

邊界層參數法之調整對於 CWB - GFS 的影響

汪鳳如 陳建河

中央氣象局科技中心 中央氣象局資訊中心

摘要

中央氣象局於 2016 年四月上線之 T511L60 全球模式，除於水平解析度及垂直解析度有大幅提升，物理參數化過程亦有多處調整，其中邊界層參數法於原有架構下，另增加層積雲(stratocumulus)區內雲輻射作用所驅動(top-driven)的邊界層渦流擴散效應(Lock et al. 2000)。其中層積雲區是以 2500m 高度內存在雲水(liquid water)混和比大於 3.5×10^{-5} kg/kg 為界定條件，於符合條件之區域，額外考慮雲輻射冷卻導致的局部不穩定環境所引發的渦流擴散(stratocumulus-top-driven diffusivity)。

邊界層參數化過程於層積雲區增加的渦流擴散效應對整體預報得分影響並不顯著，但對雲水的分布特性則有明顯影響，雲水的垂直剖面分析顯示，低層雲水分布明顯往上抬升，其中又以熱帶區特別顯著；從 925hPa 的雲水分布可以發現，熱帶區域的雲水有普遍減少趨勢，而 850hPa 的雲水分布則於此區呈現增加趨勢。若以 ECMWF 的重分析資料(ERA-Interim)為參考，可發現調整版本產生的雲水分布較趨近此參考標準。

關鍵字: 邊界層參數法，雲輻射冷卻，渦流擴散效應

一 前言

中央氣象局全球模式(CWB-GFS)於 2016 年四月上線作業的更新版本，主要於垂直解析度及水平解析度進行了大幅提升，垂直分層從 40 層增加為 60 層，模式頂從 1hPa 提高至 0.1hPa，水平網格數則從 960x480(T319)增為 1536x768 (T511)，更新後模式的網格間距降至約 25 公里。

雖然解析度提升為此次版本更新主要目的，但配合解析度之改變，物理過程亦有多處進行了調整，其中網格尺度降水過程的雲水(冰)凝結及雲量計算，均牽涉到一個臨界相對濕度的定義，原模式中此變數的定義僅隨緯度(緯度越低，臨界值越小)及網格間距(格點越粗，臨界值越小)變化，但在新版模式中增加了太陽天頂角的影響，進一步將季節影響納入。另外有關雲輻射過程計算所需的雲量(Xu and Randall 1996)及雲滴粒徑(Fu 1996)等資訊，在新版本亦做了調整，並將原本雲量最大值為 0.6 的設限取消。以上幾項物理過程的修改，對於模式原本偏低的高雲診斷有顯著的加強，同時降低了因垂直解析度提高衍生的高層冷偏差。

新版模式在物理過程的另一項改變是選用了邊界層參數法的另一版本選項，此版本增加考慮當邊界層之上有層積雲時，雲輻射冷卻導致的局部不穩定環境所引發的渦流擴散(stratocumulus-top-driven diffusivity)，此部分主要是參考有雲覆蓋之邊界層模擬相關研究(Lock et al. 2000; van Meijgaard and van Ulden 1998)，加入對於有雲覆蓋之邊界層頂混和逸入的補強作法，此版本雖已建置於模式中，但在之前較低解析度版本的測試評估中，因為預報得分於冬季月份有顯著負面影響，因此未能上線作業。但於此次提高解析度之版本重新測試，結果顯示對預報得分影響並不顯著，但對低層雲水結構有顯著的影響，若以歐洲氣象中心(ECMWF)的重分析資料(ERA-Interim)為參考標準，可以發現雲水於低層的變化較接近參考標準，因此在此次上線的新版模式中選用此調整版本邊界層參數法。

以下第二節將針對此版本邊界層參數法增加之調整部分做說明，第三節為實驗設計並從預報得分及雲水分佈進行結果比較，第四節為結論。

二 邊界層參數法的調整

(一) 作業版

調整版邊界層參數法是以原作業模式的 MRF 邊界層參數法架構 (Hong and Pan 1996; Troen and Mahrt 1986) 為基礎，原架構下邊界層內任一變數 (c) 的渦流通量可表示為

$$\overline{w'c'} = -(K_h^{surf}) \frac{\partial c}{\partial z} + K_h^{surf} \gamma_c \quad (1)$$

