

系集機率擬合平均定量降水預報產品之分析： 以 2014 年梅雨季為例

蘇奕勸 洪景山 李志昕

中央氣象局

(中華民國一〇四年十一月二十一日收稿；中華民國一〇五年五月三十一日定稿)

摘 要

系集預報的目的是要包含預報的不確定性，以補單一模式預報的不足；然而，如何從龐大的系集預報資料中產製有用的預報產品，此為重要的課題。

本研究評估以中央氣象局區域系集預報系統為基礎所發展之機率擬合平均(Probability Matched Mean, PMM)降水產品的特性與預報表現。研究結果顯示 PMM 定量降水預報產品，可有效改善系集平均定量降水預報對大雨低估的情形，並且有比決定性預報更高的可預報度。然而，校驗結果亦顯示 PMM 降水產品對大雨有過度預報的情形，此一現象無法經由機率擬合方法之修正而獲得足夠的改善，顯示對於大雨過度預報情形為模式本身的系統性偏差所致。此外，為因應不同氣象資料使用者的需求，可發展出不同累積區間的 PMM 產品，但分析顯示使用較短累積區間的 PMM 加總成較長時間的定量降水預報會強化大雨的極值，此一現象隨著累積區間之縮短而更為明顯。

關鍵字：機率擬合平均、系集預報

一、前言

定量降水預報(Quantitative Precipitation Forecast, QPF)是數值天氣預報最大的挑戰之一，大氣中水氣相位變化的過程及其與大氣熱力、動力過程的交互作用，無論是在觀測，或是模式解析度的限制以及物理參數法的不確定性等，都使得數值模式的定量降水預報充滿不確定性。也因此，為了彌補觀測和模式技術的限制，系集預報系統的發展以及系集定量降水預報產品的研發成為近年來重要的研究課題。

現今國際各主要的數值天氣預報中心，不論就全球模式或區域模式，莫不極力發展系集預報系統(Du et al. 2004; Eckel and Walters 1998; Buizza et al. 1999a; Molteni and Buizza 2001; Carolyn and Junichi 2015)。如歐洲氣象中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的全球系集預報系統(Molteni et al. 1996)，水平解析度為 T639，垂直分層為 62 層，共 51 個成員(Shutts et al. 2011)；美國國家環境預報中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的全球系集預報系統水平解析度為 T254，共 21 個系集成員提供 16 天的預報(Tracton and Kalnay 1993; Stensrud et al. 1999; Carolyn and Junichi 2015)，以上系集產品在中央氣象局颱風路徑預報作業上均扮演重要的角色。

在區域系集預報系統方面，例如 NCEP 利用多模式的預報，發展 SREF (Short Range Ensemble Forecast, Du et al. 2004)系統以提供美國中尺度天氣系統預報不確定性之相關資訊。中央氣象局亦致力於區域系集預報之發展，李和洪(2011, 2014)針對系集成員產生方式進行一系列的評估，並據以建立了一套以 WRF 區域模式為基礎之系集預

報系統(WRF Ensemble Prediction System, WEPS)，期望涵蓋可能之預報不確定性，並嘗試從大量系集預報資料中發展出可信度高的預報指引。例如，黃等人(2014)介紹近年來中央氣象局在實際預報作業上使用系集定量降水預報、定量降水機率預報到機率定量降水預報的現況。Hong et al. (2015)則從大量系集定量降水預報資料中，利用給定的颱風路徑，篩選出適當的系集樣本，發展出所謂的系集颱風定量降水預報(Ensemble Typhoon Quantitative Precipitation Forecast, ETQPF)技術，此一 ETQPF 產品在臺灣颱風定量降水預報作業與防災應用上均扮演重要的角色。

在一個好的系集預報系統中，每個系集預報成員都代表一種可能性，每個成員對於真值的預報命中率都是相同，因此系集平均不一定會是最佳的(Zhou et al., 2005)。但是，如果系集成員的預報呈現高斯分布，那麼系集平均會是發生機率最大的結果，這在溫度場的預報尤為明顯。而相對於單一預報，系集平均往往可以提供更準確的預報結果(Du et al. 1997; Buizza and Palmer 1998)。例如，簡等(2005)針對台灣地區 2003 年梅雨季進行系集降水預報實驗，結果顯示系集平均相對於單一決定性預報有較佳的技術得分。

然而在定量降水預報上，雖然系集平均往往能得到不錯的降水分布，卻常有極值低估的問題(Tracton and Kalnay 1993; Ebert et al. 2001; Zhou et al. 2005; Fang and Kuo 2013)。針對此問題，Ebert et al. (2001)利用系集定量降水預報資料，發展出機率擬合平均(Probability-Matched Mean, PMM)降水產品，在系集平均的基礎上，藉由重新分配系集降水頻率分布，而能維持 PMM 降水的極值。Fang and Kuo (2013)微調 PMM 降水的產製方法，進一步結合高解析度和低解析度的系集定量降水

預報，並引進偏差修正方案，其結果可大幅改善地形上的定量降水預報能力。葉等(2014)也發展新的 PMM 方法，藉由調整系集降水頻率分布的方法，以求降低 PMM 降水過度預報的現象。目前美國 NCEP (Hamill et al. 2013)、澳洲氣象局 (Ebert et al. 2001)及中國氣象局等已發展 PMM 產品並在作業中使用。

本研究主要是參考 Ebert et al. (2001)方法，使用中央氣象局區域系集定量降水預報資料發展 PMM 降水產品，並評估其預報效能，及其於預報上應用的狀況。第二節簡要介紹中央氣象局區域系集預報系統和 PMM 降水的原理，第三節說明校驗的方法，第四節為結果分析，最後則是結論。

二、系集預報系統與機率擬合平均降水介紹

(一) 系集預報系統介紹

中央氣象局區域系集預報系統(WRF Ensemble Prediction System, WEPS)包含三層巢狀網格，模式水平解析度為 45/15/5 km (如：李和洪 2014)，垂直解析度 45 層，模式頂層為 30 hPa。

WEPS 由 20 組系集成員組成，使用了初始擾動、邊界擾動和模式擾動。初始擾動來自中央氣象局決定性區域預報系統 (以 WRF_D 表示) 所提供之六小時預報場，再透過 WRF 三維變分法加入隨機亂數，產生 20 組擾動初始場；邊界擾動則是由 NCEP 全球系集預報系統(NCEP GEFS)提供解析度為 0.5°之擾動邊界條件；而模式擾動則是由不同之模式物理參數法之設定產生，主要針對微物理參數法、邊界層參數法和積雲參數法進行不同參數法之組合 (李和洪，2011、2014)，如表一所示，有兩種微物理參數法設定，包括

WSM5 及 Goddard Cumulus Ensemble Model (GCE)；三種邊界層參數法，包括 Yonsei University (YSU)、Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)和 Asymmetric Convective Model version 2 (ACM2)；以及五種積雲參數法 Grell-Devenyi ensemble (GD)、Tiedtke、Betts-Miller-Janjic (BMJ)、Kain-Fritsch (KF)、Simplified Arakawa-Schubert (old SAS)和 New Simplified Arakawa-Schubert (new SAS)。參數法之詳細介紹詳見 WRF 使用手冊(Skamarock et al., 2008)。

本文中所使用之模式資料為 2014 年 5 月至 6 月兩個月之系集預報，每次執行 20 組系集成員，每天 0000 和 1200 UTC 各進行 72 小時預報，總計有 120 次系集預報個案。

(二) 機率擬合平均降水介紹

本文參考 Ebert (2001)提出機率擬和平均 (Probability-Matched Mean, PMM)之方法，混和兩種不同特徵的資料，利用調整機率密度函數 (Probability Density Function, PDF)以導出新的產品。過去常用於混和雷達估計降水與雨量站資料 (Rosenfeld et al. 1993)、或是結合同步衛星和繞極衛星的雨量估計(Anagnostou et al.1999)。

本文取用 WEPS 5 公里解析度的降水預報資料，如圖 1 為 WEPS 5 公里解析度的積分範圍，黑框則是本研究中計算 PMM 的範圍，該區域中以使用 PMM 方擬合系集平均以及各系集成員的定量降水預報。詳細 PMM 降水產品之計算方法參見文末附錄。

表 1 WEPS 20 組系集成員之物理參數法設定。

	微物理參數法	邊界層參數法	積雲參數法
第 1 組	GCE	YSU	Grell
第 2 組	GCE	YSU	Tiedtke
第 3 組	GCE	MYJ	Betts-Miller
第 4 組	GCE	MYJ	K-F
第 5 組	GCE	MYJ	Tiedtke
第 6 組	GCE	MYJ	Old SAS
第 7 組	GCE	MYJ	New SAS
第 8 組	GCE	ACM2	Grell
第 9 組	GCE	ACM2	Tiedtke
第 10 組	GCE	ACM2	New SAS
第 11 組	WSM5	YSU	Tiedtke
第 12 組	WSM5	MYJ	Betts-Miller
第 13 組	WSM5	MYJ	K-F
第 14 組	WSM5	MYJ	Tiedtke
第 15 組	WSM5	MYJ	Old SAS
第 16 組	WSM5	MYJ	New SAS
第 17 組	WSM5	ACM2	Grell
第 18 組	WSM5	ACM2	Tiedtke
第 19 組	WSM5	ACM2	New SAS
第 20 組	WSM5	YSU	Grell

