

中央氣象局全球預報模式RRTMG輻射參數化及臭氧參數化方法影響評估

張美玉
氣象科技研究中心
中央氣象局

摘要

太陽輻射為地球大氣系統最重要及根本的能量來源，而輻射參數化與臭氧參數化方法用於計算數值模式中大氣短波及長波輻射之作用量，將直接影響地球—大氣—海洋系統的能量變化，為數值預報模式中非常重要的一環。中央氣象局全球預報模式目前已成功引進及建置應用於 ECMWF、NCEP-GFS 等歐洲及美國氣象作業模式之 RRTMG 輻射參數化及臭氧參數化模組。本報告將包含 RRTMG 輻射參數化及臭氧參數化方法之理論概念說明，描述模組之基本方程、所需新增之背景資料及模組之基本架構。

由三組實驗的預報結果顯示，RRTMG 參數化方法在多數個案的表現較中央氣象局全球模式 Fu-Liou 輻射參數化方法表現為佳，尤其在南半球，所有個案均顯示 RRTMG 參數化方法之預報技術得分較佳。

在 McICA 及 cloud overlap 敏感度測試發現，對於短天期之個案測試實驗，此二選項，對模式的預報結果均不甚敏感，影響甚小。而加入臭氧參數化模組之測試結果顯示，臭氧參數化對模式預報技術得分確有正面的效應。

關鍵字：輻射參數化、臭氧參數化

一、前言

太陽的短波輻射為地球—大氣系統能量的來源，此外長波輻射和大氣的溫室效應兩者息息相關，亦為維持地球—大氣系統溫度相對穩定的主要機制，輻射參數化模組為大氣數值預報模式中最複雜的物理模組，其與臭氧參數化模組主控數值模式中大氣短波及長波輻射作用量的計算，將直接影響地球—大氣—海洋系統的能量變化；此外，輻射作用量亦為估算溫室效應及氣候變遷強度的度量，因此引進目前國際作業中心所應用之最新一代的輻射與臭氧參數化模組，將有助於改進本局全球預報模式與氣候預報系統的物理過程，提升預報品質，並提供預報作業單位在短期天氣預報、中長期氣候預報以及氣候變遷衝擊之評估方面，得到最佳的預報資訊與指引。

二、RRTMG 輻射參數化方法及臭氧參數化方法說明

2.1 RRTMG 輻射參數化方法

RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model for GCM) 輻射參數化方法(Iacono et al., 2008)為美國「大

氣與環境大氣研究股份有限公司」(Atmospheric and Environmental Research, Inc.)所研發，乃應用「相關吸收係數 k - 分布」方法 (correlated k-distribution technique)來計算大氣的輻射通量。

「相關吸收係數 k - 分布」的方法概念是將輻射通量透射率從波數的函數，轉成吸收係數累積機率(g)的函數，其說明如下：

在均勻大氣中，一特定波段的輻射通量透射率可由對波數的積分，轉為對吸收係數(k)的積分，

$$T_v(u) = \int_{\Delta v} e^{-k \cdot u} \frac{dv}{\Delta v} = \int_0^{\infty} e^{-ku} f(k) dk \quad (1)$$

即將吸收係數(k)由小到大排序，再以吸收係數之透射率乘以吸收係數的機率分布函數 f(k)並積分，則可得此特定波段的輻射通量透射率。其中 f(k) 是吸收係數(k)在波段 (Δv) 之正規化 (normalized) 機率分布函數，當 k_{\min} 趨近 0， k_{\max} 趨近 ∞ 時，

$$\int_0^{\infty} f(k) dk = 1 \quad (2)$$

另定義吸收係數(k)的累積機率函數 g(k)如下，

$$g(k) = \int_0^k f(k) dk \quad (3)$$

$$dg(k) = f(k) dk \quad (4)$$

則 (1) 可改寫為

$$T_v(u) = \int_{\Delta v} e^{-k \cdot u} \frac{dv}{\Delta v} = \int_0^{\infty} e^{-ku} f(k) dk \quad (5)$$

$$= \int_0^{\infty} e^{-k(g)u} dg \approx \sum_{j=1}^m e^{-k(g_j)u} \Delta g_j$$

因 $g(k)$ 相對於吸收係數 (k) 為變化平緩的函數，不似吸收係數 (k) 相對於波數的劇烈變化，因此，此方法可將原來依波數排序，需進行數(十)萬次單線積分之計算，簡化為只需依吸收係數累積機率分布函數 (g)，進行百餘個 g 區段之計算，大大減少模式運算的時間。

