

普渡區域模式模擬東亞夏季季風之評估

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 5 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 0.9)。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。在年際變化模擬方面，PRM 模擬的各年夏季雨量距平值均與觀測值同相 (即正負號相同)。比如，1996 年與 1998 年期間，東亞與台灣地區平均降雨偏少，1997、1999 及 2000 年平均降雨則為偏多。資料顯示，東亞與台灣地區降雨與氣壓的年際變化呈現明顯負相關，亦即 850hPa 高度場距平值與降雨距平值反號。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。

一、前言

區域氣候數值模式的發展，主要是為了彌補全球氣候模式在空間解析度上的不足。以目前氣候研究上常用的全球模式，一般空間解析度為 T42 (約 300 公里)，無法滿足氣候研究所需的區域性 (100 公里以下) 的尺度 (Wilson and Mitchell 1987)。為了大幅度提升空間解析度，同時克服電腦計算能力的限制，Diskinson et al (1989) 及 Giorgi (1990) 首先採用巢狀區域數值模式，進行氣候模擬研究。一個巢狀區域氣候模式的模擬，需要初始的氣象條件、隨時間改變的側邊界條件以及下墊面的邊界資料，方能提供一個高解析度區域氣候模式較完整的控制條件。區域氣候模式研究至今，發展的不只有大氣部分，同時還不斷的引入其他影響氣候的其他過程模式，如水文、海洋、海冰、化學與氣溶膠及地表過程與生物圈等模式。在 IPCC 全球氣候變遷的研究中，

Houghton et al. (2001) 提到要提高時間及空間的解析度有三種方法：(一) 有效提高全球模式的空間解析度，(二) 研發區域氣候模式，(三) 利用經驗統計與統計動力方法。在他們的評估報告中，大氣環流模式在季節地表平均溫度上的誤差約在 2~4°C，降雨誤差則在 -40% ~80%；高解析度區域氣候模式，地表溫度誤差在 2°C 以內，降雨的誤差則約在 50% 左右。區域模式明顯降低模擬誤差。

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 1996 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。

二、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 1996 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。

三、模擬結果之評估

針對 5 年 (1996 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)，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 8 月份平均的溫度場為 0.65 及高層 200 hPa 6 至 8 月的溼度場為 0.72 至 0.78 之間，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。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。經過偏差校正後，PRM 各年夏季降雨的空間分布均與 CMAP 分布相似，在型態相關方面 (表 2)，型態相關都在 0.8 以上 (1999 年最高 0.94，1998 年最低 0.8)，均方根差也都在 1.66mm/day 以下 (1996 年最小 1.03 mm/day，2000 年最大 1.66 mm/day)。在偏差校正降雨與 850 hPa 高度場中，PRM 具有與觀測分析資料相同的年際變化，且每年的模擬誤差

值相當小，結構亦相似。

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。（如圖一）

四、結論

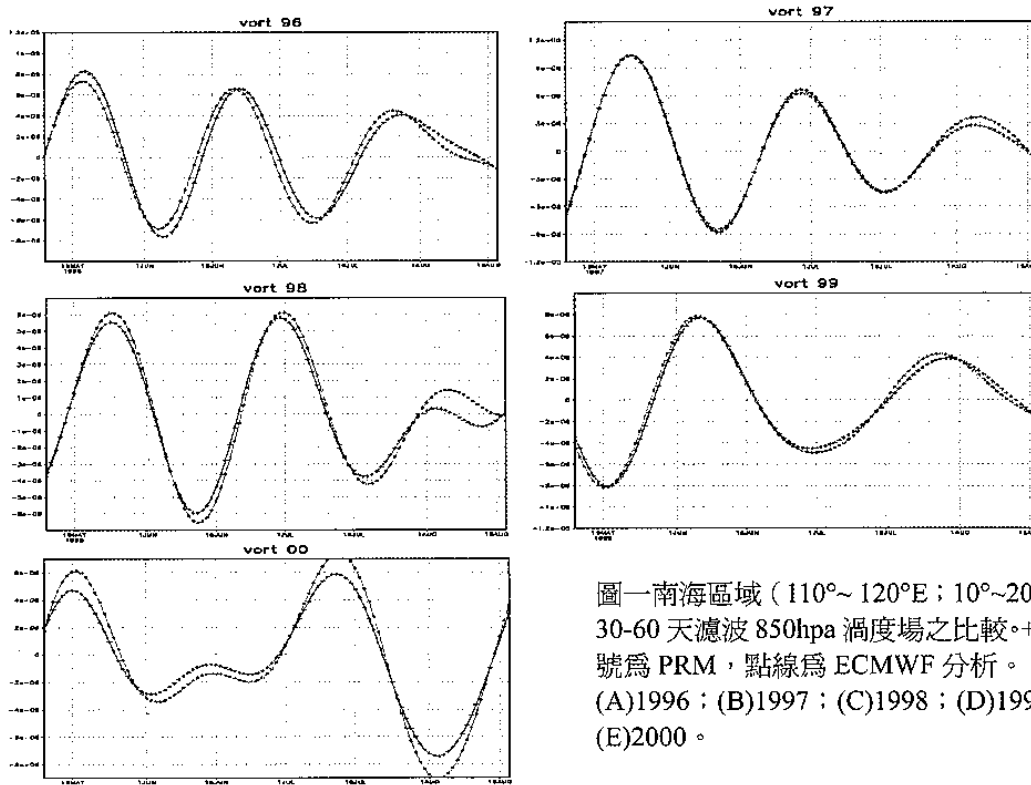
在 PRM 5 年夏季的模擬實驗當中，PRM 在氣候場的表現相當出色，與實際分析場相驗證，型態相關多半高達 0.9 以上，相似性很高。在溫度的垂直誤差中，模式低層為冷偏差，高層則為暖偏差。此一溫度誤差垂直結構使得 PRM 平均而言比實際大氣穩定。夏季氣候平均海平面氣壓的均方根誤差值為 0.61hPa，與使用於歐洲的 RCM 的 0.77hPa 相似。整體而言，此模式成功的模擬了氣候平均大氣環流場。PRM 模式亦可模擬出地表氣溫分佈，可是可能因為地表參數化偏差與欠缺海器交互作用過程，地表氣溫在陸地上偏冷，海洋上偏暖。模式降雨因為對參數化過程與地形的太過於敏感，因此在夏季的模擬中存在著一個在西南季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雨年際變化方面，在 PRM 模擬結果中，1996 年與 1998 年屬於雨量較少的乾年，1997 年、1999 年與 2000 年為雨量較多的濕年，其結果均與 CMAP 觀測資料呈現的年際變化一致。在 850 hPa 高度場的年際變化方面，模擬結果均與 ECMWF 分析的高度場變化的相同，如 1996 年與 1998 年少雨時，850hPa 高度場為正距平，1997 年、1999 年與 2000 年多雨時，高度場則呈現負距平。正負距平的年際表現恰與降雨的相位相反，主要是因為東亞地區夏季主要是受太平洋高壓系統的影響，當高壓勢力增強時，東亞地區與台灣地區之 850hPa 高度場呈現正距平，該年的降雨則明顯偏少。倘若該年高壓勢力較弱，850hPa 高度場為負距平時，降雨則偏多。因此，850hPa 高度場與降雨在年際變化的訊號上呈現相反的相位。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。

