

NWW3波浪模式不同源項之測試研究

張恆文¹ 施景峯² 林芳如² 顏厥正³ 朱啟豪² 滕春慈²
社團法人台灣地球觀測學會¹ 中央氣象局海象測報中心² 工研院³

摘要

風場輸入為提高風浪模擬準確性的重要因素，而參數化的源項公式將風場轉化成能量進入到風浪的控制方程式，此亦為影響模擬準確性的另一要素。NWW3為美國NOAA發展的風浪模式，5.16版提供不同的參數化公式作為風場輸入及能量消散，本研究利用CFRSR及氣象局的作業化分析風場測試不同源項的執行力，並蒐集衛星資料及氣象局的浮標資料作為真值，研究成果將作為未來修正氣象局藍色公路及生活氣象波浪預報之依據。分析結果顯示預報中心提供的風場，在10km及2.5km解析度的差異甚小，但都比CFRSR(Climate Forecast System Reanalysis)大，尤其在台灣海峽、巴士海峽及南海等區域，此造成了南海波高的正偏差，而ST4及ST6公式可以減緩波高正偏差的數值，ST4尤佳。比較浮標之波高部分，以ST4表現較佳，週期部分，各公式無明顯差異，但ST2在9個測站最佳，ST4最佳則有7個測站。

關鍵字：波浪預報、參數化源項

一、前言

氣象局藍色公路波浪預報系統始於2011年作業化，系統由數值模式及資訊系統組成，其中數值模式採用NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)WW3(Wave Watch III)模式3.14版及3層之多重網格(multi-grid)計算，不同網格之計算範圍如圖1之3層紅色框線，由外到內分別為 0.25° 、 0.1° 及 0.025° 之網格大小，不同網格計算採雙向(two-way)交互作用，每日預報4次、每次預報96小時。資訊系統包括利用觀測資料修正航線預報值及轉成XML檔案供系統網頁查詢展出，系統每小時修正未來48小時航線之海象資料，包括風、波、流的資訊，目前共有33條航線預報(氣象局，2017)。

在提供此服務後，氣象局接獲許多業者、漁民及經常登上研究船隻的學者反應，對該服務的詳細資訊與準確度給予肯定。然而模式本身的精度是需要再被提升的，而風場輸入為提高風浪模擬準確性的重要因素，包括風場及在風浪控制方程式中之參數化源項(source term)，後者即將風場轉化成能量進入到風浪的控制方程式中，包括波浪的能量輸入及消散，因此許多研究均在提升參數化源項的表現，亦已應用在新版的NWW3模式中，而這種參數化是一種主要適用於全球規模的折衷方案，而在短風域時仍會呈現偏差，可用改正的風剪力參數修正之(Roland and Ardhuin, 2014)。目前NOAA之作業化預報業已採用4.18版的NWW3模式，而2016年發表5.16版的NWW3模式，在參數化的源項公式部分即有許多重要的更新。

過去許多相關文獻均曾探討不同風場公式的影響: Ardhuin et al.(2010)分析NWW3之WAM cycle 4公式(ECWAM, switch:ST3)及Bidlot et al. (2005,代號BAJ)建議之參數，在全球、密西根湖(屬於young sea)、墨西哥灣(颶風)等海域，利用ECMWF風場、衛星及浮標觀測，測試比較新的參數組合，提出代號TEST441組合之參數，唯其在密西根湖的海域的執行力並不顯著，但在地中海則較佳。而其並未測試全部的參數，僅建議調整其中幾個重要參數即可得到較好的結果，且因為主要利用ECMWF的風場調整深海的波浪計算，因此使用其他風場來源需要適當調整。Filipot and Ardhuin(2012)提出新的碎波消散參數(TEST500)，其利用碎波機率及單位面積下之消散率等碎波基本物理機制，透過隨波高，波長和水深變化的每單位面積的碎波消散率，整合從深水到淺水碎波消散的過渡段，並透過衛星及浮標觀測，比較BAJ、TEST441、TEST500等之執行力。Ardhuin F. (2012)認為在大洋模擬的誤差，非常敏感於參數化的湧浪消散(swell dissipation)，此可透過試誤法找到參數，唯仍需要觀測及理論基礎方面的協助，其亦認為非線性的湧浪消散比線性模擬的好，此外其認為另一迫切需要改進的是慣性和高頻範圍的光譜形狀，特別是方向分佈，亦透過衛星及浮標觀測，比較BAJ、TEST441、TEST451(較TEST441有較平滑之湧浪消散的門檻，即平滑大氣層流邊界層至亂流邊界層之轉換段)等之執行力，從TEST441改到TEST451，降低誤差4.2%。Saulter et al.(2016)使用NWW3 4.18版SMC網格及Ardhuin et al.(2010)

