

輻射參數化模式之測試比較

馮 欽 賜

中央氣象局 資訊中心

(中華民國八十一年十月二十日收稿；中華民國八十一年十二月二十七日定稿)

摘 要

正確的輻射參數化模式無論對氣候模擬或數值天氣預報都是相當重要的。本文參照國際間輻射模式比較計劃(International Comparison of Radiation Codes Used in Climate Models, ICRCCM)設定的方法，測試分析兩版不同的輻射參數化模式，一是中央氣象局現行全球作業模式中的輻射模式(簡稱舊版, CWB1)，一是第二代全球模式將採用的新版輻射模式(CWB2)。藉由最精確單線模式或次精確頻段模式的結果為標準值，本文選用熱帶、中緯度夏季和副極區冬季三種標準大氣，並設定在晴天條件下，分別計算新舊版長波和短波的垂直大氣加熱/冷卻率以及邊界輻射通量值(包括地表與大氣層頂)，比較兩者相對於標準值的差異。為了進一步瞭解垂直解析度與輻射計算精確性之關聯，本文同時分析新版模式於不同垂直分層下結果(CWB2L為新版含20層，而CWB1及CWB2含9層)。比較結果如下：

(一)長波方面—CWB1忽略臭氧吸收因而高估300mb以上大氣的冷卻率，另一方面未考慮e-type continuum吸收效應，導致低估溫暖潮濕大氣之中低對流層冷卻率與高估地表淨輻射通量。CWB2則無上述CWB1的缺失，垂直大氣冷卻率分佈的誤差都幾乎小於 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{day}$ ，並且輻射通量計算值小於5%的誤差。其次，加大CWB2的垂直解析度至20層得到CWB2L的結果，發現溫暖潮濕大氣的長波冷卻率與垂直解析度有密切相關，CWB2L明顯縮小CWB2因垂直解析度不夠出現在熱帶大氣低對流層長波冷卻率高估的現象。

(二)短波方面—CWB1簡化的設計，導致明顯低估大氣的加熱率和吸收量。CWB2相較CWB1雖然略見改善，但仍低估兩者，不過大氣加熱率的偏差尚保持在 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 以內。CWB1與CWB2則相對地高估到遠地面的向下輻射通量，其次，垂直20層的CWB2L除了改進平流層解析度而增加臭氧的短波吸收量外，其餘結果類似CWB2，垂直解析度對短波輻射的計算並不敏感。

針對新版(CWB2L)短波輻射低估大氣吸收量的問題，經由進一步測試，發現與計算水氣有效吸收光程時所使用的非均勻修正函數的誤差有關。

關鍵字：輻射參數化模式，長波，短波

一、前 言

只要不以氣候變動那樣微妙的問題為對象，地球-大氣系統的年平均溫度可視為常數。地球-大氣系統吸收約70%的太陽能量，然後又經由長波輻射放出同等的能量而達成此一平衡(曾，1988)。因為地球自轉軸傾斜的因素造成輻射能量年平均

收支，在地球-大氣系統的低緯度地區是淨正值，高緯度地區是淨負值，於是產生南北溫度梯度，提供了大氣環流運動的可用位能(Holton,1979)。因此研究氣候問題的本質上，無論是使用一維輻射模式(Manabe and Strickler, 1964; Liou and Ou, 1983)，或者複雜的三維環流模式(Williamson et al., 1987)，輻射參數化模式都扮演關鍵的角色。尤其是三維的模

式，輻射效應可藉由反映在溫度場上的分佈，由熱力風作用而影響氣候模擬的正確性。Ramanathan等人(1983)嘗試模擬冬季平流層極夜噴流與對流層極鋒噴流，曾經將輻射參數化對氣候模式作一系列的敏感性實驗，結果發現需用一套晴天之下和雲與輻射之間交互作用都能處理地較精確的輻射參數化方法，才能產生符合觀測的緯向平均風場與溫度場，進而透過動力過程產生合理的冬季極夜與極鋒噴流。由此可見，欲模擬正確的氣候現象，需要合理的輻射參數化模式共同配合。

