

東亞夏季季風之區域模擬

于宜強^{1,2} 許晃雄¹ 柯文雄¹ 鄒治華² 許武榮¹ 商文義³

¹ 國立台灣大學大氣科學系

² 國立台灣師範大學地球科學系

³ 美國普渡大學

摘要

本研究利用普渡區域模式 (Purdue Regional Model, PRM) 進行 10 年夏季模擬, 針對模式結果進行大氣環流及地表變數的驗證, 同時為求客觀及數量化, 亦利用氣候統計方法評估模擬結果, 以便了解 PRM 模擬東亞夏季季風的能力。除了降雨外, 其他模擬變數的誤差均很小, 型態相關 (pattern correlation) 也相當高 (大於 0.8)。降雨誤差的進一步分析, 發現 PRM 的夏季模擬, 存在一個明顯的系統性誤差結構。若將此系統性誤差扣除, 降雨的模擬誤差值與型態相關均大幅提升。在 1991~2000 十年的年際變化模擬方面, PRM 模擬的各年夏季雨量的分布, 與觀測雨量分布的情形相當相近, 模擬降雨分布的型態相關係數表現的相當理想 (型態相關為 0.68~0.94 之間)。模擬東亞地區平均的距平值除了 1994、1995、1996 及 1998, 因模擬結果太過接近平均值, 表現出距平訊號太弱, 呈現與觀測距平值反號外, 其他各年距平的分布均與觀測值呈現同相 (即正負號相同)。PRM 成功的模擬此一現象。在季內振盪方面, 模式模擬的 30~60 天低頻訊號, 在南海地區的強度與相位均與觀測資料相似。綜觀以上結果, PRM 在東亞夏季季風的模擬, 不論是氣候平均、年際變化或季內振盪, 都有相當令人滿意的表現。

壹、前言

本研究期望利用先進的區域氣候模式, 針對東亞地區的區域特性, 再加上模式所具有的完整物理過程, 進行時間與空間解析度提升的工作。本研究引進美國普渡區域模式 (Purdue Regional Model, PRM), 利用過去 PRM 在中尺度與氣候模擬相當優秀的能力, 來針對東亞區域氣候複雜的變因, 進行高解析模擬。為了未來能應用於氣候變遷模擬, 吾人首先必須先了解模式模擬現今氣候的表現, 才能針對未來氣候變遷進行推估模擬。本研究針對 PRM 在 1991 至 2000 年夏季每年四個月的模擬結果進行氣候評

估, 以了解 PRM 在夏季短期氣候模擬能力的表現, 以便作為模式修改及未來氣候模擬之依據。章節安排如下: 第二節模式介紹, 第三節模式結果評估, 第四節討論與結論。

貳、模式介紹與使用資料

PRM 是由美國普渡大學商文義教授研究群 (Sun and Hsu 1988, Sun and Chern 1993) 研發的三度空間的靜力模式, 垂直座標採追隨地勢的 σ_p 座標, 網格架構採用 Arakawa C 網格以提高輻合場以及垂直速度計算的精準度。模式包含動量、熱量、表面氣壓基本預報方程, 同時也預報擾動動能及水

的相變化(包括水汽、雲水、過冷水及冰雪, Chern 1994)。其中輻射參數化採用 Chou 和 Suarez(1994)所發展出來的參數過程, 積雲參數採用 Sun 和 Haines(1996)發展的參數過程與 Kuo-type 參數過程(Anthes 1978, Molinari 1982)。邊界層參數過程則是使用 1.5 order closure scheme 其中包含擾動動能(Sun 1988, 1993)。土壤與植被則採用 Bosilovich and Sun (1995) 發展出來的模組, 同時考慮土溫與土濕的預報與水文在植被中的傳送。

模式初始場與邊界條件的資料為 ECMWF 重分析資料 (reanalysis), 解析度為 $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$ 資料 (1998 年 5、6 月為 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$), 側邊界條件的提供則是利用邊界上 10 個網格作為模式的緩衝區 (buffer zone), 每 6 小時提供一次新的邊界資料, 提供模式修正。本研究針對 1991 年至 2000 年夏季 (5 至 8 月), 進行短期氣候模擬, 每次模擬均使用當年的 5 月 1 日 00Z 為初始條件, 每次模擬時間為四個月, 模式所使用的空間解度為 60 公里, 時間間隔為 180 秒, 地形部份則使用美國海軍 $10' \times 10'$ 的高解析地形資料。分析比較所使用之雨量資料則為 CMAP (CPC Merged Analysis of Precipitation, Huffman et al. 1997) $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的降雨分析資料。