(1) 式右邊第一項為局部渦流擴散作用，與變數的局部梯度相關， K_h^{surf} 表示由下邊界驅動的渦流擴散係數。第二項為大渦流產生的非局部擴散作用， γ_c 代表大渦流 (large eddy) 非局部效應：

$$\gamma_c = b \frac{\overline{w'c'}}{w_{sh}} \quad (2)$$

目前模式對非局部通量的考量僅針對質量場 (溫度場及濕度場)，所以 $\overline{w'c'}$ 為溫度場或濕度場的地表通量， w_s 為邊界層內的速度尺度 (velocity scale)， h 為邊界層高度， b 設定為 7.8。

(二) 調整版

調整版的邊界層渦流通量計算由 (1) 式修改為 (3) 式，右邊第一項增加之 K_h^{sc} 即代表增加的層積雲 (stratocumulus) 之雲輻射作用所驅動 (top-driven) 的邊界層渦流擴散效應 (Han and Pan 2011; Lock et al. 2000):

$$\overline{w'c'} = -(K_h^{surf} + K_h^{sc}) \frac{\partial c}{\partial z} + K_h^{surf} \gamma_c \quad (3)$$

其中層積雲區是以 2500m 高度內存在雲水 (liquid water) 混和比大於 3.5×10^{-5} kg/kg 為界定條件，於符合條件之區域，額外考慮雲輻射冷卻導致的局部不穩定環境所引發的渦流擴散 (stratocumulus-top-driven diffusivity)。有關 K_h^{sc} 的詳細數學式可參考 Han and Pan (2011)。

三 實驗設計及結果

本研究測試採用氣象局全球預報模式於 2016 年四月上線作業的版本，此版本解析度為 T511L60，為一典型波譜模式，垂直為 sigma

$$\left(= \frac{(p - p_{top})}{(p_{sfc} - p_{top})} \right) \text{ 及氣壓}(P)\text{混和座標，模}$$

式預報變數包含渦度場、輻散場、虛位溫、比濕、雲水及地面氣壓。模式的物理模組包含 NOAH-4 層土壤模式 (Ek et al. 2003)，相似理論地表通量參數法

(Businger 1971)，MRF 邊界層參數法 (Hong and Pan 1996)，淺積雲參數法 (Li 1994)，new_SAS 積雲參數法 (Han and Pan 2011)，雲水預報決定網格尺度降水參數法 (Zhao and Frederick 1997)，重力波拖曳參數法 (Palmer et al 1986) 及輻射參數法 (Fu 1997; Fu and Liou 1992; 1993)。模式之客觀分析採用 3 維變分方法，此方法源自 NCEP - GSI 版本 (Wu et al. 2002)。

測試規劃選取 2013 年 1 月 1 日至 15 日，進行 15 天擬作業程序測試；亦即模擬作業程序，進行每天四次 (00 UTC, 06 UTC, 12 UTC, 18 UTC) 資料同化分析及預報，除了於 12 UTC 和 00 UTC 進行 120 小時預報，其餘二個分析時間 (06 UTC, 18 UTC) 則僅預報 6 小時，並以每一次 6 小時預報場，作為下一次 (6 小時之後) 觀測資料同化分析之猜測場。以此架構測試，預報的影響可藉由 6 小時預測場帶入下一次分析，累積模式差異產生的影響，最後以整個測試期的平均預報得分進行評比，其結果將較單一個案具代表性。測試分二組進行，控制組採用原作業版邊界層方案，調整組採用調整版邊界層方案，其餘均維持相同。

(一) 預報得分比較

預報得分為為作業更新評估的基本參考，因此先將各層得分作時間平均，再針對北半球 (NA, 20°N-80°N)，南半球 (SA, 20°S-80°S) 及熱帶 (TP, 20°S-20°N) 三個區域，直接進行垂直分佈比較。圖一為北半球的高度場距平相關 (AC, Anomaly Correlation) 比較，圖 1a 顯示二測試版於北半球的中低層 (500hPa

