

系集預報系統產生最佳定量降水預報方法之探討與分析

葉世瑄 黃椿喜 呂國臣 洪景山

中央氣象局

摘要

本研究在中央氣象局之系集預報系統的架構下，依據系集預報系統設計之原理，並由 2015 年梅雨季統計校驗之結果，探討各種系集預報方法產生之定量降水預報(Quantitative Precipitation Forecast, QPF)產品特性，包括系集平均、PM (Probability-Matched Mean)、NPM (New PM)及超越機率(或百分位數)之 QFPF (Exceeding Probability of QPF 或 QPF Percentile)產品。以統計結果而言，所有預報方法之預報技術皆隨雨量門檻提高而降低。系集平均對小(大)雨之預報技術高(低)，具有對小雨高估但大雨低估且不均勻偏離的特性。PM 在極端降雨之校驗技術最高，但偏離指數也大；小至大雨則略有高估且偏離指數略大於 1。NPM 是最中性的定量降水預報產品，對極端降雨具有有限的預報技術，而對整體雨量僅有輕微高估，但其偏離指數最接近 1，近似於均勻無偏。QFPF 之偏離指數隨機率門檻增大而減小；任意機率之 QFPF 隨雨量門檻增加呈不均勻偏離，但程度小於系集平均；50% 以上之 QFPF 對整體之降水為低估；而 QFPF20 與 QFPF30 具有較高的預報技術，對極端降雨仍具有有限的技術，雖略有過度預報，但不失為優良的指引。NPM 是系集預報系統在理論及統計上的最佳解，具有高預報技術、高偵測率，低誤報率、低漏報率且接近無偏的最佳的預報特性。為了防災上的需求，對於具有有限機率的高風險的事件，通常會預作提醒及特別注意，因此中央氣象局之官方定量降水預報作業會傾向提供稍低機率、但高風險的事件，以致常稍有過度之預報，與 QFPF20 特性相似，為本研究建議另一綜合評估之重要參考。QFPF 產品亦可提供預報人員更多預報之彈性，例如針對防災之應變，可依機率提供不同情境評估，如：1.) 高風險、低機率的 QFPF5 或 QFPF10；2.) 稍高風險、稍低機率的 QFPF20 或 QFPF30；或 3.) 低風險、高機率的 QFPF50 或 QFPF70 等。

關鍵字：定量降水預報、機率擬合平均、定量降水機率預報、超越機率

一、前言

為了因應防災的需求，中央氣象局自 2005 年 12 月 31 日起正式發布 24 小時內之逐 12 小時定量降水預報，目前每日於清晨 05 時 30 分 及下午 05 時 30 分各發布一次未來 2 個時段(12 小時一段)的定量降水預報。一般而言，評估系集預報系統至少應包含 3 類預報產品：最佳決定性預報、變異程度及機率(Lorenz, 1993; Du et al., 1997)，其中關鍵問題是如何由系集預報系統得到最佳的決定性預報與機率預報，因此有許多系集衍生產品。本研究重點擺在預報雨量方面，如何從系集成員各自的 QPF，產製有用的降水預報指引。鑒於 CWB 有自行發展的系集預報系統 WEPS，本研究將針對四種預報降水產品：系集平均、PM、系集頻率平均(New PM, NPM)與超越機率之定量降水預報

(QFPF)，選取 2015 年梅雨季進行系統性的統計分析。第二部份說明觀測資料來源，WEPS 模式簡介與研究方法。第三部份為主要的校驗結果，而相關討論與結論則在最後說明。

二、資料來源與分析方法

(一) 資料來源與模式簡介

本研究使用的格點雨量資料與觀測雷達回波資料為中央氣象局自 2002 年起整合多重觀測資料並結合地理資訊發展劇烈天氣監測系統 QPESUMS (Quantitative Precipitation Estimation and Segregation Using Multiple Sensor)之定量降水估計產品與雷達產品。

