

WRF 模式之敏感度測試

第二部份：定量降水預報校驗

簡芳菁¹ 洪景山² 張文錦¹ 周仲島³ 林沛練⁴
林得恩³ 劉素屏³ 繆璿如⁴ 陳致穎⁴

¹國立台灣師範大學地球科學系

²交通部中央氣象局

³國立台灣大學大氣科學系

⁴國立中央大學大氣科學系

(中華民國九十四年九月三十日收稿；中華民國九十五年九月八日定稿)

摘 要

本文利用 12 組不同物理組合的 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 模式系集成員，針對 2004 年 5 月 15 日~6 月 15 日台灣地區梅雨季進行一整個月的連續積分，再將降雨產品分別和綜觀測站觀測、台灣自動雨量站觀測進行定量降水預報 (Quantitative Precipitation Forecast, QPF) 校驗，藉以評估 WRF 模式降水預報能力，並找出適合台灣地區及華南地區梅雨季降水模擬的最佳物理組合。從降水校驗的公正預兆得分(ETS)分析得知 WRF 模式降水模擬在 12~24 小時有最佳表現，小雨模擬能力比大雨強，而且使用 Yonsei University (YSU) 邊界層參數法比 Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) 邊界層參數法可得到較好的降水模擬。在華南地區採用 WRF Single-Moment (WSM) 5-class 微物理法搭配 Kain-Fritsch 積雲參數法可有最好的結果，在台灣地區的小雨模擬也是採用此物理組合最好，但是台灣地區大雨模擬較適合採用表現穩定的 Grell-Devenyi 積雲參數法，不過 Grell-Devenyi 積雲參數法有高估大雨的缺點。此外，模式系集平均的降水預報能力不錯，大多排名在 1~3 名之間。

關鍵詞：WRF 模式，梅雨，降水校驗

一、前言

近年來，由於數值天氣預報技術以及高速電腦計算能力的快速進展，有愈來愈多的學術機構擁有獨立進行即時數值天氣模擬的能力。在美國，最早於 1996 年由 Cliff Mass 以及其研究群在西雅圖華盛頓大學開始建構一套即時的 MM5 預報系統，其主要的預報區域為美國西北部(Colle et al. 2000)。該模式所預報的資料不但可以應用於學術研究，也可提供當地氣象預報單位(NWS)作業之參考。爾後幾年，這種觀念迅速在美國各地推廣，蔚為潮流，使得學術研究與預報作業密切交流，互蒙其利。更有甚者，華盛頓大學現在已開始發展即時的系集預報系統，可以同時執行多組模擬(Grimit and Mass 2002)，以提升預報能力，並校驗及改善中尺度系集預報方法。

在台灣地區，系集預報仍在起步階段，Chien et al. (2002) 針對民國八十七年台灣地區 MM5 模式的降水預報校驗研究結果指出，無論是對於 0~12 小時、12~24 小時、24~36 小時的預報長度，降雨預報對於小、中雨的預報能力均高於對大雨的預報能力，且隨著預報時間增長，預報能力逐漸降低，以 12~24 小時期間的預報最佳。民國 89 年及 90 年的梅雨季，國內的氣象作業及學術研究單位利用變動物理過程的觀念，以 MM5 進行系集降水預報。參與的單位包括有台灣大學、中央大學、台灣師範大學、及中國文化大學四所大學，以及中央氣象局、民用航空局二個政府單位。簡等(2003)即是利用這兩年 MM5 系集預報的降水產品進行校驗，以評估此預報系統的預報能力，並探討合適的系集降水預報組合方式，以獲取最佳之預報。同時，該論文也從各物理過程的組合中，討論其應用於台灣地區梅雨季降水

預報的優劣及特性。Chien and Jou (2004)再結合民國 91 年梅雨季系集預報的成果討論 MM5 系集預報在台灣地區的表現，同時也利用了統計分析的觀點評估各物理組合之間差異性的顯著水準。

可見國內研究單位也有很好的數值天氣預報作業能力及充分的電腦設備，可以執行即時天氣預報。因此，我們計畫透過中央氣象局的協助建立台灣地區數值天氣預報聯合網路，在各大學執行即時的天氣預報。本計畫支持之數值模式預報產品可以透過網路佈線的快速連結，各大學以及中央氣象局均可獲得即時預報之資訊。短期而言可以提供中央氣象局天氣預報作業更多的預報指引，並且可以提升學界數值模擬以及天氣預報之訓練；就長期而言，可以在國內訓練相關研究人員、開發新的數值預報技術（如系集預報）、校驗方法、深耕數值研究能力、增加學界以及氣象局之技術、學術交流等。除了製造氣象局與學術界更緊密的雙贏局面，也將對於國內學術研究和作業能力提升產生重大的影響。

目前，由美國 NCAR 發展的新一代中尺度數值天氣預報模式 WRF (The Weather Research and Forecasting Model, 簡稱 WRF 模式) 已經接近成熟，並且逐漸取代 MM5 模式。過去我們對梅雨季的降水預報模擬經驗都是架構在 MM5 模式上(例如：Chien et al. 2002；Hong 2003；Chien and Jou 2004)，為了能多瞭解 WRF 模式的物理參數特性，並比較 MM5 模式與 WRF 模式降水預報的異同，我們結合台灣師範大學、台灣大學、中央大學、及中央氣象局，針對 WRF 模式設計 12 組敏感度測試實驗，對 2004 年 5 月 15 日~6 月 15 日台灣地區梅雨季進行一整個月的連續積分，並對產品進行氣象場及 QPF 之校驗，本論文討論

QPF 校驗的部分，洪等（2006）則針對氣象場校驗之部分進行討論。第二章介紹模式設定與校驗方法，第三章為利用綜觀測站觀測資料進行 QPF 校驗的結果，第四章為利用台灣自動雨量觀測資料進行 QPF 校驗的結果，第五、六章分別為討論與結論。

二、模式設定與校驗方法

本實驗使用 WRF 模式雙層巢狀網格設定，外層粗網格 (D1) 是 140x105，解析度 45 公里，內層細網格 (D2) 是 100x100，解析度 15 公里 (圖 1)，垂直方向有 31 層，模擬預報時間 48 小時。初始場與邊界條件使用 NCEP GFS (舊稱 AVN) 的分析場與每六小時一筆的預報場。系集成員之

組成係在微物理方法、積雲參數法、邊界層參數法上產生變動，其中包括 3 組積雲參數法：Kain-Fritsch、Betts-Miller-Janjic、Grell-Devenyi 參數法，2 組邊界層參數法：Yonsei University (簡稱 YSU)、Mellor-Yamada-Janjic (簡稱 MYJ) 參數法，及 2 組微物理方法：WSM 5-class、Ferrier 法，共組合形成 12 個成員，詳細設定請參閱表 1，各物理方法之說明請參考 Skamarock et al. (2005)。

我們利用廣被氣象作業及研究單位所採用的公正預兆得分 ETS (Equitable Threat Score, Schaefer 1990) 及偏離指數 Bias 進行降水預報校驗。ETS 是在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

