

颱風定量降水預報指引之校驗與特性探討

朱美霖 張承傳 謝旻耕 葉世瑄 黃椿喜
中央氣象局氣象預報中心

摘要

颱風為臺灣地區主要的災害性天氣之一，每年的豪大雨事件大多與颱風或梅雨有關；颱風侵臺期間往往會有延續時間長且區域範圍廣的強降雨出現，造成地質災害以及水患，影響人民生活甚鉅，因此颱風的降雨預報對防災作業相當重要。過去對於颱風常採用類比法或氣候法，參考過往個案的路徑、位置和測站雨量得到降雨估計，但這 2 種方法均無法掌握環境與颱風交互作用和中尺度對流過程的影響。

近年隨著數值模式進步和因應防災需求，本局區域系集預報系統(WEPS)以及定量降水預報相應上線。定量降水預報上常參考的指引來源有全球模式(EC、NCEP、JMA)、區域模式(如 WRFD、TWRP 等)以及區域系集預報系統(如機率擬合平均概念的 PM 與 NPM 方法、超越機率型產品 QPFP20 和針對颱風做進一步篩選的ETQPF)。整體而言，全球模式穩定性高且預報時間長，但其解析度較低，對於地形的掌握度較差；臺灣地形複雜且地勢起伏大，颱風降雨分布和極值與地形有著密不可分的關係，因此高解析區域模式雖然預報時間較短，但在近期預報的參考價值相當高，具有較完整的物理過程；而區域系集預報系統更是能透過不同初始場擾動和雲微物理參數化設定的成員展現預報的不確定性和機率，透過適當的後處理方法便能從系集系統中產生出符合需求的單一預報指引(最佳解)。本研究針對颱風作業常使用的定量降水預報指引進行近兩年(2014年、2015年)颱風相關豪大雨事件之統計校驗，藉由預兆得分(TS)、公正預兆得分(ETS)、偵測率(POD)等各項技術指標的比較，歸納出各預報指引的特性與優缺點，供防災單位以及日後定量降水預報作業參考。

關鍵字：颱風、定量降水預報、區域系集預報系統、最佳解

一、前言

颱風是臺灣地區造成劇烈降水的主要天氣系統，颱風襲臺往往會有延續時間長且範圍廣的強降雨出現，造成地質災害以及水患，影響人民生活甚鉅，因此颱風的降雨預報對防災作業相當重要。

近年隨著數值模式進步和因應防災需求，本局的WRF區域系集預報系統WEPS以及官方之定量降水預報作業相繼上線。定量降水預報上常參考的指引來源有全球模式(EC、NCEP、JMA)、區域模式(如 WRFD、TWRP)以及區域系集預報系統(如機率擬合平均概念的 P M 與 N P M 方法、超越機率型產品 QPFP20和針對颱風做進一步篩選的ETQPF)。整體而言，全球模式穩定性高且預報時間長，但其解析度較低，對於地形的掌握度較差；臺灣地形複雜且地勢起伏大，颱風降雨分布和極值與地形有著密不可分的關係，高解析度之區域模式雖然預報時間較短，但在近期預報的參考價值相當高，具有較完整的物理過程；而區域系集預報系統更是能透過不同初始場擾動和雲

微物理參數化設定的成員展現預報的不確定性和機率，透過適當的後處理方法便能從系集系統中產生出符合需求的單一預報指引(最佳解)。

近年來全球模式亦持續在進步，模式解析度與時俱進地提高，在校驗上亦有進步的趨勢，加上全球模式具有預報時間長和穩定性高的優視，因此在預報作業上，除了對於前期的情勢評估以及整段時間的趨勢具有相當程度的參考價值，甚至在近期的預報上對於極值也時而會有還不錯的表現，因此在預報作業上仍具相當的參考價值，是校驗工作不可或缺的一環。

本研究針對颱風作業常使用的定量降水預報指引進行近兩年(2014年、2015年)颱風相關豪大雨事件之統計校驗，藉由預兆得分(TS)、公正預兆得分(ETS)、偵測率(POD)等各項技術指標的比較，歸納出各預報指引的特性與優缺點，供防災單位以及日後定量降水預報作業參考。