輻射傳遞模式可分為：(一)最精確也最耗時的單線模式(line-by-line model)。(二)較精確的頻段模式(narrowband model)。(三)一般氣候模式或數值天氣預報模式採用的高度參數化寬帶模式(broadband model)。但即使是寬帶輻射模式，在三維數值模式中仍需耗費相當多的計算時間，因此輻射模式的設計必須同時考量計算效率和正確性(Stephens, 1984)。早期由於電腦速度有限，往往遷就計算時間而損失正確性，近年來電腦的快速發展，造就不少新的輻射模式的產生(Harshvardhan et al., 1987; Chou, 1992)，不僅能計算得快，也能包含較詳細的吸收與散射過程使輻射能量估計地更正確。不過，縱使各氣候模式都是採用寬帶輻射模式，彼此間仍有不少差異，例如：Stephens (1984)曾詳盡地討論各研究中心氣候模式所使用的輻射參數化方法之間的異同。

近十年來由於人們對於氣候變遷的疑慮，因而投入相當多的心血於氣候問題的研究之中，例如：CO₂倍增的溫室效應，或者雲對輻射的反饋效應。然而透過各個氣候模式模擬未來數十年後氣候變遷的結果表現上，雖然在某些定性上呈現一致(例如：地表溫度會因CO₂倍增而增加)，但定量上卻很分歧(Mitchell et al., 1990)。這其中一個直接的因素可能由於各氣候模式採用不同簡化的輻射參數化方法，以及對大氣中的重要成分如水氣、雲和氣溶膠的光學特性與含量不夠瞭解所致(Ellingson and Fouquart, 1991)。因此，為了客觀評估各輻射參數化模式的差異，以及它對氣候模擬結果可能產生的不確定性，促使1980年代一項國際間輻射模式比較計劃(Intercomparison of Radiation Codes Used in Climate Models, ICRCCM)。這項計劃的目的，在瞭解各類模式於不同標準大氣和特定條件之下，彼此間輻射能量計算值的差異分佈，並且探討產生差異的各種因

素(Luther et al., 1988; Ellingson and Fouquart, 1991)。經過ICRCCM的各種個案測試比較發現：(1)單線輻射傳遞模式的結果呈現很好的一致性，因此最精確單線模式的計算值，在缺乏直接詳細的觀測資料時，是足以提供其它參數化輻射模式測試比較的標準值。(2)當在輻射模式內加入越多的氣體吸收與粒子散射的效應，進行測試比較時，各模式間計算值的差異範圍也會變大(Ellingson et al., 1991; Fouquart et al., 1991)。這顯示一般氣候模式所計算出的輻射能量相當不一致，尤以考慮雲與氣溶膠的效應之後更明顯。

另一方面，由於ICRCCM這個機會，各氣候模式或數值天氣預報模式中的輻射參數化模式，得以透過較精確的計算值，而瞭解模式的誤差，進一步改善輻射模式的精確性(Fels et al., 1991; Morcrette, 1991)。近來一些研究顯示不僅氣候模式需要很正確的輻射模式，即使是對種短期的數值天氣預報，精確的輻射參數化方法和有效地處理好雲與輻射之間的交互作用，將能明顯的提升預報成果。Arpe (1988)分析ECMWF的系統性誤差，指出模式預報能力的提升，其中主要因素之一是輻射參數化方法的改進。其次Morcrette (1990)詳細討論ECMWF第三版輻射模式對模式預報結果的改進，進一步指出由於新版的輻射模式能正確地估計淨輻射通量，促使熱帶產生較活躍的對流，並使OLR的分佈較符合觀測資料。

中央氣象局現行作業的全球數值預報模式自1988年上線運作，也相繼校驗了模式的系統性誤差(陳等人, 1989; 王等人, 1991)，至於輻射部份的非絕熱效應與系統性誤差之間的關聯並不清楚。因此若能瞭解輻射效應誤差的範圍，應該可以客觀地提供作業模式本身系統誤差來源的定量參考。此外，中央氣象局自1990年也開始著手全球數值預報模式的更新計劃，其中輻射參數化部份，將採用Harshvardhan等人(1987)發展的輻射模式，取代現行作業模式中Katayama (1974)發展的輻射模式。我們也需要對新版輻射模式的特性有所認識。因此本文的目的便是希望經由較精確的輻射模式，客觀評估兩版的差異，一方面瞭解新版模式與現行版各有何相對誤差，另一方面發現新版模式可能存在的缺失，以繼續改善。吾人參照國際間輻射模式比較計畫(ICRCCM)設定的方法，進行測試比較。藉由最精