系集模式則為氣象局作業使用之系集模式預報系統，這個系統是基於本局決定性 WRF 模式(Weather Research and Forecasting Model)所做的預報(WRFD)，使用 WRF 三維變分同化系統(WRD three-dimensional data assimilation system, 3D-VAR)建構的系集預報系統，為三層巢狀網格結構，解析度分別是 45/15/5 公里，現行預報作業每日更新 4 次，分別為每日的 0000 UTC、0600UTC、1200UTC、1800UTC，每次產生 20 個系集成員之預報結果。總預報時間長度為 72 小時，模式輸出頻率為 3 小時一筆(李等 2011)。

(二) 研究方法

PM 為 Ebert(2001)提出，圖 1(b)為其預報結果。其設計理念可用圖 2 詮釋，圖 2 為康瑞颱風於 2013 年 8 月 28 日 1200~8 月 29 日 0000UTC (與圖 1 預報時間相同)的 12 小時累積之降雨頻率，圖中黑色曲線為實際觀測，紫色曲線為系集平均。同樣顯示 50 毫米以上明顯低估(紫色曲線位在黑色曲線下方)，但 50 毫米以下則預報的還不錯(紫色曲線與黑色曲線重合)，而中小雨分布在 QPF 圖中即代表降雨空間分布的形狀。另一方面，降雨頻率分析之棕色曲線(系集)顯示觀測之降雨極值確實落在系集 QPF 的變異之內，表示系集預報系統本身具有預報大雨的能力。故 PM 擁有與系集平均 QPF 相同之空間分佈來保有對中小雨的預報能力，並將整體系集成員頻率重新分配而能得到比系集平均更好的降水強度。但也因 PM 並沒有考慮到系集成員彼此預報的差異性，故極值容易來自某幾個系集成員所預報的 QPF 極值。從圖 2 也可看出，PM(藍色曲線)在大雨部分降雨頻率比系集平均更接近實際觀測，但在極大值的部分(12 小時累積降雨量大於 300 毫米)則有明顯預報過度的情形。

NPM 則參考 PM 處理系集系統之降雨頻率的基礎，空間之相對分布同樣採取系集平均，但考慮各系集成員之差異，採用各成員降雨頻率之平均作為 NPM 的降雨頻率，理論上應是良好系集預報系統的較佳解。圖 1(c)為其預報結果。從圖 2 即可觀察到實際觀測之降雨頻率(黑色曲線)落在棕色曲線(系集成員)的中間時，大致為系集預報最理想的情形，滿足 NPM 的假設；NPM 的降雨頻率(紅色曲線)在大雨部分明顯比系集平均來的接近實際觀測，也改善了 PM 在極值降雨

過度預報的情形。

QFPF 為以機率空間產生之定量降水預報產品，圖 3 為其預報結果。在系集預報系統之架構下，給定降雨門檻可產生定量降水機率預報 PQPF_x，若給定機率門檻 y%則可產生超越機率之定量降水預報 QFPF_y，QFPF_y亦可表示為任一格點雨量預報在系集維度上第 y 百分位數(percentile)之排序。PQPF_x 表示系集預報系統中發生 x 毫米以上之 QPF 的機率，轉換到機率空間上可以表示為此系統有 y%的機率產生超過 QFPF_y 的雨量；實際上，QFPF_y 圖上發生 x 毫米以上雨量的範圍相等於 PQPF_x 圖上發生機率為 y%的範圍。QFPF 意義上仍是定量降水預報，但隱含機率之本質，因此易於提供防災或水文耦合模式進行模擬，或以不同機率門檻進行災害情境之評估。經 QFPF 處理後之雨量累積頻率(無附圖)較單一成員雨量頻率(圖 2)之散布範圍更大，具有更大的散度。

(三) 校驗方法

本研究校驗格點上之系集 QPF 預報與觀測降水，並使用預兆得分(Threat Score, TS)、公正預兆得分(Equitable Threat Score, ETS)與偏差指數(Bias Score, BS)進行定量分析。TS 與 ETS 為了解模式預報超過門檻值時，正確預報降雨面積占預報與觀測降雨面積總和的比值；BS 則為模式預測降水次數與觀測降水次數之比值。TS、ETS 值越接近 1，表示模式降雨預報能力越高；BS 數值小於 1 代表預報低估，大於 1 代表預報高估。

四、 結果討論

(一) 預兆得分(TS)與公正預兆得分(ETS)

