暴潮預報系統。接續之暴潮預報將透過 crontab 工作排程，於每日 0、3、6、9、12、15、18、及 21 時，自動確認系統內資料是否符合啟動下一次預報的條件，若符合將執行定時暴潮預報 bash 腳本；若不符條件則會結束本次颱風事件之暴潮預報，本節作業化測試後續展示相關指令及產品截圖皆以 2021 年之颱風彩雲（CHOI-WAN）為例。

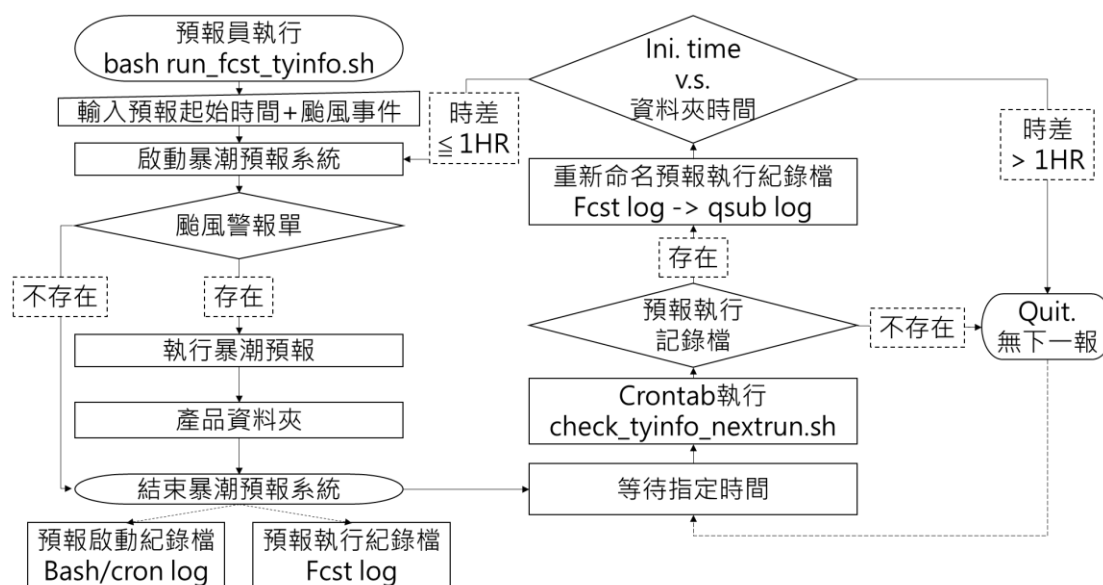


圖 7—1 PCC-COMCOT 暴潮預報系統作業流程圖

7.1. 預報員手動執行預報

預報員手動執行 COMCOT 暴潮預報系統之 bash 腳本為 run_fcst_tyinfo.sh，其內容依序為環境變數、輸入颱風警報單資訊、以及執行暴潮預報，執行方式如圖 7—2。環境變數內容如圖 7—3，包含預報系統之指定路徑、存放紀錄檔之資料、及啟動時間。輸入颱風警報單資訊部分，分為輸入指定預報起始時間、及選擇預報之颱風事件。圖 7—4 和圖 7—5 以 2021 年 06 月 03 日 20 時發布之颱風警報單為例，按照指定格式 YYYYMMDDHH 輸入預報起始時間 2021060320 後，選擇選項 0 之颱風彩雲（CHOI-WAN）。

當輸入完警報單資訊，其資訊即顯示於執行視窗，並顯示系統指令與 JOB_ID（如圖 7—6），表示已開始執行暴潮預報。如要查看執行情形，可透過 qstat 指令查看（圖 7—7）。當暴潮預報系統完成預報及產品輸出後，系統將會輸出預報執行紀錄檔 fcst_comcot_tyinfo.log。

```
$ bash run_fcst_tyinfo.sh
removing old file typhname.dat

=====

WELCOME COMCOT STORMSURGE FORECAST SYSTEM

START RUNNING ... ..

=====

Please input forecast initial time and typhoon name ...
```

圖 7—2 執行 run_fcst_tyinfo.sh 時指令視窗畫面截圖

```
# for comcot path
compath="${HOME}/COMCOT_StormSurge"

# for logfile path
logpath="$compath/startup_log"

# datetime for logfile filename
dlog=$(date +%Y.%m%d.%H%Mm)
```

圖 7—3 run_fcst_tyinfo.sh 檔案內環境變數內容截圖

```

+-----+
|                                     |
|               # 1. Input Initial Forecasting Time               |
|                                     |
+-----+-----+
| YEAR      | 2018, 2019, 2020, 2021 |
+-----+-----+
| MONTH     | 01,02,03,04,05,06,07,08,09,10,11,12 |
+-----+-----+
| DAY       | 01-31                    |
+-----+-----+
| HOUR      | 02, 05, 08, 11, 14, 17, 20, 23 |
+-----+-----+
|                                     |
|               Input Format-YYYYMMDDHH                          |
|               (e.g. 2018021602)                                |
|                                     |
+-----+-----+
|                                     |
| INPUT (YYYYMMDDHH):                                           |
| 2021060320 [ ]                                              |
|                                     |
+-----+

```

圖 7—4 run_fcst_tyinfo.sh 輸入起始時間畫面截圖

```

Option 0 : Typhoon CHOI-WAN
Which one should be run for the prediction: 0

```

圖 7—5 run_fcst_tyinfo.sh 選擇颱風事件畫面截圖

```

=====
RUNNING COMCOT STORMSURGE FORECASTING

COMCOT PATH : /home/mmcsurge/COMCOT_StormSurge

ssfs_initime.dat : 2021 06 03 20

typhname.dat : CHOI-WAN
=====

*** PBS Commands ***

"qstat -ns <JOB_ID>" to check the job status

"qdel <JOB_ID>" to kill the job

2606965.tmacx-login01

```

圖 7—6 run_fcst_tyinfo.sh 腳本輸入必要訊息後之顯示畫面截圖

```

$ qstat -ns 2606965

tmacx-login01:

Job ID          Username Queue   Jobname   SessID  NDS  TSK  Req'd  Req'd  Elap
-----
2606965.tmacx-l mmcsurge research fcst_comco 218355   1   32   --   48:00 R 00:00
      tmacx-cx41/0*32
      Job run at Thu Jun 03 at 22:14 on (tmacx-cx41:ncpus=32)

```

圖 7—7 Qstat 指令查看執行情況畫面截圖

7.2. 排程執行預報

crontab 排程於每日 0、3、6、9、12、15、18、及 21 時，執行 bash 腳本 check_tyinfo_nextrun.sh，該程式藉由預報執行紀錄檔 (fcst_comcot_tyinfo.log) 存在與否判斷上一時段是否有執行暴潮預報。若前一時段有執行暴潮預報，則於該時段啟動暴潮預報系統，並將預報執行紀錄檔重新命名為指定格式名稱 (*qsub_fcst.comcot_tyinfo) 進行記錄歸檔，如 2021 年 6 月 3 日 22 時 14 分執行暴潮預報，則紀錄檔名稱為 2021.0603.22h14m.qsub_fcst.comcot_tyinfo；若前一時段未執行預報（即預報執行紀錄檔不存在），則繼續等待下一指定時間。

此外，為紀錄 crontab 排程執行情形，在排程中每次執行腳本時皆會輸出指定格式名稱 (* cron_fcst.comcot_tyinfo) 之紀錄檔，以供預報員檢視工作排程紀錄。如 2021 年 6 月 4 日 3 時 20 分啟動，其紀錄檔名稱為 2021.0604.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo；若前一時刻作業系統判定預報執行紀錄檔並不存在，將刪除前一時刻的 crontab 排程紀錄，以節省資料存儲空間。

圖 7—8 為環境變數設置，依序為預報執行紀錄檔、COMCOT 暴潮預報系統之導入理想風場之指定路徑、預報執行紀錄檔之資料夾、及預報執行腳本。

```
# file name
qsub_log    = 'fcst_comcot_tyinfo.log'
dir_comcot  = 'COMCOT_StormSurge'
dir_log     = 'qsub_log'
fn_pbs      = 'fcst_comcotss_tyinfo.ksh'
```

圖 7—8 check_tyinfo_nextrun.sh 檔案內環境變數內容截圖

7.3. 預報紀錄檔

PCC 上啟動和執行暴潮預報，皆有對應紀錄檔可查看，可確認預報資訊、預報系統是否成功啟動、或是預報執行時的錯誤訊息等。啟動暴潮預報系統之紀錄檔位於 startup_log 資料夾（圖 7—9），其中包含以 bash 手動執行之紀錄檔，以及工作排程 crontab 自動啟動之紀錄檔。

由圖 7—9 可知，颱風彩雲之暴潮預報期間，啟動預報系統之紀錄檔為 2021 年 6 月 3 日 22 時至 6 月 5 日 0 時，6 月 4 日 0 時至 6 月 5 日 9 時為自動執行 check_tyinfo_nextrun.sh 腳本，而透過紀錄檔大小可得知，6 月 5 日 0 時至 9 時並未啟動暴潮預報系統。

此外，為避免無颱風事件期間，crontab 工作排程自動執行 bash 腳本之紀錄檔過多，於排程自動執行時，若上一時段無執行暴潮預報，將刪除上一啟動之紀錄檔，當 6 月 8 日至 9 日預報測試結束後，下一紀錄檔為 6 月 18 日 12 時啟動紀錄檔。

```
$ ls -l startup_log/2021.06*
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 235 Jun 3 22:14 startup_log/2021.0603.22h14m.bash_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 568 Jun 4 00:20 startup_log/2021.0604.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 568 Jun 4 03:20 startup_log/2021.0604.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 568 Jun 4 06:20 startup_log/2021.0604.06h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 568 Jun 4 09:20 startup_log/2021.0604.09h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 568 Jun 4 12:20 startup_log/2021.0604.12h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 568 Jun 4 15:20 startup_log/2021.0604.15h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 568 Jun 4 18:20 startup_log/2021.0604.18h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 568 Jun 4 21:20 startup_log/2021.0604.21h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 478 Jun 5 00:20 startup_log/2021.0605.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 390 Jun 5 03:20 startup_log/2021.0605.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 390 Jun 5 06:20 startup_log/2021.0605.06h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 390 Jun 5 09:20 startup_log/2021.0605.09h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 232 Jun 8 15:38 startup_log/2021.0608.15h38m.bash_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 568 Jun 8 18:20 startup_log/2021.0608.18h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 568 Jun 8 21:20 startup_log/2021.0608.21h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 568 Jun 9 00:20 startup_log/2021.0609.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 568 Jun 9 03:20 startup_log/2021.0609.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 478 Jun 9 06:20 startup_log/2021.0609.06h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 389 Jun 18 12:20 startup_log/2021.0618.12h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
```

圖 7—9 startup_log 資料夾內容截圖（2021 年 6 月紀錄）

圖 7—10 至圖 7—13 為檢視啟動預報系統之紀錄檔內容，依序展示手動執行第一次預報（圖 7—10）、排程執行預報（圖 7—11）、該次颱風事件最後一次成功排程執行預報（圖 7—12）及非颱風警報期間排程預報（圖 7—13）時紀錄檔內容截圖。可由這些紀錄檔得知，暴潮預報起始時間、颱風事件、預報執行之 JOB ID、預報結束、或未執行暴潮預報。

```
$ more startup_log/2021.0603.22h14m.bash_fcst.comcot_tyinfo
=====
RUNNING COMCOT STORMSURGE FORECASTING

COMCOT PATH : /home/mmcsurge/COMCOT_StormSurge

ssfs_initime.dat : 2021 06 03 20

typhname.dat : CHOI-WAN
=====
```

圖 7—10 手動執行預報紀錄內容截圖
(2021.0603.22h14m.bash_fcst.comcot_tyinfo)

```
$ more startup_log/2021.0604.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
2607210.tmacx-login01

-----
Check whether fcst_comcot_tyinfo.log exists.
If it exists, rename specified file name and move it.
If it does not exist, wait next forecast.
-----

Last qsub LOG (fcst_comcot_tyinfo.log) exists.

Last forecast initial time is 2021 06 03 20 (Year/Month/Day/Hour).

fcst_comcot_tyinfo.log renamed 2021.0603.22h14m.qsub_fcst.comcot_tyinfo

Run next forecast ...
/opt/pbs/bin/qsub /home/mmcsurge/pbs_ksh/fcst_comcotss_tyinfo.ksh
```

圖 7—11 排程執行預報紀錄內容截圖
(2021.0604.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo)

```

$ more startup_log/2021.0605.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-----
Check whether fcst_comcot_tyinfo.log exists.
If it exists, rename specified file name and move it.
If it does not exist, wait next forecast.
-----

Last qsub LOG (fcst_comcot_tyinfo.log) exists.
Last forecast initial time is 2021 06 04 20 (Year/Month/Day/Hour).
fcst_comcot_tyinfo.log renamed 2021.0604.21h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
End surge forecast.

```

圖 7—12 排程執行預報紀錄內容截圖
(2021.0605.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo)

```

$ more startup_log/2021.0605.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-----
Check whether fcst_comcot_tyinfo.log exists.
If it exists, rename specified file name and move it.
If it does not exist, wait next forecast.
-----

Last qsub LOG (fcst_comcot_tyinfo.log) does not existst.
NOT YET TO EXECUATE STORM SURGE FORECAST SYSTEM!
(InputForce: TyInfo)

```

圖 7—13 排程執行預報紀錄內容截圖
(2021.0605.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo)

暴潮預報詳細執行內容之紀錄檔位於 qsub_log 資料夾 (圖 7—14)，可由紀錄檔內容了解暴潮預報執行細節，如圖 7—15 可得知 2021 年 6 月 3 日 20 時之暴潮預報，已成功執行完畢，並成功輸出指定預報產品，包含近岸每 12 小時最大水位分布圖和數值資料、指定預報產品之壓縮檔、及 NetCDF 格式檔案，而由可圖 7—16 知，2021 年 6 月 4 日 21 時已完成颱風彩雲之暴潮預報。此外，若暴潮預報於執行期間發生錯誤，可藉由此紀錄檔確認錯誤訊息，使維護人員可修正錯誤。

```

$ ls -l qsub_log/2021.06*
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15019329 Jun 3 23:27 qsub_log/2021.0603.22h14m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15016765 Jun 4 01:33 qsub_log/2021.0604.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15016765 Jun 4 04:31 qsub_log/2021.0604.03h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15016765 Jun 4 07:32 qsub_log/2021.0604.06h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15016765 Jun 4 10:32 qsub_log/2021.0604.09h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15016765 Jun 4 13:32 qsub_log/2021.0604.12h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15016765 Jun 4 16:32 qsub_log/2021.0604.15h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15016765 Jun 4 19:31 qsub_log/2021.0604.18h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 5677 Jun 4 21:20 qsub_log/2021.0604.21h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15016765 Jun 8 16:50 qsub_log/2021.0608.15h38m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15016765 Jun 8 19:33 qsub_log/2021.0608.18h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15016765 Jun 8 22:33 qsub_log/2021.0608.21h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15016765 Jun 9 01:33 qsub_log/2021.0609.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 5677 Jun 9 03:20 qsub_log/2021.0609.03h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo

```

圖 7—14 qsub_log 資料夾內容截圖（2021 年 6 月紀錄）

```

$ tail -20 qsub_log/2021.0603.22h14m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
residual(60-72hr).png
maxpt_02_2021060312_60_72hr.dat
maxst_02_2021060312_60_72hr.dat
res_02_2021060312_60_72hr.dat
maxpt_03_2021060312_60_72hr.dat
maxst_03_2021060312_60_72hr.dat
res_03_2021060312_60_72hr.dat
maxpt_04_2021060312_60_72hr.dat
maxst_04_2021060312_60_72hr.dat
res_04_2021060312_60_72hr.dat
maxpt_05_2021060312_60_72hr.dat
maxst_05_2021060312_60_72hr.dat
res_05_2021060312_60_72hr.dat
maxpt_06_2021060312_60_72hr.dat
maxst_06_2021060312_60_72hr.dat
res_06_2021060312_60_72hr.dat
move files to directory(2021060320) ...

zip storm tide and pure tide hourly data
convert ASCII format into NetCDF format

```

圖 7—15 暴潮預報詳細執行內容之紀錄檔內容截圖
（2021.0603.22h14m.qsub_fcst.comcot_tyinfo）

```

$ tail -20 qsub_log/2021.0604.21h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
rm: cannot remove 'ss_06 *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'pt_06 *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'st_06 *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'residual_06 *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'layer06_p *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'layer06_wx *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'layer06_wy *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'maxss *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'maxpt *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'maxst *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'res *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'ts_record *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'p_record *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'w_record *.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'ts_record *.dat x': No such file or directory
rm: cannot remove 'r.L': No such file or directory
rm: cannot remove 'ss.L': No such file or directory
rm: cannot remove 'ss.L_new': No such file or directory

The warn file could not be found. Please check data in the correct directory.

```

圖 7—16 暴潮預報詳細執行內容之紀錄檔內容截圖
（2021.0604.21h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo）

若於暴潮預報執行期間，確認預報系統執行至哪一步驟，可查看副程式執行之紀錄檔 LOGFILE，如圖 7—17 至圖 7—19。在圖 7—17 中，可知目前已至執行 COMCOT 暴潮模式階段。圖 7—18 為完成 2021 年 6 月 3 日 20 時之颱風警報單之暴潮預報。而由圖 7—19 可知，目前為 2021 年 6 月 3 日 23 時之颱風警報單之暴潮預報，並為 COCMOT 暴潮模式執行階段。

```
$ tail -f COMCOT_StormSurge/LOGFILE
Dir      : /cx/home/mmcsurge/COMCOT_StormSurge
#-----#
2021-06-03 22:14 Loading CWB Warn file
2021-06-03 22:14 Python: find_latest_warnfile
2021-06-03 22:14 Python: find_typhoon
2021-06-03 22:14 loading TyInfo_202106032015.csv .....
2021-06-03 22:14 Python: choose_typhoon
2021-06-03 22:14 Python: tide_warmup
2021-06-03 22:14 Python: cal_warmtide_time
2021-06-03 22:14 Python: tpxo9_run_shuchun2
2021-06-03 22:15 Python: generate_ctl
2021-06-03 22:15 ./comcot
```

圖 7—17 暴潮預報系統執行期間副程式紀錄檔 LOGFILE 內容截圖
(剛啟動預報系統，2021 年 6 月 3 日 20 時彩雲颱風)

```
2021-06-03 23:24 095400 ...
2021-06-03 23:24 096300 ...
2021-06-03 23:24 097200 ...
2021-06-03 23:24 098100 ...
2021-06-03 23:24 099000 ...
2021-06-03 23:24 099900 ...
2021-06-03 23:24 100800 ...
2021-06-03 23:25 101700 ...
2021-06-03 23:25 102600 ...
2021-06-03 23:25 103500 ...
2021-06-03 23:25 104400 ...
2021-06-03 23:25 105300 ...
2021-06-03 23:25 106200 ...
2021-06-03 23:25 107100 ...
2021-06-03 23:25 108000 ...
2021-06-03 23:25 Python: create_animation
2021-06-03 23:25 Python: create_animation
2021-06-03 23:25 Python: create_animation
2021-06-03 23:25 Python: create_animation
2021-06-03 23:25 Python: movedata
2021-06-03 23:25 Bash: zip_data
2021-06-03 23:26 Bash: netcdf_bash
```

圖 7—18 暴潮預報系統執行期間副程式紀錄檔 LOGFILE 內容截圖
(預報系統執行中，已完成預報，正在輸出預報產品)

```

2021-06-03 23:25 Python: create_animation
2021-06-03 23:25 Python: movedata
2021-06-03 23:25 Bash: zip_data
2021-06-03 23:26 Bash: netcdf_bash
#-----#
Storm Surge Forecast Information
Input      : Parmetric Typhoon Model
UTC Time   : 2021-06-03 15:00
Local Time : 2021-06-03 23:00
CPU Threads: 24
Login Time : 2021-06-04 00:20
Dir        : /cx/home/mmcsurge/COMCOT_StormSurge
#-----#
2021-06-04 00:20 Loading CWB Warn file
2021-06-04 00:20 Python: find_latest_warnfile
2021-06-04 00:20 Python: find_typhoon
2021-06-04 00:20 loading TyInfo_202106032325.csv .....
2021-06-04 00:20 Python: choose_typhoon
2021-06-04 00:20 Python: tide_warmup
2021-06-04 00:20 Python: cal_warmtide_time
2021-06-04 00:20 Python: tpxo9_run_shuchun2
2021-06-04 00:20 Python: generate_ctl
2021-06-04 00:20 ./comcot

```

圖 7—19 暴潮預報系統執行期間副程式紀錄檔 LOGFILE 內容截圖
(預報系統執行中，2021 年 6 月 3 日 23 時彩雲颱風)

7.4. 2021 年颱風季預報系統於 PCC 作業化紀錄

2021 年七月起至十月曾發布海上/陸上颱風警報之颱風事件如表 7—1，依據颱風編號依序為烟花（IN-FA）、盧碧（LUPIT）、璨樹（CHANTHU）、圓規（KOMPASU）。颱風警報發布後，將由預報員手動執行第一報，後續由系統依據是否有新警報單及前一報產品產製時間判斷是否執行排程預報。

表 7—1 2021 年 7 月至 10 月有發警報颱風列表

名稱	烟花 (IN-FA)	盧碧 (LUPIT)	璨樹 (CHANTHU)	圓規 (KOMPASU)
編號	202106	202109	202114	202118
生成 地點	132.9, 22.3	115.5, 21.2	136.6, 15.6	131.8, 12.7
侵(近) 臺日期	07 月 24 日	08 月 05 日	09 月 12 日	10 月 11 日
發布 時間	海上 07-21 20:30	海上 08-04 14:30	海上 09-10 05:30 陸上 09-10 17:30	海上 10-10 20:30
解除 時間	海上 07-24 11:30	海上 08-05 17:30	陸上 09-12 20:30 海上 09-13 02:30	海上 10-12 08:30
發布 報數	22	10	24	22

烟花

於烟花颱風發布海上颱風警報前，開發團隊曾於 07 月 20 日晚間執行預報系統測試。海上警報於 07 月 21 日 20 時 30 分發布後，開發團隊於當天 21 時 32 分手動啟動預報。中途遭遇指定預報時間之颱風警報單未能及時傳入 PCC 的情況，導致排程預報系統無法讀取警報單而中斷排程，開發團隊後續於 22 日 09 時發現排程中斷，並於 09 時 24 分透過手動重啟預報。啟動預報紀錄如圖 7—20 所示，檔案名稱依序標註啟動預報之時間（年.月日.時分）及啟動預報之方式為手動（bash）或排程（cron）。

圖 7—21 為預報系統執行紀錄之截圖，大部分之紀錄檔案大小約為 15MB，若有系統計算途中意外中斷、預報結束或資料上傳失敗等，則將可概略從紀錄檔案大小看出端倪，亦可從紀錄檔案的修改時間推估預報系統自啟動至結束預報所需之時間。舉例來說，07 月 20 日晚間執行預報系統測試之紀錄檔案大小正常，下一次測試預報因沒有後續颱風警報單輸入故結束預報，因此紀錄檔案大小約為 1MB。實際預報情況中，開發團隊於當天 21 時 32 分手動啟動預報後，原定 22 日 00 時 20 分時系統應讀取 23 時發布之颱風警報單（圖 7—22），但因其未能及時傳入 PCC，導致預報系統執行後無法取得指定颱風警報單，進而結束預報（圖 7—23）。於本次颱風事件中，後續排程作業皆正常執行直到颱風警報結束發布。

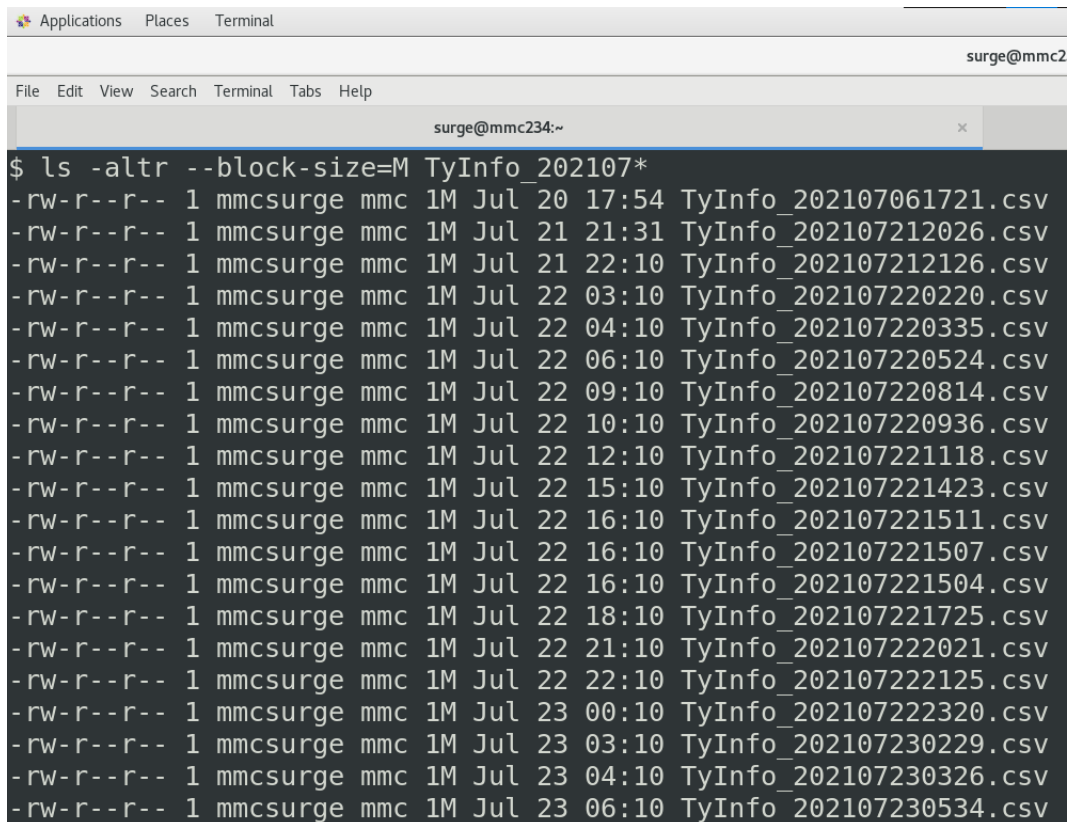
由圖 7—21 和圖 7—24，比對 Python 版本與 MATLAB 版本預報系統產品輸出，兩種版本第一報皆為手動啟動並順利執行輸出產品，但與 MATLAB 版本相比，Python 版本無第二至四報之預報產品，於第五報時再次重啟預報並順利執行及輸出產品至颱風警報結束。


```
Applications Places Terminal
surge@mmc234:~
File Edit View Search Terminal Tabs Help
surge@mmc234:~
$ ls -altr --block-size=M 2021.07*
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 20 23:27 2021.0720.23h27m.bash_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 21 03:20 2021.0721.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 21 06:20 2021.0721.06h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 21 21:32 2021.0721.21h32m.bash_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 00:20 2021.0722.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 03:20 2021.0722.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 09:24 2021.0722.09h24m.bash_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 12:20 2021.0722.12h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 15:20 2021.0722.15h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 18:20 2021.0722.18h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 21:20 2021.0722.21h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 23 00:20 2021.0723.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 23 03:20 2021.0723.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 23 06:20 2021.0723.06h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 23 09:20 2021.0723.09h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 23 12:20 2021.0723.12h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 23 15:20 2021.0723.15h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 23 18:20 2021.0723.18h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 23 21:20 2021.0723.21h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 24 00:20 2021.0724.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 24 03:20 2021.0724.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 24 06:20 2021.0724.06h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 24 09:20 2021.0724.09h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 24 12:20 2021.0724.12h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 24 15:20 2021.0724.15h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
```

圖 7—20 啟動預報紀錄截圖

```
Applications Places Terminal
surge@mmc234:~
File Edit View Search Terminal Tabs Help
surge@mmc234:~
$ ls -altr --block-size=M 2021.07*
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 21 00:40 2021.0720.23h27m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 21 03:20 2021.0721.03h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 21 22:47 2021.0721.21h32m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 00:20 2021.0722.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 22 10:37 2021.0722.09h24m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 22 13:34 2021.0722.12h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 22 16:32 2021.0722.15h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 22 19:33 2021.0722.18h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 22 22:32 2021.0722.21h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 23 01:33 2021.0723.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 23 04:32 2021.0723.03h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 23 07:33 2021.0723.06h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 23 10:33 2021.0723.09h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 23 13:32 2021.0723.12h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 23 16:32 2021.0723.15h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 23 19:31 2021.0723.18h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 23 22:33 2021.0723.21h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 24 01:35 2021.0724.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 24 04:32 2021.0724.03h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 24 07:33 2021.0724.06h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 24 10:33 2021.0724.09h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Jul 24 13:32 2021.0724.12h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
$
```

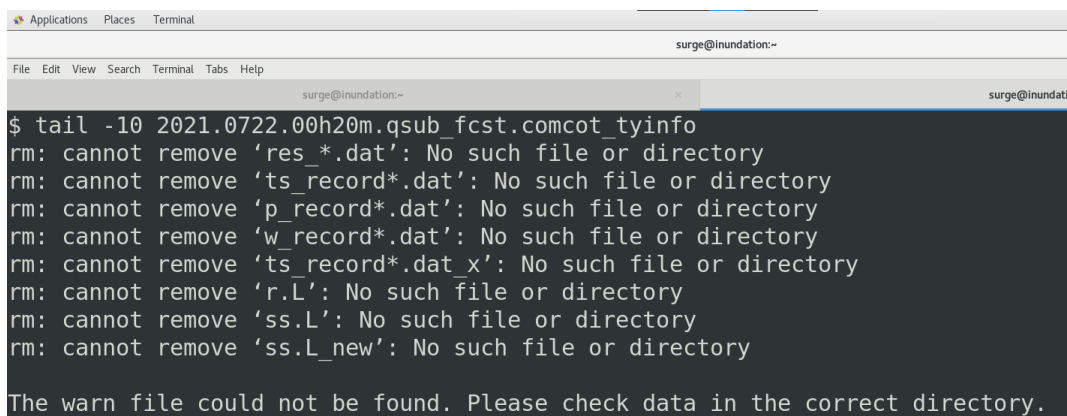
圖 7—21 預報執行紀錄截圖（qsub）



The screenshot shows a terminal window with a menu bar (Applications, Places, Terminal) and a title bar (surge@mmc2). The terminal prompt is surge@mmc234:~. The command executed is `$ ls -altr --block-size=M TyInfo_202107*`. The output lists 20 CSV files in the TyInfo_202107 directory, sorted by modification time (oldest first). Each line shows permissions, file size (1M), owner (mmcsurge), group (mmc), and the file name.

```
$ ls -altr --block-size=M TyInfo_202107*
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 20 17:54 TyInfo_202107061721.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 21 21:31 TyInfo_202107212026.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 21 22:10 TyInfo_202107212126.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 03:10 TyInfo_202107220220.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 04:10 TyInfo_202107220335.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 06:10 TyInfo_202107220524.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 09:10 TyInfo_202107220814.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 10:10 TyInfo_202107220936.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 12:10 TyInfo_202107221118.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 15:10 TyInfo_202107221423.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 16:10 TyInfo_202107221511.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 16:10 TyInfo_202107221507.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 16:10 TyInfo_202107221504.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 18:10 TyInfo_202107221725.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 21:10 TyInfo_202107222021.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 22 22:10 TyInfo_202107222125.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 23 00:10 TyInfo_202107222320.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 23 03:10 TyInfo_202107230229.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 23 04:10 TyInfo_202107230326.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Jul 23 06:10 TyInfo_202107230534.csv
```

圖 7—22 颱風警報單上傳至 PCC 紀錄截圖

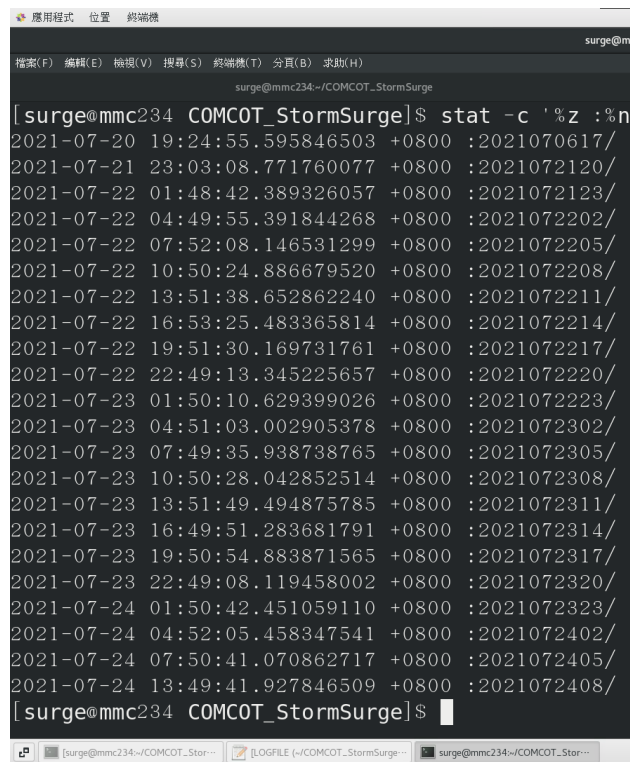


The screenshot shows a terminal window with a menu bar (Applications, Places, Terminal) and a title bar (surge@inundation:~). The terminal prompt is surge@inundation:~. The command executed is `$ tail -10 2021.0722.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo`. The output shows a series of error messages from the `rm` command, indicating that it cannot remove files that do not exist. The final message states that the warn file could not be found.

```
$ tail -10 2021.0722.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
rm: cannot remove 'res_*.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'ts_record*.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'p_record*.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'w_record*.dat': No such file or directory
rm: cannot remove 'ts_record*.dat x': No such file or directory
rm: cannot remove 'r.L': No such file or directory
rm: cannot remove 'ss.L': No such file or directory
rm: cannot remove 'ss.L_new': No such file or directory

The warn file could not be found. Please check data in the correct directory.
```