確單線模式或次精確頻段模式的結果為標準值，吾人選用熱帶、中緯度夏季和副極區冬季三種標準大氣，並設定在晴天條件之下，分別計算新舊版長波和短波的垂直大氣加熱/冷卻率以及邊界輻射通量值（包括地表與大氣層頂），比較兩者相對於標準值的差異。本文第二節將先介紹兩版輻射模式的異同，第三節是兩者的測試比較，其中為了瞭解垂直解析度對測試結果的敏感度，吾人同時分析了9層與20層不同垂直解析度的計算結果。第四節是對前節的測試結果再作進一步討論，最後一節將是總結。

二、輻射參數化模式之介紹

現行所用的Katayama的輻射參數化模式，由於早期發展時電腦資源有限，以及輻射計算的昂貴，因此不得不作了各種簡化，以節省輻射計算的電腦時間。新版Harshvardhan的輻射參數化模式，在電腦進步的基礎之下，則考慮了更詳盡的計算方法。以下吾人簡稱現行作業版的輻射模式為CWB1，新版的輻射模式為CWB2，它們之間主要的特徵，敘述如表一並簡要說明如下（由於測試僅就晴天條件，因此說明也僅限晴天處理之異同）：

表一 晴天計算時，CWB1新舊版輻射參數化模式差異之說明。

| Characteristic | CWB1 | CWB2 |
|---|---|--|
| A. Longwave | | |
| Gas absorption | H2O and CO2 absorptions considered only; O3 neglected | H2O, CO2, O3 and e-type continuum absorptions all included |
| Spectrum divided by absorption band | One interval including H2O and CO2 absorptions together | Four grouped intervals named 1. H2O band center (0-340cm ⁻¹ & 1380-1900cm ⁻¹) 2. H2O band wing (340-540cm ⁻¹ , 800-900cm ⁻¹ , 1130-1380cm ⁻¹ , 1900-3000cm ⁻¹) 3. CO2 band (540-800cm ⁻¹) 4. O3 band (980-1100cm ⁻¹) |
| Broadband transmission | A parameterized function of each gas transmission weighted by Plank-function for the spectrum, based on Katayama (1974). Total transmission is by multiplication of each transmission | A parameterized function of total transmission weighted by Plank-function for each interval, based on Chou & Peng (1983), Chou (1984) and Harshvardhan (1987) |
| Temperature and pressure dependence of absorption | Employs one-parameter scaling approximation, and scaled function = (P/P ₀) ^m * (T ₀ /T) ⁿ | Also, one-parameter scaling approximation; but scaled function is considered more detailly than the left side, based on Chou & Arking (1980) |
| B. Shortwave | | |
| Gas absorption | Only H2O absorption considered O3 neglected | H2O and O3 absorptions considered |
| Broadband absorption | Parameterized formula for H2O absorption, based on LOWTRAN code results | Parameterized formulas for H2O and O3 absorptions, based on Lacis and Hansen (1974) |
| Rayleigh scattering | Considered for less than 0.9 μm, a simple parameterized formula used | Considered for less than 0.9 μm, and evaluated with two stream approximation by Rayleigh optical depth preseted |
| Surface albedo | No differences between direct and diffuse radiation albedos | A parameterized formula for direct radiation albedo, based on Paltridge and Platt (1976) |

長波參數化部分：CWB1只考慮對流層中最重
 要的水氣和二氧化碳吸收氣體，忽略對平流層會
 有重要影響的臭氧吸收效應，以及對潮溼熱帶大氣
 低對流層有顯著貢獻的e-type continuum 吸收效應
 。CWB1 僅將整個長波波譜視為一個波段區間，此
 一波段區間各氣體寬帶透射函數是基於Katayama
 (1974)的參數化公式。至於修正垂直大氣的非均勻
 效應是採一般常用的單參數定標近似 (one-parameter
 scaling approximation)。

CWB2包含所有重要的吸收氣體，並且參考Chou
 (1984)和Chou and Peng (1983)的研究將長波波譜分
 為四個主要的波段區間，在每一個波段區間，藉
 由不同研究者的結果參數化成各氣體的寬帶透射函
 數(Chou, 1984; Chou and Peng, 1983; Rodgers, 1968;
 Roberts et al., 1976)。至於修正垂直大氣的非均勻效
 應，仍是採用類似的單參數定標近似，不過新版乃
 根據Chou and Arking (1980)的wing-scaling近似，改
 進單參數定標近似中參考層P、T的選取以及溫度修
 正項的誤差。

