

系集定量降水預報方法之探討與分析—系集平均、機率擬合平均與超越機率之定量降水預報

黃椿喜 葉世瑄 呂國臣 洪景山

中央氣象局

(中華民國一〇五年二月十五日收稿；中華民國一〇五年七月十八日定稿)

摘 要

本研究延續葉等(2016)的工作，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、機率擬合平均(PM, Probability-Matched Mean)、NPM (New PM)及超越機率之 QPFP (Exceeding Probability of QPF 或 QPF Percentile)產品。整體而言，所有系集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。決定性預報之 WRFD (Deterministic Weather Research and Forecasting Model)在小(大)雨量的預報技術低(高)於系集平均，與觀測相比有略低估之傾向。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。QPFP 之偏離指數隨機率門檻增大而減小；任意機率之 QPFP 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 QPFP 對整體之降水為低估；而 QPFP20 與 QPFP30 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。另外，系集平均、PM 或 NPM 之總降水量與系集預報系統總平均降水量相等，具有保守特性；但 QPFP 之總降水量則不保守，且隨機率門檻增加而下降。

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，以致預報稍有過度之傾向，其特性與 QPFP20 相似，為本研究建議另一綜合評估之重要參考。QPFP 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 QPFP5 或 QPFP10；2.)稍高風險、稍低機率的 QPFP20 或 QPFP30；或 3.)低風險、高機率的 QPFP50 或 QPFP70 等。

關鍵字：系集預報、定量降水預報、機率擬合平均、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，而自 2014 年起，於颱風警報期間或中央災害應變中心因氣象災害開設時，則改發布未來 24 小時、逐 6 小時之定量降水預報。配合定量降水預報之發布，中央氣象局的區域天氣系集預報系統(WRF Ensemble Prediction System, WEPS)也自 2012 年起上線（李與洪，2014），目前已提供國內中央主要的防災單位使用，在預報作業中也建立對應的網頁及圖形編輯工具，可針對系集預報進行各種統計方法的應用（黃等，2012）。

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)，其中第一個關鍵問題是如何由系集預報系統得到最佳的決定性預報，過去通常以系集平均為定量降水預報之單一預報。簡等(2005)首先對台灣地區 2003 年的梅雨季進行系集降水預報實驗，認為系集平均比單一決定性預報有較佳的技术得分。但實際上，系集平均對時空上連續且為高斯分布的變數，如高度

場、溫度、露點等較具代表性，但 QPF 並非連續的變數，尤其是暖季對流有關的降雨事件，通常為數公里至數十公里的中尺度過程，這些對流系統的生命尺度也通常只有數十分鐘至數小時，因此在時間與空間上分布並不連續，具有局部且劇烈的特性，加上系集預報系統對較長時間的預報之離散度也通常較高，因此雖然單一系集成員之降雨頻率可能與實際降雨類似，但中尺度降雨過程或較大的系集離散度在空間上的差異將造成系集平均過度平滑。一般而言，系集平均可取得 QPF 較佳的空間相對分布，但易造成較大或極端雨量之低估（蘇等，2016；葉等，2016）。

Elbert (2001)首指出系集平均易造成平滑的效果，在定量降水預報上常導致小雨高估而大雨低估，因此提出機率擬合平均(Probability Matched Mean; PM)的定量降水預報方法以改善上述的問題，此方法先取系集平均的相對空間分布，再以系統之總雨量頻率做為其頻率分布，其降雨頻率不論其空間及系集分布而取自系統之總頻率。蘇等(2016)以 PM 方法校驗 2015 年臺灣地區 5、6 月的梅雨季節之 QPF，發現 PM 方法可有效提升區域天氣系集預報系統的預兆得分(Threat Score, TS)技術，但卻明顯高估極端雨量。由系集預報系統設計之概念或原理而言，PM 忽略個別成員之差異而取自系統之總降雨頻率，其極值近似於系

統之極值，當任一成員對極值過度預報時，PM 亦會產生較大的偏差而導致高估。葉等(2016)分析上述的系集平均及 PM 特性，提出修正的 NPM (New PM)方法，此方法仍使用系集平均之相對空間分布，但其頻率取自各系集成員降雨頻率之平均，NPM 與 PM 不同之處在於其降雨頻率保留個別成員之特性，其極端降雨為各成員極端降雨之平均。修正的 NPM 可提升大雨或極端降雨之預報，同時也改善 PM 極端雨量高估的缺點，中小雨門檻之校驗特性則與 PM 相似，但更為中性；他們以預兆得分、公正預兆得分(Equitable Threat Score, ETS)及偏離指數(Bias Score, BS)校驗 2015 年之梅雨季節的雨量預報後指出，統計上系集平均具有高估小雨且低估強降雨的特性，PM 則容易過度預報強降雨，因此都不適合做為系集預報系統的最佳解，NPM 才是系集預報系統的最佳單一決定性預報。

由於系集預報系統可評估天氣系統演變的不確定性，預報作業單位與許多研究都強調機率預報的重要性，系集預報系統產生多個預報的特性很容易計算機率型的產品，當給定一雨量門檻即可產生相對應的定量降水機率預報(Probability of Quantitative Precipitation Forecast, PQPF)。中央氣象局早自 1993 年起開始發布主觀的降雨機率預報，目前為止雖尚未對外發布正式的定量降雨機率預報，但內部作業已經常使用不同降雨門檻產生之定量降雨機率預報，評估豪大雨事件發生的機率，做為發布特報或對外說明的參考。由於機率型產品本身就具有模糊的概念，應用上不如決定性預報產品明確，且可能因應各種防災需求而必須給定不同雨量門檻，甚至需要多個門檻之機率。因此推廣上常遇到不少困難，政府防災單位或民眾對應用的程度通常較低，對於以定量降水

預報產生之進一步災害評估上也較不容易。因為災害之評估常不僅於使用定量降水預報，而是需要進一步耦合定量降水預報之洪水預報、土石流預報或都市淹水預報等下游模型，而定量降水機率預報在這些模型上的使用常有應用上之困難。

對系集預報系統而言，給定雨量門檻可產生定量降水機率預報，若轉換到機率空間上，給定機率門檻則可產生超越機率之定量降水預報(QPFP)。其意義代表任一格點上的成員百分比之 QPF 大於此機率門檻之 QPFP。另一觀點來看，QPFP 亦可表示為任一格點的 QPF 在系集之維度上排序的百分位數(percentile)。QPFP 形式為定量降水預報，但隱含機率之本質，因此可以輕易耦合防災或水文模型產生進一步的模擬與應用，也容易由不同機率門檻產生定量降水預報評估不同程度的災害。不確定性之描述在系集預報的概念下，目前普遍認為合適的方法可能是盡量說明最可能發生的狀況（系集產生的單一預報），而後再輔以說明不確定的範圍，以及發生的機率。實務上有時會以不確定性評估或不同情境之模擬取代機率，因此另一個更簡化的版本可以是目前在中央災害應變中心中提出的三種情境，除了最可能的答案外，另外提供 2 種以上情境說明不確定的範圍。而本文提出的超越機率方法實際上是機率預報的另一呈現方式，且可以結合不同情境之不確定性之評估。

實際上對於特殊的天氣系統，可以採取其他策略來應用系集預報系統，而得到更精確的預報。例如曹等人(2011)發展的 ETQPF (Ensemble Typhoon Quantitative Precipitation Forecast)方法，就是最佳颱風預報路徑，篩選位於其附近範圍(如 50 公里半徑)內的多個成員，而後合成產生不同時間長度的 QPF。或是中央氣象局目前發展中，

使用影像辨識技術，篩選最相似於觀測回波的系集預報成員，再以系集方法產生之 0 至 6 小時極短期定量降水預報（陳等，2016）。

本研究延續葉等(2016)的工作，針對系集預報系統產生之各種定量降水預報產品，包括系集平均、PM、NPM 及各門檻之 QPFP，以 QPESUMS 之定量降水估計產品進行系統性校驗，討論各種產品在理論上的意義，並分析其在預報上之特性。經由系統性的校驗 2015 年梅雨季之預報技術包括預兆得分 TS、公正預兆得分 ETS (Black, 1994)、偏離指數 BS、預報偵測率 POD (Probability of Detection)、預報誤報率 FAR (False Alarm Rate)及漏報率 MS (Missing Rate)等，提供未來預報員產生定量降水預報產品之應用參考。

二、使用資料及校驗方法

(一) 觀測之雨量格點估計：

本研究使用格點雨量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(QPE, Quantitative Precipitation Estimation)產品。此雨量估計是利用中央氣象局現有的五分山、花蓮、七股及墾丁都卜勒雷達觀測站之整合降水回波，依據雷達回波及雨量估計之 Z-R 關係式估計，再經由 500 個左右的雨量站觀測校正後產生，目前這組資料已在作業時即時提供給國內主要的防災單位使用。

(二) 中央氣象局之系集預報系統 WEPS

系集預報系統則為中央氣象局作業使用之系統，基於中央氣象局之決定性 WRFD 模式 (Deterministic Weather Research and Forecasting

Model)，此系統以美國 GFS 之分析場做為其初始場及邊界場，利用由 WRF 三維變分同化系統(3-dimensional data assimilation system, 3D-VAR)建構的系集預報系統(Hsiao et al. 2015)。

中央氣象局之區域天氣系集預報系統 (WRF Ensemble Prediction System, WEPS；李與洪 2011、2012、2014) 則包含三層巢狀網格，模式水平解析度分別為 45、15 及 5 公里，垂直解析度 45 層，模式頂層為 30 hPa。WEPS 由 20 個系集成員組成，使用初始擾動、邊界擾動和模式擾動。初始擾動來自中央氣象局 WRFD 提供之 6 小時預報場，再透過 WRF 三維變分同化法加入隨機亂數，而後產生 20 組擾動初始場；邊界擾動來自美國環境預報中心(National Center of Environment Forecast, NCEP)全球系集預報系統(Global Ensemble Forecast System, GEFS)提供解析度為 0.5°之擾動邊界；而模式擾動由雲微物理、邊界層及積雲等參數法產生之組合 (Hsiao et al, 2015；蘇等，2011、2013)。現行預報作業每日更新 4 次，分別為每日的 0000 UTC、0600UTC、1200UTC 及 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，本研究使用的中央氣象局的官方系集預報系統除了上述 20 成員外，還包含決定性預報之 WRFD，以及針對颱風優化的決定性預報 TWRF (Typhoon WRF; Hsiao et al., 2015)，共 22 成員。