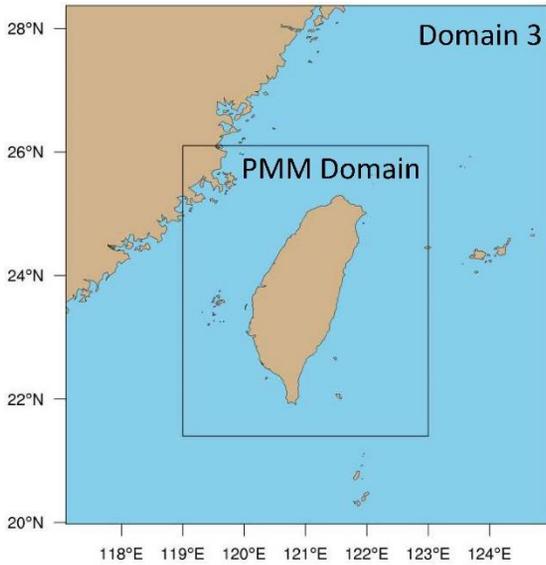


圖 1 模式的第三層巢狀網格範圍與 PMM 網格範圍。

三、校驗方法

(一) 系集離散度

本文使用離散度 (SPRD) 和均方根誤差 (RMSE) 來描述系集預報系統之離散程度，離散度 (SPRD) (Toth et al. 2003; Zhu et al. 2008) 的計算公式如下：

$$SPRD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{f} - f_i)^2}{N}}$$

SPRD 基本上為系集成員和系集平均之間的均方根 (root mean square)，其中 f_i 為各系集成員之預報值， \bar{f} 為系集平均， N 為系集成員數。

RMSE 公式如下：

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - O)^2}{N}}$$

其中 O 為觀測，RMSE 基本上為系集成員和觀測之間的均方根，反映出系集預報的準確度，

當均方根誤差越大表示模式預報誤差越大。當 RMSE 和 SPRD 相當時表示系集系統的離散程度合理；當 RMSE 大於 SPRD 時，表示離散不足；反之，表示過度離散。

此外，本文亦使用相關係數 (Correlation, R) 來表示兩個變數 (X, Y) 的相關程度：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

上述 N 表示兩變數對應之樣本數，藉由兩變數之值 X_i 和 Y_i 以及其平均值 \bar{X} 與 \bar{Y} ，計算出 R 以定量描述兩變數間的相關特徵，當相關程度越高時 R 越接近於 1，亦表示兩個變數 (X, Y) 之間的線性關係越明顯。

(二) 降水校驗

本研究使用中央氣象局 467 個自動雨量站提供的雨量觀測 (測站分布如圖 2)，用以校驗模式之定量降水預報能力。在此我們將模式預報的雨量內差至雨量站，降水校驗閾值為 1、2、5、10、20、30、40、50、75、100、125、150、200 及 300 mm，針對不同的雨量閾值，利用公正預兆得分 (Equitable Threat Score, ETS) 及偏離指數 (Bias) 進行定量降水預報校驗，此兩指數均被氣象作業及研究單位廣為使用。ETS 是在計算針對特定雨量閾值，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，ETS 分數愈高代表模式降水預報愈準確，其定義如下：

$$ETS = \frac{H - R}{O + F - H - R}$$

上式的 H 代表預報與觀測皆有降水的格點數， F 為針對特定雨量閾值，統計預測降水的點

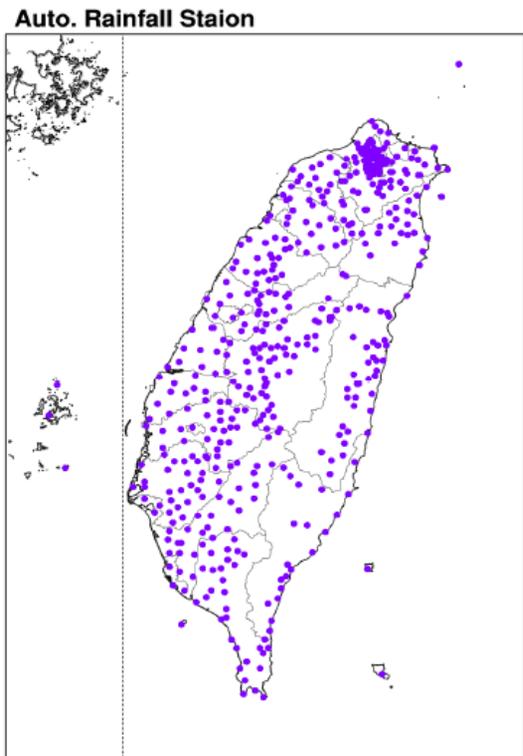


圖 2 中央氣象局自動雨量站分布。

數， O 為觀測降水的點數， $R = FO/N$ 為隨機可正確預測降水的點數， N 為預報點數與觀測點數之和。

偏離係數之定義為：

$$\text{Bias} = \frac{F}{O}$$

即模式預測降水點數與觀測降水點數之比，當 Bias 值大於 1 代表模式高估降水點數，小於 1 則代表模式低估降水點數，綜合 ETS 與 Bias 得分的結果，可判斷降水預報的正確性。

另外，本文亦討論降水量之機率密度函數 (Probability Density Function, PDF)。機率密度函數 (PDF) 會依據該模式中所有降水格點的降水量分布在不同個降水區間中的累積次數，並依照其占

總格點數的比例計算。在計算給定區間的機率密度函數 (PDF) 時，舉例來說，如果區間是 a_1, a_2, a_3, \dots ，所有介於 a_2 和 a_3 之間的樣本累計，即定義為 a_2 區間的累積總次數。算出所有區間的累積次數再除以總次數即得到該區間的 PDF。

四、結果分析

圖 3 是 2014 年 5 至 6 月 0~48 小時之 WEPS 定量降水預報的離散度 (SPRD) 和均方根誤差 (RMSE)，圖中顯示 SPRD 隨著 RMSE 的增加而增加，相關係數在 0.6~0.88 之間，顯示 WEPS 具有好的散布關係 (dispersion relation)。一個好的散布關係是評量系集預報系統的重要指標，代表系集成員具有合理的分佈，也是得到一個好的系集產品和機率預報的基礎。

系集平均是系集預報系統最常見的產品之一。就常態分布而言，「平均」代表機率發生最高的情況，因此，「平均」具有其統計意義。然而，如果統計樣本不是常態分布，那「平均」就只是算數平均，未必能代表特定的統計特性。圖 4 為 2014 年 5 至 6 月 12 小時降水之 PDF，圖中觀測 (黑線) 之 PDF 分布顯示降水並非常態分布：小雨的發生頻率高，而大雨的發生頻率低。WEPS 所有成員的 PDF (紅線) 和觀測之 PDF 分布趨勢大致吻合，這意味著系集預報能掌握降水觀測的 PDF，特別是在大雨區段，模式預報和觀測的頻率分佈幾乎一致，顯示 WEPS 能掌握極端降水。但從 PDF 中我們無法從頻率分佈的分析中知道極端降水發生的時間、位置以及是由哪一個系集成員所預報的結果。系集平均之 PDF (藍線) 則顯示在大雨區段 (大於 50 mm) 有明顯低估的現象，這是因為各個系集成員極端降水發生的時、空分佈未必一致，因此在平均的過程中會勻滑掉