短波參數化部分：CWB1仍只考慮對流層最重
 要的水氣吸收，忽略臭氧的吸收。水氣的吸收函數
 是根據LOWTRAN資料參數化得來。小於 $0.9\mu\text{m}$ 波長
 的雷氏散射(Rayleigh scattering)效應，由天頂角函數
 的參數化公式估算雷氏散射的反射率。到達地表面
 的太陽短波可分直達輻射通量與散射輻射通量(晴
 天時直達通量遠大於散射通量)，一般地表面對於直
 達輻射量的反射率是天頂角的函數，不同於散射輻
 射通量的反射率都視為定值，但是CWB1並沒有額
 外處理此一直達部分的地表反射率，而將直達與散
 射輻射通量的反射率設為同一值。

CWB2含水氣和臭氧的吸收，不考慮次要的二
 氧化碳或氧氣吸收氣體。並使用Lacis and Hansen
 (1974)的水氣和臭氧吸收函數。雷氏散射效應的估
 算，是經由先設定的雷氏散射光程(optical depth)，
 利用二向近似(two-stream) 解出反射率。至於地表
 面對於直達輻射通量的反射率是採用Paltridge and
 Platt (1976)的參數化公式。

三、輻射參數化模式之測試比較

(一)方法說明

由ICRCCM所設定的晴天試驗個案中，以包含

| LEVEL | PP (mb) | SIGMA |
|-------|---------|---------|
| 1 | 50.0 | 0.0 |
| | 75.34 | |
| 2 | 100.7 | 0.05263 |
| | 138.7 | |
| 3 | 176.7 | 0.13158 |
| | 214.7 | |
| 4 | 252.7 | 0.21053 |
| | 303.4 | |
| 5 | 354.1 | 0.31579 |
| | 404.8 | |
| 6 | 455.5 | 0.42105 |
| | 531.5 | |
| 7 | 607.5 | 0.57895 |
| | 696.2 | |
| 8 | 784.9 | 0.76316 |
| | 822.9 | |
| 9 | 861.0 | 0.84211 |
| | 937.0 | |
| 10 | 1013.0 | 1.0 |

(a) 9層垂直解析度，CWB1與CWB2所使用。

| LEVEL | PP (mb) | SIGMA |
|-------|---------|-------|
| 1 | 0.01 | 0.0 |
| | 10.14 | |
| 2 | 20.27 | 0.02 |
| | 40.53 | |
| 3 | 60.79 | 0.06 |
| | 96.24 | |
| 4 | 131.7 | 0.13 |
| | 157.0 | |
| 5 | 182.3 | 0.18 |
| | 202.6 | |
| 6 | 222.9 | 0.22 |
| | 243.1 | |
| 7 | 263.4 | 0.26 |
| | 288.7 | |
| 8 | 314.0 | 0.31 |
| | 352.0 | |
| 9 | 390.0 | 0.385 |
| | 428.0 | |
| 10 | 466.0 | 0.46 |
| | 516.6 | |
| 11 | 567.3 | 0.56 |
| | 617.9 | |
| 12 | 668.6 | 0.66 |
| | 706.6 | |
| 13 | 744.6 | 0.735 |
| | 782.5 | |
| 14 | 820.5 | 0.81 |
| | 845.9 | |
| 15 | 871.2 | 0.86 |
| | 891.4 | |
| 16 | 911.7 | 0.90 |
| | 926.9 | |
| 17 | 942.1 | 0.93 |
| | 957.3 | |
| 18 | 972.5 | 0.96 |
| | 985.1 | |
| 19 | 997.8 | 0.985 |
| | 1003.0 | |
| 20 | 1008.0 | 0.995 |
| | 1010.0 | |
| 21 | 1013.0 | 1.0 |

(b) 20層垂直解析度，CWB2L所使用。

圖1 垂直解析度之分佈。

大氣中各種主要吸收氣體與散射效應的綜合個案為挑選的原則，因此我們在長波方面挑選第25號、第27號和第33號三個個案，在短波方面則挑選第31號至第42號共十二個個案，進行測試並與標準值作一比較。我們分別計算了，不同天頂角(θ)與地表反射率(A_s)之下，晴天垂直大氣加熱/冷卻率的分佈與邊界輻射通量值，這其中使用熱帶、中緯度夏季和副極區冬季(簡稱TRO, MLS, SAW)三種標準大氣剖面(McClatchey et al., 1972)，並將二氧化碳設定為300 ppm的濃度。

