

WRF 模式之敏感度測試

第一部分：探空測站上的校驗

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

¹中央氣象局

²國立台灣大學大氣科學研究所

³國立台灣師範大學地球科學研究所

⁴國立中央大學大氣物理研究所

(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

本研究主要是針對 WRF 模式 12 種物理參數法組合，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）GFS 全球模式分析場為初始場，進行連續 32 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）和預報時間長度而有明顯差異；選擇不同邊界層參數法對模式預報誤差影響最顯著、積雲參數法次之、微物理參數法更次之。低對流層水氣和溫度場之預報誤差的垂直分佈，因選用不同邊界層參數法而有顯著的差異，並連帶反映在高度場預報誤差的垂直結構。

在本研究的實驗範疇中，就探空站上的氣象場校驗而言，當應用 WRF 模式於東亞地區進行數值天氣預報時，總結建議以 YSU+WSM5+KF 為最佳的物理參數法組合。

關鍵詞：WRF，物理參數法，校驗

一、前言

對於數值天氣預報而言，一個客觀的校驗系統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數值模式預報產品的詮釋範圍，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環節。

模式預報產品的校驗可以針對個案（例如 Colle and Mass 2000；Roebber and Eise 2001；Gallus and Segal 2001），但是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（Hong 2001；Colle et al. 2003a、b；Nagarajan and Aiyyer 2004；Zhong et al. 2005）、不同模式參數法組態的影響（Yang et al. 2000；Chien et al. 2002；簡等 2003；Chien and Jou 2004；Yang et al. 2004）、不同積分範圍、解析度（Gaudet and Cotton 1998；Hong 2003；Colle et al. 1999；2000）以及不同模式間的比較（Colle et al. 1999；Zhong and Fast 2003）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（Wilks 1995；Mesinger 1996；Tustison et al. 2001；Gallus 2002；Baldwin and Lakshmiarahan 2003；Skamarock 2004；Baldwin et al. 2005）。

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。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, Skamarock et al. 2001；Michalakes et al. 2001) 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。Jankov et al. (2005) 即針對 WRF 模式不同物理參數法組合，針對個案進行定量降水預報校驗，但目前有關利用 WRF 模式進行長

時間天氣預報校驗的相關研究則仍未有所見。為此，本研究即是針對 WRF 模式不同物理參數方法的組合，評估其在東亞地區於梅雨季期間的預報能力，並在收集一段時間之預報校驗後以期能進一步明瞭：

1.何種 WRF 物理參數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？

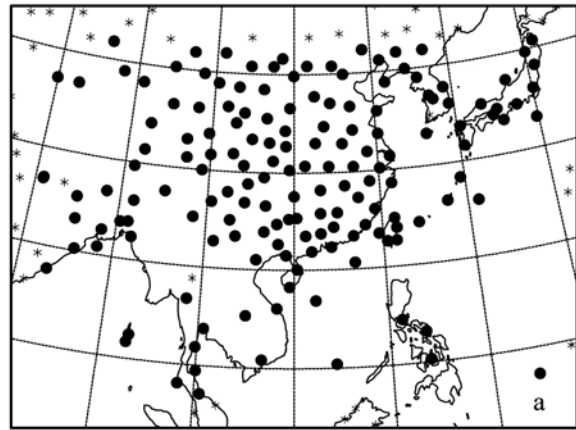
3.預報誤差的統計特性？

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。本研究之第一部份將著重在氣象場的校驗（高度場、溫度場和相對濕度場），第二部分則進行定量降水預報校驗。本文第二節介紹模式組態之設計與校驗方法簡介，第三節是校驗結果分析，第四節則是結論。

二、模式設計與校驗方法

本研究使用 WRF V2.0.3，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）GFS 全球模式分析場為初始場，進行連續 32 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。模式粗網格的積分範圍主要是考量能涵蓋青康藏高原，但受限於計算資源，粗網格在西太平洋所涵蓋的範圍則較為有限。

Total screened station numbers in Domain 1 = 158



Total screened station numbers in Domain 2 = 17

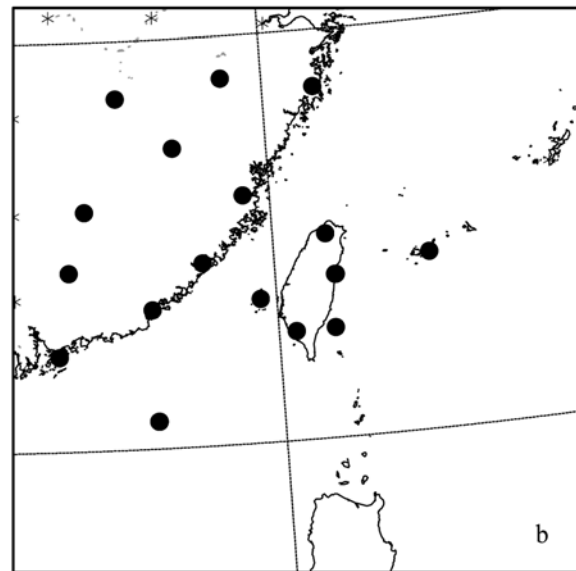


圖 1 模式粗網格 (a) 和細網格 (b) 積分範圍，圓點是積分範圍內所有的探空站，其中黑圓點是本研究列入校驗的探空測站，星號是被排除的測站。

表一為本研究所欲探討之物理參數法的 12 種實驗組合列表，其中包括 Yonsei University（簡稱 YSU，Hong and Pan 1996）和 Mellor - Yamada - Janjic TKE（簡稱 MYJ，Janjic 1990; 1996; 2002）

表一 各物理參數法的組合列表，各參數法簡稱所代表的原意請參考文內之詳細說明。

組別	邊界層參數法	微物理參數法	積雲參數法
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

兩種邊界層參數法；WRF Single-Moment 5-class (簡稱 WSM5, Hong et al. 2004) 和 Eta Ferrier (Roger et al. 2001) 兩種微物理參數法；以及 Kain-Fritsch (簡稱 KF, Kain and Fritsch 1990; 1993)、Betts-Miller-Janjic (簡稱 BMJ, Janjic 1994; 2000) 和 Grell-Devenyi ensemble (Grell and Devenyi 2002) 等三種積雲參數法。