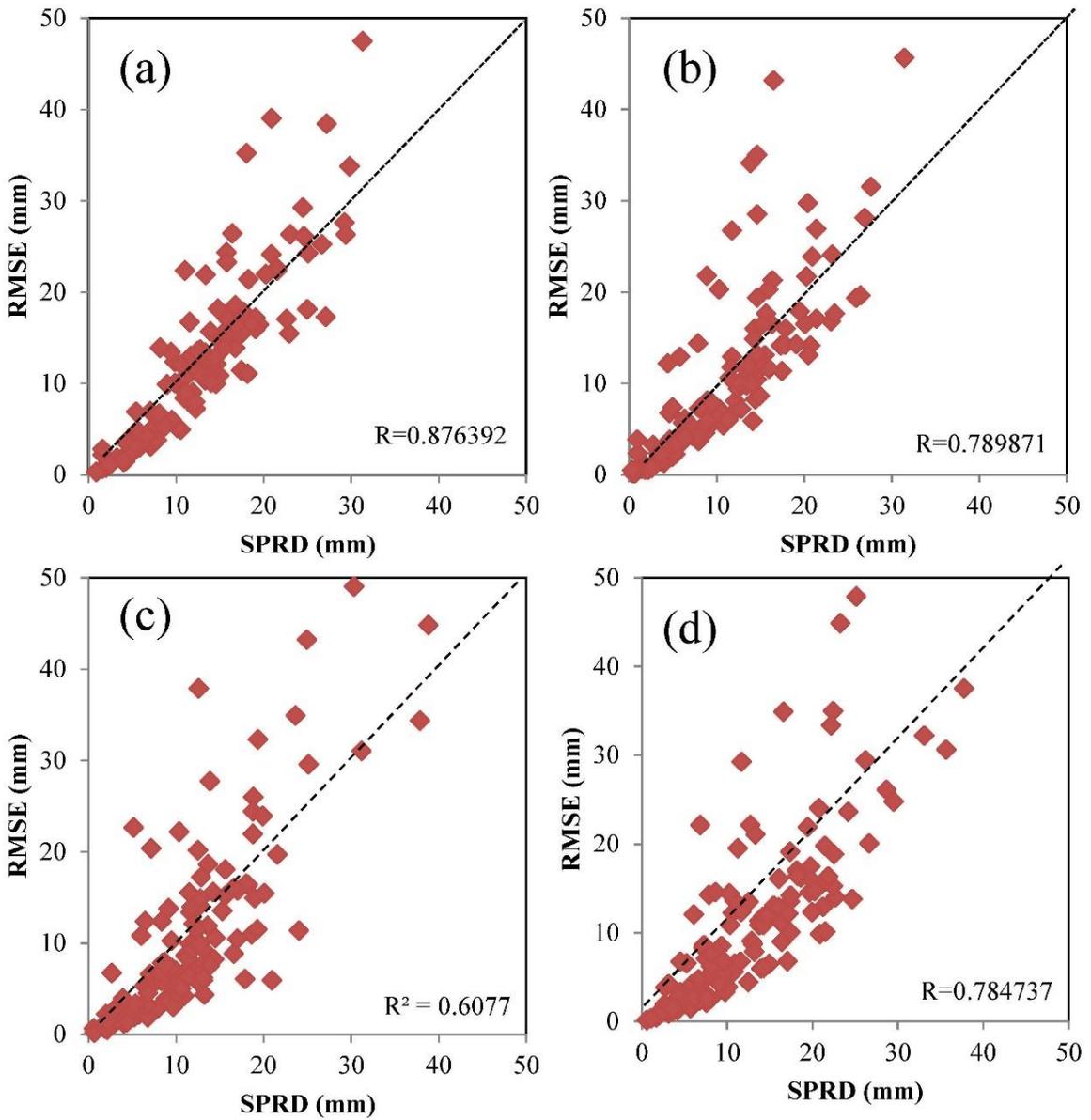


圖3 2014年5至6月WEPS定量降水預報之離散度(Spread, 橫軸)和均方根誤差(RMSE, 縱軸), 圖(a)(b)(c)(d)分別為模式之0-12、12-24、24-36、36-48小時預報之累積降水。

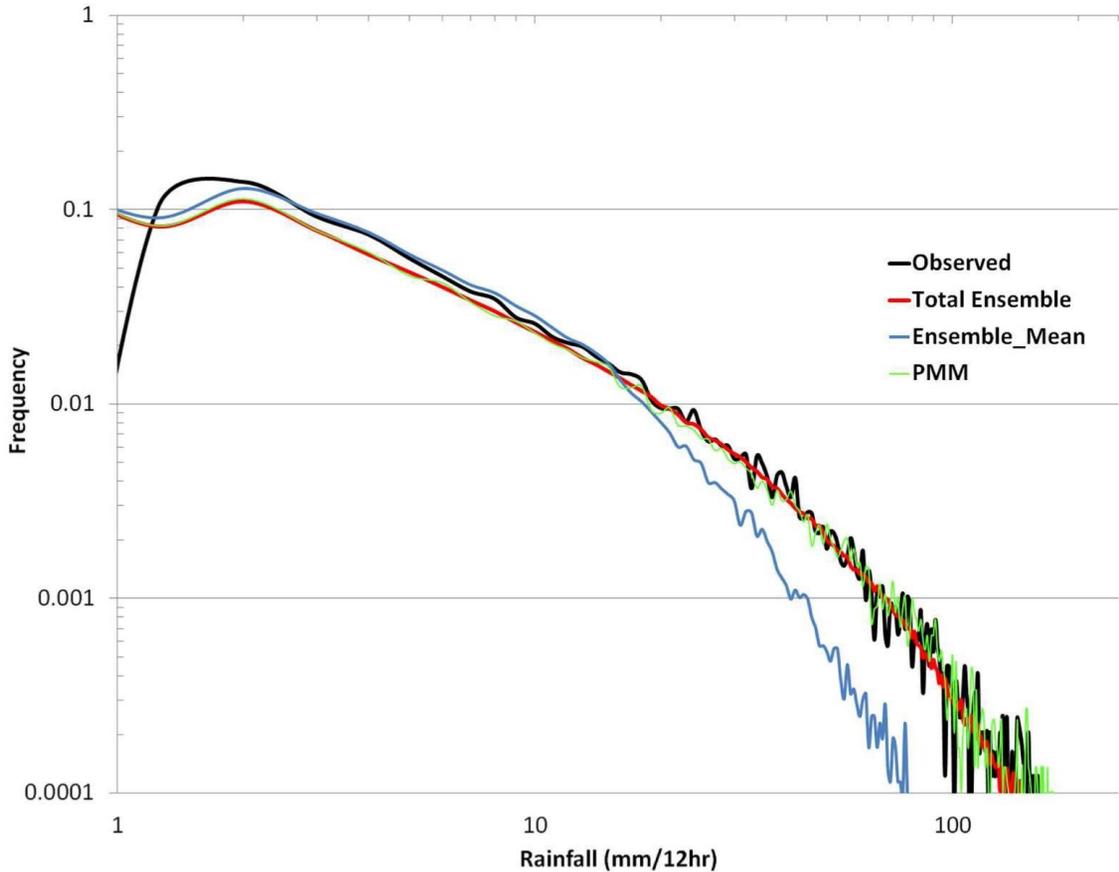


圖 4 2014 年 5 至 6 月之觀測（黑線）、所有系集成員（紅線）、系集平均（藍線）以及 PMM（綠線）之 0-12 小時累積雨量之機率密度函數。機率密度函數之區間為 1 mm。

系集成員的極值，而導致系集平均低估極端降水的現象。這個結果顯示，系集平均在定量降水預報上是不適用的，特別是極端降水會被嚴重低估，無法提供防災應用最重視的極端降水預報。

PMM 以系集平均為基礎，擬合所有系集成員降水預報的 PDF，而得到一組新的降水預報產品。PMM 降水產品之 PDF 如圖 4 中（綠線）所示，可以看到 PMM 產品與 WEPS 所有成員之 PDF（紅線）非常接近，大雨部分亦和觀測之 PDF 相同，顯示 PMM 方法對於系集平均之大雨降水頻率低估的問題確實能有效改善。

為顯示 PMM 在降水預報之表現，本研究從個案來突顯不同定量降水預報產品的差異。圖 5 是 2014 年 5 月 20 日 1200 UTC 之 12 小時定量降水預報，系集平均（圖 5a）能掌握到北部及中部山區的降水，但比起觀測仍有低估的情形，且隨著預報時間的增加其低估的情形更為明顯。相較之下 PMM（圖 5b）降水分佈和系集平均一致，但經過機率擬合之後能重建降水的極值，在中部山區的降水量更接近觀測，且在北部的降水分布也更為明顯，顯示 PMM 能有效修正系集平均中降水極值被低估的現象。