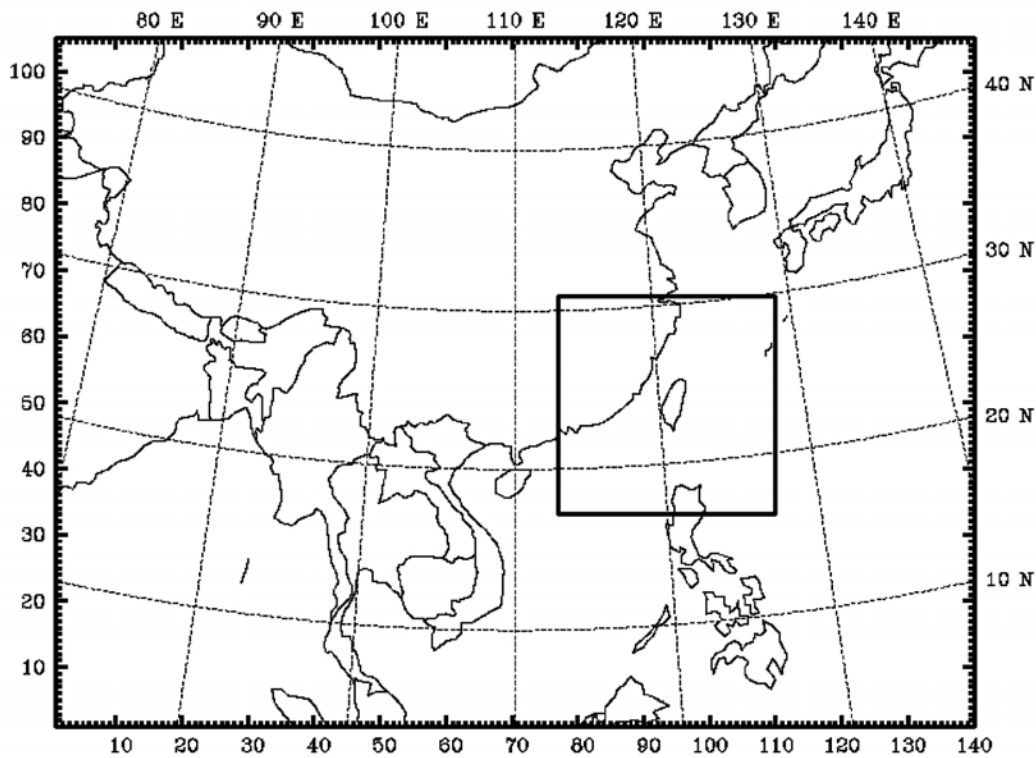


圖 1 模式網格設定。外層粗網格 (D1) 是 140x105，解析度 45 公里，內層細網格 (D2) 是 100x100，解析度 15 公里。

表 1 12 組 WRF 模式敏感度測試之物理參數設定。

模式成員	邊界層參數法	微物理方法	積雲參數法
P1	Yonsei University (簡稱 YSU)	WSM 5-class	Kain-Fritsch
P2	YSU	WSM 5-class	Betts-Miller-Janjic
P3	YSU	WSM 5-class	Grell-Devenyi
P4	YSU	Ferrier	Kain-Fritsch
P5	YSU	Ferrier	Betts-Miller-Janjic
P6	YSU	Ferrier	Grell-Devenyi
P7	Mellor-Yamada-Janjic (簡稱 MYJ)	WSM 5-class	Kain-Fritsch
P8	MYJ	WSM 5-class	Betts-Miller-Janjic
P9	MYJ	WSM 5-class	Grell-Devenyi
P10	MYJ	Ferrier	Kain-Fritsch
P11	MYJ	Ferrier	Betts-Miller-Janjic
P12	MYJ	Ferrier	Grell-Devenyi

率，ETS 分數愈高代表模式降雨預報愈準確，其定義如下：

$$ETS = \frac{H - R}{F + O - H - R} \quad (1)$$

上式的 F 為預測降雨的次數， O 為觀測降雨的次數， H 代表預報與觀測皆有降雨的次數， $R = FO/N$ 為隨機可正確預測降水的次數， N 為預報次數與觀測次數之和。偏離係數 $Bias = F/O$ ，即模式預測降水次數與觀測降水次數之比，當 $Bias$ 值大於 1 代表模式高估降水次數，小於 1 則代表模式低估降水次數，綜合 ETS 與 $Bias$ 得分的結果，可判斷降水預報的正確性。

由於模式預報長度為 48 小時，而我們的校驗

對象是 12 小時累積降水，因此將預報長度分為 0 ~ 12、12 ~ 24、24 ~ 36、36 ~ 48 小時四個時段，分別稱為 A、B、C、及 D 時段，其中模式開始預報的 A 時段為 spin-up 階段，其降水預報較不可靠，而 D 時段的降水校驗與 C 時段的降水校驗結果大致相似，只是 ETS 得分較低，因此為節省篇幅本文不分析 A 及 D 時段的降雨預報。另外，為了校驗不同降雨強度的預報準確度，我們使用 8 種降水門檻值分別是 0.3、2.5、5.0、10.0、15.0、25.0、35.0、50.0mm，根據各個門檻值判斷是否有降雨，以檢驗模式對該門檻值降水強度的預報能力。

圖 2 說明 2004 年梅雨季在台灣地區與 D2 範圍內的華南地區之降雨情形，台灣地區 12 小時累

積降水是利用 343 個自動雨量站的觀測降水取平均之後獲得此期間日、夜降水之分布概況，華南地區則以此區內綜觀測站觀測降水之平均來顯示。圖 2a 顯示台灣地區主要之降水發生在 5 月 20 日至 22 日之間，此波降水係導因於梅雨鋒面通過台灣伴隨中尺度對流系統所致，當時曾造成總統就職典禮之不便。除此之外，台灣地區尚有兩波次大的降雨系統，分別在 5 月底、6 月初及 6 月 9 日前後。而就日、夜降水分佈來看，此區日

間因熱力作用而導致降雨一般皆較夜間降雨大。華南地區的降水分佈大致上與台灣地區一致（圖 2b），除了 5 月 20~22 日之降水較弱之外，幾波主要降水發生的時間皆相符合，且略有領先台灣地區的情形，顯見應是梅雨鋒面影響而產生之降水，由華南地區漸移至台灣地區所致。至於降水偏弱一方面可能跟綜觀測站分佈較疏有關，另一方面則可能因為沒有如台灣地區有顯著地形可貢獻額外的舉升效應所致。同時，華南地區日、夜