(三) 校驗方法：

本研究使用的校驗方法延續葉等(2016)，預報格點為各種系集方法產生之定量降水預報，觀測格點則是 QPESUMS 之雨量估計。QPESUMS 的 QPE 利用雷達最低仰角資料，以雷達迴波估計台灣附近的降雨空間分布，最後以密集的雨量站

觀測進行校正，該資料目前已例行性提供國內防災單位使用。

校驗使用表 1 之列聯表關係(Contingency table; Finley 1884)，依據 2015 年梅雨季之統計資料，收集系集預報系統產生的系集平均、PM、NPM、不同超越機率門檻(10%, 20%, 30%..., 100%)之 QPFP 以及 WRFD 之 QPF，依據預兆得分、公正預兆得分、偏離指數、預報偵測率、預報誤報率及漏報率等，針對台灣本島陸地評估各種方法之特性及表現：

$$TS = \frac{a}{a + b + c},$$

$$ETS = \frac{a - a_r}{a + b + c - a_r},$$

$$BS = \frac{a + b}{a + c},$$

$$POD = \frac{a}{a + c},$$

$$FAR = \frac{b}{a + b},$$

$$MS = \frac{c}{a + c} = 1 - POD,$$

$$a_r = \frac{(a + b)(a + c)}{n}$$

其中 a 為命中格點(hits)、 b 為誤報格點(false alarms)、 c 為漏報格點(misses)、 d 為正確識別格點(correct negatives 或 correct rejections)、 n 為台灣本島陸地的總格點數($n = a + b + c + d$)、 a_r 則是隨機可正確預測的次數。進行統計分析時則分別計算 a, b, c, d 之個別總合，再進行之 TS 、 ETS 、 POD 、 FAR 、 MS 及 BS 運算，相關參數之詳細意義及計算方式請參考葉等(2016)關於校驗之方法介紹。

本研究除了引用列連表關係式導出的 6 項指數外，也導入 Robber (2009)使用的性能圖，該圖（如圖 10）可以在同一張圖上顯示 TS 、 POD 、 FAR 及 BS 等 4 項指數，因此易於顯示各種定量降水方法之綜和技術特性。其橫軸為成功預報率(Success Ratio, $1 - FAR$)；縱軸為偵測率(POD)。曲線則為預兆得分(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。傾斜直線表示為偏離指數(BS)，斜率 45° 之傾斜直線上之 BS 為 1，是為無偏之預報；斜率大於 45° 為過度預報，小於 45° 則為預報不足。

表 1 列聯表關係，其中 a 為命中格點(hits)、 b 為誤報格點(false alarms)、 c 為漏報格點(misses)、 d 為正確識別格點(correct negatives)。

Contingency table (Finley, 1884)

Obs. Fct.	Yes	No	Total
Yes	a (<u>Hits</u>)	b (<u>False alarms</u>)	$a+b$ (<u>Fct. Yes</u>)
No	c (<u>Misses</u>)	d (<u>Correct negatives</u>)	$c+d$ (<u>Fct. No</u>)
Total	$a+c$ (<u>Obs. Yes</u>)	$b+d$ (<u>Obs. No</u>)	$a+b+c+d$ (<u>Total</u>)

三、使用方法之原理與討論

系集預報系統產生的產品大致可分為 3 種形式，分別是最有可能的答案，不確定程度以及機率。處理這些系集預報產品常使用系集平均做為最可能的答案，而標準差或變異數代表不確定程度，或以 QPF 之最大或最小值決定不確定性範圍，第 3 種常見形式則是機率型產品。

(一) 基本定量降水預報產品：

利用簡單的統計方法產生多種決定性定量降水預報產品，例如系集平均、中位數、眾數等。或可計算標準差或變異數等，預報員進行定量降水預報評估時，依據系集平均進行加（減）一定權重之標準差，產生主觀的定量降水預報產品。

圖 1 為本研究使用的系集預報系統成員 1 至

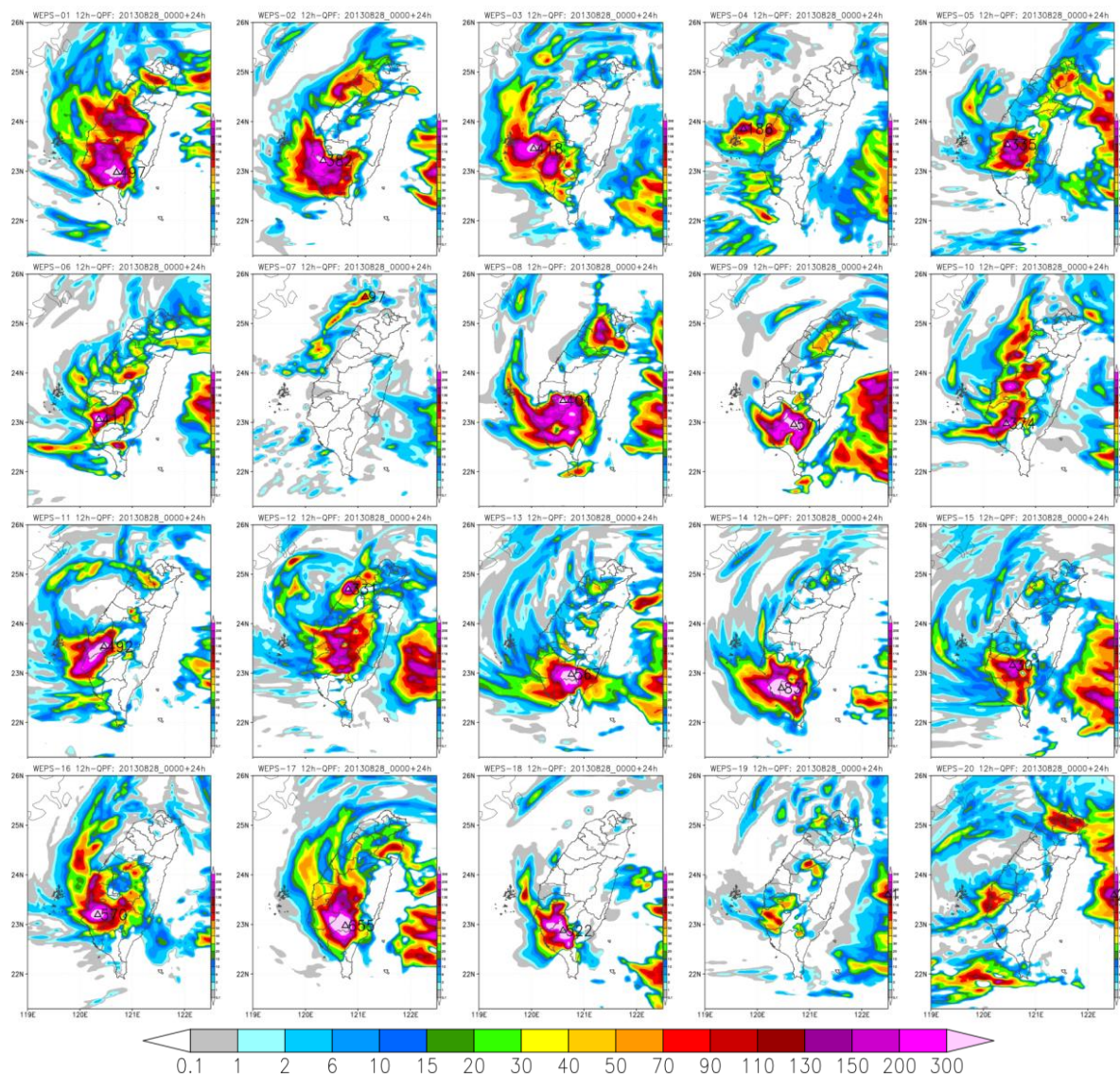


圖 1 系集預報系統產生的基本定量降水預報產品，以 2013 年 8 月 28 日 0000 UTC 初始時間，預測 12-24 小時，此為 20 個系集成員的預報結果。色階為累積雨量，單位為毫米(mm)。(葉等，2016)

20 之 QPF 郵票圖(葉等, 2016), 初始時間為 2013 年 8 月 28 日 0000 UTC, 預測 12 至 24 小時的 QPF, 台灣地區受 2013 年輕度颱風康瑞颱風 (Kong-Rey) 侵襲, 導致中南部地區劇烈降雨。大致而言, 20 成員預報的雨量極大值約在 97 至 831 毫米間, 多數成員預測嘉義以南地區有劇烈雨勢, 但其空間分布差異及量值呈現明顯變異, 表示此降雨過程之預報不確定及離散度皆非常高。

圖 2 為此系統產生的基本定量降水預報產品, 分別為系集平均、系集最大值與系集標準差。系集平均之最大值約 221 毫米, 發生在高雄市; 其 50 毫米以上雨量的範圍大致由彰化、南投以南延伸至屏東、台東一帶。系集標準差之最大值達 230 毫米, 其分布特性與系集平均相似。以此個案來看, 雨量預報之分布顯然不是無偏, 其系集標準差之最大值甚至大於系集平均, 變異程度非常大。系集最大值顯示 20 成員預報之極端雨量為 831 毫米, 約為系集平均的 4 倍, 系集最大值亦顯示北台灣及中台灣局部地區可能出現較大雨勢。而 QPESUMS (圖 2d) 估計之最大降雨發生在嘉義, 其值為 442 毫米, 因此對康瑞颱風個案而言, 大範圍的分布雖大致合理, 但系集平均明顯

低估, 且空間分布細節仍有差異。由以上的討論可知此系集預報系統對康瑞颱風之預報離散度大且不確定性高, 任一成員之預報皆不易單獨使用, 而系集平均雖明顯低估, 但其空間分布尚可, 因此非常適合做為介紹系集預報方法之範例說明。