CWB1與CWB2的垂直解析度是使用9層，且將模式頂層設為50mb。同時為了探討垂直解析度對輻射計算的影響，我們將CWB2加大垂直層數至20層，得到CWB2L的結果，兩種垂直解析度如圖1所示，圖1-(b)相較於圖1-(a)主要是增加低對流層與高對流層以上大氣的垂直解析度。此外，ICRCCM中GFDL單線輻射模式的結果，將作為長波比較的標準值；短波部份由於缺乏對應個案單線模式的計算結果，因此只能使用次精確頻段模式的結果為標準值。(上述的標準值，我們直接引用Morcrette (1991)研究文獻所發表的結果。)

(二)結果比較

1. 長波方面

表二是長波淨輻射通量計算值的比較，表中包含大氣層頂(事實上是模式頂層)、對流層頂以及地表面三個邊界量。對流層頂的設定在TRO是93.7mb，在MLS是179.0mb，在SAW是282.9mb，其次CWB2L中為了配合ICRCCM的建議，我們將TRO對流層頂以上的水氣混合比固定為 3.25×10^{-6} (g/g)，MLS與SAW對流層頂以上的水氣混合比則固定為 4×10^{-6} (g/g)。相較於單線模式(簡稱LBL)標準值，CWB2在各個量的計算值表現地比CWB1的結果較正確，並且誤差範圍保持在5%。CWB1除了在大氣層頂和對流層頂的計算值符合理想之外，在地表面的淨輻射通量計算，出現TRO 26.3%與MLS 13.1%的誤差。合理的解釋是因為CWB1未考慮e-type continuum吸收效應所導致的，而此一吸收強度與水氣壓成正比。一些研究文獻(Harshvardhan et al, 1987; Morcrette, 1991)都指出，在溫暖潮溼的大氣e-type continuum吸收效應會增加低對流層紅外長波熱體輻射通量(thermal emission)，因此若忽略此一吸收效應

，對溫暖潮溼大氣的中低對流層會低估長波冷卻率，而高估地表淨長波輻射通量。由圖2 CWB1垂直大氣長波冷卻率分佈，我們的確察覺到TRO與MLS大氣的中低對流層有低估的現象。然而在較乾燥的SAW大氣e-type continuum吸收效應不顯著，即不見地表淨長波輻射通量明顯的誤差，甚至圖2-(c)中低對流層反而呈現高估冷卻率，這應該與CWB1所使用的寬帶透射函數的誤差有關。另外，圖2中也顯示CWB1由於忽略臭氧吸收效應，而使300 mb以上大

表二 淨長波輻射通量值之結果比較。TOP是大氣層頂，TROPOPAUSE是對流層頂，SURFACE是地表面。各模式之代號分別是：LBL是GFDL的單線模式。CWB1是CWB現行作業版的輻射參數化模式。CWB2是CWB第二代新版的輻射參數化模式。CWB2L是同CWB2，但垂直解析度增至20層。

| | TOP | | | |
|---------|------------|-------|-------|-------|
| | LBL | CWB1 | CWB2 | CWB2L |
| TRO | 298.3 | 284.4 | 292.1 | 297.9 |
| ERROR % | | -4.7% | -2.1% | -0.2% |
| MLS | 289.0 | 276.9 | 278.7 | 287.4 |
| ERROR % | | -4.2% | -3.7% | -0.5% |
| SAW | 203.0 | 198.3 | 193.9 | 203.4 |
| ERROR % | | -2.3% | -4.5% | 0.2% |
| | TROPOPAUSE | | | |
| | LBL | CWB1 | CWB2 | CWB2L |
| TRO | 288.1 | 280.1 | 291.1 | 292.8 |
| ERROR % | | -2.8% | 1.0% | 1.6% |
| MLS | 272.8 | 259.0 | 274.4 | 276.6 |
| ERROR % | | -5.0% | 0.6% | 1.4% |
| SAW | 178.2 | 174.4 | 179.1 | 183.0 |
| ERROR % | | -2.1% | 0.5% | 2.7% |
| | SURFACE | | | |
| | LBL | CWB1 | CWB2 | CWB2L |
| TRO | 66.5 | 84.0 | 69.0 | 67.5 |
| ERROR % | | 26.3% | 3.8% | 1.5% |
| MLS | 79.1 | 89.5 | 82.9 | 81.6 |
| ERROR % | | 13.1% | 4.8% | 3.2% |
| SAW | 82.9 | 79.2 | 87.1 | 86.6 |
| ERROR % | | -4.7% | 5.1% | 4.5% |