圖 7—23 預報執行紀錄內容截圖（2021.0722.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo）



```
surge@mmc234 ~/COMCOT_StormSurge
[surge@mmc234 COMCOT_StormSurge]$ stat -c '%z :%n'
2021-07-20 19:24:55.595846503 +0800 :2021070617/
2021-07-21 23:03:08.771760077 +0800 :2021072120/
2021-07-22 01:48:42.389326057 +0800 :2021072123/
2021-07-22 04:49:55.391844268 +0800 :2021072202/
2021-07-22 07:52:08.146531299 +0800 :2021072205/
2021-07-22 10:50:24.886679520 +0800 :2021072208/
2021-07-22 13:51:38.652862240 +0800 :2021072211/
2021-07-22 16:53:25.483365814 +0800 :2021072214/
2021-07-22 19:51:30.169731761 +0800 :2021072217/
2021-07-22 22:49:13.345225657 +0800 :2021072220/
2021-07-23 01:50:10.629399026 +0800 :2021072223/
2021-07-23 04:51:03.002905378 +0800 :2021072302/
2021-07-23 07:49:35.938738765 +0800 :2021072305/
2021-07-23 10:50:28.042852514 +0800 :2021072308/
2021-07-23 13:51:49.494875785 +0800 :2021072311/
2021-07-23 16:49:51.283681791 +0800 :2021072314/
2021-07-23 19:50:54.883871565 +0800 :2021072317/
2021-07-23 22:49:08.119458002 +0800 :2021072320/
2021-07-24 01:50:42.451059110 +0800 :2021072323/
2021-07-24 04:52:05.458347541 +0800 :2021072402/
2021-07-24 07:50:41.070862717 +0800 :2021072405/
2021-07-24 13:49:41.927846509 +0800 :2021072408/
[surge@mmc234 COMCOT_StormSurge]$
```

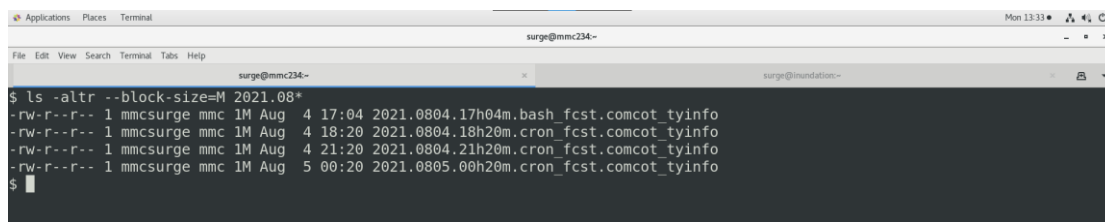
圖 7—24 作業中 MATLAB 版本預報系統產品紀錄截圖

盧碧

盧碧颱風海上警報於 08 月 04 日 14 時 30 分發布後，開發團隊於當天 17 時 04 分手動啟動預報。啟動預報紀錄如圖 7—25 所示，檔案名稱依序標註啟動預報之時間（年.月日.時分）及啟動預報之方式為手動（bash）或排程（cron）。

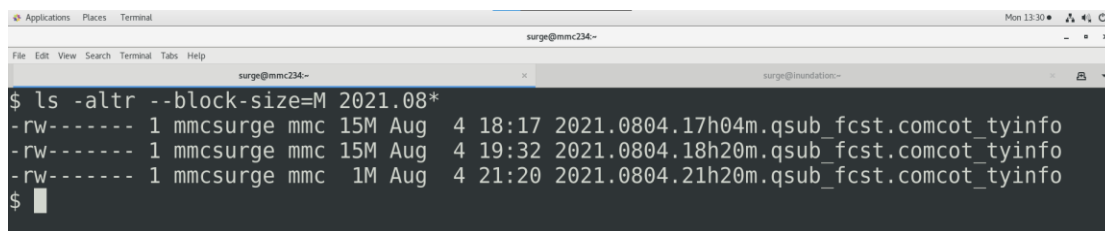
圖 7—26 為預報系統執行紀錄之截圖，08 月 04 日之 17 時 04 分及 18 時 20 分預報啟動之紀錄檔案大小正常，而原定 21 時 20 分執行下一預報，但無 20 時警報單（圖 7—27）而導致預報結束，其紀錄檔案約為 1M。

由圖 7—26 和圖 7—28，比對 Python 版本與 MATLAB 版本預報系統產品輸出，兩種版本第一報與第二報皆順利執行輸出產品，但無 04 日 20 時警報單導致兩種版本無成功執行第三報及第四報預報，於第五報時 MATLAB 版本重新啟動預報，並順利執行至颱風警報結束，而 Python 版本後續無重新啟動預報。



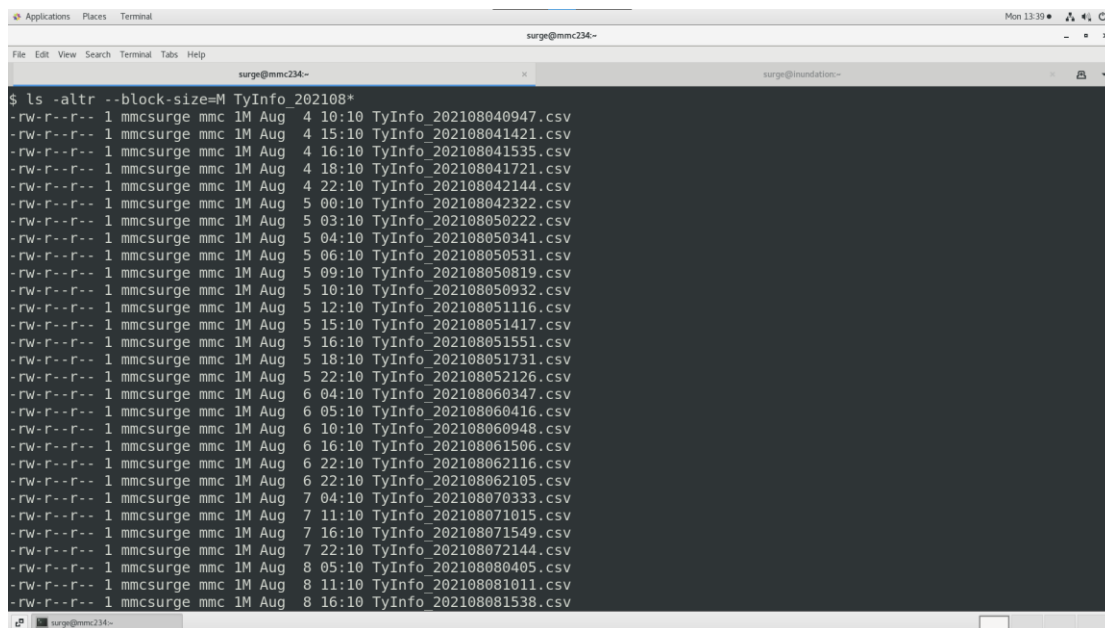
```
Applications Places Terminal
surge@mmc234~
File Edit View Search Terminal Tabs Help
surge@mmc234~
surge@inundation~
$ ls -altr --block-size=M 2021.08*
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 4 17:04 2021.0804.17h04m.bash_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 4 18:20 2021.0804.18h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 4 21:20 2021.0804.21h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 5 00:20 2021.0805.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
$
```

圖 7—25 啟動預報紀錄截圖



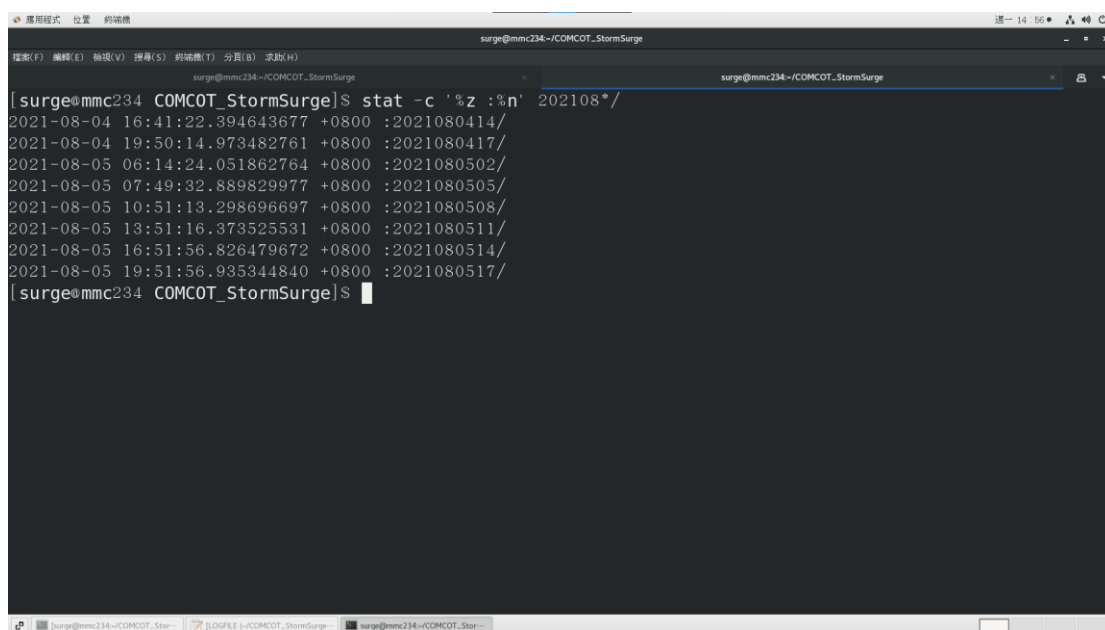
```
Applications Places Terminal
surge@mmc234~
File Edit View Search Terminal Tabs Help
surge@mmc234~
surge@inundation~
$ ls -altr --block-size=M 2021.08*
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Aug 4 18:17 2021.0804.17h04m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Aug 4 19:32 2021.0804.18h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 4 21:20 2021.0804.21h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
$
```

圖 7—26 預報執行紀錄截圖（qsub）



```
surge@mmc234~  
$ ls -ltr --block-size=M TyInfo_202108*  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 4 10:10 TyInfo_202108040947.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 4 15:10 TyInfo_202108041421.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 4 16:10 TyInfo_202108041535.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 4 18:10 TyInfo_202108041721.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 4 22:10 TyInfo_202108042144.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 5 00:10 TyInfo_202108042322.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 5 03:10 TyInfo_202108050222.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 5 04:10 TyInfo_202108050341.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 5 06:10 TyInfo_202108050531.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 5 09:10 TyInfo_202108050819.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 5 10:10 TyInfo_202108050932.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 5 12:10 TyInfo_202108051116.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 5 15:10 TyInfo_202108051417.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 5 16:10 TyInfo_202108051551.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 5 18:10 TyInfo_202108051731.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 5 22:10 TyInfo_202108052126.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 6 04:10 TyInfo_202108060347.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 6 05:10 TyInfo_202108060416.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 6 10:10 TyInfo_202108060948.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 6 16:10 TyInfo_202108061506.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 6 22:10 TyInfo_202108062116.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 6 22:10 TyInfo_202108062105.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 7 04:10 TyInfo_202108070333.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 7 11:10 TyInfo_202108071015.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 7 16:10 TyInfo_202108071549.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 7 22:10 TyInfo_202108072144.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 8 05:10 TyInfo_202108080405.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 8 11:10 TyInfo_202108081011.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Aug 8 16:10 TyInfo_202108081538.csv
```

圖 7—27 颱風警報單上傳至 PCC 紀錄截圖



```
surge@mmc234~/COMCOT_StormSurge  
[surge@mmc234 COMCOT_StormSurge]$ stat -c '%z :%n' 202108*/  
2021-08-04 16:41:22.394643677 +0800 :2021080414/  
2021-08-04 19:50:14.973482761 +0800 :2021080417/  
2021-08-05 06:14:24.051862764 +0800 :2021080502/  
2021-08-05 07:49:32.889829977 +0800 :2021080505/  
2021-08-05 10:51:13.298696697 +0800 :2021080508/  
2021-08-05 13:51:16.373525531 +0800 :2021080511/  
2021-08-05 16:51:56.826479672 +0800 :2021080514/  
2021-08-05 19:51:56.935344840 +0800 :2021080517/  
[surge@mmc234 COMCOT_StormSurge]$
```

圖 7—28 作業中 MATLAB 版本預報系統產品紀錄截圖

燦樹

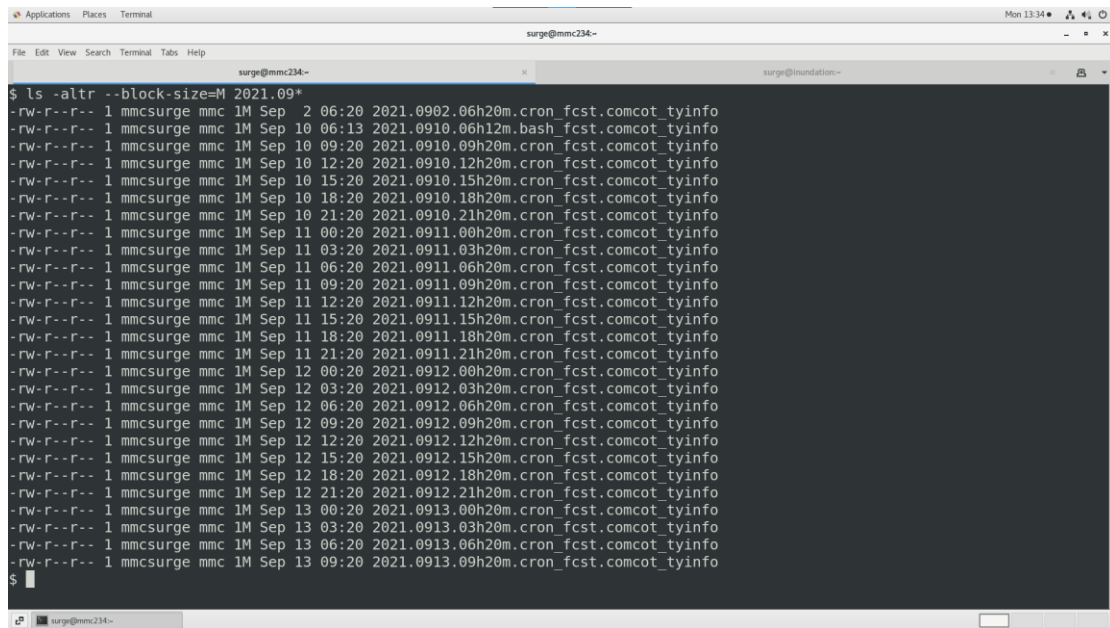
燦樹颱風海上警報於 09 月 10 日 05 時 30 分發布後，於當天 06 時 12 分手動啟動預報。啟動預報紀錄如圖 7—29 所示，檔案名稱依序標註啟動預報之時間（年.月日.時分）及啟動預報之方式為手動（bash）或排程（cron）。

09-13 02:30

圖 7—30 為預報系統執行紀錄之截圖，09 月 10 日 06 時手動啟動之第一報正常執行，後續 10 日 09 時至 13 日 03 時之排程作業皆正常執行，紀錄檔案皆約為 15M。13 日 06 時因颱風警報已解除，無警報單輸入結束預報，其紀錄檔案約為 1M。

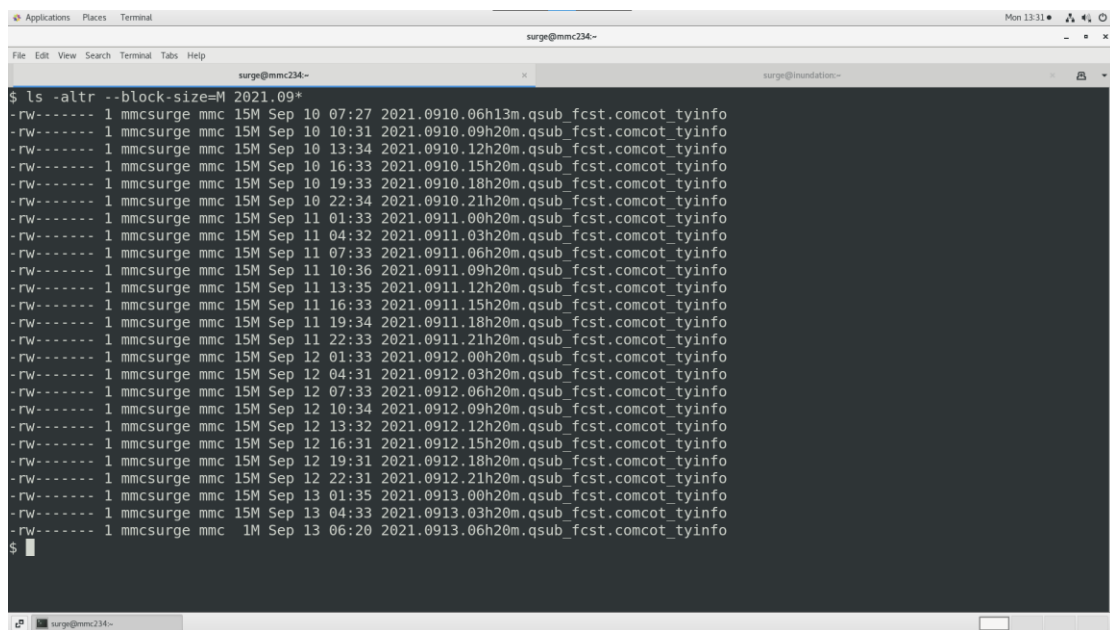
圖 7—31 為 2021 年 09 月颱風警報單上傳至 PCC 紀錄截圖。

由圖 7—30 和圖 7—32，比對 Python 版本與 MATLAB 版本預報系統產品輸出，兩種版本於燦樹第一報颱風警報單發布手動執行後，至颱風警報解除皆順利執行輸出產品。



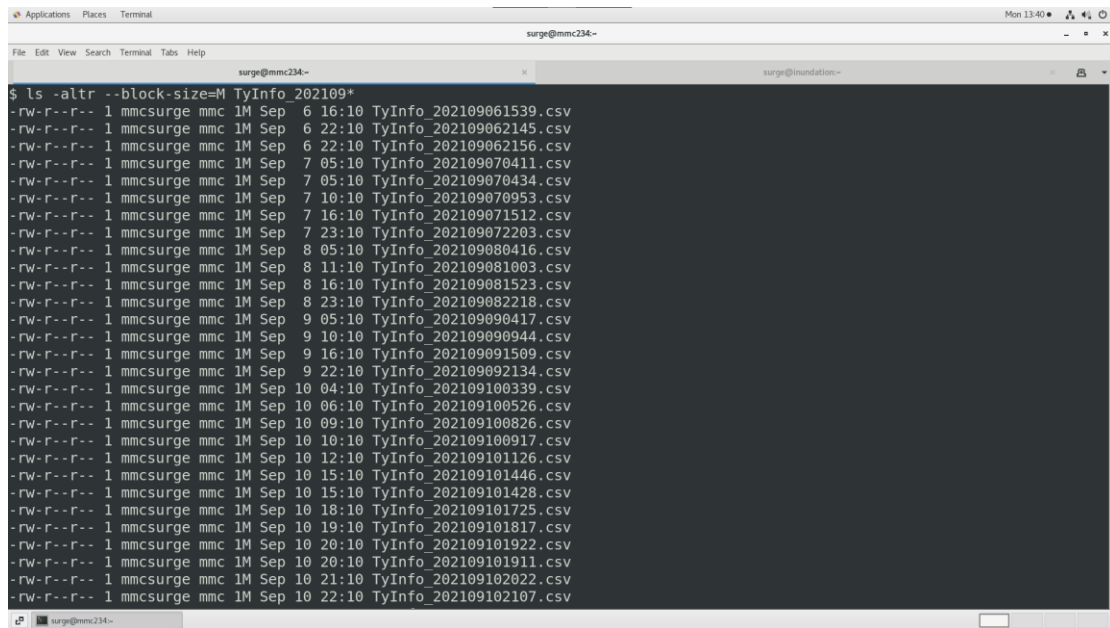
```
$ ls -altr --block-size=M 2021.09*
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 2 06:20 2021.0902.06h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 06:13 2021.0910.06h12m.bash_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 09:20 2021.0910.09h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 12:20 2021.0910.12h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 15:20 2021.0910.15h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 18:20 2021.0910.18h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 21:20 2021.0910.21h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 11 00:20 2021.0911.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 11 03:20 2021.0911.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 11 06:20 2021.0911.06h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 11 09:20 2021.0911.09h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 11 12:20 2021.0911.12h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 11 15:20 2021.0911.15h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 11 18:20 2021.0911.18h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 11 21:20 2021.0911.21h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 12 00:20 2021.0912.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 12 03:20 2021.0912.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 12 06:20 2021.0912.06h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 12 09:20 2021.0912.09h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 12 12:20 2021.0912.12h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 12 15:20 2021.0912.15h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 12 18:20 2021.0912.18h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 12 21:20 2021.0912.21h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 13 00:20 2021.0913.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 13 03:20 2021.0913.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 13 06:20 2021.0913.06h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 13 09:20 2021.0913.09h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
```

圖 7—29 啟動預報紀錄截圖



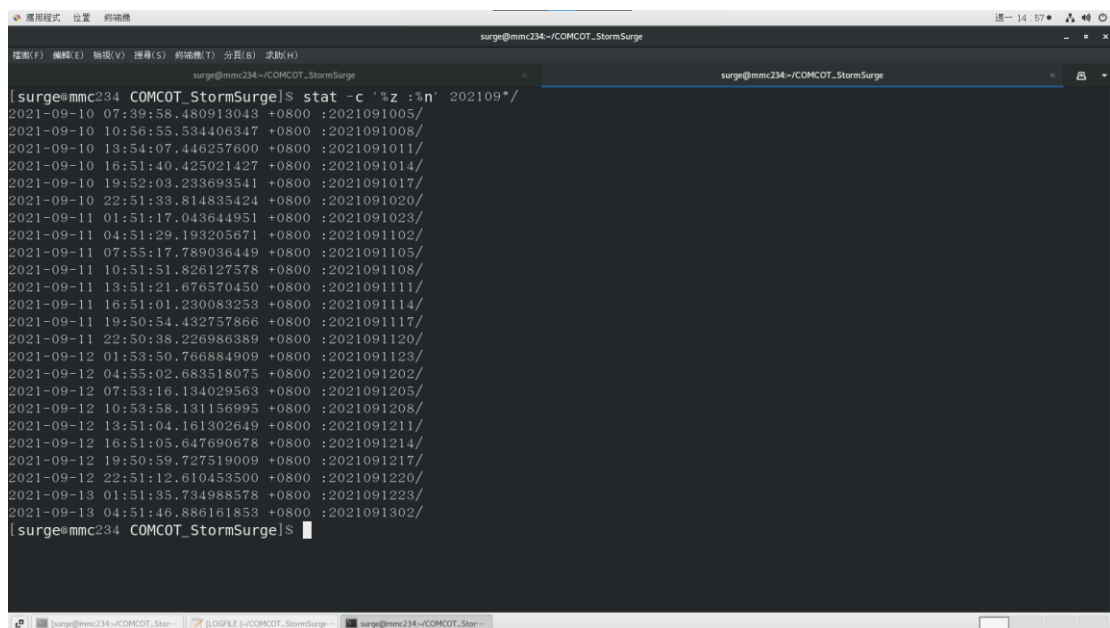
```
$ ls -altr --block-size=M 2021.09*
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 10 07:27 2021.0910.06h13m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 10 10:31 2021.0910.09h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 10 13:34 2021.0910.12h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 10 16:33 2021.0910.15h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 10 19:33 2021.0910.18h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 10 22:34 2021.0910.21h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 11 01:33 2021.0911.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 11 04:32 2021.0911.03h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 11 07:33 2021.0911.06h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 11 10:36 2021.0911.09h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 11 13:35 2021.0911.12h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 11 16:33 2021.0911.15h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 11 19:34 2021.0911.18h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 11 22:33 2021.0911.21h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 12 01:33 2021.0912.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 12 04:31 2021.0912.03h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 12 07:33 2021.0912.06h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 12 10:34 2021.0912.09h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 12 13:32 2021.0912.12h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 12 16:31 2021.0912.15h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 12 19:31 2021.0912.18h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 12 22:31 2021.0912.21h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 13 01:35 2021.0913.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Sep 13 04:33 2021.0913.03h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 13 06:20 2021.0913.06h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
```

圖 7—30 預報執行紀錄截圖（qsub）



```
$ ls -ltr --block-size=M TyInfo_202109*
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 6 16:10 TyInfo_202109061539.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 6 22:10 TyInfo_202109062145.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 6 22:10 TyInfo_202109062156.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 7 05:10 TyInfo_202109070411.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 7 05:10 TyInfo_202109070434.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 7 10:10 TyInfo_202109070953.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 7 16:10 TyInfo_202109071512.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 7 23:10 TyInfo_202109072203.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 8 05:10 TyInfo_202109080416.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 8 11:10 TyInfo_202109081003.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 8 16:10 TyInfo_202109081523.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 8 23:10 TyInfo_202109082218.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 9 05:10 TyInfo_202109090417.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 9 10:10 TyInfo_202109090944.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 9 16:10 TyInfo_202109091509.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 9 22:10 TyInfo_202109092134.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 04:10 TyInfo_202109100339.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 06:10 TyInfo_202109100526.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 09:10 TyInfo_202109100826.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 10:10 TyInfo_202109100917.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 12:10 TyInfo_202109101126.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 15:10 TyInfo_202109101446.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 15:10 TyInfo_202109101428.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 18:10 TyInfo_202109101725.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 19:10 TyInfo_202109101817.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 20:10 TyInfo_202109101922.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 20:10 TyInfo_202109101911.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 21:10 TyInfo_202109102022.csv
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Sep 10 22:10 TyInfo_202109102107.csv
```

圖 7—31 颱風警報單上傳至 PCC 紀錄截圖



```
[surge@mmc234 COMCOT_StormSurge]$ stat -c '%z %n' 202109*/
2021-09-10 07:39:58.480913043 +0800 :2021091005/
2021-09-10 10:56:55.534406347 +0800 :2021091008/
2021-09-10 13:54:07.446257600 +0800 :2021091011/
2021-09-10 16:51:40.425021427 +0800 :2021091014/
2021-09-10 19:52:03.233693541 +0800 :2021091017/
2021-09-10 22:51:33.814835424 +0800 :2021091020/
2021-09-11 01:51:17.043644951 +0800 :2021091023/
2021-09-11 04:51:29.193205671 +0800 :2021091102/
2021-09-11 07:55:17.789036449 +0800 :2021091105/
2021-09-11 10:51:51.826127578 +0800 :2021091108/
2021-09-11 13:51:21.676570450 +0800 :2021091111/
2021-09-11 16:51:01.230083253 +0800 :2021091114/
2021-09-11 19:50:54.432757866 +0800 :2021091117/
2021-09-11 22:50:38.226986389 +0800 :2021091120/
2021-09-12 01:53:50.766884909 +0800 :2021091123/
2021-09-12 04:55:02.683518075 +0800 :2021091202/
2021-09-12 07:53:16.134029563 +0800 :2021091205/
2021-09-12 10:53:58.131156995 +0800 :2021091208/
2021-09-12 13:51:04.161302649 +0800 :2021091211/
2021-09-12 16:51:05.647690678 +0800 :2021091214/
2021-09-12 19:50:59.727519009 +0800 :2021091217/
2021-09-12 22:51:12.610453500 +0800 :2021091220/
2021-09-13 01:51:35.734988578 +0800 :2021091223/
2021-09-13 04:51:46.886161853 +0800 :2021091302/
[surge@mmc234 COMCOT_StormSurge]$
```

圖 7—32 作業中 MATLAB 版本預報系統產品紀錄截圖

圓規

圓規颱風海上警報於 10 月 10 日 20 時 30 分發布後，於當天 21 時 15 分手動啟動預報。啟動預報紀錄如圖 7—33 所示，檔案名稱依序標註啟動預報之時間（年.月日.時分）及啟動預報之方式為手動（bash）或排程（cron）。

圖 7—34 為預報系統執行紀錄之截圖，10 月 10 日 21 時手動啟動之第一報正常執行，後續 11 日 00 時至 12 日 09 時之排程作業皆正常執行，紀錄檔案皆約為 15M。12 日 12 時因颱風警報已解除，無警報單輸入結束預報，其紀錄檔案約為 1M。

圖 7—35 為 2021 年 10 月颱風警報單上傳至 PCC 紀錄截圖。

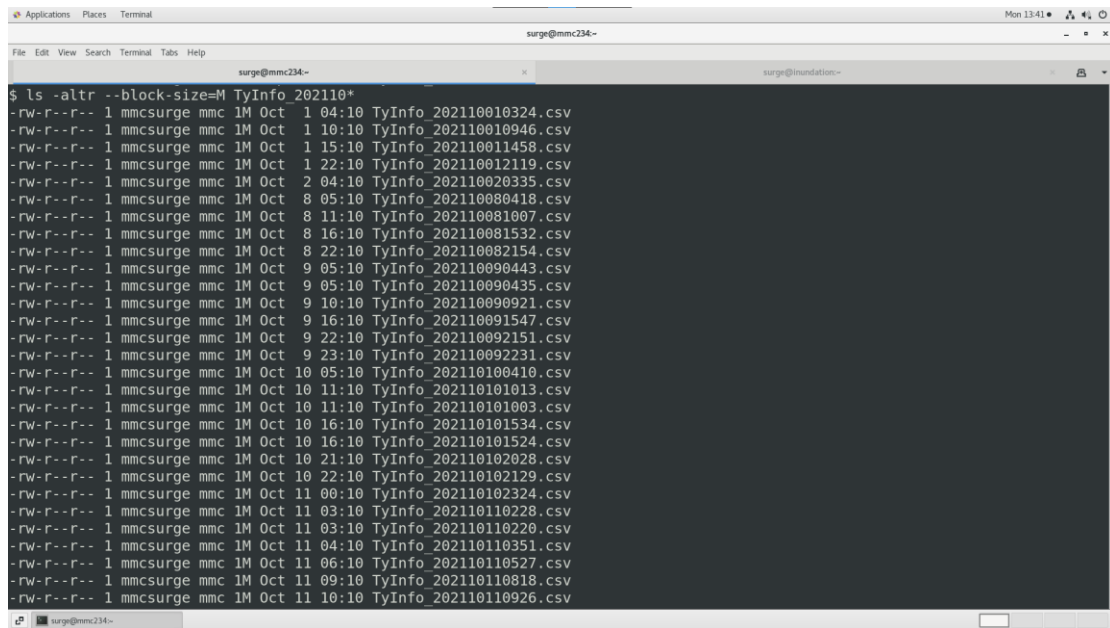
由圖 7—34 和圖 7—36，比對 Python 版本與 MATLAB 版本預報系統產品輸出，兩種版本於圓規第一報颱風警報單發布手動執行後，至颱風警報解除皆順利執行輸出產品。

```
$ ls -ltr --block-size=M 2021.10*
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 10 21:16 2021.1010.21h15m.bash_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 00:20 2021.1011.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 03:20 2021.1011.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 06:20 2021.1011.06h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 09:20 2021.1011.09h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 12:20 2021.1011.12h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 15:20 2021.1011.15h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 18:20 2021.1011.18h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 21:20 2021.1011.21h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 12 00:20 2021.1012.00h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 12 03:20 2021.1012.03h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 12 06:20 2021.1012.06h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 12 09:20 2021.1012.09h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 12 12:20 2021.1012.12h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 12 15:20 2021.1012.15h20m.cron_fcst.comcot_tyinfo
$
```