有關吸收係數 (k) 及累積機率分布函數 (g) 等資訊，RRTMG 輻射參數化方法採用單線積分模式 (line-by-line model) 之結果，運用於大氣短波、長波的輻射通量及衍生之加熱率等計算，以增進輻射通量等計算之精確度與效率。由於雲在全球模式網格解析度下為非均勻分布，且雲的輻射作用效應對大氣輻射及全球能量平衡之影響甚鉅，因此 RRTMG 輻射參數化方法採用 Pincus and Morcrette(2003) 蒙地卡羅單獨氣柱近似法 (Monte Carlo Independent Column Approximation, McICA)，以亂數取樣方式處理網格點上輻射通量受次網格雲分量之影響與效應。對於雲垂直疊加的處理，則包括隨機疊加 (random overlap) 及最大值-隨機疊加 (Maximum-random overlap) 二種方式。有關水雲 (cloud water) 的光學特性，採 Hu and Stamnes(1993) 設定，對於冰雲 (cloud ice) 的光學特性，則依 Fu(1996) 之定義。

RRTMG 輻射參數化方關於短波輻射之計算，其包含 14 個波段及 112 個 g 區段，短波輻射波段範圍定義如表一，短波輻射吸收氣體包括 H_2O 、 O_3 、 CO_2 、 CH_4 、 O_2 、 CO 等氣體。對於短波的散射，採 Oreopoulos and Barker (1999) 之二流方法 (two-stream algorithm) 計算。長波輻射的計算，則包含 16 個波段及 140 個 g 區段，長波輻射波段範圍定義如表二，長波輻射的吸收氣體包括 H_2O 、 O_3 、 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 、 O_2 、 CO 、 $CFC-11$ 、 $CFC-12$ 、 $CFC-22$ 、 CCL_4 等氣體，長、短波輻射均考慮懸浮微粒 (aerosols) 的輻射效應。

RRTMG 輻射參數化方法採用 NCEP-RRTMG 模組，其包括天文、懸浮微粒、(溫室) 氣體、地表、雲、短波及長波計算等 7 個子模組，以處理影響大氣輻射作用量的各主要機制 (詳如圖一)。

2.2 臭氧參數化方法

臭氧參數化方法採用 Cariolle and Deque (1986) 修正版本，此參數化方法假設大氣中臭氧 (O_3) 的化學變化將依一線性鬆弛方程而趨近於光化平衡，其隨時間 (t) 變化之預報方程如下：

$$\frac{dO_3}{dt} = C_0 + C_1(O_3 - \overline{O_3}) + C_2(T - \overline{T}) + C_3(O_3^\uparrow - \overline{O_3^\uparrow})$$

$$\text{where } O_3^\uparrow(p) = -\int_p^0 \frac{O_3(p')}{g} dp' \quad (6)$$

其中 T 為溫度、 P 為氣壓、 g 為重力加速度、 C_i ($i=0, 1, 2, 3$) 為鬆弛係數 (relaxation coefficient)、 $O_3^\uparrow(p)$ 為大氣層頂 ($p=0$) 至氣壓 p 面上單位面積累積之臭氧質量、 \overline{T} 、 $\overline{O_3}$ 、 O_3^\uparrow 為溫度、臭氧濃度及大氣層頂至氣壓 p 面上單位面積累積臭氧質量之光化平衡值，上述鬆弛係數與光化平衡值則由另一光化模式所決定之。