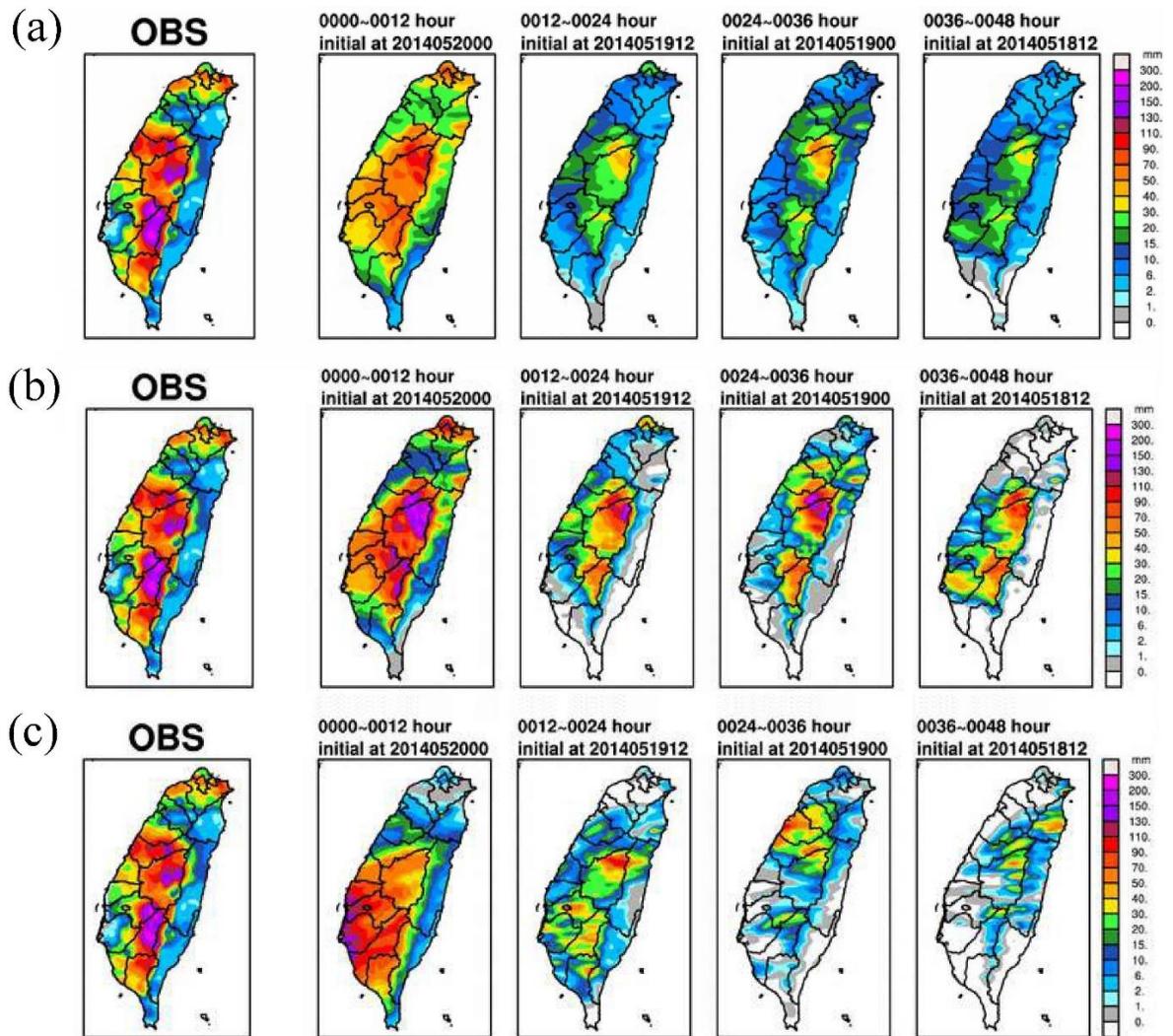


圖 5 2014 年 5 月 20 日 0000-1200 UTC 之 12 小時累積降水，其中(a)為觀測及不同初始時間之系集平均，由左至右分別為，觀測、0-12、12-24、24-36 及 36-48 小時之預報。(b)、(c)和(a)相同，分別為(b) PMM 之降水預報以及(c)決定性預報 WRF_D。

此外，比較 PMM 和 WRF_D 之定量降水預報（圖 5c），結果可看到 WRF_D 0-12 小時預報之降水主要集中於台灣西南側，並沒有掌握到中部山區和北部之降水。12-24 小時之預報則集中於中部山區，24-36 小時則偏北部山區，顯示 WRF_D 對於不同預報時間的定量降水預報分布有很大的差異。相比之下，PMM 在不同預報時間的定量降水預報具有較高的一致性。進一步統計 2014 年 5 至 6 月期間，PMM 和 WRF_D 在不同預報時間之 12 小時定量降水預報的相關性（如圖 6），圖中顯示 PMM 在各個預報時間皆較 WRF_D 有更高的相關性，意味著 PMM 對降水系統的可預報度較 WRF_D 為高，這是歸因於 PMM 是建立在系集平均的基礎上所發展出來的產品。

圖 7 比較 2015 年 5 至 6 月間系集平均跟 PMM12 小時降水預報之 Bias 及 ETS 得分。系集

平均的 Bias 在小雨（小於 5 mm）有高估，大雨部分（大於 50 mm）則是明顯低估。而 PMM 產品在小雨部分之 Bias 接近 1，大雨部分則有高估的情形。此外，0-12 小時預報的 Bias 偏高，而 12-24 小時預報的 Bias 最接近 1。在 ETS 表現上，PMM 產品在小雨跟大雨的分數都較系集平均為佳，顯示 PMM 相較於系集平均能有更佳的定量降水預報能力。

PMM 雖能避免系集平均大雨低估的問題，但卻也導致大雨過度預報的情形。為此，我們嘗試在 PMM 的篩選策略上增加一個篩選門檻：當系集平均大於 10 mm 時，PMM 使用排序的最小值取代中位數，這組實驗稱之為 MOD_PMM。可預期 MOD_PMM 將會降低 PMM 降水量過大的問題。

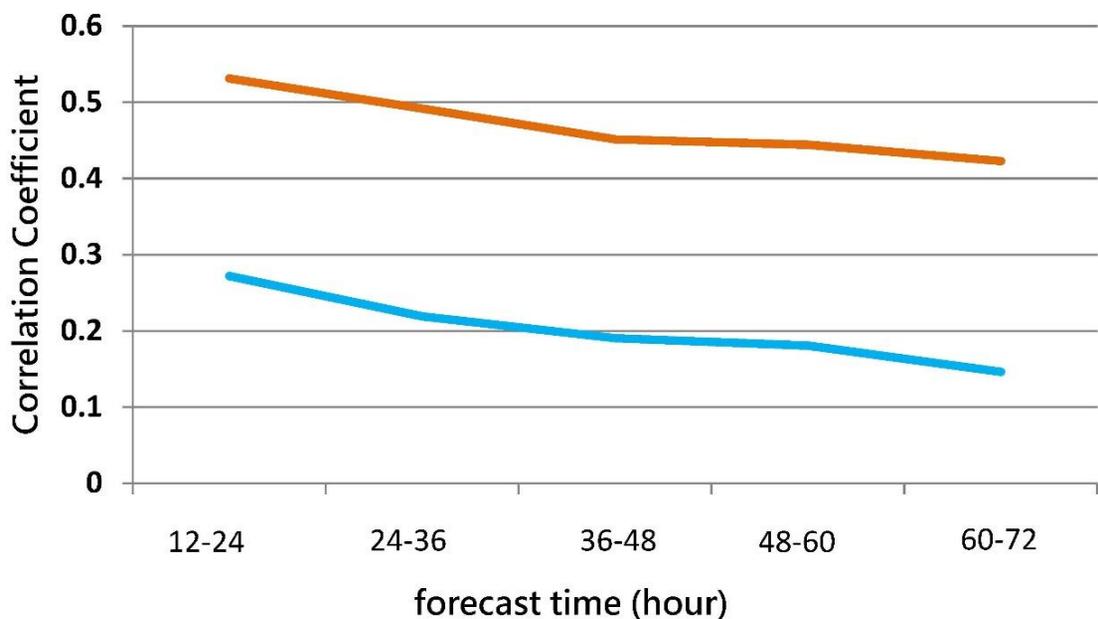


圖 6 針對 2014 年 5 至 6 月期間，以模式 0-12 小時預報為基準，比較前 12 小時之 12-24 預報、前 24 小時之 24-36 預報、前 36 小時之 36-48 預報、前 48 小時之 48-60 預報和前 60 小時之 60-72 小時預報累積雨量之相關係數，橘線和藍線分別為 PMM 和 WRF_D 之校驗結果。