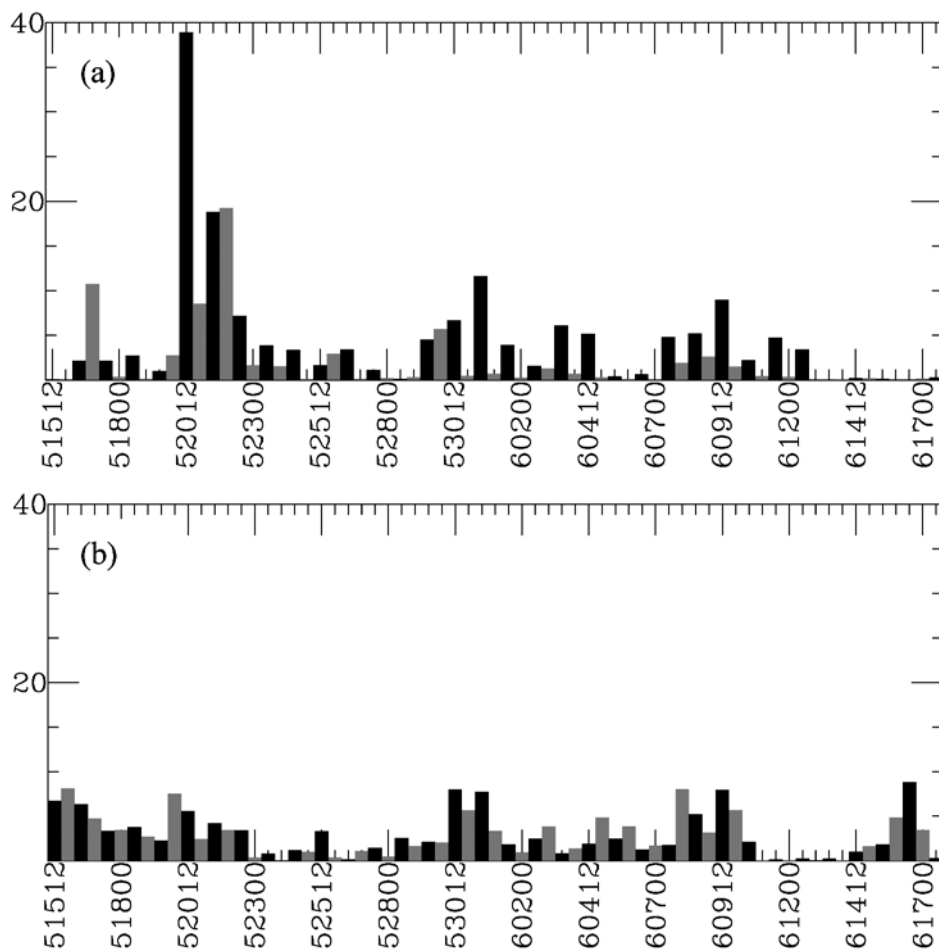


圖 2 2004 年 5 月 15 日至 6 月 17 日平均 12 小時累積雨量（單位：mm），黑色代表日間雨量（早上 8 時至晚上 8 時），灰色代表夜間雨量（晚上 8 時至早上 8 時）。(a) 台灣地區約 340 個自動雨量站之平均；(b) 華南地區約 70 個綜觀測站之平均。

降水的分佈也與台灣地區有異，並沒有如台灣地區有明顯日間多於夜間降水的現象，顯見台灣地區因為日間加熱而增強對流的效應遠比華南地區顯著。

三、利用綜觀測站觀測所進行的 QPF 校驗

本節利用綜觀測站 (SYNOP) 的觀測降水以校驗 2004 年梅雨季 12 組 WRF 模式成員的模式

降水，我們將 15 公里解析度 D2 的模擬降水資料內插至綜觀測站再進行降水校驗。D2 網格包含台灣本島及部分華南地區網格點，因此為了比較 D2 內台灣地區和華南地區的降水預報之差異，我們將降雨校驗分析依地區分成台灣地區 (約有 20 多站)、華南地區 (約有 70 多站) 二組，分別比較兩區校驗結果之異同。

(一)台灣地區

從模式成員 P1~P6 在 B 時段的 ETS 可見小

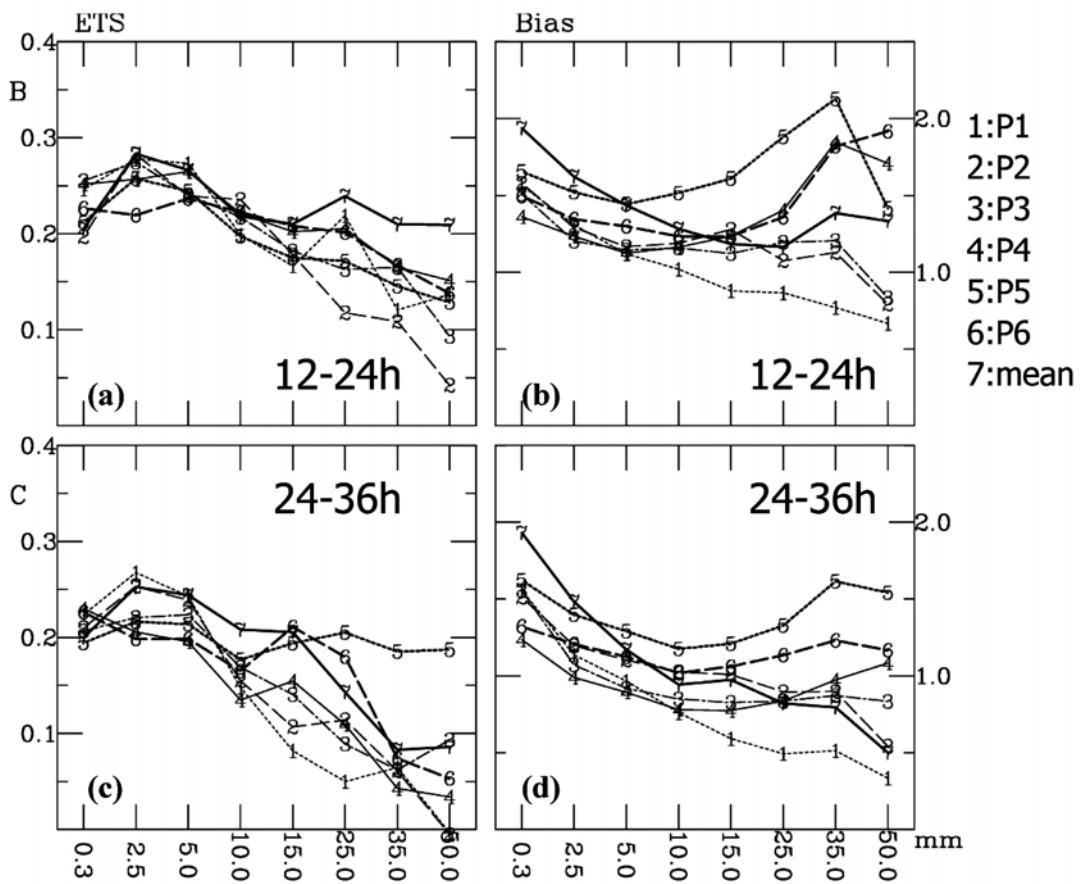


圖 3 2004 年梅雨季模式成員 P1~P6 及此 6 個成員系集平均降水預報在台灣地區綜觀測站校驗的 ETS 與 Bias 得分。橫軸是 12 小時累積雨量，單位是 mm。(a) B 時段(12-24h)ETS，(b) B 時段(12-24h)Bias，(c) C 時段(24-36h)ETS，(d) C 時段(24-36h)Bias。

於 10mm 的降雨模擬得分約在 0.2~0.3 之間 (圖 3a)，其中又以 P1 最好，但是大於 10mm 的降雨模擬平均而言以 P4、P6 較佳，其餘成員的 ETS 得分較低且相當分歧，而 P1~P6 系集平均的 ETS 得分排名在第 1~3 名之間，在大雨門檻得分最高。圖 3b 顯示此時段 Bias 得分以 P1~P3 最接近 1，其他成員及系集平均的降雨模擬都是高估。

圖 4a 為 B 時段模式成員 P7~P12 的 ETS，可見除了少數門檻 (例如：2.5、5mm) 之外，其餘降水門檻之得分皆較 P1~P6 (圖 3a) 之得分低。P7~P12 系集平均也是在這兩個降水門檻有

比 P1~P6 系集平均高的得分，其餘大於 10mm 的降雨則皆較 P1~P6 系集平均的得分低。就個別成員而言，在小雨部份難分軒輊，在大於 10mm 以上的降雨則以 P9、P12 的結果較好，但其 Bias 都有高估的情形 (圖 4b)。