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 64 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. 距離粗、細網格邊界 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。

模式預報場均利用 bicubic spline 方法內差至探空站，並和探空站之觀測 (包括高度場、溫度場和水氣場)，在各等壓面上 (1000、925、850、700、500、400、300、250、200、150 和 100 hPa) 計算平均偏差 (Mean Error, ME) 和均方根誤差 (Root Mean Square Error, $RMSE$)：

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}$$

其中 F 是模式預報場， O 是探空觀測， N 是測站數目。當 ME 是負值時，代表模式預報較觀測偏低，反之，則偏高。由於校驗是在等壓面進

行，為避免地面以下之等壓面（例如青康藏高原及鄰近的探空站）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，所以各等壓面層之測站數目（*N*）會有所不同。

三、校驗結果

圖 2 是 D1 和 D2 積分範圍內模式 24 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 邊界層參數法，後者使用的是 MYJ 邊界層參數法。圖 2 顯示，不論是 D1 或 D2，或者是各個實驗組，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. 1990，1993，1996；Hollingsworth 1986，Hong 2001），本研究之預報

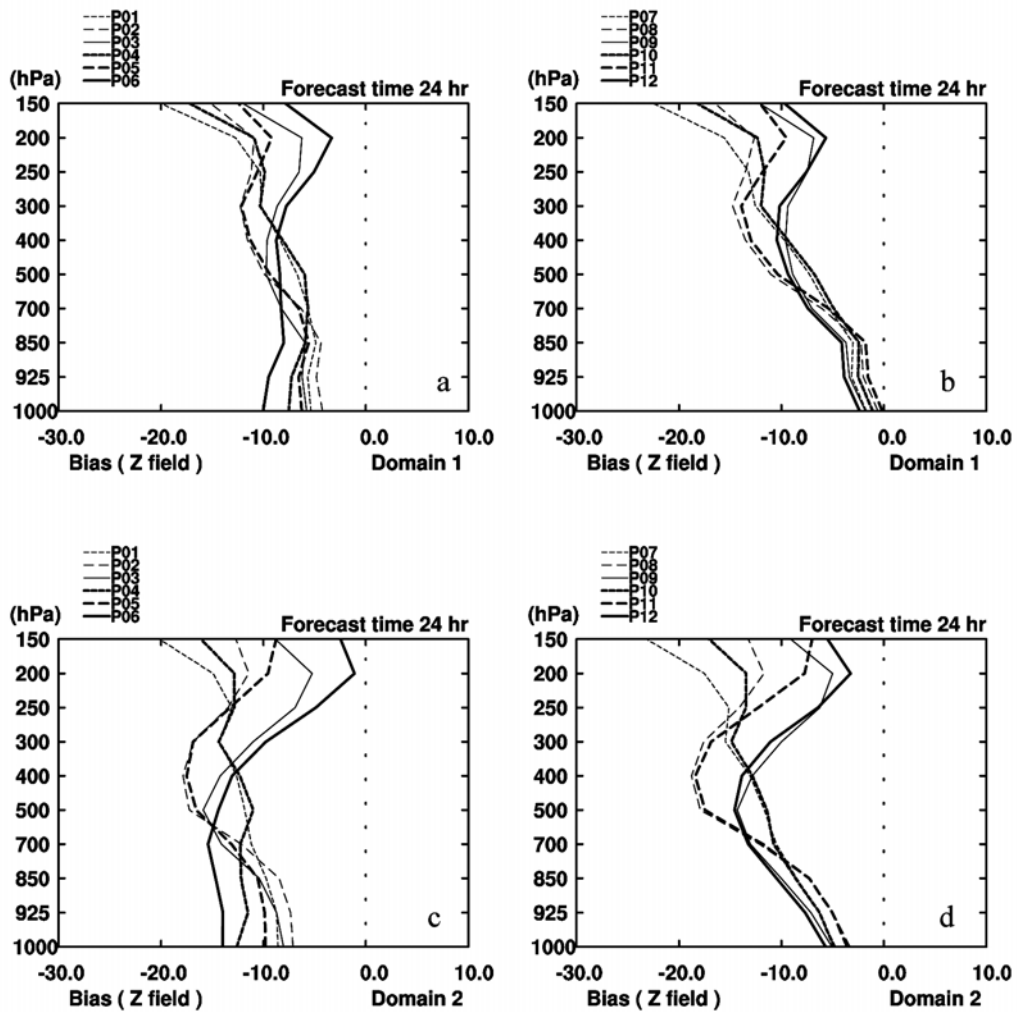


圖 2：圖 2：模式 24 小時預報水平平均之高度場平均偏差的垂直分佈，單位為公尺。a：粗網格 P01~P06 實驗組，b：粗網格 P07~P12 實驗組，c：細網格 P01~P06 實驗組，d：細網格 P07~P12 實驗組。

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（見表二、三）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，D1 和 D2 中各個實驗組高度場的 ME 均為負值，表示高度場的預報較觀測偏低，這和中央氣象局全球模式的校驗結果一致 (Hong 2001)。此外，高度場 ME 的垂直結構顯示，D1 和 D2 相同實驗組的垂直結構非常類似，但是 D2

表二 各組實驗成員在 D1 之 24 小時預報各變數的平均偏差。其中低層為 1000、925 和 850 hPa 的平均，中層則為 700、500 和 400 hPa 的平均，高層則為 300、250 和 200 hPa 平均。

表三 同表二，但為 48 小時預報。

的平均偏差較 D1 大一些，而且各個實驗組彼此之間 *ME* 的差異性也比 D1 來得大，這有可能是 D2 的取樣數目比 D1 來的少的緣故。圖 2 中最重要的現象即是，當使用 YSU 邊界層參數法時 (P01~06)，*ME* 在 300 hPa 以下大約僅-10 公尺，而且垂直上的分佈差異不大，相對來說，當使用 MYJ 邊界層參數法時 (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法下，當使用不同積雲參數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

