

機率擬合之系集定量降水預報後處理方法

葉世瑄¹ 林沛練¹ 洪景山² 黃椿喜³

¹ 國立中央大學大氣物理研究所

² 中央氣象局資訊中心

³ 中央氣象局預報中心

(中華民國一〇四年十一月二十四日收稿；中華民國一〇五年三月九日定稿)

摘 要

系集預報系統除了可以針對預報之不確定性與機率進行評估以外，由其產生的預報也通常優於任一成員的決定性預報。對於連續性的變數，系集平均或中位數等簡單的統計方法通常可做為其單一預報的基準。對於定量降水預報(Quantitative Precipitation Forecast, QPF)的問題，系集平均雖然對於中小雨之預報技術亦常優於決定性預報，但因極端降雨常與中尺度之對流過程相關，其分布在時間、空間及系集等維度上並非連續的變數，因此簡單的平均易將各成員之雨量預報平滑而低估較大雨量之預報。Ebert (2001) 首先針對澳大利亞地區的 QPF 提出機率擬合平均(Probability-matched ensemble Mean, PM)的概念，這個方法採取系集平均的空間相對分布，其降雨頻率則以所有系集成員之總降雨頻率取代系集平均之降雨頻率。但 PM 用於氣象局發展的區域高解析系集預報系統(WEPS)，常過度預報較大雨量。主要是因為系集預報系統之總降雨頻率，容易因為某些成員的明顯過度預報偏差，導致極端雨量之過度預報。

本研究嘗試由系集預報系統之設計概念，探討理想上系集預報系統對於產生最佳定量降水預報的原理，並應用於氣象局 WEPS 在一般的作業或統計上之特性，基於 PM 方法，提出修正的 NPM 方法(New Probability-matched ensemble Mean, NPM)，此方法亦使用系集平均之空間相對分布，但降雨頻率修正為各系集成員降雨頻率分布之平均，因此可以改善 PM 過度預報較大雨量的缺點，減少個別成員導致之偏差。針對 2013 蘇力颱風個案與 2015 年梅雨季檢測系集平均、PM 與 NPM 系統性統計分析，發現系集平均對於中小雨的預報能力 (TS 或 ETS) 的確能明顯提升，但對於大雨或極端雨量之預報技術卻可能

低於決定性預報，因此系集平均並不適合做為系集預報系統之最佳 QPF，而 PM 與 NPM 可明顯改善系集平均過度預報小雨及大雨低估的情形，同時也提升對於豪大雨事件的預報能力；PM 與 NPM 相比，PM 較能預報到極端降水的發生，但相對的也容易高估極端降水面積。NPM 可保留系集成員預報極值的能力，並且改善 PM 容易過度預報的問題，是最中性的系集預報方法，最適合做為系集預報系統的最佳解。

關鍵字：系集預報系統，定量降水預報，機率擬合平均(PM)，新 PM 法(NPM)

一、前言

系集預報的起源與發展，源自於大氣系統本身的混沌性質，加上數值天氣預報處理上不可避免存在各種觀測、背景與數值運算誤差。因此非線性的大氣控制方程，導致初始的微小誤差隨積分時間增加而成長，不同的初始場抑或不同的模式將會有不同的預報結果，且隨著預報時間推移所累積的誤差將嚴重影響預報結果，使預報失效 (Lorenz, 1960)；此天氣預報的理論上限又稱為天氣預報之可預報度。同樣的季節也會因不同的天氣系統而使預報結果有非常大的差異。

故完整的預報除了最可能的答案以外，須定量描述預報不確定性的分布範圍，因此發展出系集(Ensemble)天氣預報的概念(Leith, 1974)。初期系集天氣預報為製造一組非常靠近的初始狀態，並以相同的數值方法和數值模式計算各初始值的天氣演變，接著從各預測結果分散的情況，估算初始誤差對天氣預報準確度的影響，進而從這些預報的統計平均值（例如系集平均）取代單一的決定性預報，作為天氣預報的結果。1990 年以後，國際各主要的數值天氣預報中心，莫不極力發展系集預報系統。從 WMO 氣象研究計畫數值試驗工作組(Working Group on Numerical Experimentation, WGNE)第 27 次會議報告指出，包括歐洲作業中

心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)、美國國家環境預報中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)、日本氣象廳(Japan Meteorological Agency, JMA)及韓國氣象局(Korea Meteorological Administration, KMA)等均每日產生數 10 組的全球系集預報產品。

除了全球系集預報系統外，目前在區域系集預報系統的運用上也開始面臨更多的需求，中央氣象局(Central Weather Bureau, CWB)自 2012 年起發展的基於 5 公里高解析區域 WRF 模式(Weather Research Forecasting Model)的區域系集預報系統 (WRF Ensemble Prediction System, WEPS; 李 2011)，目前作業的版本為每 6 小時更新 20 組的系集預報，並已廣泛應用在 2012 年上線的鄉鎮尺度天氣預報之中(黃等, 2012)。一個好的系集預報系統，每個系集成員預報都代表一種可能性，即期望每個系集成員對於真值的預報命中率是平均的。但如何從大量的資料，從中得到有用的資訊，產生有用的預報指引是關鍵的議題。最常使用的系集預報產品如系集平均(Mean)，系集中位數(Median)，系集離散度(Spread, SD)，義大利麵圖(Spaghetti diagram, SP)等。

國內外有許多學者進行系集預報的研究與應用。如使用 ECMWF、NCEP、JMA、德國、澳大

利亞等五種的全球波譜模式及澳大利亞的區域模式和英國氣象局的全球模式結果來作 24 至 48 小時的 QPF (Quantitative Precipitation Forecast, QPF)，研究顯示對於 24 小時降水機率預報在降雨強度(mm day^{-1})大於 50 毫米而言，多家模式系集預報 (Poor Man's Ensemble)比 ECMWF 的單一系集預報結果有更好的表現(Ebert, 2001)。Zhou and Du (2010)針對霧的預報進行系集預報的研究，結果顯示多重模式的系集預報結果，其機率預報可信度會優於使用單一模式產生的系集預報結果。簡等(2005)針對台灣地區 2003 年梅雨季進行系集降水預報實驗，亦顯示系集平均相對於單一決定性預報都有較佳的技術得分。而曹等人(2011)則發展更為先進的系集模式颱風 QPF 方法 (Ensemble Typhoon Quantitative Precipitation Forecast, ETQPF)，以最佳的颱風預報路徑，依據 72 小時內、每 3 小時的預測位置，於不同延時初始時間、預報時間的大量系集空間中，篩選最佳颱風預測位置附近 (如 50 公里半徑之範圍內)的多個成員，計算逐 3 小時的系集定量降雨強度，最後合成產生不同時間長度的 QPF。黃等人(2014)則介紹近年來 CWB 於實際預報作業上使用定量降水預報的現況，並提出一個新的機率定量降水預報(QPFP)的概念。

一般而言，系集平均對於連續性且為高斯分布的變數有最好的預報得分，ECMWF 指出系集平均在預報海平面氣壓與溫度上效果是還不錯的，因這兩個氣象變數的頻率分布近似高斯分布，發生頻率最高的位置和平均值相近，所以誤差最低；中位數則是在預報風速上比較適合，因為這一個氣象變數的頻率分布並非類似高斯分布。而 QPF 分布通常不連續，加上劇烈天氣常與對流尺度的降雨特性有關，降雨極值常發生在鄰近空間

上的不同位置或格點，因此一般只考慮系集空間的統計，不論是平均或中位數均會低估 QPF，而無法取得正確解析系集系統預測之降雨極值。進階的統計方法不僅考慮系集空間的平均，同時考慮系集的降雨頻率分布，產生機率擬和平均 (Probability-Matched Mean, PM; Elbert 2001, 李 2014) 的 QPF；簡單而言，PM 基於系集平均產生雨量的最佳空間分布，但將系集平均的降雨頻率以整體系集預報系統的降雨頻率取代。

系集預報可產製大量的資料，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，本研究將針對三種預報降水產品：系集平均，PM 與系集頻率平均(New PM, NPM)，選取 2013 蘇力颱風個案檢測 PM 與 NPM 的敏感度，再進一步選取 2015 年 5~6 月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、資料來源與研究方法

(一)資料來源與模式簡介

本研究使用的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)之定量降水估計產品與雷達產品，採用雷達降水估計並使用全台雨量站(約 500 個)進行校正。CWB 蘇力颱風的最佳路徑與 CWB WEPS 的預報資料。CWB WEPS 的預報資料，本研究只選取槽狀網格第三層的網格點的資料來做

分析, 解析度為 5km。CWB 的系集模式預報系統 WEPS, 是由氣象局資訊中心使用 WRF 3DVAR 和 WRF 模式所建構之系集預報系統, 擁有合理的離散度使 WEPS 為良好的系集預報系統 (蘇等, 2016)。WEPS 為三層槽狀網格結構, 解析度依序為 45/15/5 公里, 預報作業每日執行 4 次, 分別為每日的 0000 UTC、0600 UTC、1200 UTC、1800 UTC, 每次由初始場擾動、雲微物理參數化產生 20 個系集預報成員進行預報。總預報時間為 72 小時, 模式輸出頻率為 3 小時一筆, 詳細的模式設定請參考 (李等, 2011。蘇等, 2016)。

(二) 研究方法

因雨量在空間上的不連續分布, 極值並非發生在同個位置, 所以系集平均和系集中位數的預報結果皆會平滑掉極值, 容易發生低估雨量的情形。因系集平均有以上的劣勢, 而必須發展新的統計方法。

1. PM (Probability-matched mean)

Ebert (2001) 提出 PM 統計方法, 其設計理念可用圖 1 詮釋, 圖 1 為康瑞颱風於 2013

年 8 月 28 日 1200~8 月 29 日 0000UTC 的 12 小時累積降雨系集成員之 QPF。20 個系集成員對於相同時間, 相同天氣系統各有不同的預報結果, 其極值位置也有所不同, 顯示其變異程度大且不確定性高, 若只針對系集成員同一個網格點位置進行平均將會平滑極值造成低估, 因此相當適合作為本研究之系集平均、PM 與 NPM 之說明。使用不同的雨量作為篩選門檻, 大於等於此門檻的網格點令為 1, 小於此門檻的網格點令為 0, 再將全部網格點作加總即可得到其累積降雨頻率 (圖 2), 圖中黑色曲線為實際觀測, 紫色曲線為系集平均。同樣顯示大雨 (本研究訂為 12 小時

累積降雨量達 50 毫米以上) 明顯低估 (紫色曲線位在黑色曲線下方), 但中小雨 (本研究訂為 12 小時累積降雨量不到 50 毫米) 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 圖中就代表了降雨空間分布的形狀。另一方面, 降雨頻率分析之棕色曲線 (系集成員) 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。因此如何使用降雨頻率之特性, 自系集預報系統產生較佳的降雨預報, 為 PM 設定理念的出發點。

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 的降雨頻率來自整體系集成員 QPF 格點打散後重新分配, 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 (例如圖 1 預報過量的成員 13、14、16、17 與 18), 導致過度預報。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。詳細的計算過程在附錄 1 裡說明。

2. NPM (New PM)

由於 PM 方法採取系集預報系統之總降雨頻率作為其新的頻率分布, 不考慮個別成員的預報分布, 因此各成員的降雨頻率分散至整體系集的降雨頻率中, 任一點的雨量預報可能來自同一成員、不同位置的預報值, 在最極端雨量的預報常因某一成員之極端預報導致強降雨常有過度預報的問題, 故本研究設計了修正的 PM 方法, NPM。NPM 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預報差異, 採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。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）在大兩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（圖 2 與圖 3）。詳細的計算過程在附錄 2 裡說明。

圖 3 為使用了系集平均，PM 與 NPM 的 QPF 結果（時間同圖 1），從極值顯示系集平均因平滑化而有顯著低估；PM 極值則是三種統計方法中最極端的，因極值主要來自圖 1 預報過量的成員 13、14、16、17 與 18 的貢獻，導致過度預報；NPM 極值介在系集平均與 PM 之間，屬較中性的統計方式。