Unit : W / m²

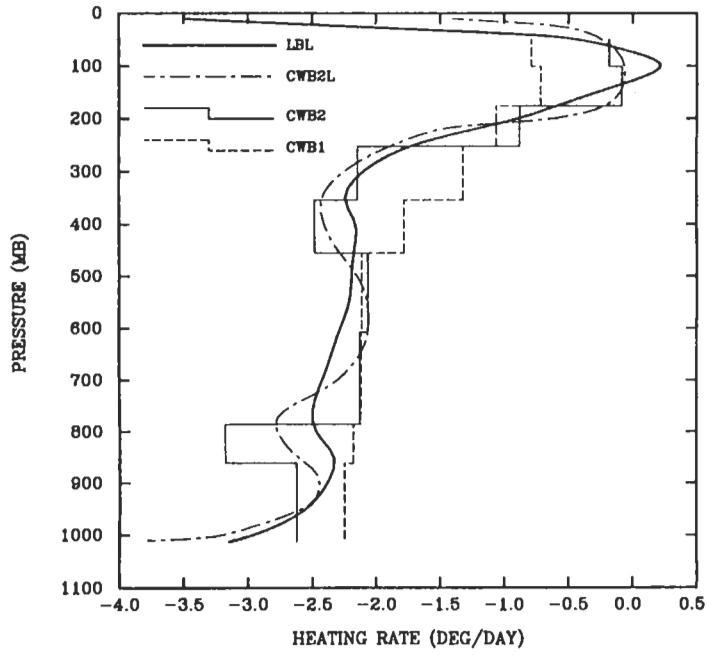


圖 2(a)

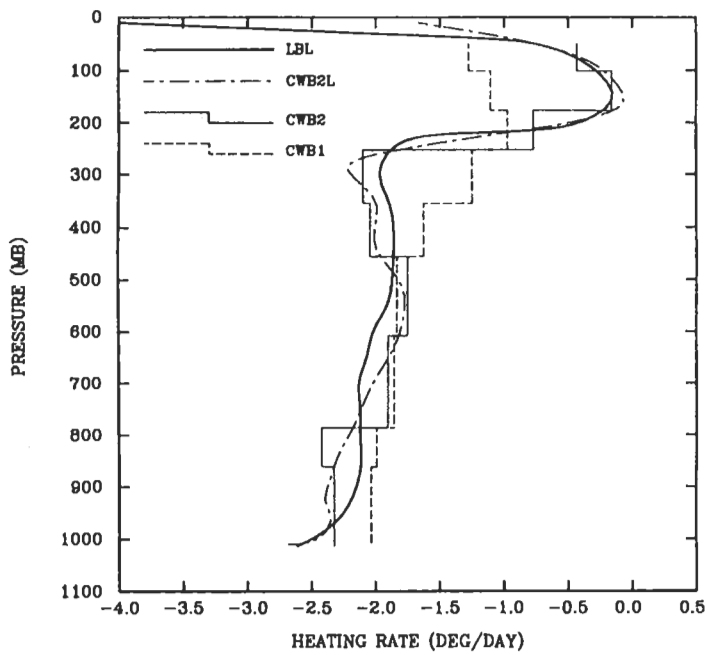


圖 2(b)

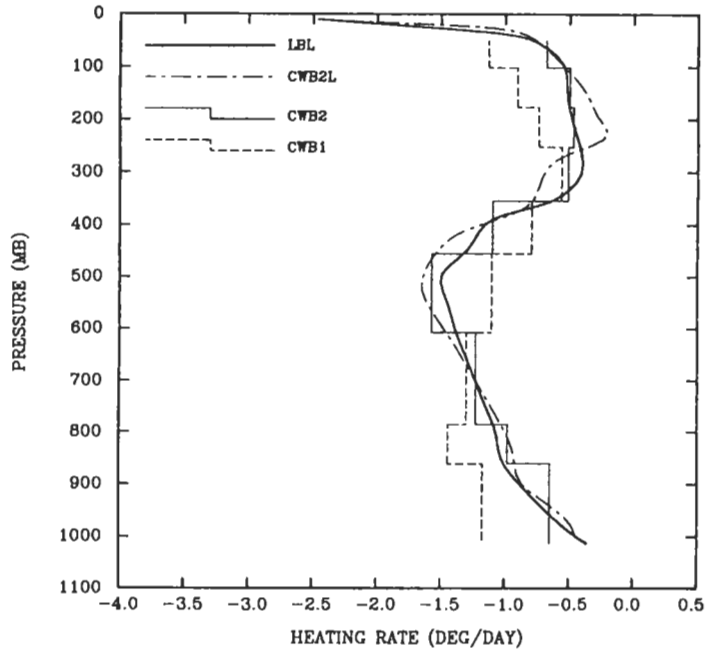


圖 2(c)