三、參數化方法背景資料

3.1 RRTMG 輻射參數化方法背景資料

包括：

- (1) 天文模組：11 年太陽黑子週期影響之太陽常數表。
- (2) 懸浮微粒模組：對流層 OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds) 氣候懸浮微粒月平均資料及平流層火山噴發之懸浮微粒月平均資料。
- (3) 溫室氣體模組：二氧化碳月平均及年平均資料。
- (4) 地表模組：反照率氣候背景資料及地表放射率氣候背景資料。如圖 2 為 CWBGFS-T512L60 模式網格 (~25 公里) 解析度之反照率氣候背景資料。

3.2 臭氧參數化方法背景資料

包括臭氧光化鬆弛係數資料及臭氧氣候資料。

四、RRTMG 輻射參數化及臭氧參數化方法之測試與評估

將 RRTMG 輻射參數化及臭氧參數化方法建置於本局 CWBGFS-T512L60 模式，並與原輻射參數化方法 (Fu-Liou 輻射參數化) 及無臭氧參數化方法版本進行比較及診斷評估。

4.1 實驗簡介

選擇 2015 年 9 月、2013 年 1 月、2015 年 7 月北半球不同季節的 20 個個案 (10 天) 進行測試評估，每個案積分 120 小時。

- (1) 2015/09/04 – 2015/09/13, 00/12 UTC, 20 個案。
- (2) 2013/01/01 – 2013/01/10, 00/12 UTC, 20 個案。
- (3) 2015/07/01 – 2015/07/10, 00/12 UTC, 20 個案。

4.2 SCORE 診斷評估

- (1) 2015/09/04 – 2015/09/13 實驗：

本實驗針對 4 組不同輻射/臭氧/McICA 方法設定，進行測試與分析評估，其分別為：

- (1.1) Fu-Liou /臭氧 On / McICA Off (blue line)
- (1.2) RRTMG/臭氧 On / McICA Off (green line)
- (1.3) RRTMG/臭氧 On / McICA On (red line)
- (1.4) RRTMG/臭氧 Off / McICA Off (sky-blue line)

由圖 3 可見，在北半球區域，紅線與綠線幾乎重合一致，即 McICA 效應在本實驗中對模式結果之影響極小。但加入臭氧參數化預報組(red line)確實發現比未加入臭氧參數化預報組(sky-blue line)之 score 為佳，加入臭氧參數化預報之測試結果(red line)較無臭氧參數化預報測試組(sky-blue line) 有較大的 Anomaly correlation, 較小的 S1 score 及較小的 Root Mean Square error。比較 Fu-Liou 和 RRTMG 輻射參數化方法表現亦發現，RRTMG 輻射參數化方法整體表現較佳，在南半球之結果類似。

- (2) 2013/01/01 – 2013/01/10 實驗：

本實驗針對 3 組不同輻射/Cloud overlap 方法設定進行測試與比較分析，其分別為：

- (2.1) Fu-Liou /Random overlap (blue line)
- (2.2) RRTMG/Random overlap (green line)
- (2.3) RRTMG/Maximum-Random overlap (red line)

由圖 4 可見，在南半球及北半球，不同 Cloud overlap 方式(Random / Maximum-Random)對模式預報結果的影響差異甚小，紅線與綠線幾乎重合一致。比較 Fu-Liou 和 RRTMG 輻射參數化方法之表現則發現，在南半球，RRTMG 輻射參數化方法的整體表現明顯比 Fu-Liou scheme 為佳，RRTMG 輻射參數化方法有較大的 Anomaly correlation、較小的 S1 score、在 U/V/T/H 場均有較小的 Root Mean Square error。在北半球，在大氣中層，RRTMG 輻射參數化方法較 Fu-Liou scheme 表現為佳，但在高層，Fu-Liou scheme 在 100hPa 以上有略大的 Anomaly correlation, 50hPa 以上有略小的 S1 score 及 Root Mean Square error。