C 時段 P1~P6 成員的 ETS (圖 3c) 可見，小雨預報能力較好的是 P1、P2 及 P1~P6 的系集平均，15mm 以上大雨預報能力以 P5 最為優異，其次才是 P6，這兩個成員的 Bias 顯現高估的情形 (圖 3d)，可見模式仍然預報太多的降水。而 C 時段 P1~P6 的 ETS 平均得分都比 B 時段低，顯

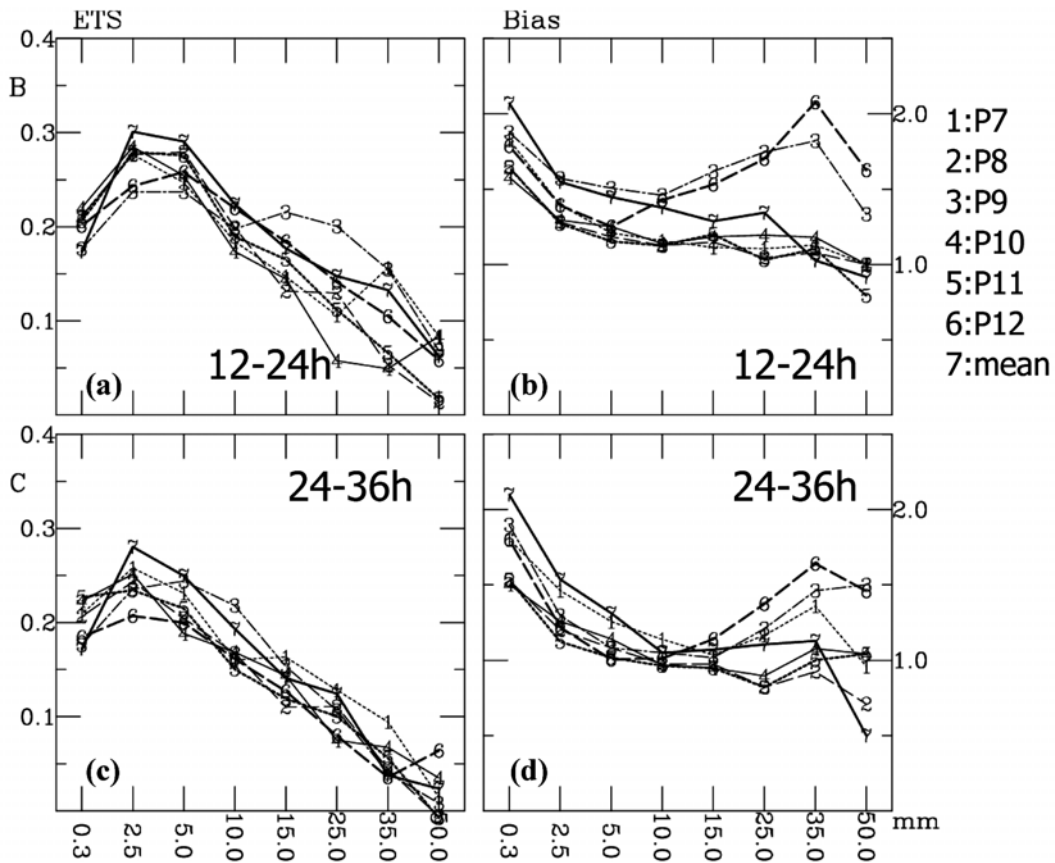


圖 4 同圖 3，但為成員 P7~P12。

見 C 時段的降雨預報能力比 B 時段差。

圖 4c 是台灣地區 C 時段模式成員 P7~P12 的 ETS，其中可見個別成員的表現差異不大，小雨門檻約以 P7、P8、P9 的預報表現較好，分數在 0.2~0.25 之間，15mm 以上的大雨預報所有成員的 ETS 得分都不高，其中只有 P7 相對較好。此外，P7~P12 系集平均的表現大約排在第 2~3 名，而且 P7~P12 的降雨預報能力比 P1~P6 略為遜色；這組成員的 P8、P10 降水預報 Bias 最接近 1，使用 Grell-Devenyi 積雲參數法的 P9、P12 降雨預報偏多。

(二)華南地區

接下來討論華南地區的降水預報表現，此區為 D2 扣除台灣地區後的剩餘範圍，其綜觀測站約有 70 多站，大都集中在華南陸地上。圖 5a、5b 分別是 B 時段模式成員 P1~P6 降水校驗的 ETS 與 Bias，從圖 5a 可見 B 時段所有成員的 ETS 值隨著降雨門檻提高而下滑，顯見小雨模擬都比 15mm 以上的大雨模擬表現好，並且成員 P1、P3、P4 的降雨模擬綜合而言表現最好，成員 P6 表現最差，而 P1~P6 的系集平均的表現在小雨門檻位居第三、四名，但在 15mm 以上則為最好。Bias