公式(switch:ST4)，並與3.14版ST3進行比較，使用1年英國氣象台大氣模式的風場，同時與浮標、鑽油平台觀測及衛星進行比較，顯示大幅的改善成果，同時亦取代現行的氣象預報模式。Stopa et al.(2016)主要針對模式對於高階波譜矩(moments)和波譜的執行力進行檢視，其使用CFSSR風場及4.18版NWW3檢視模式中所有的參數化風場公式在，包括Tolman and Chalikov (1996) (代號TC, switch:ST2)、ST3、ST4及Zieger et al. (2015)公式(switch:ST6)等，觀測包括浮標及衛星，結果顯示所有公式對於波高的模擬較佳，但對於波譜的大小及方向的散布(spread)存在較大的偏差，只有部分可以較為理想，但沒有公式是可完全滿足所有的檢視，顯示參數化風場仍然存在改善的空間，尤其是源項在方向上的分布是未來改進的重點。Sheng et al.(2019)利用5.16版檢視不同源項公式在舟山群島附近淺海域之颱風波浪模擬(2014鳳凰颱風及2015昌鴻颱風)，其使用荷蘭風場及ECMWF的組合組合風場，利用浮標驗證比較所有的源項公式，結果顯示使用TC公式的模擬結果最佳。

而氣象局的波浪預報亦需要提升，相關研究顯示，當鋒面由大陸快速出海時，風場預報有被掌握，但在馬祖和新竹波高的預報卻無法看到變化趨勢，研判亦與參數化源項公式有關，因此本研究擬在更新NWW3模式之前，針對現行作業化風場進行不同源項的測試，以便選擇適當的參數化公式。

二、研究方法

(一)NWW3模式

NWW3模式計算波數(wavenumber)、方向波譜(direction spectra)之變化，所用之控制方程式為波浪作用力平衡方程式(action balance equation)，如下式：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla_x [(C_g + U)A] + \frac{\partial}{\partial \kappa} (\dot{\kappa}A) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\dot{\theta}A) = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

其中

$$\dot{\kappa} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - \kappa \cdot \frac{\partial U}{\partial s} \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{\kappa} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} - \kappa \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right] \quad (3)$$

式中 $A(x, \theta, \kappa, t)$ 為波動密度能譜(wave action density spectrum)， x 經度、緯度， θ, κ 波浪傳遞方向及波數， t 時間， S_{tot} 總源項包括線性風浪交互作用 S_{ln} 、風浪交互作用 S_{in} (指數成長)、非線性波浪交互作用 S_{nl} 、能量消散(白沫whitecapping) S_{ds} 、底床摩擦力 S_{bot} 、碎波 S_{db} 、三波交互作用 S_{tr} 、水深引起之波浪散射 S_{sc} 等， $\sigma(=2\pi f r)$ 波浪頻率， C_g 群波速度， U 流速， d 水深， s, m 波浪前進方向及垂直方向座標。

風浪交互作用 S_{in} 與能量消散 S_{ds} 與風場輸入及消散有關，本研究泛指源項。目前5.16版共有5個源項公式，除了WAM-3(1981,1984)(switch:ST1)已較少使用外，其他仍廣泛被使用。各公式可參考表1之參考文獻或NWW3使用手冊。

(二)校驗指標

本研究使用下述之統計指標來評估不同源項的執行力，包括偏差(BIAS)、均方根誤差(RMSE)、相關係數(CR)、分散係數(Scatter Index, SI)、正規化均方根誤差(normalized root square error, NRSE)：