(二) 進階定量降水預報產品：

本章節的討論延續葉等(2016)的工作, 進階定量降水預報產品包括: 整合系集平均空間相對分布與系統總降雨頻率產生的機率擬合平均 PM (Elbert 2001, 蘇等 2016), 以及仍考慮系集平均之空間相對分布、但取系集成員降雨頻率之平均的 NPM 方法(葉等 2016)。

考慮在理想的系集預報系統下, 理論上的觀測最大值應預期落在各成員最大值之中位附近。PM 之降雨頻率取自系統之總降雨頻率, 最大值自然趨近於各成員最大值之極大值, 本質上就具有過度預報之特性, 尤其當系統之離散度高或任一成員過度預報顯著時, PM 過度預報之傾向也會變得嚴重。NPM 的設計即是為了修正 PM 的缺點, 因此基於 PM 取系集平均空間相對分布的概念, 修正其降雨頻率為各系集成員降雨頻率的系

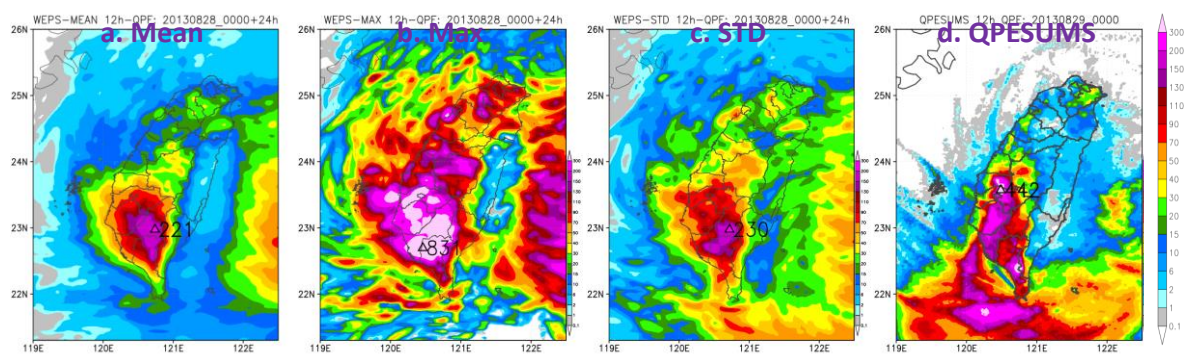


圖 2 系集預報系統產生的基本定量降水預報產品, 以 2013 年 8 月 28 日 0000 UTC 初始時間, 預測 12-24 小時, 由左至右分別為系集平均、最大值、標準差及 28 日 1200UTC 至 29 日 0000UTC 之 QPESUMS 估計雨量圖。

集平均。NPM 之最大值即為所有成員最大值之平均，最大值通常落在各成員最大值之中位附近，對降雨頻率而言是最為中性之分布。

圖 3 為 2013 年 8 月 28 日 0000 UTC 預報 12-24 小時 QPF 之進階系集產品，使用 PM 方法估計之雨量高達 820 毫米，接近此系集預報系統各成員預報最大降雨之極大值，即成員 14 預報之 831 毫米雨量；而 NPM 之最大值約 459 毫米為各成員預報最大值的平均。此個案中，NPM 與 PM 皆能修正系集平均低估雨量的缺點，且 NPM 與 QPFSUMS 估計之 442 毫米雨量僅有 17 毫米左右的誤差，但 PM 則將近高估 1 倍。圖 4 為同一段時間的降水預報與 QPESUMS 之累積降雨頻率，各系集成員於 150 毫米以下的雨量預報頻率大多低於 QPESUMS 雨量估計，顯示 150 毫米以下各雨量門檻之預報面積（格點數）大多小於實際的雨量面積。而系集平均之頻率在極端雨量時明顯偏低，僅大於 3 成員，原因是定量降水預報的中尺度特徵及偏大的系集離散度（葉等，2016）。由於 PM 取自整體系集的雨量頻率，因此其極端雨量（820 毫米）相當於系統之最大值（831 毫米）；NPM 之最大值則是各成員最大值之平均，其最大

值落在各成員最大值之中位附近，表現最為中性。PM（或 NPM）與系集平均之累積降雨頻率大致在 30 毫米雨量交叉，30 毫米以下 PM（或 NPM）之頻率低於系集平均，以上則相反。在 10 毫米的低雨量門檻，系集平均之頻率超過各成員之最大降雨頻率，此為系集平均於低門檻高估之特徵；10 至 30 毫米，系集平均大致落在各成員累積降雨頻率之中位附近；超過 30 毫米門檻，則逐漸偏向較低位數；最極端 1%（約 200 毫米以上）之雨量頻率落在最低之第 3、4 位成員間，為系集平均於極端雨量易低估之特徵。PM 與 NPM 除了在最極端的 1% 之雨量頻率有較大的差異外，其餘之分布相似，70 毫米以下 NPM 稍高於 PM，以上則相反；NPM 於各門檻皆在成員中位附近，PM 則於 200 毫米（僅占 1% 以下）雨量門檻後偏離 NPM 而趨近最大頻率之成員。與觀測的 QPESUMS 之雨量估計相比，PM、NPM 之累積降雨頻率分別約在 270 與 290 毫米（0.5% 與 0.3%）與其交叉，以下之頻率為低估，以上則是高估。此部分結論與葉等(2016)一致，因此從系集預報系統設計之概念及理論探討，並由 WEPS 針對 2015 年 5、6 月梅雨季之校驗結果，可以建議 NPM 為系集預報系統之最佳定量降水預報產品。

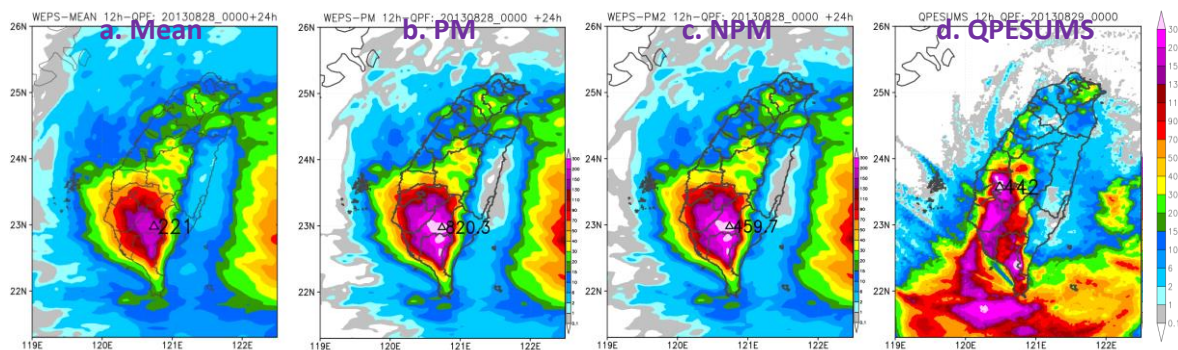


圖 3 系集預報系統產生的進階定量降水預報 PM 及 NPM 產品，以 2013 年 8 月 28 日 0000 UTC 初始時間，預測 12-24 小時，由左自右分別為系集平均、PM、NPM 及 28 日 1200UTC 至 29 日 0000UTC 之 QPESUMS 估計雨量圖。

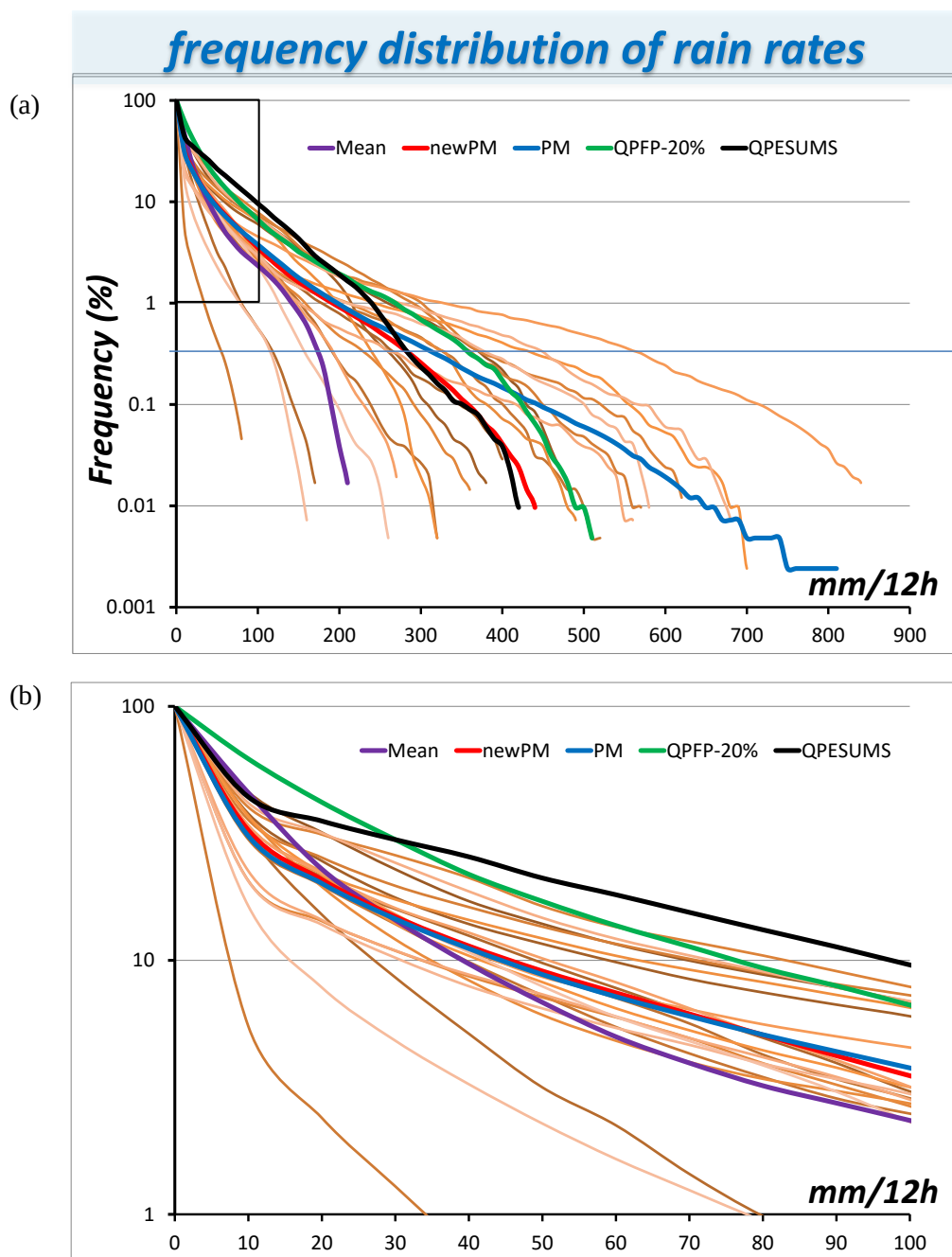


圖 4 模式初始時間為 2013 年 8 月 28 日 0000UTC 之 12-24hQPF 累積降雨頻率分布圖。棕色曲線為 20 個系集成員，黑色曲線為實際觀測，紫色曲線為系集平均，藍色曲線為 PM，紅色實線為 NPM。縱軸為發生頻率數目（對數座標），橫軸為雨量門檻值（單位為毫米）。下圖(b)為上圖(a)左上角黑色格子的部分，為 1 毫米至 100 毫米之累積降雨頻率分布圖。