圖 2 垂直大氣長波冷卻率分佈之比較。(a)熱帶大氣(TRO)。(b)中緯度夏季大氣(MLS)。(c)副極區冬季大氣(SAW)。各模式之代號說明同表二。

氣高估冷卻率，誤差可達 $1^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 以上，發現TRO與MLS的500 mb和300 mb之間，以及SAW的600mb和400mb之間，都有低估長波冷卻率的現象。

CWB2在三種標準大氣的長波冷卻率分佈，都較CWB1接近單線模式的分佈，唯有在TRO大氣的模式第八層(壓力在820mb左右)出現 $0.8^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 的誤差之外，其餘都能保持 $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 的誤差範圍之內。當我們加大CWB2的垂直解析度至20層，以比較CWB2L與CWB2的差異，可以發現CWB2L由於在平流層多加了幾層且將頂層設在0.01mb，因而增加平流層臭氧效應的解析，使得OLR的估計較理想，所以表二中CWB2L的大氣層頂淨長波輻射通量更接近單線模式的標準值；並且最重要的，經由增加低對流層垂直解析度，使CWB2L於低對流層的長波冷卻率分佈更接近標準值的分佈，尤其在TRO大氣CWB2L減少CWB2第八層的高估至 $0.4^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 的誤差以內。這顯示CWB2在第八層的高誤差，主要來自低層垂直解析度不夠的原故，因為長波輻射決定於

垂直大氣溫度和吸收氣體的分佈。近來，研究文獻(Ridgway et al., 1991; Morcrette, 1991)也指出垂直解析度對輻射傳遞模式計算大氣長波冷卻率的分佈有密切相關，尤其是溫暖潮溼大氣的中低對流層。

2. 短波方面

表三是短波輻射通量計算值的比較，僅選取其中6個個案作討論，表中NBM的值代表的是頻段模式的結果，此一模式將太陽波譜分為208個波段，每個波段都同時處理分子吸收與散射的交互作用(Zdunkowski et al., 1980)。由於在短波沒有對應個案的單線模式結果可供參考，所以僅能用頻段模式當作對照比較誤差的標準值。其次，在表三我們也將ICRCCM所公佈的參考值列入(Fouquart et al., 1991)，此一參考值是選取各參與模式計算值的中間值。

CWB1在短波計算方面仍未考慮臭氧吸收，當初模式的設計可能為了簡化計算過程，也一併忽略大氣吸收氣體對地表所反射的短波，產生再一

表三 在不同標準大氣、天頂角(θ)與地表反射率(A_s)之下,短波輻射通量的結果比較。NBM是頻段模式的計算值,CWB1、CWB2與CWB2L如表二說明,最後一行(NBM-CWB2L)是CWB2L相對NBm之差值,ICRCCM是參與ICRCCM各模式計算值的中間值。DNSUR是到達地表面的向下輻射通量,ABTOT是大氣層的吸收通量,NTSUR是地表面的淨通量。