圖 7—33 啟動預報紀錄截圖

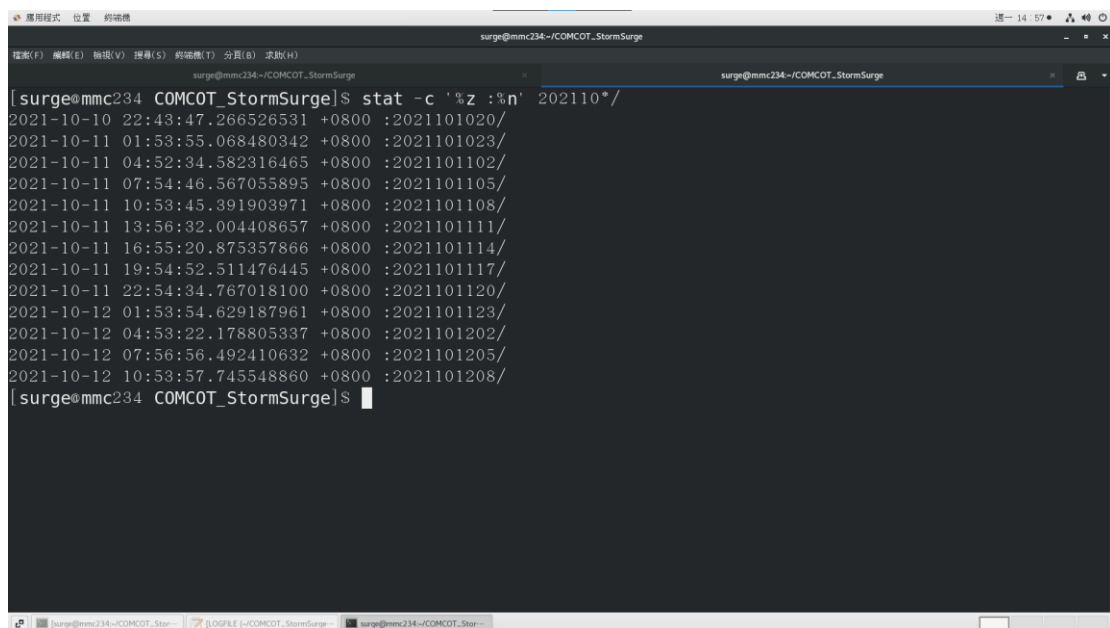
```
$ ls -ltr --block-size=M 2021.10*
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Oct 10 22:28 2021.1010.21h15m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Oct 11 01:34 2021.1011.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Oct 11 04:32 2021.1011.03h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Oct 11 07:33 2021.1011.06h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Oct 11 10:36 2021.1011.09h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Oct 11 13:33 2021.1011.12h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Oct 11 16:32 2021.1011.15h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Oct 11 19:32 2021.1011.18h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Oct 11 22:34 2021.1011.21h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Oct 12 01:34 2021.1012.00h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Oct 12 04:32 2021.1012.03h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Oct 12 07:33 2021.1012.06h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 15M Oct 12 10:35 2021.1012.09h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
-rw----- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 12 12:20 2021.1012.12h20m.qsub_fcst.comcot_tyinfo
$
```

圖 7—34 預報執行紀錄截圖（qsub）



```
surge@mmc234~  
$ ls -ltr --block-size=M TyInfo 202110*  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 1 04:10 TyInfo 202110010324.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 1 10:10 TyInfo 202110010946.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 1 15:10 TyInfo 202110011458.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 1 22:10 TyInfo 202110012119.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 2 04:10 TyInfo 202110020335.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 8 05:10 TyInfo 202110080418.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 8 11:10 TyInfo 202110081007.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 8 16:10 TyInfo 202110081532.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 8 22:10 TyInfo 202110082154.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 9 05:10 TyInfo 202110090443.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 9 05:10 TyInfo 202110090435.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 9 10:10 TyInfo 202110090921.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 9 16:10 TyInfo 202110091547.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 9 22:10 TyInfo 202110092151.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 9 23:10 TyInfo 202110092231.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 10 05:10 TyInfo 202110100410.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 10 11:10 TyInfo 202110101013.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 10 11:10 TyInfo 202110101003.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 10 16:10 TyInfo 202110101534.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 10 16:10 TyInfo 202110101524.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 10 21:10 TyInfo 202110102028.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 10 22:10 TyInfo 202110102129.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 00:10 TyInfo 202110102324.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 03:10 TyInfo 202110110228.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 03:10 TyInfo 202110110220.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 04:10 TyInfo 202110110351.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 06:10 TyInfo 202110110527.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 09:10 TyInfo 202110110818.csv  
-rw-r--r-- 1 mmcsurge mmc 1M Oct 11 10:10 TyInfo 202110110926.csv
```

圖 7—35 颱風警報單上傳至 PCC 紀錄截圖



```
surge@mmc234~/COMCOT_StormSurge  
[surge@mmc234 COMCOT_StormSurge]$ stat -c '%z :%n' 202110*/  
2021-10-10 22:43:47.266526531 +0800 :2021101020/  
2021-10-11 01:53:55.068480342 +0800 :2021101023/  
2021-10-11 04:52:34.582316465 +0800 :2021101102/  
2021-10-11 07:54:46.567055895 +0800 :2021101105/  
2021-10-11 10:53:45.391903971 +0800 :2021101108/  
2021-10-11 13:56:32.004408657 +0800 :2021101111/  
2021-10-11 16:55:20.875357866 +0800 :2021101114/  
2021-10-11 19:54:52.511476445 +0800 :2021101117/  
2021-10-11 22:54:34.767018100 +0800 :2021101120/  
2021-10-12 01:53:54.629187961 +0800 :2021101123/  
2021-10-12 04:53:22.178805337 +0800 :2021101202/  
2021-10-12 07:56:56.492410632 +0800 :2021101205/  
2021-10-12 10:53:57.745548860 +0800 :2021101208/  
[surge@mmc234 COMCOT_StormSurge]$
```

圖 7—36 作業中 MATLAB 版本預報系統產品紀錄截圖

7.5. 效能比較報告

本研究計畫下半年度執行期間，合計有 4 次颱風侵台事件，透過預報系統執行後所留之紀錄檔案，我們便可計算預報系統於烟花 (IN-FA)、盧碧 (LUPIT)、璨樹 (CHANTHU)、圓規 (KOMPASU) 等颱風事件於預報執行時所需要的時間。本研究於每次颱風事件預報中，取每一事件 3 次預報之平均執行時間，以比較兩版本間預報系統之計算效能。其中，由於盧碧颱風在 PCC 版本只完成 2 次預報，故 PCC 版本於該次颱風事件中只取 2 次預報執行時間的平均值。

於記錄檔案中主要的工作階段區分為輸入邊界條件及參數條件、系統執行模擬及系統模擬結果的後處理等。現行作業版本執行時間如表 7—2，合計系統作業完成預報所需時間平均一次約 92.92 分鐘。其中，潮汐模式輸出潮汐邊界時間至預報模式所需時間不到 1 分鐘，COMCOT 暴潮模式執行純潮汐模擬約需 31 分鐘，加入颱風氣象力參數一併進行運算時則需約 30.92 分鐘，合計系統運算時間約需 62 分鐘。在模式後處理資料部分，包含二維產品輸出、預報數值資料輸出、及傳輸預報產品等，需約 30.67 分鐘。

建置於 PCC 之 COMCOT 暴潮預報系統執行時間如表 7—3，平均完成一次預報約 73.09 分鐘。每階段執行時間為潮汐邊界輸出小於 1 分鐘，COMCOT 暴潮模式純潮汐模擬約需 31.91 分鐘，加入颱風氣象力參數一併進行運算時則需約 32.18 分鐘，合計系統運算時間約需 64 分鐘，而在後處理部分則僅需約 8.64 分鐘，與現行作業版本相比有大幅減少的情形。

兩種版本執行效能的詳細比較表整理如表 7—4，表中可發現建置於 PCC 之版本執行時間在總時長平均減少約 19.83 分鐘，與現行作業版本之執行時長進行比對，得出執行效能約提升 21.34%。因紀錄檔案內登陸各項系統重點執行區段的時間精確度單位為分鐘，而兩項版本在計算潮汐邊界輸出方面皆落於 1 分鐘內，故無法評斷兩種版本在該區段內的差異多寡。於 COMCOT 暴潮模式本身計算所需時間方面，兩者並無太大差別，時間相差約 1 分鐘，現行作業版本略快於 PCC 版本，由於預報系統的計算核心由 Fortran 所撰寫，並非本次研究計畫中改

動的項目，故在系統執行所需時間部分應只受兩作業版本所處之系統及硬體效能的不同而反映出些微的差異。於後處理產品的效率比較部分，PCC 版本可節省約 22.03 分鐘，執行效益與現有作業版本相比可提升高達 71.84%，可謂十分顯著的提升。

表 7—2 預報系統現行作業版本執行時間（單位：分鐘）

颱風事件	起始時間	總時長	潮汐 邊界	COMCOT (PT)	COMCOT (ST)	後處理
烟花颱風	2021-07-21 20:00	91.00	1.00	31.00	30.00	29.00
	2021-07-22 08:00	91.00	< 1	31.00	31.00	29.00
	2021-07-23 05:00	91.00	< 1	31.00	30.00	30.00
盧碧颱風	2021-08-04 14:00	95.00	1.00	30.00	31.00	33.00
	2021-08-04 17:00	92.00	< 1	31.00	30.00	31.00
	2021-08-05 08:00	92.00	1.00	30.00	30.00	31.00
燦樹颱風	2021-09-11 02:00	93.00	< 1	32.00	31.00	30.00
	2021-09-11 20:00	92.00	< 1	31.00	31.00	30.00
	2021-09-12 08:00	94.00	< 1	31.00	32.00	31.00
圓規颱風	2021-10-11 02:00	94.00	< 1	31.00	32.00	31.00
	2021-10-11 08:00	95.00	1.00	32.00	31.00	31.00
	2021-10-11 20:00	95.00	< 1	31.00	32.00	32.00
平均		92.92	< 1	31.00	30.92	30.67

表 7—3 預報系統 PCC 版本執行時間（單位：分鐘）

颱風事件	起始時間	總時長	潮汐 邊界	COMCOT (PT)	COMCOT (ST)	後處理
烟花颱風	2021-07-21 20:00	75.00	1.00	33.00	32.00	9.00
	2021-07-22 08:00	72.00	< 1	32.00	32.00	8.00
	2021-07-23 05:00	73.00	< 1	32.00	33.00	8.00
盧碧颱風	2021-08-04 14:00	72.00	< 1	32.00	32.00	8.00
	2021-08-04 17:00	72.00	< 1	31.00	32.00	9.00
燦樹颱風	2021-09-11 02:00	72.00	1.00	31.00	31.00	9.00
	2021-09-11 20:00	73.00	< 1	32.00	32.00	9.00
	2021-09-12 08:00	74.00	1.00	32.00	32.00	9.00
圓規颱風	2021-10-11 02:00	72.00	1.00	31.00	31.00	9.00
	2021-10-11 08:00	75.00	< 1	33.00	33.00	9.00
	2021-10-11 20:00	74.00	< 1	32.00	34.00	8.00
平均		73.09	< 1	31.91	32.18	8.64

表 7—4 平均執行效能比較（單位：分鐘）

	總時長	潮汐邊界	COMCOT (PT)	COMCOT (ST)	後處理
PCC 版本 預報系統	73.09	< 1	31.91	32.18	8.64
現行作業版本 預報系統	92.92	< 1	31.00	30.92	30.67
效能差異	19.83	-	0.91	1.27	22.03
差異百分比	21.34%	-	-2.93%	-4.09%	71.84%

第八章、結論

本計畫為三年期研究計畫，已執行「暴潮系集預報模式精準度提升研究」、「港灣海堤遮蔽效應對風暴潮預報準確度之影響分析」及「暴潮溢淹預報模式精準度提升研究」等工作項目，分敘如下：

於執行「暴潮系集預報模式精準度提升研究」工作項目期間，於依據氣象局颱風最佳路徑資料庫及歷史預報資料，統計過往颱風強度預報誤差，取得誤差分布機率曲線，並依靠誤差分布搭配颱風警報單內紀錄之決定性預報資料，產生對應的系集成員。研究中利用 2019 年有登陸台灣紀錄的颱風白鹿進行案例分析，發現目前採用的理想風場模式中，氣壓參數組成的系集預報結果影響水位變動範圍較風速參數成員組合的結果大，而風速成員的預報較氣壓成員有機會產生負暴潮偏差。若採用同樣的成員產生方法分析路徑誤差與強度誤差對測站水位的影響，強度參數對測站水位影響主要集中在原本決定性預報路徑影響該測站期間，影響水位的極值振幅變化。路徑參數變化除了可能影響水位極值振幅變化外，亦會改變颱風接近測站的對應時間，造成峰值在該測站發生的時間可能較決定性預報提前或延後。若同時考量強度及路徑成員的組合，成員數會提升至原本考量數量的平方倍，並且在暴潮歷線中得到較大的偏差極值。在決定性預報就已經取得相對準確的測站而言，考量如次大量的系集成員反而可能造成過度預報的現象，於後續計畫工作項目中，除了持續精進系集預報系統外，亦預計使其作業化以供預報員操作使用，並持續進行歷史案例的相關測試與分析，以期找出適合台灣現地之暴潮系集預報成員。

於執行「港灣海堤遮蔽效應對風暴潮預報準確度之影響分析」工作項目期間，為降低潮位站觀測水位與調和分析殘差值之週期性震盪，以提升分析颱風暴潮時可校驗資料之品質，首先利用潮汐調和分析模式 Utide 模式 (Codiga, 2011)，分析各潮位站觀測水位取得分潮組成及天文潮水位，利用各項統計參數，與氣象局

現有作業中調和分析預報水位進行比較兩者之分析結果。研究過程中發現，若採用 Utide 模式分析兩年觀測資料所得之調和分析參數，在部分測站如淡水、箔子寮等站將有機會降低天氣平緩時天文潮預報水位與觀測水位之間的誤差，將有助於分析颱風來臨時，風暴潮實際對沿岸造成的影響。綜觀現有測站之整體統計參數情形，利用單年觀測資料進行調和分析並進行預報，效果並不如分析兩年觀測資料所得之效果，而利用三年資料分析所得參數預報水位所得之誤差與兩年資料相比，並無顯著進益。

執行調和分析後，研究透過氣象局現有的港內外潮位站觀測資料，以比對小區域的港內外潮汐差異，分析若需要探討沿海細部地形結構對潮汐水位的影響，所需要的網格解析度門檻。研究中發現，以淡海/淡水測站為例，兩點相距約 2.0 公里便有分潮振幅與相位角間之不同，因此在暴潮模式預報中，的確有可能因為預報系統網格解析度不足，造成模式潮汐水位與觀測水位之間的差異產生分潮振幅及潮時的誤差，進而造成水位偏差值的震盪情形。於計畫後續研究中，預計將透過 COMCOT 模式搭配高解析度地形，探討該週期性水位偏差起伏是否可以透過提高模式內部的地形資料解析度及數值網格解析度改善潮汐水位之模擬結果。

於執行「暴潮溢淹預報模式精準度提升研究」工作項目期間，本研究透過蒐集國內外可供分析之風場及壓力場觀測資料，搭配國外各項理想風場模式及參數統計模型，以推估適合台灣現地之風場參數。研究中利用 ECMWF ERA5 再分析風場資料取得近中心最大風速及最大風速半徑並代入各項理想風場模式，得出適用不同強度之熱帶氣旋的最佳理想風場模式並非唯一一種，後續針對暴潮溢淹預報模式的精進或許可以考慮依據不同的颱風強度選用較為合適的理想風場模式。於最大風速半徑估算方面，本研究探討了現存公式中較合適之最大風速半徑推估公式，以作為後續調整理想風場模式之參考。研究中發現，大部分文獻選用的資料乃以 JTWC 最佳路徑資料或北美觀測資料為主，因此若直接套用 JMA 最佳路徑參數至各項統計模型後與 ECMWF 及 JMA 的最大風速半徑互相比對，是可被預期有改善空間的。另外，關於風場參數調整後對於颱風暴潮的預報能力是否改

善，仍有待後續研究評估，未來將會利用本年度計畫所得理想風場參數進行案例分析。

除了利用觀測資料整理理想風場參數外，本研究於執行「暴潮溢淹預報模式精準度提升研究」工作項目期間亦成功將理想風場暴潮預報模式建置於中央氣象局超級電腦（PCC）並進行作業化測試。透過 2021 年下半年之烟花（IN-FA）、盧碧（LUPIT）、燦樹（CHANTHU）、圓規（KOMPASU）四個颱風事件，本研究提出作業化報告及效能比較報告。現有作業紀錄中，建置於 PCC 之版本執行時間在總時長平均減少約 19.83 分鐘，與現行作業版本之執行時長進行比對，得出執行效能約提升 21.34%，其中在預報產品輸出的部分，PCC 版本可節省約 22.03 分鐘，執行效益與現有作業版本相比可提升高達 71.84%，可謂十分顯著的提升。而在現階段作業流程中，預報員只需於第一報預報時啟動指定 bash 腳本，並輸入預報起始時間與颱風事件，即可執行暴潮預報系統。後續預報可透過工作排程定時執行預報，大幅降低作業員負擔。於後續計畫工作項目安排中，除了提出系統維護報告外，亦會借鑒本次作業化經驗，將颱風暴潮 TWRF 預報模式建置於中央氣象局超級電腦（PCC）並進行作業化測試。

參考文獻

- [1]. Atkinson, G.D.; Holliday, C.R. Tropical cyclone minimum sea level pressure/maximum sustained wind relationship for the Western North Pacific. *Mon. Weather Rev.* 1977, 105, 421–427.
- [2]. Bernier, N. B., & Thompson, K. R. (2015). Deterministic and ensemble storm surge prediction for Atlantic Canada with lead times of hours to ten days. *Ocean Modelling*, 86, 114-127.
- [3]. Codiga, D. L. (2011). Unified tidal analysis and prediction using the UTide Matlab functions.
- [4]. Ding, X., Chen, Y., Pan, Y., & Reeve, D. (2016). Fast ensemble forecast of storm surge along the coast of China. *Journal of Coastal Research*, (75), 1077-1081.
- [5]. Dushaw, B. D., Egbert, G. D., Worcester, P. F., Cornuelle, B. D., Howe, B. M., & Metzger, K. (1997). A TOPEX/POSEIDON global tidal model (TPXO. 2) and barotropic tidal currents determined from long-range acoustic transmissions. *Progress in Oceanography*, 40 (1-4), 337-367.
- [6]. Egbert, Gary D., and Svetlana Y. Erofeeva. "Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides." *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19.2 (2002): 183-204.
- [7]. FANG, Pingzhi; YE, Gengjiao; YU, Hui. A parametric wind field model and its application in simulating historical typhoons in the western North Pacific Ocean. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2020, 199: 104131.
- [8]. Fang, W.; Chen, G.P.; Zhao, H.J.; Yan, S.C. A Comparative Study on the Calculation effect of maximum wind speed Radius on station wind wave. *J. Waterw. Harb.* 2017, 38, 574–580. (In Chinese)
- [9]. Forbes, C., Rhome, J., Mattocks, C., & Taylor, A. (2014). Predicting the storm surge threat of Hurricane Sandy with the National Weather Service SLOSH model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2(2), 437-476.
- [10]. Foreman, M. G. G., & Henry, R. F. (1989). The harmonic analysis of tidal model time series. *Advances in water resources*, 12(3), 109-120.
- [11]. Foreman, M. G., Cherniawsky, J. Y., & Ballantyne, V. A. (2009). Versatile harmonic tidal analysis: Improvements and applications. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, 26(4), 806-817.
- [12]. Foreman, M.G.G. 1977. Manual for tidal heights analysis and prediction. . Pacific
- [13]. Foreman, M.G.G. 1978. Manual for tidal currents analysis and prediction. . Pacific
- [14]. Fujita, H. 1952. The exact pattern of a concentration-dependent diffusion in a semi-infinite medium, Part II. *Text. Res. J.* 22: 823-827.

- [15]. Godin, G. 1972. The analysis of tides. University of Toronto Press, Toronto.
- [16]. Haigh, I.D.; MacPherson, L.R.; Mason, M.S.; Wijeratne, E.M.S.; Pattiaratchi, C.B.; Crompton, R.P.; George, S. Estimating present day extreme water level exceedance probabilities around the coastline of Australia: Tropical cyclone-induced storm surges. *Clim. Dyn.* 2014, 42, 139–157.
- [17]. Harper, B. A. and Holland, G. J. 1999. An updated parametric model of the tropical cyclone. *Proceedings of the 23rd Conference of Hurricane and Tropical Meteorology* Dallas, Texas, pp. 893-896.
- [18]. Holland, G. J. 1980. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes. *Mon. Weather Rev.* 108, 1212-1218.
- [19]. Hsiao, L.F.; Chen, D.S.; Kuo, Y.H.; Guo, Y.R.; Yeh, T.C.; Hong, J.S.; Fong, C.T.; Lee, C.S. Application of WRF 3DVAR to operational typhoon prediction in Taiwan: Impact of outer loop and partial cycling approaches. *Weather Forecast.* 2012, 27, 1249–1263.
- [20]. Hu, C. K., Chiu, C. T., Chen, S. H., Kuo, J. Y., Jan, S., & Tseng, Y. H. (2010). Numerical simulation of barotropic tides around Taiwan. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 21(1).
- [21]. Hubbert, K. P. and Wolf, J. 1991. Numerical investigation of depth and current refraction of waves. *J. Geophys. Res.* 96 (9), 2737-2748.
- [22]. Hwung, H. H., Tsai, C. L. and Wu, C. C. (1986) “Studies on the correlation of tidal elevation changes along the western coastline of Taiwan,” *Proceedings of the 20th International Conference on Coastal Engineering*, Taipei, pp. 293-305.
- [23]. Jan, S. C. S. Chern, J. Wang, and S. Y. Chao, 2004a: The anomalous amplification of M2 tide in the Taiwan Strait. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L07308, doi: 10.1029/2003GL019373.
- [24]. Jan, S., Wang, Y. H., Chao, S. Y., & Wang, D. P. (2001). Development of a nowcast system for the Taiwan Strait (TSNOW): numerical simulation of barotropic tides. *Ocean and Polar Research*, 23(2), 195-203.
- [25]. Jan, S., Y. H. Wang, D. P. Wang, and S. Y. Chao, 2004b: Incremental inference of boundary forcing for a three-dimensional tidal model: Tides in the Taiwan Strait. *Cont. Shelf Res.*, 24, 337-351, doi: 10.1016/j.csr.2003.11.005.
- [26]. Jelesnianski, C. P., Chen, J. and Wilson, A. Shaffer 1992. SLOSH: Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes, NOAA Technical Report, NWS 48, Silver Springs, Maryland.
- [27]. Jiang, Z.H.; Hua, F.; Qu, P. A new tropical cyclone parameter adjustment scheme. *Adv. Mar. Sci.* 2008, 1, 1–7. (In Chinese)
- [28]. Kato, F. Study on Risk Assessment of Storm Surge Flood, Technical Note of National Institute for Land and Infrastructure Management of Japan; No.275; National Institute for Land and Infrastructure Management: Tokyo, Japan, 2005.

- [29]. Knaff, J.A.; Sampson, C.R.; DeMaria, M.; Marchok, T.P.; Gross, J.M.; McAdie, C.J. Statistical Tropical Cyclone Wind Radii Prediction Using Climatology and Persistence. *Weather Forecast.* 2007, 22, 781–791.
- [30]. Krien, Y.; Dudon, B.; Roger, J.; Arnaud, G.; Zahibo, N. Assessing storm surge hazard and impact of sea level rise in Lesser Antilles-Case study of Martinique. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2017, 17, 1559–1571.
- [31]. Krien, Y.; Dudon, B.; Roger, J.; Zahibo, N. Probabilistic hurricane-induced storm surge hazard assessment in Guadeloupe, Lesser Antilles. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2015, 15, 1711–1720.
- [32]. Krien, Y.; Testut, L.; Durand, F.; Mayet, C.; Islam, A.K.M.S.; Tazkia, A.R.; Becker, M.; Calmant, S.; Papa, F.; Ballu, V.; et al. Towards improved storm surge models in the northern Bay of Bengal. *Cont. Shelf Res.* 2017, 135, 58–73.
- [33]. Lakshmi, D.; Murty, P.L.N.; Bhaskaran, P.K.; Sahoo, B.; Srinivasa Kumar, T.; Shenoj, S.S.C.; Srikanth, A.S. Performance of WRF-ARW winds on computed storm surge using hydrodynamic model for Phailin and Hudhud cyclones. *Ocean Eng.* 2017, 131, 135–148.
- [34]. Leffler, K. E., & Jay, D. A. (2009). Enhancing tidal harmonic analysis: Robust (hybrid L1/L2) solutions. *Continental Shelf Research*, 29(1), 78-88.
- [35]. Lin, M. C., Juang, W. J., & Tsay, T. K. (2001). Anomalous amplifications of semidiurnal tides along the western coast of Taiwan. *Ocean Engineering*, 28(9), 1171-1198.
- [36]. Lin, N.; Chavas, D. On hurricane parametric wind and applications in storm surge modeling. *J. Geophys. Res.* 2012, 117, D09120.
- [37]. Lin, N.; Emanuel, K.A. Grey swan tropical cyclones. *Nat. Clim. Chang.* 2016, 6, 106–111.
- [38]. Lin, N.; Smith, J.A.; Villarini, G.; Marchok, T.P.; Baeck, M.L. Modeling extreme rainfall, winds, and surge from Hurricane Isabel (2003). *Weather Forecast.* 2010, 25, 1342–1361.
- [39]. Lin, W.; Fang, W.H. Study on the Regional Characteristics of Holland B coefficient in the Typhoon wind field model in the Northwest Pacific Ocean. *Trop. Geogr.* 2013, 33, 124–132, (In Chinese with English Abstract).
- [40]. MacAfee, A. W. and Pearson, G. M. 2006. Development and testing of tropical cyclone parametric wind models tailored for multitude application preliminary results. *J. Appl. Meteorol.* 45, 1244-1260.
- [41]. Marine Science Rep. 77-10, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, 101 pp.
- [42]. Marine Science Rep. 78-6, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, 70 pp.
- [43]. Mattocks, C.; Forbes, C. A real-time, event-triggered storm surge forecasting system for the state of North Carolina. *Ocean Model.* 2008, 25, 95–119.
- [44]. Mel, R., & Lionello, P. (2014). Storm surge ensemble prediction for the city of Venice. *Weather and forecasting*, 29(4), 1044-1057.

- [45]. Niedoroda, A.W.; Resio, D.T.; Toro, G.R.; Divoky, D.; Das, H.S.; Reed, C.W. Analysis of the coastal Mississippi storm surge hazard. *Ocean Eng.* 2010, 37, 82–90.
- [46]. Olfateh, M.; Callaghan, D.P.; Nielsen, P.; Baldock, T.E. Tropical cyclone wind field asymmetry—Development and evaluation of a new parametric model. *J. Geophys. Res. Oceans* 2017, 122, 458–469
- [47]. Orton, P.M.; Hall, T.M.; Talke, S.A.; Blumberg, A.F.; Georgas, N.; Vinogradov, S. A validated tropical-extratropical flood hazard assessment for New York harbor. *J. Geophys. Res. Oceans* 2016, 121, 8904–8929.
- [48]. Ou, S. H., Liao, J. M. and Hsu, T. W. 2002. Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan. *J. Ocean Engineering.* 29(18), 947-971.
- [49]. Palmer, T., R. Buizza, R. Hagedorn, A. Lawrence, M. Leutbecher, and L. Smith, Ensemble prediction: A pedagogical perspective, *ECMWF Newsletter*, (106) , 2005.
- [50]. Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8), 929-937.
- [51]. Phadke, A. C., Martino, C. D., Cheung, K. F. and Houston, S. H. 2003. Modeling of tropical cyclone winds and waves for emergency management. *J. Ocean Engineering.* 30(4), 553-578.
- [52]. Powell, M. D., Soukup, G., Cocke, S., Gulati, S., Morisseau-Leroy, N., Hamid, S., Dorst, N., Axe, L., 2005. State of Florida hurricane loss projection model: atmospheric science component. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 93(8), 651–674.
- [53]. Powers, J.; Klemp, J.; Skamarock, W.; Davis, C.; Dudhia, J.; Gill, D.; Coen, J.; Gochis, D.; Ahmadov, R.; Peckham, S.; et al. The weather research and forecasting (WRF) model: Overview, system efforts, and future directions. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2017.
- [54]. Pugh, D.T. (1987) *Tides, surges and mean sea level.* John Wiley & Sons.
- [55]. Saito, K., Kuroda, T., Kunii, M., & Kohno, N. (2010). Numerical simulation of Myanmar cyclone Nargis and the associated storm surge part II: ensemble prediction. *Journal of the Meteorological Society of Japan.* Ser. II, 88(3), 547-570.
- [56]. Schloemer, R. W. 1954. Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okechobee. *Florida US Weather Bureau, Hydromet. Rep.*, 31, 1-49.
- [57]. Shao, Z.; Liang, B.; Li, H.; Wu, G.; Wu, Z. Blended wind fields for wave modeling of tropical cyclones in the South China Sea and East China Sea. *Appl. Ocean Res.* 2018, 71, 20–33.
- [58]. Taylor, A. A., & Glahn, B. (2008, January). Probabilistic guidance for hurricane storm surge. In *19th Conference on probability and statistics (Vol. 74).*

- [59]. Vickery, P. J. Masters, F. J., Powell, M. D., and Wadhera, D., 2009. Hurricane hazard modeling: The past, present, and future. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 47, 2497-2517.
- [60]. Vickery, P. J., & Wadhera, D. Statistical models of Holland pressure profile parameter and radius to maximum winds of hurricanes from flight-level pressure and H* Wind data. *Journal of Applied Meteorology and climatology*, 2008, 47(10), 2497-2517.
- [61]. Vickery, P.J.; Skerlj, P.F.; Steckley, A.C.; Twisdale, L.A. Hurricane Wind Field Model for Use in Hurricane Simulations. *J. Struct. Eng.* 2000, 126, 1203–1221.
- [62]. Vickery, P.J.; Skerlj, P.F.; Twisdale, L.A. Simulation of Hurricane Risk in the U.S. Using Empirical Track Model. *J. Struct. Eng.* 2000, 126, 1222–1237.
- [63]. Willoughby, H. E. Darling, R. W. and Rahn, M. E. 2006. Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part II: A new family of sectional continuous profiles. *Mon. Weather Rev.* 134, 1102-1120.
- [64]. Willoughby, H.E.; Rahn, M.E. Parametric representation of the primary hurricane vortex. Part I: Observations and evaluation of the Holland (1980) model. *Mon. Weather Rev.* 2004, 132, 3033–3048.
- [65]. Wu, D., Fang, G., Cui, X., & Teng, F. (2018). An analytical study of M 2 tidal waves in the Taiwan Strait using an extended Taylor method. *Ocean Science*, 14(1), 117-126.
- [66]. Yen, P. H., Jan, C. D., Lee, Y. P., & Lee, H. F. (1996). Application of Kalman filter to short-term tide level prediction. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 122(5), 226-231.
- [67]. Zhu, J., Hu, J. Y., Zhang, W. Z., Zeng, G. N., Chen, D. W., Chen, J. Q., & Shang, S. P. (2009). Numerical study on Tides in the Taiwan Strait and its adjacent areas. *Marine Science Bulletin*, 11(2), 23-36.

王玉懷 (1998) 台灣海峽的潮汐特性。八十七年國科會海洋成果發表會論文摘要集，第203-208頁。

王玉懷 (1999) ,”TSNOW 現場觀測資料報告”，台灣海峽海況即時預報模式計畫 (TSNOW)研討會論文集, pp. 16-21,

吳建民和馮德榮，”淡水河感潮水位站調和分析”，第五屆水利工程研討會，1990，PP. 1023~1030。

李志昕、洪景山，“區域系集預報系統研究：物理參數化擾動”。*大氣科學*，第39期第2號，95 -116，2011。

李汴軍, 范揚泓, 董東環, & 高家俊. (2005). 台灣海域潮汐空間均勻特性之研究. *海洋工程學刊*, 5(1), 67-83.

李賢文 (1989)，「台灣鄰近海域潮汐預報數值模式」，第二屆海洋數值模式研習會論文集，台灣省交通處港灣技術研究所，第179-195頁。

周宗仁,施士力,“淡水港潮汐分析研究”,國立海洋大學,河海工程學系,河海研究第八號,民國七十年四月。

林炤圭、林玉峰、戴益寶,2005:“基隆港及花蓮港的水位觀測研究”,第27屆海洋工程研討會論文集,949-956

林嫩瑛、邱銘達、柳文成、陳致穎、鄭皓元(2016) 颱風暴潮預報之不確定性分析,臺灣水利,第64卷,第3期,2016。

林演斌、陳聖學、施孟憲、滕春慈、林燕璋,2020:“港內外潮位差異分析”,109 年天氣分析與預報研討會, A5-O-N07。

林演斌、陳聖學、滕春慈、林燕璋,2019:“港內外潮位分析”,108 年天氣分析與預報研討會, A7-14。

張恆文,“建構波浪系集預報系統(4/4)”,交通部中央氣象局委託研究計畫期末成果報告,2015。

張國棟、何崇華、沈建全、陳昭憲 (2001),「台灣西南海域潮汐特性分析」,第23屆海洋工程研討會論文集,第112-119頁。

張憲國,莊文傑,& 曾相茂.(2013). 臺灣商港的主要天文潮汐與潮流的特性比較. 海洋工程學刊, 13(4), 393-410.