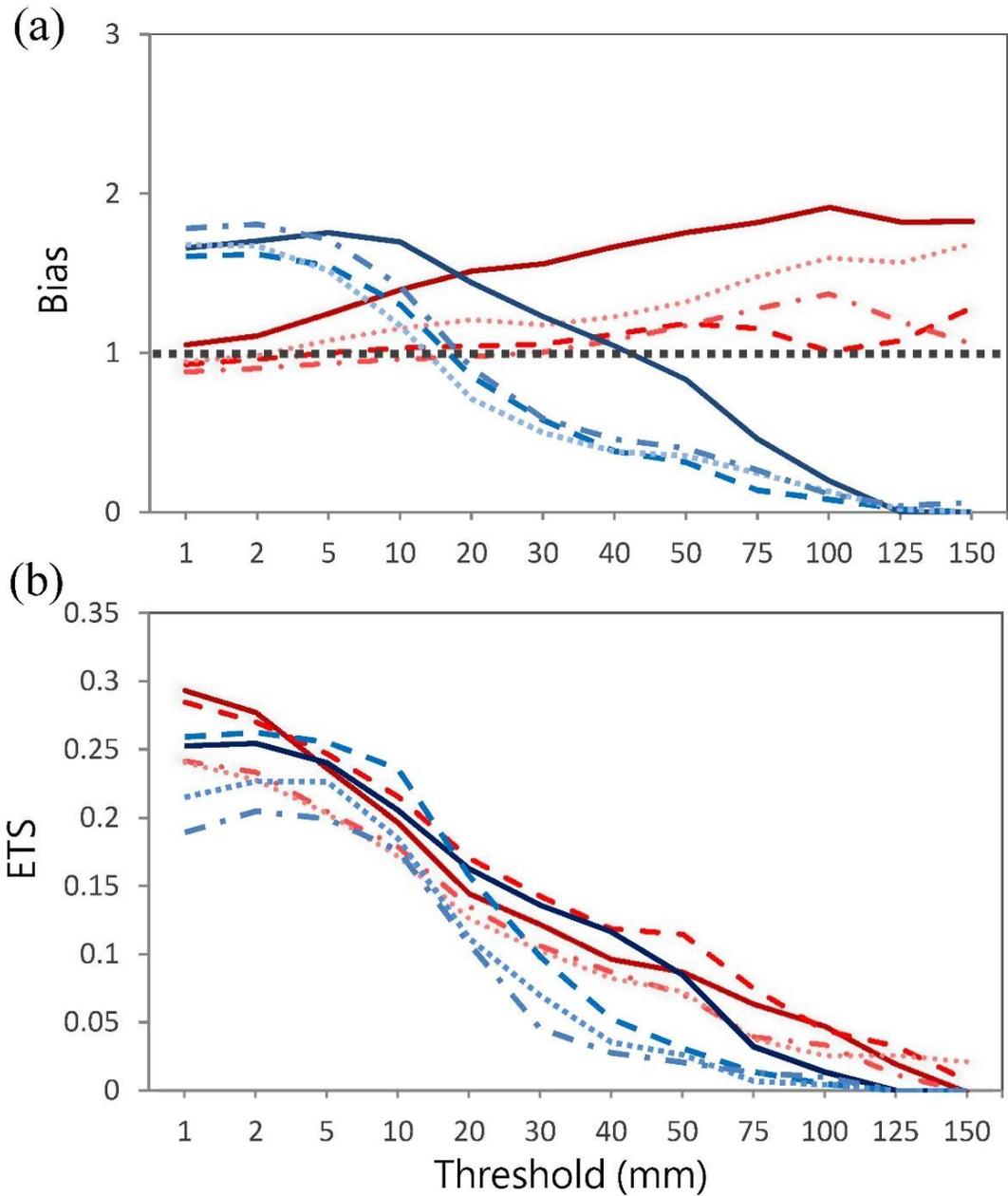


圖 7 針對 2014 年 5 至 6 月期間，模式 12 小時預報累積雨量之(a) Bias 及(b) ETS 校驗之結果，分別為 0-12 (實線)、12-24 (虛線)、24-36 (點虛線) 和 36-48 (點線) 小時累積雨量，分別為 PMM (紅線) 和系集平均 (藍線) 之結果。

圖 8 為初始時間 2014 年 5 月 4 日 000 UTC 之 12-24 小時預報的累積降水，該個案中 PMM (圖 8b) 和觀測 (圖 8a) 降水分布相近，但是在中部山區有高估的現象。而 MOD_PMM (圖 8c)

在降水分布上和 PMM 並沒有明顯地差異，這是因為兩者的降水分佈皆為系集平均之故。但由兩者之差異 (圖 8d) 可發現，MOD_PMM 對極端降水的高估的確有些微修正，但預報的最大雨量仍

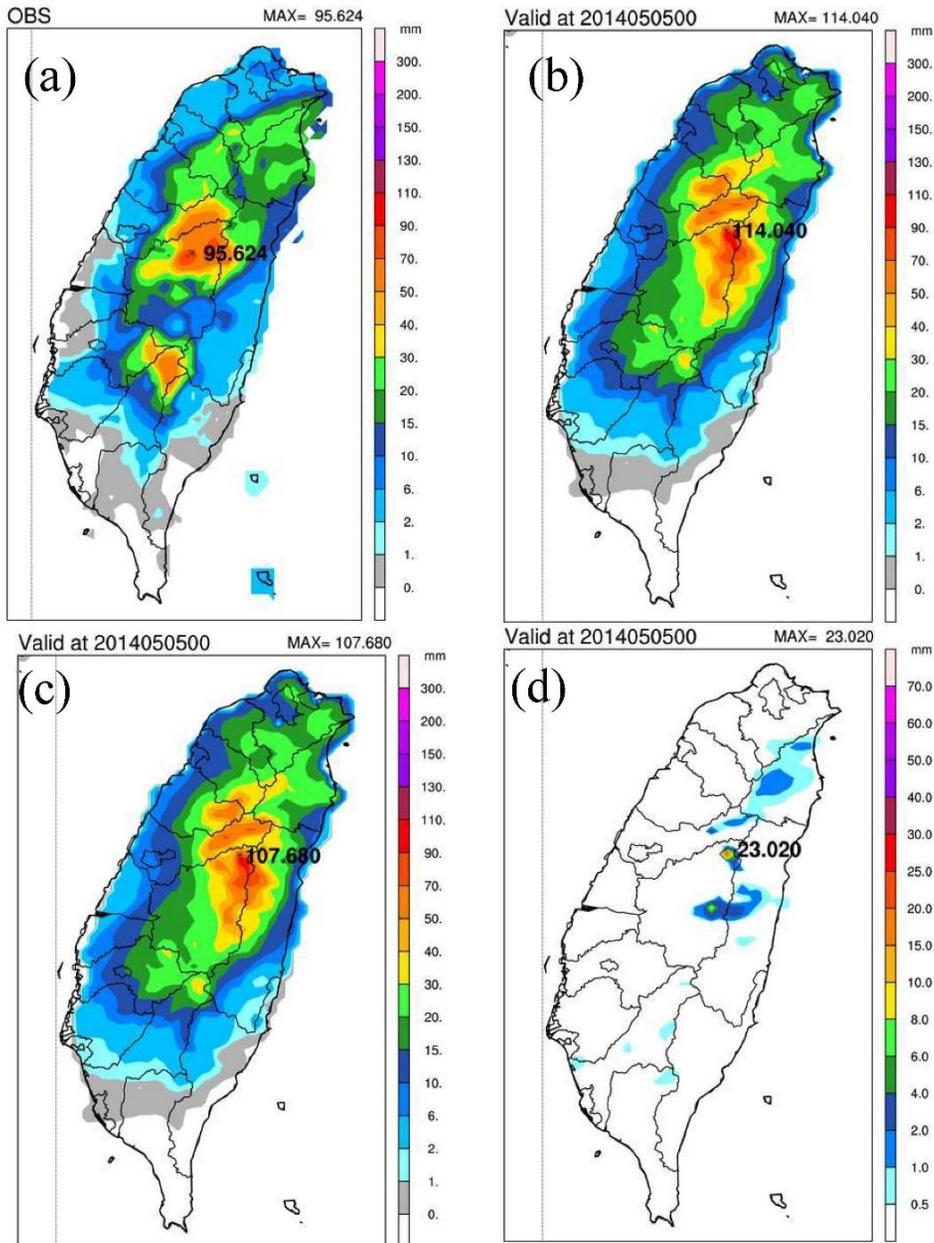


圖 8 初始時間為 2014 年 5 月 4 日 000 UTC 之 12-24 小時預報的累積降水，其中(a)為觀測，(b) PMM 產品，(c) MOD_PMM 產品，圖(d)為 MOD_PMM 跟 PMM 產品之差異。

較觀測高估，顯示降水高估的現象無法經由 PMM 機率擬合方法之修正獲得足夠的改善。圖 9 為 2014 年 5 至 6 月 WEPS 各系集成員在不同降水校驗門檻的 PDF 統計，圖中顯示大部分系集成員在 10 mm 以上的 PDF 就已經高於觀測，表示幾乎所有的系集成員在大雨區域皆有高估的情形，這是模式的系統性偏差。在這情形之下，無論如何調整 PMM 的機率擬合方式皆無法改善大雨高估的情形，在此，唯一解決之道是改善模式定量降水預報的系統性偏差才能進一步改善 PMM 的預報能力。

為因應實際應用需求，可以發展出不同累積區間的 PMM 降水產品，例如以 1 小時和 12 小時累積區間為例，為產製 12 小時累積雨量，可以由 12 個 1 小時累積區間的 PMM 降水累加而成，也可以是 1 個 12 小時累積區間的 PMM 降水。逐時累積區間之 PMM 是由所有系集成員之逐時雨量的 PDF 擬合而成，在此可突顯出逐時雨量的極值；而 12 小時累積區間之 PMM 是由所有系集成員之 12 小時累積雨量的 PDF 擬合而成，此將突顯出 12 小時累積雨量的極值。當我們將 12 個逐時 PMM 雨量累加成 12 小時累積雨量時，可預期