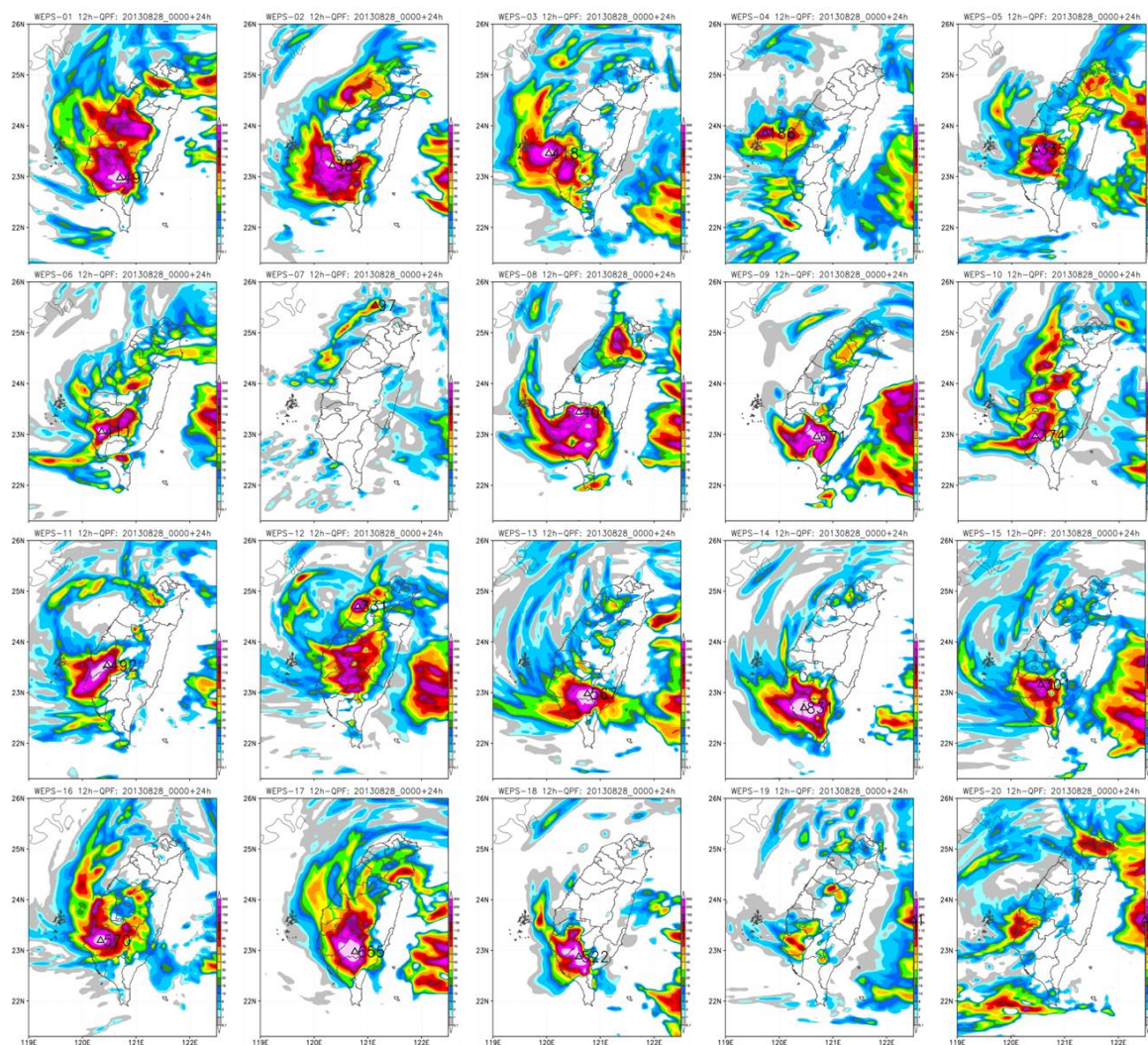


圖 1 模式初始時間為 2013 年 8 月 28 日 0000UTC 之 12-24hQPF。此為 20 個系集成員各自的預報結果。

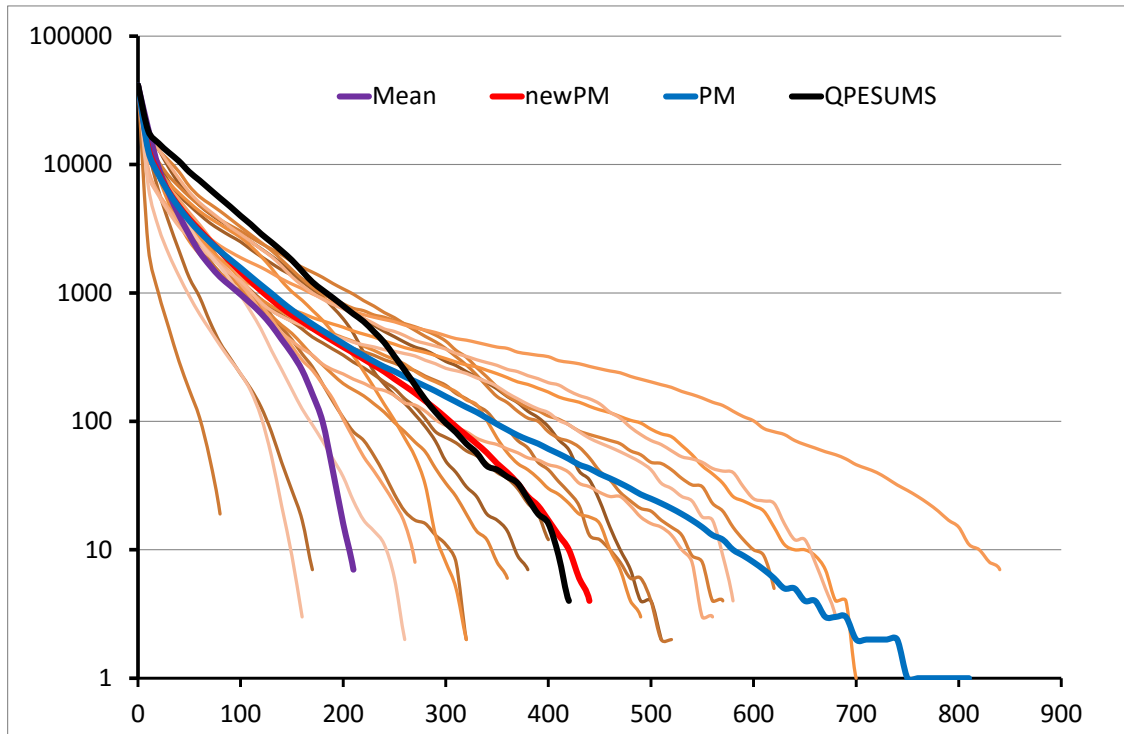


圖 2 模式初始時間為 2013 年 8 月 28 日 0000UTC 之 12-24hQPF 累積降雨頻率分布圖。棕色曲線為 20 個系集成員，黑色曲線為實際觀測，紫色曲線為系集平均，藍色曲線為 PM，紅色實線為 NPM。縱軸為發生頻率數目(對數座標)，橫軸為雨量門檻值(單位為毫米)。

(三) 校驗方法

本研究比較網格點上模式降水與觀測降水，並利用表 1 之列聯表關係式評估模式預報降水的能力。首先選定降水校驗之門檻值，當預報降水或觀測降水超過門檻值時，就定義為有降水，反之當低於門檻值時，則定義為無降水。表 1 中， a 代表預報有降雨且觀測也有降雨的次數(hits)， b 代表預報有降雨但觀測無降雨的次數(false alarms)， c 代表預報無降雨但觀測有降雨的次數(misses)， d 代表預報無降雨且觀測也無降雨的次數(correct rejection)。

根據表 1，本研究利用三個延伸指標來校驗降水預報：預兆得分(Threat Score, TS)，公正預兆

表 1 門檻得分(TS)的 a 、 b 、 c 、 d 定義， $a = \text{hits}$ ， $b = \text{False alarms}$ ， $c = \text{misses}$ ， $d = \text{correct rejection}$

Forecast	Observed		
	Yes	No	Total
Yes	a	b	$a + b$
No	c	d	$c + d$
Total	$a + c$	$b + d$	$a + b + c + d = n$

得分(Equitable threat score, ETS, Black, 1994)與偏差指數(Bias Score, BS)。

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。定義如下：

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

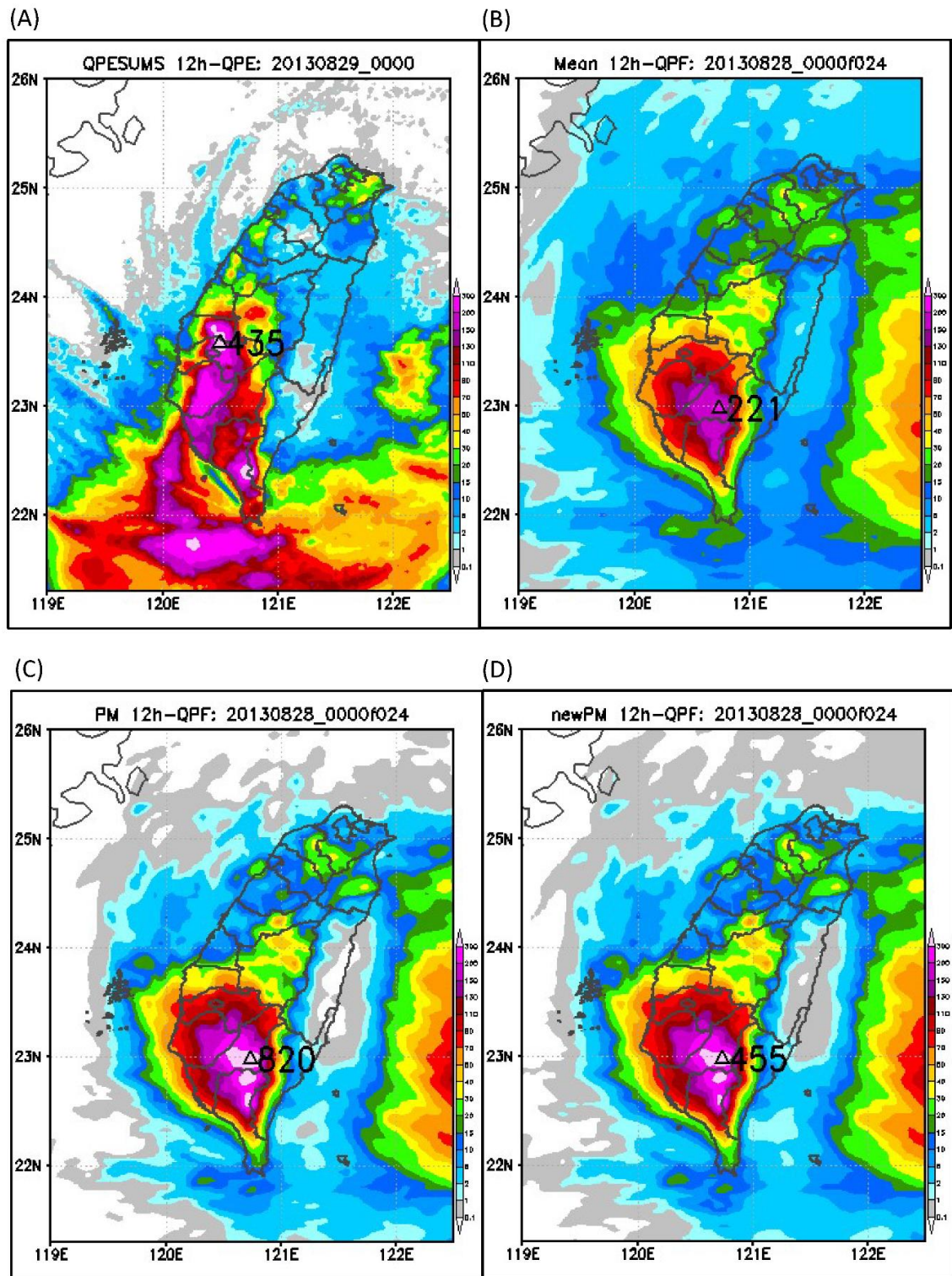


圖 3 模式初始時間為 2013 年 8 月 28 日 0000UTC 之 12-24hQPF 降雨空間分布圖，三張圖分別代表(A)觀測 (B) 系集平均(MEAN) (C) PM (D) NPM。

$$ETS = \frac{a - a_r}{a + b + c - a_r}, \quad a_r = \frac{(a+b)(a+c)}{n}$$

當 a 的值越高時， TS 與 ETS 值會越接近 1，表示模式正確預報降雨面積的預報能力越高；只是 ETS 會扣除 a_r (隨機可正確預測的次數)，計算除了模式與觀測皆無降水且不是隨機猜中的情況下，模式正確預測降水的機率。從 ETS 的 a_r 來看，可將其寫成