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum (P_i - O_i) \quad (4)$$

$$RMS = \left\{ \frac{1}{N} \sum (P_i - O_i)^2 \right\}^{1/2} \quad (5)$$

$$CR = \frac{\sum [(P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]}{\left\{ \sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2 \right\}^{1/2}} \quad (6)$$

$$SI = \frac{RMS}{\bar{O}} \quad (7)$$

$$NRSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum O_i^2}} \quad (8)$$

三、模式建置

(一)、模式建置及輸入條件

1.模式計算範圍

藍色公路波浪預報模式之計算範圍，根據氣象局(2017)、張恆文(2018)的研究指出，當波浪模式的東邊邊界訂在東經155°時，雖然對於颱風的模擬影響較小，但對於其他時間，整個北太平洋西向的浪往往在此範圍外形成，且受限於其開放邊界條件並未額外設定(即未由其他模式提供)，因此當能量自計算領域傳遞出去時，與邊界條件值無關，但當能量自計算領域外傳入時，因其只靠風速轉換成的能量與上一階時域的值積分而成，若有長週期之能量進入計算領域時，包括颱風未接近台灣但在東經155°西側經過時，例如彩雲颱風(201523)，東台灣海域會受到影響而產生低估的情形。為避免此現象，將計算範圍擴增為4層，最外層計算範圍包括北太平洋，如圖1所示。

地形水深資料取自美國NOAA國家地球物理資料中心(NGDC)ETOPO1解析度1分之地形資料，近台灣海域部分再以海科中心500m水深資料取代。

2.輸入條件

輸入條件包括風場及冰濃度場，風場部分，不同的計算網格使用不同解析度的風場，最外圍2層使用NCEP(National Centers For Environmental Prediction)2018年CFSSR 0.5°解析度之第6小時預報

場，第3層及第4層分別使用氣象局預報中心2018年10km及2.5km解析度之分析場(均為每6小時1筆)。由於北太平洋的北部在冬天已有部分受到冰的影響，故需輸入冰濃度資料，資料來源為NCEP-NOAA CDAS I(Climate Data Assimilation System I)逐日分析資料。

3. 模式計算條件設定

減緩花園灑水器效應(Garden Sprinkler Effect, GSE)及波浪非線性交互作用分別使用PR3平均法及DIA(Discrete Interaction Approximation)法求解。為比較不同源項公式的差異，選擇ST2、ST4、ST6等條件進行分析。

(二)、觀測資料

1. 衛星資料

使用法國 AVISO 高度量測中心 (Altimetry center) 蒐集及處理過的網格衛星資料，解析度為 1° ，頻率為1天1筆。法國 AVISO 高度量測中心的主要任務為聯合處理美國 NASA 及法國太空中心 CNES 在衛星方面的資料，提供快速查看的產品以推廣 Topex/Poseidon 衛星系統，其主要透過高度計雷達反射訊號之形狀及強度來推算波高及海表面風速，目前其應用的領域包括季節性的變動、大西洋颶風、印度洋南向湧浪、瘋狗浪及帆船比賽之航跡追蹤等。其蒐集的衛星包括 Topex/Poseidon、Envisant、Saral、Jason-1、Jason-2、Jason-3 等，即時資料則以 Saral、Jason-2 及 Jason-3 等衛星為主，在觀測2小時產製量測資料提供作為資料同化使用，同時其亦整合過去2天的衛星資料處理成 $1^\circ \times 1^\circ$ 的網格資料。

2. 氣象局浮標資料

另蒐集氣象局浮標觀測資料進行比較，圖2顯示所使用的19個觀測站之位置分布及代號。

四、結果與討論

計算結果分別就風場及波浪場部分說明如下：

(一)、風場

圖3為2018年CFSR與衛星風場的BIAS分布，圖中顯示除了夏威夷群島及赤道附近(北緯 10° 度、東經 180° 度到西經 90° 度)海域風速偏小外，最大約 1.5m/s ，此區域衛星繞行時離地最近，而表面斜率由於膨脹而減小了雷達橫截面，這被錯誤地解釋為更高的風速(Stopa et. al, 2016)。其他地區風速均偏大，最大約在 $1\sim 1.5\text{m/s}$ ，台灣海峽附近偏差較大，可達 2m/s 。圖4及圖5分別為預報中心2018年10km及2.5km解析度之分析場與衛星之比較圖，其中剪出CFSR在相同範圍之BIAS分布圖、10km及2.5km風速與CFSR的BIAS，圖中顯示，10km及2.5km風速

均較衛星大，可達 2.5m/s ，亦大於CFSR，但10km及2.5km之間的差距並不明顯，顯然預報中心經過預報員的判釋後，其風場呈現偏大的趨勢，與CFSR比較，台灣東北海域偏大的趨勢較小，巴士海峽及南海附近較大，而在台灣海域四周約偏大 $0.2\sim 0.4\text{m/s}$ ，巴士海峽及南海附近約偏大 $0.4\sim 0.75\text{m/s}$ 。