陳怡發、黃煌輝 (1990) 「台灣沿海潮汐資料之整理及分析」,第五屆水利工程研討會論文集,第1050-1063頁。

劉文俊 (1999),「台灣的潮汐」,第二版。自費出版。

劉肖孔 (1983),「中國海域三度空間數值模式」,行政院科技顧問組,共156頁。

蔡育霖 (2014) 風暴潮速算系統之建立及1845年雲林口湖事件之還原與研究。中央大學水海所研究所碩士論文。

蔡瓊林,黃煌輝,“台灣平均海水面特性變化研究(一)南灣實測資料之分析”,第六屆海洋工程研討會論文集,民國七十一年九月。

蘇青和、江中權 (1992),台灣各港口潮汐相關性與預報模式研究。台灣省政府交通處港灣技術研究所,81-研(十三)

附錄 A 會議紀錄

四月份工作會議紀錄

時 間：110 年 4 月 26 日上午 10 時

地 點：氣象局 616b 會議室

主 席：滕春慈主任

記 錄：林君蔚

出席人員：中央氣象局

林芳如課長、楊天瑋

國立中央大學團隊

吳祚任教授、林君蔚、莊淑君、莊美惠

壹、執行團隊簡報：略

貳、會議討論：

1. 系集產品之結果呈現討論：系集產品加入決定性預報，以紅色虛線表示。

2. 連線讀取資料之問題排除。

3. 未來兩個月工作項目之操作探討。

參、會議結束時間：上午 11 時 25 分

六月份工作會議紀錄

時 間：109 年 6 月 29 日下午 2 時 30 分

地 點：Google meet 視訊會議

主 席：滕春慈主任

記 錄：林君蔚

出席人員：中央氣象局

林芳如課長、楊天瑋

國立中央大學團隊

吳祚任教授、林君蔚、曹瑤、范子軒

肆、執行團隊簡報：略

伍、會議討論：

1. 颱風警報於氣象局 PCC 操作流程說明及討論：請作業單位與預報中心確認未來警報單格式，以評估未來排程執行預報的可行性

2. 部分觀測站資料請中央大學提供相關資訊與作業單位核對資料是否有誤（將軍站）

3. 於本次會議協議本周四（7/1）執行 PCC 預報系統測試

4. 作業單位建議應持續討論符合下游單位之系集預報產品

5. 未來第五月重點工作項目需作業單位協助事項（提供浮標觀測風速、氣壓資料）

陸、會議結束時間：下午 4 時 0 分

期中會議審查意見

交通部中央氣象局

「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (1/3)」

期中報告審查會議紀錄

一、標案名稱：「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (1/3)」

1102048B

二、廠商名稱：國立中央大學

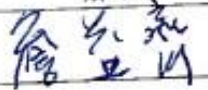
三、審查日期：110 年 7 月 22 日 (星期四) 14 時 0 分

四、地點：線上視訊會議 meet.google.com/nxo-tjme-zrt

五、主持人：滕委員春慈

紀錄：陳維翔

六、出席人員：

單位	姓名	簽名
國立臺灣大學	詹益齊	
	簡仲璟	
中央氣象局 海象測報中心	滕春慈	
中央氣象局 氣象預報中心	林秉煜	
中央氣象局 海象測報中心	朱啟豪	

業務單位：

廠商：

交通部中央氣象局

「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (1/3)」

期中報告審查會議紀錄

一、標案名稱：「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (1/3)」

1102048B

二、廠商名稱：國立中央大學

三、審查日期：110 年 7 月 22 日 (星期四) 14 時 0 分

四、地點：線上視訊會議 meet.google.com/nxo-tjme-zrt

五、主持人：滕委員春慈

紀錄：陳維翔

六、出席人員：

單位	姓名	簽名
國立臺灣大學	詹益齊	
	簡仲璟	簡仲璟
中央氣象局 海象測報中心	滕春慈	
中央氣象局 氣象預報中心	林秉煜	
中央氣象局 海象測報中心	朱啟豪	

業務單位：

廠商：

交通部中央氣象局

「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (1/3)」

期中報告審查會議紀錄

一、標案名稱：「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (1/3)」

1102048B

二、廠商名稱：國立中央大學

三、審查日期：110 年 7 月 22 日 (星期四) 14 時 0 分

四、地點：線上視訊會議 meet.google.com/nxo-tjme-zrt

五、主持人：滕委員春慈

紀錄：陳維翔

六、出席人員：

單位	姓名	簽名
國立臺灣大學	詹益齊	
	簡仲璟	
中央氣象局 海象測報中心	滕春慈	
中央氣象局 氣象預報中心	林秉煜	
中央氣象局 海象測報中心	朱啟豪	

業務單位：

廠商：

吳祥任 曹瑤 范子軒 *Spunf* 林君蔚

七、簡報計畫研究成果：(略)

八、審查意見與回覆：

委員意見	廠商回覆
(一) 詹委員益齊	
1. 期中交付項目：(1) 兩次進度報告會議(附錄)；(2) 模式上線運作(第六章)；(3) 港內外潮汐比對(第五章)；颱風預報強度誤差分析(第四章)。	1. 感謝委員。
2. 報告中有些許方程式錯誤、參考資料引用等細節問題宜修訂。	2. 遵照委員意見辦理。
3. 3.6 (P. 35)：機率分布的選擇是否採用一般統計分析檢定的方法進行？	3. 現有研究採用圖示化展示進行初步比對，後續研究考慮探討採用統計分析檢定方法之可行性。
4. P.46：東吉島最大 24 小時 (78.3) 大於事件總量 (76.8) 是否須加以說明。	4. 感謝委員建議，將會尋求作業單位協助確認資料細節。
5. 強度參數之影響 (4.2)：圖 4-12 至 4-23 的呈現似乎較難以評判結果或得到肯定的結論；七級暴風半徑若不具影響性，是否需展示其結果(中間列的圖)？中心壓力較風速更具影響性 (P. 59) 這個結論似乎與所採用之大氣模式 (P.27) 直接相關。	5. 後續完稿將遵循委員建議移除七級暴風半徑之模式結果，並將調整結果圖片展示之水位上下界限以更加凸顯模式結果之差異。現有結論確以預報模式採用何種模式高度相關，若採用其他參數風場模式做為輸入場，將可能得到不同結論。
6. 路徑與強度分析 (4.3) 圖 4-24 至 4-35 似乎較難理解如何展現 9 種、81 種不同輸入；似乎也不容易從結果圖中看出較為肯定的結論。	6. 產品圖中選用之成員搭配為表 3-4 中所得之誤差成員，依據預報小時數相互搭配，於案例分析中皆採用切割曲線下面積均分數為 2 時所得之三組成員。路徑成員之 9 組誤差成員為垂直路徑誤差 3 組成員與平行路徑誤差 3 組成員互相搭配；強度成員為壓力誤差 3 組成員與近中心最大風速誤差 3 組成員互相搭配。81 種成員則考量上述參數變數之所有搭配結果，合計為 $3^4 = 81$ 組成員。結果圖將調整圖片展示上下界以更加凸顯模式結果之差異。
7. 第五章：建議宜多加比較 Utide 和氣象局現行作業模式理論上的異同、模式的輸入條件等；淡水與	

淡海、塭港與東石測站的分析顯示出港內外的確存有差異，除了解析度的精進，是否有其他的改進方向？期待後續的分析結果。 8. 報告書中似乎較少見到關於溢淹部分的討論。	7. 局內現行調和分析作業理論參考 Foreman (1977)，現行作業採用前兩年觀測水位進行參數分析，預報下一年度之潮汐水位，近年為精進分析結果，觀測資料輸入模式前會先進行氣壓校正。由於現階段尚在探討暴潮預報模式的誤差來源分布，現階段將先透過精進模式解析度探討可否改善現有預報結果，並探討可達到之潮汐模擬極限，確定誤差來源後會再探討其他改進方向，未來將與作業單位討論如何將誤差範圍整合進預報結果，供預報員參考。 8. 模式名稱命名時包含「溢淹」關鍵字，但本年度計畫重點工作項目與溢淹模組關聯較少。
(二) 簡委員仲璟	
1. 第 76 頁所述強度級路徑參數都會影響系集預報結果（峰值及相位），但同時考量強度及路徑的組合，可能造成過度預報的現象。因此，怎樣的系集成員及組合才能會有較佳的預報結果？ 2. 第 118 頁所述是否利用二年的觀測資料進行調和分析就已足夠？請再確認。此外利用 Utide 模式在部分測站有機會降低天氣平緩時天文潮預報水位與觀測水位之間的誤差，此段說明較為模糊，請再檢視補充說明。 3. 港內外潮位的比較建議於模式中選取鄰近港外站 2 個計算點做更	1. 在過往研究計畫中我們僅考慮路徑系集成員的組合，發現在各颱風案例中預報最佳的成員組合不盡相同，雖然在計畫成果中有透過已分析案例得出部分結論，但本年度執行之工作項目中，現有案例分析僅考量 2019 年颱風白鹿 24 小時登陸前之颱風預報，需要透過更多案例分析尚可得出最佳成員組合之結論。 2. 研究中選用之各站觀測資料係直接選用海象中心資料課提供之各潮位站水位資料，並未針對極端天氣現象或資料離群值等進行更進一步的資料品管或資料補遺。

完整之比較。港內外潮位潮時的差異是否在潮差大的地區會較明顯？若差異微小（或可接受）則有必要提升計算網格解析度而耗費較多的計算時間？建議有整體的平衡考量。 4. 壓力參數建議改為氣壓參數。建議增加圖表目錄。	以研究中取得之觀測資料總長度為三年，若以現有資料品質進行分析，則 30 個觀測站中，有 12 個測站（龍洞、麟山鼻、福隆、基隆、竹圍、台中港、高雄、小琉球、花蓮、烏石、七美、吉貝等站）在選用三年資料所得之分析結果來預報本年度潮汐水位時所得方均根誤差為最小。9 個測站（淡水、麟山鼻、淡海、新竹、箔子寮、蘭嶼、蘇澳、馬祖、馬公）在選用兩年資料所得之分析結果來預報本年度潮汐水位時所得方均根誤差為最小。而所有測站所得之方均根誤差平均，以 2 年資料所得之分析結果為最低。 3. 感謝委員建議，後續研究將考慮利用暴潮預報模式偶合之 TPXO 潮汐模式計算港外站點之潮汐水位，並探討兩者差異。若差異微小（或可接受）則將考慮優先將計算效能配置於差異較大之計算區域以求最佳化利用預報時效。 4. 遵照委員意見辦理。
(三) 林委員秉煜	
1. 內容充實且實用，僅一問題詢問，若象局於 TD 期間（非颱風）即發布警報，即預期接近台灣時會增強為颱風，則此模式是否亦能開始 run？會這麼問是因為近 2-3 年，越來越多近台才增強為颱風的案例，如能考慮 TD 期	1. 目前暴潮決定性預報系統中，TWRF 氣象場之預報功能選項可以達到該需求，展示時機會跟作業單位討論。

間暴潮預報，將更完備！	
(四) 滕委員春慈	
1. 白鹿颱風模擬個案，報告書可以放比較受影響地區的潮位站，其他則可以放附錄參考。 2. 圖 4-6~4-11 建議增加詳細圖說以利閱讀。 3. 由颱風近中心預報誤差分布，明顯看出 12 小時預報的誤差準確且誤差分布集中，是否得到分析 12 小時的暴潮系集預報的應用可能更容易推廣。 4. 是否增加暴潮預報誤差分布圖？ 5. 有些颱風預報誤差存在 bias，是否考慮誤差分布先 de-bias？	1. 遵照委員建議辦理。 2. 遵照委員建議辦理。 3. 感謝委員建議，後續案例展示將會以颱風登陸前 12 小時之警報路徑進行相關分析。 4. 感謝委員建議，未來將與作業單位討論產品需求。 5. 現有誤差計算方式為透過預報結果與後分析之最佳路徑結果所得之誤差，其中誤差內存在之偏誤情形應屬於誤差群體之特性，經研究團隊討論後認為於現階段仍應保留該特性於系集預報中，但後續研究可納入探討移除誤差整體 bias 後對系集成員預報結果之影響。
(五) 朱委員啟豪	
1. 暴潮系集系統可嘗試進行簡化操作流程以利本局預報員上線作業。	1. 感謝委員建議，後續將與作業單位討論如何更進一步簡化流程。

九、審查結果：

審查通過。

十、散會。(上午 16 時 20 分)

八月份工作會議紀錄

時 間：110 年 8 月 26 日下午 2 時 0 分

地 點：Google meet 視訊會議

主 席：滕春慈主任

記 錄：林君蔚

出席人員：中央氣象局

林芳如課長、楊天璋

國立中央大學團隊

吳祚任教授、林君蔚、曹瑤、范子軒

壹、執行團隊簡報：略

貳、會議討論：

1.請中央大學與海象中心討論 PCC 預報系統配合監控系統之執行可行性。

2.請作業單位協助確認中央大學連線颱風警報單 API 權限問題。

參、會議結束時間：下午 4 時 15 分

陳麗長

楊天璋

08/27/08/10

課長林芳如
08/28/08/25

主任滕春慈
08/28/09/20

十月份工作會議紀錄

時 間：110 年 10 月 29 日下午 2 時 0 分

地 點：Google meet 視訊會議

主 席：滕春慈主任

記 錄：林君蔚

出席人員：中央氣象局

林芳如課長、楊天璋

國立中央大學團隊

吳祚任教授、林君蔚、曹瑤

壹、執行團隊簡報：略

貳、會議討論：

1. 已完成評估現有參數化風場，進行參數校正以更符合觀測資料。
2. 評估參數化風場校正之必要性。
3. 未來工作項目會提供現有之風暴潮預報系統維護報告及提交期末報告。

參、會議結束時間：下午 3 時 30 分

陳閱長
楊天璋

1029/
11610

課長林芳如
1029/1700

主任滕春慈
1029/1715

交通部中央氣象局

「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (1/3)」

期末報告審查會議紀錄

一、標案名稱：「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究 (1/3)」

1102048B

二、廠商名稱：國立中央大學

三、審查日期：110 年 12 月 22 日 (星期三) 14 時 0 分

四、地點：616B 會議室

五、主持人：滕委員春慈

紀錄：陳維翔

六、出席人員：

單位	姓名	簽名
國立臺灣大學	詹益齊	詹益齊
	簡仲璟	簡仲璟
中央氣象局 海象測報中心	滕春慈	滕春慈
中央氣象局 氣象預報中心	林秉煜	請假
中央氣象局 科技中心	柳再明	柳再明

業務單位：

陳維翔

廠商：

吳仲任

七、簡報計畫研究成果：(略)

八、審查意見與回覆：

委員意見	廠商回覆
(一) 詹委員益齊	
1. 本報告書中針對計畫書中本年度以下各項期末預計交付項目皆有詳細的描述與說明： 7.配合本局不定期之查訪 8.以觀測資料整理未來系集分析用之參數畫風場參數 9.暴潮參數化模式之作業化報告 10.進行暴潮模式更新版本之個案模擬與分析 11.廠商於期末報告須附上績效報告 12.伺服器弱點修復	1. 感謝委員肯定。
2. 報告書中提到眾多理論與經驗公式，各方程式的正確性與符號的說明難免會有編寫上的些許筆誤。這些小錯誤雖可能不致影響整體分析結果，但建議仍可修正這些細微的錯誤。	2. 感謝委員建議，錯誤部分將於完稿中修正。
3. 本報告藉由豐富的實例分析，試圖在眾多既有的氣壓場及風場模式中選擇較合適本土情境的模式。報告中詳細的實例結果可作為成果分析有力的依據，就理論基礎方面，建議是否可考慮加強說明各既有模式相對應的理論背景及原本的適用範圍。此外，氣壓場模式及風場模式之間是否能任意搭配套用、各參數的選定、變數間的轉換等事項建議或許都可加強討論與說明。	3. 感謝委員建議，委員建議增補之模式理論背景將統整後於完稿中增述。
4. 本報告為三年期計畫的第一年，相信有一些工作項目是有年度持續性，建議在第八章結論的部分	4. 感謝委員建議，結論內容將於完稿中調整。

或許可以更加具體地說明這些持續性工作現階段成果及後續工作計畫。另外，結論的論述似乎有些許部分與期中報告重疊，建議是否加以更新較能反映最新的工作成果與進度。 5. 報告書中展示了豐富的實例與情境分析成果。受限於篇幅的壓縮，圖片難免略小導致閱讀與理解上的不便，建議是否可考慮將代表性的案例加以放大，或許能更清楚地呈現其所代表的特徵。	5. 感謝委員建議，遵照辦理。
(二) 簡委員仲璟	
1. 港灣海堤對暴潮預報準確度之影響(港內外巢位資料分析比較)，在17頁所述"本研究預計利用模式(哪一個模式？是 Utide？)現有潮汐預報成果，及局內調和分析預報成果，比較兩者與觀測資料之差異"。這樣的差異如何比較出港內外潮位變化的差異？建議參照5.4做修正。 2. 第四章第4.2及4.3兩小節，建議修改為4.3強度參數對系集預報之影響、4.4路徑參數對系集預報之影響、4.5強度及路徑參數對系集預報之影響 3. PCC 版本之暴潮預報系統，如圖7-1所示，需要颱風警報單提供強度及路徑等參數資料，以目前警報單內資料區間為12小時(第35頁所述)，若此區間變長，對預報準確度提升是否有幫助？PCC 在後處理部分的效率有大幅提升，後續是否改用？	1. 感謝委員建議，遵照辦理。 2. 感謝委員建議，遵照辦理。 3. 警報單預報發布總時長可達120小時，其中前72小時預報資料點以12小時為間隔。在內部測試中發現，礙於模式效能，模式預報時長達到120小時恐壓縮到後續預報員處理預報產品對外發布之時效性，且隨著預報時間拉長，後續預報之颱風位置誤差會越大，在折衷情形下現選用72小時預報時長進行作業。PCC 在後處理產品部份大幅提升，現階段

4. 第38頁所述"為求選取系集成員的方式統一，後續研究皆採取 T 位置尺度分布之機率密度分布函數作為產生系集預報路徑成員之依據"，為何採 T 位置尺度分布？Normal 及 Logistic 分布不佳？此外氣壓、七級風半徑及近中心最大風速是否也是採 T 位置尺度分布？ 5. 第59頁。由分析中發現強度參數中氣壓比風速對暴潮有較大的影響，但七級風半徑似乎沒有討論？ 6. 5.3節顯示 Utide 比目前作業中調和分析為佳，此是否後續之調和分析將改用 Utide 模式？ 7. 第174頁所述之資料平均值及趨勢斜率如何得知？其意義為何？本	仍交由作業單位評估需直接移轉或是採雙系統並行作業。 4. 機率密度分布函數在選用時的基準為最能夠表達過往預報誤差分布情形者，雖然資料分布情形可以透過多種合適的機率密度曲線描述，但研究中判定之依據為函數曲線是否能夠捕捉大部分資料極端集中於中心，且資料尾部分布較窄的情形。在各項誤差分布情形下，T 位置尺度分布用目視判定可以得到三者之間最佳的表現，並非另外兩種分布不適用。而颱風強度參數等誤差分布情形與路徑誤差分布情形相似，為精簡研究呈現方式，故所有成員皆採用 T 位置尺度分布曲線計算並取得。 5. 現作業中局內理想風場之颱風強度參數中，並未使用到七級風半徑參數推估颱風結構，因此團隊選擇於報告中精省相關討論。 6. 研究內容中選用資料為局內資料提供，但並未依據特定天氣特徵為調和分析用水位進行更進一步的濾除或品管，因此現有調和分析參數中很有可能含有非天文潮訊號，對天文潮本身的分潮分析實屬有待商榷的結果。研究能取得加以比對的局內調和分析水位屬於作業單位的歷史資料，實則作業單位針對調和分析的作業仍持續精進，因此本次研究成果尚屬與作業單位分享及交流階段，無法透過本次結果判斷模式的可替代性。 7. 資料平均值為該測站中選用資料之平均值，透過該平均值可以判
--	---

5.4節目的是探討細部地形結構(例如海堤、防波堤等)對潮位影響所需的網格解析度門檻。目前認為至少2公里，此是否足夠？ 8. 第6.3節探討最大風速半徑目的為何？是否欲評估比較與七級風半徑的差異？ 9. 大量的系集成員可能造成過度預報。因此決定性預報即可？沒有系集預報的需要？還是目前系集預報準確度仍有提升空間？	斷選用資料區間與測站定高海水位面間的差距，作為模式校正水位基準之參考。趨勢斜率為判定資料分布是否整體持續向上/向下，在資料記錄基準並未變動的情況下，趨勢斜率在本研究中用於協助判斷資料中是否藏有長周期分潮。研究中因現有預報系統於台灣本島之網格解析度為2.0公里，但尚不足以解析港內外細部地形結構對潮位的影響，因此研究結論僅能表示至少需要2.0公里以下的解析度，但地形資料多細部才足以解析該資訊，實須留待後續工作項目持續研究。 8. 探討最大風速所在半徑的目的在於取得前人理想風場模式之必要參數，以往使用方法為透過七級風半徑以推估最大風速半徑，本研究為精進理想風場模式故試圖採用他人研究並找出比現有推估方法更符合現實情況之統計模式加以採用。 9. 系集預報的主要存在意義在於輔助推估決定性預報可能的誤差範圍，而於現階段系集過度預報的情形表示尚有精進的空間。
(三) 柳委員再明	
1. 預計三年後可以提供怎麼樣的結果？	1. 本計畫重點預期完成之工作項目及具體成果主要分為3大項，皆屬提升模式精準度之相關研究。於「暴潮溢淹預報模式精準度提升研究」方面，預計透過精進理想風場模型進而改善颱風暴潮之決定性預報成果，並透過轉移預報系統作業平台以提升預報時效。於「暴潮系集預報模式精準度提升研究」方面，預計透過，

2. 現實環境中的風場與雨帶皆不對稱，是否能在颱風模式應用或相關資料如何帶入？(本局颱風模式之颱風資料的啟用) 3. "參數化"的名詞解釋，在海洋學及氣象學中有不同意義。 4. 超級電腦的使用度，目前用幾顆	透過路徑分布、颱風強度、與參數化風場類型等，發展適合台灣之系集預報模式，以作為決定性預報的輔助，期待提供預報作業員更多的參考。於「港灣海堤遮蔽效應對風暴潮預報準確度之影響分析」方面，為提升分析颱風暴潮時可校驗資料之品質，研究中除了盡可能利用局內作業調和分析模式及其他模式濾除天文潮外，亦預計在可取得之最精細地形下探討現有潮位觀測站設置於港口內部對於資料的影響，以提供颱風暴潮預報模式結果與觀測資料比對時可能的誤差來源的參考依據之一。 2. 現有作業化暴潮預報模式中擁有兩種氣象場輸入選項且各具優勢。其中之一便為考量現實環境中的颱風情形而選用局內颱風模式（TWRP）作為二維氣象場資料之輸入，且該選項之預報作業與局內颱風模式預報頻率相同，皆為一天四次。理想風場的用途與之相比，具備簡潔、效率、彈性及相對較低需求的計算成本，對於利用統計方法調查風暴潮危害，或是在製造大量假想合成的熱帶氣旋時頗具優勢，在國外颱風暴潮系集預報中被廣泛使用。於颱風警報期間之預報作業中，兩種氣象輸入場所得之模式結果皆能輸出並加以比較。 3. 感謝委員建議，後續完稿中預計將「參數化風場」調整為「理想風場」以減低不同專業領域交流時的困擾。 4. 目前作業化測試中使用的 CPU
--	--

CPU，最多可以用到幾顆？可否測試？如何提高使用數量？	數量為32顆。因為程式架構採 OpenMP，非 MPI，因此在主機間的核心數使用方式有其限制，現有核心模式效能分析曾發布於以下期刊，而如何在模式現有架構下提高使用數量則需要後續評估： 1. Lin, S. C., Wu, T. R., Yen, E., Chen, H. Y., Hsu, J., Tsai, Y. L., ... & Philip, L. F. L. (2015). Development of a tsunami early warning system for the South China Sea. <i>Ocean Engineering</i>, 100, 1-18. 2. 現有 PCC 版本預報系統於109年度委託研究計畫「氣象局暴潮預報溢淹模式精進」開發時曾執行過核心數效能測試，引用報告內文及圖如下： 「以導入 TWRP 大氣模式之2020年10月11日0時（UTC）預報氣象場測試後，如圖1，當核心數設置20以上，COMCOT 暴潮模式執行時效並無明顯變化，使用20顆或24顆核心數計算一次完整暴潮模擬時間約為34分鐘，而使用30顆或32顆核心數計算一次完整暴潮模擬時間約為33分鐘。而由圖2可知，加上氣象場輸入、潮汐邊界執行、以及預報產品輸出，COMCOT 暴潮預報系統於設置30顆或32顆之總執行時長約為74分鐘。」
------------------------------------	---

5. 預報點若在人多的地方(如：龍洞)，或重點區域，能否提高解析度？(Nested)	<table border="1"> <caption>Figure 1 Data: COMCOT Average Execution Time</caption> <thead> <tr> <th>核心數</th> <th>時間(分鐘)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2</td><td>70.5</td></tr> <tr><td>4</td><td>53</td></tr> <tr><td>8</td><td>42</td></tr> <tr><td>12</td><td>38</td></tr> <tr><td>16</td><td>36.5</td></tr> <tr><td>20</td><td>34.5</td></tr> <tr><td>24</td><td>34</td></tr> <tr><td>30</td><td>33</td></tr> <tr><td>32</td><td>33</td></tr> </tbody> </table> 圖1 核心數使用數量與 COMCOT 暴潮模式平均執行時間 <table border="1"> <caption>Figure 2 Data: Total Execution Time</caption> <thead> <tr> <th>核心數</th> <th>時間(分鐘)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2</td><td>149</td></tr> <tr><td>4</td><td>114</td></tr> <tr><td>8</td><td>92</td></tr> <tr><td>12</td><td>83</td></tr> <tr><td>16</td><td>80</td></tr> <tr><td>20</td><td>77</td></tr> <tr><td>24</td><td>77</td></tr> <tr><td>30</td><td>74</td></tr> <tr><td>32</td><td>74</td></tr> </tbody> </table> 圖2 核心數使用數量與 COMCOT 暴潮模式平均執行時間 5. 感謝委員建議，團隊在後續研究將評估在預報時效下如何利用巢狀網格於重點區域提高解析度。	核心數	時間(分鐘)	2	70.5	4	53	8	42	12	38	16	36.5	20	34.5	24	34	30	33	32	33	核心數	時間(分鐘)	2	149	4	114	8	92	12	83	16	80	20	77	24	77	30	74	32	74
核心數	時間(分鐘)																																								
2	70.5																																								
4	53																																								
8	42																																								
12	38																																								
16	36.5																																								
20	34.5																																								
24	34																																								
30	33																																								
32	33																																								
核心數	時間(分鐘)																																								
2	149																																								
4	114																																								
8	92																																								
12	83																																								
16	80																																								
20	77																																								
24	77																																								
30	74																																								
32	74																																								
(四) 滕委員春慈																																									
1. 報告請增加綜整各工項在報告書的頁碼。 2. 同時考慮路徑、強度預差時，誤差機率分布是怎麼處理？ 3. 白鹿颱風模擬時，水位振盪比較大的潮位站和第5章的測站是否一致？ 4. 白鹿颱風模擬個案，未來可否測試系集成員在路徑僅使用3組？ 5. 建議未來可以選擇不同強度侵臺颱	1. 感謝委員建議，遵照委員意見辦理。 2. 在同時考慮路徑誤差成員 X 組與強度誤差成員 Y 組時，系集成員總數為 X*Y 組，並假設各成員的發生機率皆相同。 3. 水位震盪較大的潮位站實為成果展示時圖片的上下極限值不一致（±0.5 公尺與±1.0公尺）造成視覺上的差異，於完稿中將修正所有圖片產品的上下極限值使其一致。 4. 感謝委員建議，團對於未來案例測試中將會考慮減少路徑成員數並加以測試。 5. 感謝委員建議，本年度計畫工作																																								

風測試，看效果和輕度颱風的差異?包括系集成員的選擇 6. 使用 Utide 雖然可以和潮位站有較小差異值，但是並不能改善去除天文潮後某些潮位站水位振盪的問題。 7. COMCOT 邊界使用 TPXO(3公里解析)產生潮汐，是不是代表限制了複雜地型的潮汐預報能力？ 8. 目前參數化颱風均以對稱颱風為	項目主要為增加系集預報系統的系集成員選項，未來計畫執行期間將會投入更多精力著重歷史案例分析與系集成員的選擇對產品的影響。 6. 是的，本次計畫執行結果顯示即使使用不同模式進行調和分析去除觀測資料中的天文潮水位後仍有部分測站存在週期性的誤差，顯示測站長期觀測資料特性並不能夠以天文潮物理完整描述，計畫中提出該水位偏差震盪嚴重程度依據測站所在位置而有所不同，因此該現象很可能源自測站所在位置之地形特性，未來計畫工作項目中將更進一步探討港內外皆具備觀測水位資料的港口更進一步探討地形效應對於短距離間測站水位的影響。 7. TPXO 全球潮汐分析/預報模式的最高解析度為1/30度（約3公里），且模式選用之分潮為八個主要分潮位（M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1）、兩個長週期分潮位（Mf,Mm）和3個非線性分潮位（M4, MS4, MN4）。若以二維資料作為水位隨時變化之基準進行耦合的確有可能在數值地形解析度較低時難以解析複雜地形周圍的潮汐變化。研究中採用潮汐耦合的方式為透過模式計算域邊界傳入，未來工作項目預計透過調整巢狀網格之涵蓋範圍使潮汐於計算域邊界輸入時具備差異性，再針對重點研究區域加密地形解析度，以期減輕 TPXO 潮汐解析度網格對複雜地形解析的限制。 8. 現有理想颱風風場以對稱結構為
---	---

主，有無考慮不對稱颱風的結構？有無可能直接由模式選得颱風結構？ 9. 表6-6是指颱風結構內不同風速位置的誤差，還是指不同颱風強度？ 10. Rmax 使用觀測資料是否更為簡便？	主，並未考慮颱風的非對稱性結構，建議未來後續精進理想風場模式時可以列入非對稱颱風結構的風場計算，使其更接近實際颱風風場分布情形。 9. 表6-6為利用 ECMWF 取得之近中心最大風速及其所在半徑值，代入各理想風場模式後所得之二維風場分布，與 ECMWF 再分析風場互相比較後取得之方均根誤差，並依據颱風強度進行分類。 10. 在分析歷史個案時使用觀測資料將會較為直觀且較為理想，但由於颱風結構在預報過程中可能會有所變動，因此在預報啟動前觀測到之近中心最大風速所在半徑並不一定能夠適用完整的預報區間。目前工作項目探討方向為利用歷史資料及前人文獻整理出較為合適的統計模型，並作為預報期間推估近中心最大風速所在半徑值的參考。
--	---

附錄 B 維護紀錄



參數化風場暴潮預報模式 (PCC) 維護紀錄表

客戶：中央氣象局海象測報中心 聯絡人：施景峯 電話：(0223491198)

地址：台北市公園路 64 號

日期：110 年 4 月 22 日

維護內容：系統作業化測試

案例：2020 哈格比 (HAGUPIT)

作業化流程細節修正

預報產品輸出異常

到達時間：

離開時間：

遠端維護

客戶簽名：

技正朱啟豪

維護人員簽名：

林君蔚



參數化風場暴潮預報模式 (PCC) 維護紀錄表

客戶：中央氣象局海象測報中心 聯絡人：施景峯 電話：(0223491198)

地址：台北市公園路64號

日期：110年6月3日

維護內容：系統作業化測試(海警發布)

案例：2021彩雲(CHOI-WAN)

測試排程系統啟動預報流程

排程記錄無異常

到達時間：

離開時間：遠端維護

客戶簽名：

技正朱啟豪

維護人員簽名：

林君蔚



參數化風場暴潮預報模式 (PCC) 維護紀錄表

客戶：中央氣象局海象測報中心 聯絡人：施景峯 電話：(02) 23491198

地址：台北市公園路 64 號

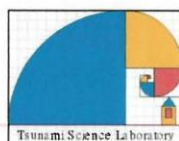
日期：110 年 7 月 1 日

維護內容：系統作業化預報測試
與作業單位協同測試

到達時間：遠端維護
離開時間：

客戶簽名：技正朱啟豪

維護人員簽名：林君蔚



參數化風場暴潮預報模式 (PCC) 維護紀錄表

客戶：中央氣象局海象測報中心 聯絡人：林芳如 電話：(02) 23491313

地址：台北市公園路 64 號

日期：110 年 07 月 20 日

維護內容：

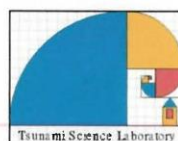
指定機器弱點修復作業 (130、157、181、234)