參、模擬結果之評估

一、氣候分析

本節針對 10 年 (1991 年至 2000 年) 夏季模擬結果進行氣候分析, 以便了解模式氣候平均場的特性。夏季則採用 5~8 月平均為代表, 與 ECMWF 分析場進行比對, 並計算 PRM 與 ECMWF 各個變數之間的平均誤差

(Bias)、均方根差 (RMSE) 及型態相關 (pattern correlation) (如表一), 以客觀量化的方式來評估模式氣候場的表現。在逐月氣候平均的環流場方面 (表 1), 模式誤差不大, 與夏季平均的誤差差不多, 型態相關也多維持在 0.80 以上, 唯有 7 月及 8 月份平均的 850hPa 溫度場分為 0.65、0.51, 表現稍差。8 月的型態相關較低, 可能是因為 8 月是模擬的最後一個月, 模擬時間較久, 累積誤差也較大。至於 200hPa 水汽, 可能因為高層溼度值原本就很小, 因此在物理過程中, 稍有一點誤差在比例上就會變得很大。

綜觀以上的結果, 模式誤差相對於平均值與標準差而言都不顯著。整體而言, PRM 的模擬結果無論在空間分佈與強度均有不錯的表現, 能有效掌握環流的大體結構, 而且低層明顯比高層更為理想。

表 1 中顯示 (precip 為扣除系統性誤差前的降雨值, precip-error 為扣除系統性誤差後的降雨值) 5 月份均方根差由原先的 2.95mm/day 降低為 1.9mm/day, 型態相關由 0.37 大幅提昇至 0.77, 6 月份均方根差由 3.44mm/day 降為 1.7mm/day, 型態相關由 0.52 升至 0.86, 7 月份均方根差由 4.74mm/day 降為 1.9mm/day, 型態相關由 0.27 升至 0.84, 8 月份均方根差由 4.24mm/day 降為 1.7mm/day, 型態相關由 0.29 升至 0.86。

由以上地表氣溫與降雨分析, 我們發現 PRM 對地形的靈敏度相當高。在地表氣溫方面, 根據統計方法評估, PRM 表現的相當不錯, 同時在較高山區, 因地形高度越高, 冷偏差越大。在降雨部分, PRM 則因為物

理過程對地形太過敏感，在夏季西南風季風期間，在地形的迎風面處，一直存在明顯的系統性誤差。扣除系統性誤差之後，即可明顯提昇模式的表現，此點亦可由統計方法的結果中明顯得知。

二、年際變化

本節分析夏季降雨，來瞭解模式是否能夠有效的掌握年際變化。針對模式每一年夏季模擬平均結果與 CMAP 進行比對，PRM 模擬夏季 MJJA 平均降雨，均方根誤差（如表二），除 1994 及 1997 年的差值為 2.05、2.01 mm/day，其餘誤差值均低於 2.0mm/day，型態相關的比對（如表二），除 1993 及 1998 年為 0.68 及 0.72 為較差，其餘均高於 0.75。十年內有二次明顯的年際差異，分別為 1993 與 1994 年、1997 年與 1998 年，1993 年日本在夏季呈現多雨，台灣地區則為乾旱，1994 年恰好相反，夏季日本卻為少雨，台灣則呈現多雨。1997 年與 1998 年則為 1997 年夏季南來的系統比較強，使得當年台灣地區降雨偏多，日本地區降雨明顯偏少，1998 年夏季太平洋高壓勢力偏強，南來系統明顯減弱，使得當年台灣地區夏季平均降雨明顯減弱，日本地區降雨卻明顯增多。PRM 在這四年的模擬（如圖 1），均能掌握到當年夏季年際變化的氣候特徵，1993 年 PRM 在日本降雨明顯比 1994 年模擬的結果為多，台灣降雨由於是處於南來系統的邊緣，1993 年模擬的太平洋高壓比實際結果弱，因此台灣地區降雨模擬並未像實際資料一般的明顯減少，1994 年台灣降雨主要是因為南來系統明顯增強，PRM 的模擬結果中，南來系統是明顯增強，但