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

意思即在一個大小為 n 的空間裡，隨機畫兩個圓 $(a+b)$ 和 $(a+c)$ ，並讓兩個圓交集的機率。最後再乘上 n ，即為隨機交集的面積大小。在颱風或梅雨鋒面個案時，因降雨區域幾乎籠罩全台，所以觀測降水面積 $(a+c)$ 很大，在這樣的情況下，若預報降水面積 $(a+b)$ 遠小於觀測降水面積，因交集面積 (a) 很大導致 TS 得分很高；但如果是 ETS 的計算方式，由於 a_r 很大 (因觀測降水面積 $(a+c)$ 很大)，所以被扣分的情形會很顯著，導致 ETS 得分很低。因此 ETS 可以避免 a 和 c 遠大於 b 時，所造成的得分偏高情況，較 TS 嚴苛。

BS 為模式預測降水面積與觀測降水面積之比值。定義如下：

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

數值小於 1 代表預報低估，大於 1 代表預報高估。

對於長期之統計預報校驗，針對統計時間內所有的 a, b, c, d 先個別進行累計，再依 TS 、 ETS 、 BS 之公式重新計算平均後的校驗分數。

定義如下：

$$\overline{TS} = \frac{\sum a}{\sum b + \sum b + \sum c}$$

$$\overline{ETS} = \frac{\sum a - \hat{a}_r}{\sum a + \sum b + \sum c - \hat{a}_r}, \quad \hat{a}_r = \frac{(\sum a + \sum b)(\sum a + \sum c)}{\sum n}$$

$$\overline{BS} = \frac{\sum a + \sum b}{\sum a + \sum c}$$

其中， Σ 代表統計時間內累計的 a, b, c, d 。

三、個案分析與結果討論

(一) PM 與 NPM 之敏感度測試

為了證實本研究對於 PM 與 NPM 於研究方法中的假設，在此選取一實際個案，2013 蘇力颱風(SOULIK)進行兩種方法的敏感度測試。簡單介紹蘇力颱風的生命週期：蘇力於 7 月 8 日在關島北方海面生成，9 日增強為中度颱風並穩定地往西北西移動，10 日 0000 UTC 增強為強烈颱風後仍持續往西北西移動，11 日 1200 UTC 強度減弱為中度颱風，12 日 0000 UTC 移動方向轉為略向西北進行並朝臺灣東北部海面接近，12 日 1900 UTC 於新北市及宜蘭縣交界處登陸並持續往西北移動，13 日 0000 UTC 時於新竹附近出海後於 0800 UTC 進入大陸，0900 UTC 時減弱為輕度颱風。由於蘇力的主要降雨時間集中在 2013 年 7 月 12 日 1200UTC 至 2013 年 7 月 13 日 1200UTC 這 24 小時內，故 QPF 分析將針對此時段來進行分析與討論。

1. 系集 QPF 之定性校驗

蘇力颱風系集路徑預報隨時間推移有往南修正的趨勢，越趨接近官方最佳路徑 (圖 4)。從圖 5 更明顯看出，平均路徑隨預報時間越近誤差逐

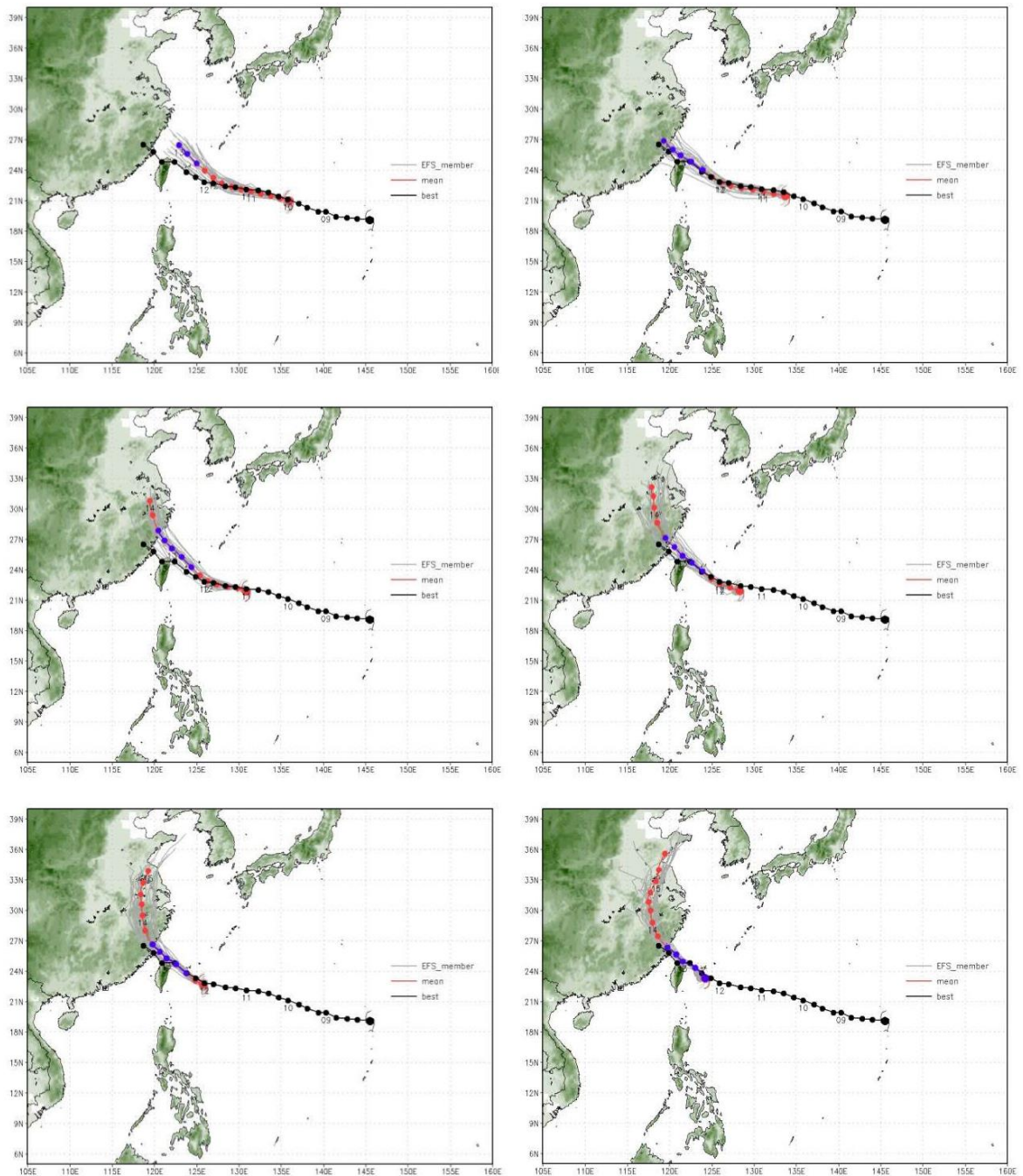


圖 4 式初始時間為 2013 年 7 月 10 日 00UTC~7 月 12 日 1200UTC 的蘇力颱風系集路徑預報（順序為由左至右，由上至下），時間間距為 12 小時。黑色實線為官方最佳路徑，灰色實線為系集成員各自的路徑預報，紅色實線為系集平均路徑預報，藍色實線代表校驗時間內（2013 年 7 月 12 日 1200UTC~2013 年 7 月 13 日 1200UTC）的系集平均路徑預報。

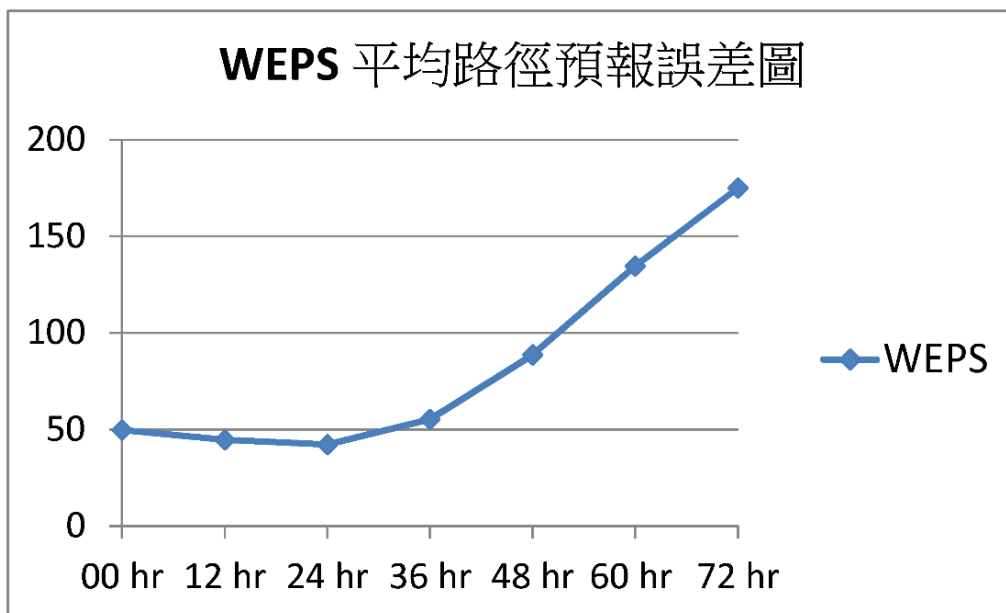


圖 5 蘇力颱風系集平均預報誤差曲線圖，橫軸為模式預報時間（單位為小時），縱軸為系集平均路徑與最佳路徑的距離誤差（單位為公里）。

漸縮小。在此個案系集成員彼此的路徑預報差異程度很小，預報方向很一致。

本研究選擇 24 小時 QPF 情形來探討系集平均、PM 與 NPM 的定性表現。在蘇力颱風顯著影響的 24 小時，顯示系集平均降水空間分布（圖 6B）非常類似實際降水分布（圖 6A），但極值過於低估；PM（圖 6C）的極值則大了實際觀測 100 多毫米，預報過量情形明顯；NPM（圖 6D）則是三種統計方法中最接近實際觀測的。從圖 7，實際觀測的降水頻率（黑色曲線）分布落在 20 個系集成員（棕色曲線）的偏右側，代表系集成員普遍有預報低估的傾向，也因此 PM（藍色曲線）預報過量的情形，除了極大值（近乎 800 毫米）高於實際觀測外，其餘皆是三種統計方法中最接近實際觀測的；NPM 的降雨頻率分布（紅色曲線）雖然略低於 PM，仍舊成功改善極值過度預報的問題。

2. 系集 QPF 之定量校驗

在定量校驗的部分，本研究將蘇力颱風顯著影響的 24 小時分成兩段時間來分析。因為從累積降雨頻率分布發現，前 12 小時的 QPF 系集成員有整體低估的情形，後 12 小時的 QPF 系集成員則整體高估（無附圖）。從這兩種不同的預報情形來比較各種系集後處理方法的校驗結果與特性。

從圖 8（蘇力颱風顯著影響的前 12 小時）比較模式初始時間為 2013 年 7 月 12 日 0000UTC，12-24h QPF 之系集平均（白色點狀直條）、PM（黑色直條）與 NPM（虛線直條）的 QPF 表現，整體而言表現優劣 PM 最好，接著為 NPM，最後是系集平均。從圖 9（蘇力颱風顯著影響的後 12 小時）比較模式初始時間為 2013 年 7 月 12 日 1200UTC 之 12-24h QPF，在大雨至 100 毫米之間的預報表現最好的為系集平均，NPM 和 PM 則幾乎相同；