到達時間：線上維護作業

離開時間：

客戶簽名：課長林芳如

維護人員簽名：林君蔚



參數化風場暴潮預報模式 (PCC) 維護紀錄表

客戶：中央氣象局海象測報中心 聯絡人：林芳如 電話：(02) 23491313

地址：台北市公園路 64 號

日期：110 年 08 月 12 日

維護內容：

修復 METWATCH 潮高預報圖的暴潮預報產品傳輸

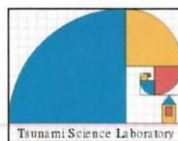
完成修復指定機器掃描弱點 (VNC server 設定@232)

到達時間：線上維護作業

離開時間：

客戶簽名：課長林芳如

維護人員簽名：林君蔚



參數化風場暴潮預報模式 (PCC) 維護紀錄表

客戶：中央氣象局海象測報中心 聯絡人：林芳如 電話：(02) 23491313

地址：台北市公園路 64 號

日期： 110 年 08 月 26 日

維護內容：

PCC 參數化預報系統作業化預報監測

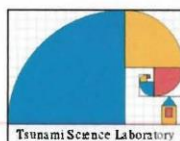
統整監測案例報告 (2021 烟花 IN-FA、盧碧 LUPIT)

到達時間：線上維護作業

離開時間：

客戶簽名：課長林芳如

維護人員簽名：林君蔚



參數化風場暴潮預報模式 (PCC) 維護紀錄表

客戶：中央氣象局海象測報中心 聯絡人：林芳如 電話：(02) 23491313

地址：台北市公園路 64 號

日期：110 年 09 月 24 日

維護內容：

PCC 參數化預報系統作業化預報監測

統整監測案例報告 (2021 燦樹 CHANTHU)

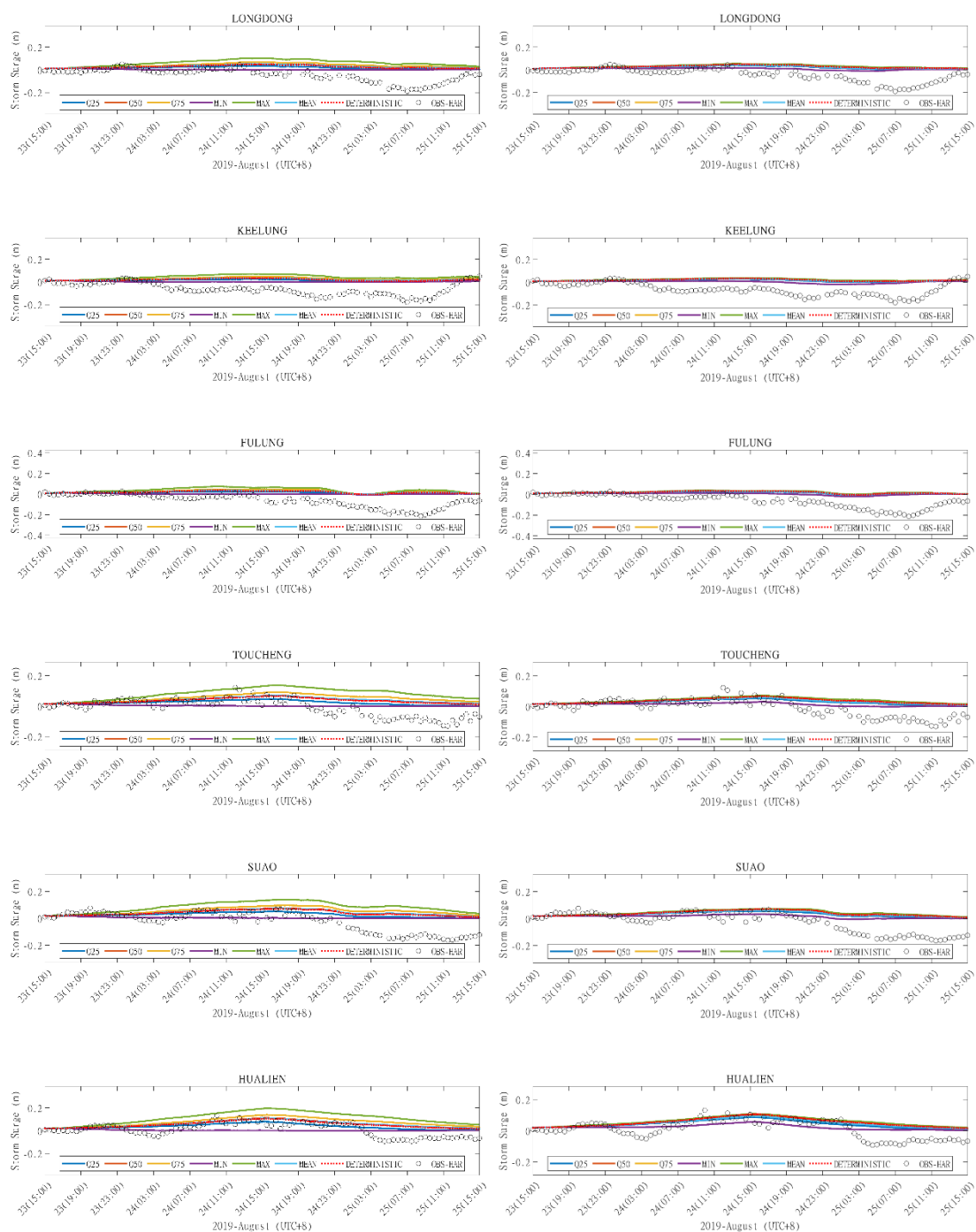
到達時間：線上維護作業

離開時間：

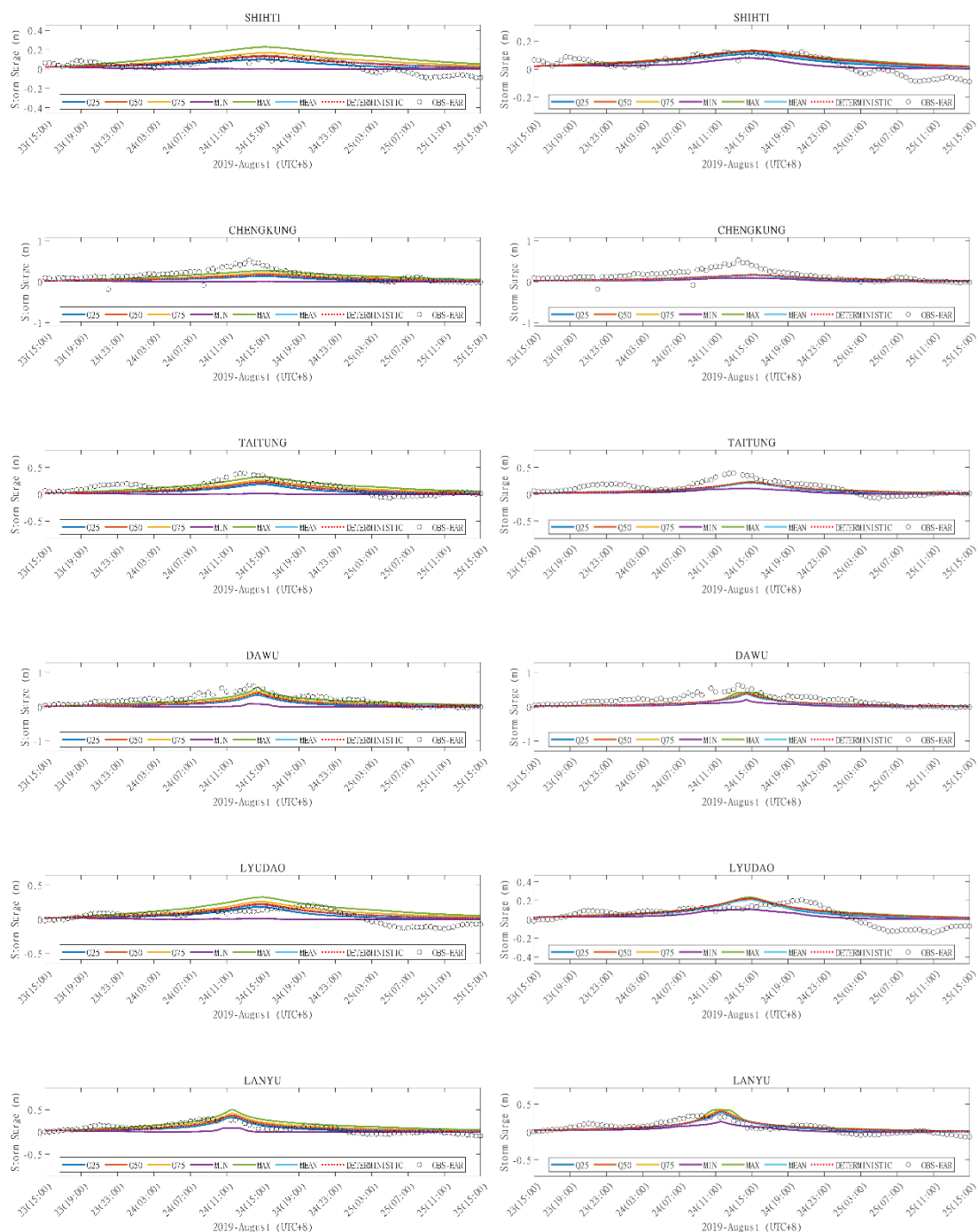
客戶簽名： 課長林芳如

維護人員簽名： 林君蔚

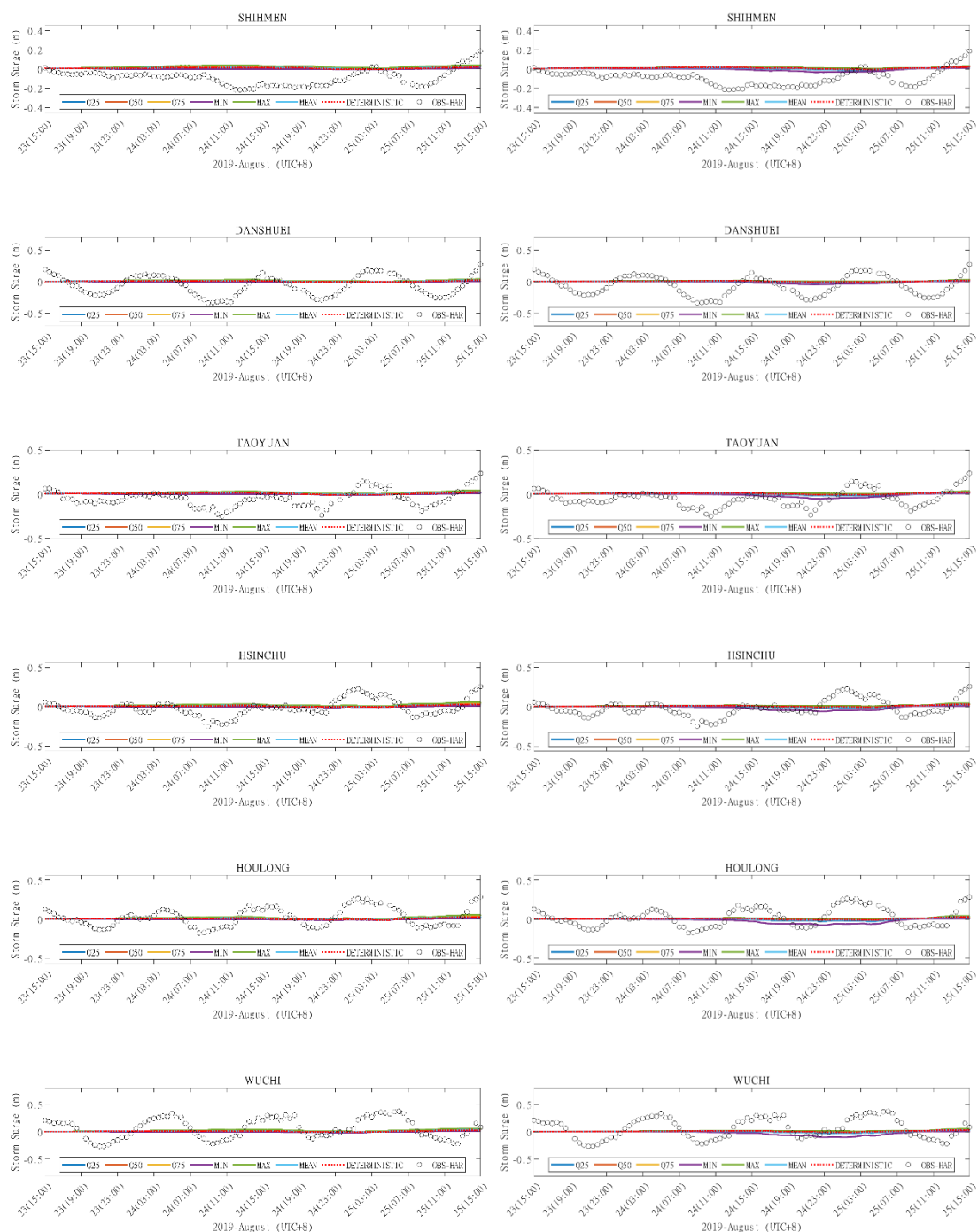
附錄 C 強度參數對系集預報影響對測站水位影響



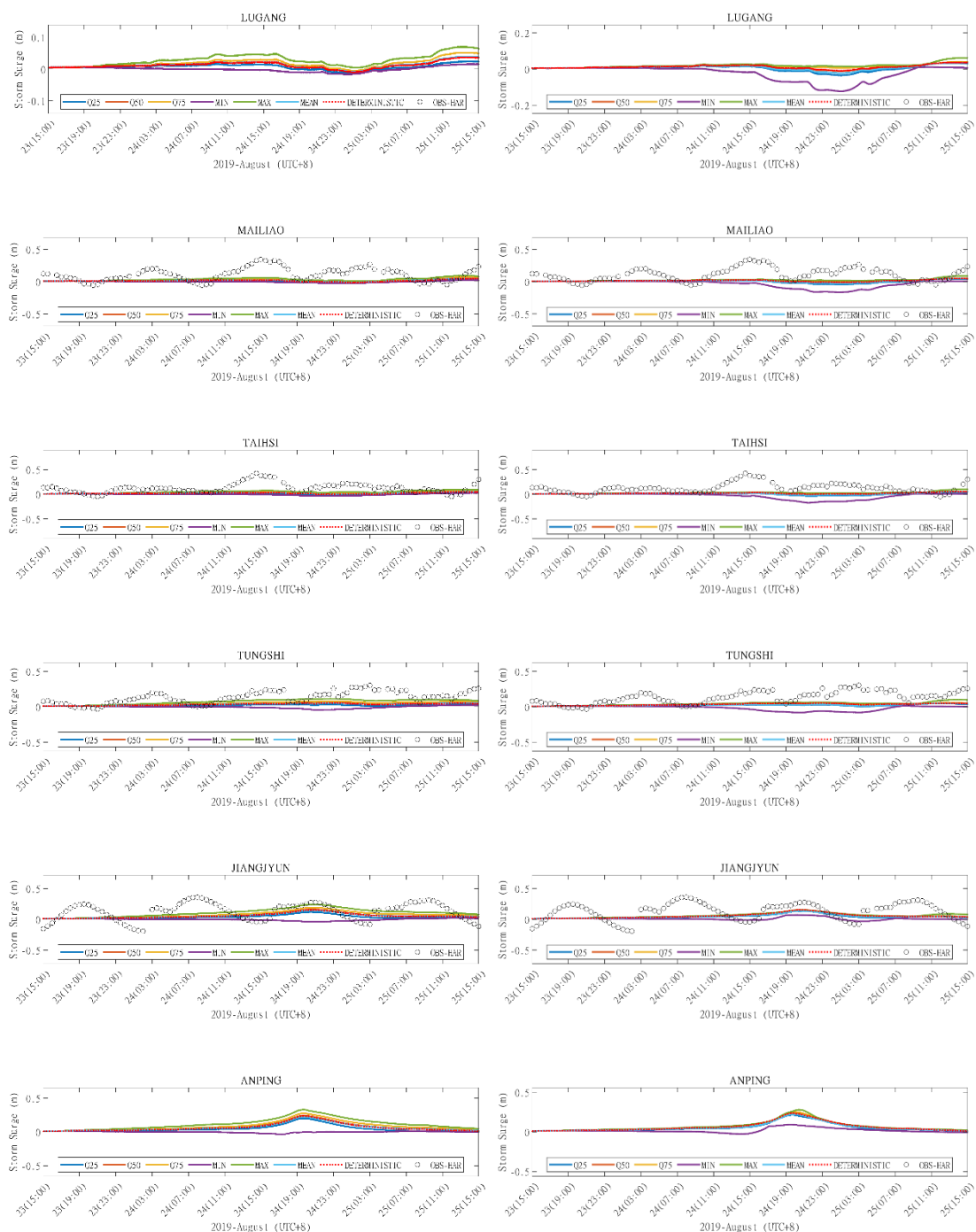
圖附— 1 強度參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員



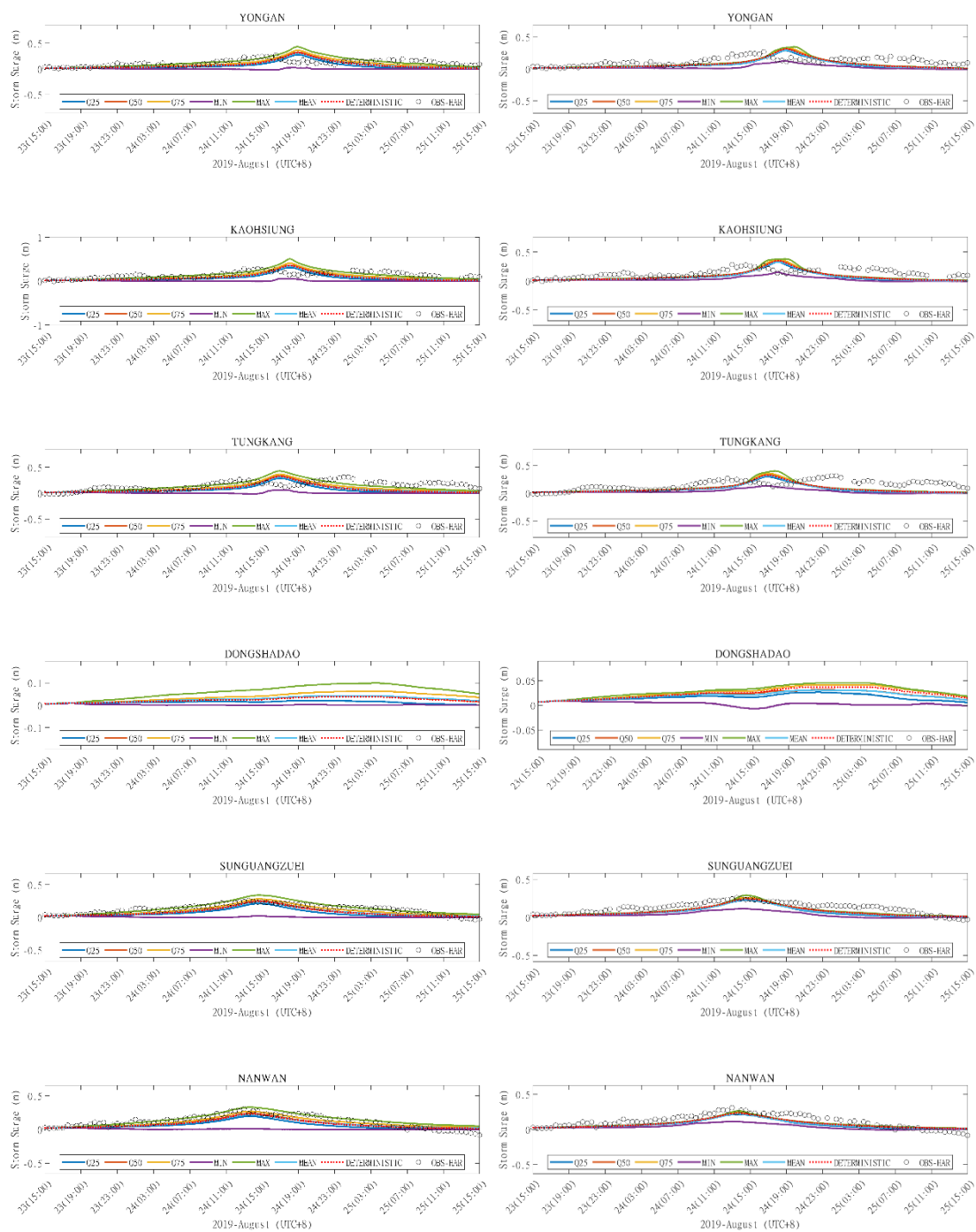
圖附— 2 強度參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員



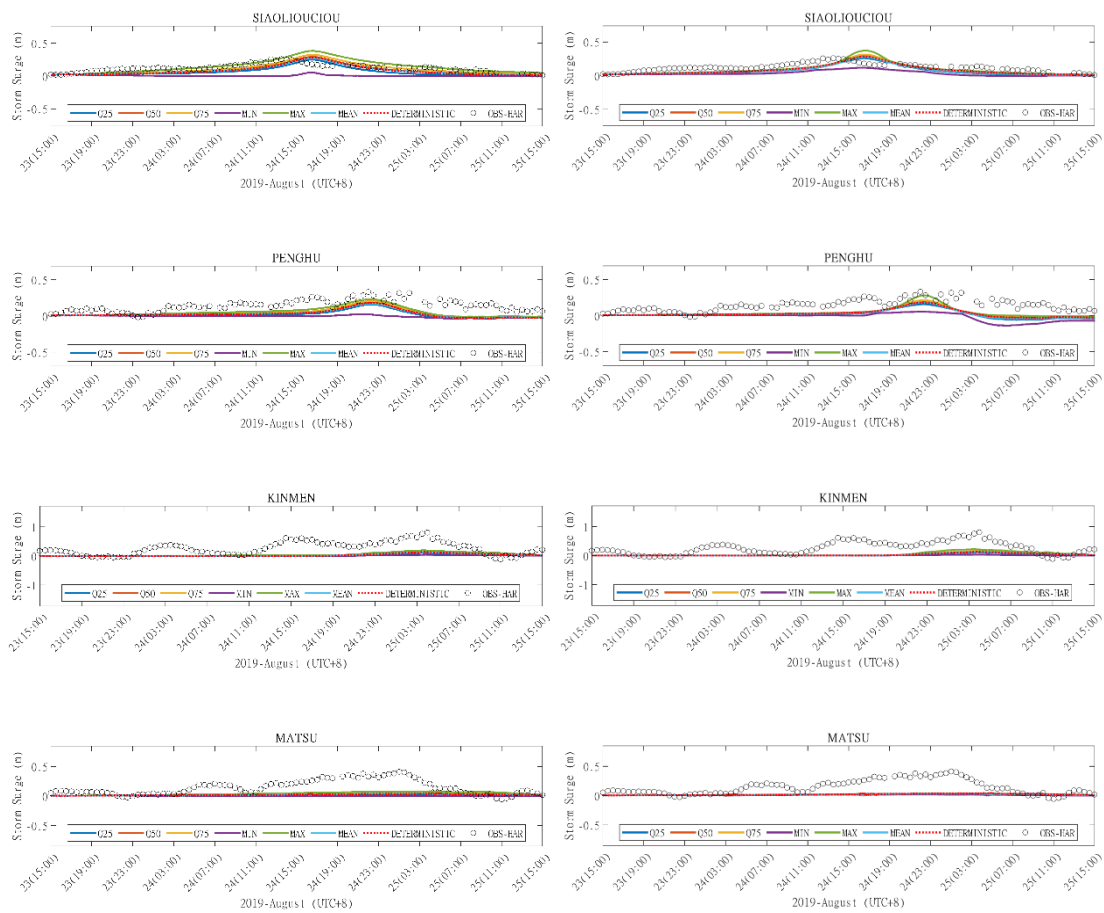
圖附— 3 強度參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員



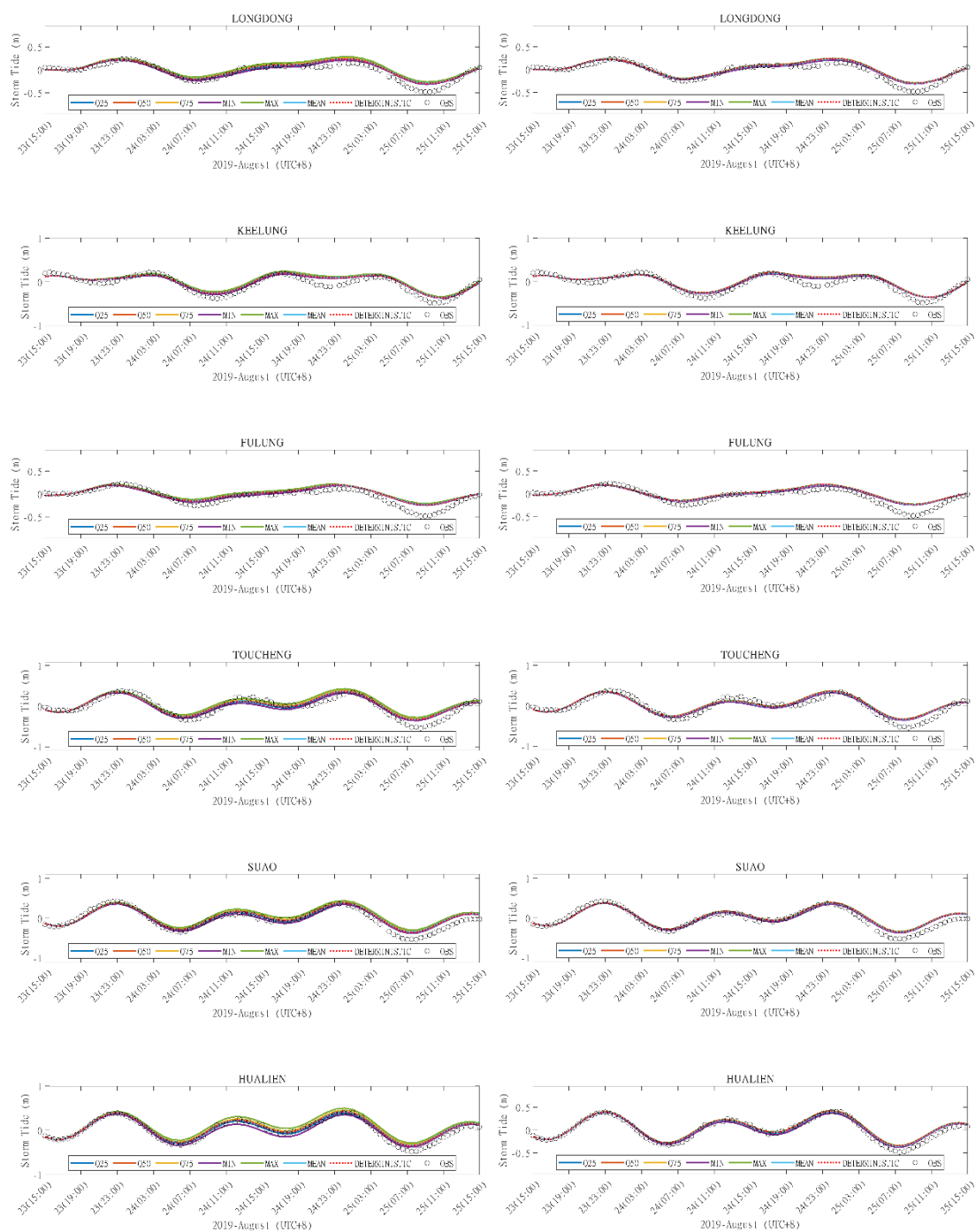
圖附— 4 強度參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員



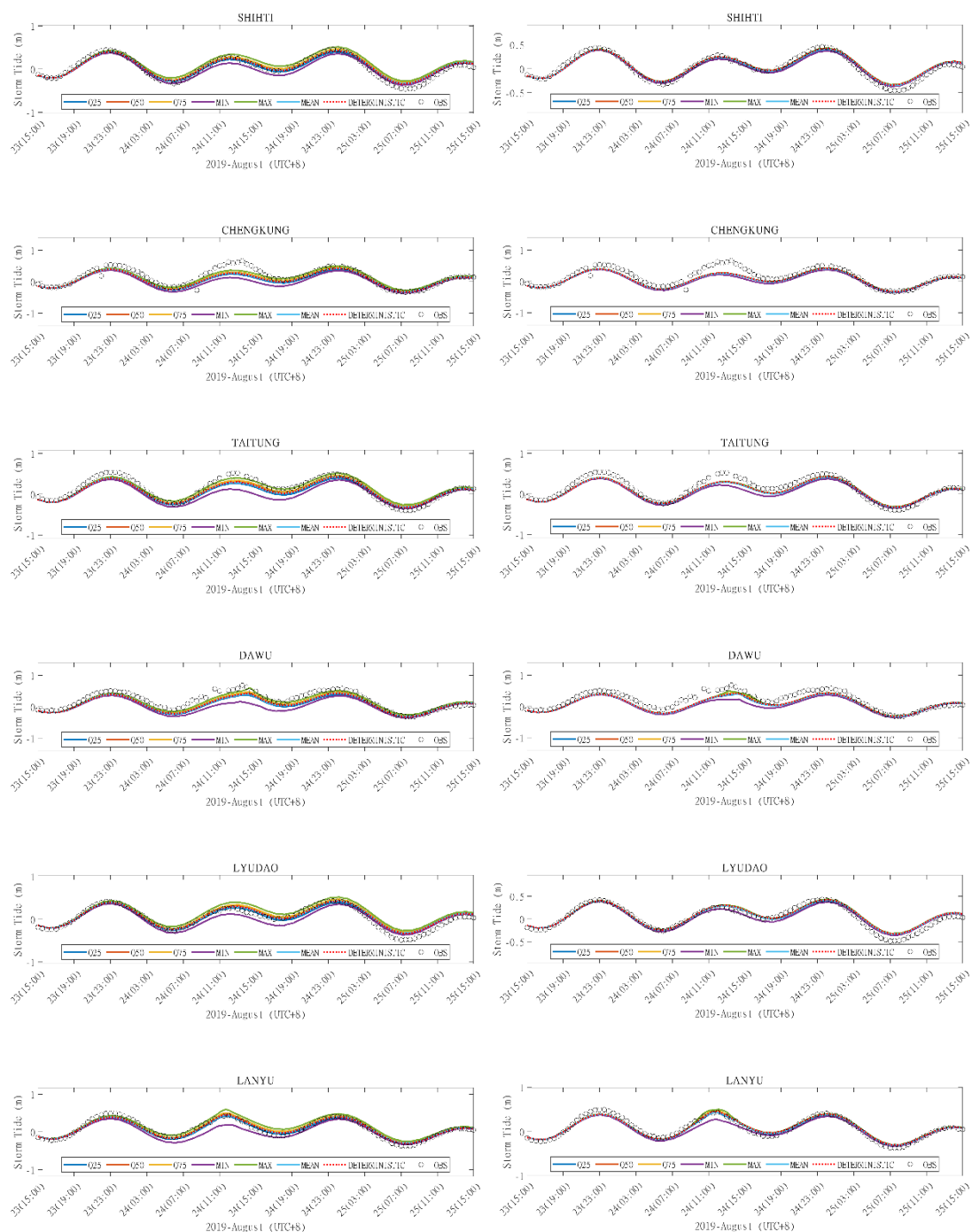
圖附— 5 強度參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員



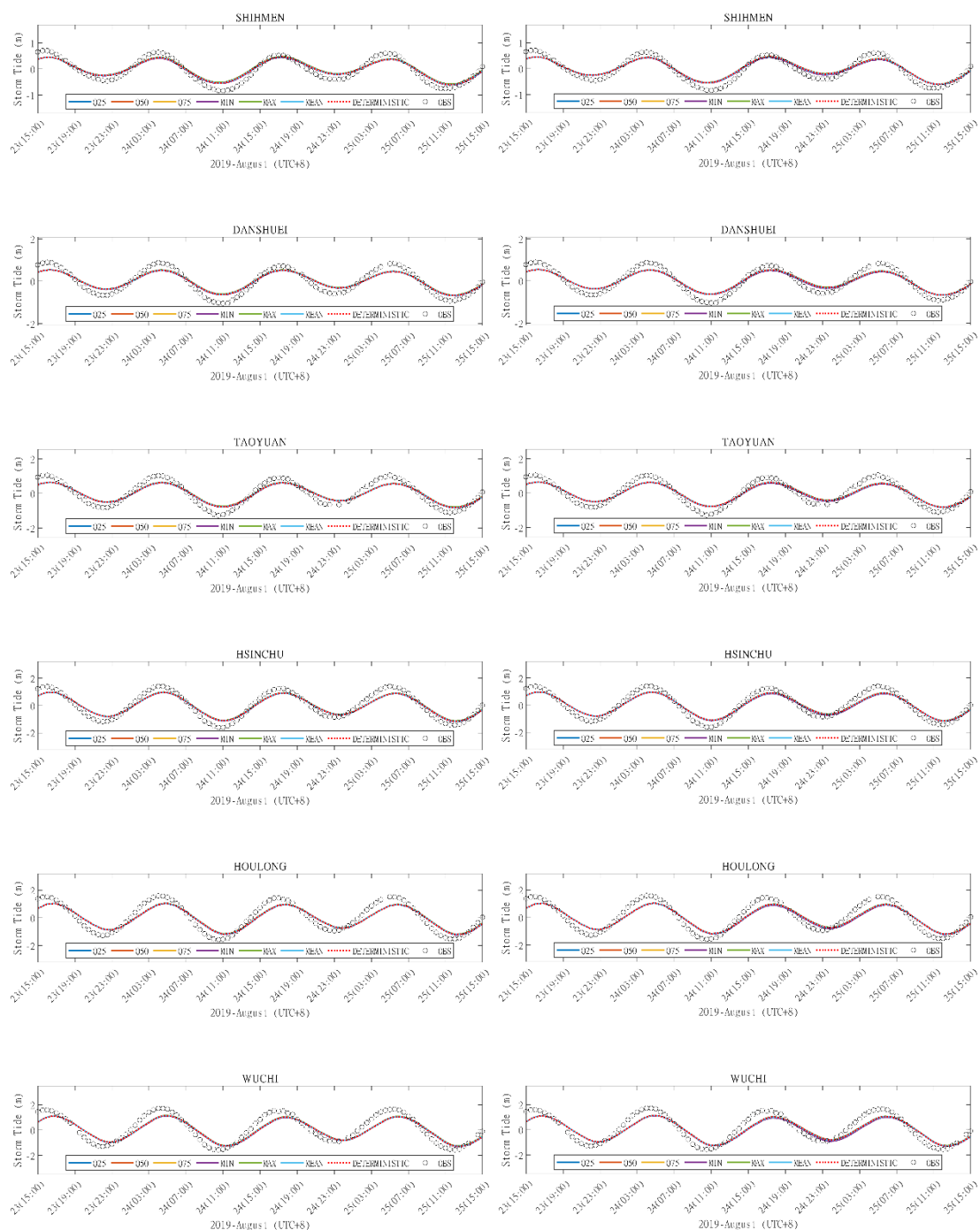
圖附— 6 強度參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員