- (3) 2015/07/01 – 2015/07/10 實驗：

本實驗針對 2 組不同輻射方法設定進行測試與比較分析，其分別為：

- (3.1) Fu-Liou scheme (blue line)
- (3.2) RRTMG scheme (red line)

由圖 5 可見，在南半球，RRTMG 輻射參數化方法的整體表現均明顯比 Fu-Liou scheme 為佳，有較大的 Anomaly correlation, 較小的 S1 score 及 U/V/T/H 場均有較小的 Root Mean Square error。在北半球高層，RRTMG scheme 在 100hPa 以上有較大的 Anomaly correlation, 有明顯較小的 H/T 場的 Root Mean Square error；在 300hPa 以下，RRTMG scheme 之 Anomaly correlation 則較 Fu-Liou scheme 略小。但

整體而言，RRTMG scheme 表現仍較 Fu-Liou scheme 為佳。

五、結論

RRTMG 輻射參數化方法及臭氧參數化方法已成功建置於本局 CWBGFS-T512L60 全球模式，由上述三組實驗結果可見，RRTMG 參數化方法在多數個案表現均較 Fu-Liou scheme 為佳，尤其在南半球，所有個案之表現均明顯較 Fu-Liou scheme 為佳。

在 McICA 及 cloud overlap 敏感度測試發現，在本次短天期之個案測試中，此二選項，對模式的預報結果均不甚敏感，影響甚小，但加入臭氧參數化之測試結果顯示，對預報得分確有正面的效應。

參考文獻：

- Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M.W. Shephard, S.A. Clough, and W.D. Collins, 2008: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, **113**, D13103, doi:10.1029/2008JD009944.
- Clough, S.A., M.W. Shephard, E.J. Mlawer, J.S. Delamere, M.J. Iacono, K. Cady-Pereira, S. Boukabara, and P.D. Brown, 2005: Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, **91**, 233-244.
- Barker, H.W., R. Pincus, and J.-J. Morcrette, 2003: The Monte-Carlo Independent Column Approximation: Application within large-scale models. *Proceedings of the GCSS/ARM Workshop on the Representation of Cloud Systems in Large-Scale Models*. May 2002, Kananaskis, Alberta, Canada, 10pp.
- Pincus, R., H.W. Barker, and J.-J. Morcrette, 2003: A fast, flexible, approximate technique for computing radiative transfer in inhomogeneous clouds. *J. Geophys. Res.*, **108**, D13, doi:10.1029/2002JD003322.
- Cariolle, D. and M. Deque, 1986 : Southern hemisphere medium-scale waves and total ozone disturbances in a spectral general circulation model. *J. Geophysical Res.*, **91**, 10825-10846.

圖表：

表 1、RRTMG 輻射參數化方法短波輻射 14 個波段

Band Index	Band Min (μm)	Band Max (μm)	Band Min (cm^{-1})	Band Max (cm^{-1})	Solar Irradiance (W/m^2)
1	3.077	3.846	2600	3250	12.11
2	2.500	3.077	3250	4000	20.36
3	2.150	2.500	4000	4650	23.73
4	1.942	2.150	4650	5150	22.43
5	1.626	1.942	5150	6150	55.63
6	1.299	1.626	6150	7700	102.93
7	1.242	1.299	7700	8050	24.29
8	0.778	1.242	8050	12850	345.74
9	0.625	0.778	12850	16000	218.19
10	0.442	0.625	16000	22650	347.20
11	0.345	0.442	22650	29000	129.49
12	0.263	0.345	29000	38000	50.15
13	0.200	0.263	38000	50000	3.08
14	3.846	12.195	820	2600	12.89

表 2、RRTMG 輻射參數化方法長波輻射 16 個波段

Band Index	Band Min (μm)	Band Max (μm)	Band Min (cm^{-1})	Band Max (cm^{-1})
1	28.57	1000.0	10	350
2	20.00	28.57	350	500
3	15.87	20.00	500	630
4	14.29	15.87	630	700
5	12.20	14.29	700	820
6	10.20	12.20	820	980
7	9.26	10.20	980	1080
8	8.47	9.26	1080	1180
9	7.19	8.47	1180	1390
10	6.76	7.19	1390	1480
11	5.56	6.76	1480	1800
12	4.81	5.56	1800	2080
13	4.44	4.81	2080	2250
14	4.20	4.44	2250	2380
15	3.85	4.20	2380	2600
16	3.08	3.85	2600	3250