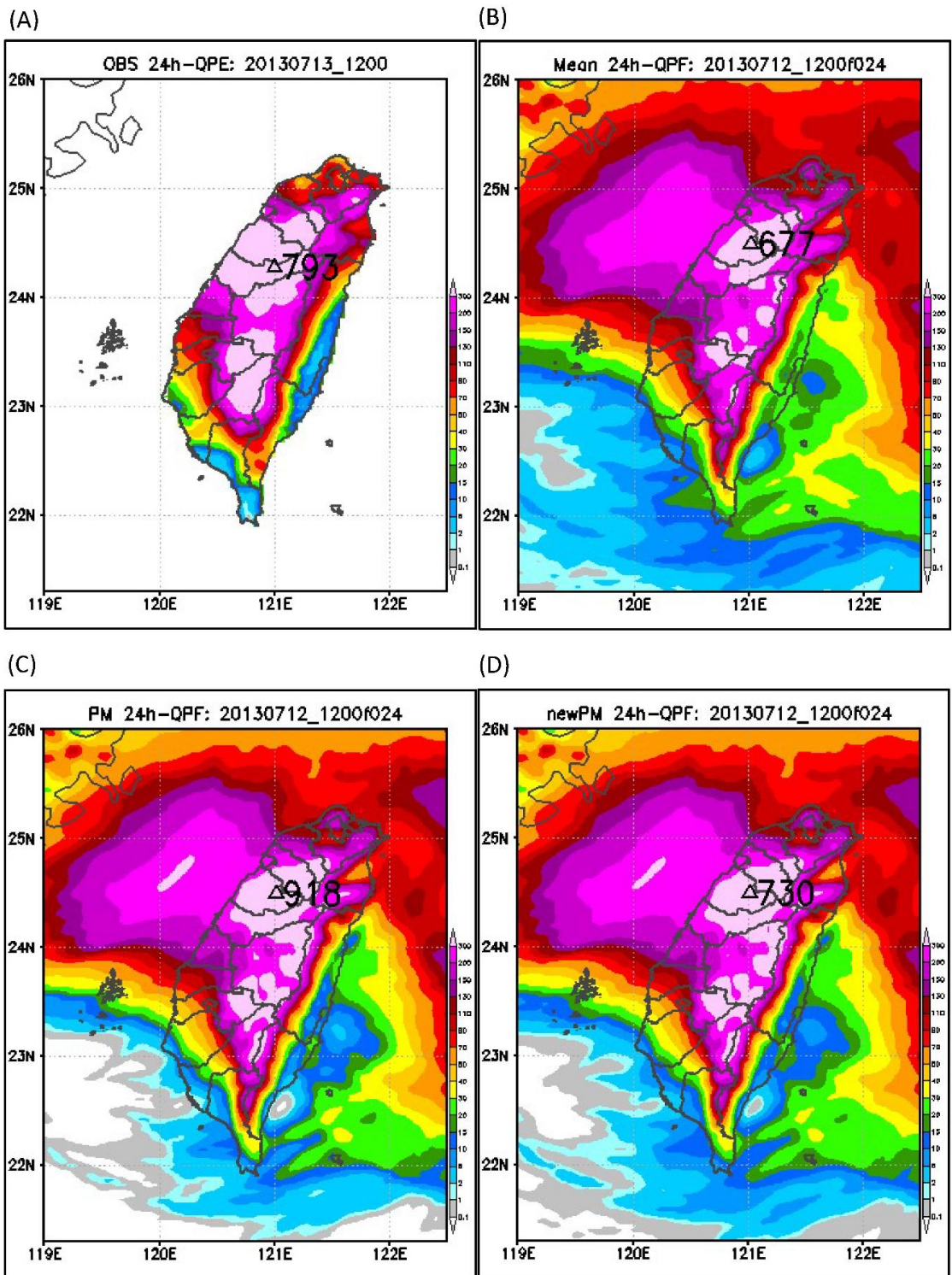


圖 6 模式初始時間為 2013 年 7 月 12 日 1200UTC 之 00-24hQPF 空間分布圖，三張圖分別代表(A)觀測 (B)系集平均(MEAN) (C) PM (D) NPM。

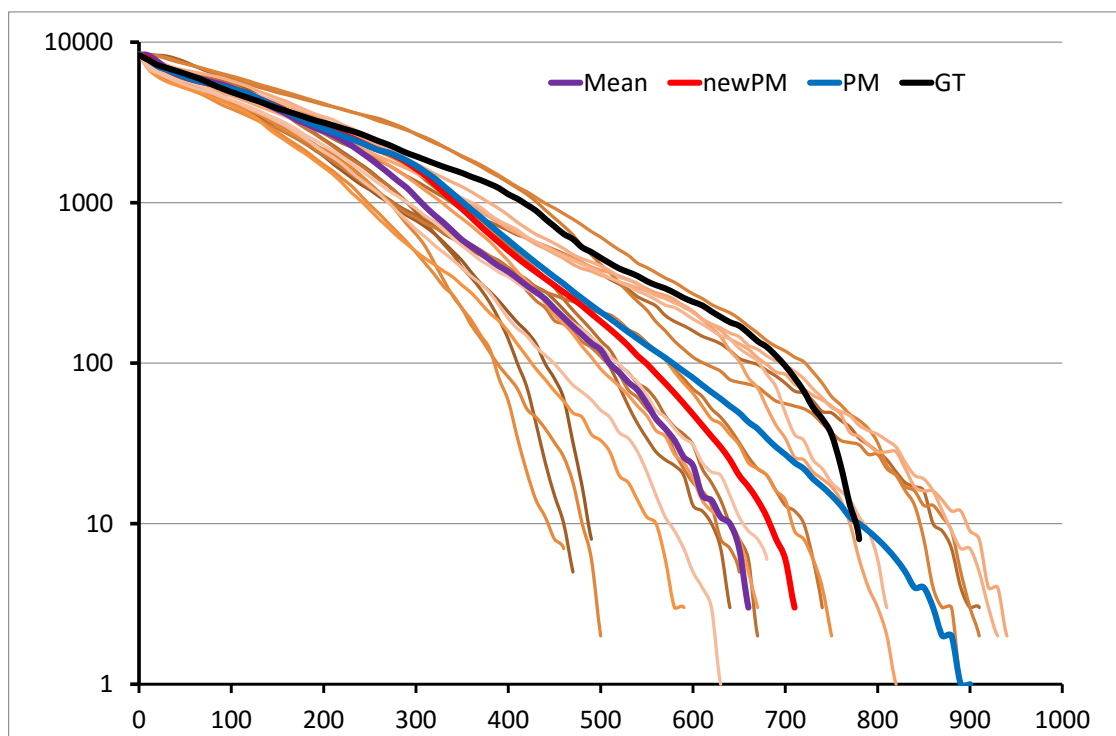


圖 7 模式初始時間為 2013 年 7 月 12 日 1200UTC 之 00-24hQPF 累積降雨頻率分布圖，棕色曲線為 20 個系集成員，黑色曲線為實際觀測，紫色曲線為系集平均，藍色曲線為 PM，紅色實線為 NPM。縱軸為發生頻率數目（對數座標），橫軸為雨量門檻值（單位為毫米）。

中小雨與 100 毫米以上則是 PM 與 NPM 稍贏系集平均，PM 與 NPM 的預報表現不分軒輊。

從 BS 來分析（圖 10A），顯示中小雨系集平均、PM 與 NPM 皆有高估的情形，尤以系集平均最明顯。大雨以上除了 NPM 在 200 毫米有些許高估以外，其他門檻值三種統計方法都為低估，不過 PM 的表現是三種統計方法裡面最好的。圖 10B 則呈現完全不同的資訊，三種統計方法在所有門檻值都有高估的情形，尤其 300 毫米時 PM 與 NPM 高估非常多（BS 皆達 4.0 以上），代表預報過量十分嚴重，且 PM 預報過量的傾向比 NPM 顯著。

（二）PM 與 NPM 之系統性統計分析

為了進一步了解更多個案的統計特性，本研究使用 2015 年 5~6 月的梅雨季所有 12 小時累積雨量預報分析三種統計方法的 QPF 表現，共使用了 122 個校驗時間（61 天×2 段校驗時間，00-12UTC 與 12-24UTC）。圖 11 統計了觀測降水在不同降雨門檻的樣本百分比，顯示有降雨事件（1 毫米以上）所佔比例為 27.9%，大雨事件（50 毫米以上）所佔比例剩下 2.1%，極端降雨事件（100 毫米以上）所佔比例為 0.50%，而此段校驗時間發生的最極端降雨為 300 毫米，所佔比例為 0.004%。從圖 12A，12 小時前至 48 小時前的模式初始時間對於 2015 年 5~6 月的 12 小時累積雨量預報校驗結果發現，7 個預報時間系集平均

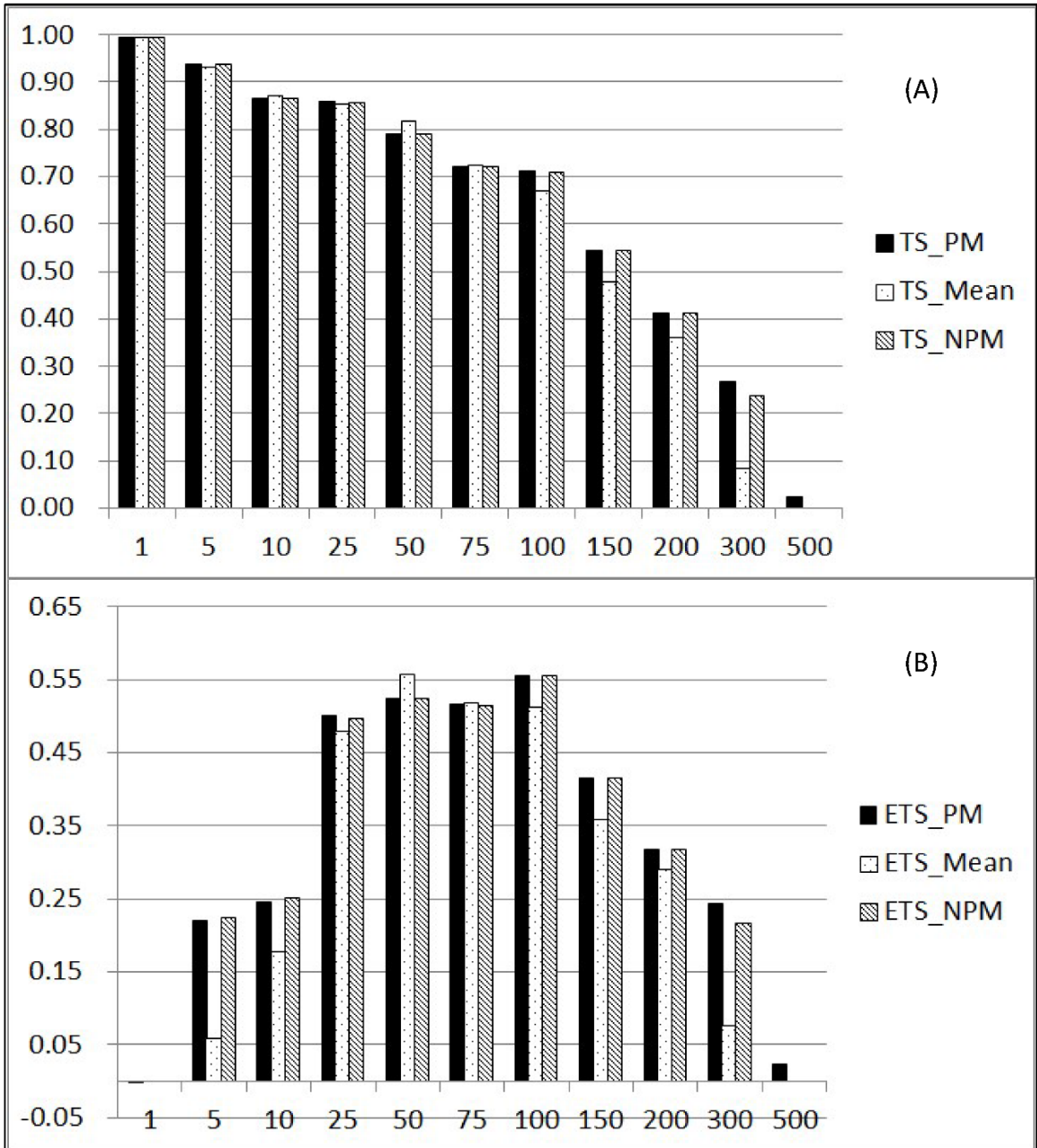


圖 8 模式初始時間為 2013 年 7 月 12 日 0000UTC 之 12-24hQPF (A)TS 得分 (B)ETS 得分。橫軸為雨量門檻值 (單位為毫米)，黑色直條為 PM，白色點狀直條為系集平均，虛線直條為 NPM。

