

# WRF模式之敏感度測試：探空測站上的校驗

洪景山<sup>1</sup>、林得恩<sup>2</sup>、劉素屏<sup>2</sup>、周仲島<sup>2</sup>、簡芳菁<sup>3</sup>、林沛練<sup>4</sup>、  
張文錦<sup>3</sup>、繆璿如<sup>4</sup>、陳致穎<sup>4</sup>、雷銘中<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中央氣象局，<sup>2</sup>國立台灣大學大氣科學研究所

<sup>3</sup>國立台灣師範大學地球科學研究所，<sup>4</sup>國立中央大學大氣物理研究所

## 摘要

本研究主要是針對 WRF 模式 12 種物理參數化法組合，就 2004 年梅雨季（2004 年 5 月 15 日~6 月 15 日），以美國 NCEP（National Center for Environmental Prediction）AVN 全球模式分析場為初始場，進行連續 30 天、每天 2 次，每次 48 小時的數值預報；並利用東亞地區探空站觀測之氣象場（包括高度場、溫度場和水氣場）進行校驗，以評估 WRF（Weather Research and Forecast model）模式不同物理參數化法組合在東亞地區的預報能力。

分析結果顯示，模式預報誤差特性不因不同解析度（45 和 15 公里）和預報時間而有明顯差異；選擇不同邊界層參數化法對模式預報誤差影響最顯著、積雲參數化法次之、微物理參數化法更次之。不同邊界層參數化法導致低層大氣不同的水氣和溫度預報誤差，並連帶反映在高度場的誤差特性。

在本研究的實驗範疇中，就探空站上的氣象場校驗而言，總結建議以 YSU + WSM5 + KF 為最佳的物理參數法組合，以提供 WRF 模式在東亞地區應用參考之用。

## 一、前言

對於數值天氣預報而言，一個客觀的校驗系統可以說是整個作業環節中最重要的部分之一。透過校驗系統所呈現出來的客觀結果，可以讓使用者具體瞭解模式的可詮釋範圍，也可以讓發展者明瞭模式系統的改進方向。因此，分析模式的校驗結果並據以賦予合理的詮釋，以及校驗方法的發展與改進，是數值天氣預報發展的一個重要領域。

對於例行性的數值天氣預報作業而言，累積長時間的預報結果，並進一步校驗其預報誤差，是深入瞭解數值模式之系統性行為所必須的基礎工作。有關長時間數值天氣預報校驗的相關研究表現在各個領域，例如考慮區域和季節的差異、不同模式參數法組態的影響、不同積分範圍、解析度、不同模式間的比較等。此外，各式校驗方法也不斷被提出，用以更明確突顯出校驗結果所表達的意涵（Mesinger 1996；Skamarock 2004）。

近年來，由於計算機資源大幅增加，因此不僅是作業單位，學術單位也有能力進行（準）數值天

氣預報實驗，因此，針對東亞地區或台灣地區所進行之數值天氣預報校驗的相關研究也持續進行中。例如以中央氣象局全球模式為主的校驗分析（Hong 2001），MM5 模式之氣象場與定量降水預報校驗（Chieh et al. 2002；Hong 2003；簡等 2003；Chieh and Jou 2004；Yang et al. 2004）等。然而，以上之校驗成果雖然可以互相比較，並且也指出造成預報誤差的可能原因，然而可以確定的是，因應不同模式或使用不同資料同化系統所產生的初始場，其預報誤差及其統計特性仍有必要被重新檢視與分析。

WRF（Weather and Research Forecast model）是美國近年來集合美國學術界和作業單位之人力所發展之下一代中尺度數值模式。WRF 的設計不僅要提供給學術單位研究之用，同時在設計之初也特別考慮進去作業的需求，例如特別強化資料同化部分，以便預報模式與分析模組能充分結合；模式程式碼高度模組化以及平行化，以使充分利用計算機資源而達到作業預報時限的要求等，因此 WRF 模式可以很有效地將學界的研究成果移植到作業單位，以縮