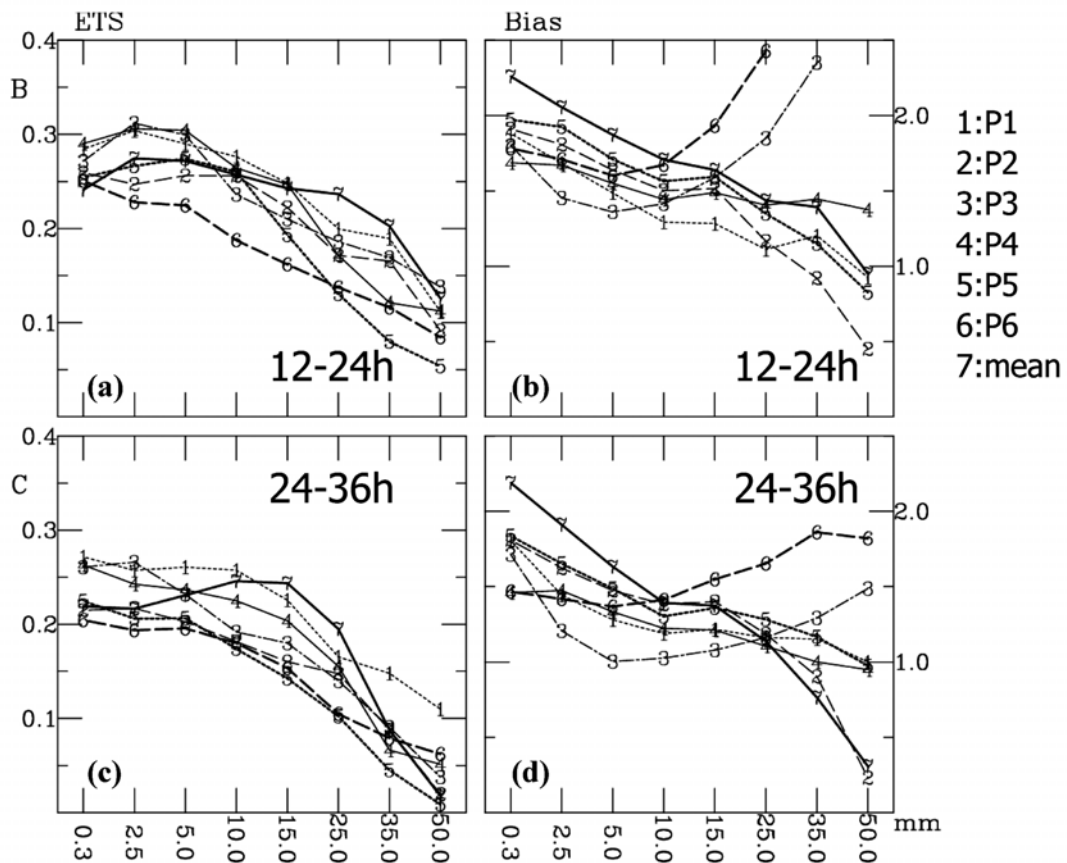


圖 5：同圖 3，但為在華南地區（即 Domain2 去除台灣地區與菲律賓後的剩餘區域）綜觀測站降水預報校驗的 ETS 與 Bias 得分。

顯示模式成員 P1~P6 對 15mm 以下的小雨都高估(圖 5b)，大雨時則只有 P1 的降雨模擬較無偏差，P2 的 Bias 則是隨降雨門檻增加而逐漸降低至 1 以下，P3、P6 (使用 Grell-Devenyi 積雲參數法) 的 Bias 則是大幅攀升至 2.0 以上，可見 P3、P6 高估大雨的情形相當嚴重，顯見使用 Grell-Devenyi 積雲參數法會讓大雨預報次數多於觀測次數。

圖 6 為模式成員 P7~P12 包含華南地區所有綜觀測站的降水校驗。在 B 時段所有成員的 ETS 值(圖 6a)與 P1~P6 相似，皆是隨著降雨門檻

提高 ETS 得分下降，顯示不論何種物理參數組合對小雨的模擬能力都高於大雨。另外，從圖 6a 可見在小雨門檻，P7 與 P10 的小雨預報最佳，在大雨門檻則以 P7、P8、P11 較佳，P7~P12 的系集平均的 ETS 排名在小雨表現不佳，但在 15mm 以上得分最高。綜合而言，P1~P6 系集平均的得分高於 P7~P12 系集平均，因此 YSU 邊界層參數法較 MYJ 邊界層參數法適合此區之降水模擬。從 Bias 部分(圖 6b)可見所有成員皆高估降雨次數，尤其 P9、P12 最嚴重，其 Bias 在降雨門檻大於 15mm 時上升至 2.0 以上，顯示使用

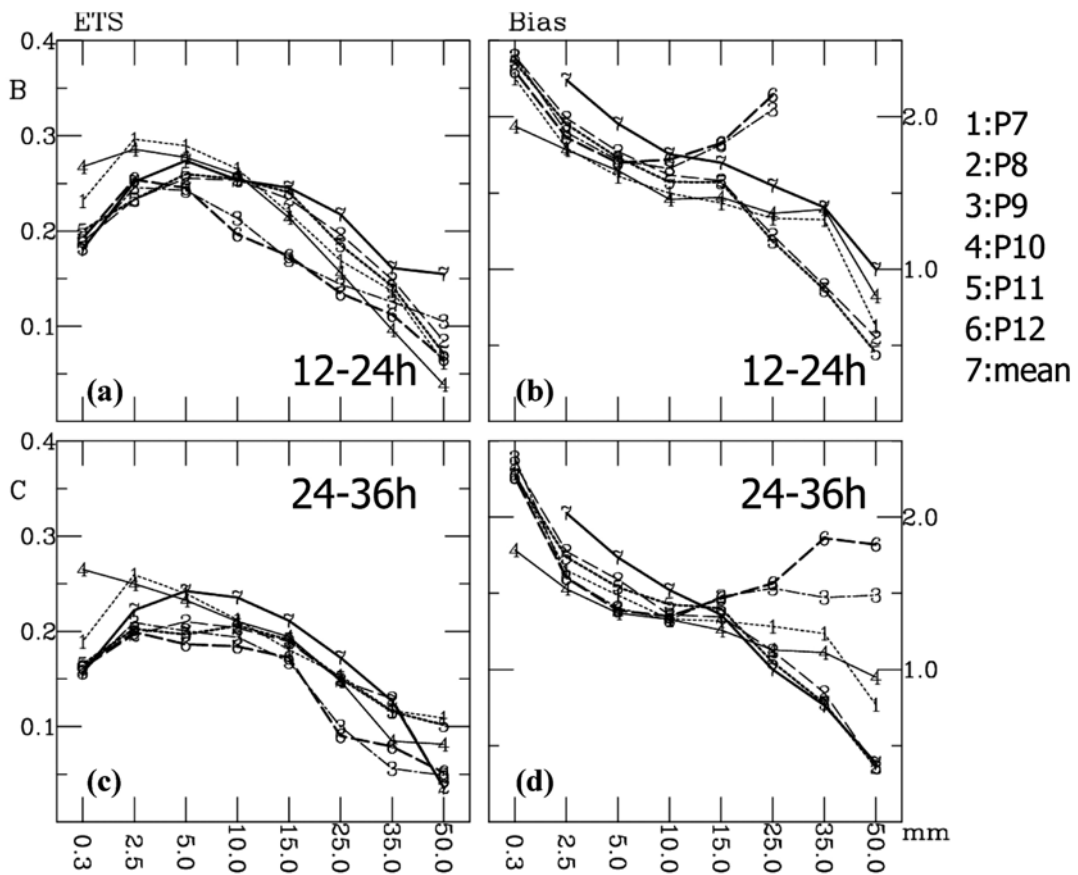


圖 6 同圖 5，但為成員 P7~P12。

Grell-Devenyi 積雲參數法使得大雨預報次數偏多；其餘的成員，Bias 則隨降水門檻的增加而下降。

C 時段成員 P1~P6 在華南地區綜觀測站的降水校驗(圖 5c)以 P1 的 ETS 得分最高，P4 其次，其餘成員得分相近，並且所有成員隨降雨門檻提高而 ETS 得分逐漸降低。整體看來，P1~P6 系集平均的 ETS 得分比 B 時段較低，排名約在第 1~3 名左右；圖 5d 顯示所有成員 15mm 以下降雨門檻預報偏高的次數較多，大雨門檻只有 P2 會低估降雨，而且使用 Grell-Devenyi 積雲參數法的 P3、P6 大雨預報偏高機會比時段 B 少，整體看來，以 P1、P4 的 Bias 最好，在大多數門檻值皆最接近 1。

P7~P12 在 C 時段的 ETS (圖 6c) 也和 P1~P6 的 ETS (圖 5c) 分布情形相似，降雨預報能力最高的是第 1 個成員，即 P7，不過所有成員的降雨預報能力都比 P1~P6 稍低；圖 6d 顯示在 C 時段成員 P7~P12 的 Bias 除了 P8、P11 在大雨預報次數較觀測偏少之外，其他成員的大雨預報次數都是偏多，另外，P9、P12 的大雨預報偏多的情形已較 B 時段有改善。

(三)小結

比較台灣地區、華南地區的降水校驗，以成員 P1~P6 來看，台灣地區在 10mm 門檻以下的 ETS 得分(圖 3a、圖 3c)比華南地區(圖 5a、圖 5c)略低一些，即表示台灣地區的小雨模擬能力比華南地區差，比較不容易模擬準確；在 B 時段，華南地區的 ETS 得分以 P1 最高、P6 最低，台灣地區小雨模擬也是 P1 最好，但是在 10mm 降水門檻以上則是 P4、P6 表現較佳，所以使用