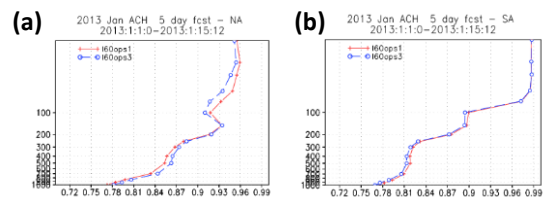


圖 1. 2013/1/1-15 期間的 120hr 預報高度場之距平相關得分垂直分佈，(a) 為北半球平均 (b) 為南半球平均，實線代表作業版，虛線代表調整版。

以下)差異不明顯，但調整版(虛線)於中高層(500hPa 至 200hPa)有稍高的得分，100hPa 以上得分卻較差。至於南半球的預報得分比較(圖 1b)，顯示調整版於中高層稍微偏低，但客觀來看二版本於南半球得分從低層到高層算是相當。

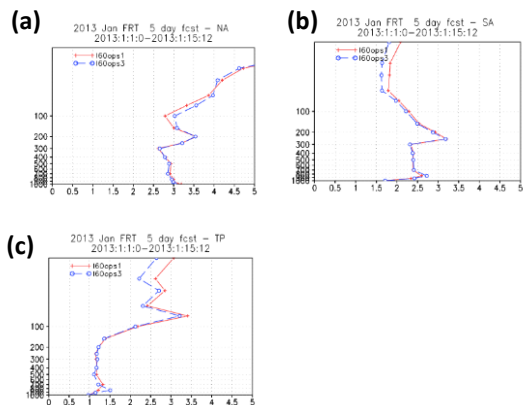


圖 2. 2013/1/1-15 期間的 120hr 預報溫度場之均方根絕對誤差垂直分布，(a)為北半球平均(b)為南半球平均(c)為熱帶平均，實線代表作業版，虛線代表調整版。

圖 2 為溫度場均方根標準誤差的比較，結果同樣顯示不論是北半球(圖 2a)南半球(圖 2b)或是熱帶(圖 2c)區域平均，二版本於 100hPa 以下的差異均不明顯，反而是 100hPa 以上有較顯著的差異。

整體而言，直接受到邊界層調整影響的低層大氣，其預報得分變化並不明顯，反而是高層有較明顯的差異，猜測此部分和二版本於背景場的擴散值設定方式變動有關。作業版風場及熱力場的背景擴散值均介於 0 與 1，隨高度作指數遞減；調整版於風場的背景擴散值設為固定值 $3\text{ m}^2/\text{s}$ ，熱力場的背景擴散值則維持隨高度作指數遞減，數值仍介於 0 和 1，但對於逆溫層則限定其值不能超過 $0.3\text{ m}^2/\text{s}$ 。

(二) 雲水分布比較

雖然邊界層參數法於層積雲區增加的渦流擴散效應對整體預報得分影響並不顯著，但對雲水分布特性有明顯影響。針對測試實驗期間 2013/1/1-15 的 24 小時預報作平均，其中雲水預報的 y-z 垂直剖面顯示(圖 3)，調整版(圖 3b)的低層雲水分布明顯較原作業版(圖 3a)往上擴升，其中熱帶區特別顯著。因此取南北緯三十度範圍作經向平均，平均之後的 x-z 剖

面(圖 4)清楚呈現熱帶於大部分緯度的低層雲水分布均呈現向上擴展趨勢，二版的差異(圖 4c)更清楚顯示調整版於 900hPa 以下的雲水為減少趨勢，900hPa 以上則是明顯增加，其增加範圍不一，最高可達 700hPa 左右的高度。