表一：各物理參數化法的組合列表

組別	PBL	MPS	CUP
P01	YSU	WSM5	KF
P02	YSU	WSM5	BMJ
P03	YSU	WSM5	Grell-Devenyi
P04	YSU	Eta Ferrier	KF
P05	YSU	Eta Ferrier	BMJ
P06	YSU	Eta Ferrier	Grell-Devenyi
P07	MYJ	WSM5	KF
P08	MYJ	WSM5	BMJ
P09	MYJ	WSM5	Grell-Devenyi
P10	MYJ	Eta Ferrier	KF
P11	MYJ	Eta Ferrier	BMJ
P12	MYJ	Eta Ferrier	Grell-Devenyi

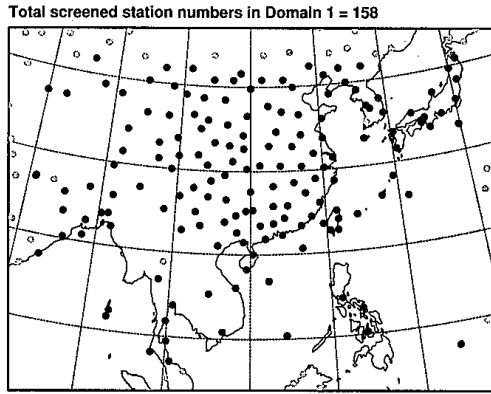


圖 1：模式粗網格積分範圍，圓點是積分範圍內所有的探空站，其中黑圓點是本研究列入校驗的探空測站。

短技術移轉的門檻。由於WRF 是美國集中大量資源所開發的下一代中尺度模式，雖然目前仍處於發展階段，但其未來的發展趨勢值得吾人深切關切。

WRF 模式提供多種大氣物理參數法選擇，可供大氣研究或作業單位選用，由於不同物理參數法有不同的假設，也因此可能可適用於不同的天氣型態、不同地理區域或在不同條件下必須作某種程度的調校。為此，本研究即是針對 WRF 模式不同物理參數方法的組合，評估其在東亞地區梅雨季期間的預報能力，並希望在收集一段時間之預報校驗後能進一步明瞭：1. 何種 WRF 物理參數化法組合最適用於東亞地區的數值天氣預報？2. WRF 合理的預報誤差大小？3. 預報誤差的統計特性？本研究之分析結果可以具體提供給有意使用 WRF 進行數值天氣預報之作業單位或學術單位參考引用，並可作為模式預報能力的參考依據。

## 二、模式設計與校驗方法

本研究使用 WRF V 2.0.3，就 2004 年梅雨季（2004 年 5 月 15 日~6 月 15 日），以美國 NCEP（National Center for Environmental Prediction）AVN 全球模式分析場為初始場，進行連續 31 天、每天兩次（0000 UTC 和 1200 UTC），每次 48 小時的數值預報。模式設計為兩層巢狀網格，積分範圍如圖 1 所示，粗網格（D1）水平解析度為 45 公里，網格點數目為 140×105；細網格（D2）水平解析度為 15 公里，網格點數目為 100×100，垂直方向則為 31 層。

表一為本研究所欲探討之物理參數化法的實驗組合列表，其中包括 Yonsei University（簡稱 YSU）和 Mellor - Yamada - Janjic TKE（簡稱 MYJ）兩種邊界層參數法；WRF Single-Moment 5-class（簡稱 WSM5）和 Eta Ferrier 兩種微物理參數化法；以及 Kain-Fritsch（簡稱 KF）、Betts-Miller-Janjic（簡稱 BMJ）和 Grell-Devenyi ensemble 等三種積雲參數化法。

本研究主要是利用東亞地區探空站觀測之氣象場進行校驗，粗、細網格積分範圍列入校驗的探空數目分別為 158 和 17 站（分佈如圖 1 所示），這些探空站均必須滿足以下兩個條件：

1. 所選取之測站在實驗期間內（2004 年 5 月 15 日~6 月 15 日共 62 次預報）至少有 50 次以上觀測，以確保每一個測站均能有足夠的取樣數目。
2. 距離邊界 5 個格點範圍內的探空站排除不用，以避免因邊界條件所導致之不合理預報。
3. 由於校驗是在等壓面進行，為避免地面以下之等壓面（例如青康藏高原）的氣象場因外插而產生不合理的誤差，因此，地面以下之模式資料均捨棄不用。