(三) 定量降水機率預報產品：

針對任一成員，給定 QPF 之門檻 x ，給定 x 以上雨量的格點為 1，其餘為 0，經系集平均後可產生“超過 x 毫米雨量門檻之定量降水機率”預報產品 (PQPF x ，圖 5)。在預報作業上，當降雨門檻為 0.1 毫米時，通常就是指傳統天氣預報所指的降雨機率(Probability of precipitation, POP)。中央氣象局最早提供的機率型之預報即是降雨機率預報，因為 0.1 毫米的雨量是人工氣象站觀測能量測的最小單位。但系集預報系統產生之機率型產品，並不全等於天氣預報概念上的降雨機率。PQPF 代表系集預報系統之成員於空間上任一點、預報某一降水門檻以上之雨量發生的機率；天氣

預報上的降雨機率則為氣候上發生頻率之期望值，應等於氣候統計之發生頻率；2 種機率產品雖然不同義，但應具有高的相關性，理論上可以透過統計之校正或投影公式產生對應的轉換。

PQPF x 可用來評估某一段時間內降雨量超過 x 毫米的機率，例如 PQPF50 表示降雨超過 50 毫米之機率。中央氣象局於 2015 年 9 月以前定義的大雨、豪雨、大豪雨及超大豪雨之 24 小時累積雨量分別為 50、130、200 及 350 毫米（註：2015 年 9 月 1 日起中央氣象局針對大雨、豪雨、大豪雨及超大豪雨之 24 小時累積雨量之定義已修正為 80, 200, 350 及 500 毫米），因此 24 小時之 PQPF50、PQPF130、PQPF200 及 PQPF350 分別為中央氣象

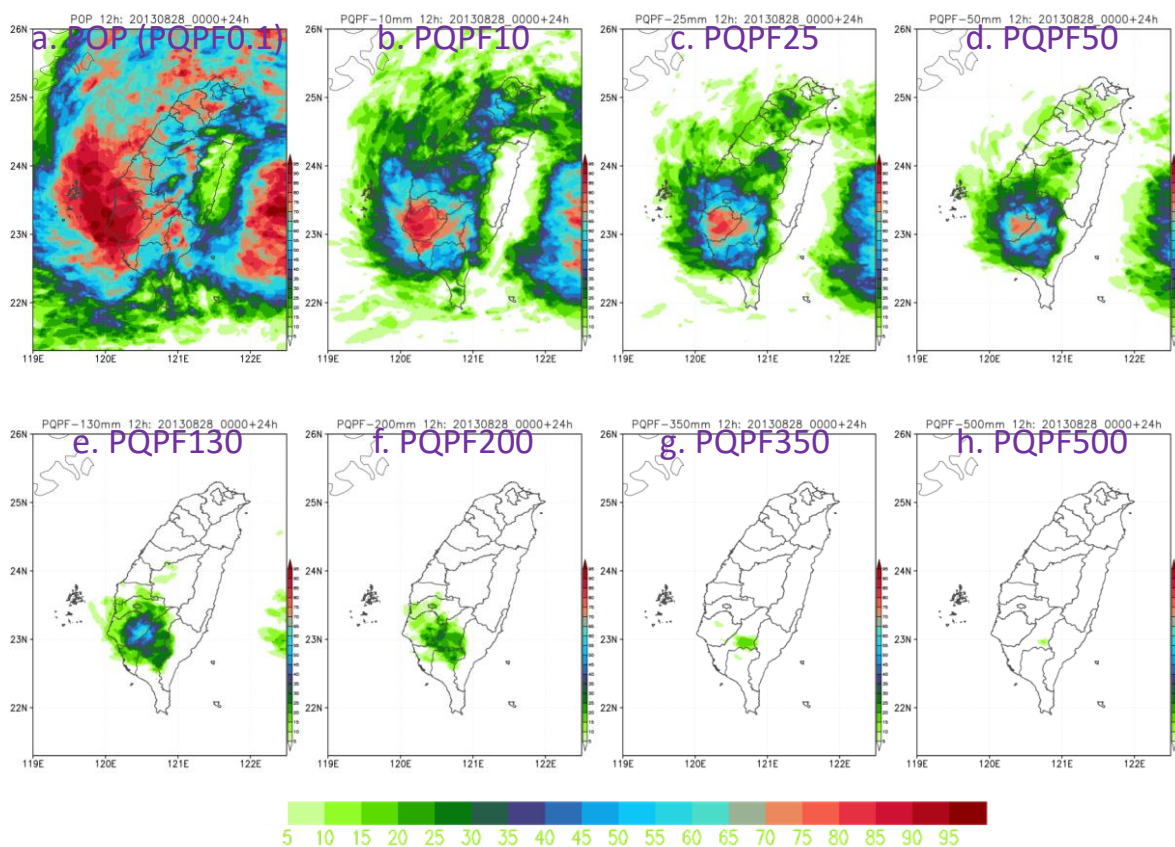


圖 5 系集預報系統產生的定量降水機率預報產品，以 2013 年 8 月 28 日 0000 UTC 初始時間，預測 12-24 小時不同雨量門檻 (0.1, 10, 25, 50, 130, 200, 350 及 500 毫米) 之 PQPF。色階為降水機率，單位為百分比(%)。

局定義的大雨機率、豪雨機率、大豪雨機率及超大豪雨機率。PQPF 在預報作業上可做為達到豪（大）雨特報標準與發布之機率評估，亦可提供防災單位或一般民眾災害之評估。

圖 5 為 2013 年 8 月 28 日 0000 UTC 預報 12-24 小時 QPF 產生之 PQPF $\underline{x}$ 產品，其中 $\underline{x}$ 為 0.1, 10, 25, 50, 130, 200, 350, 500 毫米之降水門檻，圖 5 顯示，台南及高雄地區在此預報時間內預測之最大雨量超過大雨（50 毫米）、豪雨（130 毫米）、大豪雨（200 毫米）及超大豪雨（350 毫米）之機率分別約為 80、60、30 及 10%。由於本文主要在討論系集預報後處理方法產生的決定性預報產品特性，因此關於定量降水機率預報之校驗暫不討論。

(四) 超越機率之定量降水預報產品：

本文另提出另一以機率空間產生之定量降水預報產品進行分析，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 $\underline{x}$ ，若給定機率門檻 $\underline{y}\%$ 則可產生超越機率之定量降水預報 QPFP $\underline{y}$ ，QPFP $\underline{y}$ 亦可表示為任一格點雨量預報在系集維度上第 $\underline{y}$ 百分位數(percentile)之排序。針對成員數 $\underline{N}$ 的系集預報系統，將空間上任一格點上的 $\underline{N}$ 個 QPF 由大至小排序，取其第 $\underline{n}$ ($\underline{y} \times \underline{N}$ 之無條件進位) 順位可得到 QPFP $\underline{y}$ 。PQPF $\underline{x}$ 表示系集預報系統中發生 $\underline{x}$ 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 $\underline{y}\%$ 的機率產生超過 QPFP $\underline{y}$ 的雨量；實際上，QPFP $\underline{y}$ 圖上發生 $\underline{x}$ 毫米以上雨量的範圍相等於 PQPF $\underline{x}$ 圖上發生機率为 $\underline{y}\%$ 的範圍。QPFP 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。

在本研究中使用 22 個成員之系集預報系統，以 10%超越機率 QPFP10 而言，表示 $10\% \times 22 = 2.2$ ，經無條件進位為第 3 排序位，因此 QPFP10 表示任一格點上有 3 個成員之 QPF 大於 QPFP10；以機率門檻為 30% (QPFP30) 為例，表示任一格點上有 7 個成員之 QPF 大於 QPFP30。因此，最小的機率門檻的 QPFP5 表示其值大於或等於 22 個成員之 QPF，是為系集預報系統在任一格點上的極大值；而最大機率門檻(100%)之 QPFP100 為極小值；QPFP50 則相當於中位數（因百分位換算為成員位數時為無條件進位，與中位數略有差異）；在一般情形下，系集平均通常落在 QPFP30 至 QPFP50 間，但不同降雨門檻可能稍有差異。