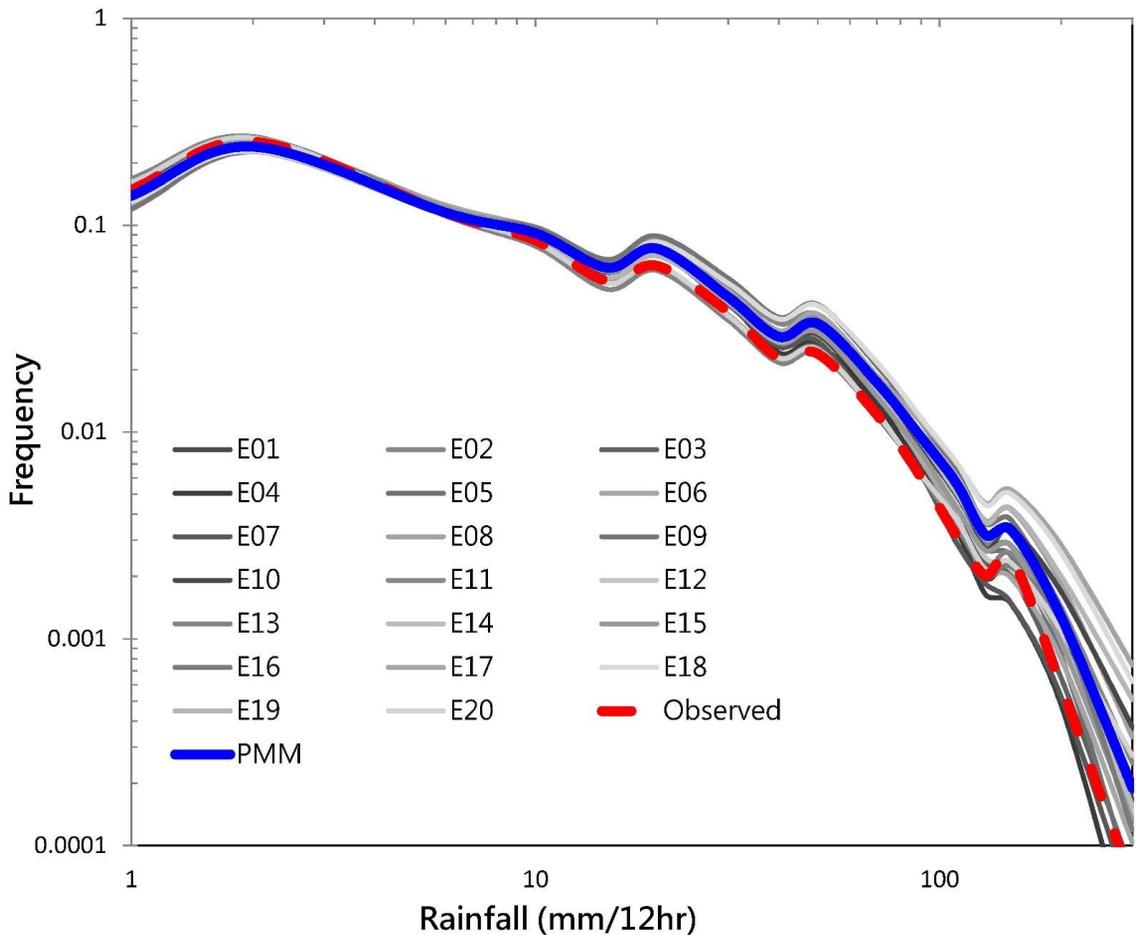


圖 9 2014 年 5 至 6 月之觀測（紅線）、各組系集成員（灰線）、和 PMM（藍線）之 0-12 小時累積雨量之機率密度函數。機率密度函數之區間為降水校驗門檻值。

將會進一步強化極端降水，並導致比 12 小時累積區間 PMM 更大的累積雨量。

圖 10 為初始時間 2014 年 5 月 4 日 000 UTC 之 12-24 小時預報的累積降水，圖中顯示 12 小時累積區間之 PMM 結果（圖 10c）在中部山區的降水極值高於觀測（圖 10a），隨累積區間的縮短（6 小時、3 小時及逐時累積區間），累積雨量高估的情形更為明顯。以上特性並非只存於單一個案，於 2014 年 5 至 6 月之平均預報降水（圖 11）中，12 小時累積區間 PMM（圖 11a）和較短累積區間之結果比較可看到，逐時累積區間（圖 11b）高估的情形最顯著，6 小時累積區間（圖 11d）的差異則為最小。圖 12 比較不同累積區間 PMM 於 5 至 6 月在不同降水門檻的 PDF 統計，圖中顯示逐時累積區間在大雨部分的 PDF 較其他區間為高。同樣的結果也反映在技術得分的校驗（圖 13）上，BIAS 結果（圖 13a）呼應圖 12 中 PDF 的分布結果，逐時累積區間會過度高估大雨，且在小雨會相對低估。ETS 得分（圖 13b）的差異不大，但 12 小時累積區間仍有略高的定量降水預報能力。故在累積區間的選用上，對於 12 小時的累積雨量選用 12 小時累積區間的 PMM 產品會有較為合理的結果。

五、結論

本文旨在評估由 CWB WEPS 發展出之 PMM 產品的特性與預報表現。首先藉由檢視 WEPS 定量降水預報的離散度 (SPRD) 和均方根誤差 (RMSE) 分析，顯示 WEPS 之定量降水預報具有良好的散布關係，此為產製合理系集產品的基礎。分析結果亦顯示，所有系集成員的降水 PDF 幾乎和觀測一致，特別是在大雨區域，顯示 WEPS 具有掌握極端降水的預報能力。進一步討論 WEPS

之 PMM 產品的特性，結果指出，由於 PMM 擬合所有系集成員的 PDF，因此 PMM 可有效改善系集平均預報對大雨低估的情形。此外，PMM 有著比決定性預報更高的可預報度，此歸因於 PMM 是建立在系集平均的基礎上所發展出來的產品。從這些特點的分析上，均顯示 PMM 為一較系集平均更佳的系集定量降水預報產品。

本研究亦顯示，WEPS 之 PMM 預報對大雨有過度預報的情形，使用修正方法後，發現降水高估的現象雖有趨緩，但仍無法經由 PMM 機率擬合方法之修正而獲得足夠的改善。其原因為所有系集成員皆存在大雨高估的現象，顯示對於大雨過度預報情形為模式本身的系統性偏差所致，改善模式定量降水預報的系統性偏差才能進一步改善 PMM 的預報能力。是故 PMM 的未來發展會跟 WEPS 模式本身與時俱進，於未來 WEPS 將根據模式解析度、初始擾動方法、邊界條件，物裡參數以及資料同化方法等方面進行強化，屆時 PMM 的定量降水預報方能有效改善。

為因應實際應用之需求，可以發展出不同累積區間的 PMM 降水產品，但在個案和統計分析中皆發現對於 12 小時預報之累積雨量，使用較短累積區間的結果會強化大雨的極值，此一現象隨著累積區間之縮短而更為明顯。顯示在使用較短累積區間的 PMM 產品時，應注意隨累積區間縮短而可能進一步高估極端降水的現象。未來 WEPS 將分別提供 12 小時，3 小時以及 1 小時累積區間的 PMM 產品提供各區間產品供防災單位使用，減少在不同區間的使用上發生高估問題的情形。

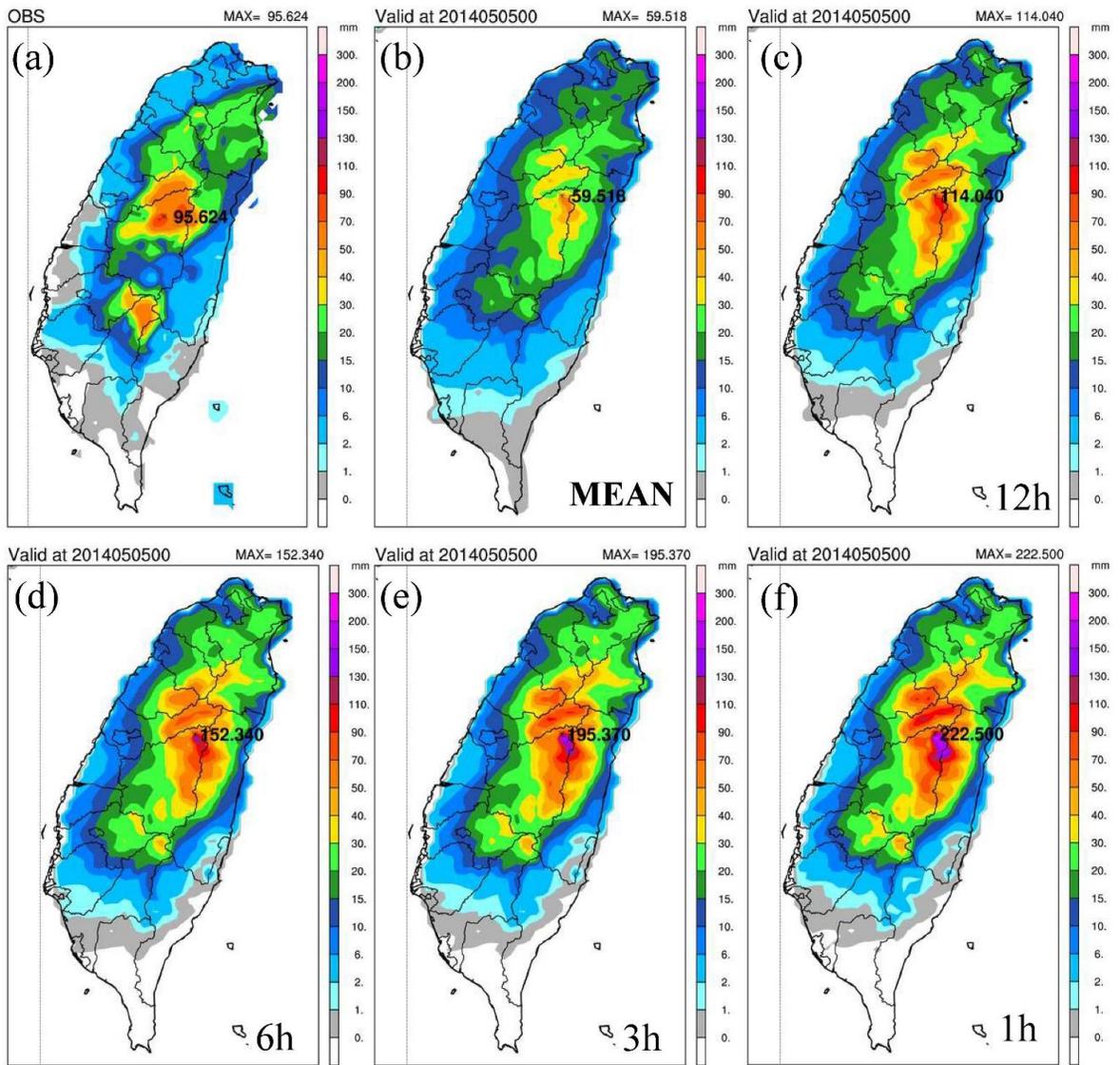


圖 10 初始時間為 2014 年 5 月 4 日 000 UTC 之 12-24 小時預報的累積降水，其中(a)為該時間之觀測雨量，(b)為系集平均，(c)(d)(e)(f)分別為 12 小時、6 小時、3 小時及逐時累積區間之 PMM 降水產品。