(二)、波高

由於預報中心的風場整體大於CFSR，因此加入另一單純考慮CFSR風場的ST2條件進行分析。波高計算結果之比較包括與衛星及浮標，分述如下：

1. 衛星

圖6至圖8分別為2018年 $1^\circ \times 1^\circ$ 平均之波高與衛星BIAS、RMSE、NRSE的比較圖。圖中顯示ST2在大約北緯 30° 以北、台灣四周及北緯 10° 以北之南海均有偏大的趨勢，北緯 10° 以南均偏小。當然南邊開放邊界與邊界條件設定有關，目前並未設定任何條件，故波高偏小的情形是可以預期的。ST2僅使用CFSR風場的計算結果減緩台灣附近海域BIAS偏大的情形；ST4考慮到湧浪消散的因素，使得原ST2偏大區域減小(包括南海北部區域)，轉成略為偏小的情形，而北緯 10° 以南偏小的趨勢較為明顯。ST6與ST4類似，但效果較不明顯，即縮小範圍較小，偏小的部分加大。RMSE亦呈現類似的趨勢，ST4及ST6在北緯 10° 以南偏小加劇，故其RMSE變成偏大的情形。而NRSE的比較顯示ST4在台灣海域、南海北部及北緯 30° 以北海域的數值最小，ST6其次，ST2+CFSR再次之。

2. 浮標及波浪測站

圖9、圖10為波高、週期在各測站之比較圖，同時將不同測站劃分為離島、澎湖群島、台灣西部及台灣東部進行分析。波高部分，圖中顯示台灣東部(除台東浮標)及澎湖全島(除東吉島ST2+CFSR)、東沙島之偏差為正，其他測站則為負，RMSE以ST4普遍最佳，新竹及成功測站為次佳，而富貴角及台東浮標最差，CR在成功測站ST6較差外，其餘差別不大，SI的變化與RMSE一致，參考美國陸軍工兵團提出之PS(performance Score)來判識計算值與觀測值之相關程度(Chawla et al, 2009)，1代表完美的相關，0無相關，其係整合BIAS、RMSE及SI等指標，圖中顯示ST4在11個測站最佳，5個測站次佳，2個站最差(富貴角及台東測站)；週期部分，ST4及ST6所有測站均偏小，ST2在東部及澎湖站偏高，RMSE的部分，ST2與ST4較佳，CR及SI各公式間差異不大，PS各組差異不大，但ST2在9站最佳，ST4在7站最佳。

五、結論與建議

本研究利用CFSR及預報中心風場、針對NWW3 5.16版之源項進行初步測試，並與衛星及浮標波浪站進行比較。結果顯示預報中心提供的風場，在10km及2.5km解析度的差異甚小，但都比CFSR大，尤其在台灣海峽、巴士海峽及南海等區域，此造成了南海波高的正偏差，而ST4及ST6公式可以減緩波高正偏差的數值，ST4尤佳。浮標之波高部分，CR表現差異不大，PS則以ST4表現較佳，週期部分，CR表現及PS亦無明顯差異，但ST2在9個測站最佳，ST4最佳則有7個測站。整體顯示，考慮湧浪消散在大洋模擬中可以提高波高模擬的精度(Ardhuin F., 2012)，對於台灣海域而言，掌握準確的外海開放邊界條件只是提升模擬精度的第一步，而其他包括各波浪分量、波浪碎波引起消散(breaking-induced dissipation)中的消散率等都是需要持續的加以改進調整，但這需要準確的浮標波譜觀測來予以協助；此外大部分浮標都位於近岸區，西部海域潮差大、海流強，此二個因素應是未來波浪模擬需要考慮的因素。

謝誌

本論文係中央氣象局研究計畫「發展波浪資料同化技術及強化波浪系集預報系統(4/4)」(編號MOTC-CWB-108-0-01)之研究成果，承蒙中央氣象局經費之補助使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

- 交通部中央氣象局，2017: "發展波浪資料同化技術及強化波浪系集預報系統(2/4)"，財團法人台灣地球觀測學會，中華民國106年十二月。
- 張恆文，2018: "區域波浪系集預報系統建立及其應用之研究"，國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系博士論文。
- Ardhuin F., E. Rogers, A. V. Babanin, J.-F. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. Van der Westhuysen, P. Queffelec, J.-M. Lefevre, L. Aouf, F. Collard, 2010: "Semi-empirical dissipation source functions for wind-wave models: part I, definition, calibration and validation", *J Phys Oceanogr* 40(9):1917–1941.
- Ardhuin F., 2012: "Dissipation parameterizations in spectral wave models and general suggestions for improving on today's wave models", *Proc. ECMWF Workshop on Ocean Waves*, 113–124.
- Bidlot, J. R., S. Abdalla and P. A. E. M. Janssen, 2005: "A revised formulation for ocean wave dissipation in CY25R1", *Tech. Rep. Memorandum R60.9/JB/0516*, Research Department, ECMWF, Reading, U. K.