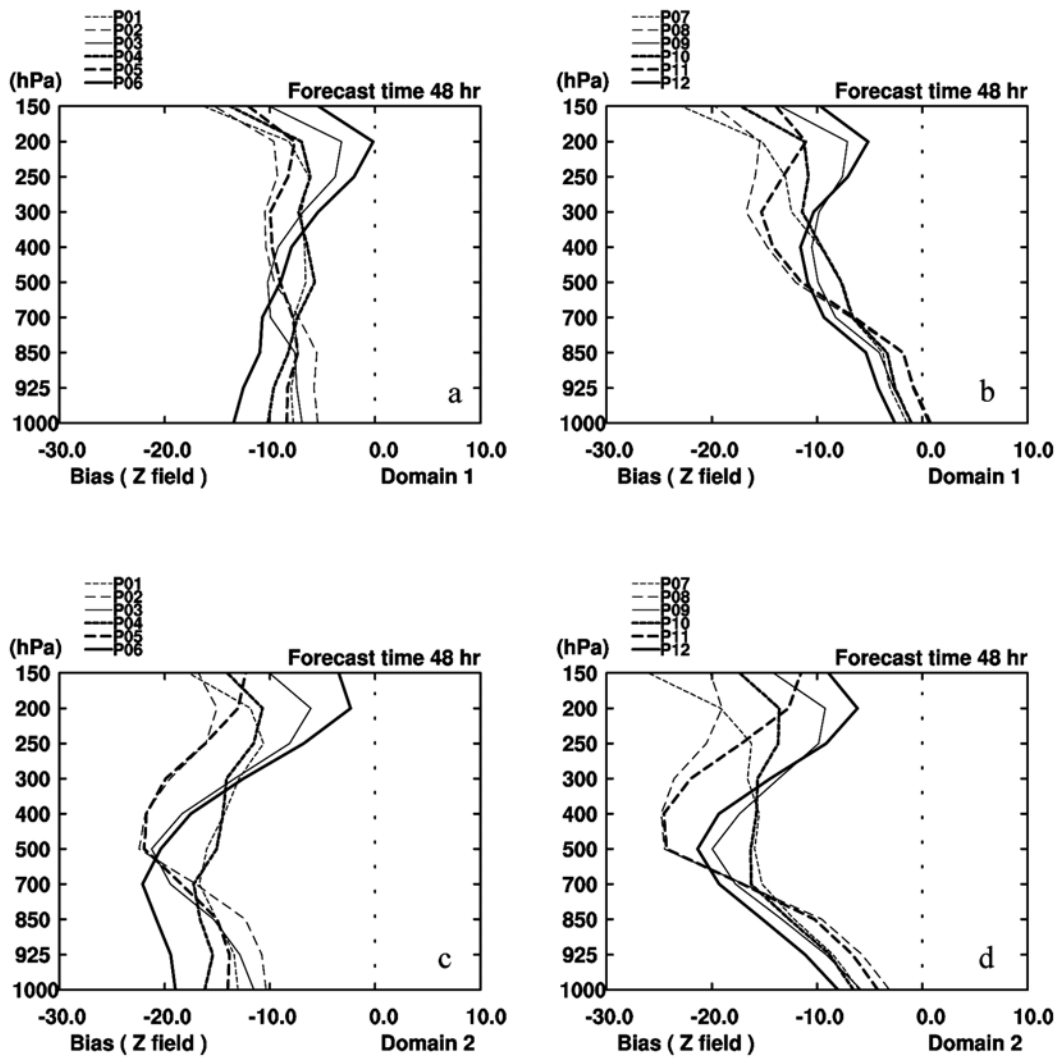


圖 3 同圖 2，但為模式 48 小時預報之高度場的平均偏差，單位為公尺。

一樣，而 P01 和 P04，P02 和 P05，P03 和 P06 等在 850 hPa 以上也幾乎一致。綜合以上之分析可知，就高度場而言，選擇不同邊界層參數法對模式預報誤差的影響最顯著、積雲參數法次之、微物理參數法更次之。

圖 3 則是高度場之 48 小時預報的 *ME* 垂直分佈，圖中顯示，隨著預報時間增加，模式預報的偏差也增加，整體來說，預報誤差增加約 20~30%（參考表二和表三）。包括 D1 和 D2 在內，48 小時預報除了 *ME* 增加以外，其餘包括 *ME* 的垂直結構和各實驗組彼此之間的相關均和 24 小時預報的誤差一致，顯示不同物理參數法的組合導致模式系統性的預報誤差，而此一系統性誤差不因預報時間增加而改變，這反應 WRF 模式具有穩定的預報能力。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，表二和表三可提供讀者 D1 不同變數在 24 小

時和 48 小時預報誤差的定量比較，以供參考。

圖 4 是 D1 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* 的垂直分佈均相當類似，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*，因此就本研究而言 P06（參數法組合為 YSU+Eta Ferrier+Grell-Devenyi）是一個預報誤差偏大的物理參數法組合。

圖 5 是各測站 48 小時預報 500 hPa 高度場的 *ME*，用以進一步瞭解模式預報誤差的空間分佈特徵。由於本研究總計有 12 項實驗組別，在此無法一一針對各實驗組詳細討論。如前所述，在使用 YSU 和 MYJ 邊界層參數法時，其水平平均的誤差分析顯示此二種參數法導致顯著的系統性差