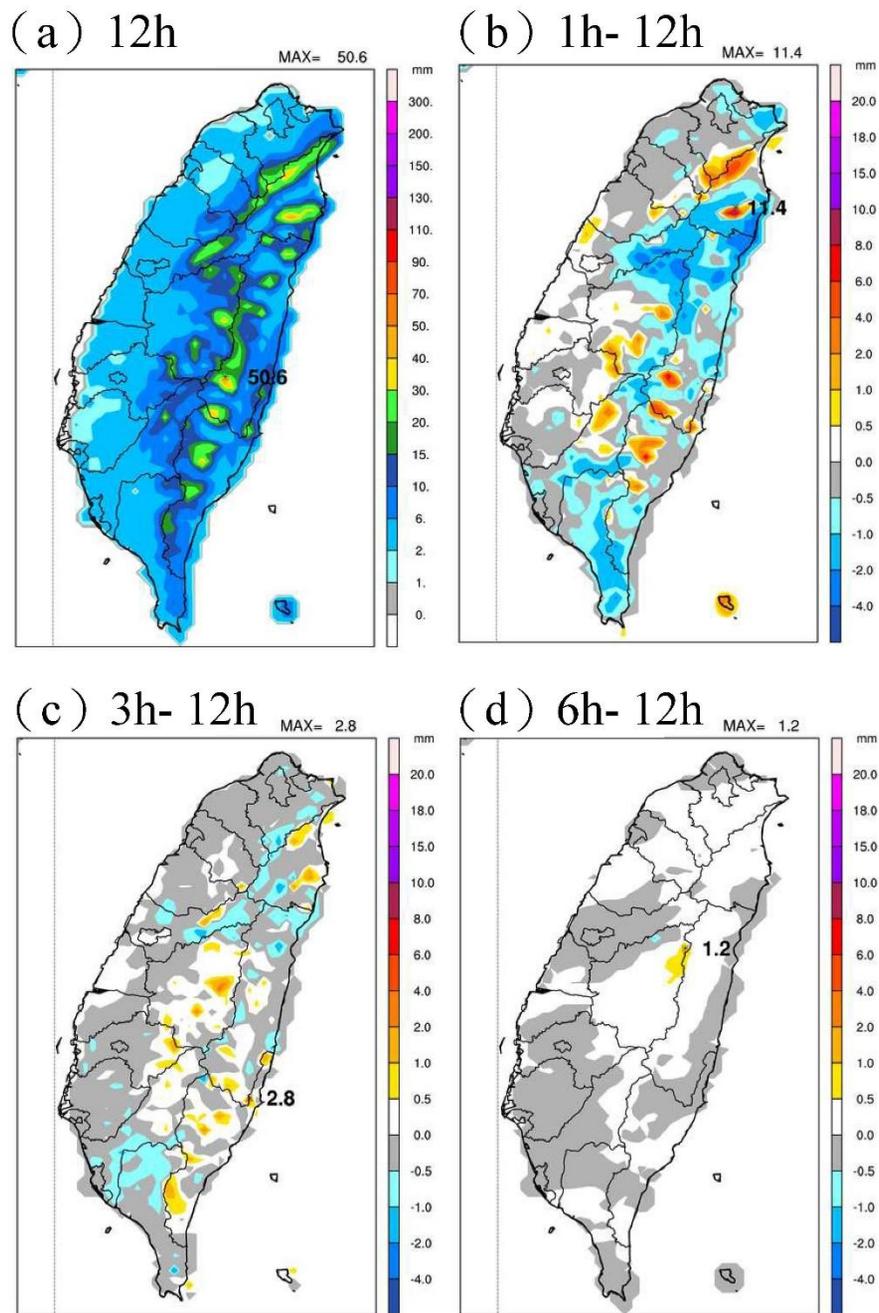


圖 11 2014 年 5 至 6 月平均之 12-24 小時累積降水。(a)為 12 小時之 PMM 降水產品，以此產品為標準，(b)(c)(d) 分別為逐時、3 小時及 6 小時之各累積區間 PMM 和(a)之差值。

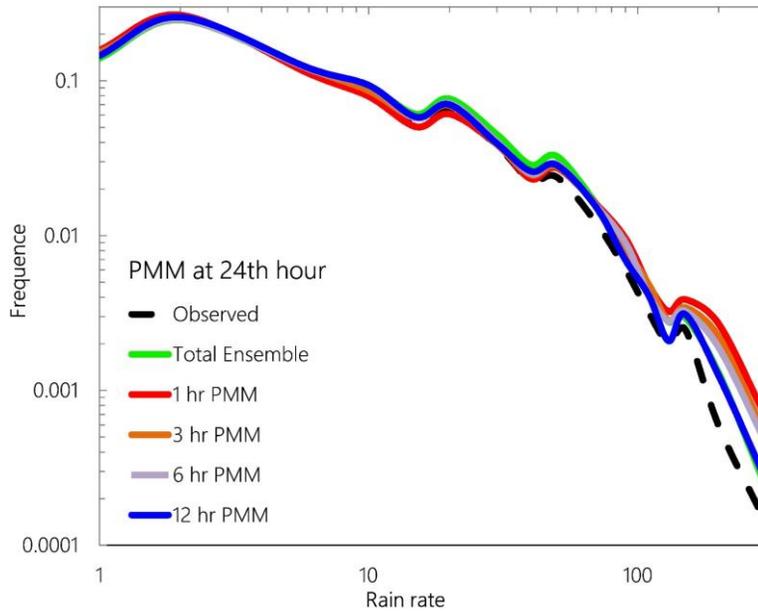


圖 12 2014 年 5 至 6 月之觀測 (黑虛線)、所有系集成員 (綠線) 和逐時 (紅線)、3 小時 (橘線)、6 小時 (灰線) 及 12 小時累積 PMM (藍線) 之 12 小時累積雨量的機率密度函數。機率密度函數之區間為降水校驗門檻值。

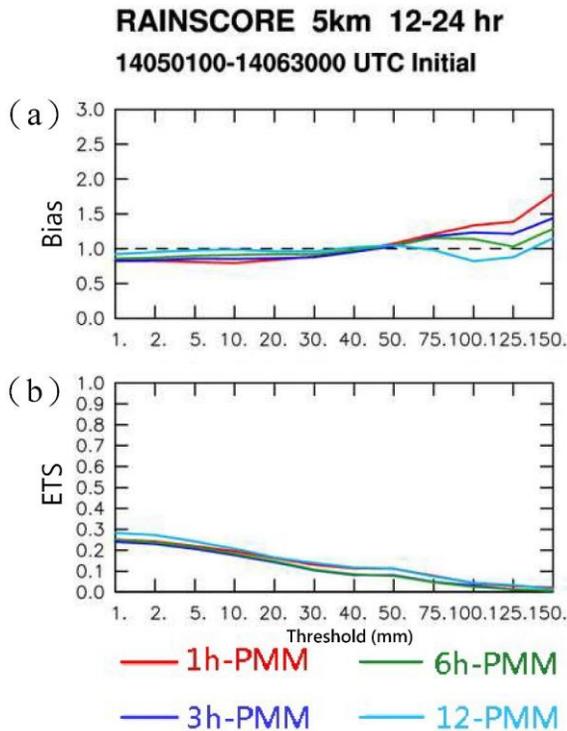


圖 13 針對 2014 年 5 至 6 月期間，模式 12-24 小時預報累積雨量之(a) Bias 及(b) ETS 校驗之結果，分別為逐時 (紅線)、3 小時 (藍線)、6 小時 (綠線) 及 12 小時 (水藍線) 累積區間 PMM 降水。