- Chawla, A., H. L. Tolman, J. L. Hanson, E.-M. Devaliere, V. M. Gerald, 2009: "validation of a multi-grid WAVEWATCHIII modeling system", 11th waves forecasting and forecasting workshop, Halifax Nova Scotia, October 18-23.
- Filipot, J.-F., and F. Ardhuin, 2012: "A unified spectral parameterization for wave breaking: From the deep ocean to the surf zone", *J. Geophys. Res.*, 117, C00J08, doi:10.1029/2011JC007784.
- Roland A. and F. Ardhuin, 2014: "On the developments of spectral wave models: numerics and parameterizations for the coastal ocean", *Ocean Dynamics*, 64(6), 833-846.
- Saulter A., C. Bunney and J.-G. Li, 2016: "Application of a refined grid global model for operational wave forecasting", *Forecasting Research Technical Report No: 614*, Met Office.
- Sheng, Y., W. Shao, S. Li, Y. Zhang, H. Yang, J. Zuo, 2019: "Evaluation of Typhoon Waves Simulated by Wave Watch-III Model in Shallow Waters Around Zhoushan Islands", *Journal of Ocean University of China*. 18. 1-11. 10.1007/s11802-019-3829-2.
- Stopa, J. E., F. Ardhuin, A. Babanin, S. Zieger, 2016: "Comparison and validation of physical wave parameterizations in spectral wave models", *Ocean Modell.*, Vol. 103, p.2-17.
- Tolman, H.L., and the WAVEWATCH III @ Development Group, 2016: "User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III@ version 5.16", *Technical Note 329*, NOAA/NWS/ NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp. + Appendices

表 1、NWW3 源項公式參考文獻一覽表

源項公式代碼	參考文獻
ST2	Chalikov and Belevich (1993); Tolman and Chalikov (1996); Tolman et al. (2002)
ST3	Janssen (1991); Janssen (2004); Bidlot et al., (2007); Bidlot (2012)
ST4	Ardhuin et al., (2010); Arduin et al., (2009); Leckler et al., (2013); Rasclé and Ardhuin (2013)
ST6	Babanin (2006); Babanin (2011); Rogers et al., (2012); Zieger et al. (submitted)