圖 6 為 2013 年康瑞颱風影響臺灣期間，以 8 月 28 日 0000 UTC 為模式初始時間預報 12-24 小時 QPF 產生之 QPFP $\underline{y}$ 產品，其中 $\underline{y}$ 分別為 10、20、30、40、50、60、70、80、90 及 100%之機率門檻產生的 QPFP。由低至高機率門檻之 QPFP，其量值及空間分布由大變小。各門檻 QPFP 之累積降雨頻率分布如圖 7，綠色細實線由左至右分別為 QPFP90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 10 及 5，綠色粗實線則是 QPFP20。經 QPFP 處理後之雨量累積頻率（圖 7）較單一成員雨量頻率（圖 4）之散布範圍更大，具有更大的散度。以 10%的累積降雨頻率為例，由 QPFP100 至 QPFP5 的範圍在 0 至 170 毫米間，而系集成員之降雨頻率則在 7 至 85 毫米間（圖 4）。比較圖 4 及圖 7 也發現，系集平均之累積降雨頻率在 10 毫米以下介於 QPFP20 至 QPFP30，10 至 80 毫米介於 QPFP30 至 QPFP40，以上則落在 QPFP40 至 QPFP50；對 NPM 之累積降雨頻率而言，15 毫米以下介於 QPFP40 至 QPFP50 間，15 毫米至 210 毫米間約介於 QPFP20 至 QPFP40，以上則介於 QPFP20 至 QPFP30 間；

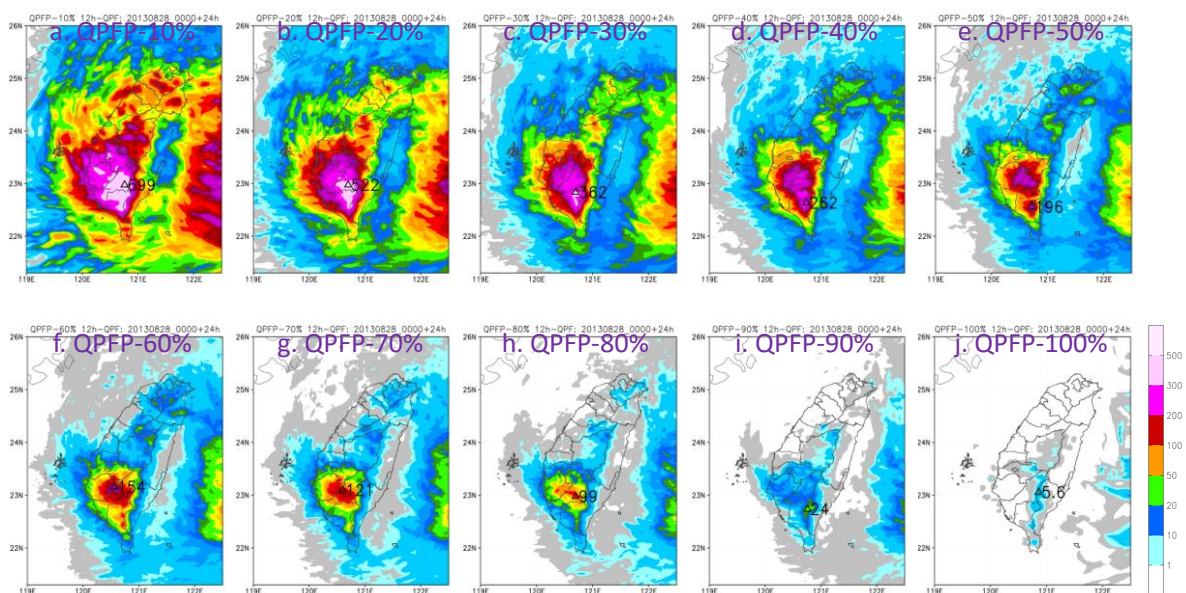


圖 6 系集預報系統產生的超越機率定量降水預報產品，以 2013 年 8 月 28 日 0000 UTC 初始時間，預測 12-24 小時不同機率門檻（10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 及 100%）之 QFPF。

PM 與 NPM 相似，只有在 410 毫米以上之頻率逐漸趨向明顯過度的 QFPF20 及 QFPF5 間；而整體而言，NPM 於所有雨量門檻之頻率皆低於 QFPF20。

(五) 小結

由上述討論可知，考慮理想的系集預報系統，由於降水過程之中尺度特性及系集預報系統之離散度影響，導致系集平均具有高估小雨範圍且低估極端雨量之傾向。將 QPF 的空間與降水頻率分開處理可得到 PM 及 NPM，2 種方法之空間相對分布皆與系集平均相同，但 PM 之降雨頻率取自整體系集預報系統之總頻率分布，最大值趨近於各成員最大值之極大值，本質上就具有過度預報之特性，尤其當系統之離散度高或任一成員過度預報顯著時。NPM 的設計即是為了修正 PM 的缺點，因此修正其降雨頻率為各系集成員降雨頻率的平均，其理論上之降雨頻率最為中性。上述的

結果基於 2 個假設，第 1 是系集平均的空間相對分布是目前可以得到的最佳分布；第 2 則是真實的降水頻率應介於各系集成員降水頻率之中位附近。對於一個設計良好且對定量降水預報優化的系集天氣預報系統，不難想見應當符合且追求這 2 個條件，依據以上假設產生的雨量產品即是 NPM。因而本文所指的理想系集天氣預報系統可視為圖 4 觀測雨量頻率與 NPM 之頻率重疊的狀況。

不論系集平均、PM 或 NPM 都沒有涵蓋機率的概念，因此預報作業機構或學界常推廣機率型產品，如降雨機率預報(POP)或定量降水機率預報(PQPF)。但機率型的產品接受度通常較低，且其單位為機率，常需要多個門檻雨量需要進行機率之評估；另外，機率型的產品也不易進行更下游模式的模擬，尤其是應用於定量降水預報進行耦合的水文或災害模型時。

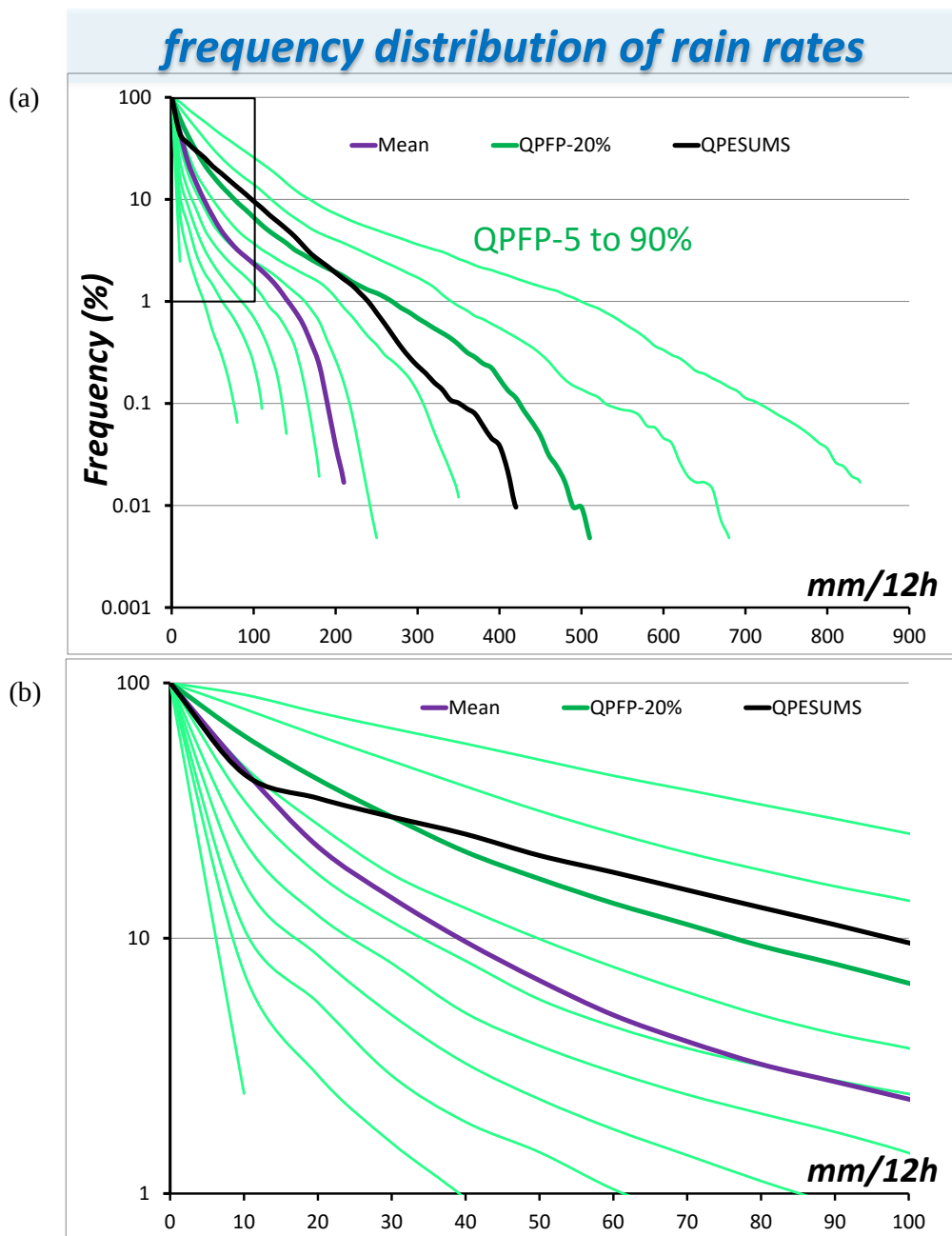


圖 7 模式初始時間為 2013 年 8 月 28 日 0000UTC 之 12-24hQPF 累積降雨頻率分布圖。綠色曲線為各種超越機率之 QFPF，其中深綠色曲線代表 QFPF20。黑色曲線為實際觀測，紫色曲線為系集平均。縱軸為發生頻率百分比（%，對數座標），橫軸為雨量門檻值（單位為毫米）。下圖(b)為上圖(a)左上角黑色格子的部分，為 1 毫米至 100 毫米之累積降雨頻率分布圖。