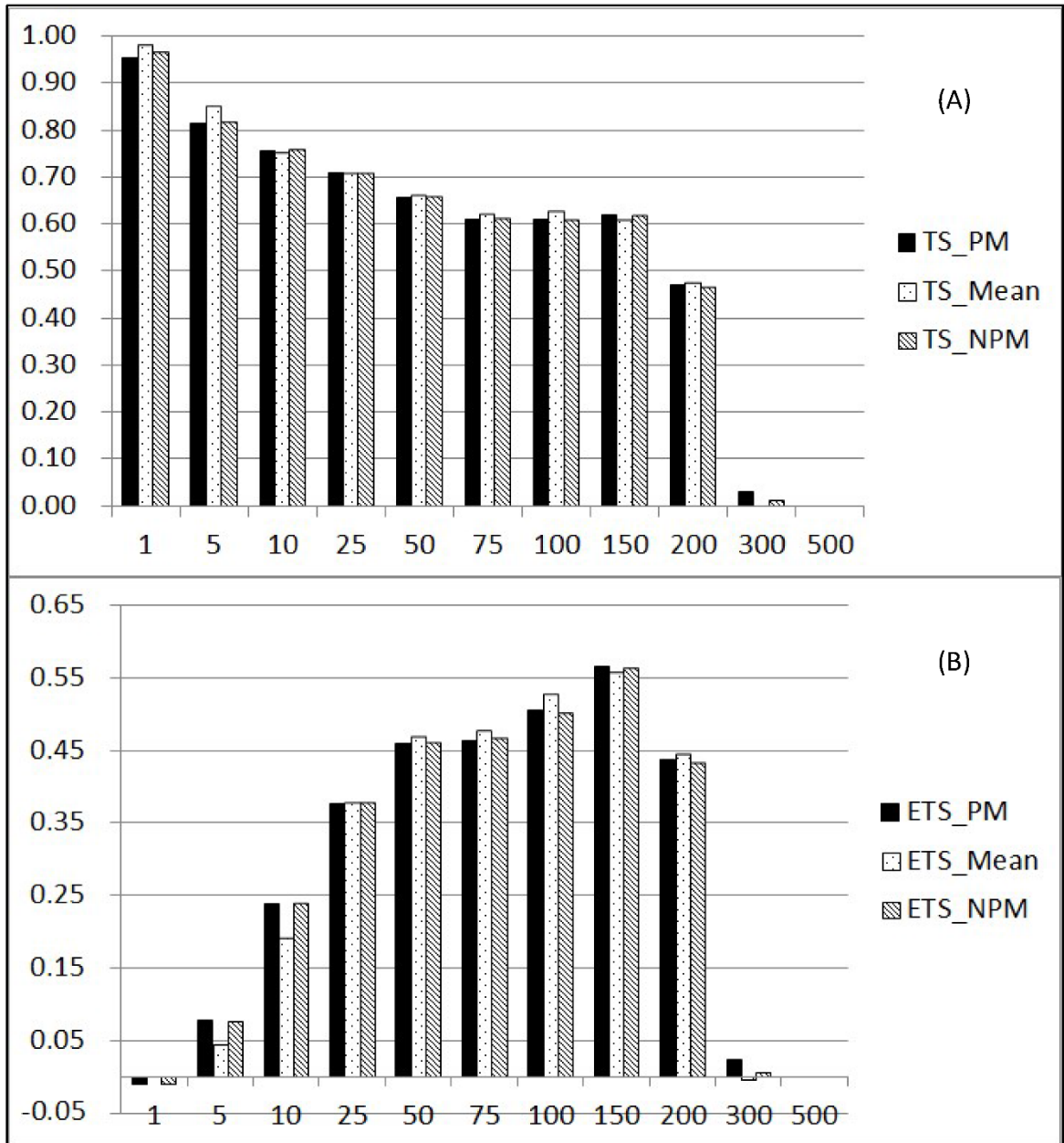


圖 9 模式初始時間為 2013 年 7 月 12 日 1200UTC 之 12-24hQPF，其他說明同圖 8。

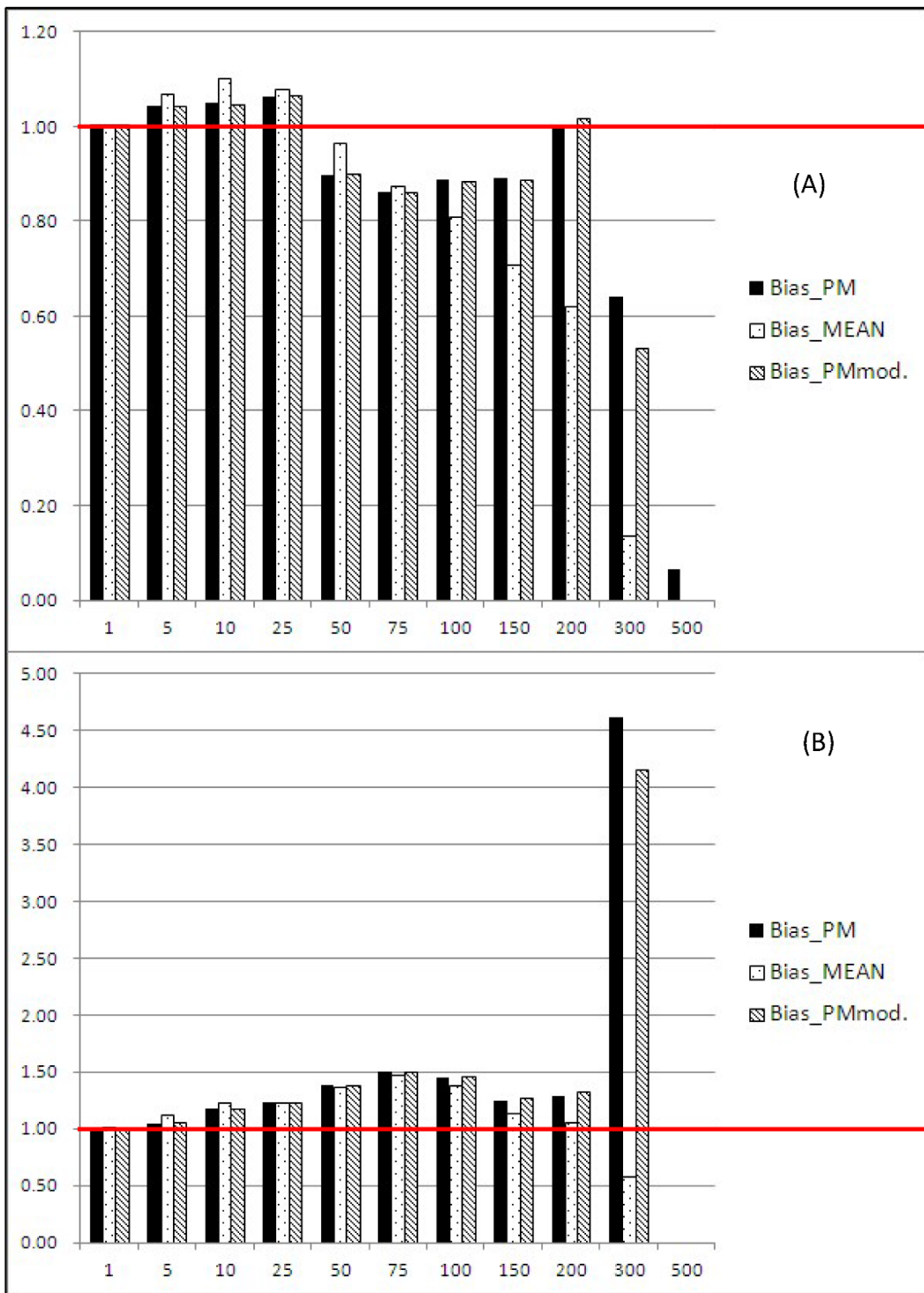


圖 10 (A)模式初始時間為 2013 年 7 月 12 日 0000UTC 之 12-24hQPF，橫軸為雨量門檻值（單位為毫米），黑色直條為 PM，白色點狀直條為系集平均，虛線直條為 NPM。BS = 1 為圖中紅色直線所在的位置。(B)模式初始時間為 2013 年 7 月 12 日 1200UTC 之 12-24hQPF，其他說明同(A)。

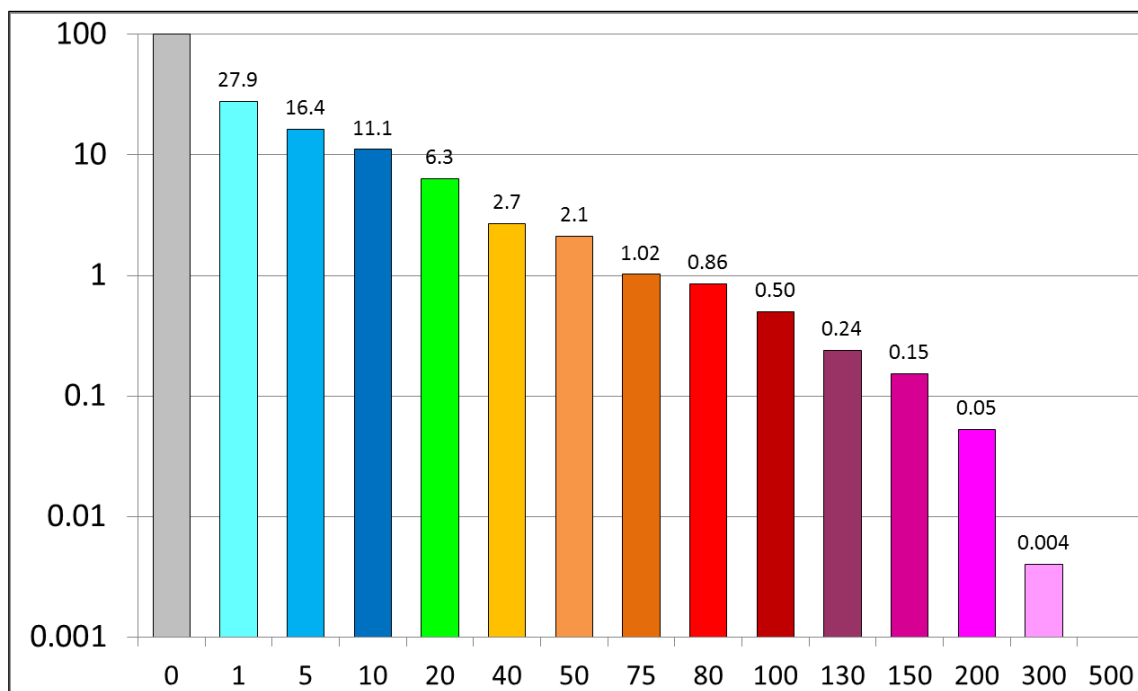


圖 11 2015 年 5~6 月 12 小時累積雨量之樣本累積數目百分比，共 122 筆預報時間。縱軸為百分比 (%)，對數座標，橫軸代表不同雨量門檻值 (單位為毫米)，圖中數字代表該雨量門檻所占之樣本百分比。

的 TS 在 1 毫米時皆有 0.5 以上，隨著雨量門檻值逐漸遞減，至大雨時 (50 毫米) 12 小時前的預報還可達 0.2 以上，100 毫米雨量在 12 小時前的預報則為 0.18；從 ETS (圖 12B) 則顯示系集平均在 1 毫米時 7 個預報時間皆有 0.3 以上，至大雨時 (50 毫米) 12 小時前的預報也可超過 0.2，100 毫米雨量在 12 小時前的預報則為 0.18。大致而言 TS 與 ETS 技術得分隨預報時間越接近實際觀測時間而增加，尤其是較大雨量之預報技術；以兩者在 100 毫米雨量的技術得分為例，12 小時 QPF 預報技術可達 0.18 左右，24 小時降低至 0.06，36 小時以上則無預報技術。造成這結果的原因主要有二：一是隨著預報時間越接近，模式對於天氣系統的預報度也逐漸改善使預報技術提高，二是系集系統的離散度常隨預報時間縮短而減低，因此降雨的掌握度會逐漸提高，尤其是對於強綜

觀系統主導之 QPF，離散度降低使系集平均導致 QPF 平滑的效應會減低而提升技術。從以上資訊代表系集平均對於中小雨 (小於 50 毫米) 掌握度不錯，但大雨的預報技術則稍嫌不足，尤其隨著預報時間遞減趨勢顯著。NPM (圖 13A 和圖 13B) 與 PM (圖 14A 和圖 14B) 的 TS 與 ETS 隨雨量門檻變化的趨勢也和系集平均有些類似，比較不同的地方在於 NPM 和 PM 隨著預報時間的變化；兩者在 30 小時前的預報，極端降雨 (例如 100 毫米) 兩種技術得分皆可達 0.15 以上，甚至可預報到 200 毫米的降雨，顯示 PM 與 NPM 相對於系集平均在較長預報時間的雨量預報有更大的優勢，而當預報時間縮短時，系集預報的離散度亦逐漸降低，因此系集平均的技術得分仍會逐漸提升，但對大雨量的預報技術提昇仍有限。相較於系集平均，NPM 與 PM 對小雨的預報技術相