## 三、校驗結果

模式預報隨著預報時間增加而增加，整體來

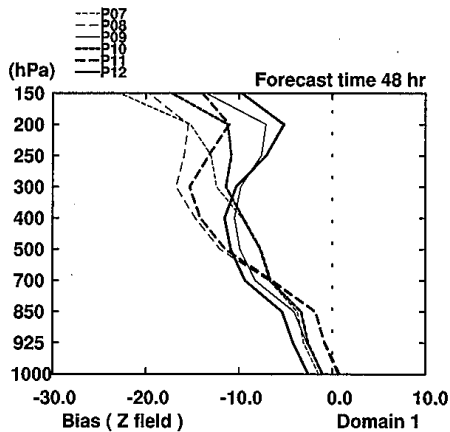
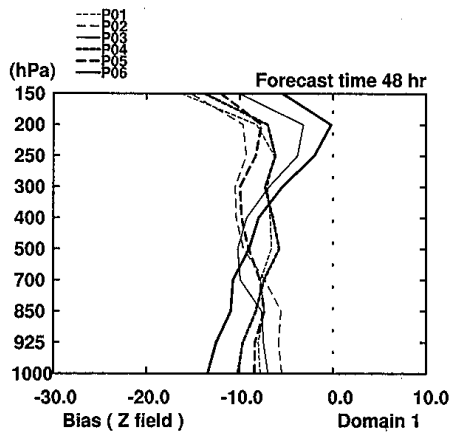


圖 2 模式 48 小時預報之高度場的平均偏差。

說，24-hr 和 48-hr 預報誤差增加約 20~30%。此外不同解析度 (D1 和 D2) 的預報誤差特性 (包括量值和空間、垂直分佈) 也都非常接近。由於 D1 和 D2、以及 24 小時和 48 小時的預報誤差特性並沒有太大的差異，因此，為節省本文討論的篇幅，以下有關各變數預報誤差特性的探討將著重在 D1 的 48 小時預報場。

圖 2 是模式 48 小時預報水平平均之高度場平均偏差的垂直分佈，其中 P01~P06 與 P07~P12 分成兩組，此兩組的差別在於前者使用 YSU 邊界層參數化法，後者使用的是 MYJ 邊界層參數化法。圖 2 顯示各層之高度場的平均偏差的絕對值均小於 20 公尺，和作業單位之數值天氣預報比較而言 (Mitchell et al. 1996; Hollingsworth 1986, Hong 2001)，本研究之預報誤差的平均偏差值仍屬合理，不僅是高度場，溫度場和水氣場 (見後圖) 的平均偏差也在合理的範圍內，這意味著本研究之之預報實驗是在一個合理及正確的架構下進行，其分析結果具有參考價值。

圖 2 顯示各個實驗組高度場的 *ME* 均為負值，

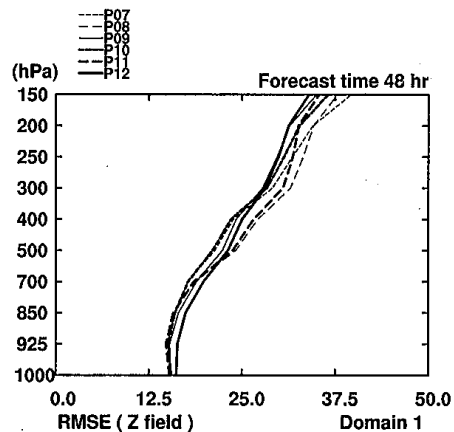
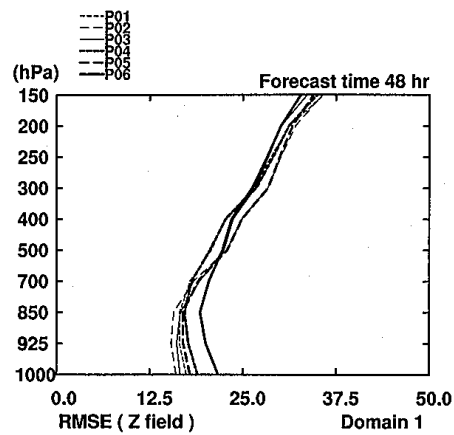