以機率為基礎，本研究推廣的另一種雨量產品為超越機率之 QPFP。超越機率之 QPFP 產品基本上仍是定量降水預報，但隱含機率的特性。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，因此中央氣象局之官方定量降水預報作業有時會傾向提供稍低機率、但高風險的事件，以致稍有過度之預報，因此本文建議 QPFP20 可做為 NPM 以外定量降水預報綜合評估的另一個重要參考，主要是因為 QPFP20 雖然發生機率稍低，且對大範圍區域有略為過度預報，但較不容易遺漏極端之降雨過程。另一方面，國內中央災害應變中心開設時除了提供最可能的情况（最可能的答案）以外，常要求另外 2 種情境評估，而以機率為門檻的超越機率之定量降水預報產品即可輕易提供這 3 種情境，例如：1.)高風險、低機率的 QPFP5 或 QPFP10；2.)稍高風險、稍低機率的 QPFP20 或 QPFP30；或 3.)低風險、高機率的 QPFP50 或 QPFP70 等。防災人員可以依據簡化過的風險程度及發生機率，迅速理解此天氣系統在預報上的不確定性、危險程度及機率等重要的資訊，並依此進行對應的模擬或作為。

另外，以系集預報系統之總降水量而言，系集平均、PM 或 NPM 的總降水量與系集預報系統之總降水量之平均相等，因此對於整個系集預報系統而言，上述 3 種產品皆有保守 QPF 的特性（註：PM 方法之降雨頻率是以系集預報系統之總降雨頻率進行排序，依總成員數將其頻率分群以去除系集之維度，再以中位數在每一群中取樣，故其總量可能稍微偏離保守的性質）。QPFP 方法是在任一格點上，依據該點上各系集成員之 QPF 排序，後依據機率門檻（百分位數）進行取樣，因此 QPFP 產生之總降水量不具保守特性，其預

報之總降水量隨機率門檻增大而下降。

四、2015 年梅雨季校驗

每年 5、6 月為台灣地區的梅雨季節，是除颱風以外影響台灣最重要的災害性天氣。2015 年梅雨季最大的降水事件發生於 5 月 19 日至 26 日間，自 19 日晚起，梅雨鋒面逐漸南下，伴隨鋒前的低層西南噴流及鋒面不穩定，導致期間台灣中部以北地區的第一波強降雨；其後梅雨鋒面及低層噴流大致位於台灣南端至巴士海峽一帶，台灣地區的降雨也稍趨緩；23 日晚上起，大範圍西南氣流再度增強，導致梅雨鋒面逐漸由南往北移動，同時華南一帶之中層短槽移出，鋒面增強併西南噴流影響，引發台灣南部及中部的第 2 波強降雨過程（圖未示）。

由於本研究旨在探討理想上系集預報系統之原理，並以梅雨季的統計校驗提供一般情況下中央氣象局的 WEPS 產製各種系集預報產品之適用特性，因此暫不對個案進行詳細分析，僅以梅雨季之統計特性加以說明。延續葉等(2016)使用 2015 年 5~6 月的梅雨季每日 0000-1200 UTC 及 1200-2400UTC 的 QPESUMS 雨量估計資料，針對預兆得分(TS)、公正預兆得分(ETS)、偏離指數(BS)、誤報率(FAR)、偵測率(POD)、漏報率(MS)等 6 項技術指標，依據預報時間 12 至 24 小時間之各種系集預報產品進行系統性的校驗。校驗時間自 5 月 1 日 0000 UTC 至 7 月 1 日 0000 UTC 間的 61 日，共 122 個採樣時間間距；雨量校驗門檻訂為 1、10、20、50、100、200、300 及 500 毫米；校驗產品包括決定性預報之 WRFD、系集平均、PM、NPM 與 10, 20, 30, 50, 70, 90%之 QPFP。以下部分分析將較著重於 WRFD、系集平均、QPFP20%、NPM 及 PM 之說明為主。

(一) 預兆得分(TS)與公正預兆得分(ETS)：

圖 8 為 2015 年梅雨季統計之觀測降水在不同降雨門檻樣本的百分比例，其中 1 毫米以上之降雨事件比例為 27.9%，50 毫米之大雨事件僅 2.1%，100 毫米以上的極端降雨事件甚至僅有 0.50%，而此段校驗時間發生的最極端降雨為 300 毫米，所占比例約 0.004%，以台灣的面積 36000 平方公里計算，此 300 毫米以上之雨量僅發生在 5 月 24 日 0000 UTC 至 25 日 0000 UTC 之間的 2 段時間，其總面積約 174 平方公里。圖 9 則為 2015 年梅雨季統計校驗各項技術指標之結果，表 2 則為 TS 與 ETS 之技術得分，其中 1 毫米（淺藍色）雨量門檻之 TS 以 QPFP30 之 0.53 最高，QPFP20 之 0.52 次高，其餘依序為系集平均與 QPFP50 之 0.50，NPM 與 QPFP10 之 0.48，PM 之 0.47，WRFD

之 0.46，QPFP70 之 0.40，最低是 QPFP90 的 0.24；ETS 則是 QPFP30 之 0.38 最高，QPFP50 之 0.37 次之，其餘依序為 QPFP20 之 0.35，WRFD 之 0.34，NPM 與 PM 之 0.33，系集平均之 0.32，QPFP70 之 0.30，QPFP10 之 0.28，最低為 QPFP90 之 0.17。20 毫米雨量門檻（綠色）之 TS 以 NPM、PM、WRFD 與 QPFP30 之 0.26 最高，系集平均與 QPFP20 之 0.25 次之；20 毫米之 ETS 則以 WRFD、NPM 與 PM 之 0.23 最高，系集平均與 QPFP30 之 0.22 次之，QPFP20 之 0.21 再次之。50 及 100 毫米雨量門檻（橙色及紅色）之 TS 與 ETS 最高皆為 NPM、PM 次之，WRFD 與 QPFP20、QPFP30 次之，系集平均在其之後。當雨量門檻超過 100 毫米時，TS 與 ETS 之差異明顯變小，顯然是由於其發生之頻率偏低（圖 8），導致 ETS 之

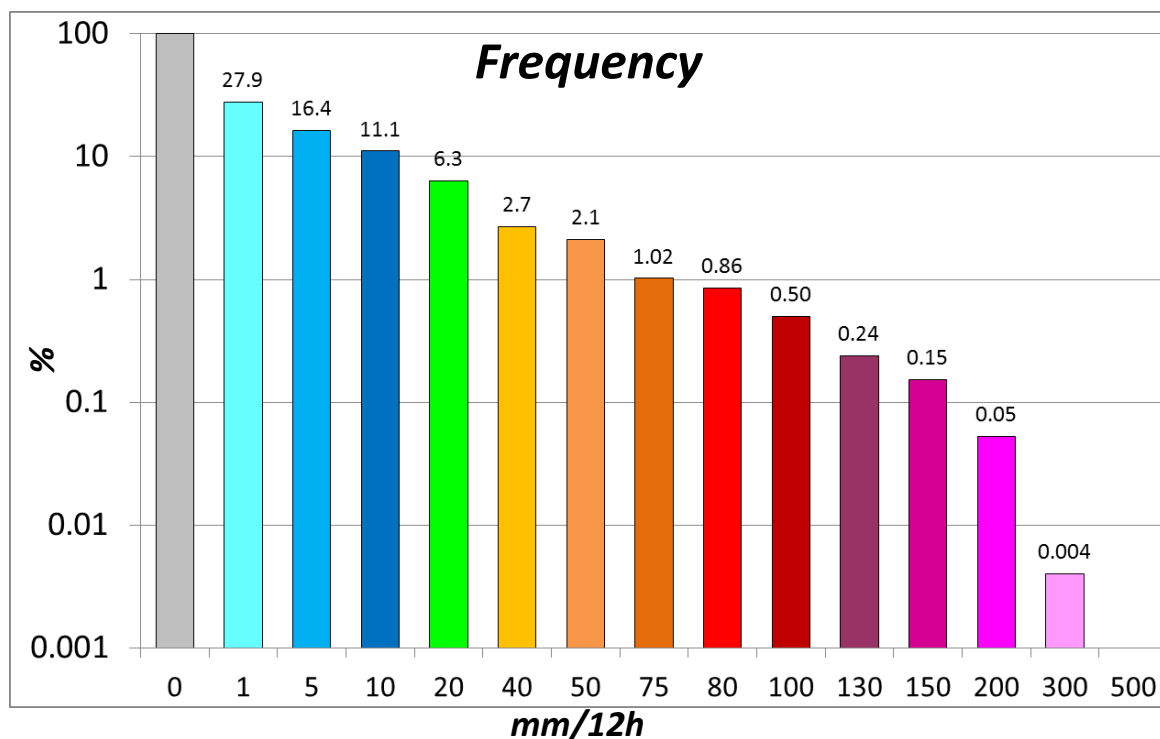


圖 8 2015 年 5~6 月 12 小時累積雨量之樣本累積數目百分比，共 122 筆預報時間。縱軸為百分比（%，對數座標），橫軸代表不同雨量門檻值（單位為毫米），圖中數字代表該雨量門檻所占之樣本百分比。（葉等，2016）