圖 4 為 2015 年梅雨季統計校驗各項技術指標之結果，整體而言，所有系集預報方法之預報技術大致隨雨量門檻提高而降低，系集平均在 1 毫米及 10 毫米雨量之 TS 與 ETS 相當於 QFPF₂₀，具有較高的預報技術；20 毫米之預報技術落後 PM 及 NPM，50 毫米及 100 毫米雨量之技術迅速下降，對於 200 毫米雨量則完全沒有預報能力。QFPF₂₀ 於 10 毫米及 20 毫米雨量之 TS 與 ETS 低於系集平均，1 毫米及 50 毫米以上則較高。NPM 於 1 毫米及 10 毫米雨量預報技術略低於系集平均，其餘雨量門檻皆較高。PM 之預報技術

大致與 NPM 相似，但在各門檻雨量之預報技術皆略低於 NPM，僅最極端的 200 毫米預報技術高於 NPM。

(二) 偏離指數(BS)

偏離指數 BS 表示任一雨量門檻之預報面積(格點數)與觀測面積的比例，兩者雖不一定交集產生 TS 或 ETS 得分，但若預報與觀測的位置相差不遠，可以詮釋為面積預報過度或不足之指標。偏離指數 BS 為 1 表示預報與觀測面積相當，視為無偏之預報，大於 1 是面積過度預報，小於 1 則是面積預報不足。對 2015 年梅雨季的統計校驗而言，系集平均之平滑效應導致 BS 隨預報門檻增加而逐漸降低，在圖 4 上呈現梯形之分布，意義是對小雨面積高估但大雨低估。PM 與 NPM 透過雨量頻率重新分配後，其 BS 大致呈水平分布；NPM 各門檻之 BS 約在 1.1 至 1.3 之間，略有過度預報之傾向，與雨量門檻相關不大，僅在 200 毫米雨量時低估(BS 為 0.61)；PM 之 BS 大致隨雨量增加而略為增加，約在 0.98 至 1.7 之間，且其極端的 300 毫米雨量為明顯高估(BS 為 3.05)；PM 及 NPM 皆可以修正系集平均的特性，得到更合理的降雨頻率分布，且對於預報之區域也較合理，但 PM 在最極端之雨量門檻常有高估的傾向。QFPF10、QFPF20 及 QFPF30 之 BS 大致為凸字形分布，20 或 50 毫米以下之 BS 隨雨量提高而提高且為過度預報，越低機率門檻之 QFPF 的偏離指數越大，20 或 50 毫米以上之 BS 則隨雨量門檻增加而降低；50% 以上之 QFPF 的 BS 皆隨雨量門檻增加而降低，且其對各門檻皆為低估，越高的機率門檻之 QFPF 於越高的雨量之低估特性越明顯。

(四) 性能圖(Performance Diagram; Robbert, 2009)

從 Robbert 於 2009 年提出的性能圖(圖 5)可以綜合比較定量降水技術之得分及各項技術特性，橫軸為成功預報率(Success Ratio, 1-FAR)；縱軸為偵測率(POD)；曲線為預兆得分(TS)，由左下至右上之 TS 得分逐漸增加，右上角代表完美預報，左下角則無預報技術；而傾斜直線為偏離指數(BS)，左上為過度預報，右下則為預報不足，45 度之傾斜直線上 BS 為 1，表示沒有偏差之預報。圖 6 顯示各種預報技術之 TS 得分大致隨雨量門檻增加而降低，僅有 PM、NPM 及 QFPF10 等 3 種方法能預測 200 毫米門檻雨量，但預報技術皆低於 0.1 以下。系集平均在性能圖上之 BS