圖 3 模式 48 小時預報之高度場的 RMSE。

這意味著高度場的預報較觀測偏低，圖中最重要的現象即是，當使用 YSU 邊界層參數化法時 (P01~06)，*ME* 在 300 hPa 以下大約僅 -10 公尺，而且幾乎沒有垂直結構，相對來說，當使用 MYJ 邊界層參數化法時 (P07~12)，*ME* 在 850 hPa 以下較小，大約在 0~5 公尺之間，但在 500 hPa 以上的 *ME* 隨高度增加而增加，顯示當使用不同邊界層參數化法時，對低對流層預報誤差的大小和垂直結構均產生顯著的影響。仔細分析各個實驗組的預報誤差特性時可進一步發現，在使用同一種邊界層參數化法下，當使用不同積雲參數化法時會產生不同的誤差特性，但再細分使用不同的微物理參數化法則看不出顯著的差別，所以圖 2 中 P07 和 P10, P08 和 P11, P09 和 P12 的誤差分佈幾乎一樣，而 P01 和 P04, P02 和 P05, P03 和 P06 等在 850 hPa 以上也幾乎一致；但必須注意的一點是，其在 850 hPa 以下之，P01~06 的 MB 垂直結構並不若使用 MYJ 邊界層參數化法時 (P07~12) 因選用不同積雲參數法而有系統性的差異，此處再一次顯示模式預報誤差對邊界層參數化

法的敏感度。綜合以上之分析可知，就高度場而言，選擇不同邊界層參數化法對模式預報誤差的影響最顯著、積雲參數化法次之、微物理參數化法更次之。

圖 3 是 48 小時預報高度場水平平均之 *RMSE*，圖中顯示，所有實驗組的 *RMSE* 垂直結構均相當，在 850 hPa 以下，*RMSE* 大約 15 公尺，850 hPa 以上則隨高度增加而增加。雖然 *ME* 的垂直結構會因不同物理參數法而有顯著差別，但 *RMSE* 卻不因選用不同物理參數法而不同。值得注意的是，P06 在 700 hPa 以下有較顯著的 *RMSE*，對應於圖 2，P06 在低對流層亦有較大的 *ME*，因此 P06 (參數法組合為 YSU+Eta Ferrier+Grell-Devenyi) 似乎是一個預報誤差偏大的物理參數化法組合。

圖 4 是各實驗組各層水平平均之溫度場 *ME* 的垂直分佈。圖中顯示，溫度場的校驗結果和高度場非常類似，使用 YSU 邊界層參數法時，溫度場的 *ME* 在 250 hPa 以下幾乎沒有垂直結構，除了 P03 以外，*ME* 大約在  $0.5^{\circ}\text{C}$  以內，也就是有偏暖的預報誤差。然而，當使用 MYJ 邊界層參數法時，溫度場的 *ME* 由 1000 hPa 之約  $-1.3^{\circ}\text{C}$  隨高度增加而減少，

一直到 700 hPa 以上，其 *ME* 轉為正值，在 200 hPa 以上又隨高度增加而遞減。圖 4 最主要的差別是在 850 hPa (含) 以下，YSU 的預報誤差大約是偏暖  $0.5^{\circ}\text{C}$  以內，MYJ 則偏冷達  $-1^{\circ}\text{C}$ 。此和邊界層過程的影響主要是在 850 hPa 以下的預期一致。

再者，從靜力平衡的角度來看，當某一層大氣預報偏冷時，將伴隨高度場的預報誤差在低層偏高、高層偏低。圖 4 在 850 hPa 以下預報偏冷並隨高度逐漸偏暖的垂直結構，和圖 3 500 hPa 高度場偏低、200 hPa 預報偏高的垂直結構正好滿足靜力平衡的關係。而圖 4 在溫度預報誤差相當小，且沒有顯著的垂直結構，此和圖 3 之高度預報誤差的垂直結構也滿足靜力平衡關係。因此，以上分析顯示，不同的邊界層參數化法導致低層大氣不同的溫度預報誤差，並連帶反映在高度場的誤差特性；而這也顯示本研究之預報實驗以及所進行之預報誤差分析的正確性。

圖 5 是溫度預報誤差的 *RMSE*，和高度場類似，圖中顯示在 500 hPa 有最小之 *RMSE*，而 925 和 1000 hPa 的 *RMSE* 則約略相似。雖然不同物理參數化法組