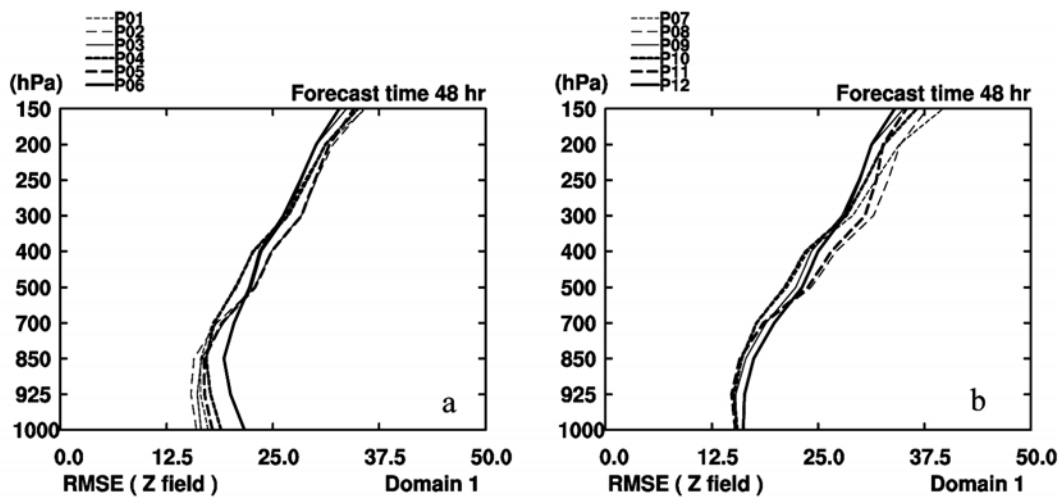


圖 4 同圖 3，但為 D1 48 小時預報之高度場的均方根誤差，單位為公尺。

異，而仔細分析各個組別的 *ME* 水平分佈後（圖未示），各個組別彼此之間容或有些許差異，但仍以 *YSU* 和 *MYJ* 參數法所產生之 *ME* 的空間分佈差異最大，因此，本研究在此選取 *P01* (*YSU* + *WSM5* + *KF*) 和 *P07* (*MYJ* + *WSM5* + *KF*) 為代表進行 *ME* 之水平分佈的分析。特別要注意的是，印度地區部分測站較靠近青康藏高原，由於

模式解析陡峭地形的精確度有限，因此在部分測站產生較大的預報誤差。另外，為表達出 *ME* 空間分佈特性，本研究將測站之 *ME* 使用 *Barnes* 方法再內差至格點以進行繪圖，此一內差過程中無法避免地導致印度地區之不正確的特殊等值線分佈型態，因此本文僅將討論的重點著重在東亞探空分佈較密集的區域。

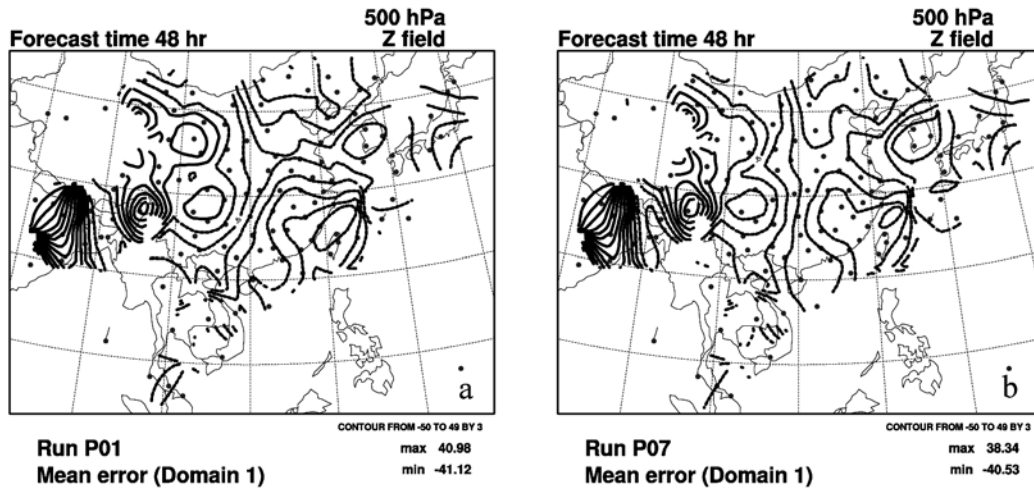


圖 5 P01 實驗組 (a) 和 P07 實驗組 (b) D1 48 小時預報之 500 hPa 高度場平均偏差的水平分佈，等值線間距為 3 m。小圓點為探空站位置。

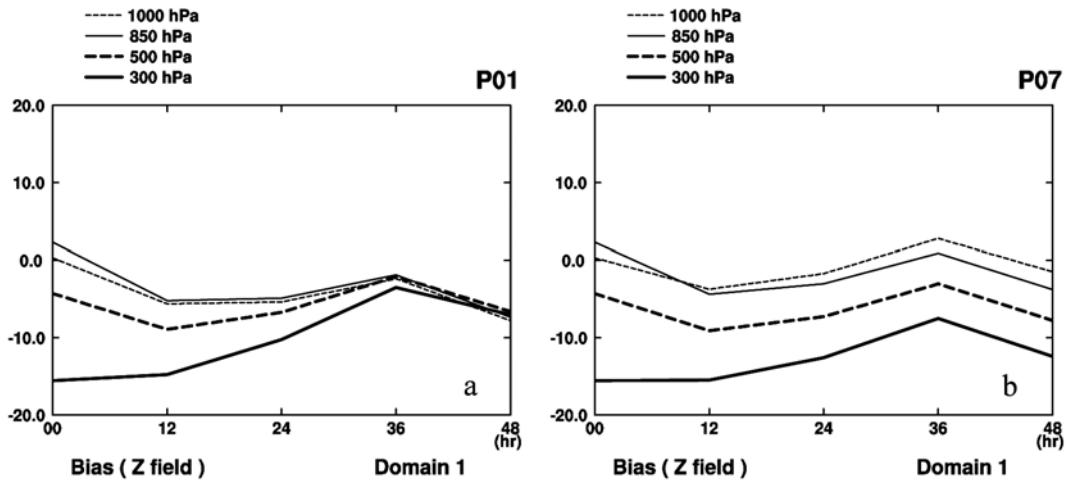


圖 6 P01 實驗組 (a) 和 P07 實驗組 (b) 在 D1 中，1000~300 hPa 各層水平平均之 0~48 小時高度場預報的平均偏差，單位為公尺。

圖 5 顯示 P01 和 P07 實驗在 48 小時 500 hPa 高度場的 ME 在東亞地區的分佈非常類似，基本上均為負值，亦即 48 小時高度場預報均偏低，特別是在台灣、韓國和蒙古一帶均為預報誤差較大的幾個地區。由於本研究選取的實驗時間在 5 月至 6 月之間，因此華南一帶的預報誤差可能和梅雨鋒面的活動有密切的關係。值得注意的是，P07

在四川盆地一帶的預報誤差明顯較 P01 來的大，此為兩者最主要的差異所在。

圖 6 是 P01 和 P07 針對 1000、850、500 和 300 hPa 高度場的水平平均 ME 在不同預報時間的分佈特性。圖中清楚顯示，P01 在初始時間 ME 隨高度增加而增加，但預報到 48 小時時，各層的預報誤差變的非常接近，換言之，其預報誤差在