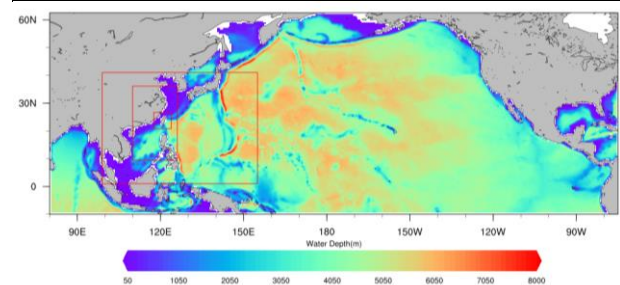


圖1、4層多重網格之計算範圍及水深分布

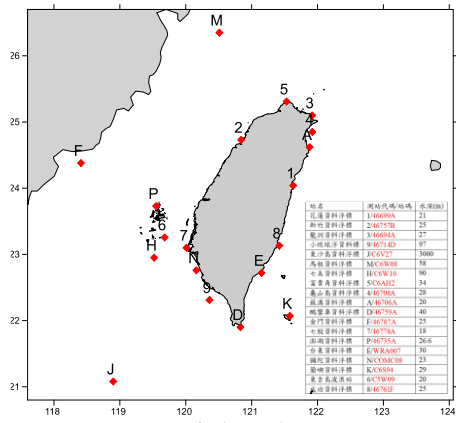


圖 2、波浪測站位置圖

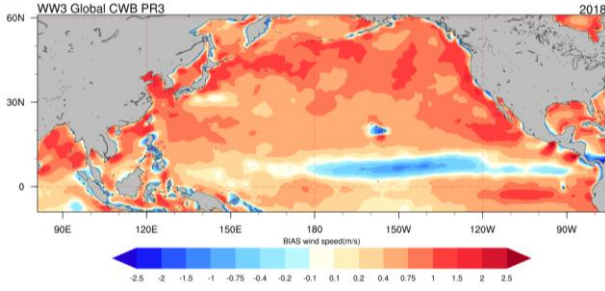


圖 3、CFSR 風場與衛星風場之 BIAS 分布

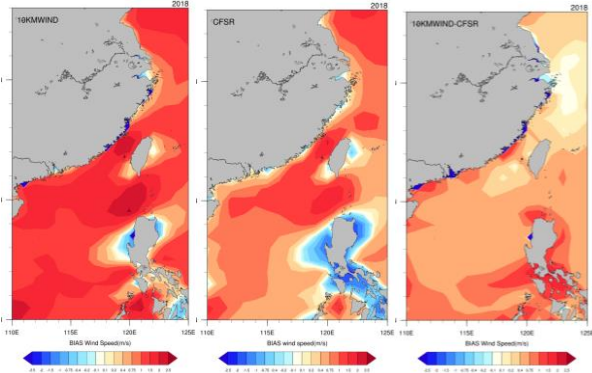


圖 4、10 公里風場與 CFSR 風場之 BIAS 分布(左:10 公里風場, 中:CFSR, 右:10 公里風場減 CFSR)

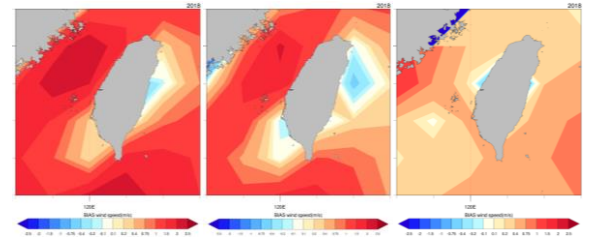


圖 5、2.5 公里風場與 CFSR 風場之 BIAS 分布(左:2.5 公里風場, 中:CFSR, 右:2.5 公里風場減 CFSR)

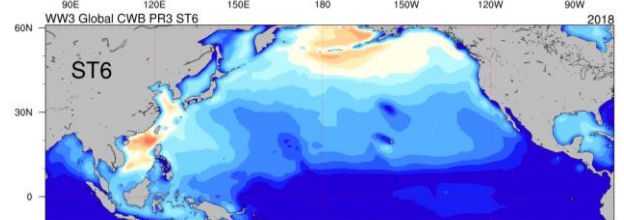
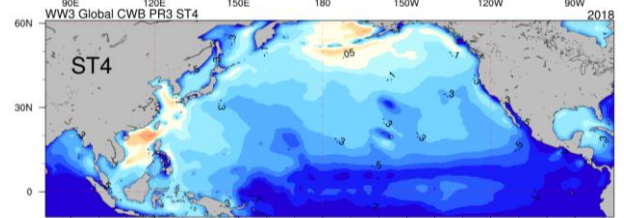
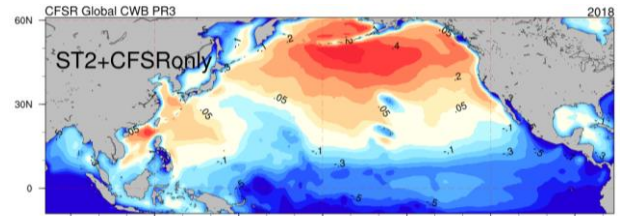
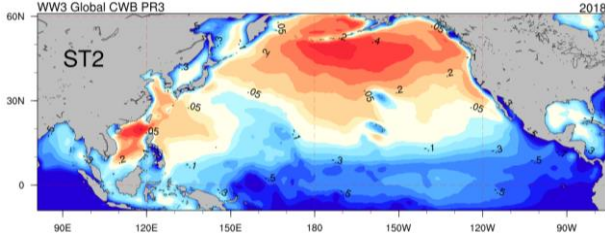