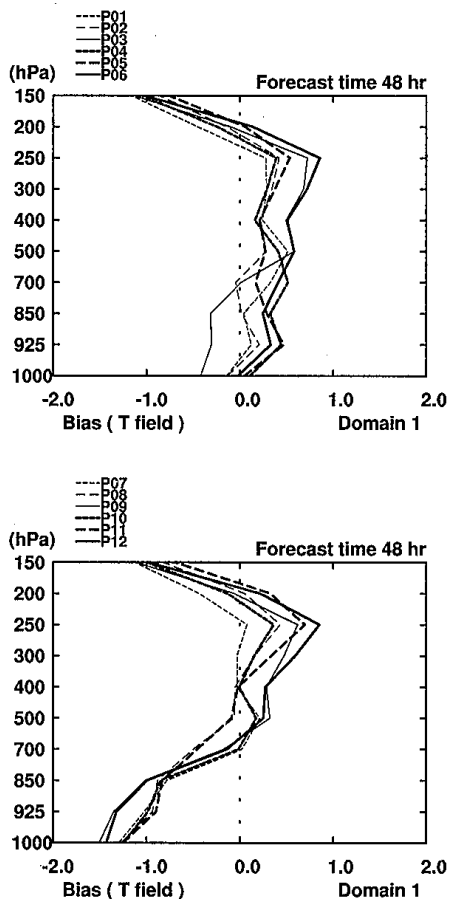


圖 4 模式 48 小時預報之溫度場的平均偏差。

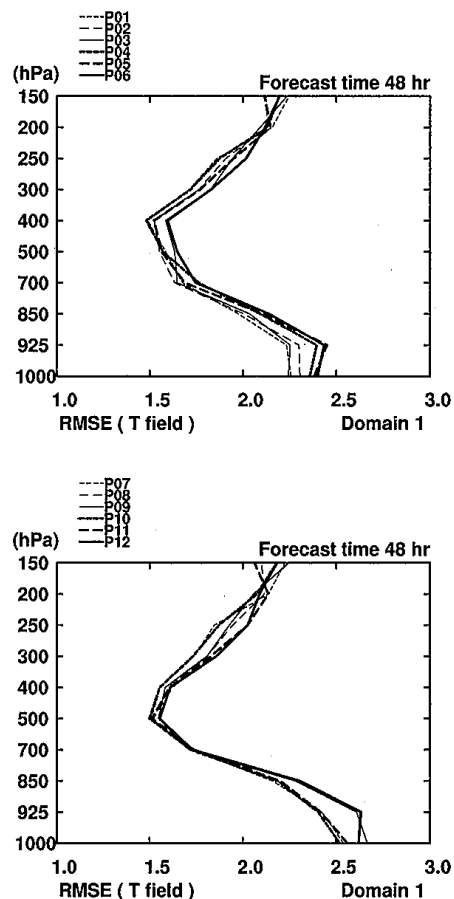
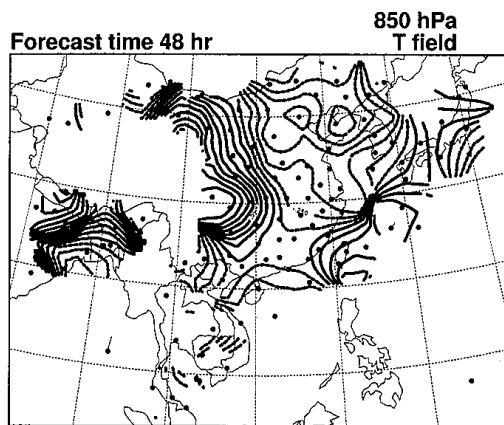
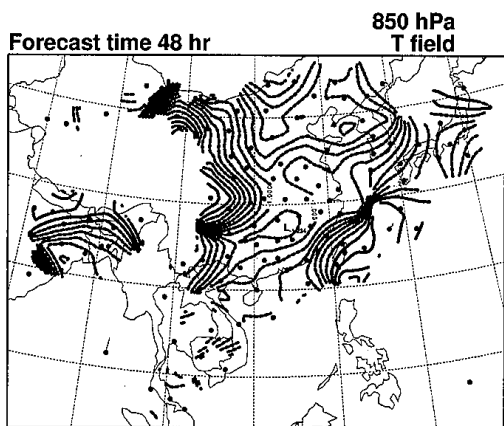