校驗內容分成兩個部分，一為針對2014年及2015年之間所有颱風警期間的定量降水預報所進行的

24小時QPF統計較驗，另一為針對2015年杜鵑颱風進行整段警報期間的24小時QPF校驗，藉以了解各項模式預報指引對於颱風定量降水預報在統計上的掌握特性，以及個案的差異。

二、研究方法

(一) 觀測與預報資料來源

觀測資料方面，本研究所使用的實際格點雨量資料為劇烈天氣監測系統QPESUMS(Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor)之定量降水估計產品，此產品整合雷達回波資料以及雨量站觀測資料(丘等)，所得到的降水估計產品之解析尺度高，因此適合用來作為格點計驗之觀測基準。

預報資料方面，本研究分別較驗官方預報以及幾項官方預報作業時常參考的模式預報指引，這些預報指引分別是來自全球模式、本局區域模式WRF(Weather Research and Forecasting Model)之決定性預報和一些WRF區域系集預報系統(WEPS)的常用相關衍生產品。官方預報GFE為預報員使用格點化圖面編輯系統，參考各項客觀指引並配合主觀判斷所產製出來。模式資料部分，全球模式共有3組，分別來自歐洲中期天氣預報中心European Centre for Medium - Range Weather Forecasts (EC，2015年以前之解析度為 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ ，目前之最新解析度為 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$)、美國國家氣象局天氣預報中心 National Centers for Environmental Prediction (NCEP，2015年以前之解析度為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，目前之最新解析度為 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)、及日本氣象廳 Japan Meteorological Agency (JMA，解析度為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$)；來自本局區域模式WRF之決定性預報的指引則有WRFD(使用解析度為5公里之資料)和針對颱風做了優化設定的TWRF(亦使用解析度為5公里之資料)。

WRF區域系集預報系統衍生產品之解析度亦為5公里，有簡單統計方法產出之系集平均，WEPS-MEAN(本文配合校驗圖皆簡稱WEPS)，以及使用較進階方法產出的產品，包機率擬合平均(Probability Matched Mean, PM)；即雨量大小的空間相對分布採用WEPS，降雨頻率採用整體系集之總降雨頻率，以及新機率擬合平均 (new PM, NPM)；類似PM的方法，但降雨頻率改以各系集成員之平均降雨頻率，在預報雨量極值上屬於較中性的做法，另外還有「超越機率之定量降水預報」，QPFP，本研究選取在過去梅雨季較驗中表現較佳且具有稍高風險、稍低機率特性的QPFP20(黃等，2016)進行較驗，此項指引之特性也與官方作業希望兼顧精緻化和安全性的考量接近

(二) 個案選取

本研究針對2014年、2015年的颱風24小時定量降水預(24-h QPF)報進行統計較驗，所校驗的有效時

間為合成的颱風侵臺期間(有發警報的時間，含海上颱風警報與海上陸上颱風警報)，藉由校驗累計時間長度為24小時的定量降水預報也可以稍加評估各模式預報指引對於颱風事件總雨量的掌握程度。預報時間(forecast hours)以官方為基準，分別探討到最近一報的24小時(0-24h)以及較早的報數48小時(24-48h)兩個時間，與官方預報擺在一起校驗的模式指引，因考慮到製作官方預報的當下要能夠參考得到，所以預報時間會比官方預報時間提前，確切的時間因模式資料輸出時間間隔而異，EC的預報時間比官方預報時間提前12小時(12-36h、36-60h)，其他預報指引則提前6小時(6-30h、30-54h)

採樣時間以能夠包含整段颱風警報期間為原則，由於24-h QPF的有效時間(valid time)開端有00Z和12Z兩種時間點，採用上因颱風警報第1報之發佈時間而異；當第1報時間落在00Z至12Z之間，則有效時間的開端為00Z；當第1報時間落在12Z至隔天00Z之間，則有效時間的開端為當天的12Z。

2014年、2015年之間共有9個颱風侵襲臺灣，其中引發降水最顯著的颱風有4個：2015年的杜鵑、蘇迪勒以及2014年的鳳凰、麥德姆，也就是這幾個颱風對本次統計校驗的極端降水部分貢獻最大；詳細的所有颱風事件如下：2014年有3個颱風侵臺事件，分別是6月15日的7號颱風哈吉貝(Hagibis)、7月21日至7月24日的10號颱風麥德姆(Matmo)和9月19日至9月22日的16號颱風鳳凰(Fung-wong)。2015年有6個颱風侵臺事件，分別是5月10日至5月11日的6號颱風紅霞(Noul)、7月6日至7月9日的10號颱風蓮花(Linfa)、7月9日至7月11日的9號颱風昌鴻(Chan-hom)、8月6日至8月9日的13號颱風蘇迪勒(Soudelor)、8月20日至8月23日的15號颱風天鵝(Goni)和9月27日至9月29日的21號颱風杜鵑(Dujuan)。