隨雨量門檻增加而逐漸降低，大致為 C 字型分布，因此對小雨高估但大雨低估，不同雨量門檻有不均勻偏離之特性。PM 除了極端的 200 毫米雨量門檻外，其 BS 大致落在 1.0 至 1.67 之間，大致仍為直線分布但有高估傾向，且能稍修正系集平均不均勻偏離之特性。NPM 除 200 毫米門檻外，其 BS 落在 1.0 至 1.25 間，略有高估但其最接近 BS 等於 1 之直線，接近於均勻無偏，因此以 BS 而言亦可視為系集預報系統之最佳解。以超越機率之 QFPF 來看，BS 隨機率門檻增大而減小；10% 門檻大致沿 2.5 之 BS 線分布，但於極端之 200 毫米雨量門檻則低於 1 之 BS 線；20% 門檻大致沿 1.67 之 BS 線分布，但於 100 毫米雨量門檻則低於 1 之 BS 線；50% 以上門檻之 BS 皆小於 1；另一個值得注意的重點是，超越機率之 QFPF 大多仍具有 C 字型的分布，隨雨量門檻變化呈現不均勻偏離，但不均勻程度似乎略小於系集平均。

五、 結論

本研究在中央氣象局的系集預報系統架構下，依據系集預報系統設計之概念及理論，並以 2013 年康瑞颱風侵台期間的雨量預報為例，探討各種定量降水預報產品的特性，包括系集平均、PM、NPM 及不同機率門檻的 QFPF。對於理想的系集預報系統或由統計之校驗都可證明，系集平均具有高估小雨範圍且低估極端雨量之傾向。為了上述的問題，產生將 QPF 的空間與降水頻率分開處理得到 PM 及 NPM 的方法；原始的 PM 取因自整體系集預報系統之頻率分布，因此經常導致極端降水之過度預報；修正的 NPM 之降水頻率則取自各系集成員之降水頻率的平均，可修正 PM 過度預報的特性，且符合理論及統計上最佳的校驗特性，因此葉等(2016)建議 NPM 為系集預報系統之最佳解。

本研究依據上述的各種定量降水預報產品，以各項預報技術指標，包括預兆得分 TS、公正預兆得分 ETS 及偏離指數 BS，針對 2015 年 5 月 1 日至 6 月 30 日之梅雨季節進行系統性的校驗，另外亦使用性能圖詮釋各種系集預報方法產生之定量降水預報產品特性。整體而言，所有預報方法之預報技術皆隨雨量門檻提高而降低。系集平均對小雨之預報技術高且高估，但

大雨則是預報技術低且低估，其 BS 分布大致為梯形，量值隨雨量增加而逐漸下降；在性能圖上，系集平均隨降雨門檻增大而呈 C 字形分布，具有不均勻偏離的特性。由其 BS 分布可知，系集平均之不均勻偏離特性是因系集平均導致，而不是預報系統之動力特性。PM 在極端雨量之預報技術最高，但過度預報之程度也高；對其他雨量門檻之 BS 大致落在 1.0 至 1.67 間，雖有高估傾向，但在性能圖上大致為直線分布，因此 PM 方法確實可以修正系集平均之不均勻偏離特性。NPM 除了極端雨量之技術略低於 PM 且無顯著過度預報以外，大致與 PM 之特性相似，但具有略高的預報技術與較低的 BS；NPM 之 BS 落在 1.0 至 1.25 間，略有高估但最接近 1，近似於均勻無偏，可視為系集預報系統之最佳解。以超越機率之 QPFP 來看，整體上 QPFP20 及 QPFP30 對各雨量門檻具有相對較高的預報技術，且對極端雨量仍具有有限的預報技術；各機率門檻之 QPFP 的 BS 皆隨機率門檻增大而減小；QPFP20 之 BS 約在 1.5 至 1.9 間，性能圖上大致沿 1.67 之 BS 線，惟 100 毫米以上雨量門檻之 BS 降低至 1 以下；50% 以上門檻之 BS 皆小於 1，對各門檻雨量普遍低估；另外，超越機率之 QPFP 在性能圖上大致仍有 C 字型分布的特性，其值隨雨量門檻變化呈不均勻偏離，但程度略小於系集平均。整體而言，QPFP10 之過度預報特性明顯，機率 50% 以上之 QPFP 則為明顯低估；而 QPFP20 或 QPFP30 具有相對較高的預報技術，且對極端降雨具有有限的技術，雖略有過度預報之傾向，但不失為優良的指引。各定量降水預報產品特性於 2016 年最主要的梅雨鋒面之性能圖(圖 6)也有相似表現。但因系集預報系統對於不同天氣系統的預報表現有所差異，所以在單一個案，需要預報員根據每次的預報與各定量降水預報產品特性來決定較符合實際情形的定量降水預報結果。