在台灣地區由於邊緣未明顯北抬，使得台灣模擬的雨量，並未與實際觀測的明顯增加。台灣地區降雨的模擬的年際變化在這二年接並沒有明顯的減少或增加，年際變化的訊號相當弱。1997 年 PRM 的模擬降雨中，日本是明顯的減少，1998 年則呈現明顯增加的情形，與實際觀測資料的年際變化結果相似。台灣地區 PRM 在 1997 年比 1998 年模擬雨量明顯增多，不過在 1998 年 PRM 模擬自南海的降雨系統強度卻比實際要強了許多，使得台灣南部地區得模擬雨量明顯偏多。

三、季內振盪

季內震盪在亞洲夏季季風區，有明顯伴隨著大尺度雲雨帶北移的現象。鄒等（2000，2002）指出季內振盪的移行路徑是由孟加拉灣北移，後在逐漸東移至南海，進入南海後，若能伴隨大尺度雲系北移，將會引起東亞地區豪大雨的情形發生，因此模式須能掌握南海季內振盪訊號的發生，進一步才能掌握東亞季風是否引發豪大雨的事件。Slingo et. al. (1996) 在 AMIP 實驗中發現多數的 AGCM 甚至無法定性的模擬季內振盪，朱等（2001）則發現 AGCM 更無法掌握夏季季內震盪北移的現象。區域模式具有較高空間解析度，若能準確模擬季內振盪，掌握降雨變化趨勢的能力也將較 AGCM 為高。本節針對南海區域（上述所提東亞地區季內振盪訊號的源頭）進行季內振盪訊號分析，希望了解 PRM 是否能準確的模擬季內振盪。

首先將 PRM 與 ECMWF 每年夏季 850hPa 日平均渦度進行 30~60 天的濾

波，再計算南海區域平均。分析南海地區 850hPa 渦度場低頻相位與強度，我們發現 PRM 模擬結果與 ECMWF 分析的結果十分一致。在 PRM 的模擬結果中，1996 年五月以後共有 3 次季內振盪（低頻正渦度高峰）通過南海，分別為 5 月 20 日、6 月 20 日與 7 月 27 日，1997 年亦有 3 次季內振盪訊號進入南海地區，分別為 5 月 23 日、6 月 30 日與 8 月 5 日，1998 年有二次季內振盪訊號進入南海地區，分別為 5 月 22 日及 6 月 30 日，1999 年 2 次季內振盪訊號進入南海地區（6 月 5 日與 7 月 25 日），2000 年則為 3 次季內振盪訊號進入南海地區，分別 5 月 16 日、6 月 14 日與 7 月 14 日。訊號高峰通過南海的時間，與 ECMWF 低頻分析的時間非常相近，低頻訊號強度的比較，亦顯示模擬與觀測幾乎相同。模擬之季內振盪的空間結構與移動方向，也與 ECMWF 分析呈現的特性相似（未示圖）。以上結果說明，PRM 可以掌握東亞夏季季風期間，通過南海地區季內振盪的低頻訊號。

四、結論與討論

PRM 在 10 年夏季的模擬實驗當中，PRM 在氣候場的表現相當出色，與實際分析場相驗證，型態相關多半高達 0.9 以上，相似性很高。夏季氣候平均海平面氣壓的均方根誤差值為 0.61hPa，與使用於歐洲的 RCM 的 0.77hPa 相似。整體而言，此模式成功的模擬了氣候平均大氣環流場。PRM 模式亦可模擬出地表氣溫分佈，可是可能因為地表參數化偏差與欠缺海器交互作用過程，地表氣溫在陸地上偏冷，海洋上偏暖。模式降雨因為對參

數化過程與地形的太過於敏感，因此在夏季的模擬中存在著一個在西南季風中地形迎風面所造成的系統性誤差結構。若將此一系統性誤差結構結果，模式在降雨模擬的誤差就大幅降低，型態相關也提昇至 0.77 以上。

PRM 在年際變化與季內尺度的變化的掌握上，亦有相當不錯的表現。在東亞地區及台灣附近區域夏季的降兩年際變化方面，在 PRM 模擬結果中，除了 1992、1994、1995、1996 及 1998 在部分區域距平值，呈現反相位。其餘結果均和觀測呈現同相位的結果。在空間分布上每年的型態相關均高於 0.68 以上。PRM 在 30~60 天季內尺度的低頻訊號的掌握上，在南海地區，與 ECMWF 分析的季內振盪訊號不僅相位相符，強度亦幾乎一致。PRM 對季內振盪變化的掌握相當理想。由以上實驗分析，PRM 已經可以相程度的模擬東亞夏季季風的氣候平均場，亦可掌握從季內到年際時間尺度的變化。對東亞夏季季風的研究而言是一個相當不錯的模擬工具。