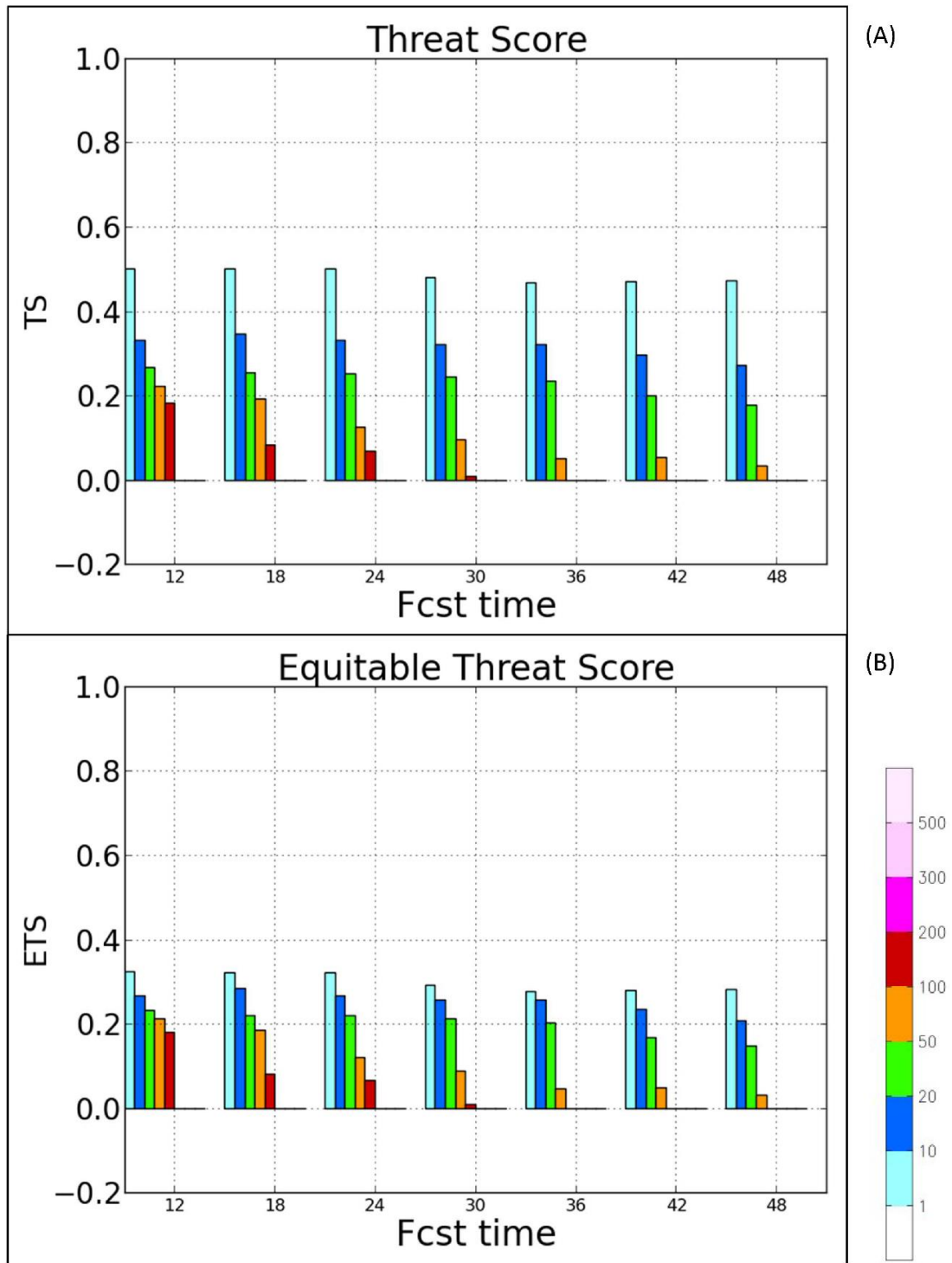


圖 12 2015 年 5~6 月 12 小時累積雨量之系集平均 TS (A) 得分與 ETS (B) 得分。縱軸為各種校驗得分，橫軸代表 12 小時前，18 小時前...至 48 小時前的模式初始時間對該段校驗時間的預報，彩色直條代表不同雨量門檻值（單位為毫米）。

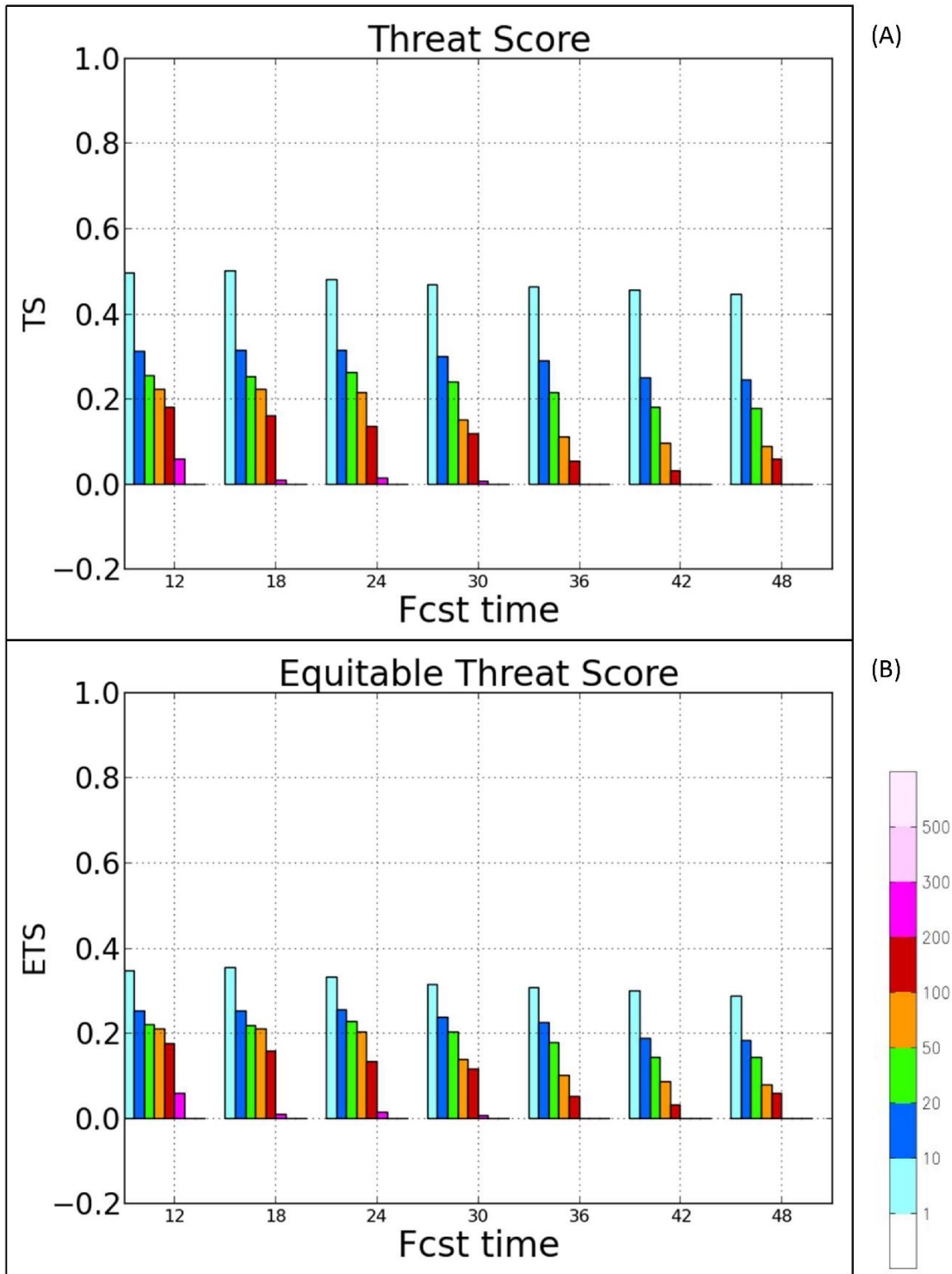


圖 13 2015 年 5~6 月平均之 NPM TS (A) 得分與 ETS (B) 得分。圖說同圖 12。

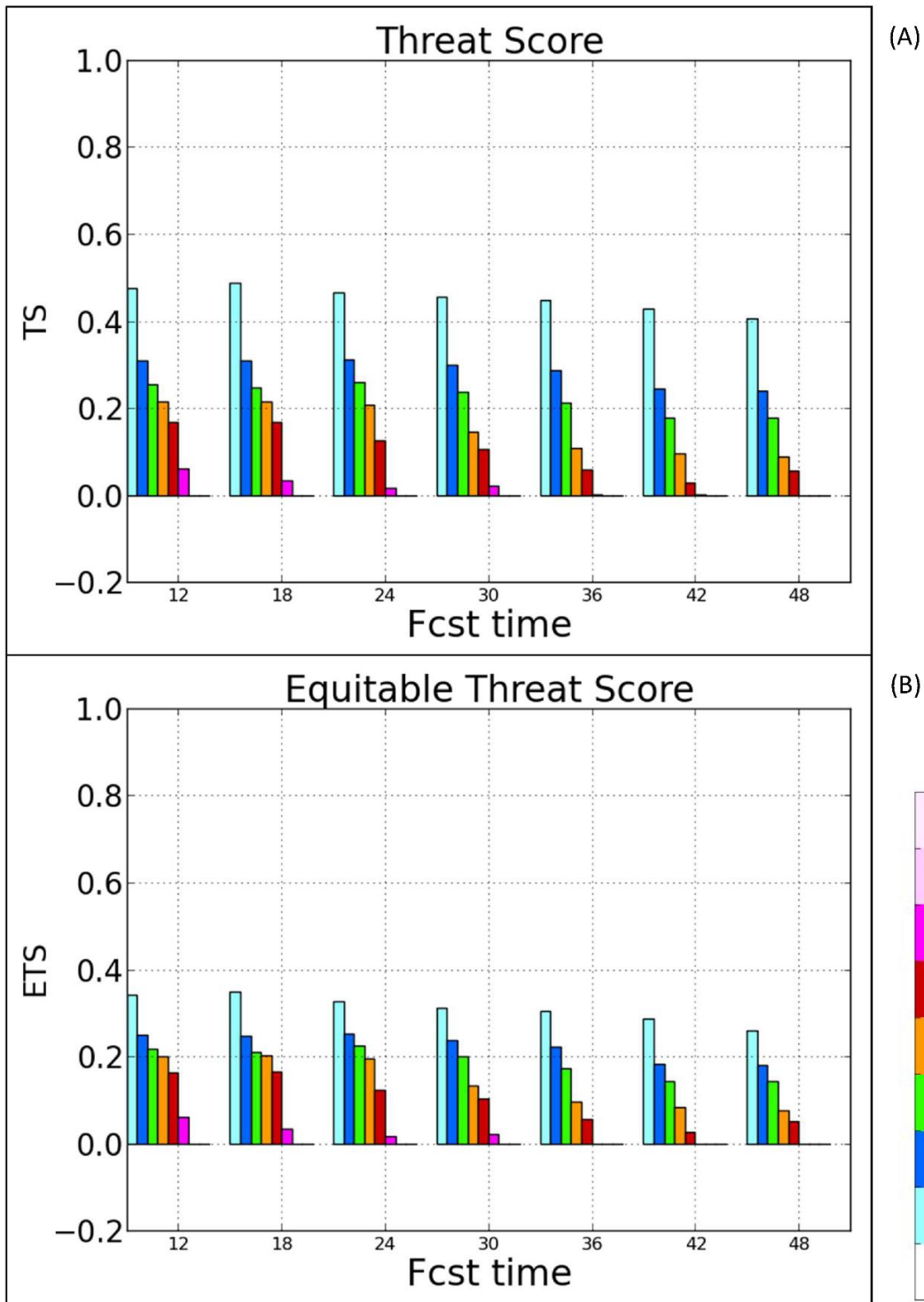


圖 14 2015 年 5~6 月平均之 PM TS (A)得分與 ETS (B)得分。圖說同圖 12。

當，但大雨以上的預報技術明顯提升。而 PM 與 NPM 對小雨量的預報技術相近，對大雨之預報技術則互有優劣，但就極端降水事件 PM 的 TS 與 ETS 稍高於 NPM。值得注意的是，2015 年梅雨季的統計校驗 TS 及 ETS 技術得分明顯低於蘇力颱風之校驗，主要原因是梅雨造成的雨量規模明顯小於颱風，如圖 11 顯示 200 及 300 毫米雨量之觀測面積僅占 0.05% 及 0.004%。實際上，2015 年僅有一個較顯著的梅雨個案發生在 5 月 20 日至 27 日間，因此超過 200 毫米以上高門檻的 QPF 預報技術因發生的頻率低且發生時的預報及觀測之面積偏小而不宜產生交集，最終導致降雨技術較低。