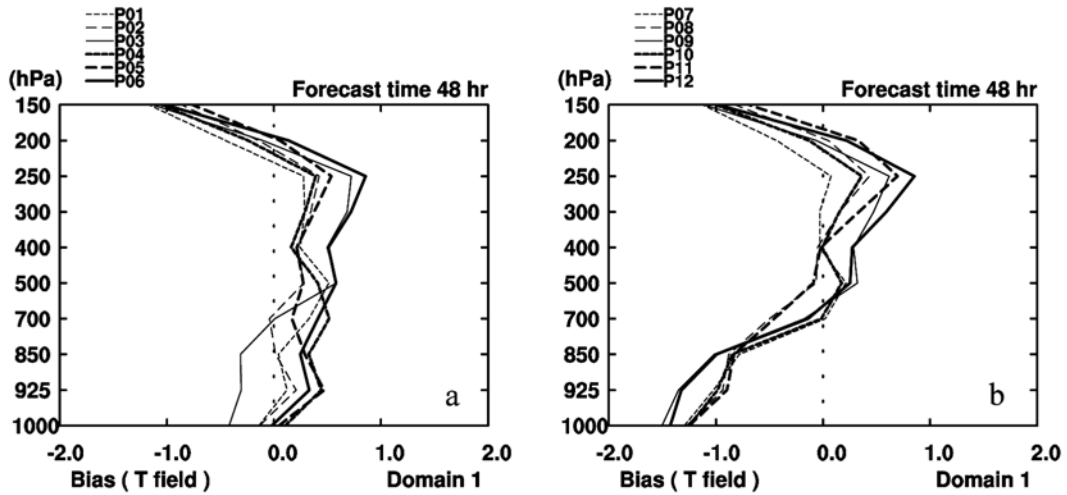


圖 7 同圖 3，但為 D1 48 小時預報之溫度場的平均偏差，單位為°C。

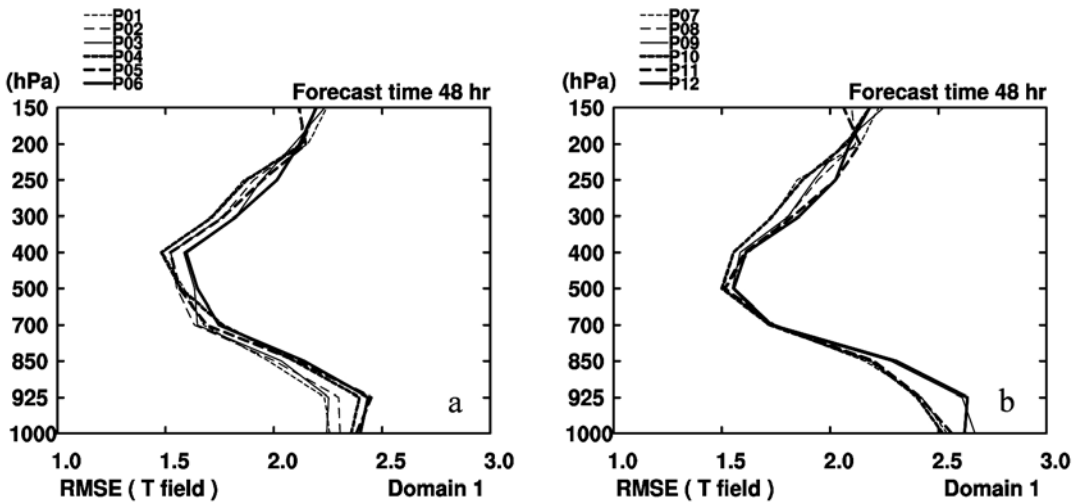


圖 8 同圖 4，但為溫度場，單位為°C。

垂直上的分佈差異不大；但是 P07 在 48 小時的預報誤差仍隨高度增加而增加。此一現象在圖 3 中已經提及，但圖 6 可以更清楚看出不同邊界層參數法在不同預報時間的誤差分佈特性。

圖 8 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 以下垂直上的分佈差異不大，除了 P03 以外， ME 大約在 0.5°C 以內，也就是有偏暖的預報誤差。150 hPa 以上 ME 變為負值，並且隨高度增加而快速增加，由於本研究之模式頂設為 50 hPa，因此在這個高度基本上已經受到模式上邊界的影響。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°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 7a 和 7b 最主要的差別是在 850 hPa 以下，YSU 的預報誤差大約是偏暖 0.5°C 以內，MYJ 則偏冷達 -1°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 7b 在 850 hPa 以下預報偏冷相對於 500 hPa 高度場預報偏低；以及 250 hPa 以下預報偏暖相對於 200 hPa 高度場預報偏高的趨勢正好滿足靜力平衡的關係。而圖 7a 在溫度預報誤差相當小，且垂直上的分佈差異不大，此和圖 3a 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 8 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。雖然不同物理參數法組合產生不同的 ME 結構，但 $RMSE$ 卻不因不同組合而有明顯的差異。然而使用 MYJ 邊界層參數法還是在 925 hPa 以下比 YSU 邊界層參數法有更大的 $RMSE$ 。