圖 1、NCEP-RRTMG 輻射參數化方法模組

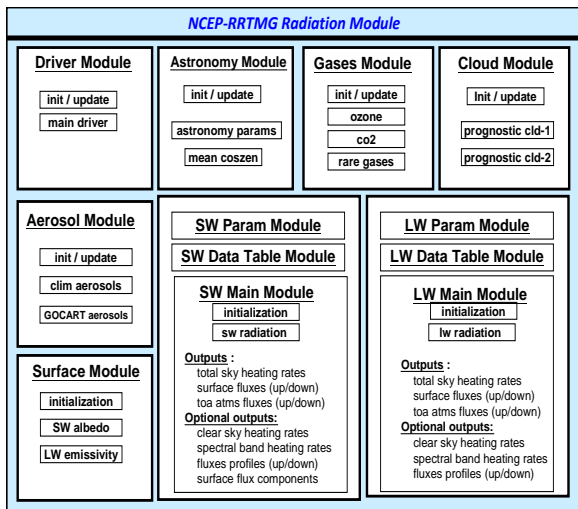


圖 2、全球模式 T512(~25 公里)反照率氣候背景場

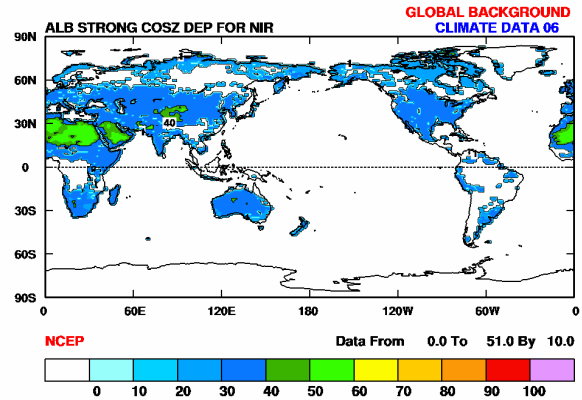


圖 3、2015/09/04 - 2015/09/13 實驗之預報技術得分