成員 P6 在台灣地區有很好的大雨預報，但是卻不適用於華南地區的降雨預報；在 C 時段，華南地區的降雨模擬 ETS 得分(圖 6c)仍是 P1 最高，P5、P6 最低，台灣地區小雨模擬 ETS 得分(圖 4c)也是 P1 最高，大雨模擬則為 P5 最好、P6 其次。若比較成員 P7~P12 在華南地區與台灣地區的表現，可以從圖 6a、圖 6c 看到 P7 在 B、C 時段降雨預報 ETS 表現不錯，但是在台灣地區(圖 4a、圖 4c)成員 P7 只在小雨預報能力較高，大雨則是 P9 與 P12 預報結果較佳。

綜合以上討論可知華南地區的降雨預報比較適合使用 P1、P7 這兩組模式物理設定，也就是 WSM 5-class 微物理法搭配 Kain-Fritsch 積雲參數法，台灣地區 15mm 以下的小雨模擬也是使用此模式物理組合最佳，而 15mm 以上大雨模擬則以 P3、P6、P9、P12 這些使用 Grell-Devenyi 積雲參數法的成員較好。不過就 P1~P6 與 P7~P12 的綜合比較發現，使用 YSU 邊界層參數法的成員表現一般皆較使用 MYJ 邊界層參數法的成員好。Zhang and Zheng (2004)指出 MYJ 邊界層參數法，往往因為低估向上傳送的地面熱通量及逆溫層的反梯度熱通量，導致邊界層內溫度日夜變化、混合層厚度均有低估的情形；而 YSU 邊界層法相對而言較能準確反應真實的邊界層結構，因此可以幫助模擬較準確之降水。

四、利用台灣自動雨量觀測所進行的 QPF 校驗

本節針對 2004 年梅雨季的 12 個 WRF 模式成員和台灣自動雨量站觀測之降水進行 QPF 校驗，校驗方式與前一節相同，但是由於台灣自動雨量觀測站共有 343 個，其分布比 15 公里解析度

的細網格格點分布密集，所以我們將細網格格點中心之 15 公里見方內之自動雨量站降水資料取平均再與模式降水進行校驗，此區的細網格格點總數約有 141 點，詳見 Chien and Jou (2004)。

從 B 時段 P1~P6 成員及此 6 組的系集平均降水 ETS 得分 (圖 7a) 可見，15mm 以下的小雨預報 P1~P6 及其系集平均的 ETS 得分都在 0.2~0.3 之間，其中 P1~P3 的分數最高，25mm 以上大雨的 ETS 得分較高的則是 P4，降雨預報能力較佳，其餘各成員分數較低且較分歧，P1~P6 系集平均的 ETS 得分不錯，尤其在中、大雨排名約為第一。B 時段 Bias (圖 7b) 的表現可見，以

P2 在 15mm 以下降水門檻的表現較穩定且最接近 1，其次表現較好的有 P1、P3，在 15mm 以上的大雨，則只有 P2 的 Bias 仍接近 1，P1 的 Bias 約為 0.5，顯示低估降雨，而其他成員的 Bias 都在 1.5 以上、皆高估大雨。

模式成員 P7~P12 及其系集平均的 B 時段降水預報 ETS (圖 8a) 顯示，P7~P12 這六組成員在 15mm 以下小雨門檻的 ETS 得分表現接近，都在 0.2~0.3 之間，並以 P7、P10 表現最好；當降雨門檻提升到 15mm 以上，眾成員的 ETS 得分下降至 0.1~0.2 之間，其中 P8、P11、P12 得分較其他成員高。P7~P12 系集平均的得分排名約在

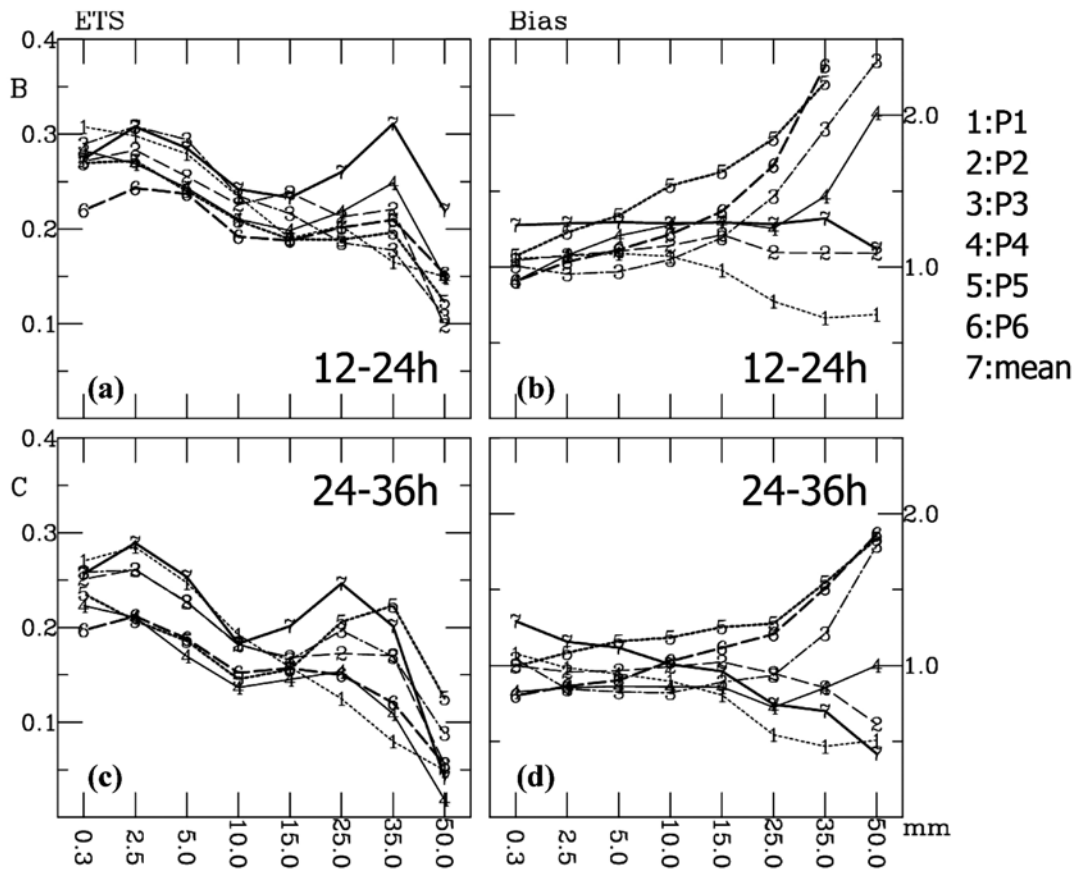


圖 7 同圖 3，但為利用台灣地區自動雨量站降水校驗之結果。

1~3 名之間，在 2.5~15mm 的門檻降雨預報表現最佳。Bias (圖 8b) 方面，以 P8、P11 表現最穩定、偏差值最接近 1，成員 P9、P12 在 15mm 以上大雨門檻的 Bias 上升到 2.0 以上，顯示出這兩個使用 Grell-Devenyi 積雲參數法的成員特別高估大雨。與 P1~P6 (圖 7a) 比較可見使用 MYJ 邊界層參數法的 P7~P12 成員比使用 YSU 邊界層參數法的 P1~P6 成員有較低的 ETS，可見 YSU 邊界層參數法較適合台灣地區降水模擬。

在 C 時段，成員 P1~P6 及其系集平均的降水預報 ETS 分數 (圖 7c) 在 15mm 以下小雨預報以 P1~P3 最高，分數在 0.2~0.3 之間，15mm 以