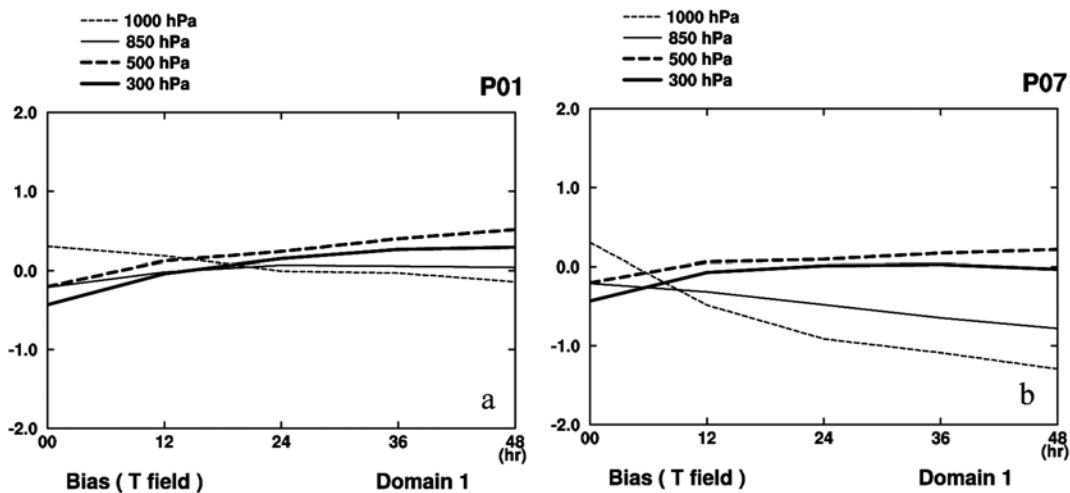


圖 9 同圖 6，但為溫度場，單位為 $^{\circ}\text{C}$ 。

圖 9 是比較 P01 和 P07 不同高度層, 0~48 小時溫度預報誤差的變化, 圖中顯示, P01 各層的預報誤差不隨預報時間增加而有明顯變化, 預報誤差都在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以內, 反之, P07 於 850 hPa 以下的預報誤差則隨預報時間增加而明顯增加。進一步檢視 850 hPa 溫度場預報誤差的空間分佈 (圖 10) 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, 此一特徵和高度場 (圖 5) 一致, 因此, 這二種邊界層參數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

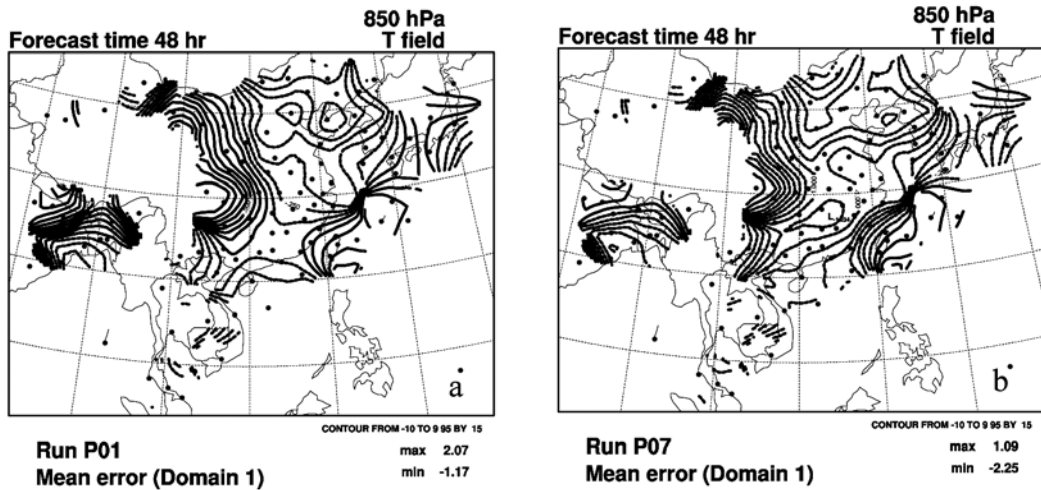


圖 10 同圖 5, 但為 850 hPa 溫度場, 等值線間距為 0.15°C 。

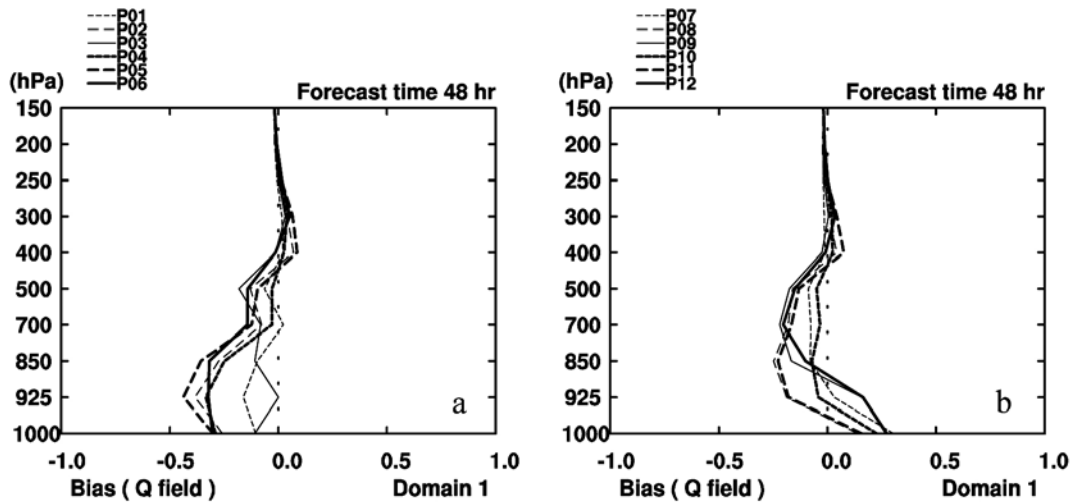


圖 11 同圖 3, 但為水氣混和比, 單位為 g/Kg 。

送，同時也和水氣垂直傳送過程有密切的關係。圖 11 是水氣混和比 48 小時預報的 *ME*，圖中顯示，模式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 邊界層參數法的預報組則偏溼，不同邊界層參數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 12) 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。圖 13 是 925 hPa 水氣混和比 *ME* 的空間分佈，圖中顯示