針對2015年杜鵑颱風亦進行整段颱風警報期間之24小時定量降水預報預報之個案校驗，個案挑選之方法同上述。

(三) 雨量門檻與校驗門檻定義

在氣象局現行(最新修訂時間為2015年9月1日)的豪大雨事件定義標準上，大雨為小時雨量達40毫米或24小時雨量達80毫米、豪雨為3小時雨量達100毫米或24小時雨量達200毫米，大豪雨和超大豪雨僅以24小時雨量定義，分別是達到350毫米以及500毫米。本研究參考此的豪大雨標準，將校驗圖所使用的雨量門檻分成中小雨、大雨、豪雨、大豪雨和極端降雨等五個階級。

雨量門檻與色階在校驗圖上有統一對一的關係，在此稍加說明以便判讀，由圖1左側之圖例，從1毫米以上的降雨開始校驗，在1-10毫米(即雨量門檻為1毫米，後續依此類推)以淺藍色色階表示、10-20毫米以深藍色表示、20-50毫米以亮綠色表示，以上階段之

降雨在本文以「中小雨」稱之。50-100毫米的部分是橘色、100-200毫米的部分是紅色，在本文以「大雨」和稱之。200-300毫米為桃紅色，為本文所指之「豪雨」。300-500毫米為淺粉紅色，為本文之「大豪雨」。最後是500毫米以上的部分，以膚色表示，為超大豪雨之極端降雨事件。

(四) 校驗方法

格點校驗的方式為選取臺灣本島陸地解析度 $0.0125^{\circ} \times 0.0125^{\circ}$ 共 21822 個網格點，以列聯表比較觀測及預報是否達到雨量門檻值後，計算出的各項指標之校驗得分(Olson et al., 1995)，本文採用的4項指標TS、BS、POD以及FAR對預報掌握度與特性進行評估；詳細的校驗指標定義及說明請見(葉等, 2016)。

TS、BS、POD及FAR等四項指標除了有各自的意涵也有互相連帶的關係，性能圖(Performance Diagram)即為能夠整合此四項指標的綜合分析圖，本文也將輔以性能圖說明各項指引的綜合分析，關於性能圖的詳細的說明請見(黃等, 2016)。

三、模式預報校驗分析

(一) 全球模式

圖1為官方預報時間0-24h之颱風24h定量降水預報統計校驗，比較3家全球模式預報指引的TS得分，整體而言以EC的表現最佳、NCEP次之。中小雨部分，3家模式的表現都不錯，得分都在0.7附近；20毫米門檻上，EC得分為0.7、NCEP為0.65、JMA為0.65。大雨部分，得分拉距稍增；以100毫米門檻來看，EC得分為0.55、NCEP為0.5、JMA略低於0.5。到了豪雨以上，三家模式之得分出現明顯差距，豪雨部分EC得分仍有0.4表現相當良好，NCEP降至0.3，JMA則大幅降至0.1附近。大豪雨方面，EC之得分也下降至0.2、NCEP降至0.1附近，JMA則僅僅只有約0.01。而在極端降雨方面，只有EC稍微有一點技術，為0.05，NCEP及JMA則沒有辦法掌握到此等級量值之降雨。

進一步分析EC模式的得分結構，中小雨的預報表現方面，TS得分在0.7附近，BS為1.2，顯示預報面積與實際下雨面積相比稍有高估傾向，但偏離程度完全均勻，至於POD和FAR則分別在0.9和0.2附近，幾乎沒有漏報實際降雨，誤報面積也小，而掌握到實際下雨的程度略優於沒有誤報的程度。大雨方面，TS得分仍在0.6附近，BS約1.3，對於實際降雨面積仍高估，偏離程度不均勻，雨量門檻較高者高估的面積也較大；POD仍接近0.9、FAR則約0.35，顯示對於實際下雨的面積掌握度仍相當高，不過誤報面積也增大，TS得分較來自於POD的貢獻。豪雨以上之TS、POD得分皆明顯下滑，同時FAR也愈來愈大，BS則開始呈現低估和不均勻偏離的趨勢；豪雨、大豪雨至極端

