

氣象局全球模式之積雲降水及邊界層參數化的更新評估

汪鳳如 馮欽賜

中央氣象局科技中心 中央氣象局資訊中心

摘要

本局全球模式 (CWB GFS) 引進美國 NCEP 全球模式使用的 SAS (Simple Arakawa Schubert) 積雲參數化版本, 希望藉此版本積雲參數化對雲水逸出的考慮, 使得模式雲水收支計算趨向完整。在更新積雲參數化的同時, 發現模式大氣底層偏濕, 造成雲底的決定異常偏低, 因此將邊界層參數化同時更新, 以非局部 (nonlocal) 方案取代原有的局部 (local) 方案。本研究利用氣象局全球模式配合資料同化進行冬夏各二個月短期 (五天) 數值預報實驗, 希望以全球的角度對此次更新作進一步評估, 評估的重點放在預報之大範圍系統性偏差及統計得分的變化。

一、前言

過去的理論、觀測及模式研究顯示, 正確的模擬熱帶對流系統及大尺度降水過程, 對模式預報降雨及其所伴隨的大尺度熱力及動力交互過程是相當重要的。本局全球模式在 2007 年將網格尺度降水過程的處理從診斷方案提升為預報方案, 因此模式已包含雲水 (或雲冰) 預報, 但雲水的收支計算尚未將積雲雲頂的雲水逸出納入考慮, 因此嘗試引進美國 NCEP 全球模式 (GFS) 使用的 SAS (Simple Arakawa Schubert) 積雲參數化 (Pan and Wu 1995), 選取 SAS 方案的主要考量乃因為此方案考慮了雲滴在雲頂的捲出

(detrainment) 作用, 於熱帶區此部分雲滴為雲水收支的一重要來源項, 此部分的納入將使雲水預報架構更趨完整; 另外 SAS 方案亦涵蓋了幾項目前作業版本未考慮的物理過程, 包括下沖流 (down draft) 過程, 其下沖流強度是由積雲發展範圍內的水平風切決定; 另外 SAS 對流方案亦考慮了對流過程中動量的垂直傳遞交換, 其處理方式則和熱量及水氣相似。

在更新積雲對流參數化的測試過程中, 發現於現行模式大氣結構下, 以新版積雲參數法判斷所得的雲底高度偏低, 經進一步追蹤, 發現和近地層大氣偏濕相關, 此偏濕情況經診斷發現乃鑿因邊界層發展過低, 因此傳自下邊界的水氣侷限於近地層, 造成底層

偏濕。為徹底改善此不合理結構, 同時預期在正常大氣環境下, 新版積雲能較合理運作, 因此嘗試更換一邊界層參數方法。

現行作業版的邊界層參數化方法為一階半 (1.5 order) 之 $E-\epsilon$ 紊流閉合邊界層參數法 (Detering and Etling 1985), 此方法分別預報紊流動能 (E) 和紊流動能消耗率 (ϵ), 再以此二預報變數決定紊流擴散係數 K (eddy diffusivity coefficient), 因此可歸類為 K 理論之方法, 其紊流通量由紊流擴散係數 (K) 及變數之局部梯度 (local gradient), 以此方法計算所得之紊流通量, 僅考慮了局部環境的影響, 如此的考量在穩定及中性大氣中尚屬適當, 但是在不穩定邊界層中的紊流非常活躍, 其大小甚至可發展至邊界層範圍, 因而可能有反梯度的通量 (countergradient flux) 產生 (Deardorff 1972; Troen and Mahrt 1986; Holtslag and Moeng 1991), 但目前作業版使用之邊界層方法, 尚無法考慮到大渦流 (large eddy) 造成的非局部影響, 對不穩定邊界層的發展有低估的可能, 因此引進美國 NCEP 全球模式使用的非局部 (nonlocal) 邊界層方案 (Troen and Mahrt 1986)。

以下第二節即針對新版積雲參數化及邊界層參數化方案做一簡要介紹, 有關新版測試與作業版比較結果則於第三節作說明。

二、 更新方案說明

2.1 新版積雲參數化 (SAS)

有關積雲參數化更新版本，選用的 SAS (Simplified Arakawa and Schubert) 方案源自於 NCEP GFS 使用之版本，此版本為 Pan and Wu(1995) 所發展，其理論架構乃依據 Arakawa and Schubert(AS, 1974) 的研究，但參考了 Grell(1993) 提出的簡化假設將模式做了相當的簡化。