圖 5 模式 48 小時預報之溫度場的 RMSE。



Run P01  
Mean error (Domain 1)      max 2.07  
min -1.17



Run P07  
Mean error (Domain 1)      max 1.09  
min -2.25

圖 6 P01 和 P07 48 小時預報之 850 hPa 溫度場平均偏差的水平分佈。

合產生不同的 *ME* 結構，但 *RMSE* 卻不因

不同組合而有明顯的差異。然而使用 MYJ 邊界層參數化法還是在 925 hPa 以下比 YSU 邊界層參數化法有更大的 *RMSE*。進一步檢視 850 hPa 溫度場預報誤差的空間分佈（在此選取 P01 (YSU+WSM5+KF) 和 P07 (MYJ+WSM5+KF) 為代表，圖 6) 時，顯示，P07 在青康藏高原東側至華南、台灣一帶均比 P01 的預報來的偏低，這其中又以青康藏高原東側的差異最大，因此，這二種邊界層參數化法如何而導致此一顯著的預報誤差特性，是否和地形或模式地表參數有關？這是一個值得進一步研究的議題。

邊界層過程不僅影響大氣邊界層內的熱量傳送，同時也和水氣垂直傳送過程有密切的關係。圖 7 是水氣混和比 48 小時預報的 *ME*，圖中顯示，模式

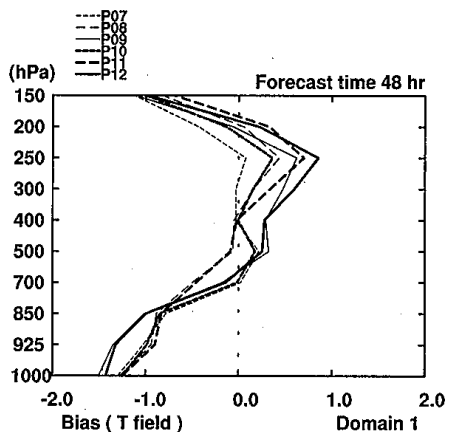
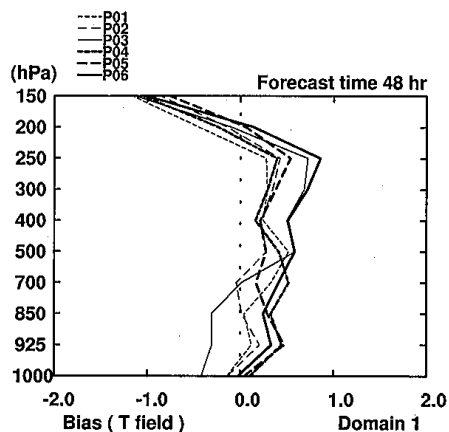


圖 7 模式 48 小時預報之水氣場的平均偏差。

水氣混和比主要的預報誤差均發生在 500 hPa 以下，基本上各實驗組在 500~850 hPa 的預報都偏乾，但使用 YSU 邊界層參數化法除了 P01 (YSU+WSM5+KF) 和 P03 (YSU+WSM5+Grell-Devenyi) 以外，在 850 hPa 以下有更乾的預報誤差，相對地，使用 MYJ 邊界層參數化法的預報組則則偏溼，不同邊界層參數化法仍然導致顯著的水氣預報誤差。水氣混和比之 48 小時預報的 *RMSE* (圖未示) 在 925 hPa 最大，並隨高度增加快速減少。另外，和其他分析的變數一樣，*RMSE* 不因不同物理參數法的組合而有顯著差異。由於水氣場和降水過程關係密切，因此，探討不同邊界層過程如何導致水氣分佈差異，是進一步瞭解或改善模式定量降水預報的一個重要關鍵。

#### 四、討論與結論

本研究之校驗結果顯示各實驗組、各變數之預報誤差的平均偏差值和作業中心的預報誤差相比均在合理的範圍內，這意味者本研究之預報實驗是

在一個合理及正確的架構下進行，其分析結果具有參考價值。

校驗結果顯示，各個實驗組的平均偏差特性和使用的物理參數法組合有密切的關係，其中不同邊界層參數化法對模式預報誤差的影響最顯著、積雲參數化法次之、微物理參數化法更次之；*RMSE* 則不因選擇不同的物理參數化法組合而有顯著的差異。此外，預報誤差的統計特性在不同解析度和不同預報時間並沒有明顯的變化，顯示 WRF 模式具有穩定的預報能力。