降雨的TS得分依次為0.4、0.25、0.05，POD為0.6、0.3、0.05，FAR為0.4、0.45、0.5，BS為1、0.6、0.1。觀察豪雨的BS、POD和FAR可以發現，雖然BS為1意味著預報面積與實際下雨面積一樣大，但此時兩者的交集的面積只占預報面積(或實際下雨面積)的60%，掌握到實際下雨的程度與沒有誤報的程度相當，這樣的表現在豪雨門檻上其實是相當良好，為所有校驗對象中TS得分最高的預報指引。

大豪雨部分，掌握到實際下雨的程度低於沒有誤報的程度，顯示TS得分較來自於低誤報的貢獻。EC對於極端降雨的預報表現在全球模式當中是最佳的，不過和區域模式或區域系集預報系統的衍生產品相比還是遜色許多，顯示臺灣崎嶇的地形與極端降雨有著密不可分的关系，而較高的模式解析度由於對於地形的掌握度較佳，因而對於極端降雨的掌握能力也明顯較高。

(二) 區域模式與區域系集預報產品

中小雨部分區域模式和區域系集預報產品大致都表現不錯，WRFD、TWRF、WEPS、PM、NPM之TS大致在0.7之上，略優於全球模式的EC，TWRF表現尤佳，20毫米門檻之TS是所有指引當中最高的。而QPFP20在20毫米門檻的TS得分是各指引當中最低的，觀察同門檻下的BS、FAR以及POD可以發現，QPFP20的誤差來源主要是來自於預報面積過大，容易高估中小雨為QPFP20之特性，其BS都在1之上，POD雖然高，但FAR也大。大雨的校驗情形與中小雨類似，QPFP20仍有高估的狀況，其他區域模式與系集產品的表現則沒有明顯差異，TS得分都約有0.5，其中以WRFD、TWRF的表現較佳，但進一步和EC比較，100毫米門檻的表現上，EC得分仍是最高，比較此門檻下三者的BS、POD、FAR，三者預報面積都傾向高估，EC的高估的程度最大，而三者的FAR卻一樣都為0.4，但EC有最高的偵測率，顯示WRFD和TWRF與EC相比主要的誤差是來自於對實際降雨面積的漏報。

豪雨階段，各系集產品和WRFD、TWRF的表現仍呈現在JMA、NCEP之上、EC之下，值得注意的是，QPFP20的POD得分相當高，將近0.7，官方則是所有指引中最高，將近0.8，探究其因，官方考慮預報穩定性及風險，會參考或保留部分較舊報數的資訊，由圖2便可以發現，官方預報時間24-48h(圖2b)，各預報指引都偏在BS大於1之高估區，且有較多指引做出偏大的大豪雨和極端降雨(靠左下角之膚色及粉紅色)，但在00-24h(圖2a)雨量又普遍有下修趨勢。大豪雨量級的降雨是高解析區域模式或系集模式明顯勝出全球模式的分界門檻，如前節所述EC在300毫米門檻之TS大幅下降至0.2附近，而高解析區域模式系列則都有超過0.3的得分，由高而低分別是WRFD、WEPS、NPM、QPFP20、PM、TWRF，POD方面，

官方及QPFP20仍為最高，顯示WRFD、WEPS、NPM較高的得分較來自於誤報狀況少的貢獻。

極端降雨部分，由統計校驗可以了解到，目前數值模式的掌握能力還是相當有限，雖然不至於完全沒以預報能力，但所有指引TS得分都不超過0.2，並且高解析區域模式和系集產品都有明顯較佳的表現，TS得分都至少有EC的3倍，其中又以系集產品最接近0.2，系集產品能夠展現出預報的不確定性(或各種可能性)和機率，因而在極端降雨的統計預報上比決定性預報的WRFD、TWRF表現更佳。不同統計方法產出的系集產品在TS得分上沒有顯著差異，POD則呈現QPFP20最高、PM次之，FAR呈現NPM最低、PM次之，顯現QPFP20明顯高估和偵測率也大的特性，以及PM、NPM方法能夠從系集系統中得出較折衷(POD比WEPS高些、也有相對下修FAR的效果)的預報，並且以NPM的表現最為中性，此部分結果也與梅雨季校驗(黃等，2016)一致，不過在颱風統計校驗中，PM、NPM的TS成績還是被較大的FAR拉下來，略低於偵測率表現其實偏低的WEPS，而且不只在極端降雨門檻，豪雨以上都是這樣的情況，至於大雨和中小雨，WEPS之POD亦高，因此本校驗中PM、NPM與WEPS沒有明顯差異。