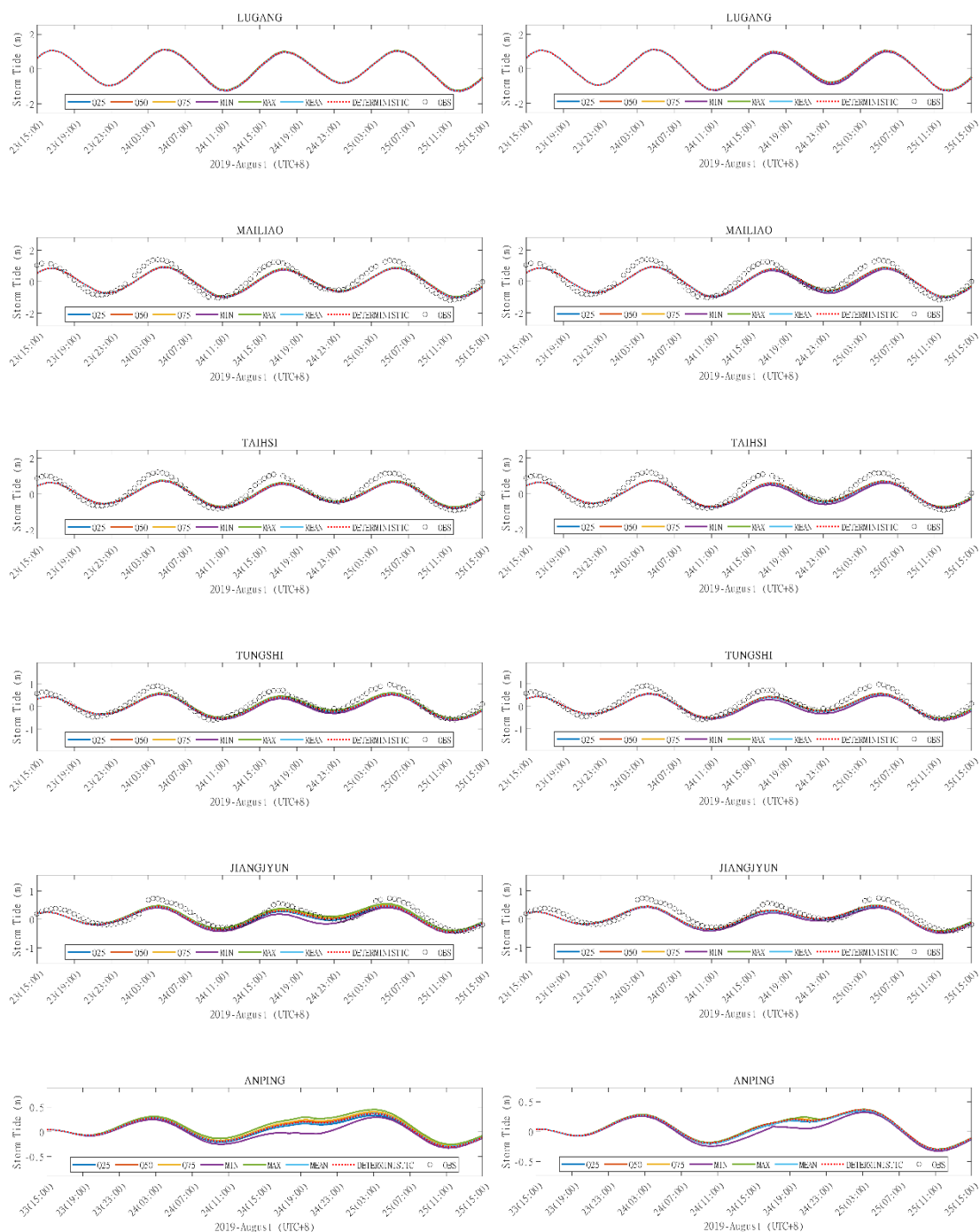
圖附— 7 強度參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員



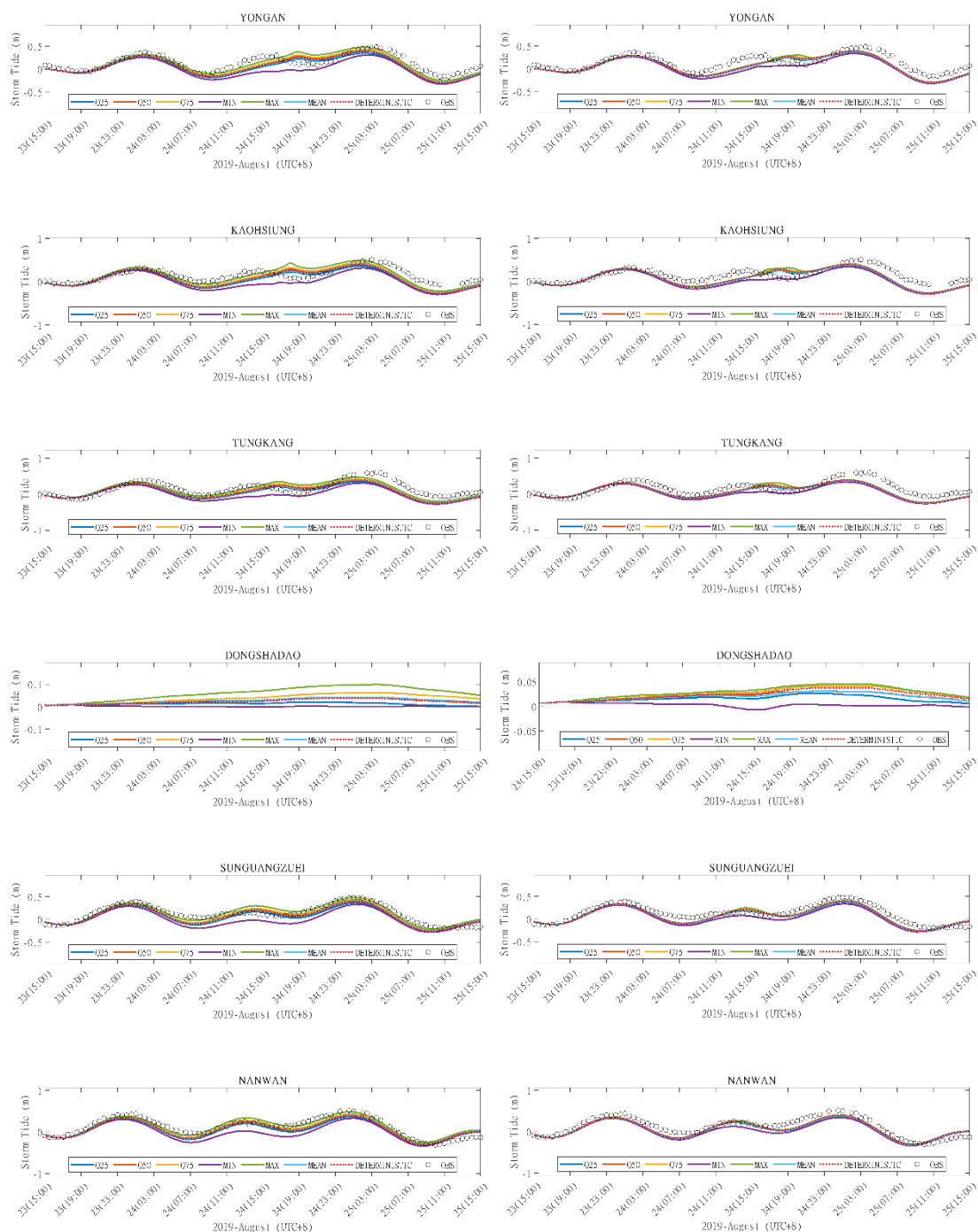
圖附一 8 強度參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員



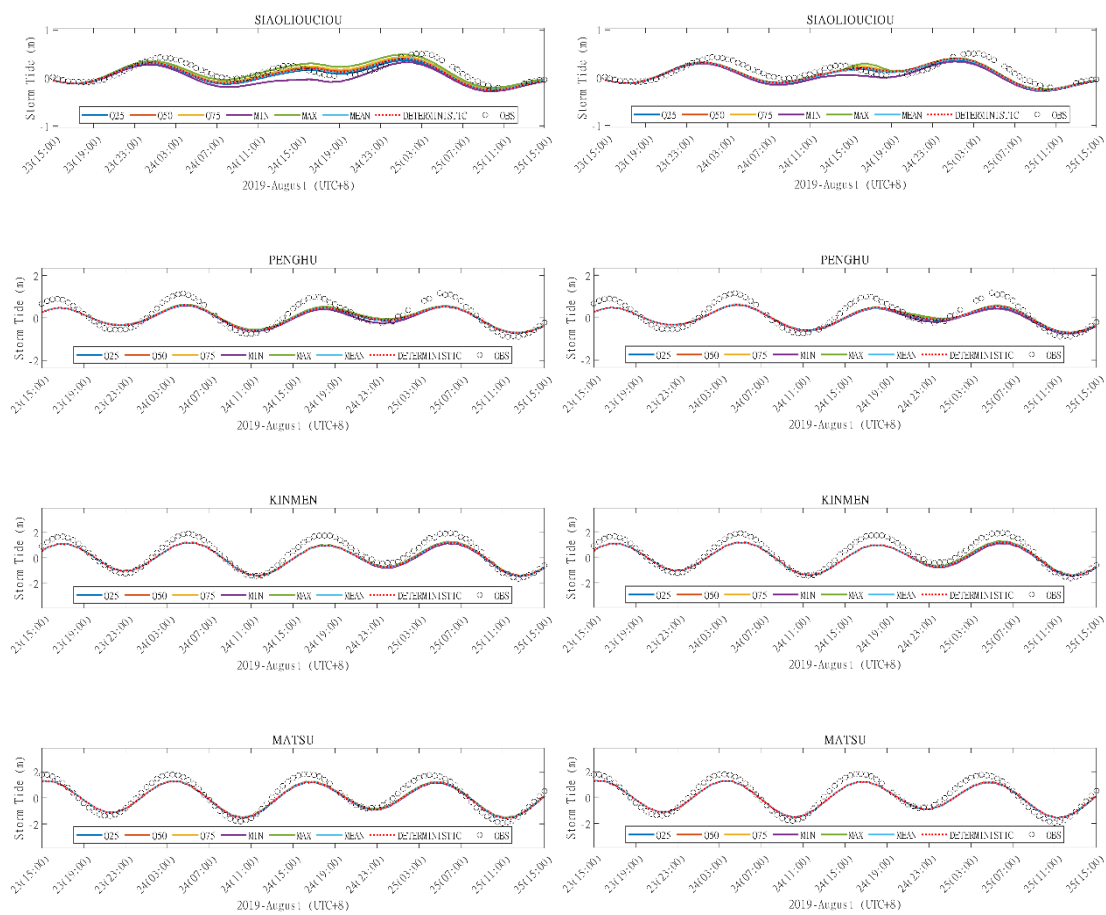
圖附一 9 強度參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員



圖附一 10 強度參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員

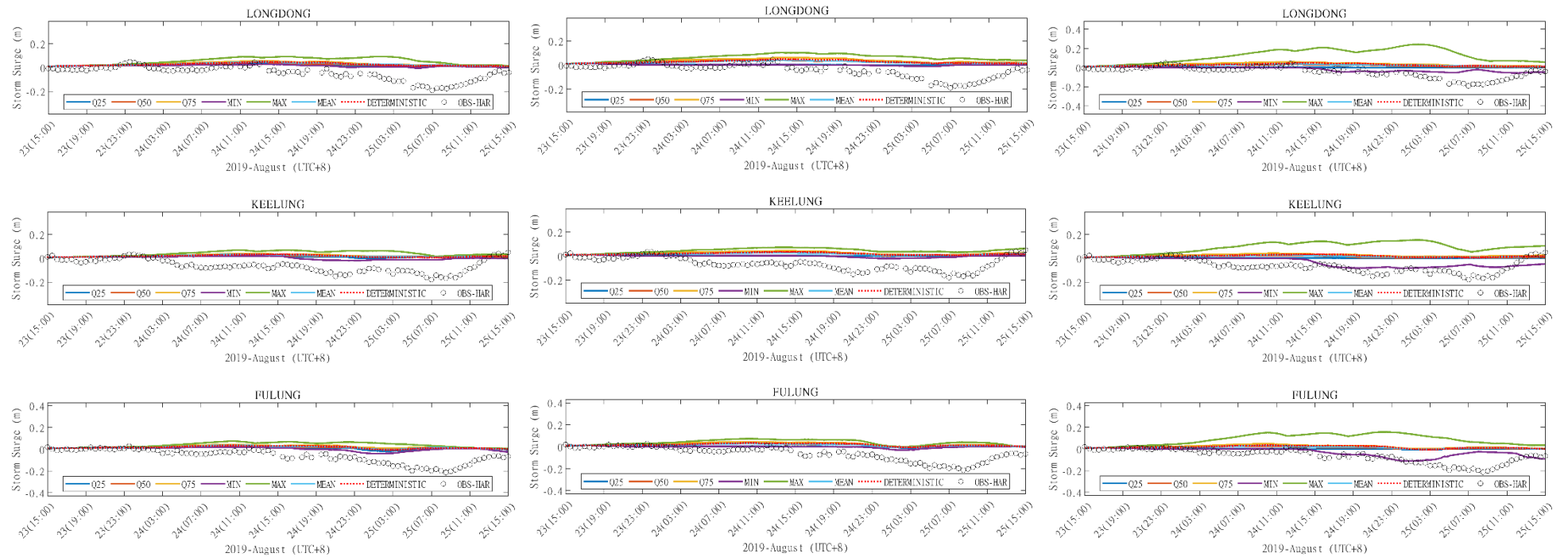


圖附— 11 強度參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員

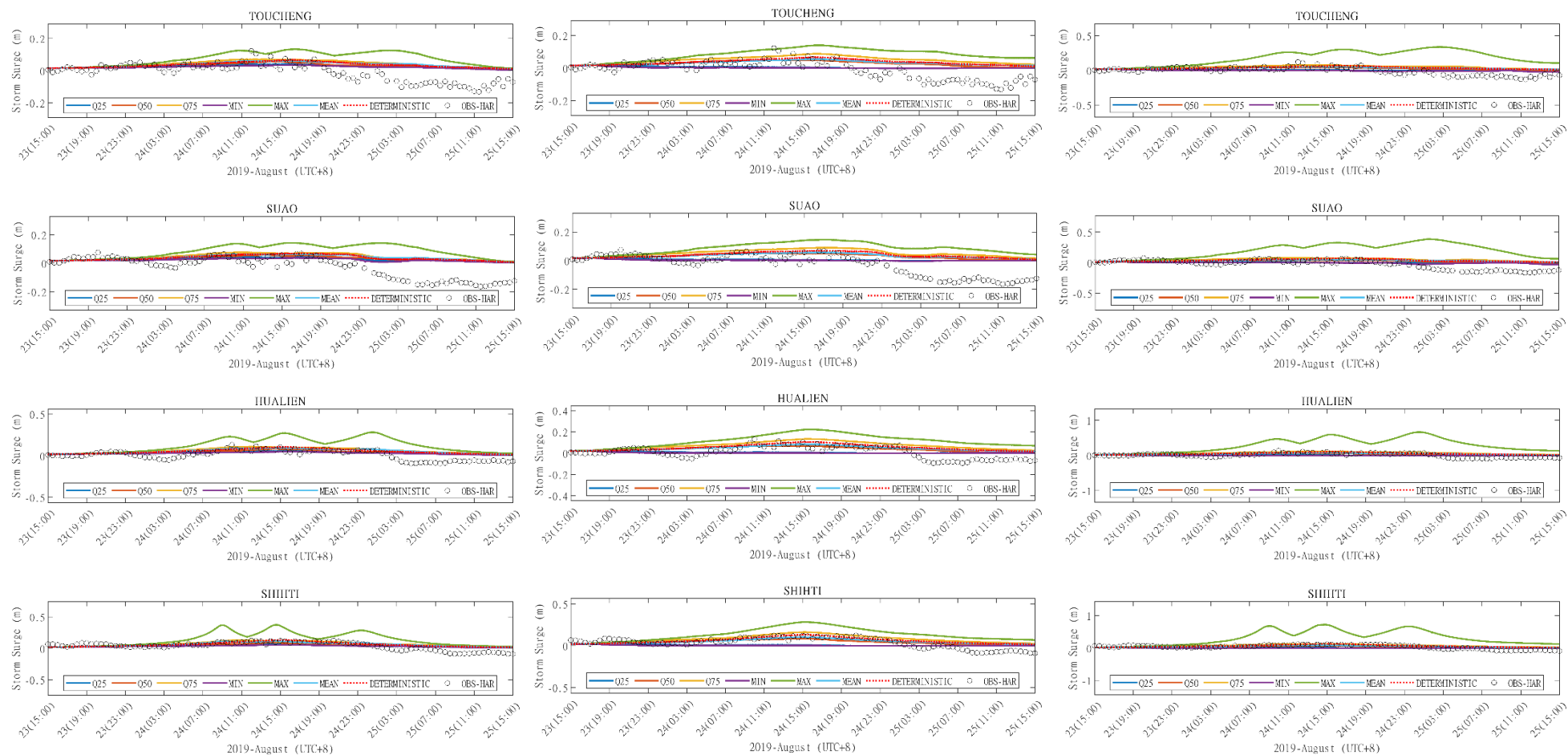


圖附一 12 強度參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員

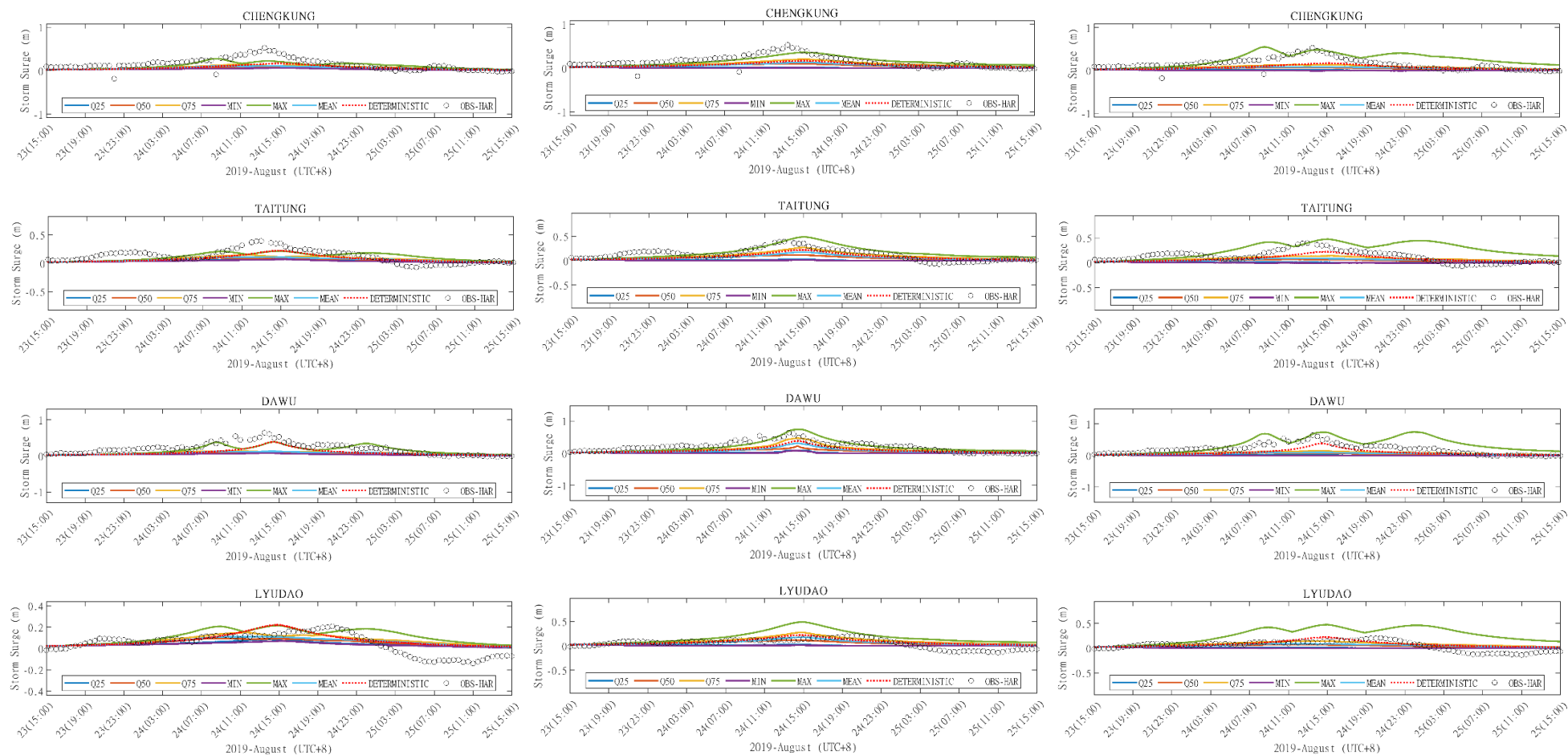
附錄 D 路徑與強度參數對系集預報對測站水位影響



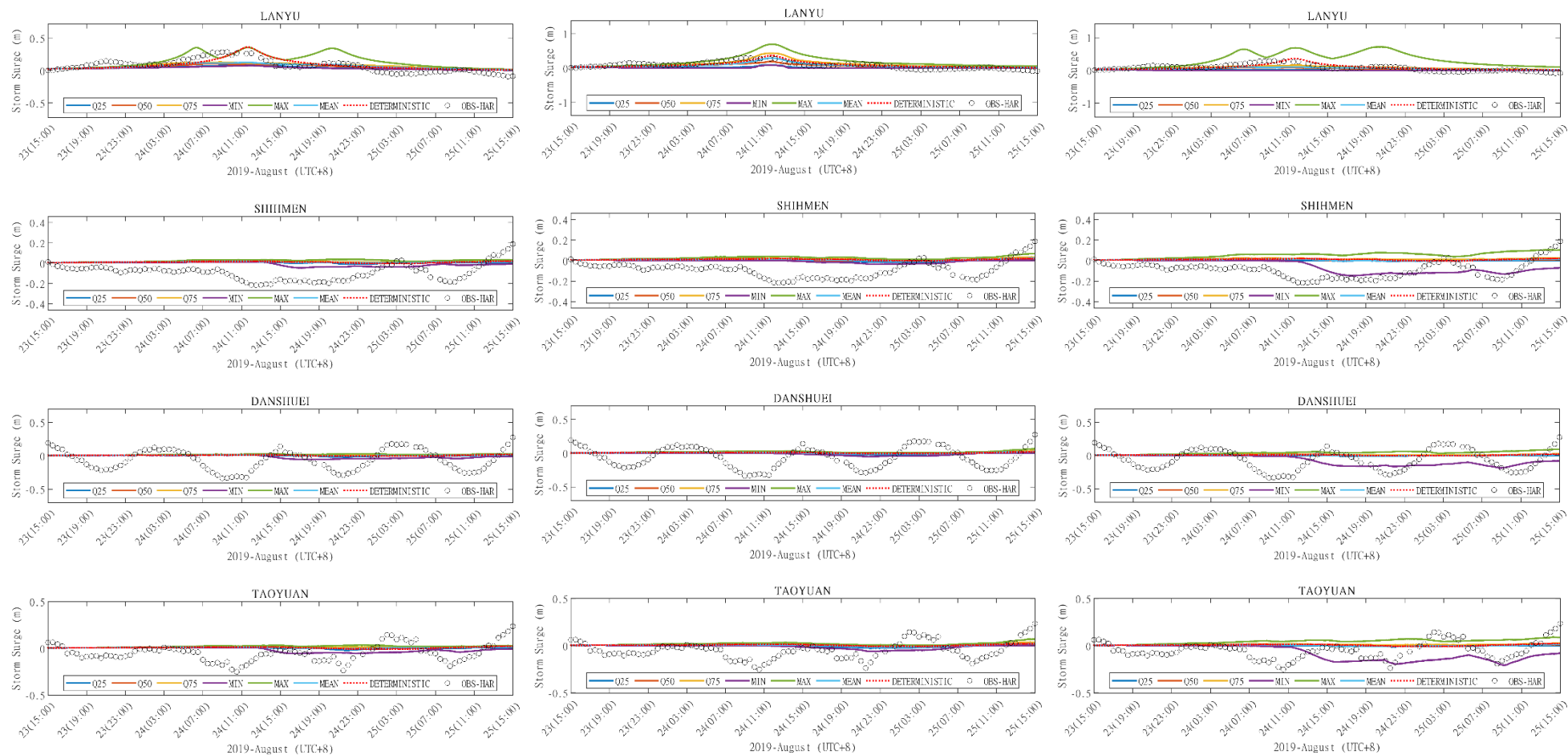
圖附一 13 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
(左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



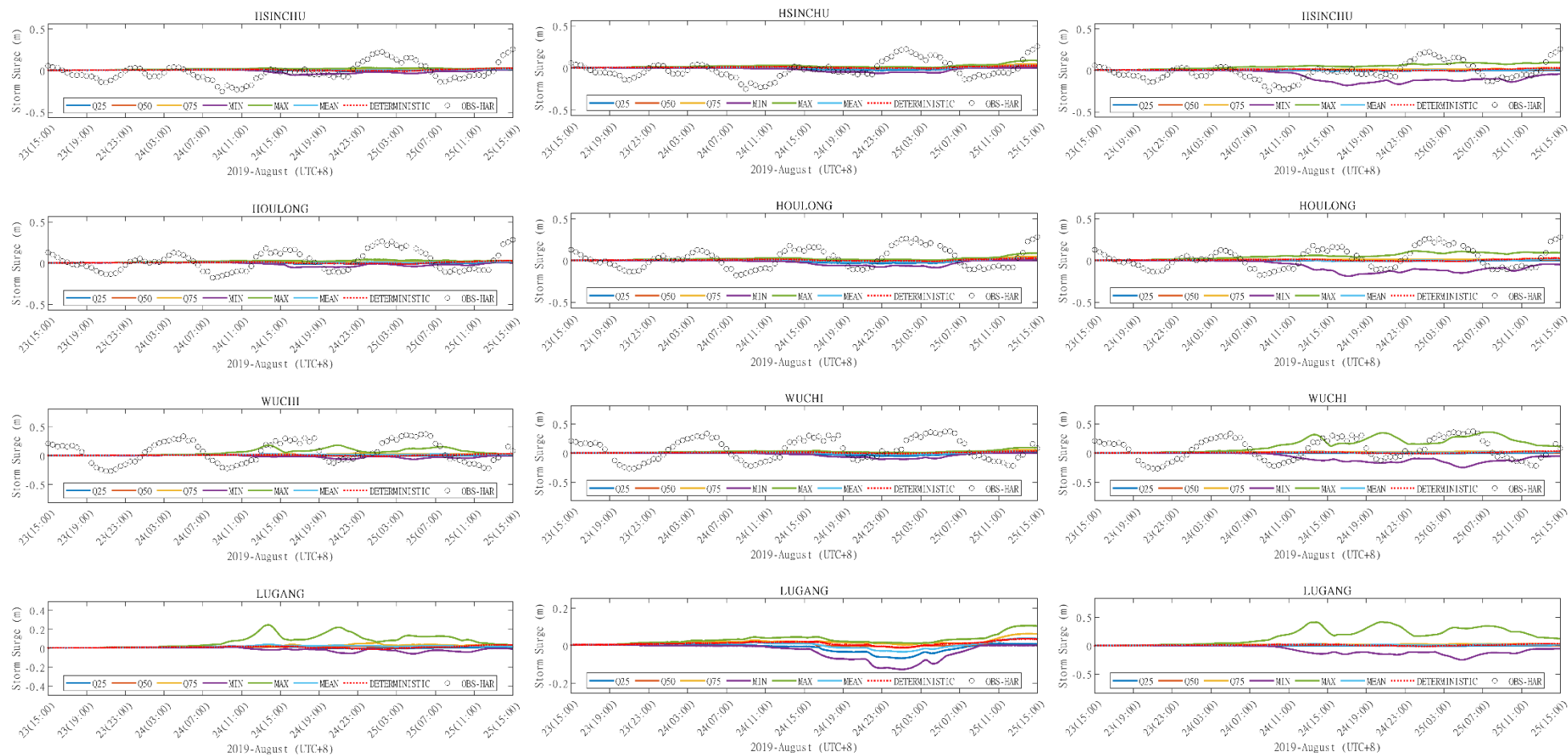
圖附— 14 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



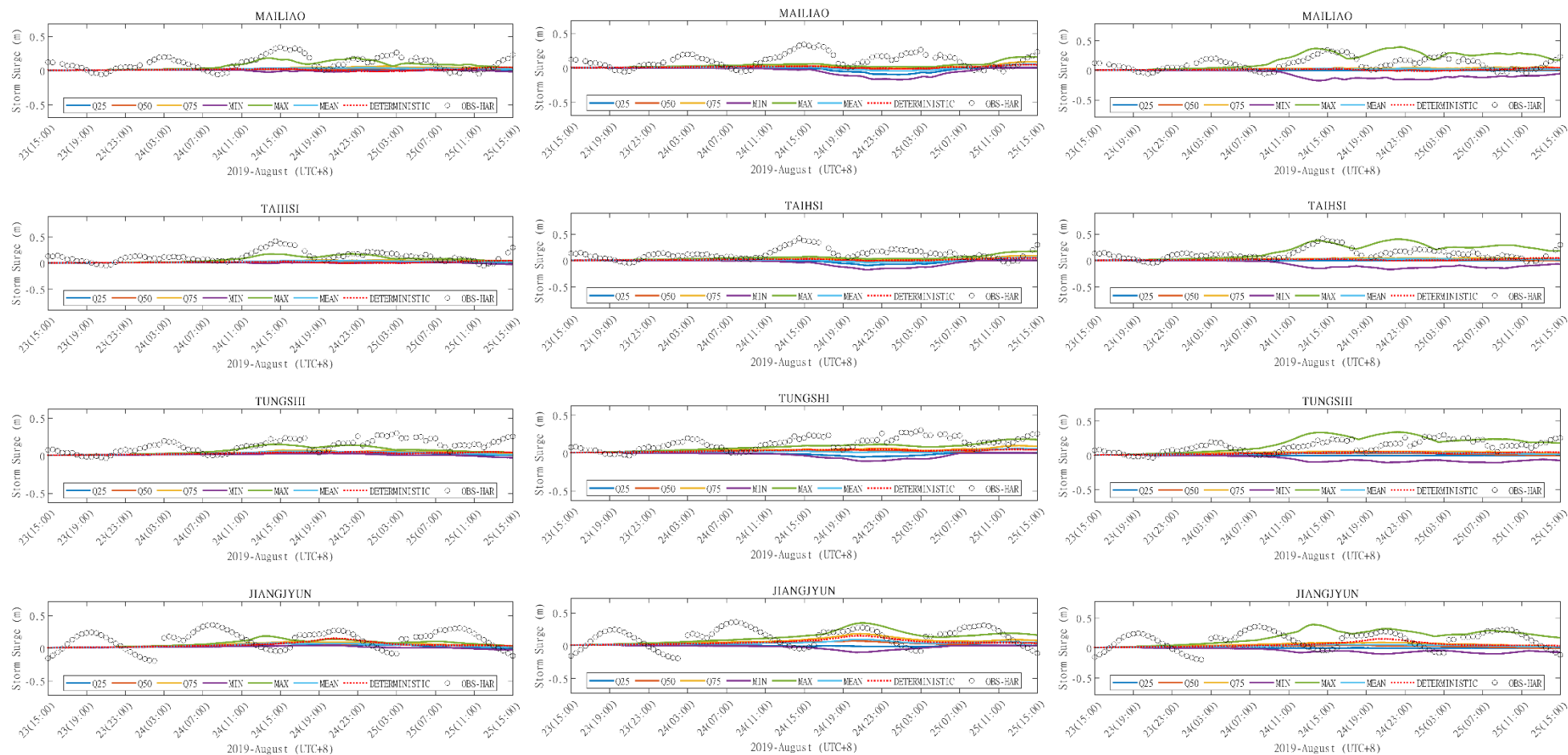
圖附— 15 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