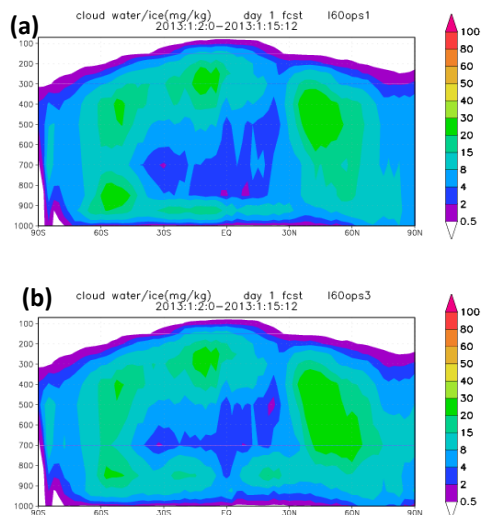


圖 3 2013/1/1-15 的 24hr 預報平均，(a)為原作業版(b)為調整版的雲水(冰) y-z 垂直剖面。單位為 mg/kg 。

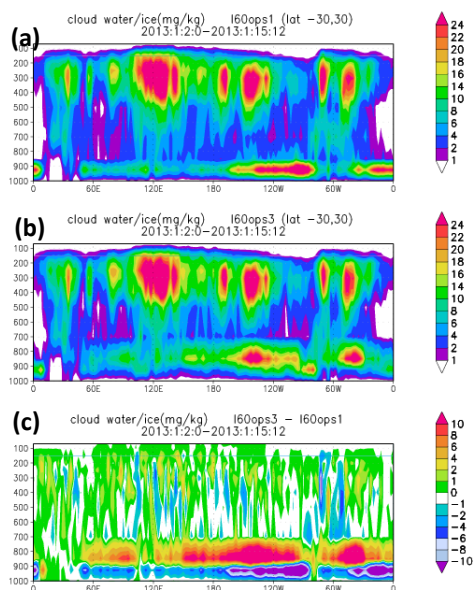


圖 4 2013/1/1-15 的 24hr 預報，(a)為原作業版(b)為調整版雲水(冰)於 20S 至 20N 平均的 x-z 垂直剖面。(c)為調整版-作業版的差值。單位為 mg/kg 。

為進一步了解雲水變化於水平的分布特徵及其合理性，另選取 ECMWF 的重分析資料(ERA-Interim)為比較參考，檢視測試實驗於 2013/1/1-15 期間 24 小時預報的平均雲水水平分布。結果顯示，調整版(圖 5b)的 925hPa 雲水混合比(mg/kg)於熱帶的中太平洋至東太平洋區域較原作業版(圖 5a)普遍的顯著減小，大

西洋區亦發現類似趨勢，若以 ECMWF 的重分析資料 (ERA-Interim) 為參考(圖 5c)，可發現調整版的變化朝

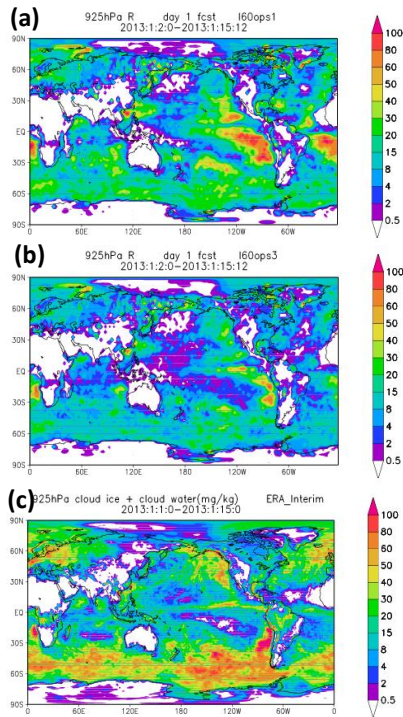


圖 5 2013/1/1-15 的 24hr 預報平均，(a)為原作業版(b)為調整版(c)為 ERA-Interim 重分析資料的 925hPa 雲水/冰分布。單位為 mg/kg。

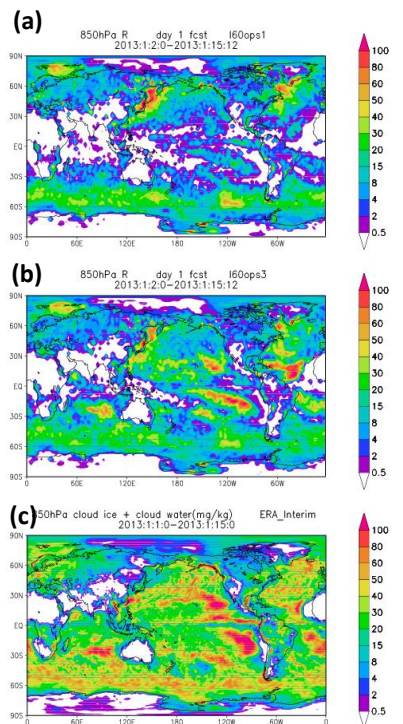


圖 6 2013/1/1-15 的 24hr 預報平均，(a)為原作業版(b)為調整版(c)為 ERA-Interim 重分析資料的 850hPa 雲水/冰分布。單位為 mg/kg。