上則是 P5 的預報最好，P3 其次，其他成員的 ETS 得分較低，降雨預報能力較差，而 P1~P6 系集平均的 ETS 得分排名在第 1~2 名之間，可見其降雨預報有不錯的成效。而從圖 7d 來看，P1~P6 成員在 C 時段 15mm 以下小雨門檻的 Bias 都很接近 1，其中又以 P1、P2 的 Bias 最接近於 1，因此可知 P1~P6 成員對於小雨模擬無太多偏差；當降雨門檻大於 15mm，成員 P3、P5、P6 的 Bias 值逐漸升高接近 2.0，發生高估降雨的現象，其餘成員則為低估降雨。而模式成員 P7~P12 在 C 時段 ETS 得分 (圖 8c) 的平均表現比 B 時段 (圖 8a) 低，可見 C 時段的降水預報能力比 B

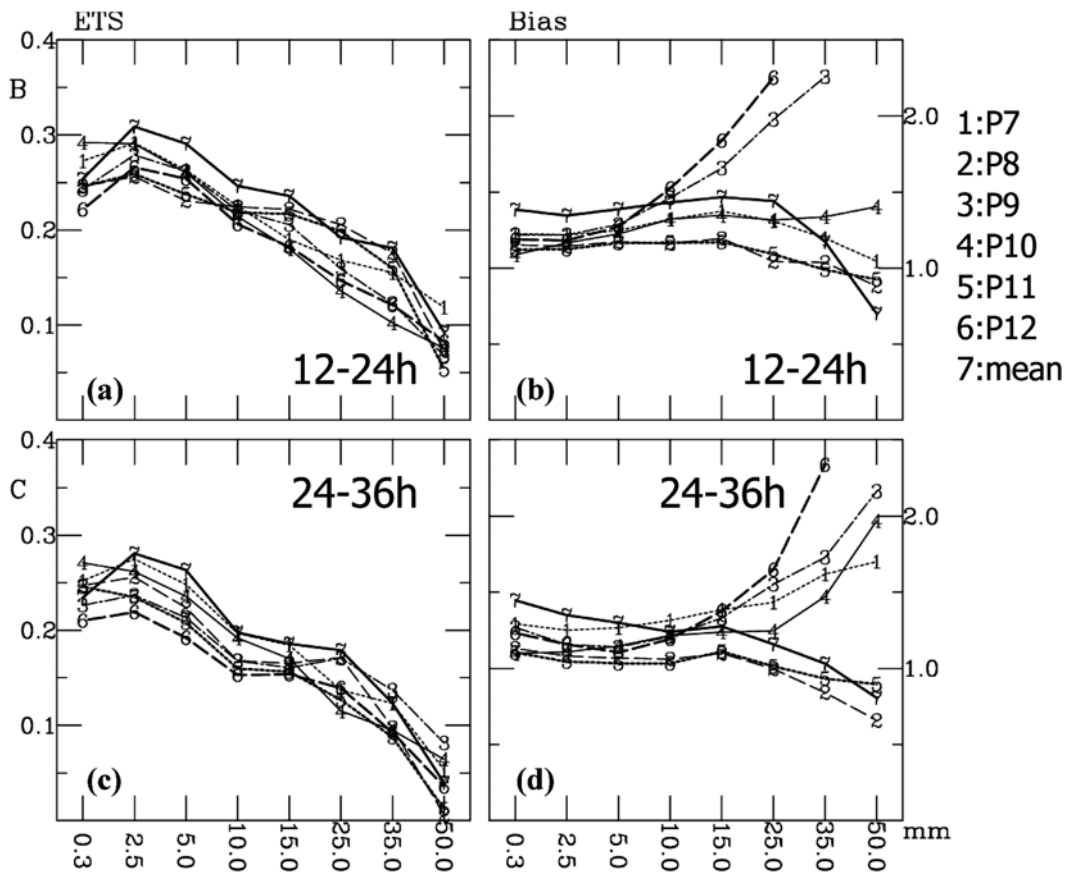


圖 8 同圖 7，但為成員 P7~P12。

時段差，在降雨門檻低於 15mm 以下時，P7~P12 模式成員及其系集平均的 ETS 分數（圖 8c）在 0.15~0.25 之間，其中以 P7~P12 的系集平均、P7、P10 表現最好，當降雨門檻上升到 15mm 以上，P7~P12 模式成員及其系集平均的 ETS 分數逐漸下降到 0.05 左右，並且只有 P9、P7~P12 的系集平均表現較好，其他成員在大雨模擬的表現較分歧。Bias 的結果（圖 8d）可見不論降雨門檻高低，成員 P11 的表現皆最接近 1，其他成員在 15mm 以下降雨門檻 Bias 分數都在 1.0~1.5 之間，顯示些微高估小雨，在 15mm 降雨門檻以上，除了 P8、P11 之外，大多數成員的 Bias 值都皆增至 2.0 以上，可見它們都高估大雨。

由以上可見，使用 WRF 模式搭配 MYJ 邊界層物理的 P7~P12 成員，其成員間的 ETS 得分分佈（圖 8a、圖 8c）和使用 YSU 邊界層物理的 P1~P6（圖 7a、圖 7c）的相似，不過仍以 P1~P6 之得分略高於 P7~P12 之得分，主要因為使用 MYJ 邊界層物理的模擬會讓模擬降水次數偏多，而使得降水預報技術下降。同時兩者皆以 Kain-Fritsch 積雲參數法與 WSM 5-class 微物理過程的 P1 或 P7 的 ETS 得分較高，但在大雨門檻，其得分下滑，同時也沒有任何成員可在大雨門檻一直保持優勢。

五、討論

本研究針對華南地區僅以綜觀測站（SYNOP）之觀測進行定量降水校驗；但在台灣地區則分別以綜觀測站與自動雨量站之觀測資料進行定量降水校驗，雖然兩者校驗範圍相同，但是前者是將自動雨量站降水資料內插至 15 公里解析度的細網格點，在台灣地區的細網格點約為

141 點，後者是將 15 公里解析度細網格降水資料內插到綜觀測站上再進行 QPF 降水校驗，在此區的綜觀測站約有 20 多站，兩者校驗方法不同，且樣本數差異大，因此有必要仔細比較並討論其結果之差異。

綜合比較這兩種校驗方式的結果可見，不論在 B、C 時段，台灣地區自動雨量站的降水校驗 ETS（圖 7、8）平均高於台灣地區綜觀測站的降水校驗（圖 3、4），這可能是受到校驗解析度的影響，因為台灣地區綜觀測站的解析度較低，將 15 公里解析度細網格降水資料內插到綜觀測站上的數值誤差可能比直接在網格點上做校驗者大，所以 ETS 得分較低。同時，因為自動雨量站的校驗樣本約為綜觀測站的 5 倍，導致利用自動雨量站校驗時，成員之間分數的分佈較具一致性，而利用綜觀測站校驗的結果，各成員的表現起伏較大。另外，從 Bias 的分佈可見，台灣地區綜觀測站的校驗呈現小雨有明顯高估的情形，而自動雨量站的校驗則呈現大雨有明顯高估的情形。這可能因為綜觀測站的校驗是以模式資料內插至測站，只要測站周圍有任一網格點有降水，就容易在測站得到雨量值，因此預報之降雨次數在小雨門檻容易造成高估。相反地，自動雨量站之校驗是將網格點周圍的自動雨量站資料平均而得觀測降水，再與模式降水比較，故在小雨門檻不會出現高估的情形，但因為觀測降水經過平均之後，較大的雨量因被平滑（Smooth）而不容易在網格點上出現大雨的觀測值，所以在大雨門檻模式相對比較容易出現高估的情形。綜而言之，由以上比較我們建議其他研究者進行降水校驗時，仍應以台灣地區自動雨量站觀測的降水校驗為主。