五、參考文獻

- 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.
- Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, **3**, 941-963.
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Manskell, C.A. Johnson, 2001: Climate Change 2001: The scientific Basis. 881pp.
- 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.
- 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.



圖一南海區域 (110°~120°E; 10°~20°N) 30-60 天濾波 850hpa 渦度場之比較。+ 符號為 PRM，點線為 ECMWF 分析。
(A)1996；(B)1997；(C)1998；(D)1999；(E)2000。

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	0.96	0.69	0.96	0.70	0.96	0.77	0.95	0.61	0.95
Tsfc	0.77	0.99	0.83	0.96	0.82	0.99	0.84	0.98	0.82	0.98
T850	0.70	0.90	0.69	0.98	0.69	0.92	0.68	0.81	0.83	0.65
T200	1.69	0.82	1.52	0.86	1.98	0.79	1.80	0.88	1.55	0.90
Z850	4.66	0.96	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	0.96
Q850	1.28E-2	0.96	1.12E-2	0.98	1.26E-2	0.95	1.40E-2	0.91	1.37E-2	0.91
Q200	1.09E-4	0.78	8.17E-5	0.85	1.16E-4	0.79	1.28E-4	0.72	1.67E-4	0.75
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 1996 年至 2000 年各年夏季降雨均方根差與型態相關

	1996	1997	1998	1999	2000
RMSE	1.03	1.39	1.35	1.04	1.66
Pattern Correlation	0.89	0.87	0.81	0.94	0.83

An evaluation of the East Asian summer monsoon simulation by the Purdue Regional Model

Yi-Chiang Yu ^{1,2}, Huang-Hsiung Hsu ¹, Wen-Shung Kau ¹, C-H Tsou ², Wu-Ron Hsu ¹,
and Wen-Yih Sun ³

¹ Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

² Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan

³ Dept of Earth and Atmospheric Sciences, Purdue University, West Lafayette, IN.

Abstract

This study used the Purdue Regional Model (PRM) to simulate the East Asian summer monsoon for the 5 summers from 1996-2000. Objective statistical methods and comparisons between the simulated and observed circulation and surface variables were performed to evaluate the performance of the PRM. All simulated variables except precipitation exhibit small errors and high pattern correlations with the observed. An analysis of the precipitation errors reveals the existence of a spatially-coherent systematic error pattern. After removing this pattern, the precipitation errors reduce significantly and the pattern correlations rise from 0.3-0.4 to 0.6-0.8. The signs of the simulated regional-averaged precipitation anomalies are the same as the observed (e.g., negative anomalies in 1996 and 1998 and positive anomalies in 1997, 1999 and 2000). This result indicates the well-simulated interannual variability by the PRM. The PRM also simulated the observed negative correlation between the 850hPa geopotential high and the precipitation in East Asia and Taiwan. In the intraseasonal time scale, the PRM well simulated the fluctuations of the 850hPa vorticity in both amplitude and phase in the South China Sea. Overall speaking, the PRM is able to simulate the East Asian summer monsoon variability from sub-seasonal to interannual time scale.