圖 6、波高與衛星波高之 BIAS 分布

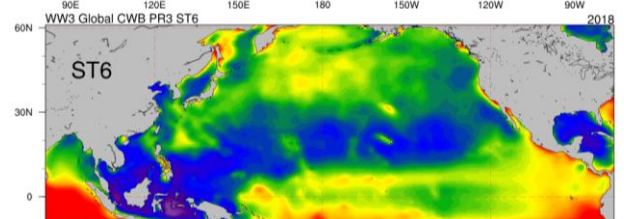
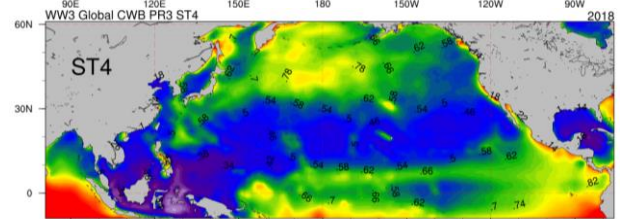
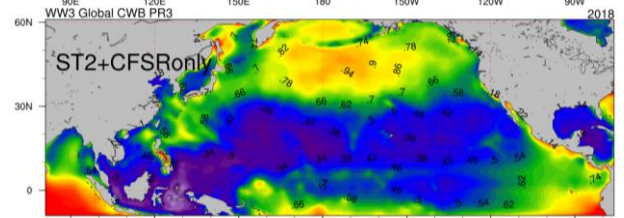
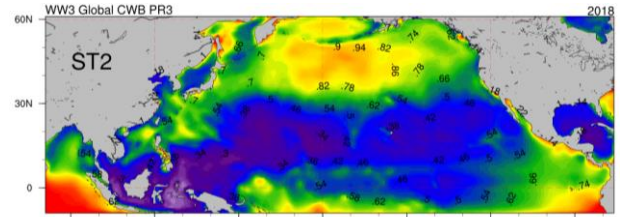