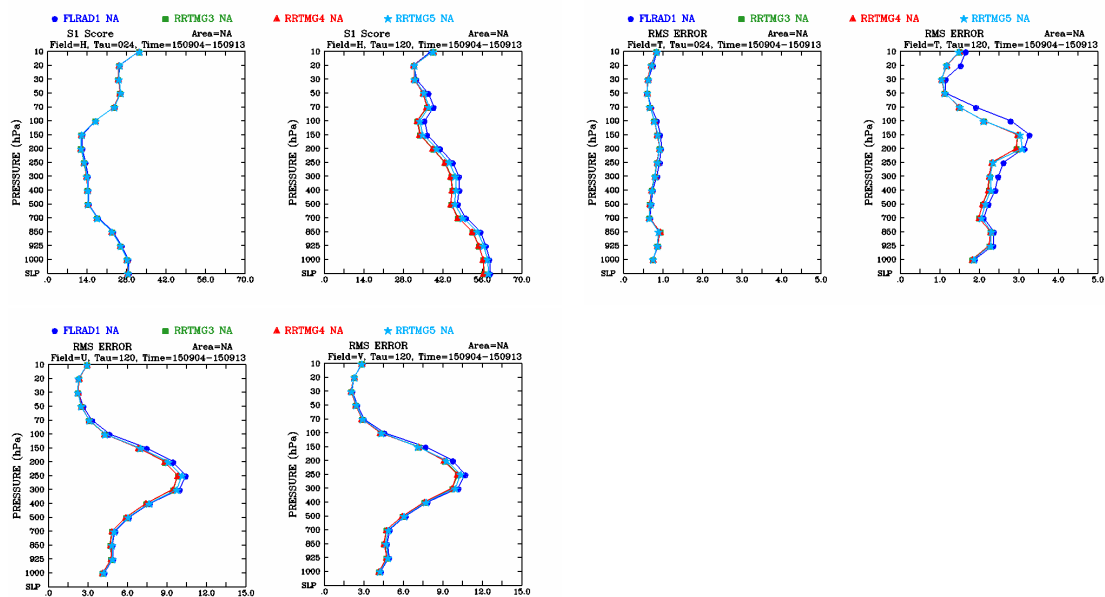
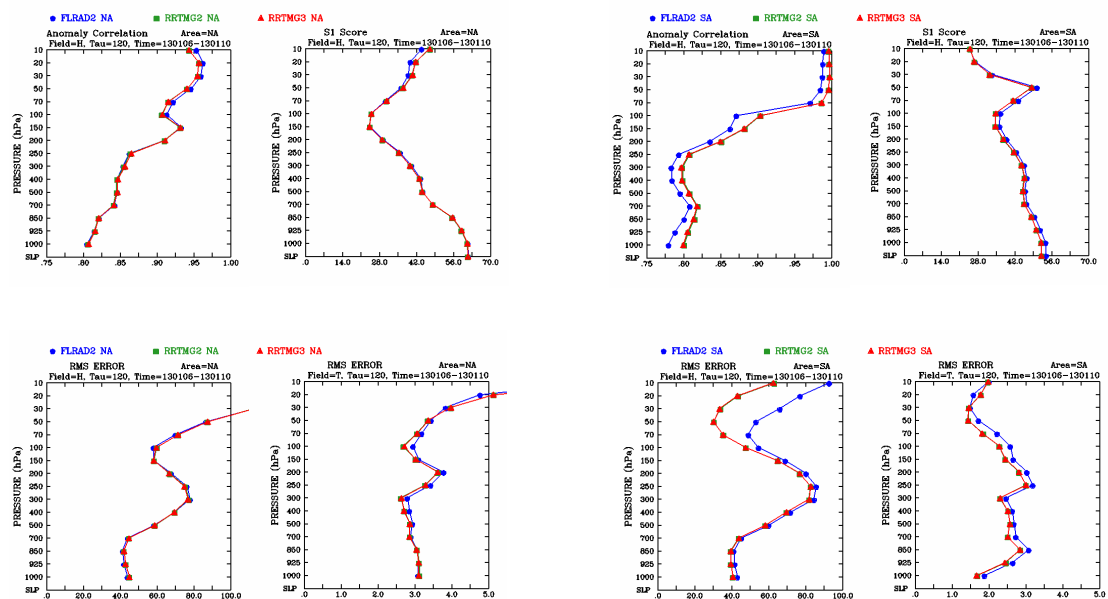


圖 4、2013/01/01 - 2013/01/10 實驗之預報技術得分



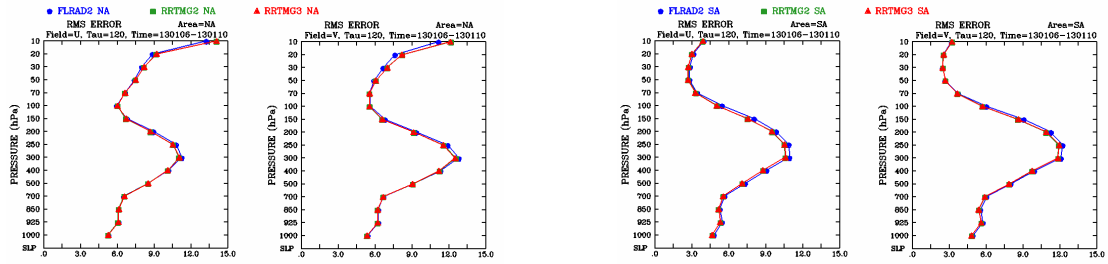


圖 5、2015/07/01 - 2015/07/10 實驗之預報技術得分