整體而言，高度場預報均較觀測偏低，使用 YSU 邊界層參數化法時，溫度場的預報偏暖，*ME* 均小於 0.5 °C，且沒有顯著的垂直結構，水氣場則均偏乾。使用 MYJ 邊界層參數化法時，溫度場的 *ME* 有顯著的垂直結構：低層偏冷，高層偏暖，水氣場則低層偏濕、中層偏乾。簡等 (2005) 在 WRF 模式的定量降水預報校驗分析中亦顯示使用 MYJ 邊界層參數化法時，降水有明顯高估的情形。由於水氣場和降水過程關係密切，因此，探討不同邊界層過程如何導致水氣分佈差異，是進一步瞭解或改善模式定量降水預報的一個重要關鍵。此外，不同邊界層參數化法的預報誤差在青康藏高原東側有顯著的差異，顯示地形對模式的邊界層過程可能扮演重要的角色。

總的來說，邊界層過程影響大氣邊界層內的水氣和熱量的垂直傳送，因此，不同的邊界層參數化法導致低層大氣不同的水氣和溫度預報誤差，並連帶反映在高度場的誤差特性；同時，溫度場和高度場的預報誤差特性也反應出靜力平衡關係，再一次顯示本研究之預報實驗以及所進行之預報誤差分析的正確性。

就以各個實驗組的校驗結果來說，使用 YSU 邊界層參數法的預報能力較 MYJ 參數法佳。在使用 YSU 邊界層參數法的實驗組中，就高度場而言，P06 的預報誤差較大 (圖 4a)，以溫度場來說，P04~06 的預報誤差較大 (圖 8a)，而水氣場則以 P01 和 P03 的預報較佳，總的來說，在本研究的實驗範疇中，就探空站上的氣象場校驗而言，總結建議以 P01 (YSU + WSM5 + KF) 為最佳的物理參數法組合。

## 致謝

本研究在中央氣象局委託計畫 MOTC-CWB-93-6M-06 與國科會計畫 NSC 93-2625-Z-052-009 支援下完成。

## 參考文獻

- 簡芳菁，蕭育琪、周仲島、林沛練、楊明仁、洪景山、鄧仁星和林慧娟，2003：MM5 系集降水預報之校驗。*大氣科學*，**31**，77 - 93。
- 簡芳菁、張文錦、周仲島、林沛練、洪景山、林得恩、劉素屏、繆璿如、陳致穎，2005：WRF 模式之敏感度測試，第二部分：定量降水預報校驗。投稿*大氣科學*。
- 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.
- , B. J.-D. Jou, 2004: MM5 ensemble precipitation forecasts in the Taiwan area for three Mei-yu seasons. *Wea. Forecasting*, **19**, 735 - 750.
- Hong, J. S., 2001: Statistics of 6-hour forecast errors derived from global data assimilation system at the Central Weather Bureau in Taiwan. *T. A. O.*, **12**, 635 - 648.
- , 2003: The evaluation of the high-resolution model forecasts over Taiwan during GIMEX. *Wea. Forecasting*, **18**, 836 - 846.
- Hollingsworth, A., D. B. Shaw, P. Lonnberg, L. Illari, K. Arpe, and A. J. Simmons, 1986: Monitoring of observation and analysis quality by a data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 861-879.
- Mesinger, F., 1996: Improvements in quantitative precipitation forecasts with the Eta regional model at the National Centers for Environmental Prediction: The 48-km upgrade. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 2637 - 2649.
- Mitchell, H. L., C. Chouinard, C. Charette, R. Hogue, and S. J. Lambert, 1996: Impact of a revised analysis algorithm on an operational data assimilation system. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1243 - 1255.
- Skamarock, W. C., 2004: Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra. *Mon. Wea. Rev.* **132**, 3019 - 3032.
- Yang, M.-J.; B. J.-D. Jou, S. C. Wang, J. S. Hong, P. L. Lin, J. H. Teng, H. C. Lin, H.-C., 2004: Ensemble prediction of rainfall during the 2000-2002 Mei-Yu seasons: Evaluation over the Taiwan area. *J. Geophys. Res.*, **109**, D18203. doi:10.1029/2003JD004368.