此參考標準趨近；而調整版的 850hPa 雲水混合比值 (圖 6b)於此二區則較原作業版(圖 6a)增大，此調整方

向亦較趨近 ECMWF 的重分析資料(圖 6c)。

另外，藉由 ECMWF 的重分析資料，我們同時發現 CWB-GFS 於南緯 45 至 60 度的中高緯度區有一顯著的系統性偏差，低層雲水混合比非常明顯的低估，此為本模式值得進一步研究的課題。

四 結論

邊界層參數法增加的層積雲區渦流擴散效應，雖然對預報得分影響並不顯著，但造成熱帶區低層雲水結構顯著的變化。以 ECMWF 重分析資料 (ERA-Interim) 為參考標準的 925hPa 及 850hPa 雲水比較，顯示調整版的雲水分布較趨近此參考標準。

低層雲水結構的改變，同時對下邊界短波輻射的淨吸收量(圖 7)產生影響，但因主要影響區域為海洋，而目前 CWB-GFS 的短期預報期間並未考慮海溫變化，所以短波輻射的變化在短期預報未能完全顯現其影響。但若考慮此模式於氣候預報的應用，雲水結構變化透過輻射作用對海溫預報及其他熱帶氣候特徵產生的衍生影響，將值得特別注意。

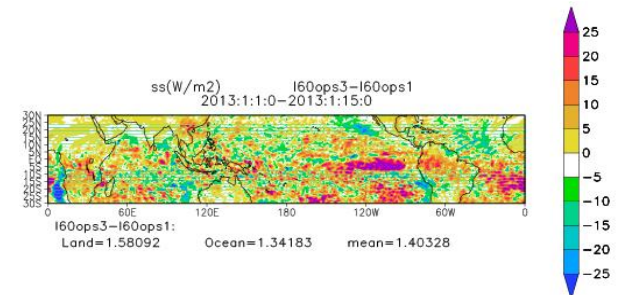


圖 7 2013/1/1-15 的 24 小時平均地表短波輻射淨吸收量，於熱帶區的差異(調整版-作業版)。單位為 W/m²。

參考文獻

Businger, J. A., J. C. Wyngaard, Y. Izumi, and E. F. Bradley, 1971: Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, *J. Atmos. Sci.*, **28**, 181-189-701.

Fu, Q., and K. N. Liou, 1992: On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 2139-2156.

Fu, Q., and K. N. Liou, 1993: Parameterization of the radiative properties of cirrus clouds. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2008-2025.

Fu, Q. 1996: An accurate parameterization of the solar

- radiative properties of cirrus clouds for climate models. *J. Atmos. Sci.*, **9**, 2058-2082.
- Fu, Q., K. N. Liou, M. C. Cribb, T. P. Charlock, and A. Grossman, 1997: Multiple scattering parameterization in thermal infrared radiative transfer. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 2799-2812.
- Han, J., and H.-L. Pan, 2011: Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP Global Forecast System. *Wea. Forecasting*, **26**, 520-533.
- 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.
- Li, J.-L., 1994: On shallow cumulus parameterization scheme for large-scale planetary boundary layers, Ph.D. thesis, University of Wisconsin-Madison, pp203.
- Lock A. P., A. R. Brown, M. R. Bush, G. M. Martin, and R. N. B. Smith, 2000: A new boundary layer mixing scheme. Part I: Scheme description and single column model tests. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 3187-3199.
- Palmer, T. N., G. Shutts, and R. Swinbank, 1986: Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 1001-1039.
- Troen, I., and L. Mahrt, 1986: A simple model of the atmospheric boundary layer: Sensivity to surface evaporation. *Bound. Layer Meteor.*, **37**, 129-148.
- van Meijgaard, E., and A. P. van Ulden, 1998: A first-order mixing-condensation scheme for nocturnal stratocumulus. *Atmos. Res.*, **45**, 253-273.
- Wu. W.-S., R. J. Purser, and D. F. Parrish, 2002: Three-dimension variational analysis with spatially in homogeneous covariances. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2905-2916.
- Zhao, Qingyun and F. H. Carr, 1997: A Prognostic Cloud Scheme for Operational NWP Models. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1931-1953