四、2015年杜鵑颱風個案校驗分析

(一)個案描述

回顧2015年第21號颱風杜鵑之降雨情形，27日在颱風外圍環流影響下，北部及東北部地區開始有降雨出現，由於此時臺灣附近風向為偏北風，白天主要的雨區出現在雪山山脈西側，晚上後隨著颱風逐漸接近，除上述地區雨量持續增加外，宜蘭山區的雨量也快速增加。28日00Z至29日00Z這段期間為本次個案降雨最多的時候，颱風中心登陸前降雨最多的地方位於北部、東北部地區及花蓮北側，28日00Z到12Z新北市山區及宜蘭縣山區累積雨量皆達到大豪雨的等級，其中最大值為新北市福山的497毫米，晚上後隨著颱風中心進入陸地及出海，雲林以南轉為西南風，雨量開始迅速增加，28日12Z到29日00Z嘉義縣山區及高雄市山區累積雨量亦皆達到大豪雨的等級，其中最大值為嘉義縣龍美的435.5毫米，29日白天後隨著颱風中心進入大陸，臺灣地區的降雨逐漸減緩。本次颱風侵臺期間局屬人工站最大24小時累積雨量達大豪雨等級的計有阿里山、鞍部及竹子湖，其中雨量最多的阿里山站達到495.5毫米。

(二) 24-h QPF校驗

圖3為2015年杜鵑颱風之24-hQPF校驗。所有指引之中小雨TS得分皆隨時間進步，來到官方預報時間00-24h，得分普遍在0.8或以上；大雨之100毫米門檻，NCEP、WRFD、TWRF之預報有比其他指引還明顯的隨時間進步的趨勢，00-24h官方有最高的TS得分，其次是EC、WRFD、TWRF並列。豪雨門檻，

不論是00-24h或24-48h，EC之表現都最佳(TS為0.5)，與統計校驗結果一致，WRFD與TWRF亦接近0.5。大豪雨門檻，值得注意的一點是，24-48hEC的表現為所有指引中最好，有前期定量評估的參考價值，而來到00-24h，EC進步幅度不多，倒是WRFD、TWRF明顯提升為表現最佳指引。而在極端降雨部分，TWRF的表現更是出色，超過0.2。

五、結論

所有校驗上，TS得分皆隨雨量門檻提高而下滑，高門檻區段(豪雨、大豪雨和極端降雨)的下滑程度較低門檻者(中小雨和大雨)迅速許多。統計校驗顯示，POD亦隨雨量門檻提高而下降；FAR則隨雨量門檻提高而提高，所有數值模式預報指引在豪雨以上都有大於0.5的誤報程度；BS方面，所有數值模式預報指引在中小雨大致接近1並傾向高估實際降雨面積，在豪雨至極端降雨區段，全球模式開始明顯低估，區域模式則傾向越來越高估，系集預報產品表現各異，WEPS傾向無偏(但在個案校驗上則不然)，QPFP20、PM、NPM則有不同程度的高估；官方預報之表現與QPFP20接近。

整體而言EC在豪雨以下的表現相當良好，前期預報之大豪雨也有高參考價值。統計上高解析指引在近期預報表現一致不錯，但個案之差異大，使用上須留意。近期預報大豪雨和極端降雨方面，TWRF和WRFD是相當不錯的指引，WRFD在統計校驗成績最佳，TWRF則在個案有傑出表現；災防觀點來看，校驗POD相當重要，統計顯示，各指引POD表現分歧度大，豪雨而言官方及QPFP20得分最高，WRFD、WEPS、NPM雖有較高TS，但貢獻來自誤報少，極端降水往往帶來嚴重災情，稍低機率稍高風險的指引(如QPFP20)是相當重要的參考。