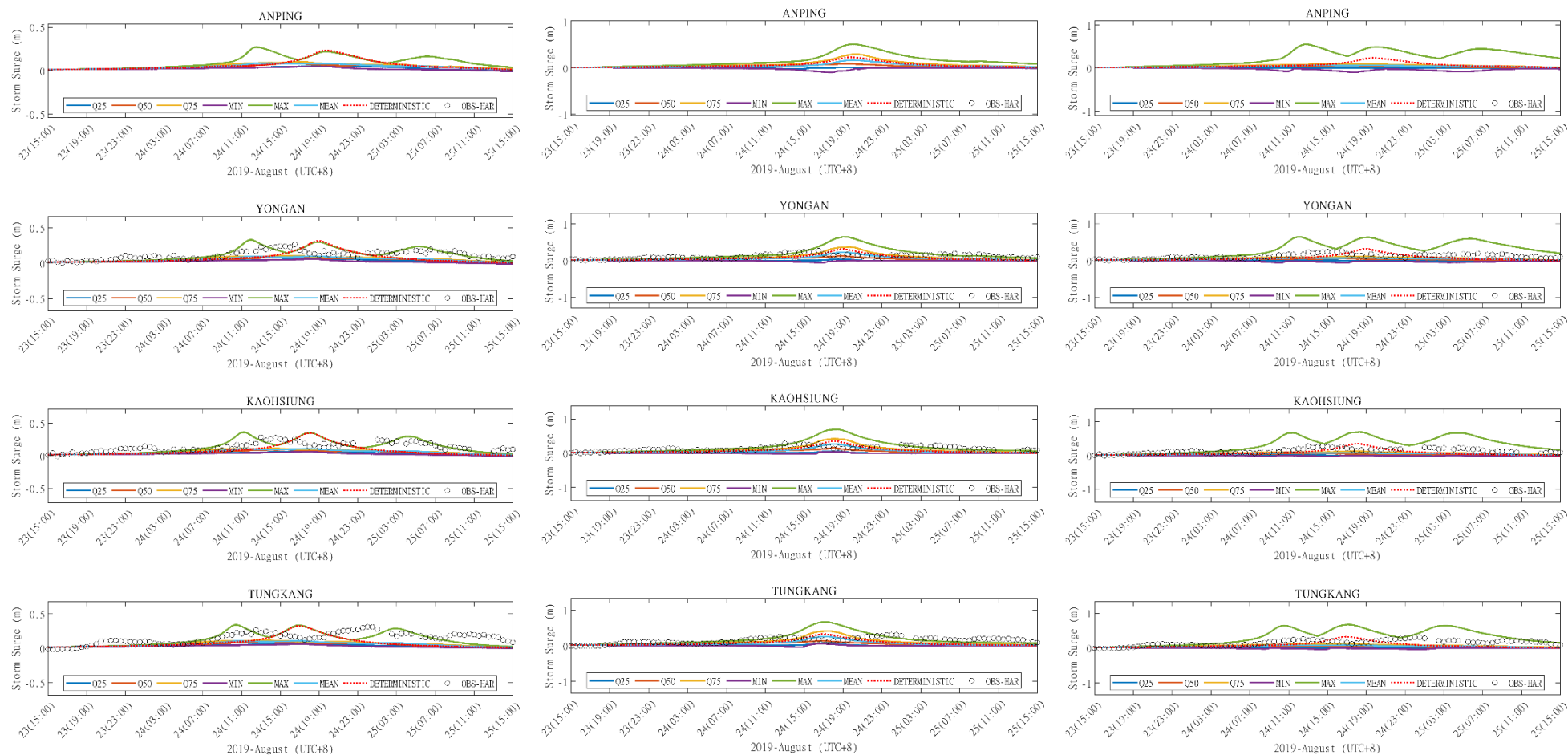
圖附— 16 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



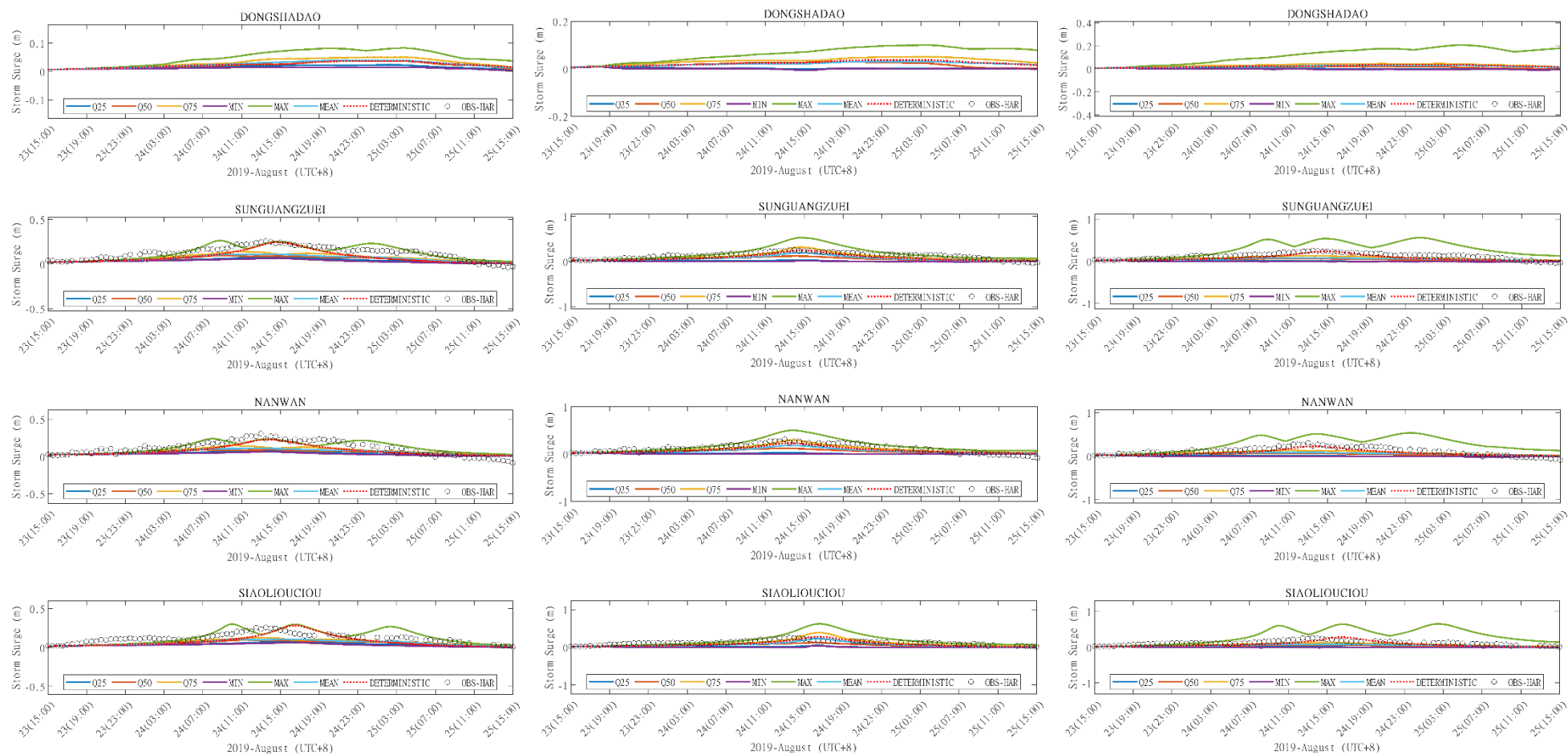
圖附— 17 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



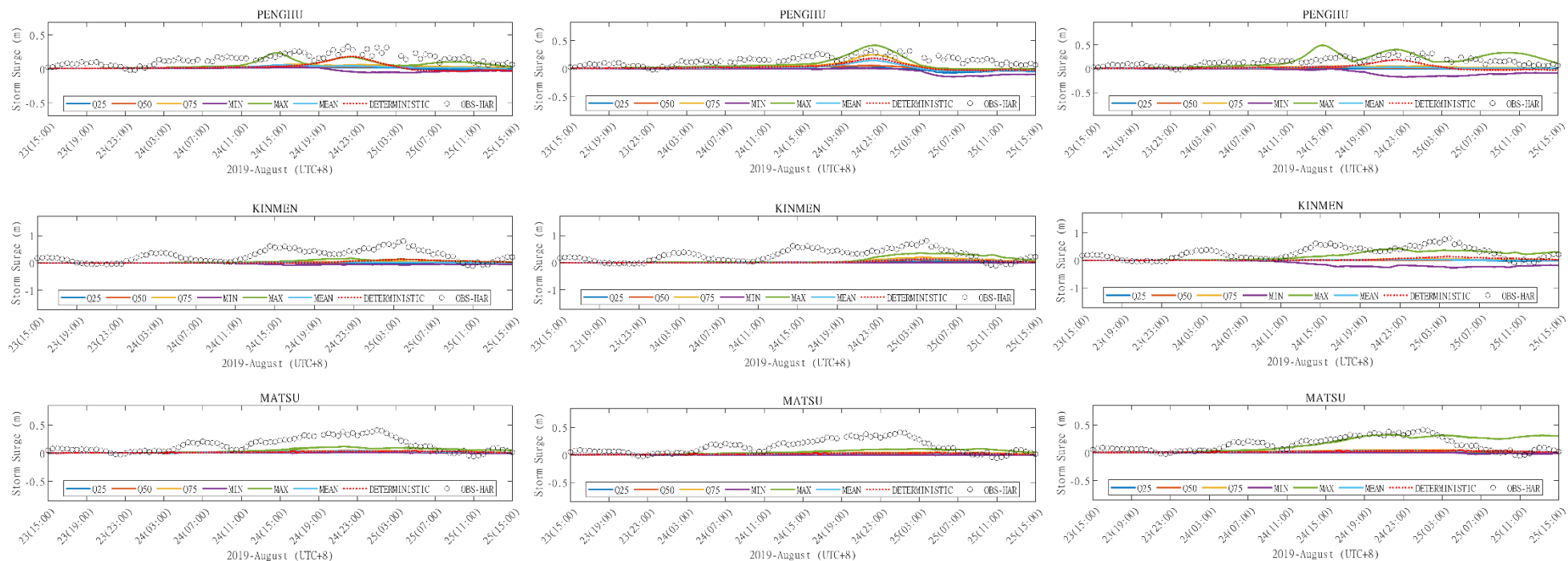
圖附— 18 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



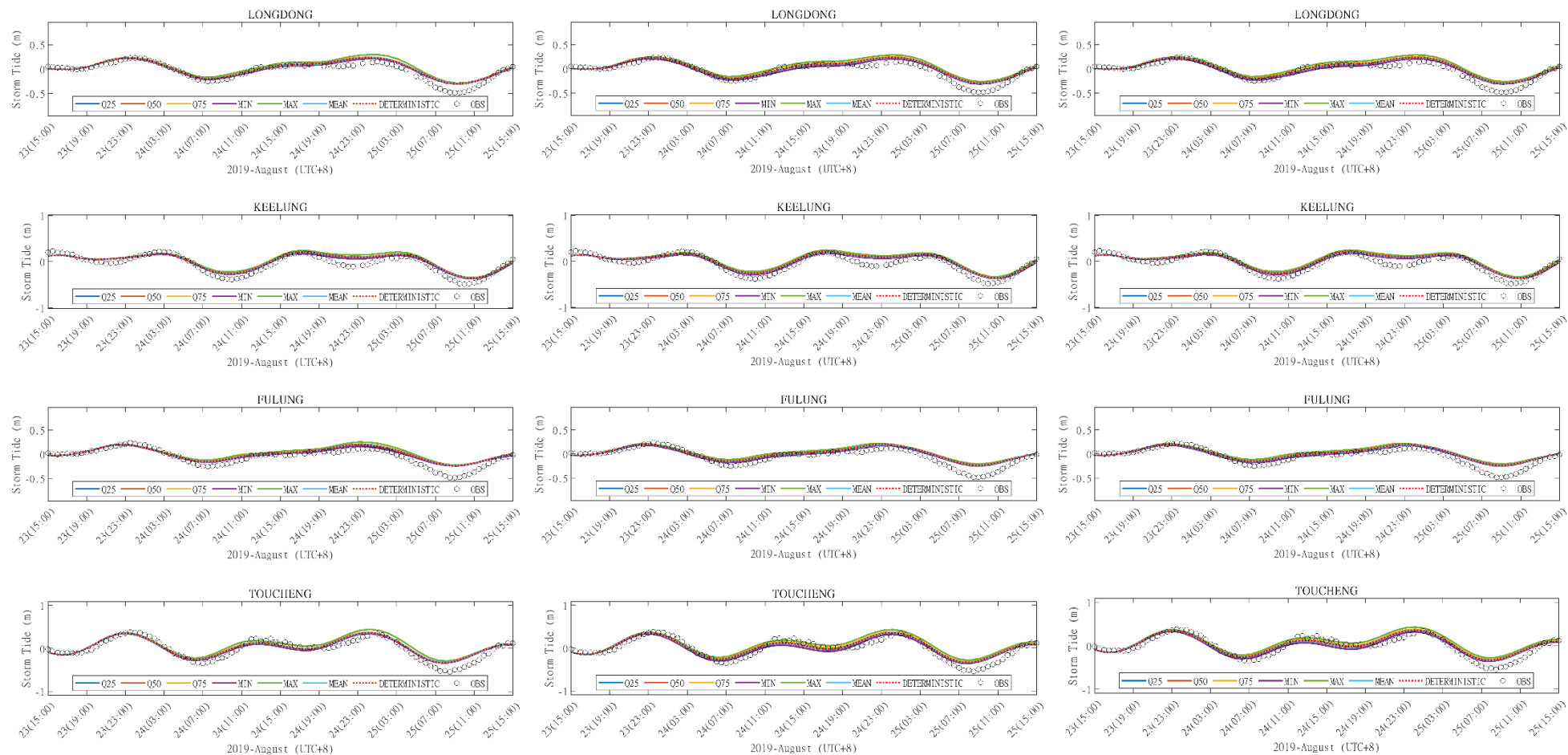
圖附— 19 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



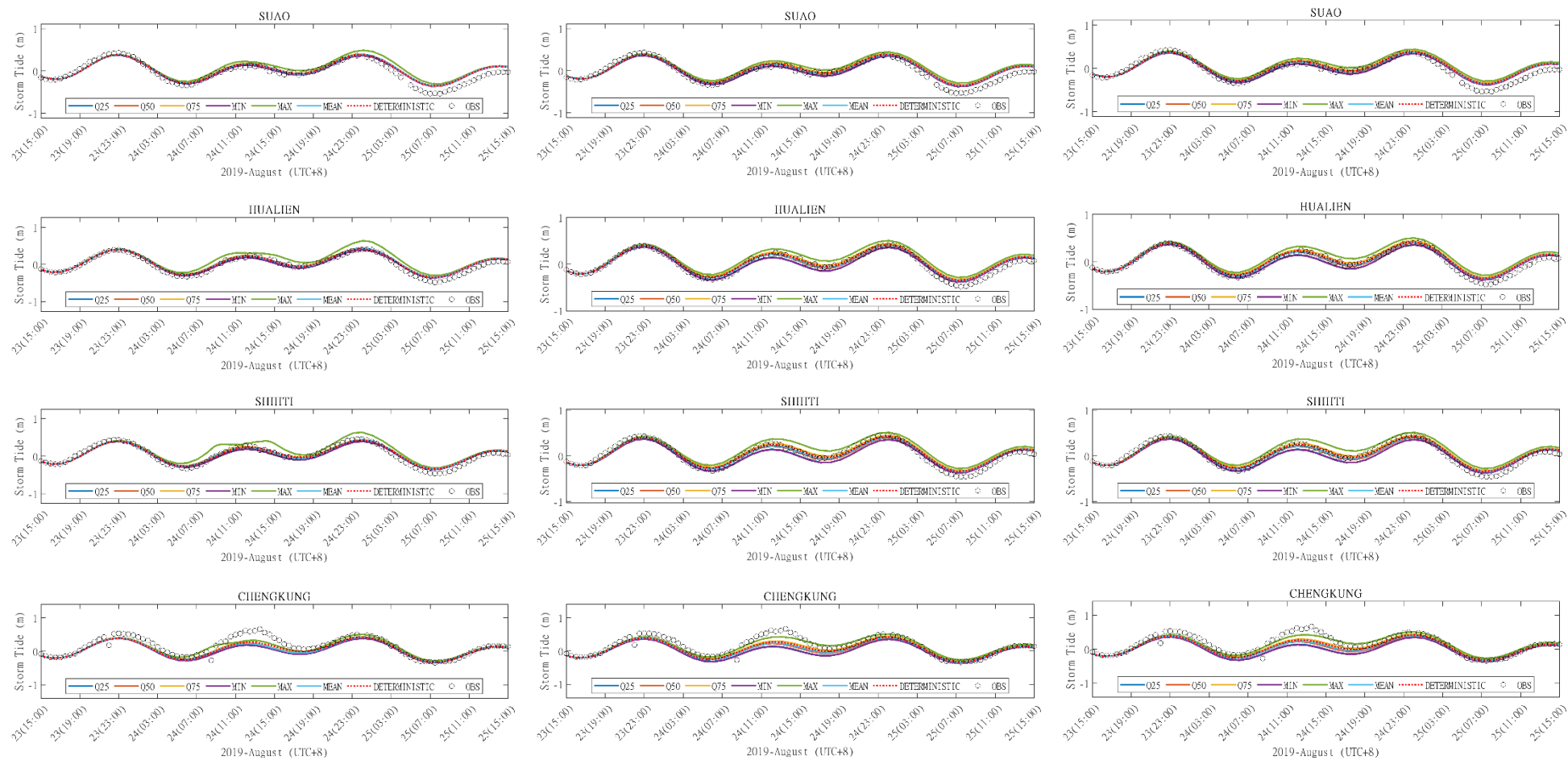
圖附— 20 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



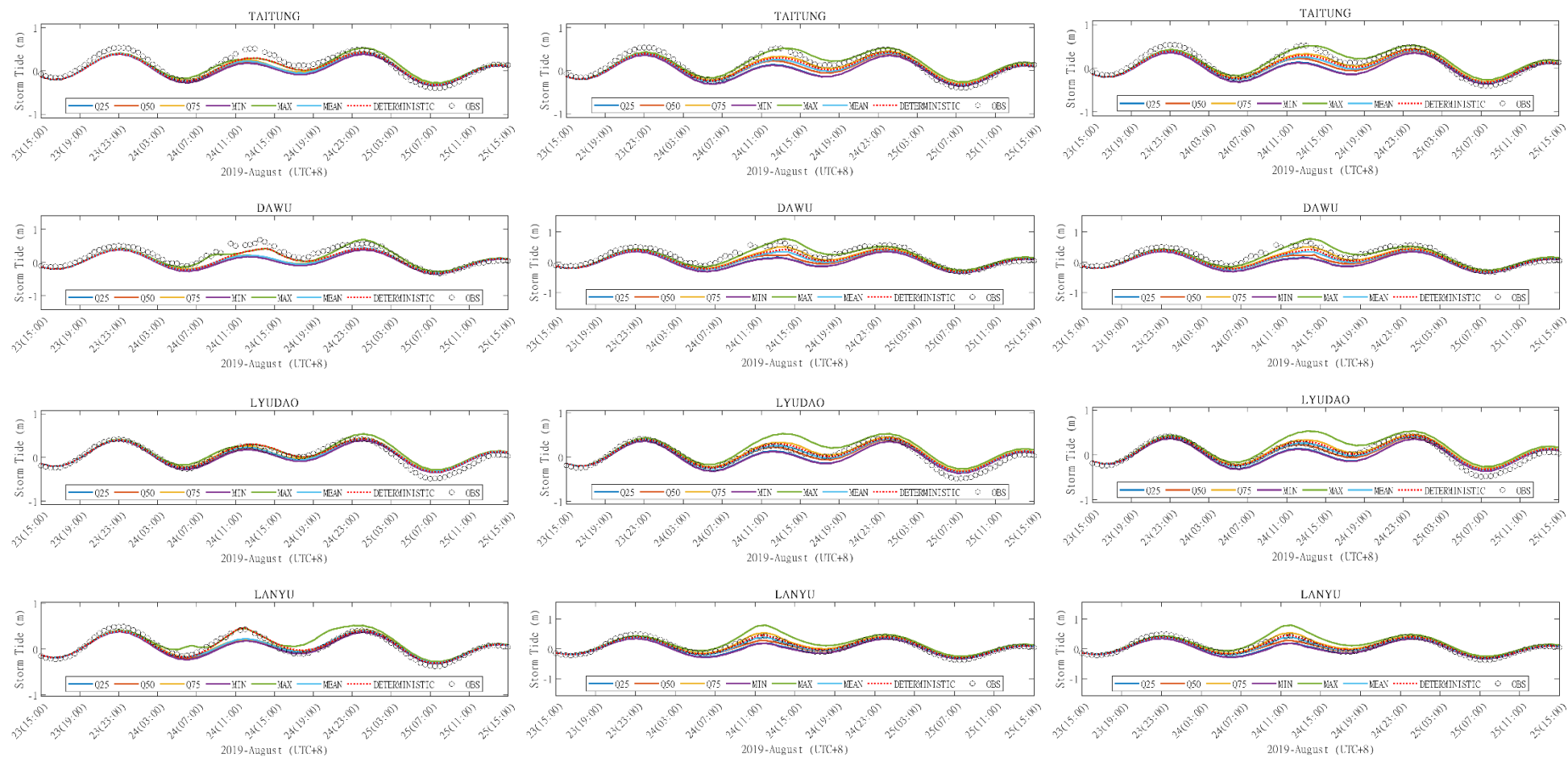
圖附一 21 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮偏差
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



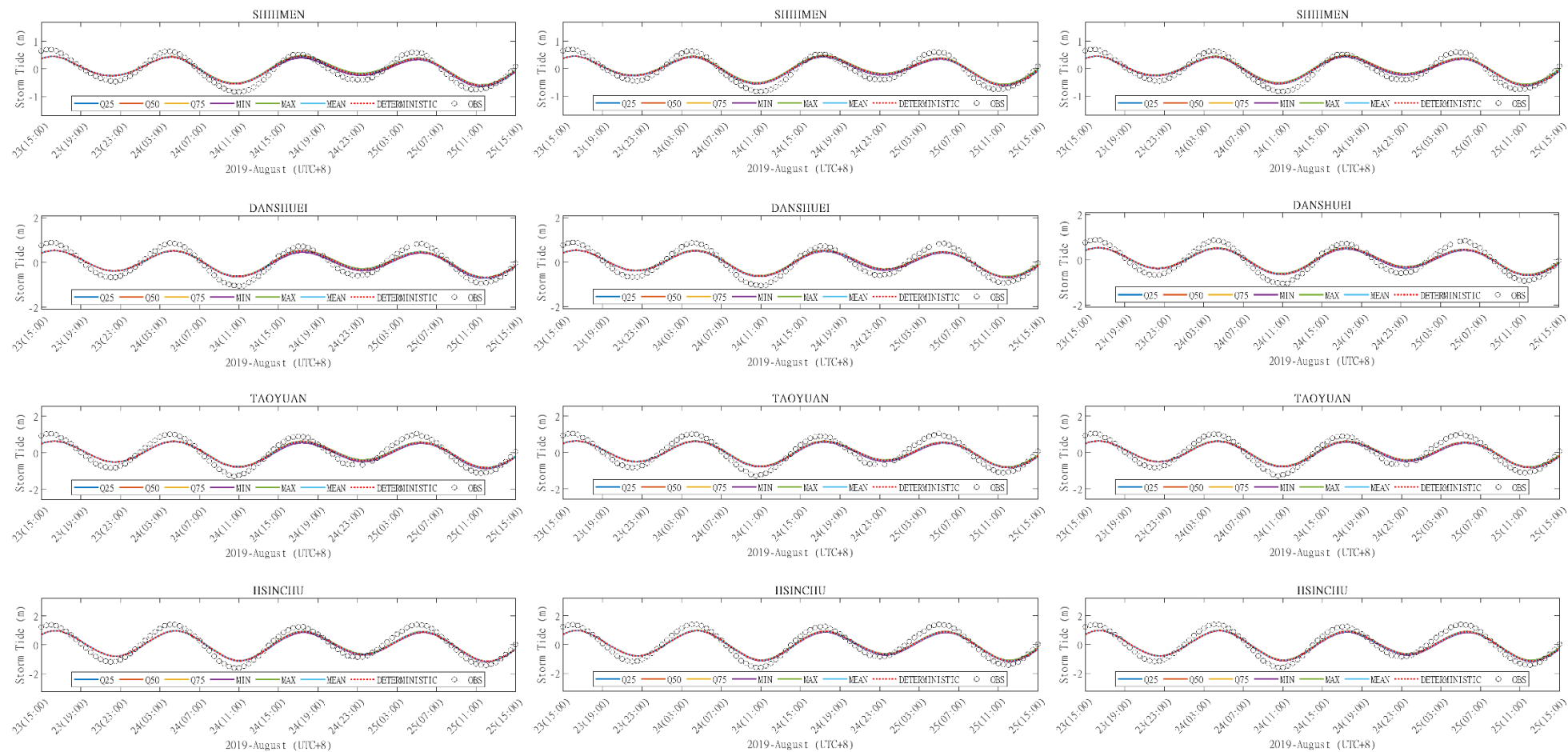
圖附— 22 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



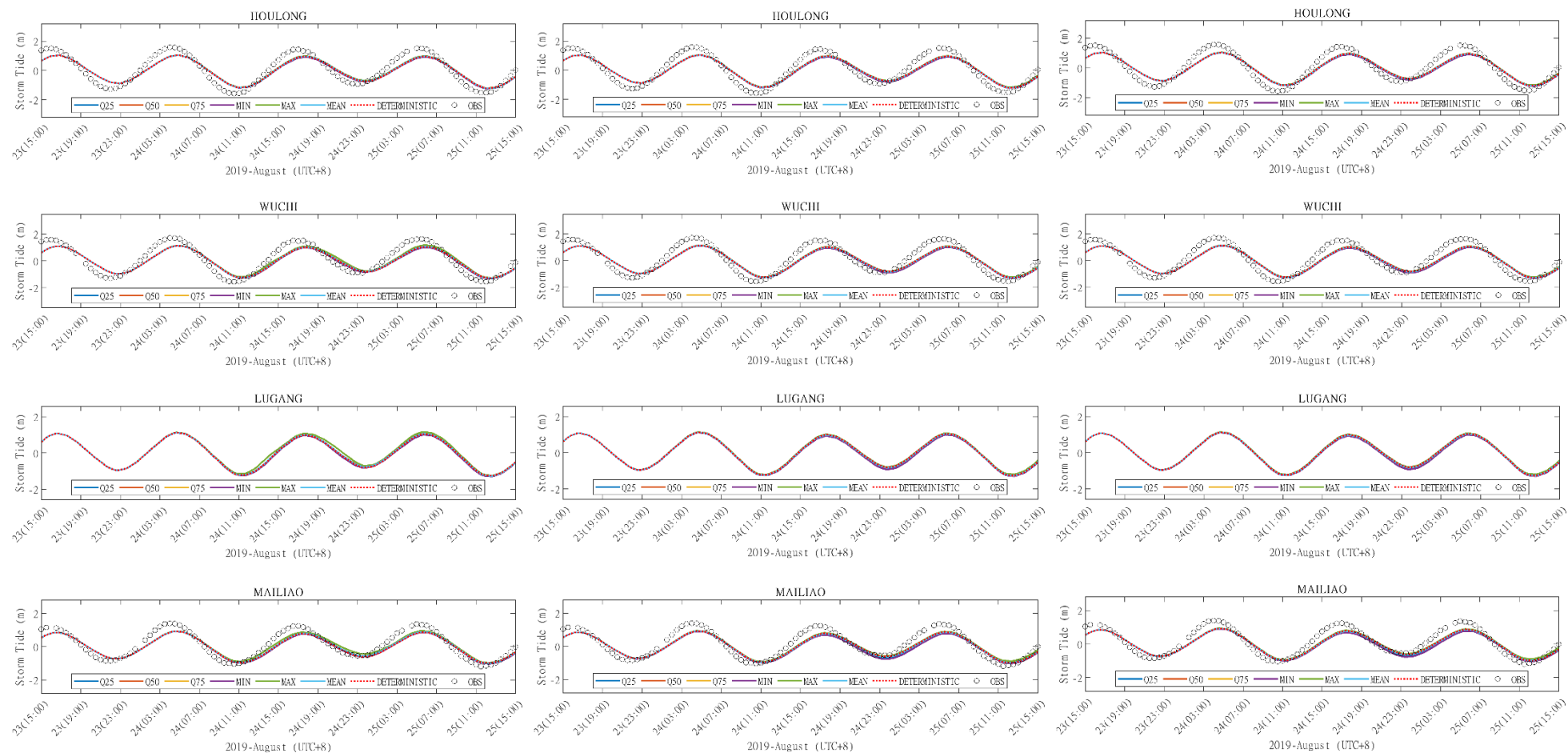
圖附— 23 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



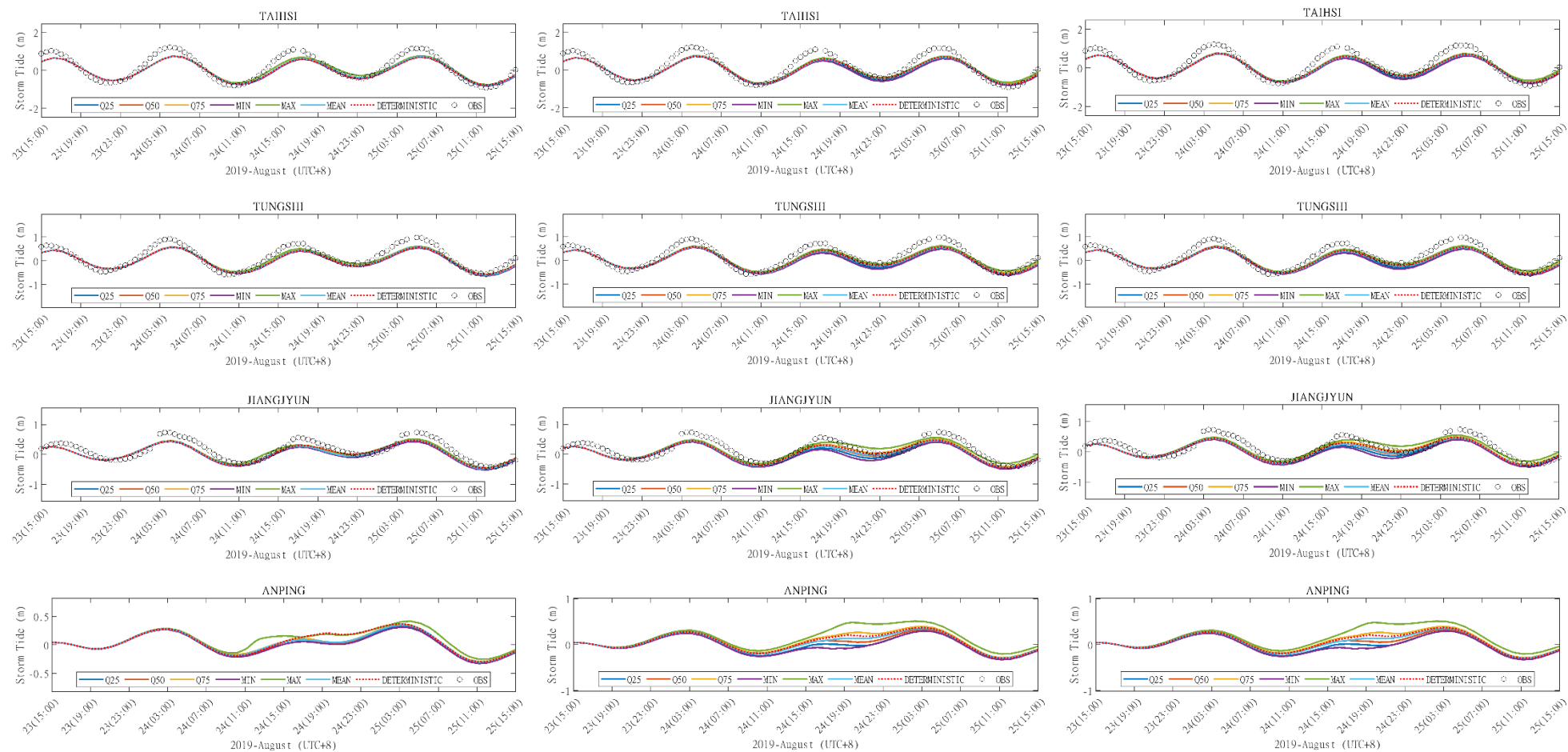
圖附— 24 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