若以物理組合觀之，這兩種校驗方式不管在 B 或 C 時段，小雨模擬都是以 P1、P7、P10 的 ETS 得分較高。在大雨門檻則較為分歧，台灣地區自動雨量觀測的降水校驗在 B 時段大雨模擬 ETS 表現最好的是 P4，其次為 P8、P11、P12，C 時段大雨模擬 ETS 表現最好的是 P5，其次為 P3、P9；而台灣地區綜觀測站的降水校驗則以 P3、P6、P9、P12 這些使用 Grell-Devenyi 積雲參數法的成員在大雨門檻有較高的 ETS 得分。若比較 YSU 邊界層參數法與 MYJ 邊界層參數法之異同可見，使用 MYJ 邊界層參數法時，降雨有明顯高估的情形，尤其在小雨門檻（例如圖 6），導致其表現不如 YSU 邊界層參數法好。綜合以上可知，台灣地區的降水模擬應以 Kain-Fritsch 積雲參數法、WSM 5-class 微物理方法、與 YSU 邊界層法的物理組合作為首選，但是 Kain-Fritsch 積雲參數法在大雨有低估的情形，此時 Grell-Devenyi 積雲參數法的表現還算穩定，可首選為台灣地區大雨模擬的物理設定。

六、結論

本文針對 2004 年 5 月 15 日~6 月 15 日台灣地區梅雨季，利用 12 組不同物理組合的 WRF 模式之模擬降水和綜觀測站或自動雨量站降水觀測進行 QPF 降水校驗，分析結果歸納成下列結論：

(1) 模式在 12~24 小時的降水預報能力最好、預報最準確，隨模擬時間增長，預報能力下降。(2) 模式的降雨預報能力隨降雨門檻上升而下降，所以模式對小雨的預報能力比大雨好。(3) 模式系集平均的降水預報能力不錯，表現大多排名在 1~3 名之間。(4) 因為使用 MYJ 邊界層參數法時，

降雨有明顯高估的情形，故採用 YSU 邊界層參數法比 MYJ 邊界層參數法能得到較好的降水模擬。(5) 華南地區的 QPF 降雨校驗結果顯示，此區最適合採用 WSM 5-class 微物理法搭配 Kain-Fritsch 積雲參數法，但是此物理組合有高估小雨、低估大雨的缺點。(6) 在台灣地區的小雨模擬也以 WSM 5-class 微物理法搭配 Kain-Fritsch 積雲參數法有最好模擬結果，但是 Kain-Fritsch 積雲參數法在大雨表現不佳；相對地，此區大雨模擬較適合採用 Grell-Devenyi 積雲參數法，不過，使用 Grell-Devenyi 積雲參數法也仍有高估大雨的缺點。(7) WRF 模式對華南地區的 QPF 預報表現優於台灣地區，顯見台灣地區之複雜地形造成 QPF 預報難度之增加。(8) 台灣地區自動雨量站的降水校驗 ETS 平均高於台灣地區綜觀測站的降水校驗；同時，前者因將網格點周圍的自動雨量站資料平均而得觀測降水，再與模式降水比較，易在大雨出現高估的情形，後者以模式資料內插至測站，易在小雨門檻造成高估的情形。

致 謝

本研究在中央氣象局委託計畫 MOTC-CWB-93-6M-06 及國科會研究計畫 NSC93-2625-Z-003-001 支持下完成。

參考文獻

簡芳菁、蕭育琪、周仲島、林沛練、楊明仁、洪景山、鄧仁星、林慧娟，2003：MM5 系集降水預報之校驗。大氣科學，**31**，77-94。
洪景山、林得恩、劉素屏、周仲島、簡芳菁、林沛練、張文錦、繆璿如、陳致穎、雷銘中，

- 2006 : WRF 模式之敏感度測試，第一部分：探空測站上的校驗。大氣科學，**34**, 241-260。
- Chien, F.-C., Y.-H. Kuo, and M.-J. Yang, 2002 : Precipitation forecast of the MM5 in Taiwan area during the 1998 Mei-yu season. *Wea. Forecasting*, **17**, 739–754.
- Chien, F.-C., and B. J.-D. Jou, 2004 : MM5 ensemble mean precipitation forecasts in the Taiwan area for three Mei-yu seasons. *Wea. Forecasting*, **19**, 735–750.
- Colle, B. A., C. F. Mass, and K. J. Westrick, 2000 : MM5 precipitation verification over the Pacific Northwest during the 1997-99 cool seasons. *Wea. Forecasting*, **15**, 730–744.
- Grimit, E. P., and C. F. Mass, 2002 : Initial results of a mesoscale short-range ensemble forecasting system over the Pacific Northwest. *Wea. Forecasting*, **17**, 192–205.
- Hong, J.-S., 2003 : Evaluation of the high-resolution model forecasts over the Taiwan area during GIMEX. *Wea. Forecasting*, **18**, 836–846.
- Schaefer, J. T., 1990 : The critical success index as an indicator of warning skill. *Wea. Forecasting*, **5**, 570–575.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2005 : A description of the advanced research WRF version 2. *NCAR/TN-468+STR.*, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
- Zhang, D.-L., and W.-Z. Zheng, 2004 : Diurnal cycles of surface winds and temperatures as simulated by five boundary layer parameterizations. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 157–169.

A Sensitivity Study of the WRF Model

Part II: Verification of Quantitative Precipitation Forecasts

**Fang-Ching Chien¹ Jing-Shan Hong² Win-Jing Chang¹
Ben Jong-Dao Jou³ Pay-Liam Lin⁴ Te-En Lin³ Su-Ping Liu³
Hsuan-Ju Miou⁴ Chih-Ying Chen⁴**

¹Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University

²Central Weather Bureau

³Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University

⁴Department of Atmospheric Sciences, National Central University

(Manuscript received 30 September 2005; in final form 08 September 2006)

ABSTRACT

This paper presents a quantitative precipitation forecast (QPF) verification study of the Weather Research and Forecasting (WRF) model during the 2004 Mei-yu season. Twelve members of WRF simulations, with different physics combinations, were run twice daily from 15 May to 15 June 2004. The 12-h accumulated precipitation forecasts from the 15-km grid were verified using rainfall observations in Taiwan and Southeast China.

The equitable threat score (ETS) shows that the precipitation forecasts between 12 and 24 h of simulation had the highest scores among other time periods and the scores decreased as the thresholds increased. The model with the Yonsei University (YSU) PBL performed better than that with the Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) scheme. In Southeast China, the combination of the WRF Single-Moment (WSM) 5-class microphysics scheme and the Kain-Fritsch cumulus parameterization scheme was the best among others. In Taiwan, this physics combination also performed the best at small rainfall thresholds, but at large thresholds the Grell-Devenyi cumulus parameterization scheme is recommended. The weakness of this scheme, however, is its tendency of over-prediction. Finally, the ensemble mean issued consistently good rainfall forecasts, usually above the top 30% among all single members.

Key words: WRF model, Mei-yu season, Quantitative precipitation forecast