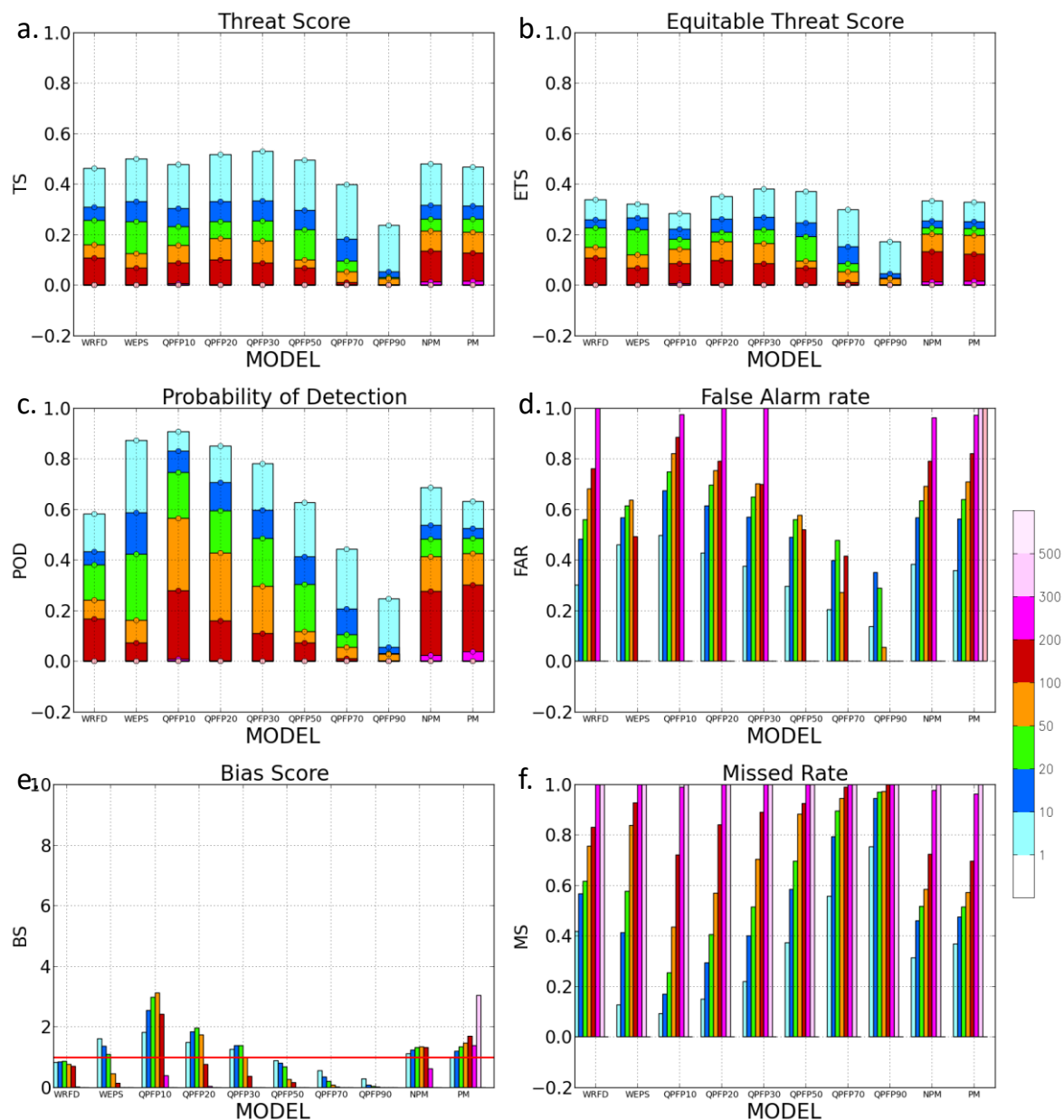


圖 9 針對 2015 年 5 月 1 日 0000UTC 至 7 月 1 日 0000UTC 之梅雨季雨量校驗，預報 12 至 24 時之定量降水預報校驗，分別針對 WRFD、系集平均(WEPS)、QPFP10、QPFP20、QPFP30、QPFP50、QPFP70、QPFP90、NPM 及 PM。色階圖說同圖 1。

表 2 針對 2015 年 5 月 1 日 0000UTC 至 7 月 1 日 0000UTC 之梅雨季，預報 12 至 24 時之定量降水預報校驗 TS 與 ETS 技術得分。

TS (mm)	WRFD	WEPS	QFPF10	QFPF20	QFPF30	QFPF50	QFPF70	QFPF90	NPM	PM
1	0.464	0.500	0.477	0.519	0.531	0.496	0.398	0.238	0.481	0.467
10	0.309	0.331	0.305	0.332	0.333	0.296	0.182	0.054	0.316	0.313
20	0.257	0.252	0.231	0.251	0.255	0.219	0.096	0.031	0.262	0.261
50	0.160	0.126	0.158	0.185	0.175	0.101	0.054	0.027	0.215	0.209
100	0.109	0.068	0.089	0.099	0.088	0.068	0.011	0.000	0.136	0.126
200	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.016
300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
ETS (mm)	WRFD	WEPS	QFPF10	QFPF20	QFPF30	QFPF50	QFPF70	QFPF90	NPM	PM
1	0.339	0.322	0.284	0.352	0.382	0.371	0.299	0.173	0.333	0.328
10	0.259	0.267	0.223	0.261	0.270	0.247	0.153	0.045	0.254	0.253
20	0.228	0.219	0.183	0.210	0.219	0.193	0.085	0.028	0.227	0.225
50	0.151	0.120	0.142	0.172	0.164	0.096	0.053	0.026	0.203	0.196
100	0.107	0.067	0.085	0.097	0.086	0.068	0.011	0.000	0.133	0.123
200	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.016
300	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

隨機預報扣分效應減少，因此 TS 與 ETS 差異不大。針對 0.05% 的 200 毫米之極端雨量門檻（深紫紅色），僅 NPM、PM 及 QFPF10 有預報技術，最高為 PM 之 0.16，NPM 之 0.14 次之，QFPF10 則為 0.007。

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。圖 9（表 2）的校驗也發現，WRFD 在 10 毫米之 TS 與 ETS 比系集平均低，10 毫米以上則較高。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) 偵測率(POD)、誤報率(FAR)及漏報率(MS)：

以圖 9 之偵測率(POD)、誤報率(FAR)及漏報率(MS)來看，系集平均對較小雨量具有高 POD、低 FAR 及低 MS 的特性，對 50 毫米以上之較大雨量卻具有較低 POD、低 FAR 及高 MS 的特性，對 200 毫米以上則無預報能力，因此 POD 及 FAR 為 0、MS 為 1。WRFD 在 20 毫米以下之 POD 及 FAR 低於系集平均，MS 略高於系集平均；50 毫米以上之 POD 及 FAR 則高於系集平均，MS 低於系集平均。PM 及 NPM 特性大致相似，對 10 毫米以下之 POD 及 FAR 略低於系集平均，MS 則略高；20 毫米以上之 POD 及 FAR 則高於系集平均，MS 則較低；PM 及 NPM 對 200 毫米以上仍有部分 POD；若比較 PM 及 NPM，PM 對 10 毫米以下之 POD 及 FAR 略低於 NPM，MS 則略高，50 毫米以上則相反，但差異並不大；但 PM 對極端的 300 及 500 毫米雨量門檻之 POD 為 0、FAR 為 1，顯示其易過度預報之特性。對超越機率之 QFPF 而言，POD 及 FAR 大致隨機率上升而下降，MS 則隨機率上升而上升。另外，QFPF10、QFPF20 及 QFPF30 之 POD 與 FAR 皆高於系集平均，MS 則低於系集平均；但 QFPF10 之過度預報傾向非常顯著，QFPF20 及 QFPF30 之過度預報則逐漸降低。值得注意的是，上述討論的各種系集方法，在提高 TS 及 POD 時，通常也增加 FAR，並使 BS 增大，沒有任何方法可以同時提高 TS 與 POD、且減少 FAR，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。一般而言，防災相關的定量降水預報作業，通常傾向較高的偵測率、較低的漏報率且稍大的誤報率，此特性與 QFPF20 或 QFPF30

較為接近。

(三) 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。葉等(2016)分析系集平均、NPM、PM 及 WRFD 之偏離指數並指出，最佳的雨量預報除了追求較高的 TS 與 ETS 分數外，其 BS 應接近於 1，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 9 上呈現梯形之分布，意義是對小雨面積高估但大雨低估。決定性預報 WRFD 之 BS 隨降雨增加大致呈水平分布，並不像系集平均有對小雨高估且對大雨低估之特性，各雨量門檻之 BS 約 0.7 或 0.8，略有低估之傾向，僅極端的 200 毫米雨量門檻有明顯低估（BS 為 0.013）。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 QPFP 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 QPFP 於越高的雨量之低估特性越明顯。

由以上的分析及討論可知，理想系集預報系統之決定性預報（或任一成員），除了最極端的降雨以外，其 BS 應該趨近於 1（無偏差）。系集平均及 QPFP 方法皆可能改變其 BS 而導致偏差產生，此偏差是因系集或統計方法而產生，而不是系集預報系統本身的特性，透過 NPM 或 PM 的系集方法可以回復系集預報系統之偏差特性，但 PM 會在極端雨量明顯過度預報，NPM 則是理論上及本研究之統計最中性無偏的方法，因此是系集預報系統的最佳解。

(四) 性能圖(Performance Diagram)：

本研究引用 Robber (2009)提出的性能圖（圖 10）進行最後的綜合比較，此圖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)，左上為明顯過度預報，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 10 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 QPFP10 等 3 種方法能預測 200 毫米門檻雨量，但預報技術皆低於