SAS 方案基本仍保留了 AS 參數化的理論核心，假設雲功函數維持準平衡，所以當大尺度過程傾向增加環境場的濕對流可用位能，使得雲功函數增加至超過臨界雲功函數時，將激發積雲對流以消耗濕對流可用位能，因此若計算出大尺度強迫作用，基於雲功函數準平衡假設，積雲對流必須提供反向且對等的貢獻，雲底質量通量因此可決定。

簡化部分則是參考 Grell(1993) 的簡化假設，僅考慮了單一雲種，而非原始 AS 方案的雲譜考量。但此單一雲種之雲頂高度，並非僅由氣塊法決定，而是在氣塊法找到的最深雲高與濕靜能最小值發生高度之間，重新以亂數做隨機選擇，定義出新的雲高，此種作法保留了單一雲種計算的單純性，同時經由亂數隨機選擇的數學特性相當於考慮了不同雲高的效果，因此亦改善雲頂的捲出雲滴過於集中在高對流層的現象，而能較均勻的分佈在中高對流層各層。

另外雲底的決定亦是積雲參數化方法中重要的一環，雲底高度不同將直接影響雲功函數大小，進而影響雲底質量通量及對大尺度回饋作用。SAS 方案是以近地層範圍 ($\sigma > 0.7$) 最大濕靜能所在為氣塊起始層，再以氣塊法尋找舉升凝結層 (LFC)，定義此層為雲底，並設限氣塊起始層和雲底距離不能大於 150hPa，否則對流無法發展。

2.2 新版邊界層參數化

邊界層更新版乃參考 NCEP GFS 使用的非局部邊界層參數法，此方法主要根據 Troen and Mahrt(1986) 的設計，其設計參照了大渦流 (large eddy) 模擬的

結果，將非局部通量觀念帶入邊界層參數化過程，其簡化的處理方式兼顧了計算效益，因此有許多天氣預報模式及大氣環流氣候模式的邊界層處理均以此架構為參考依據 (Giorgi et al. 1993; Holtslag and Boville 1993)。

此參數化方案中，Troen and Mahrt(1986) 的非局部通量參數化概念僅針對邊界層範圍，邊界層以上自由大氣的紊流擴散處理則是參考 Kim(1991) 的觀測研究。所以在邊界層內，依據 Troen and Mahrt(1986) 的概念，紊流擴散對任一變數 (C) 的影響可以下式表示：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_c \left(\frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c \right) \right] \quad (1)$$

動量擴散係數 K_m 在邊界層範圍內的垂直分佈是以一固定多項式描述：

$$K_m = k w_s z \left(1 - \frac{z}{h} \right)^p \quad (2)$$

p 值設定為 2， k 為 von Karman 常數 ($=0.4$)， h 為邊界層高度， z 為離地表的高度距離， w_s 為邊界層內的速度尺度 (velocity scale)。

實際計算流程中，邊界層高度的估計為參數化第一步驟，此版本是以整體理查遜常數 Rib (bulk Richardson number) 為判斷依據，從模式最底層開始檢查，若此層的 Rib 小於臨界整體理查遜常數 Rib_{cr} (critical bulk Richardson number)，則定義此層為邊界層範圍，邊界層高度 (h) 則為滿足此條件的最高高度， Rib_{cr} 目前設定為 0.25，其值大小對邊界層高度有決定性影響，邊界層高度 (h) 可由下式表示：

$$h = Rib_{cr} \frac{\theta_{v1}(U(h))^2}{g(\theta_v(h) - \theta_{vs})} \quad (3)$$

(3) 式中 θ_{v1} 為模式最底層之虛位溫 (virtual potential temperature)， $U(h)$ 為邊界層高度層之

水平風速， $\theta_v(h)$ 為邊界層高度層之虛位溫， θ_{vs} 在第一次估計邊界層高度時以 θ_{v1} 帶入。至於質量擴散係數 (K_z) 可經由 Prandtl number 關係式求得，詳細數學式可參考 Hong and Pan (1996)。

三、 平行測試

3.1 測試模式及方法

本次三維研究測試乃採用現行作業之全球預報模式，此版本解析度為 T240L30，模式預報變數包含渦度場、輻散場、虛位溫、比濕及地面氣壓，至於模式詳細的動力及物理過程可參考 Liou et al. (1997)。