7 個預報時間 3 種統計方法的預報技術，因預報表現雷同，故以 24 小時前的預報（圖 15）作為代表，並與 WRF 決定性預報(WRFD, Hsiao 2015)一起做比較。WRFD 與 WEPS 是完全一樣的模式設定，差別在 WEPS 有加入初始場，邊界場與模式的擾動。從各雨量門檻之預報技術預兆得分 TS 顯示系集平均、NPM 與 PM，於中小雨系集平均的預報表現（TS 得分 1 毫米為 0.5，20 毫米為 0.25）略優於 NPM（TS 得分 1 毫米為 0.48，20 毫米為 0.28）與 PM（TS 得分 1 毫米為 0.45，20 毫米為 0.28）；但對公正預兆得分 ETS 而言，PM 與 NPM 反而略優於系集平均。大雨則是 NPM 與 PM（兩者 50 毫米 TS 得分皆為 0.21）較系集平均（50 毫米 TS 得分為 0.15）較優，極端降雨則是 PM（100 毫米 TS 得分為 0.14）與 NPM（100 毫米 TS 得分為 0.15）不相上下；ETS 對於大雨之趨勢與 TS 相同。相對於決定性預報 WRFD 之預報技術（TS 得分 1 毫米為 0.45，20 毫米為 0.25，50 毫米為 0.18，100 毫米為 0.12），系集平均 QPF 對於中小雨的預報能力的確能提升，但對

於極端雨量之預報技術卻可能低於決定性預報，因此系集平均並不適合做為系集預報系統之最佳 QPF；機率擬合方法（PM 或 NPM）才能提升系集預報系統由小雨至大雨之整體 QPF 技術。

實際上比較圖 15 的 TS 與 ETS 得分可以發現，當雨量偏小時，TS 與 ETS 的差異很大，但當雨量大於 50 毫米以上，其值則趨於一致。主要是因為 a_r 定義為隨機預報之影響，當預報或觀測面積明顯小於校驗面積時，其值是可以被忽略的。因此考慮同一個降雨事件、不同門檻的降雨 TS 及 ETS 得分發現，TS 及 ETS 得分雖然在小雨量得分有顯著差異；當雨量達到一定門檻使降雨面積明顯變小後，除因觀測與預報不易交集而導致得分容易變小外， a_r 也會逐漸減小到可以忽略，因此 TS 與 ETS 會相互趨近。所以 TS 及 ETS 得分與降雨門檻及降雨規模有很大的相關，Wang (2015) 也指出，模式在颱風可得到很高的技術得分，是因颱風所造成的降雨規模大且雨量極值高。因此以相同的 200 毫米門檻來看，對於梅雨通常是極端降雨，而對於颱風而言卻並不是如此，導致其得分會有明顯差異。

一般而言，TS 代表的是預報範圍與觀測範圍之交集與聯集比例，而 BS 代表的是預報範圍與觀測範圍之比例，當 BS 大於 1 表示過度預報，小於 1 則是低估，在預報的觀點上，最佳的雨量預報除了追求較高的 TS 與 ETS 分數以外，其偏差應該要接近於 1，因為 BS 代表任一雨量預報門檻與觀測雨量所代表的降雨面積之比例。由三種統計方法的 BS 得分（圖 16），系集平均的 BS 隨預報門檻增加而逐漸降低，圖上顯示為傾斜的分布，代表在低雨量門檻時，預報區域明顯較觀測區域大，1 毫米之偏差可達 1.5 以上；中小雨（10 毫米、20 毫米）門檻接近於 1；但超過 50 毫米以

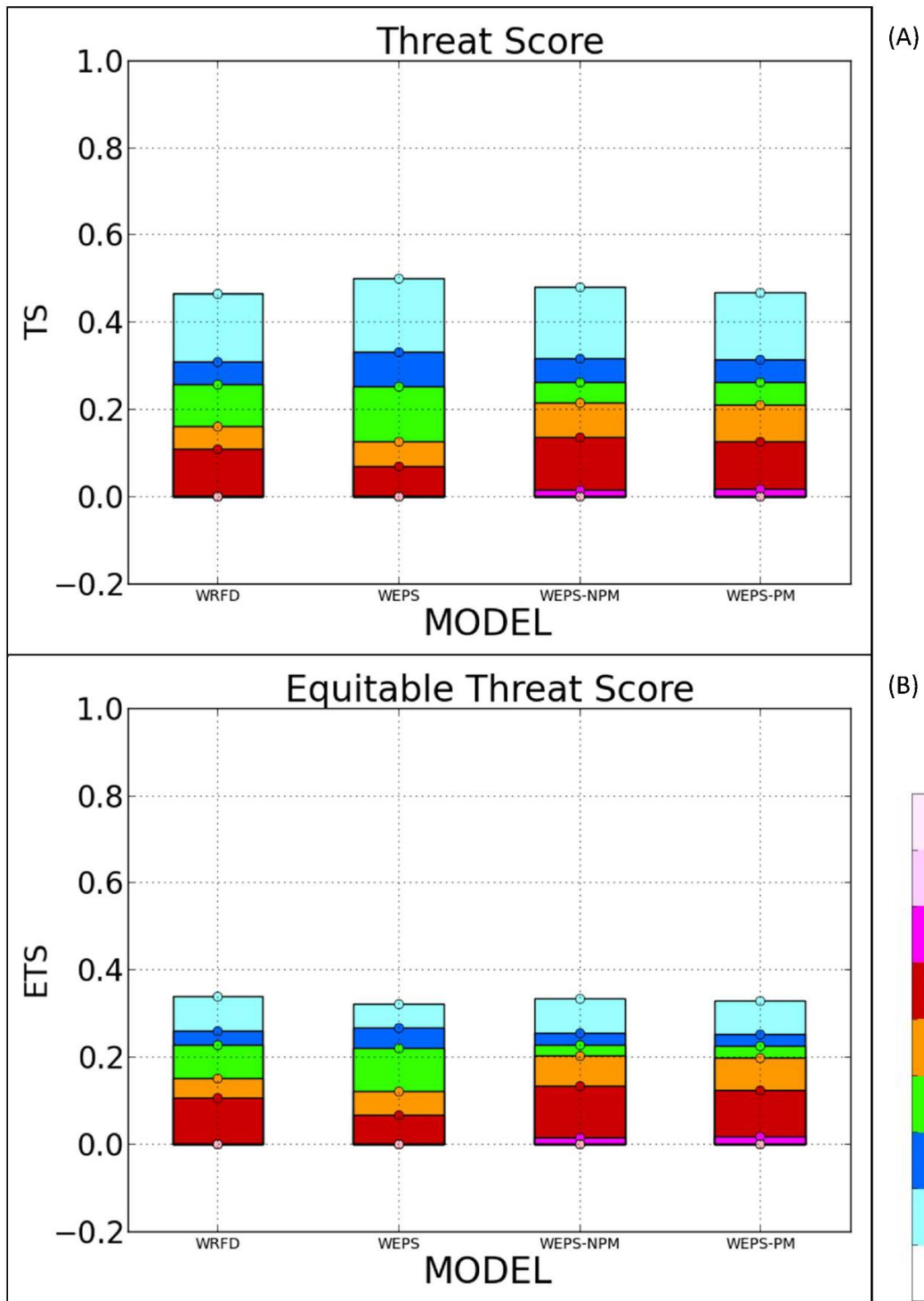


圖 15 24 小時前的模式初始時間對 2015 年 5~6 月 12 小時累積雨量之平均 TS (A) 得分與 ETS (B) 得分，縱軸為各種校驗得分，橫軸代表不同模式預報，依序為 WRFD、WEPS (MEAN)、NPM、PM。彩色直條代表不同雨量門檻值 (單位為毫米)。

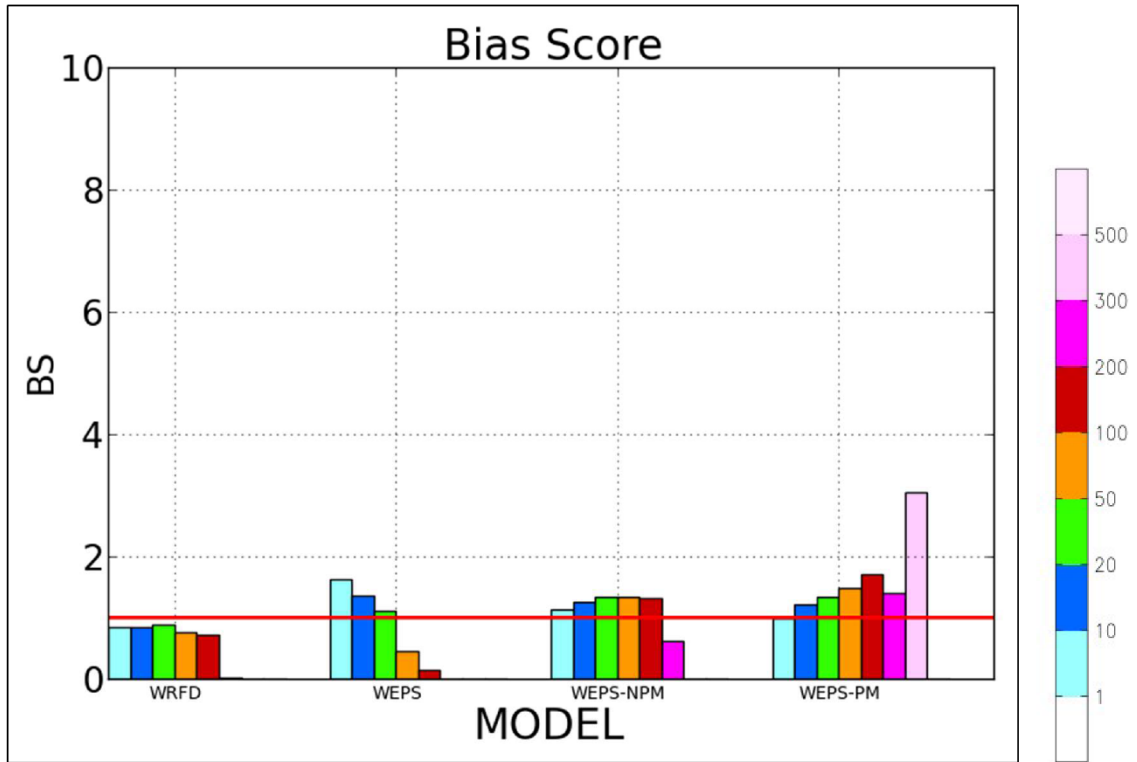


圖 16 24 小時前的模式初始時間對 2015 年 5~6 月 12 小時累積雨量之平均 BS 得分，圖說如圖 15。

上的大雨量門檻 BS 迅速下降，表示對於極端雨量之預報範圍明顯偏小；故長期統計而言，系集平均有對小雨高估但大雨低估的特性；由 WRFD 的 BS 顯示，以決定性預報而言，1 毫米至 50 毫米之 BS 約 0.9，而 100 毫米之 BS 仍有 0.8，顯示 WRFD 之 QPF 略低估雨量，但與實際觀測之偏差並不大，因此單一的決定性預報並不似系集預報系統之平均 QPF 具有小雨高估且大雨低估之特性。圖 16 亦顯示機率擬合之 PM 與 NPM 皆可以修正系集平均的 BS 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。綜合系集平均之 TS、ETS 及 BS 特性發現，系集平均在中小雨有稍高的 TS 及稍低的 ETS 之主要原因是建立在預報範圍偏大的緣故。另一方面，由於 PM 擬合整體系集之降雨頻率分布，因此常可以預報

到更極端如 300 毫米以上的區域（但 TS、ETS 無得分），但由 BS 之分析顯示其面積有明顯高估的傾向，預報面積超過實際觀測面積 3 倍（BS 得分為 3），不只是 BS 顯示如此，在實際預報作業上，也常發現 PM 對於極端降雨之量值之預報經常高估，雖然 PM 對於極端降雨有較佳的 TS 或 ETS，但因其誤報率明顯偏高，導致預報上的限制；修正的 NPM 較無 PM 高估 QPF 的情形，預報最為中性（100 毫米 BS 得分為 1.2，200 毫米 BS 得分為 0.7）；由於極端降雨的範圍原本就很小，PM 具有較高的 TS 與 ETS 主要原因是過度預報極端降雨的面積，因此容易與觀測有交集而得分，NPM 對於極端雨量面積之中性預報反而不易與觀測有所交集。整體來說，NPM 雖不如 PM 於極端降水的技術得分，但 NPM 仍不失其預報極值的能力，

且可以減少部分系集成員過度預報的影響，預報最為中性，因此是本研究對於定量降水預報上建議的最佳指引。

結論

一個完備的系集預報系統除了可以提供機率和不確定性資訊（如透過機率預報產品）外，通常也可以產生優於任一成員的單一預報（簡等，2005）。對於一般連續性的變數，系集平均或中位數等簡單的統計方法通常可做為其單一預報的基準，但對於定量降水預報(Quantitative Precipitation Forecast, QPF)的問題，系集平均雖然對於中小雨之預報技術亦常優於決定性預報，但由於極端的降雨過程常與中尺度之對流有關，具有局部性及不連續的特性，因此其分布在時間、空間及系集的3個維度上並非連續的變數，平均會將各成員預報之極值平滑而導致低估降雨。Ebert (2001)首先提出 PM 的概念，這個方法的 QPF 取用系集平均之相對空間分布，但降雨頻率分布則為所有系集成員之總降雨頻率分布。氣象局於定量降水預報作業上使用 WEPS 產生 PM，發現這個方法有效提高系集 QPF 極值的頻率，同時也將小雨頻率的分布降低，對於大雨的預報技術明顯提升，小雨的預報技術則與系集平均相當，但另一個衍生的問題是 PM 對於極端雨量常有過度預報。