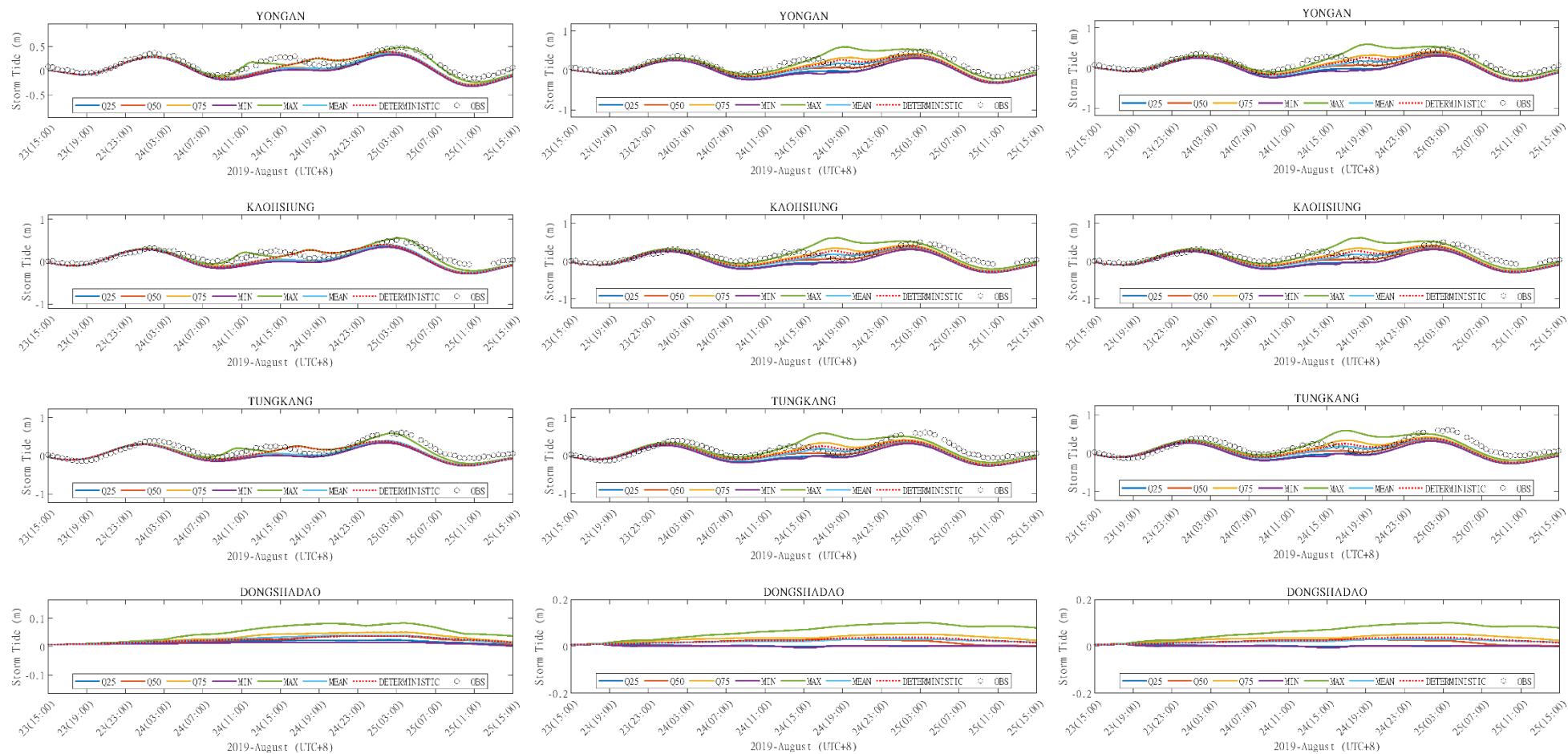
圖附— 25 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



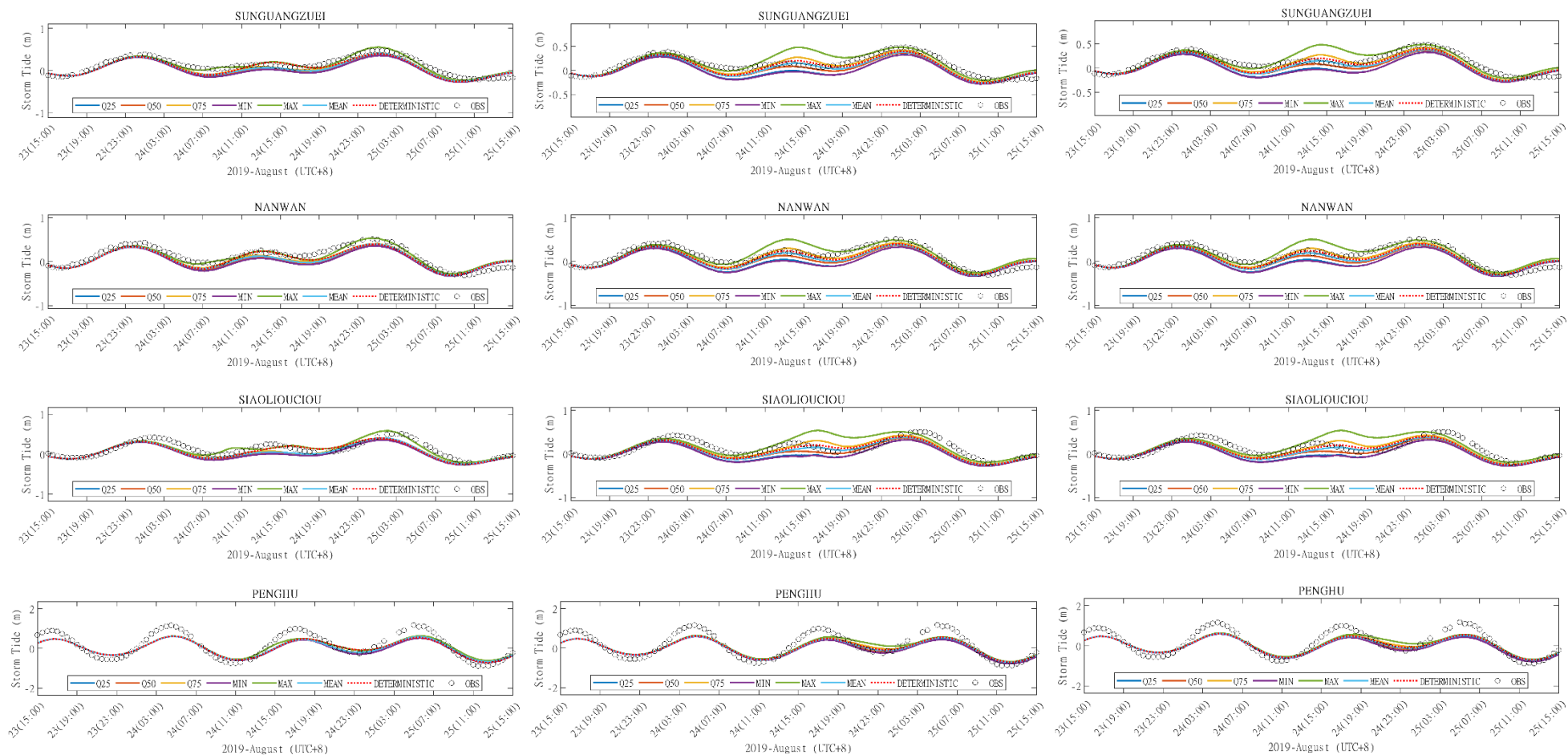
圖附— 26 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



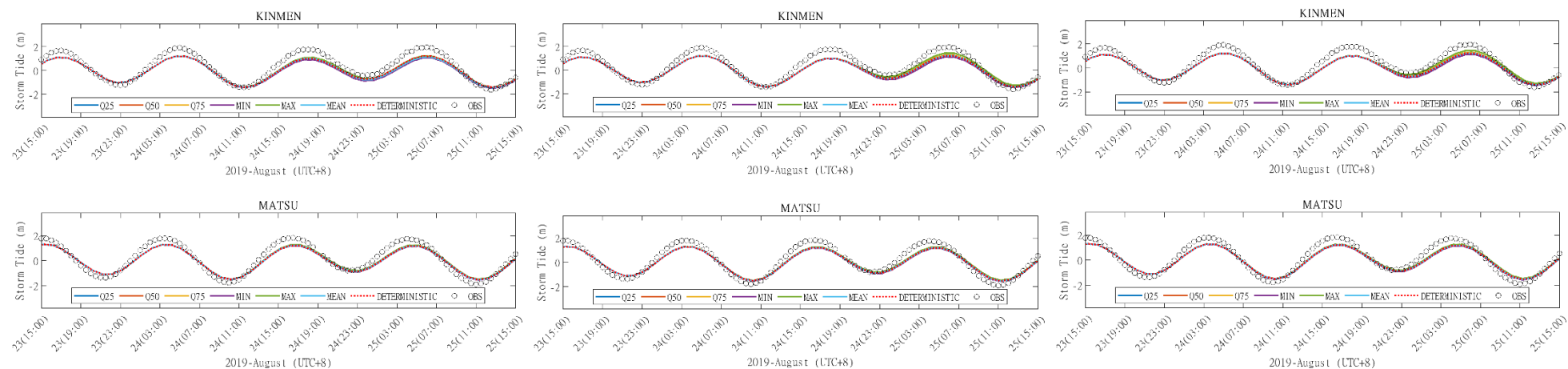
圖附— 27 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



圖附— 28 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



圖附— 29 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
 (左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員



圖附一 30 強度、路徑參數系集成員預報之結果—暴潮總水位
(左) 路徑誤差成員、(中) 強度誤差成員、(右) 強度及路徑誤差成員

附錄 E 績效報告書

110 年度政府科技發展計畫
績效報告書
(D006)

計畫名稱：

氣象局暴潮預報溢淹模式精進

執行期間：

全程：自 110 年 03 月 31 日 至 110 年 12 月 31 日止

本期：自 110 年 03 月 31 日 至 110 年 12 月 31 日止

主管機關：交通部

執行單位：中央氣象局

中華民國 110 年 12 月 02 日

年度	階段性目標達成情形(每年度以 300 字為限)	重要成果摘要說明 (每年度以 600 字為限，過程性結果請免列)
110	- 發展第二代暴潮系集預報系統，分析過往颱風預報強度誤差分佈情形，包含颱風中心氣壓、近中心最大風速、颱風半徑等，並利用歷史案例進行颱風強度系集成員案例分析。 - 以港堤外之潮汐水位資料或 TPXO 潮汐預報資料，進行港內觀測資料與港外之潮汐比對，以分析港灣之遮蔽效應。 - 將理想風場暴潮預報模式建置於中央氣象局超級電腦上並上線運作。 - 收集測站風速及壓力場等觀測資料，整理出適用臺灣之理想風場參數。	- 本研究提出依據氣象局颱風最佳路徑資料庫及歷史預報資料，統計過往颱風強度預報誤差，取得誤差分布機率曲線，並依靠誤差分布搭配颱風警報單內紀錄之決定性預報資料，產生對應的系集成員。 - 為降低潮位站觀測水位與調和分析殘差值之週期性震盪，採用 Utide 模式分析兩年觀測資料所得之調和分析參數，在部分測站如淡水、箔子寮等站將有機會降低天氣平緩時天文潮預報水位與觀測水位之間的誤差，將有助於分析颱風來臨時，風暴潮實際對沿岸造成的影響。 - 研究透過氣象局現有的港內外潮位站觀測資料，以比對小區域的港內外潮汐差異。研究中發現，以淡海/淡水測站為例，的確有可能因為預報系統網格解析度不足，造成模式潮汐水位與觀測水位之間的差異產生分潮振幅及潮時的誤差，進而造成水位偏差值的震盪情形。 - 本研究透過蒐集國內外可供分析之風場及壓力場觀測資料，利用 ECMWF ERA5 再分析風場資料取得近中心最大風速及最大風速半徑並代入各項理想風場模式，得出適用不同強度之熱帶氣旋的最佳理想風場模式並非唯一一種，後續針對暴潮溢淹預報模式的精進或許可以考慮依據不同的颱風強度選用較為合適的理想風場模式。 - 本研究成功將理想風場暴潮預報模式建置於中央氣象局超級電腦（PCC）並進行

		作業化測試，並提出作業化報告及效能比較報告。執行效益與現有作業版本相比有十分顯著的提升。
--	--	---

第一部分

壹、 目標與架構

一、 目標與效益

目標

在未來全球暖化暨潛在強烈颱風生成機率提高之情境下，世界各國更加重視風暴潮科學之研究，中央氣象局已主動建立一套功能完整、計算快速且精準之風暴潮溢淹預報速算系統，並為因應未來潛在強烈颱風強度變動、路徑和相關物理因子之不確定因素，成功發展暴潮系集預報作業系統及相關機率預報產品。針對現有已開發之暴潮預報系統，本計畫預計透過更新系統設備硬體及模式理論方法，包含調教理想風場模式、發展二代系集預報模式、執行潮位站所在位置對暴潮預報準確度影響等之分析與研究，以求更加提升現有預報系統之精準度與效率，為沿海區域之民眾提供詳細且精準之暴潮預報資訊，以期達到減災和防災之目的，降低生命財產損失。

效益

本研究奠基於 106 年度至 109 年度發展暴潮系集預報系統發展暨波浪與暴潮校驗系統建置之成功經驗，使中央氣象局可透過本團隊開發之系集模式替臺灣預報沿海地區可能之風暴潮災害，減少沿海地區民眾之財產損失和保障其生命安全。本計畫將持續精進此一風暴潮速算系統，其效益如下所列：

1. 理想風場暴潮預報模式於中央氣象局超級電腦上線運作
透過測站風速及壓力場等觀測值，調校適合臺灣之理想風場參數。進而提升風暴潮預報模式之準確度。並將預報系統之作業平臺轉移至中央氣象局之超級電腦，進行測試與提出效率報告。
2. 進行港內觀測資料與港外之潮汐比對
以港堤外之潮汐水位資料或 TPXO 潮汐預報資料，進行港內觀測資料與港外之潮汐比對，以分析港灣之遮蔽效應。
3. 分析過往颱風預報強度誤差分佈情形
發展第二代暴潮系集預報系統，分析過往颱風預報強度誤差分佈情形，包含颱風中心氣壓、近中心最大風速、颱風半徑等，並利用歷史案例進行颱風強度系集成員案例分析。
4. 以觀測資料整理未來系集分析用之理想風場參數
收集測站風速及壓力場等觀測資料，整理出適用於臺灣之理想風場參數。

● 國際比較與分析

(如有計畫執行前後之國際比較，請列出，並以表格方式呈現為佳。)

比較項目或 計畫產出成果	計畫執行前	計畫執行後
以再分析氣象場 建構理想風場模 型	氣象局已建置之 COMCOT 風暴潮溢淹預 報模式，導入 CWB Model 參數化大氣模式及中央氣 象局 TWRF 2.0 氣象場，惟 預報成果精確度仍有改善 空間。	本案選用 ECMWF ERA5 再分析氣象場資料，搭配 國外各項理想風場模式， 以推估適合台灣現地之風 場參數。目前初步分析得 出適用不同強度之熱帶氣 旋的最佳理想風場模式並 非唯一一種，後續針對暴 潮溢淹預報模式之精進將 可考慮依據不同的颱風強 度選用較為合適的理想風 場模式，其預期成果相當 樂觀。

貳、 主要內容

一、 執行內容

「臺灣暴潮預報溢淹模式精準度量化研究」計畫擬訂之重點類別分為三類，一為暴潮溢淹預報模式精準度提升研究，二為港灣海堤遮蔽效應對風暴潮預報準確度之影響分析，三為暴潮系集預報模式精準度提升研究。計畫執行內容如下：

1. 發展第二代暴潮系集預報系統，並利用歷史案例進行颱風強度系集成員案例分析

本研究提出依據氣象局颱風最佳路徑資料庫及歷史預報資料，統計過往颱風強度預報誤差，取得誤差分布機率曲線，並依靠誤差分布搭配颱風警報單內紀錄之決定性預報資料，產生對應的系集成員。研究中利用 2019 年有登陸台灣紀錄的颱風白鹿進行案例分析，發現目前採用的理想風場模式中，氣壓參數組成的系集預報結果影響水位變動範圍較風速參數成員組合的結果大，而風速成員的預報較氣壓成員有機會產生負暴潮偏差。若採用同樣的成員產生方法分析路徑誤差與強度誤差對測站水位的影響，強度參數對測站水位影響主要集中在原本決定性預報路徑影響該測站期間，影響水位的極值振幅變化。路徑參數變化除了可能影響水位極值振幅變化外，亦會改變颱風接近測站的對應時間，造成峰值在該測站發生的時間可能較決定性預報提前或延後。若同時考量強度及路徑成員的組合，成員數會提升至原本考量數量的平方倍，並且在暴潮歷線中得到較大的偏差極值。在決定性預報就已經取得相對準確的測站而言，考量如次大量的系集成員反而可能造成過度預報的現象。

2. 以港堤外之潮汐水位資料或 TPXO 潮汐預報資料，以分析港灣之遮蔽效應

為降低潮位站觀測水位與調和分析殘差值之週期性震盪，以提升分析颱風暴潮時可校驗資料之品質，首先利用潮汐調和分析模式 Utide 模式 (Codiga, 2011)，分析各潮位站觀測水位取得分潮組成及天文潮水位，利用各項統計參數，與氣象局現有作業中調和分析預報水位進行比較兩者之分析結果。研究過程中發現，若採用 Utide 模式分析兩年觀測資料所得之調和分析參數，在部分測站如淡水、箔子寮等站將有機會降低天氣平緩時天文潮預報水位與觀測水位之間的誤差，將有助於分析颱風來臨時，風暴潮實際對沿岸造成的影響。

執行調和分析後，研究透過氣象局現有的港內外潮位站觀測資料，以比對小區域的港內外潮汐差異，分析若需要探討沿海細部地形結構對潮汐水位的影響，所需要的網格解析度門檻。研究中發現，以淡海/淡水測站為例，兩點相距約 2.0 公里便有分潮振幅與相位角間之不同，因此在暴潮模式預報中，的確有可能因為預報系統網格解析度不足，造成模式潮汐水位與觀測水位之間的差異產生分潮振幅及潮時的誤差，進而造成水位偏差值的震盪情形。

3. 收集測站風速及氣壓場等觀測資料，整理出適用臺灣之理想風場參數

本研究透過蒐集國內外可供分析之風場及壓力場觀測資料，搭配國外各項理想風場模式及參數統計模型，以推估適合台灣現地之風場參數。研究中利用 ECMWF ERA5 再分析風場資料取得近中心最大風速及最大風速半徑並代入各項理想風場模式，得出適用不同強度之熱帶氣旋的最佳理想風場模式並非唯一一種，後續針對暴潮溢淹預報模式的精進或許可以考慮依據不同的颱風強度選用較為合適的理想風場模式。

4. 將理想風場暴潮預報模式建置於中央氣象局超級電腦上並上線運作

本研究於執行「暴潮溢淹預報模式精準度提升研究」工作項目期間亦成功將理想風場暴潮預報模式建置於中央氣象局超級電腦（PCC）並進行作業化測試。透過 2021 年下半年之烟花（IN-FA）、盧碧（LUPIT）、燦樹（CHANTHU）、圓規（KOMPASU）四個颱風事件，本研究提出作業化報告及效能比較報告。現有作業紀錄中，建置於 PCC 之版本執行時間在總時長平均減少約 19.83 分鐘，與現行作業版本之執行時長進行比對，得出執行效能約提升 21.34%，其中在預報產品輸出的部分，PCC 版本可節省約 22.03 分鐘，執行效益與現有作業版本相比可提升高達 71.84%，可謂十分顯著的提升。而在現階段作業流程中，預報員只需於第一報預報時啟動指定 bash 腳本，並輸入預報起始時間與颱風事件，即可執行暴潮預報系統。後續預報可透過工作排程定時執行預報，大幅降低作業員負擔。

二、 遭遇困難與因應對策

(執行計畫過程中所遭遇困難、執行落後之因應措施及建議，如無遭遇困難或落後情形者，請填寫「無」即可。)

類別	說明	因應措施與建議
執行困難	無	
執行落後	無	

參、經費與人力執行情形

肆、已獲得之主要成果與重大突破(含量化 output) (E003)

屬性	績效指標類別	績效指標項目		108 年度		效益說明 (每項以 500 字為限)	重大突破
				原訂目標值	實際達成值		
學術成就 (科技基礎研究)	A.論文	期刊論文	國內(篇)	0		論文發表數量高達 10 篇，研究成果於國內外重要研討會受高度肯定。	
			國外(篇)				
		研討會論文	國內(篇)		9		
			國外(篇)		1		
		專書論文	國內(篇)				
			國外(篇)				
	B. 合作團隊 (計畫)養成	機構內跨領域合作團隊(計畫)數				效益說明可包含合作團隊(計畫)進一步形成研究中心、實驗室等情形。	
		跨機構合作團隊(計畫)數					
		跨國合作團隊(計畫)數					
		簽訂合作協議數					
		形成研究中心數					
		形成實驗室數					

110 年度計畫績效指標實際達成與原訂目標差異說明：與原訂目標無差異

第二部分

壹、 主要成就及成果之價值與貢獻度(outcome)

一、 學術成就(科技基礎研究)

國內研討會論文 9 篇

第一作者：林君蔚

論文名稱：以誤差機率分布法發展台灣颱風暴潮系集預報系統

研討會名稱：2021 海洋年會暨科技部成果發表會

第一作者：曾博森

論文名稱：以 COMCOT-SS 預報印度洋之風暴潮

研討會名稱：2021 海洋年會暨科技部成果發表會

第一作者：許家鈞

論文名稱：以影響強度法分析與重建 1845 雲林口湖風暴潮事件

研討會名稱：2021 海洋年會暨科技部成果發表會

第一作者：林君蔚

論文名稱：颱風暴潮機率預報系統之開發與評估

研討會名稱：110 年天氣分析與預報研討會

第一作者：曾博森

論文名稱：發展適用於印度洋之氣旋風暴潮預報模式

研討會名稱：110 年天氣分析與預報研討會

第一作者：許家鈞

論文名稱：發展風暴潮影響強度分析法以重建 1845 雲林口湖風暴潮事件

研討會名稱：110 年天氣分析與預報研討會

第一作者：范子軒

論文名稱：以影響強度法分析與重建 1845 雲林口湖風暴潮事件

研討會名稱：第 43 屆海洋工程研討會

第一作者：曾博森

論文名稱：以 COMCOT-SS 發展印度洋風暴潮系統

研討會名稱：中華民國地質學會與中華民國地球物理學會 110 年年會暨學術研討會

第一作者：許家鈞

論文名稱：發展 SSIIA 分析法並重建 1845 年雲林口湖風暴潮事件

研討會名稱：中華民國地質學會與中華民國地球物理學會 110 年年會暨學術研討會

國際研討會 1 篇

第一作者：Tsai, Yu-Lin

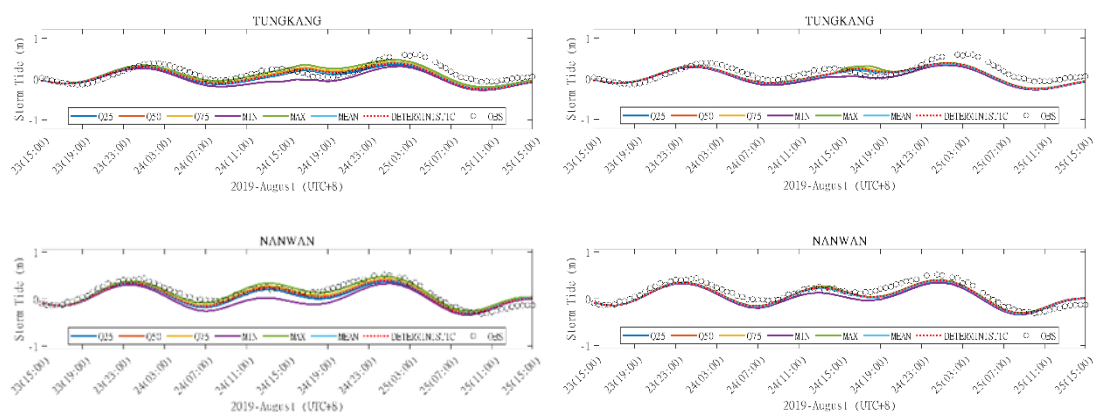
論文名稱：Storm Surges Interacting with Wind Waves from Deep Waters to Shallow Waters

研討會名稱：AOGS 2021

二、技術創新(科技技術創新)

本團隊為中央氣象局所發展之暴潮系集預報模式，基於中央氣象局現有採用之 COMCOT 暴潮模式為基礎，而 COMCOT 暴潮模式之前身為國際知名之海嘯模式 COMCOT (Cornell Mutli-grid Coupled Tsunami Model)，導過颱風氣象力（氣壓梯度力及風剪力）之加入，使模式具備以非線性之淺水波方程式計算並分析風暴潮生成、傳播以及近岸溯上之完整歷程。

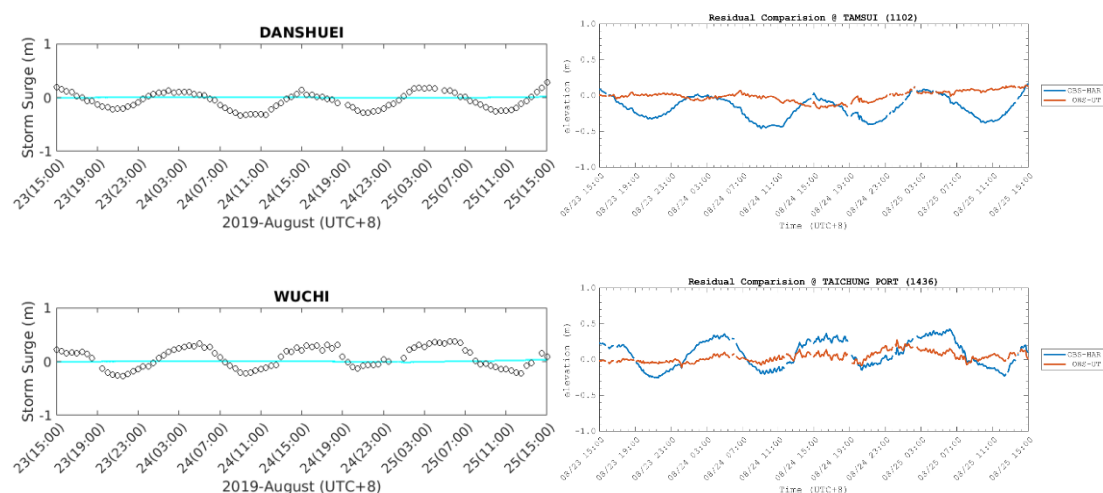
本案發展颱風強度系集成員以誤差機率法產出的方法，選用近年有登陸台灣本島紀錄之 2019 年颱風白鹿作為分析不同系集成員組合對系集預報產品影響的研究分析案例。本次分析選用該颱風案例於登陸台灣前 24 小時的颱風警報作為示範模擬案例，能夠在模擬期間觀察到登陸區域較完整之暴潮水位預報資訊。



東港及南灣之強度參數系集成員預報結果—暴潮總水位
(左) 中心氣壓誤差成員、(右) 近中心最大風速誤差成員

三、經濟效益(經濟產業促進)

本研究目的為降低潮位站觀測水位與調和分析殘差值之週期性震盪，以提升分析颱風暴潮時可校驗資料之品質。其中，潮位站觀測到的水位起伏，主要為平均海水面、潮汐與其他氣象影響因素的集合。由於國內各單位基於業務職掌需要而進行潮位觀測，為能維持長期運作，大多選擇於港內穩固的結構物處架設儀器，而非外海。氣象局內作業中暴潮預報模式為顧及預報時效，數值網格計算域並不足以解析港口尺度的地形細節，故本研究將接著透過氣象局現有的港內外潮位站觀測資料，以比對小區域的港內外潮汐差異，以分析暴潮預報系統與觀測資料校驗時可能的誤差來源。提升後之分析水位資料將更有效之助於沿海民眾活動參考，減少不必要之經濟損失。



2020 年颱風白鹿預報案例分析部分淡水與梧棲測站之決定性預報與觀測資料校驗值之比對結果，紅線顯示觀測值扣除本研究使用之 Utide 潮位分析，相對於藍線可明顯觀察出正確的潮位偏差。

四、社會影響(社會福祉提升、環境保護安全)

中央氣象局現有之 COMCOT 暴潮預報系統，擁有兩種版本之系統軟體程式，其中一種為現行作業版本，以 Matlab 程式語言銜接 COMCOT 暴潮模式以及預報作業系統，並於指定機器運作；另一種為 109 年度委託研究計畫「氣象局暴潮預報溢淹模式精進」計畫中，以 Python 程式語言重新撰寫之暴潮預報系統。本年度計畫重點工作項目之一為導入理想風場模式之預報系統，並使其於中央氣象局之 PC-Cluster（以下簡稱 PCC）中完成作業化。並以今年度的颱風案例進行作業化效率分析，其成果如下表：

平均執行效能比較（單位：分鐘）

	總時長	潮汐邊界	COMCOT (Pure Tide)	COMCOT (StormTide)	後處理
PCC 版本 預報系統	73.09	< 1	31.91	32.18	8.64
現行作業版本 預報系統	92.92	< 1	31.00	30.92	30.67
效能差異	19.83	-	0.91	1.27	22.03
差異百分比	21.34%	-	-2.93%	-4.09%	71.84%

表中可發現建置於 PCC 之版本執行時間在總時長平均減少約 19.83 分鐘，與現行作業版本之執行時長進行比對，得出執行效能約提升 21.34%。於後處理產品的效率比較部分，PCC 版本可節省約 22.03 分鐘，執行效益與現有作業版本相比可提升高達 71.84%，可謂十分顯著的提升。藉由模式高效產出之準確度之預報結果，安撫民眾對於風暴潮可能造成災害之不安定，對於民生社會安定發展之目標有相當之助益。

五、其他效益(科技政策管理、人才培育、法規制度、國際合作、推動輔導等)

本計畫培養兩名碩士生及兩名博士生，積極參與國內研討會發表風暴潮相關研究成果，共計 10 篇，表現優良。疫情期間亦成功發表風暴潮數值模式之論文於國際研討會，成果倍受肯定。

貳、檢討與展望

(請檢討計畫執行可改善事項或後續可精進處，並說明後續工作構想重點與未來展望等；)

本計畫中利用 ECMWF ERA5 再分析風場資料取得近中心最大風速及最大風速半徑並代入各項理想風場模式，得出適用不同強度之熱帶氣旋的最佳理想風場模式並非唯一一種，後續針對暴潮溢淹預報模式的精進或許可以考慮依據不同的颱風強度選用較為合適的理想風場模式。於最大風速半徑估算方面，本研究探討了現存公式中較合適之最大風速半徑推估公式，以作為後續調整理想風場模式之參考。研究中發現，大部分文獻選用的資料乃以 JTWC 最佳路徑資料或北美觀測資料為主，因此若直接套用 JMA 最佳路徑參數至各項統計模型後與 ECMWF 及 JMA 的最大風速半徑互相比對，是可被預期有改善空間的。而關於風場參數調整後對於颱風暴潮的預報能力是否改善，期待後續研究評估。

附表、佐證資料表

【A 論文表】

題 名	第一作者	發表年(西元年)	文獻類別
以誤差機率分布法發展台灣颱風暴潮系集預報系統	林君蔚	2021	E
以 COMCOT-SS 預報印度洋之風暴潮	曾博森	2021	E
以影響強度法分析與重建 1845 雲林口湖風暴潮事件	許家鈞	2021	E
Storm Surges Interacting with Wind Waves from Deep Waters to Shallow Waters	Tsai, Yu-Lin	2021	F
颱風暴潮機率預報系統之開發與評估	林君蔚	2021	E
發展適用於印度洋之氣旋風暴潮預報模式	曾博森	2021	E
發展風暴潮影響強度分析法以重建 1845 雲林口湖風暴潮事件	許家鈞	2021	E
以影響強度法分析與重建 1845 雲林口湖風暴潮事件	范子軒	2021	E
以 COMCOT-SS 發展印度洋風暴潮系統	曾博森	2021	E
發展 SSIIA 分析法並重建 1845 年雲林口湖風暴潮事件	許家鈞	2021	E

註：文獻類別分成 A 國內一般期刊、B 國內重要期刊、C 國外一般期刊、D 國外重要期刊、E 國內研討會、F 國際研討會、G 國內專書論文、H 國際專書論文