參考文獻

- 朱容練，許晃雄與柯文雄，2001: AMIP 模式模擬之夏季季內振盪。第七屆全國大氣科學學術研討會論文彙編，台北，395-399。
- 鄒治華，柯文雄與張卜仁，2000: 利 Wavelet 分析南海地區季內振盪與東亞季風之研究，*大氣科學*，28，27-45。
- 鄒治華，徐邦琪與柯文雄，2002: 台灣五-七月豪（大）雨之中長期變化與季內振盪，*大氣科學*，

- Anthes, R. A., 1977: A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 270-286.
- Bosilovich, M. G., and W. Y. Sun, 1995: Formulation and verification of a land surface parameterization for atmospheric numerical models. *Bound-Layer Meteor.*, **73**, 321-341.
- Chern, J. D., 1994: Numerical simulation of cyclogenesis over the Western United States. Ph. D. Dissertation. Purdue University, West Lafayette, IN, pp. 178.
- Chou, M. D., and M. J. Suarez, 1994: An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models, NASA Tech. Memo. 104606, Vol. 3, 85pp.
- Dickinson R.E., R.M. Errico, F. Giorgi and G.T. Bates, 1989: A regional climate model for western United States. *Clim. Change*, **15**, 383-422.
- Huffman, G. J. and co-authors, 1997: The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined data set. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 5-20.
- Molinari, J., 1982: A method for calculating the effects of deep cumulus convection in numerical models. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 1527-1534.
- Slingo, J. M., K. R. Sperber, J. S. Boyle, J.-P. Ceron, M. Dix, B. Dugas, W. Ebisuzaki, J. Fyfe, D. Gregory, J.-F. Gueremy, J. Hack, A. Harzallah, P. Inness, A. Kitoh, K.-M. Lau, B. McAvaney, R. Madden, A. Mathews, T. N. Palmer, C.-K. Park, D. Randall, N. Renno, 1996: Intraseasonal oscillations in 15 atmosphere general circulation models: results from an AMIP diagnostic subproject. *Clim. Dyn.*, **12**, 325-357.
- Sun, W. Y., and J. D. Chern, 1993: Diurnal oscillation of mesoscale circulation in Taiwan and surrounding area. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 191-209.
- Sun, W. Y., and W. R. Hsu, 1988: Numerical study of cold air outbreak over the warm ocean. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1205-1227.
- Sun, W. Y., and P. A. Haines, 1996: Semi-prognostic tests of a new mesoscale cumulus parameterization scheme. *Tellus*, **48A**, 272-289.
- Wilson CA, Mitchell JFB, 1987: A doubled CO₂ climate sensitivity experiment with global climate model including a simple ocean. *J. Geophys. Res.* **92**, 13315-13343.

表一 PRM 夏季氣候平均場之均方根差與型態相關

	MJJA		May		June		July		August	
	RMSE	P_C	RMSE	P_C	RMSE	P_C	RMSE	P_C	RMSE	P_C
MSLP	0.61	0.95	0.69	0.96	0.70	0.96	0.77	0.94	0.61	0.93
Tsfc	0.77	0.99	0.83	0.99	0.82	0.99	0.84	0.98	0.82	0.98
T850	0.70	0.87	0.69	0.98	0.69	0.93	0.68	0.68	0.83	0.51
T200	1.69	0.85	1.52	0.85	1.98	0.80	1.80	0.91	1.55	0.92
Z850	4.66	0.95	5.49	0.96	5.37	0.98	5.71	0.97	4.22	0.96
Z200	43.55	0.99	45.65	0.99	46.13	0.99	42.26	0.98	40.59	0.94
Q850	1.28E-2	0.96	1.12E-2	0.98	1.26E-2	0.95	1.40E-2	0.91	1.37E-2	0.90
Q200	1.09E-4	0.84	8.17E-5	0.86	1.16E-4	0.81	1.28E-4	0.81	1.67E-4	0.84
Precip	2.7	0.35	2.95	0.37	3.44	0.52	4.74	0.27	4.24	0.29
Precip -error	1.0	-	1.9	0.77	1.70	0.86	1.90	0.84	1.7	0.86

表 2 1991 年至 2000 年各年夏季降雨均方根差與型態相關

	1991	1992	1993	1994	1995
RMSE	1.01	1.31	1.63	2.05	1.58
Pattern Correlation	0.91	0.81	0.68	0.78	0.77