為了解決 PM 容易過度預報的缺點，本研究提出修正的 NPM 方法。理論上，完善的系集預報系統之重要特性是可以正確描述預報過程中的不確定性，因此降雨真值本應包含在系集預報系統之不確定中。因此，若不考慮系集預報系統的偏差時，降雨極值的真值也應該包含在各系集成員的 QPF 極值中，但因極端降雨多與中尺度天氣有關，具有局部及不連續的特性，因此 NPM 系集

QPF 方法基於 PM 的概念，使用系集平均之空間分布，但降雨頻率修正為各成員降雨頻率之系集平均，因此對 NPM 而言其 QPF 極端值即是各系集成員之極端值的系集平均。NPM 產生的 QPF 極值介於系集平均及 PM 之間，而小雨的降雨頻率分布特性則與 PM 相似，因此可修正 PM 之極值過度預報的缺點。

本研究針對蘇力颱風個案的測試中，發現相較於系集平均，NPM 或 PM 均可提高 QPF 之 TS 及 ETS，尤其是在大雨；但中小雨的預報技術仍是系集平均較好。從系統性統計分析結果，12 小時累積雨量 25 毫米之系集平均、PM 與 NPM 之 QPF 預報技術 TS 與 ETS 皆可近於 0.2。小於 50 毫米時 3 種預報方法的預報技術相當，大於 50 毫米則是 PM 與 NPM 的預報技術較佳，100 毫米以上除最近的預報時間外，系集平均 QPF 幾乎沒有預報技術(TS 與 ETS 皆小於 0.1)，但 PM 與 NPM 的 TS 和 ETS 皆可達 0.2；PM 對於 50 毫米以上的預報技術大致優於 NPM，但 BS 也明顯偏大，故 PM 雖然可以預報到比較極端的降水極值，但降水誤報的情形也更加顯著。而 NPM 則與 PM 同樣可保留系集成員預報極值的能力，但可改善 PM 過度預報的情形。

整體而言系集平均 QPF 對於中小雨的預報能力(TS 或 ETS)的確能明顯提升，但對於極端雨量之預報技術卻可能低於決定性預報，因此系集平均並不適合做為系集預報系統之最佳 QPF，尤其對於極端降雨之預報，系集平均之預報技術甚至常不如決定性預報；由系集預報系統發展之原理與本研究針對 2015 年梅雨季校驗的結果發現，機率擬合方法(PM 或 NPM)才能真正提升系集預報系統小雨至大雨之整體 QPF 技術。尤其由預報偏差 BS 的觀點來看，系集平均容易過度

預報小雨的面積，但明顯低估大雨的面積；機率擬合方法可修正此缺陷，提高大雨預報的能力，但 PM 方法容易高估極端降雨之量值及範圍，因此雖然 PM 對於極端降雨具有較高的技術得分，但通常是建立在過度預報降雨範圍的基礎上；而修正後的 NPM 方法較為中性，對於極端降雨之估計亦屬合理，為本研究建議最適當當作系集預報系統的最佳解。

本研究針對氣象局作業用的系集預報系統產生之系集平均、PM 及 NPM 方法，首先由系集預報系統之設計概念，探討理想上系集預報系統對於產生最佳定量降水預報的原理，並以 2015 年梅雨季進行系統性的研究，提供一般作業及統計上之適用特性。由於本研究探討的 WEPS 為作業之系集預報系統，因此並不能針對每次的預報或個案進行最佳化的調整，因此將系集預報產品應用於官方預報作業的定量降水預報時，仍可能因為模式初始資料分析、動力模擬特性、最近誤差特性或不同天氣個案等，導致主觀預報可能選取不同的產品或方法，未來工作將針對不同類型的個案，如颱風、梅雨、夏季午後雷陣雨或冬季降水特性進行不同天氣系統之校驗，以提供預報員在更多狀況下的應用。另一方面將由 QPF 產品與實際 QPE 之降雨頻率建立線性回歸方程，進而發展 QPF 的校正技術；或針對任一系集成員 QPF 之降雨頻率進行校正，最後使用本研究的統計方法產生系集之 QPF。需要注意的是 PM 或 NPM 方法雖然可以透過系集降雨頻率之重新分配而校正其偏差，但如何選取其計算的範圍有時也會影響計算結果，尤其是在選定的區域內的降雨因為空間內不同天氣系統，或因不同時間發展導致的降雨系統，偶爾可能導致降雨頻率重新分配時的錯置。蘇等(2016)的文章中將計算的區域侷限於台灣本

島陸地便是為了減少此問題帶來的影響。本研究未來則將依據天氣系統之時空尺度，選取不同分區進行 PM 或 NPM 運算，最後再將其擬合產生新的定量降水預報。而另一方面，PM 或 NPM 方法對於空間之相對分布之校正目前並無較佳的解決方案，未來將透過氣候統計的方式來發展的空間的校正技術，或由系集預報系統本身之進步，如動力過程、物理過程、時空解析度、初始資料同化過程之改進及觀測資料之增加仍是最重要的關鍵。

致謝

感謝中央氣象局衛星中心提供雷達降水估計 QPESUMS 產品，使本研究得以進行定量降水預報之校驗。

附錄

1. PM (Probability-matched mean)

假設此系集預報系統，包含 3 個系集成員，且每個成員有 9 個格點值。

Model 1		
0mm	0mm	1mm
0mm	2mm	9mm
0mm	5mm	50mm

Model 2		
7mm	31mm	5mm
17mm	60mm	55mm
12mm	10mm	8mm

Model 3		
0mm	1mm	5mm
0mm	5mm	30mm
0mm	1mm	7mm

I. 計算系集平均，並進行格點預報值排序。表中之黑字為各網格點之系集平均，紅字為排序值。

Grids MEAN		
2.3mm 9	10.7mm 4	3.7mm 8
5.7mm 5	22.3mm 2	31.3mm 1
4mm 7	5.3mm 6	21.7mm 3

II. 將所有成員之所有格點進行排序，此例子中需進行 27 個格點之排序。並將排序完之預報值依照成員個數進行分組。此例子因有三個系集

成員，因此每三個預報值為一組。(附表 A)

III. 每組取中位數，並按照大小(組別)，填入已排序的格點上(I 步驟的排序)。此雨量值即為 PM 雨量產品。故 PM 保留了系集平均的降水分布與系集成員的預報極值。

PM		
0mm 9	7mm 4	0mm 8
5mm 5	31mm 2	55mm 1
1mm 7	2mm 6	10mm 3

2. NPM (New PM)

I. 進行系集平均並排序(同 PM 的 I 步驟)。

II. 將 3 個系集成員各自的格點進行排序，此例子中每個系集成員需進行 9 個格點之排序，共 27 個格點。(附表 B)

附表 A

Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Forecast	60mm	55mm	50mm	31mm	30mm	17mm	12mm	10mm	9mm
組別	1			2			3		
Rank	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Forecast	8mm	7mm	7mm	5mm	5mm	5mm	5mm	2mm	1mm
組別	4			5			6		
Rank	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Forecast	1mm	1mm	0mm	0mm	0mm	0mm	0mm	0mm	0mm
組別	7			8			9		

附表 B

Model 1									
RANK	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Forecast	50mm	9mm	5mm	2mm	1mm	0mm	0mm	0mm	0mm

Model 2									
RANK	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Forecast	60mm	55mm	31mm	17mm	12mm	10mm	8mm	7mm	5mm

Model 3									
RANK	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Forecast	30mm	7mm	5mm	5mm	1mm	1mm	0mm	0mm	0mm

附表 C

Rank MEAN									
RANK	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Forecast	46.7mm	23.7mm	13.7mm	8mm	4.7mm	3.7mm	2.7mm	2.3mm	1.7mm

- III. 將每個系集成員依照排序的格點預報值進行平均，並再一次進行排序。此例子中需進行排序第 1 至排序第 9 各自的格點預報值平均，再進行排序。(附表 C)
- IV. 按照格點值大小，填入已排序的格點上 (I 步驟的排序)。此雨量值即為 NPM 雨量產品。

NPM					
1.7mm	9	8mm	4	2.3mm	8
4.7mm	5	23.7mm	2	46.7mm	1
2.7mm	7	3.7mm	6	13.7mm	3

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。
- 、——，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。
- 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》，尚在審查中。

- 曹嘉宏、洪景山，2011：系集模式颱風定量降水：個案研究。《建國百年天氣分析預報與地震測報研討會論文集編》，中央氣象局，278-282。
- 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。《天氣分析與預報研討會》，143-146。
- 黃椿喜、洪景山、葉世瑄、呂國臣，2014：從定量降水預報、定量降水機率預報到機率定量降水預報，《天氣分析與預報研討會論文集摘要彙編》，A6-1。
- 葉世瑄、林沛練、洪景山、黃椿喜，2014：機率擬合之系集定量降水預報後處理方法，《天氣分析與預報研討會論文集摘要彙編》，A6-6。
- 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。
- 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.
- Leith, C. E., 1974: Theoretical skill of Monte Carlo forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **102**, 409-418.
- Lorenz, Edward N., 1963: Deterministic Nonperiodic Flow. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 130-141.
- , ——, 1965, A study of the predictability of a 28-variable atmosphere model. *Tellus*, **17**, 321-333.
- , ——, 1969, Atmosphere predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*, **21**, 289-307.
- Wang, C.-C., 2015: The more rain, the better the model performs—The dependency of quantitative precipitation forecast skill on rainfall amount for typhoons in Taiwan. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1723-1748.
- Zhou, B., J. Du, 2010: Fog prediction from a multi-model mesoscale ensemble prediction system. *Wea. Forecasting*, **25**, 303-322.

Modified Probability Matched Mean QPF of the Ensemble Prediction System

Shih-Husan Yeh¹ Pay-Liam Lin¹ Jing-Shan Hong² Treng-Shi Huang³

¹National Central University, Taoyuan, Taiwan

²Meteorology Information Center, Central Weather Bureau

³Meteorology Forecast Center, Central Weather Bureau

(manuscript received 24 November 2015 ; in final form 9 March 2016)

ABSTRACT

A complete ensemble prediction system is interpreted by 3 factors, i.e. deterministic solution, spread, and probability. For a continuous variable, ensemble mean is usually the best solution. It is not, however, for Quantitative Precipitation Forecast (QPF) because ensemble mean gets only higher scores for small to medium precipitation but not for the heavy or extreme precipitation. A effect makes a smoothing QPF when averaging among the ensemble dimension. Ebert (2001) thus proposed a solution, probability matched mean (PM), for this problem. PM takes the relative special pattern of ensemble mean, but resamples the mean frequency as the frequency of the ensemble itself regardless of the special and ensemble dimension. Using PM on the WEPS in CWB, we found it over-predicts heavy to extreme QPF a lot because the nature of PM tends to match the maximum value of the ensemble system.

The authors thus propose a NPM (new PM) method modified from PM. As the way to make PM, NPM takes the relative special pattern as ensemble mean, and resamples the mean frequency as frequency averaging from members' frequency. We make this assumption because the truth for a well-defined ensemble system is usually covered in the ensemble dimension. We thus assume the maximum precipitation is covered in members' maximum QPF as well.

In this study, threat score (TS), equitable threat score (ETS) and bias score (BS) are introduced to verify the ensemble system. Both for case study during Typhoon Soulik (2013) and for statistics of May and June 2015 which is defined as meiyu season in Taiwan, it is found both TS and ETS of ensemble mean QPF are slightly better for light to medium threshold on QPF as compared to PM, NPM and deterministic WRFD as well.

However, it loses its skill or has no skill for heavy to extreme QPF threshold. PM gets both the highest TS and ETS for heavy or extreme rainfall, but its BS increases to 4 or higher for extreme rainfall forecast as well, which means PM overestimates heavy to extreme rainfall threshold for 4 times over above to observation. The performance of NPM has similar characteristics to PM except for the extreme cases. NPM keeps a higher performance on heavy rainfall and reduces the weakness of overestimating extreme rainfall as compared to PM. Based on this result, we would suggest NPM but not ensemble mean or PM as the best solution on QPF for the ensemble system.

Key Words: EPS (Ensemble Prediction System), QPF (Quantitative Precipitation Forecast), PM (Probability-matched mean), NPM (New PM)