參考文獻

- 丘台光、陳嘉榮、張保亮、林品芳：劇烈天氣監測系統QPESUMS之服務與應用。http://qpesums.cwb.gov.tw/taiwan-html/QPESUMS_doc.pdf, 18頁。
- 黃椿喜、葉世瑄、呂國臣、洪景山，2016：從定量降水預報、定量降水機率預報到超越機率之定量降水預報。投稿至大氣科學。
- 葉世瑄、林沛練、宏景山、黃椿喜，2016：機率擬合之系集定量降水預報後處理方法。大氣科學，44，83-111。
- 葉世瑄，2014：系集定量降水預報方法之研究。國立中央大學，大氣物理研究所，碩士論文。
- 謝旻耕，2014：颱風定量降水預報作業簡述 - 以鳳凰颱風為例。2014海峽兩岸災害性天氣分析與預報研討會。
- David A. Olson, Norman W. Junker, and Brian Korty, 1995: Evaluation of 33 years of Quantitative Precipitation Forecasting at the NMC. Weather Forecasting, 10, 498-511

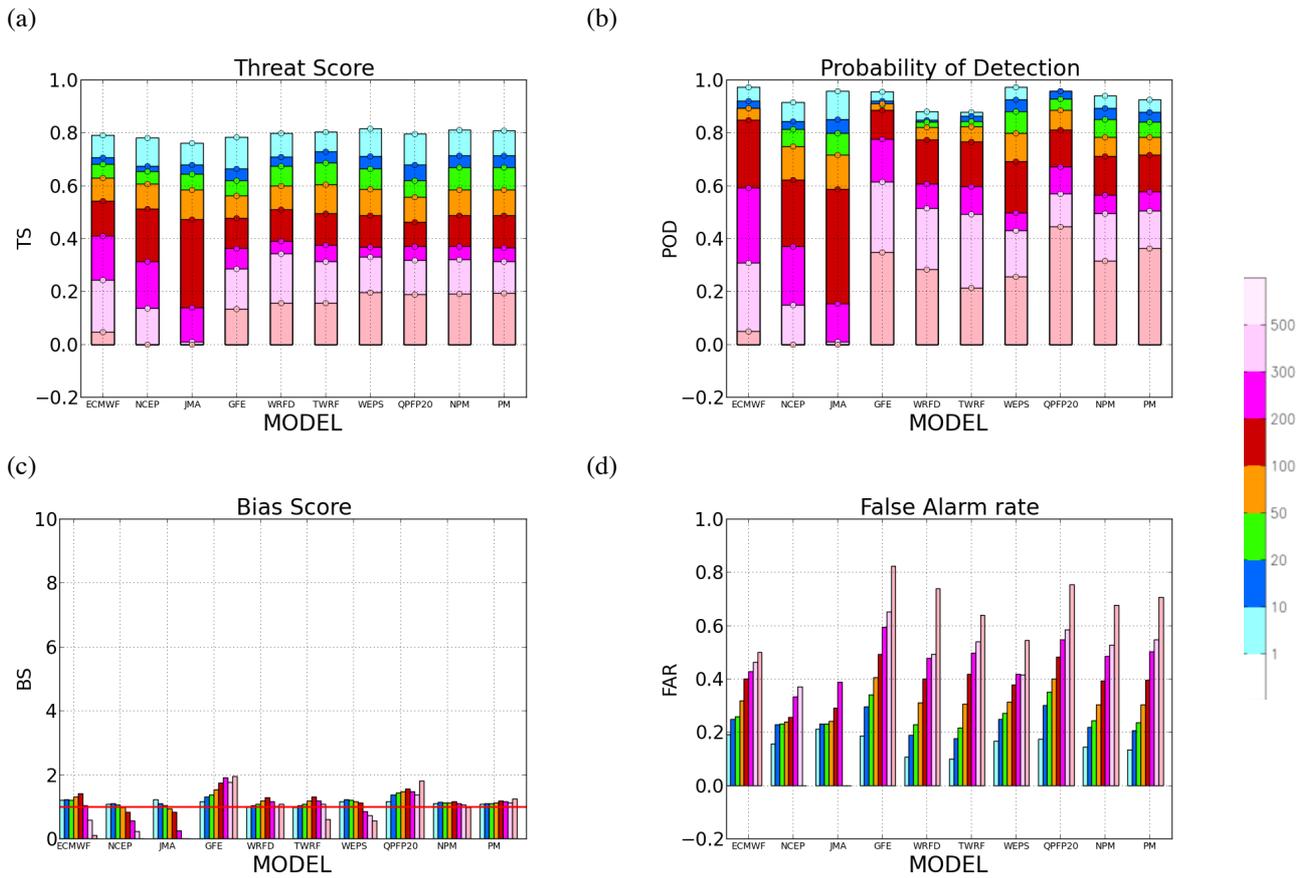


圖1 預報時間為0-24h之官方預報以及各數值模式預報指引之24h定量降水預報統計校驗得分，統計時間為合成2014年及2015年當中之有颱風警報期間；縱軸為各較驗參數之得分：(a)TS (b)POD (c)BS (d)FAR；橫軸則為所校驗的各項預報產品，由左至右為依序為全球模式EC、NCEP、JMA、官方GFE、區域模式WRFD、TWRF、系集預報產品WEPS、QFPF20、PM、NPM)。

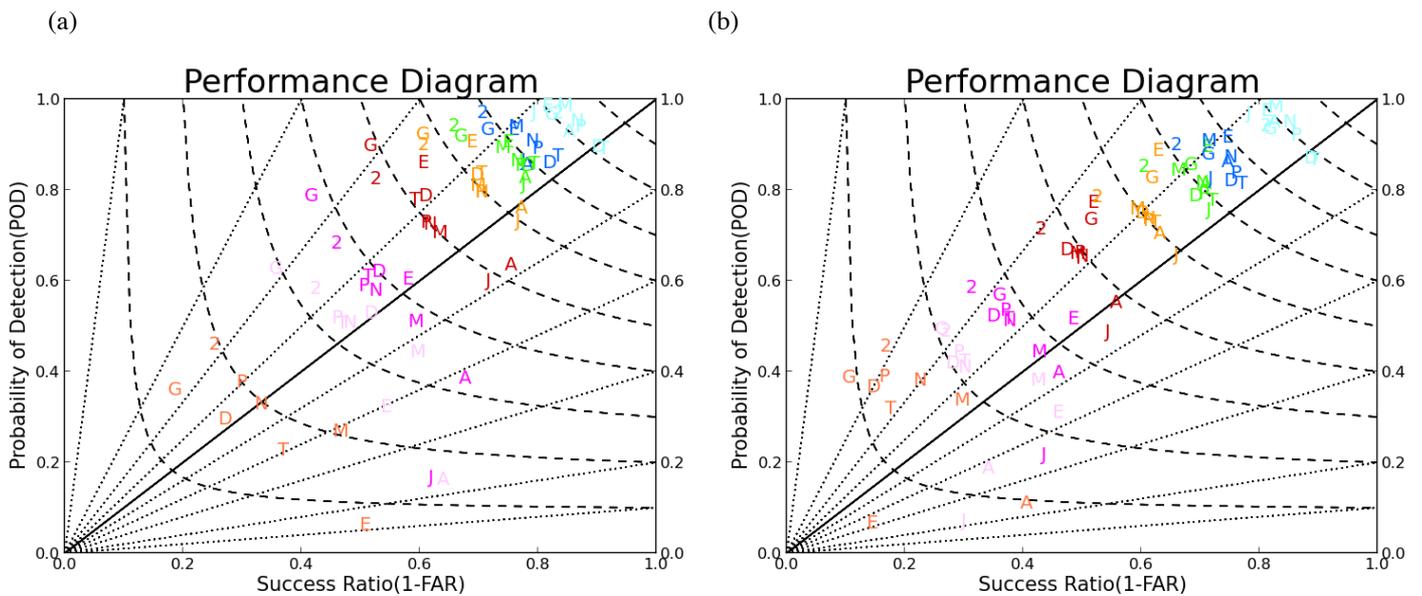


圖2 性能圖2014年、2015年颱風統計校驗24-h QPF性能圖，縱軸為偵測率(POD)、橫軸為預報成功率(1-FAR)、斜直點線為偏差指數(BS)、虛線曲線為預兆得分(TS)，各色數字及字母代表所校驗的各項預報產品，G為官方、D為WRFD、T為TWRF、E為EC、A為NCEP、J為JMA、M為WEPS、N為NPM、P為PM、2為QFPF20，顏色代表各雨量門檻；(a) 有效時間為00-24h (b)有效時間24-48h。