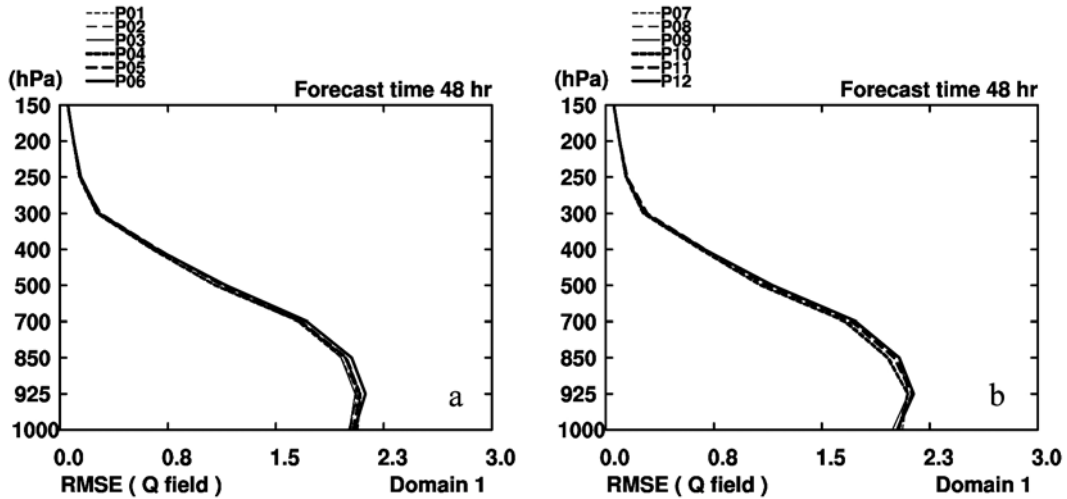


圖 12 同圖 4，但為水氣混和比，單位為 g/Kg。

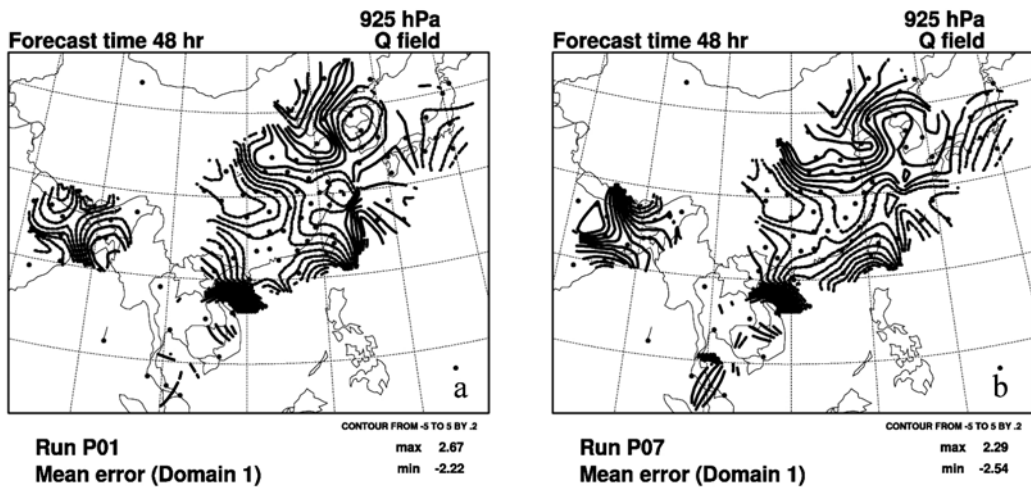


圖 13 同圖 5，但為 925 hPa 水氣混和比，等值線間距為 0.2 g/Kg。

P01 和 P07 的 *ME* 最主要的差異發生在韓國、台灣東部外海和印度一帶，在青康藏高原東側亦有明顯的差異，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）GFS 全球模式分析場為初始場，進行連續 32 天、每天兩次（0000 UTC 和 1200 UTC），每次 48 小時的數值預報實驗。目的是針對 WRF 模式 12 種不同物理參數法組合，在探空站上校驗並分析高度場、溫度場和水氣場的預報誤差特性。

分析結果顯示，本研究各實驗組、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，這意味著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法對模式預報誤差的影響最顯著、積雲參數法次之、微物理參數法更次之；*RMSE* 則不因選擇不同的物理參數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 邊界層參數法時，溫度場的預報偏暖，*ME*

均小於 0.5 °C，且垂直上的分佈差異不大，水氣場則均偏乾。模式中溫度場是模式的預報變數，高度場則是導出量場，因此高度場平均預報誤差為負值，主要是反應模式溫度預報在高對流層（250 hPa 以下）預報偏暖所致。至於溫度預報偏暖的原因為何？這個問題一時之間恐怕難以分析清楚。如前所述，這個結果和中央氣象局全球模式的校驗結果一致（Hong 2001），因此這個誤差特性有可能是初始場所導致的系統性偏差，這牽涉到資料同化的問題，而不單只是模式本身的問題。本研究的主要是評估 WRF 模式不同物理參數法組合的預報能力，以及呈現出各個實驗組的預報特性，因此有關誤差形成的原因分析，則有待更進一步的研究加以探討。

使用 MYJ 邊界層參數法時，溫度場的 *ME* 的垂直分佈則有明顯的變化：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，低對流層水氣和溫度場之預報誤差的垂直分佈，因選用不同邊界層參數法而有顯著的差異，並連帶反映在高度場的誤差特性；Bright and Mullen（2002）和 Wisse and Vila-Guerau de Arellano（2004）也有類似的研究結論，但本研究則更具體指出其預報誤差的垂

直分佈特性。此外，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。*大氣科學*，**34**，261-158。

Baldwin, M. E., and S. Lakshmiarahan, 2003: Development of an events-oriented verification system using data mining and image processing algorithms. Preprints, *3rd Conf. on Artificial Intelligence*, Long Beach, CA, Amer. Meteor. Soc., paper 4.6.

——, J. S. Kain, and S. Lakshmiarahan, 2005: Development of an Automated Classification Procedure for Rainfall Systems *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 844 - 862.

Bright, D. R., and S. L. Mullen, 2002: The sensitivity of the numerical simulation of the southwest monsoon boundary layer to the choice of PBL turbulence scheme in MM5. *Wea. Forecasting*, **17**, 99 - 114.

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.

Colle, B. A., K. J. Westrick, and C. F. Mass, 1999: Evaluation of the MM5 and Eta-10 precipitation forecasts over the Pacific Northwest during the cool season. *Wea. Forecasting*, **14**, 137 - 154.

——, and C. F. Mass, 2000: The 5-9 February 1996 flooding event over the Pacific Northwest: Sensitivity studies and evaluation of the MM5 precipitation forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 593 - 617.

——, 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.

——, J. B. Olson, and J. S. Tongue, 2003a: Multiseason verification of the MM5. Part I: Comparison with the NCEP Eta Model over the central and eastern United States and impact of MM5 resolution. *Wea. Forecasting*, **18**, 431 - 457.