為評估新版物理方案的影響同時考量物理過程在不同季節的活躍差異性，因此設計模式於對比明顯的冬夏季節分別測試二個月，希望藉此提供較完整的評估。因此選取冬季及夏季各二個月進行準平行測試；亦即模擬作業程序，以 post-run 維持 6 小時一次的資料同化分析及 6 小時預報，以此預報提供 major-run 於 00Z、12Z 的初始猜測場並進行 5 天 (120hr) 預報，經由二個月的資料同化預報，預報的影響藉由 6 小時預測場帶入分析，可累積模式差異造成的影響，最後以整體平均和作業版的預報得分進行評比，其結果將較單一案例具代表性。

測試分二組進行，一組為作業版，另一組測試版則將積雲參數化及邊界層參數化二個物理方案更換，其餘均維持與作業版模式相同。測試評估乃依循傳統校驗系統，針對異常相關 (ACH)，標準偏差 (standard deviation) 進行分析比較。由於垂直較驗層大於 10 層，為簡化較驗圖集，先將各層得分作時間平均，再針對三個區域北半球 (20N-80N)，南半球 (20S-80S) 及熱帶 (20S-20N) 直接進行區域平均得分的垂直分佈比較。每一層的時間序列比較，僅以異常相關於 500hPa 高度場及海平面氣壓場之得分為代表。

3.2 預報得分評比

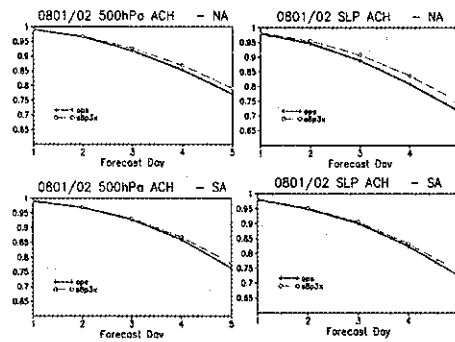


圖 1：上圖為北半球 (20N-80N) 區域，500hPa 高度場及海平面氣壓場五天預報之異常相關 (ACH) 於 2008/1 至 2008/2 二個月期間之月平均得分比較。下圖則為相同變數場於南半球的比較情況。實線為作業版，虛線為測試版。

冬季個案選取之測試時段為 2008 Jan /1- Feb /28，500hPa 高度場及海平面氣壓場的第一至第五天預報得分 (ACH) 評比示於圖 1，從圖上可看到幾個現象，其一測試版 (虛線) 的得分表現均優於作業版 (實線)，其二北半球進步的幅度明顯大於南半球，低層 (海平面氣壓場) 又較中高層 (500hPa 高度場) 顯著，其三不論南北半球，進步顯著性隨預報時間增加而增大，乃至第五天差異最大。以下即針對第五天預報，作進一步全面比較。

首先以北半球的第五天預報為代表，對 500hPa 高度場及海平面氣壓場的距平相關 (ACH) 得分，進一步審視二個版本時間序列的表現差異，從時間序列上的差異可發現，測試版於作業版原本得分較低的情況有較顯著的改進，其餘大部分時間則是略高於作業版，少數情形也有略低於作業版的現象，整段時間平均而言，500hPa 高度場得分從 0.770 進步至 0.790 (提昇率 2.5%)，海平面氣壓場的得分表現則有更顯著的進步，從 0.715 提升至 0.746 (提昇率 4.3%)。

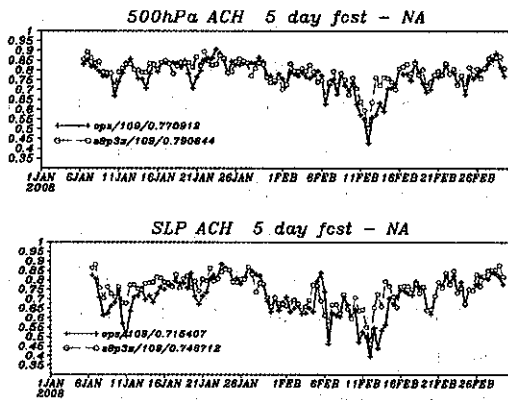


圖 2：2008/1 至 2008/2 期間，北半球之 500hPa 高度場及海平面氣壓場，於第五天預報的距平相關 (ACH) 時間序列。實線為作業版，虛線為測試版。

接下來我們將焦點放在北半球及南半球垂直各層表現差異，圖 3 為距平相關 (ACH) 的比較，圖上清楚顯示，不論於北半球或是南半球，測試版 (虛線) 垂直各層的距平相關均明顯大於作業版 (實線)，同時如前面圖 1 所示，北半球進步的幅度較南半球更為顯著。至於溫度場 (圖 4) 及風場 (圖略) 的均方根誤差 (root mean square error)，於北半球、熱帶及南半球三個區域，也同時顯示測試版 (虛線) 的誤差較作業版 (實線) 明顯減小。