值得一提的是，對於總降水量預報，系集平均、PM 或 NPM 與系集預報系統之平均總降水量相等，具有保守的特性；但超越機率之 QPFP 方法則不具保守特性，且隨機率門檻增大而下降。而各種系集方法，提高預兆得分技術及偵測率時，通常伴隨誤報率之增加，並使偏離指數增大，並沒有方法可以提高預兆得分技術及偵測率且減少誤報率；因此這些方法不能真

正改變系集預報系統本身的預報度，只能經由方法得到最佳的預報特性，預報度之改進仍須依賴系集預報系統之進步。

由系集預報之原理及本研究之統計分析發現，NPM 在性能圖上落在 45 度的斜線上，是為理想系集預報系統的最佳解，具有高預報技術、高偵測率，低誤報率、低漏報率且接近無偏的最佳的預報特性。為了防災上的需求，對於具有有限機率的高風險的事件，通常會預作提醒應注意，中央氣象局之官方定量降水預報作業因此常提供具有稍低機率、但高風險的事件，以致稍有過度預報之傾向。以 QPFP 產品來看，本文亦建議 QPFP20 可做為定量降水預報綜合評估的另一個重要參考，主要是因為 QPFP20 雖然機率稍低，對大範圍區域有稍過度預報之傾向，但也相對不容易遺漏極端之降雨事件。

本文著重在於系集後處理產生各種定量降水預報的方法，經由各個產品之原理深入探討其特性及使用時機。最後以 2015 年梅雨季之校驗結果，說明中央氣象局的系集預報系統在梅雨季的雨量預報能力。這些結果可以提供系集預報系統發展者的改善模式預報的方向，並使各防災單位更深入了解各種產品之特性。未來將針對颱風或其他天氣系統進行更有系統性的校驗，以提供定量降水預報使用時的參考及限制。

六、參考文獻

- 李志昕、洪景山，2011：區域系集預報系統研究：物理參數化擾動。大氣科學，39，95 - 116。
- 黃椿喜、呂國臣、洪景山，2012：系集預報系統在氣象局鄉鎮精緻化預報之應用。101 年天氣分析與預報研討會，143-146。
- 葉世瑄、林沛練、洪景山、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
- Ebert, Elizabeth E., 2001: Ability of a Poor Man's Ensemble to Predict the Probability and Distribution of Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 2461-2480.
- Robber P.-J., 2009: Notes and Correspondence -Visualizing Multiple Measures of Forecast Quality. *Wea. Forecasting*, 24, 601-608.

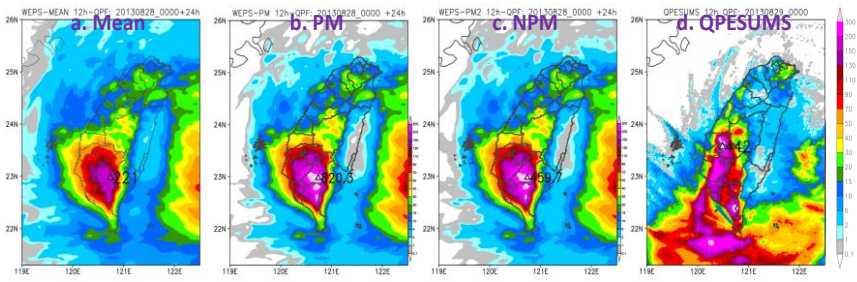


圖 1 系集預報系統產生的進階定量降水預報 PM 及 NPM 產品，以 2013 年 8 月 28 日 0000 UTC 初始時間，預測 12-24 小時，由左自右分別為系集平均、PM、NPM 及 28 日 1200UTC 至 29 日 0000UTC 之 QPESUMS 估計雨量圖。色階為累積雨量，單位為毫米(mm)。