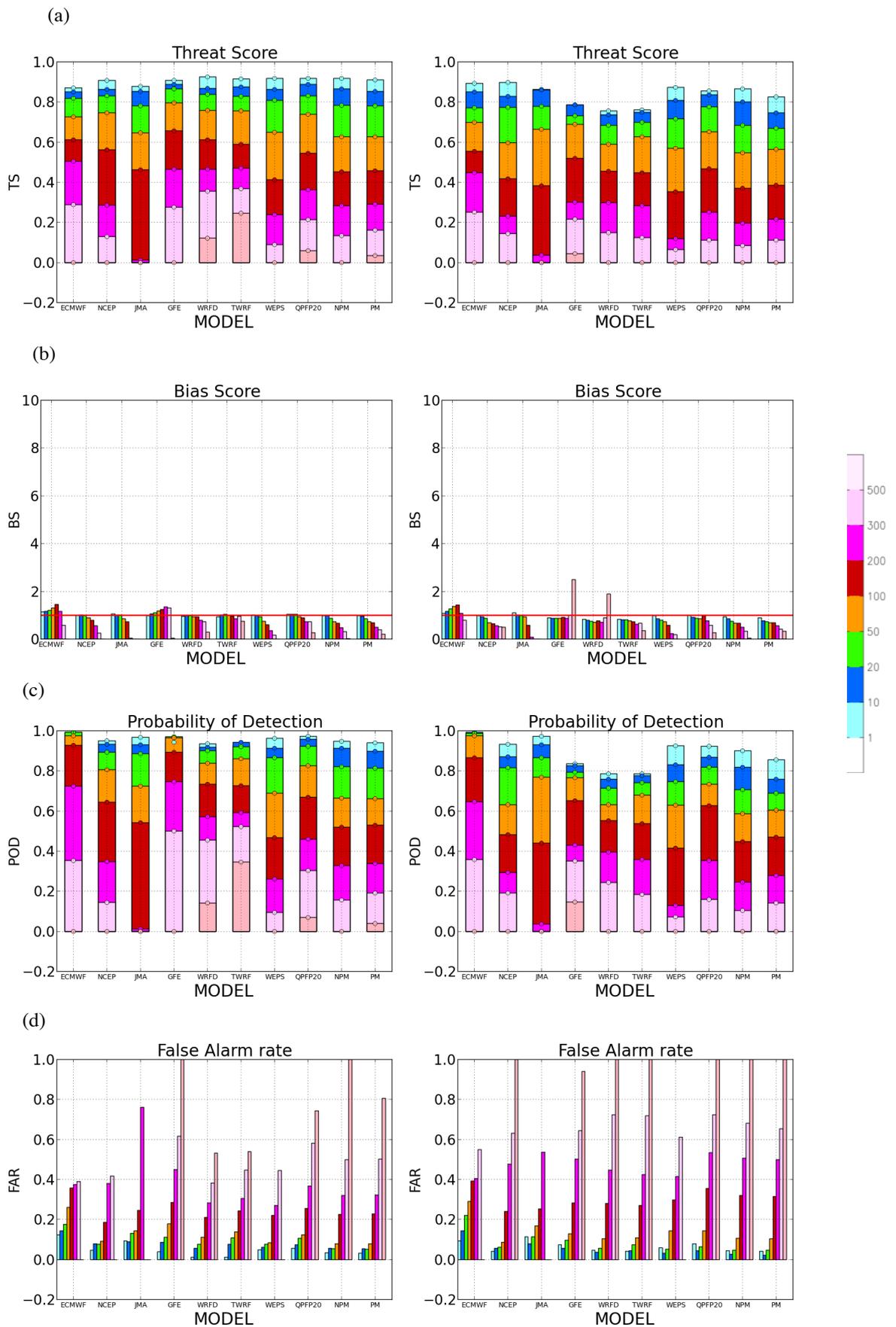


圖3 2015年杜鵑颱風警報期間之官方與各模式預報指引24-h QPF校驗，左欄之官方預報時間為00-24h，右欄之官方預報時間為24-48h；(a)TS (b)POD (c)BS (d)FAR。