從距平相關及均方根誤差的變化，可以確定測試版模式對大尺度系統形勢 (pattern) 的掌握和觀測有更高的一致性，模式整體的絕對偏差也往減小方向改進。夏季個案測試選取時段為 2007 Jun /1 - Jul /31，其評比結果和冬季測試相似，新版的預報得分表現均顯著優於作業版 (圖略)。

最後以表一將整體比較做一數值上的整理，表一列出二個季節 (各二個月) 的 ACH 得分數值比較，選取 500hPa 高度場及地面氣壓為代表，每個格子內同時列出北半球 (左) 及南半球 (右) 的得分數值，中以斜線分隔，作業版均以黑色字表示，測試版得分若比作業版高則以粗字表示，表格中清楚顯示新版得分均較作業高。

整體評估結果顯示，不論冬季或夏季月份，新版本均表現出正面影響，同時考量新版本具有較完整理論基礎的利基，建議將此新版本上線。

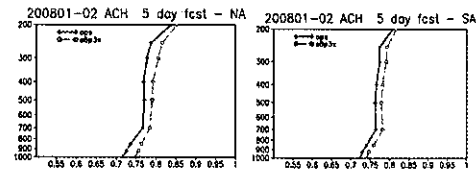


圖 3：2008/1 至 2008/2 期間，北半球 (圖左) 及南半球 (圖右) 垂直各層之距平相關得分比較。紅線為作業版，藍線為測試版。

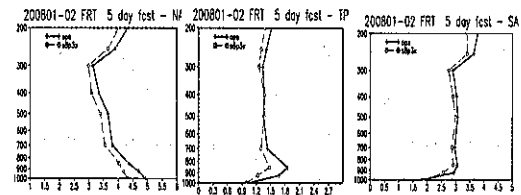


圖 4：2008/1 至 2008/2 期間，於北半球 (圖上) 熱帶 (圖中) 及南半球 (圖下) 第五天預報溫度場均方根差之月平均垂直分佈比較。紅線為作業版，藍線為測試版。

2008/		
	Jan-Feb	(NA/SA)
	500hPa	slp
ops	0.770/0.762	0.715/0.726
new	0.790/0.778	0.746/0.741
2007		
	/ Jun-Jul	(NA/SA)
	500hPa	slp
ops	0.767/0.771	0.717/0.736
new	0.784/0.774	0.750/0.738

參考文獻

Arakawa, A., and W. H. Schubert, 1974: Interaction of cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.

Deardorff, J. W., 1972: Theoretical expression for the countergradient vertical flux. *J. Geophys. Res.*, **77**, 5900-5904.

Grell, G. A., 1993: Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 764-787.

- Giorgi, F., M.R. Marinucci, and G. T. Bates, 1993: Development of a second-generation regional climate model(RegCM2). Part1: Boundary-layer and radiative transfer process. *Mon. Wea. Rev.*, **121**,2794-2813.
- Holtslag, A., A. M., and C.-H.Moeng, 1991: Eddy diffusivity and countergradient transport in the convective atmospheric boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **48**, 1690-1698.
- , and B.A. Boville, 1993: Local versus nonlocal boundary layer diffusion in a global climate model. *J. Climate*, **6**, 1825-1842.
- 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.
- Kim, J., 1991: *Turbulent and Gravity Wave Transport in the Free Atmosphere*. Ph.D. dissertation, Oregon State Univerdity, 103pp.
- Liou, Chi-Sann, Jen-Her Chen, Chuen-Teyr Terng, Feng-Ju Wang, Chin-Tzu Fong, Thomas E. Rosmond, Hong-Chi Kuo, Chih-Hui Shiao, and Ming-Dean Cheng, 1997: The second-generation global forecast system at the central weather bureau in Taiwan. *Weather and Forecasting*, **3**, 653-663.
- Pan, H.-L. and W.-S. Wu, 1995: Implementing a mass flux convective parameterization package for the NMC Medium-Range Forecast model. NMC Office Note 409, 40pp.
- Troen, I., and L. Mahrt, 1986: A simple model of the atmospheric boundary layer: Sensivity to surface evaporation. *Bound. Layer Meteor.*, **37**, 129-148.