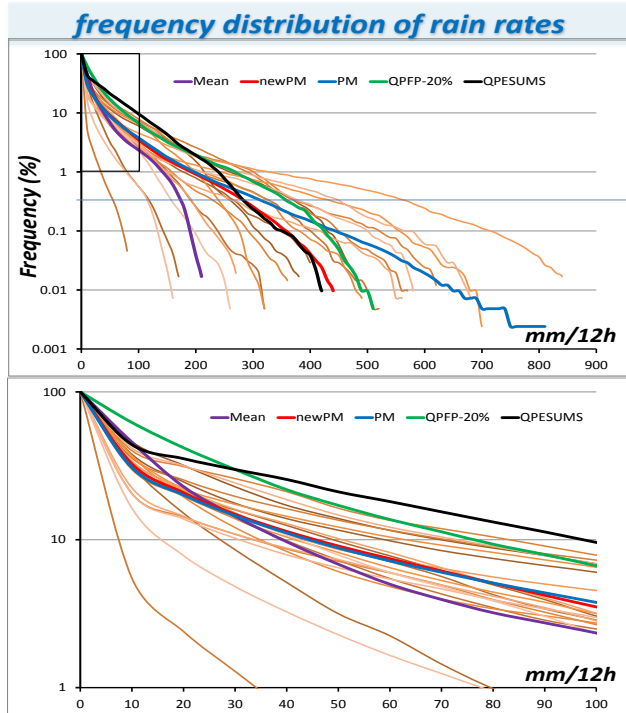


圖 2 模式初始時間為 2013 年 8 月 28 日 0000UTC 之 12-24hQPF 累積降雨頻率分布圖。棕色曲線為 20 個系集成員，黑色曲線為實際觀測，紫色曲線為系集平均，藍色曲線為 PM，紅色實線為 NPM。縱軸為發生頻率數目(對數座標)，橫軸為雨量門檻值(單位為毫米)。下圖(b)為上圖(a)左上角黑色格子的部分，為 1 毫米至 100 毫米之累積降雨頻率分布圖。

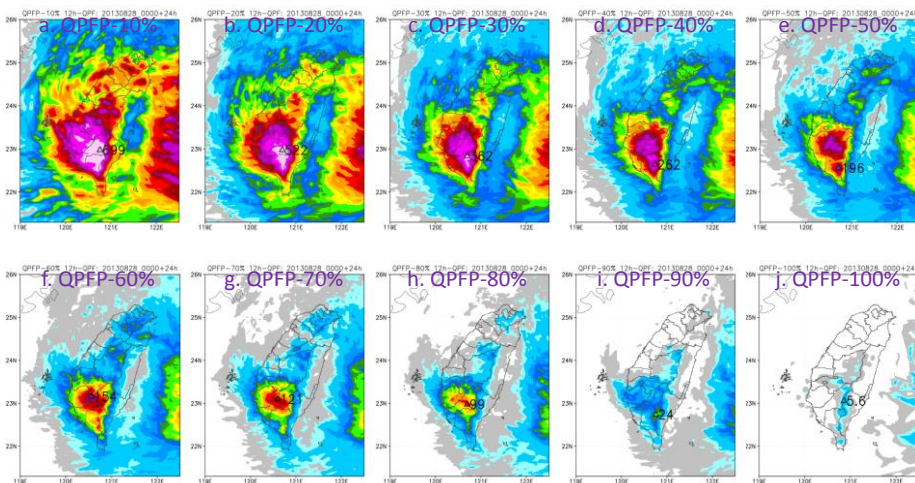


圖 3 系集預報系統產生的超越機率定量降水預報產品，以 2013 年 8 月 28 日 0000 UTC 初始時間，預測 12-24 小時不同機率門檻(10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 及 100%)之 QPFP。