圖 7、波高與衛星波高之 RMSE 分布

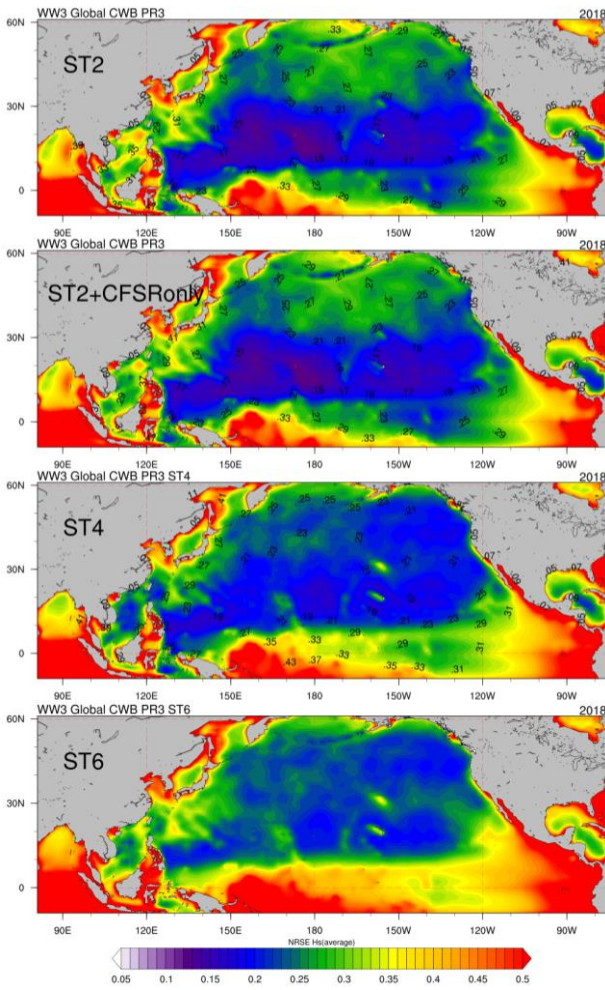


圖 8、波高與衛星波高之 NRSE 分布

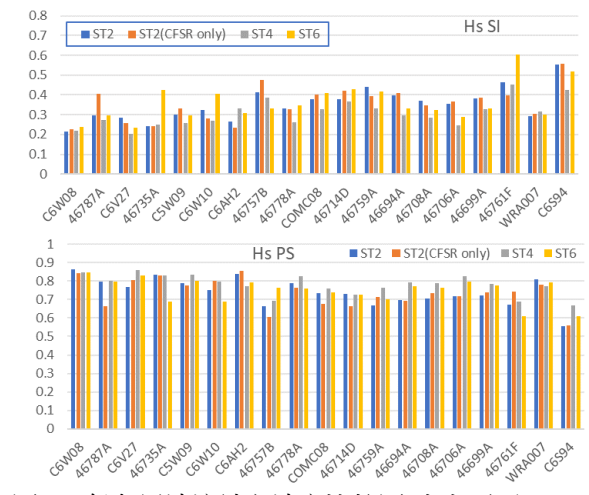
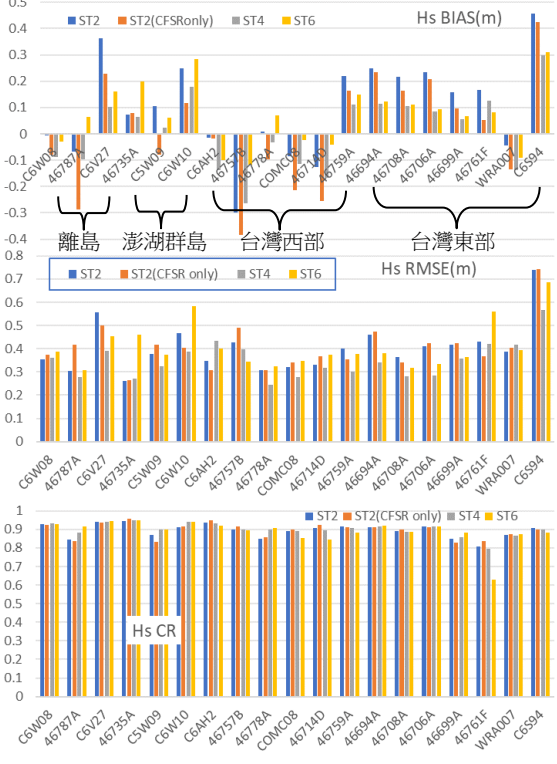


圖 9、氣象局波浪站之波高比較圖(由上而下: BIAS, RMSE, CR, SI, PS)

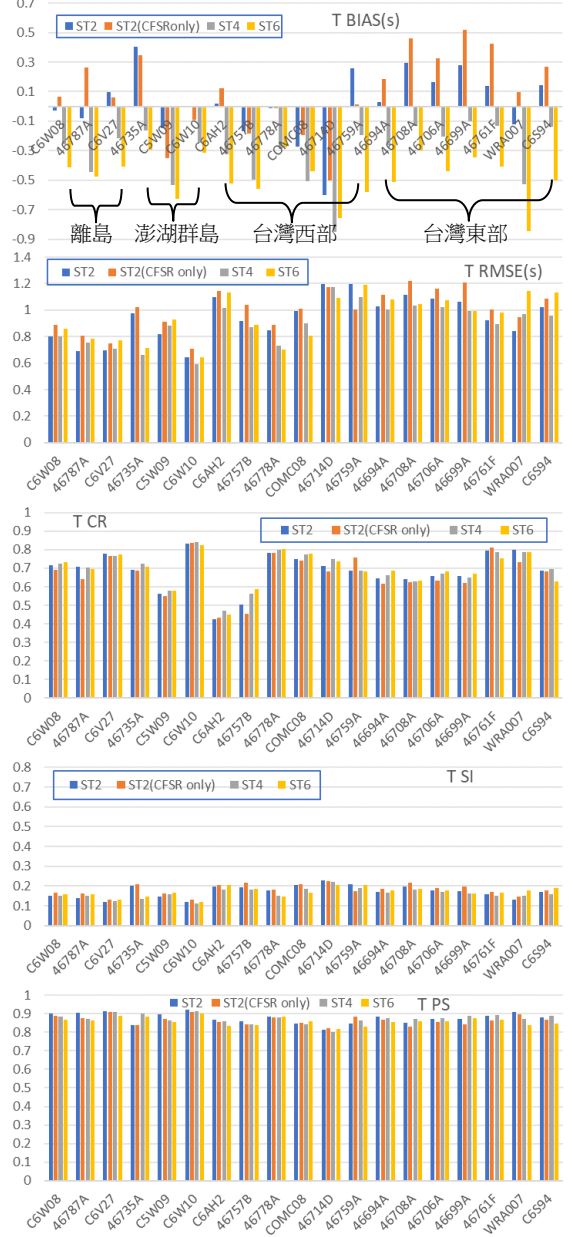


圖 10、氣象局波浪站之週期比較圖(由上而下: BIAS, RMSE, CR, SI, PS)