- , J. B. Olson, and J. S. Tongue, 2003b: Multiseason verification of the MM5. Part II: Evaluation of high-resolution precipitation forecasts over the northeastern United States. *Wea. Forecasting*, **18**, 458 – 480.
- Gallus, W. A., 2002: Impact of verification grid-box size on warmseason QPF skill measures. *Wea. Forecasting*, **17**, 1296 – 1302.
- , and M. Segal, 2001: Impact of improved initialization of mesoscale features on convective system rainfall in 10-km Eta simulations. *Wea. Forecasting*, **16**, 680 – 696.
- Gaudet, B., and W. R. Cotton, 1998: Characteristics of a real-time precipitation forecast. *Wea. Forecasting*, **13**, 966 – 982.
- Grell, G. A., and D. Devenyi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1693.
- 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.
- Hong, S.-Y., and H.-L. Pan, 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2322 – 2339.
- , J. Dudhia and S.-H. Chen. 2004: A revised approach to ice microphysical processes for the Bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.* **132**, 103 – 120.
- 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.
- Janjic, Z. I., 1990: The step-mountain coordinate: physical package. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1429 – 1443.
- , 1994: The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes, *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 927 – 945.
- , 1996: The surface layer in the NCEP Eta model. eleventh conference on numerical weather prediction, Norfolk, VA, 19–23 August 1996; *Amer. Meteor. Soc., Boston, MA*, 354 – 355.
- , 2000: Comments on "Development and Evaluation of a Convection Scheme for Use in Climate Models", *J. Atmos. Sci.*, **57**, 3686.
- , 2002: Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP meso model. *NCEP Office Note No.* 437, 61 pp.
- Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1990: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2784 – 2802.
- Jankov, I., W. A. Gallus, M. Segal, B. Shaw, and S. E. Koch, 2005: The impact of different WRF model physical parameterizations and their interaction on warm season MCS rainfall. *Wea. Forecasting*, **20**, 1048-1060.

- Kain, J. S., and J. M. Fritsch, 1990: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization, *J. Atmos. Sci.*, **47**, 2784 – 2802.
- , and J. M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, *The representation of cumulus convection in numerical models*, K. A. Emanuel and D.J. Raymond, Eds., Amer. Meteor. Soc., 246 pp.
- 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.
- Michalakes, J., S. Chen, J. Dudhia, L. Hart, J. Klemp, J. Middlecoff, and W. Skamarock, 2001: Development of a next generation regional weather research and forecast model. *Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, W. Zwiefelhofer and N. Kreitz, Eds., World Scientific, 269 – 276.
- Mitchell, H. L., C. Charette, C. Chouinard, and B. Brasnett, 1990: Revised interpolation statistics for the Canadian data assimilation procedure: Their derivation and application. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1591 – 1614.
- Mitchell, H. L., C. Charette, S. J. Lambert, J. Halle, and C. Chouinard, 1993: The Canadian global data assimilation system: Description and evaluation. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 1467 – 1492.
- 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.
- Nagarajan, B., and A. Aiyer, 2004: Performance of the ECMWF operational analysis over the tropical Indian ocean, *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2275 – 2282.
- Roebber, P. J., and J. Eise, 2001: The 21 June 1997 flood: Stormscale simulations and implications for operational forecasting. *Wea. Forecasting*, **16**, 197 – 218.
- Rogers, E., T. Black, B. Ferrier, Y. Lin, D. Parrish, and G. DiMego, Cited 2001: Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis. *NWS Technical Procedures Bulletin 488*, NOAA/NWS, 2001.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, and J. Dudhia, 2001: Prototypes for the WRF (Weather Research and Forecasting) model. Preprints, *Ninth Conf. on Mesoscale Processes*, Fort Lauderdale, FL, Amer. Meteor. Soc., J11–J15.
- , 2004: Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra. *Mon. Wea. Rev.* **132**, 3019 – 3032.
- Tustison, B., D. Harris, and E. Foufoula-Georgiou, 2001: Scale issues in verification of precipitation forecasts. *J. Geophys. Res.*, **106**, 11 775 – 11 784.

- Wilks, D., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences: An Introduction*. Academic Press, 467 pp.
- Wisse, J. S. P., and J. Vila-Guerau de Arellano, 2004: Analysis of the role of the planetary boundary layer schemes during a severe convective storm. *Ann. Geophys.*, **22**, 1861 – 1874.
- Yang, M.-J., F.-C. Chien, and M.-D. Cheng, 2000: Precipitation parameterization in a simulated Mei-Yu front. *T. A. O.*, **11**, 393 – 422.
- ; 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.
- Zhong, S., and J. Fast. 2003: An Evaluation of the MM5, RAMS, and Meso-Eta Models at Subkilometer Resolution Using VTMX Field Campaign Data in the Salt Lake Valley. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1301 – 1322.
- , H.-J. In, X. Bian, J. Charney, W. Heilman, and B. Potter. 2005: Evaluation of Real-Time High-Resolution MM5 Predictions over the Great Lakes Region. *Wea. Forecasting*, **20**, 63 – 81.

A Sensitivity Study of the WRF Model

Part I: Verification over Radiosound Observation

Jing-Shan Hong¹ Den-En Lin² Fang-Ching Chien³ Su-Ping Liu²
Ben Jong-Dao Jou² Pay-Liam Lin⁴ Win-Jing Chang² Hsuan-Ju Miou⁴
Chih-Ying Chen⁴ Ming-Chun Lei⁴

¹ Central Weather Bureau

² Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University

³ Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University

⁴ Department of Atmospheric Sciences, National Central University

(Manuscript received 30 September 2005; in final form 8 September 2006)

ABSTRACT

This paper presents the verification over radiosound observations 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 using the initial condition from NCEP (National Center for Environmental Prediction) GFS model from 15 May to 15 June 2004.

The verification results show that the model forecast error tended to be insensitivity to the model resolution and forecast periods. The choice of PBL scheme is the most significant to the model forecast, cumulus scheme the second, and the microphysics the third. Different PBL scheme results in different vertical profile of temperature and moisture fields within boundary layer, and then project to the vertical structure of the forecast of geopotential height.

In overall, the best choice of the combination of the physical parameterization package in WRF model applying over southeast Asia area is suggested to be YSU+WSM5+KF.

Key words: WRF model, Physical parameterization, Verification