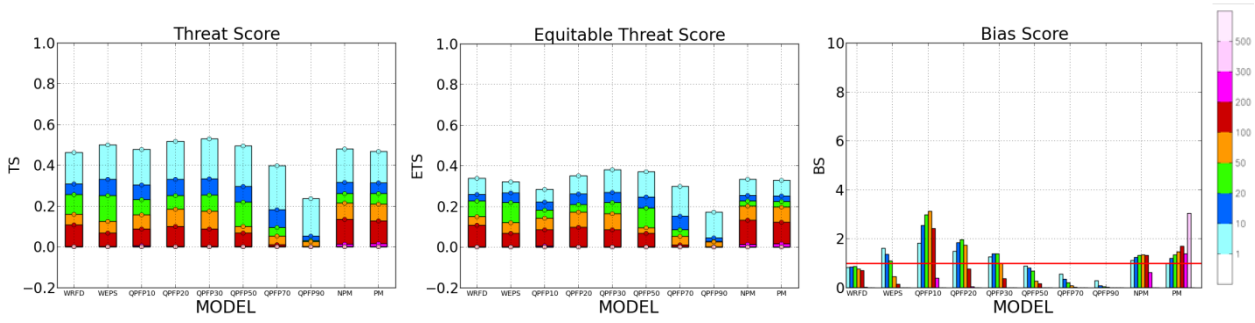


圖 4 針對 2015 年 5 月 1 日 0000UTC 至 7 月 1 日 0000UTC 之梅雨季雨量校驗，預報 12 至 24 時之定量降水預報校驗，分別針對 WRFD、系集平均(WEPS)、QFPF10、QFPF20、QFPF30、QFPF50、QFPF70、QFPF90、NPM 及 PM。色階圖說同圖 1。

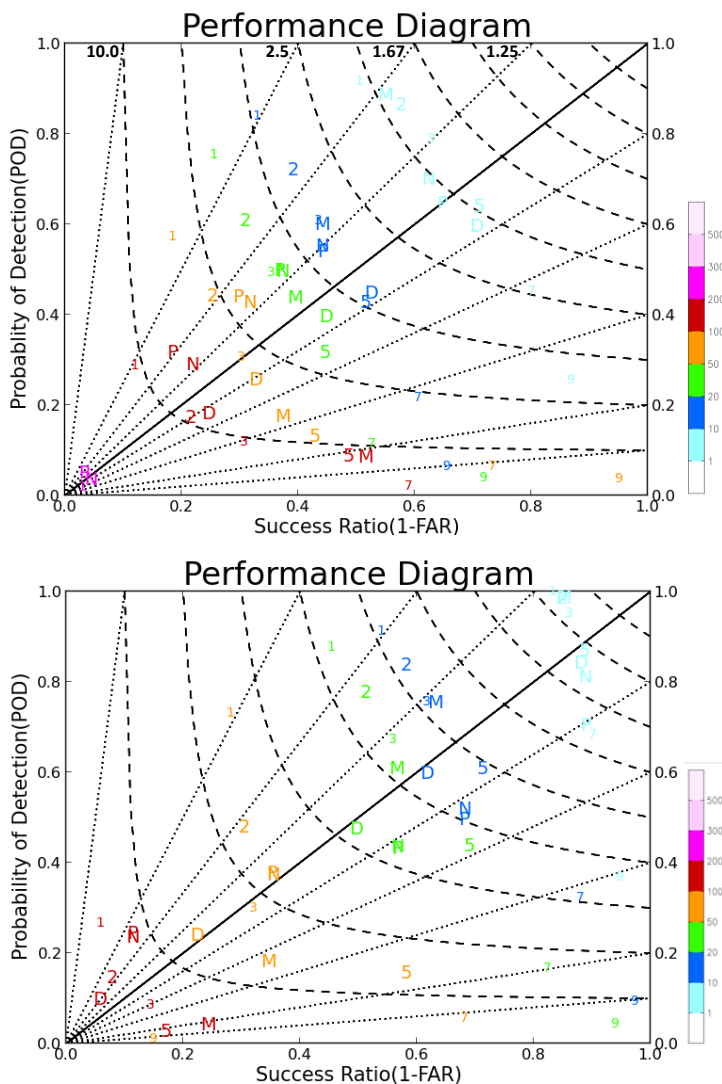


圖 5 2015 年 5 月 1 日 0000UTC 至 7 月 1 日 0000UTC 之梅雨季系集預報系統預報 12 至 24 小時之 QPF 校驗，D 為 WRFD、P 為 PM、N 為 NPM、M 為系集平均、1, 2, 3, 5, 7, 9 分別為 QFPF10, QFPF20, QFPF30, QFPF50, QFPF70, QFPF90。色階圖說同圖 1。

圖 6 2016 年 6 月 11 日 0000UTC 至 6 月 15 日 0000UTC 之梅雨鋒面系集預報系統預報 12 至 24 小時之 QPF 校驗。圖說同圖 5。