	1996	1997	1998	1999	2000
RMSE	1.50	2.01	1.82	0.96	1.40
Pattern Correlation	0.87	0.80	0.72	0.94	0.89

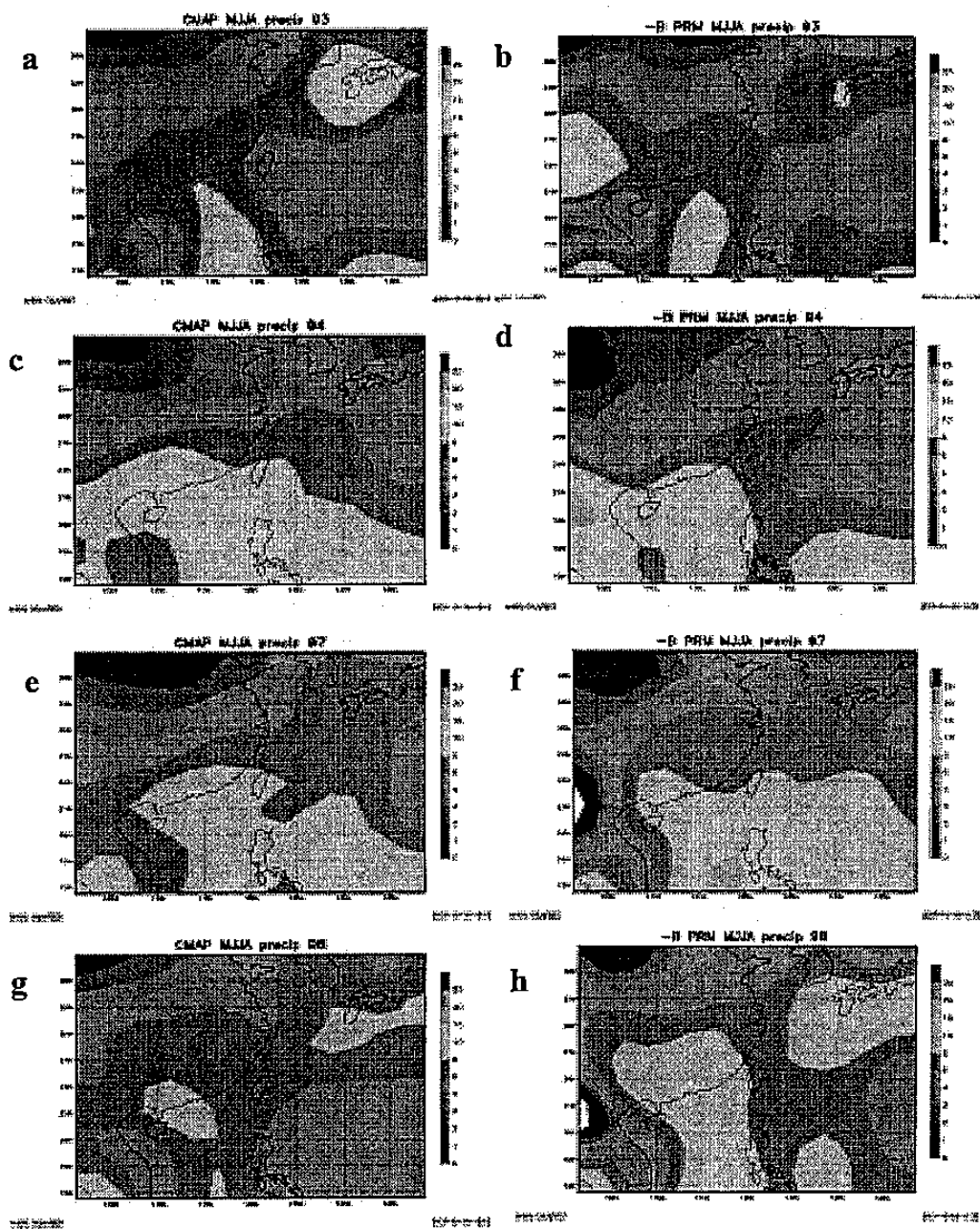


圖 1 各年夏季氣候月平均降雨之年際比較。(A) CMAP 1993 年 MJJA (B) PRM 1993 年 MJJA (C) CMAP 1994 年 MJJA (D) PRM 1994 年 MJJA (E) CMAP 1997 年 MJJA (F) PRM 1997 年 MJJA (G) CMAP 1998 年 MJJA (H) PRM 1998 年 MJJA。