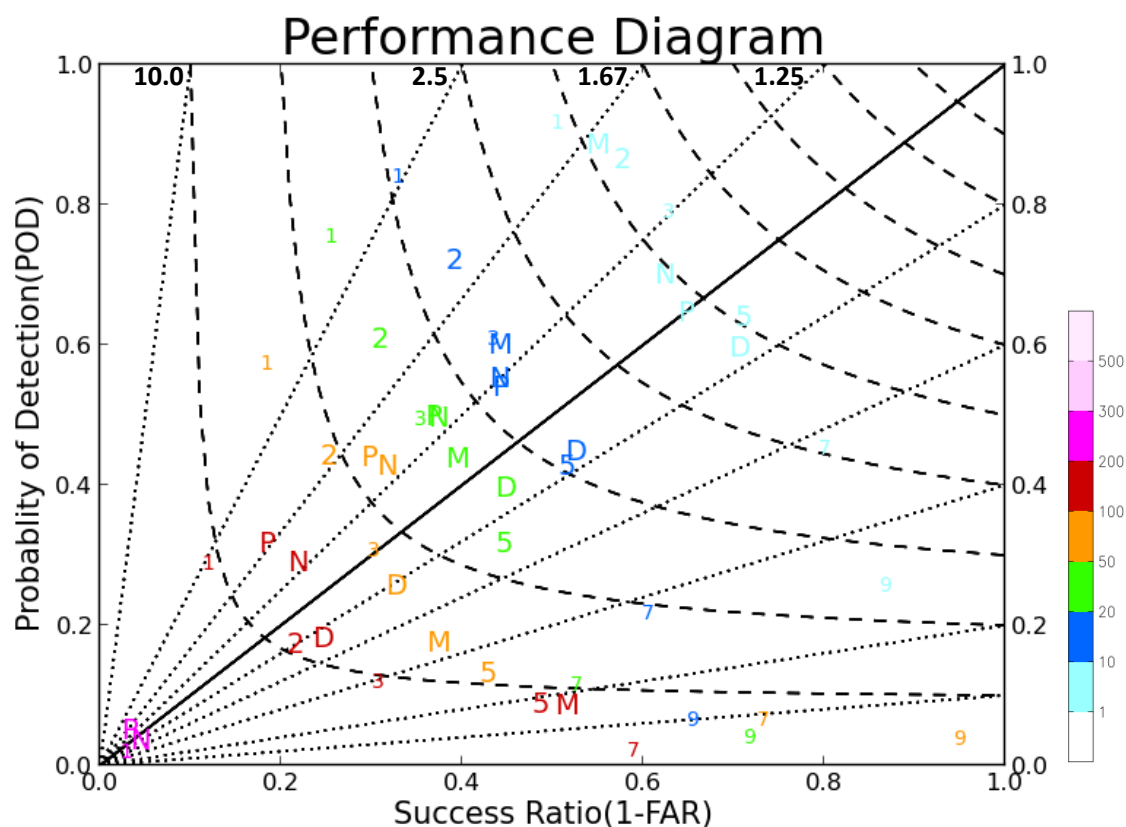


圖 10 2015 年 5 至 6 月梅雨季系集預報系統預報 12 至 24 小時之 QPF 校驗，D 為 WRFD、P 為 PM、N 為 NPM、M 為系集平均、1, 2, 3, 5, 7, 9 分別為 QPFP10, QPFP20, QPFP30, QPFP50, QPFP70, QPFP90。色階圖說同圖 1。

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。WRFD 則大致沿 BS 為 0.8 成直線分布，因此略有低估。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 QPFP 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 QPFP 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

中央氣象局在精緻化的鄉鎮天氣預報與區域數值系集預報系統發展的架構下，積極開發短期定量降水預報技術；目前官方的 QPF 作業可針對不同全球預報系統、區域預報模式與區域天氣系集預報系統，進行主觀的多模式系集、系集預報系統預報或進階的混合系集預報；或依據不同統計方法產生單一的決定性預報產品，如系集平均、標準差、中位數、百分比平均或進階的機率擬合平均等方法；預報員最後再依據各種 QPF 指引產品進行系統性校驗，並依據其結果與經驗，製作基於客觀的系集方法的主觀 QPF 預報。

本研究延續葉等(2016)的工作，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 QPFP。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。

不論系集平均、PM 或 NPM 都是決定性預報產品，並沒有任何機率的概念，為了詮釋預報之不確定性，預報作業機構或學界建議應推廣機率型產品，如降雨機率預報(POP)或定量降水機率預報(PQPF)。由於機率型產品本身就具有模糊的概念，應用上不如決定性預報產品明確，且可能因應各種防災需求而必須給定不同雨量門檻，甚至可能需要多個門檻之機率。因此推廣上常遇到不少困難，政府防災單位或民眾對應用的程度通常較低，對於以定量降水預報產生之進一步災害評估上也較不容易。因為災害之評估常不僅於使用定量降水預報，而是需要耦合定量降水預報之洪水預報、土石流預報或都市淹水預報等下游模型，而定量降水機率預報在這些模型上的使用常有應用上之困難。對系集預報系統而言，給定雨量門檻可產生定量降水機率預報，若轉換到機率空間上，給定機率門檻則可產生超越機率之定量降水預報(QPFP)。其意義代表任一格點上的成員百分比之 QPF 大於此機率門檻之 QPFP。另一觀點

來看, QPFP 亦可表示為任一格點的 QPF 在系集之維度上排序的百分位數(percentile)。QPFP 形式為定量降水預報, 但隱含機率之本質。不確定性之描述在系集預報的概念下, 目前普遍認為合適的方法可能是盡量說明最可能發生的狀況(系集產生的單一預報), 而後再輔以說明不確定的範圍, 以及發生的機率。實務上常以不確定性評估或不同情境之模擬取代機率, 因此另一個更簡化的版本可以是目前在中央災害應變中心中提出的三種情境, 除了最可能的答案外, 另外提供 2 種以上情境說明不確定的範圍。而本文提出的超越機率方法實際上是機率預報的另一呈現方式, 且可以結合不同情境之不確定性之評估。因此在防災應用上, 以機率為門檻可以進行不同情境之評估, 例如目前常使用的 3 種可能情境可分別提供: 1.)高風險、低機率的 QPFP5 或 QPFP10; 2.)稍高風險、稍低機率的 QPFP20 或 QPFP30; 或 3.)低風險、高機率的 QPFP50 或 QPFP70 等; 防災人員可以依據簡化過的風險程度及發生機率, 迅速理解此天氣系統在預報上的不確定性、危險程度及機率等重要的資訊, 並依此進一步相對應模擬或作為。

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、偵測率 POD、誤報率 FAR、漏報率 MS 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。決定性預報之 WRFD 在小雨量的預報技術低於系集平均, 大雨則較高, 其 BS 在各雨量門檻皆在 0.7 至 0.8 間, 略有低估的傾向; 而由其 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。除了極端雨量之技術略低於 PM 且無顯著過度預報以外, NPM 大致與 PM 之特性相似, 但具有略高的預報技術, 且較低的 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, 且對極端降雨有限的技術, 雖略有過度預報之傾向, 但不失為優良的指引。

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。
- 、——，2013：“區域系集預報系統強化研究——物理參數法擾動強化”，*102 年天氣分析與預報研討會論文彙編*，**A2**，37-42。
- 、——，2014：區域系集定量降水預報之應用與分析研究。*天氣分析與預報研討會論文摘要彙編*，**A2-19**。
- 陳新淦、黃椿喜、呂國臣、洪景山、張博雄，2016：利用雷達回波影像辨識及篩選技術發展極短期系集定量降水預報。*大氣科學*，**44**，1-31。
- 蘇亦叡、洪景山、李志昕，2016：系集機率擬合平均定量降水預報產品之特性分析。*大氣科學*，已接受。
- 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。
- 簡芳菁、柳懿秦、周仲島、林沛練、洪景山和蕭玲鳳，2005：2003 年梅雨季 MM5 系集降水預報。*大氣科學*，**33**，255-275。
- Black, T.L., 1994: The new NMC mesoscale Eta model: description and forecast examples. *Wea.Forecasting*, **9**, 265-278.
- Lorenz, E. N., 1993. *The Essence of Chaos*. University of Washington Press, Seattle, 240pp.

- Du, J., S.-L. Mullen, F. Sander, 1997: Short-Range Ensemble Forecasting of Quantitative Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2427-2459.
- Finley, J.P., 1884: Tornado predictions. *Amer. Meteor. J.*, **1**, 85-88.
- 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.
- Hsiao, L.-F., X.-Y. Huang, Y.-H. Kuo, D.-S. Chen, H. Wang, C.-C. Tsai, T.-C. Yeh, J.-S. Hong, C.-T. Fong, C.-S. Lee, 2015: Blending of Global and Regional Analyses with a Spatial Filter: Application to Typhoon Prediction over the Western North Pacific Ocean. *Wea. Forecasting*, **30**, 754-770.
- Robber P.-J., 2009: Notes and Correspondence - Visualizing Multiple Measures of Forecast Quality. *Wea. Forecasting*, **24**, 601-608.

Postprocessing of Ensemble Rainfall Forecasts - Ensemble Mean, Probability Matched Mean and Exceeding Probability

Treng-Shi Huang Shih-Husan Yeh Kuo-Chen Lu Jing-Shan Hong

Central Weather Bureau

(manuscript received 15 February 2016 ; in final form 18 July 2016)

ABSTRACT

In this study, we follow the work by Yeh et al. (2016) and thoroughly examine several QPF products derived by different post processes on the ensemble members of the CWB (Central Weather Bureau) operational WRF (Weather Research and Forecasting Model) ensemble prediction system (WEPS), including ensemble mean, PM (Probability Matched Mean), NPM (modified PM by Yeh et al, 2016) and QPFs (exceeding probability of QPF or QPF percentile). Based on the statistical verification of 12-24 hour QPF during Mei-yu season (May and June) in 2015 for all QPF products in Taiwan area, it is found that the overall threat score (TS) and equitable threatscore (ETS) decrease with increasing rainfall threshold. The ensemble mean tends to over-predict the light rainfall while under-predict the heavy rainfall, characteristic of an inhomogeneous decreased

bias with increased thresholds. Skill scores of deterministic WRF (WRFD) are slightly lower than WEPS for light rainfall, but higher for heavy rainfall. The result based on bias score also indicates that the rainfall is slightly underestimated at all rainfall thresholds as compared to the observation. PM is slightly over-predicted at most rainfall thresholds, but has a large bias at the extreme rainfall. NPM is similar to PM with less over-prediction at most thresholds, especially for the extreme rainfall. Its unbiased or neutral nature makes NPM as the best solution for WEPS. QPFs show a decreasing bias with increasing probability, which are not homogeneous as well. It also under-predicts QPFs with probabilities up to 50% or above. QPFP20 or QPFP30 could be a good guidance though it is overall over predict. For products derived from WEPS, it is found ensemble mean, PM and NPM conserved the domain total water amount, but QPFs are not.

In summary, NPM is the best solution for WEPS in theory and statistics, with characteristics of higher skill score, higher probability of detection, lower false alarm rate and neutrally un-bias. Another important guidance would be QPFP20 since the operation QPF tends to deliver a higher risk forecast with lower probability. Finally, QPFP is suitable for probability-based decision making. And we may provide guidance for applications of QPF products in the following three categories 1) high-risk with low probability: QPFP5 or QPFP10; 2) higher risk with lower probability: QPFP20 or QPFP30; or 3) low risk with high probability: QPFP50 or QPFP70.

Key Words: WEPS (WRF Ensemble System), QPF (Quantitative Precipitation Forecast), PM (Probability-Matched Mean), NPM (New PM), QPFP (Exceeding Probability or Percentile of QPF)