致謝

本研究在中央氣象局氣象資訊中心提供之計算支援以及科技部研究計畫 MOST 103-2625-M-052 -002 支援下完成。

附錄：PMM 計算方法

本研究設計簡易模型來解釋 PMM 之計算過程。

1. 假設此系集預報中，包含 3 個系集成員，且在 PMM 計算網格中每個成員共有 9 個格點，每個格點存在一個預報值，如下表所示。

Member 1		
0 mm	0 mm	1 mm
0 mm	2 mm	9 mm
0 mm	5 mm	50 mm

Member 2		
7 mm	21 mm	15 mm
17 mm	60 mm	20 mm
12 mm	10 mm	8 mm

Member 3		
0 mm	1 mm	5 mm
0 mm	5 mm	40 mm
0 mm	1 mm	7 mm

2. 計算該系集系統之系集平均，並就格點中的平均值進行排序，標記每個格點對應的排序值。下表中黑字表各網格點之系集平均，9 個格點之系集平均的排序如紅字所示。

Ensemble Mean		
2.3 mm 9	7.3 mm 4	7 mm 5
5.7 mm 6	22.3 mm 2	23 mm 1
4 mm 8	5.3 mm 7	21.7 mm 3

3. 將所有成員之所有格點的預報值全部置於同一序列中，並進行排序，如下頁表之紅字所示。排序完之預報值依照系集成員個數進行分組，且每組會標記對應之序次，如藍字所示。以本範例而言，將 27 個預報分成每 3 個一組，共 9 組。(附表一)

附表一

Rank	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Forecast (mm)	60	50	40	21	20	17	15	12	10
Group number	1			2			3		
Rank	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Forecast (mm)	9	8	7	7	5	5	5	2	1
Group number	4			5			6		
Rank	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Forecast (mm)	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Group number	7			8			9		

4. 最後，從上表每組中取出該組內中位數的預報值，並按照各組被標記之序次，依據系集平均排序的次序填入所對應的網格位置，此即為PMM之降水產品。

Ensemble Mean		
0 mm 9	8 mm 4	5 mm 5
2 mm 6	20 mm 2	50 mm 1
0 mm 8	1 mm 7	12 mm 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。
- 李志昕、洪景山，2014：區域系集預報系統研究：系集成員產生方式之評估。《大氣科學》，**42**，153-179。
- 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。
- Anagnostou, E. N., A. J. Negri, and R. F. Adler, 1999: A satellite infrared technique for diurnal rainfall variability studies. *J. Geophys. Res.*, **104**, 31 477-31 488.
- Buizza, R., and T. N. Palmer, 1995: The singular vector structure of the atmospheric general circulation. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1434-1456.
- , and ——, 1998: Impact of ensemble size on ensemble prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2503-2518.
- , A. Hollingsworth, F. Lalaurette, and A. Ghelli, 1999a: Probabilistic predictions of precipitation using the ECMWF Ensemble Prediction System. *Wea. Forecasting*, **14**, 168-189.
- , M. Miller, and T. N. Palmer, 1999b: Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF Ensemble Prediction System. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 2887-2908.
- Carolyn and Junichi, 2015: Recent activities related to EPS. *Report of the 30th session of the WGNE*. College Park, MD, 23-36 Mar. 2015.
- Du, J., S. L. Mullen, and F. Sanders, 1997: Short-range ensemble forecasting of quantitative precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2427-2459.
- , J. McQueen, G. DiMego, T. Black, H. Juang, E. Rogers, B. Ferrier, B. Zhou, Z. Toth and M. S. Tracton, 2004. The NOAA/NWS/NCEP short-range ensemble forecast (SREF) system: evaluation of an initial condition vs. multi-model physics ensemble approach. Preprints (CD), 16th Conference on Numerical Weather Prediction, *Seattle, Washington, Amer. Meteor. Soc.*
- , J. McQueen, G. DiMego, Z. Toth, D. Jovic, B. Zhou, and H. Chuang, 2006: New Dimension of

- NCEP Short-Range Ensemble Forecasting (SREF) System: Inclusion of WRF Members, *Preprint, WMO Expert Team Meeting on Ensemble Prediction System*, Exeter, UK, Feb. 6-10.
- , G. DiMego, Z. Toth, D. Jovic, B. Zhou, J. Zhu, H. Chuang, J. Wang, H. Juang, E. Rogers, and Y. Lin, 2009: NCEP short-range ensemble forecast (SREF) system upgrade in 2009. 19th Conf. on Numerical Weather Prediction and 23rd Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Omaha, *Nebraska, Amer. Meteor. Soc.*, June 1-5, 2009, paper 4A.4.
- Eckel, F. A., and M. K. Walters, 1998: Calibrated probabilistic quantitative precipitation forecasts based on the MRF ensemble. *Wea. Forecasting*, **13**, 1132-1147.
- 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.
- Fang, X., and Y. H. Kuo, 2013: Improving ensemble-based quantitative precipitation forecast for topography-enhanced typhoon heavy rainfall over Taiwan with modified probability-matching technique. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3908-3932.
- Hamill, 1997: Reliability Diagrams for Multicategory Probabilistic Forecasts. *Wea. Forecasting*, **12**, 736-741.
- , 2001: Interpretation of Rank Histograms for Verifying Ensemble Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 550-560.
- , T. M. Bates, G. T., Whitaker, J. S., Murray, D. R., Fiorino, M. 4, Galarneau, T. J., Zhu, Y. and Lapenta, W., 2013: NOAA's second-generation global medium-range 2 ensemble reforecast data set. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1553-1565.
- Hong, J. S., C. T. Fong, L. F. Hsiao, Y. C. Yu, and C. Y. Tzeng, 2015: Ensemble typhoon quantitative precipitation forecasts model in Taiwan. *Wea. Forecasting*, **30**, 217-237.
- Molteni, F., R. Buizza, T. N. Palmer, and T. Petroliagis, 1996: The ECMWF Ensemble Prediction System: Methodology and validation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **122**, 73-119.
- , ——, Marsigli, C., Montani, A., Nerozzi, F., & Paccagnella, T., 2001. A strategy for high-resolution ensemble prediction. Part I: definition of representative members and global-model experiments. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **127**, 2069-2094.
- NMOC operations Bulletin No. 81, Operational Description of the Daily PME System, 2009, *NMOC operations Bulletin No. 81*. Retrieved from <http://www.bom.gov.au/australia/charts/bulletins/apob81.pdf>
- Rosenfeld, D., D. B. Wolff, and D. Atlas, 1993: General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate. *J. Appl. Meteor.*, **32**, 50-72.
- Skamarock, W. C., Coauthors, 2008: A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113pp.

- Shutts, G. J., Leutbecher, M., Weisheimer, A., Stockdale, T., Isaksen, L., & Bonavita, M., 2011: Representing model uncertainty: stochastic parametrization at ECMWF. *ECMWF Newsletter No. 129*, 19-24.
- Stensrud, D. J., H. E. Brooks, J. Du, M. S. Tracton, and E. Rogers, 1999: Using ensembles for short-range forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 433-446.
- Toth, Z., and E. Kalnay, 1997: Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 3297-3319.
- , O. Talagrand, G. Candille and Y. Zhu, 2003: Probability and ensemble forecasts. *Forecast Verification—A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*, I. T. Joliffe and D. B. Stephenson, Eds., John Wiley & Sons, 137-163.
- Tracton, S., and E. Kalnay, 1993: Ensemble forecasting at NMC: Operational implementation. *Wea. Forecasting*, **8**, 379-398.
- Zhou, B. , J. McQueen, J. Du, G. DiMego, Z. Toth and Y. Zhu, 2005: Ensemble forecast and verification of low level wind shear by the NCEP SREF system. *21st Conference on Weather Analysis and Forecasting/17th Conference on Numerical Weather Prediction*. Washington, D.C., *Amer. Meteor. Soc.*, 11B.7A
- , and J. Du, 2010: Fog prediction from a multi-model mesoscale ensemble prediction system. *Wea. Forecasting*, **25**, 303-322.
- Zhu, Y. and Z. Toth, 2008: Ensemble Based Probabilistic Forecast Verification. *19th AMS conference on Probability and Statistics*. New Orleans, LA, 20-24 Jan. 2008.

The Characteristics of the Probability Matched Mean QPF for 2014 Meiyu Season

Yi-Jui Su Jing-Shan Hong Chih-Hsin Li

Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan

(manuscript received 21 November 2015 ; in final form 31 May 2016)

ABSTRACT

Ensemble forecast is expected to cover the uncertainties due to the deficiency of the limited predictability from the single forecast. However, how to derived useful forecast product from the large ensemble dataset is of most important and challenging.

This research aimed at the assessment of characteristics and performance of the Probability Matched Mean (PMM) rainfall product derived from the operational ensemble prediction system in Central Weather Bureau. The results show that the PMM is able to re-construct the extreme rainfall as the observations, to improve the under-estimate of the ensemble mean, and provide better predictability against the deterministic forecast. However, the PMM also shows the slightly over-prediction at the larger rainfall threshold. The over-prediction was due to the systematic bias from the ensemble prediction system and can't be removed from the fine-tune of the PMM algorithm. For the practical application, PMM can be designed according to the different accumulation period. This study pointed out that the accumulated rainfall from the PMM with shorter accumulation period will result in the enhancement of the extreme rainfall.

Key Words: Probability Matched Mean, Ensemble Forecast