| | NBM | ICRCCM | CWB1 | CWB2 | CWB2L | CWB2L-NBM |
|------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| ----- | | | | | | |
| TRO $\theta = 30, A_s = 0.2$ | | | | | | |
| ----- | | | | | | |
| DNSUR | 917.1 | 932.6 | 952.7 | 961.8 | 951.9 | 34.8 |
| ABTOT | 235.0 | 215.1 | 171.5 | 183.8 | 206.4 | -28.6 |
| NTSUR | | | 762.2 | 809.1 | 800.7 | |
| MLS $\theta = 30, A_s = 0.2$ | | | | | | |
| ----- | | | | | | |
| DNSUR | 930.6 | 943.7 | 967.3 | 970.7 | 963.3 | 32.7 |
| ABTOT | 222.1 | 206.2 | 156.9 | 171.2 | 196.6 | -25.5 |
| NTSUR | | | 773.8 | 816.6 | 810.3 | |
| MLS $\theta = 75, A_s = 0.2$ | | | | | | |
| ----- | | | | | | |
| DNSUR | 230.4 | 235.8 | 252.7 | 244.8 | 240.1 | 9.7 |
| ABTOT | 90.5 | 83.8 | 58.4 | 70.5 | 84.1 | -6.4 |
| NTSUR | | | 202.2 | 167.2 | 163.9 | |
| MLS $\theta = 30, A_s = 0.8$ | | | | | | |
| ----- | | | | | | |
| DNSUR | 969.6 | 985.0 | 1011.9 | 1015.3 | 1007.4 | 37.8 |
| ABTOT | 261.8 | 245.3 | 156.9 | 203.2 | 234.8 | -27.0 |
| NTSUR | | | 202.4 | 213.1 | 211.4 | |
| MLS $\theta = 75, A_s = 0.8$ | | | | | | |
| ----- | | | | | | |
| DNSUR | 239.1 | 246.2 | 283.2 | 254.2 | 249.3 | 10.2 |
| ABTOT | 96.6 | 89.2 | 58.4 | 73.9 | 88.8 | -7.8 |
| NTSUR | | | 56.6 | 43.7 | 42.8 | |
| SAW $\theta = 75, A_s = 0.8$ | | | | | | |
| ----- | | | | | | |
| DNSUR | 261.3 | 265.1 | 301.3 | 273.8 | 271.6 | 10.3 |
| ABTOT | 75.1 | 72.7 | 40.3 | 52.9 | 67.1 | -8.0 |
| NTSUR | | | 60.3 | 46.9 | 46.5 | |
| ----- | | | | | | |
| Unit : W / m**2 | | | | | | |

次吸收的過程,因此CWB1中大氣吸收短波的能量(ABTOT)相較於頻段模式或ICRCCM值都明顯偏低。當天頂角小而且地表反射率大時,由於地表的反射量大,低估的量就相當可觀,例如MLS大氣, $\theta = 30^\circ$ 且 $A_s = 0.8$ 時,相對於頻段模式的計算值,低估值高達 $105\text{W}/\text{m}^2$,相對誤差是40%左右。CWB2中大氣對短波的吸收量雖然比CWB1略有增加,但似乎仍是偏低,在MLS, $\theta = 30^\circ$, $A_s = 0.8$ 的個案也有達 $58.6\text{W}/\text{m}^2$ 的誤差值。當提高解析度,雖然CWB2L彌補

了CWB2平流層未有理想解析度所低估的臭氧吸收量,例如:前述的個案略為減少至 $37.8\text{W}/\text{m}^2$ 的誤差量,然而也未能一舉改進低估的現象。這未盡理想的原因可能來自兩方面,一是非均勻大氣的修正函數,二是短波的水氣吸收函數,這是新版輻射傳遞模式可以進一步研究改善的部份,下一節我們將作較詳細的討論。反之,CWB1、CWB2與CWB2L都高估到達地表面的向下短波輻射通量(DNSUR),根據天頂角的大小可多出 $40\text{W}/\text{m}^2$ 左右至 $10\text{W}/\text{m}^2$ 。

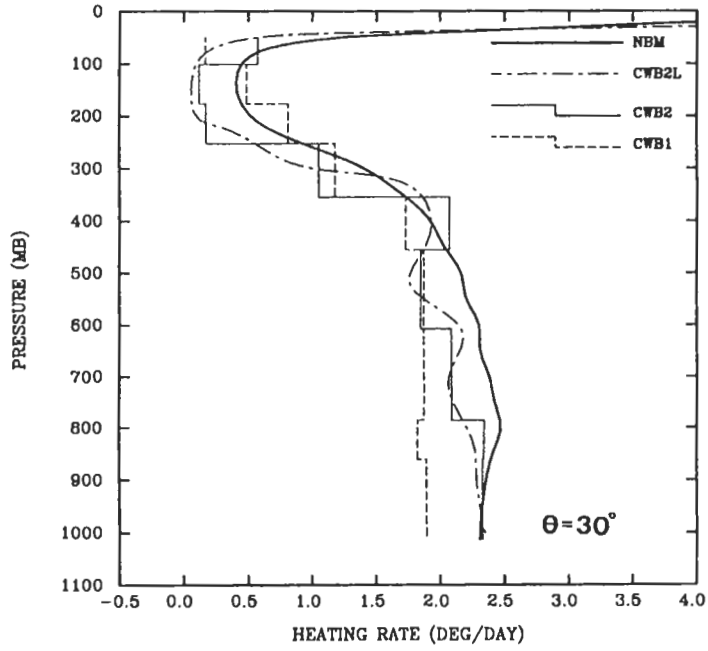


圖 3(a)-1

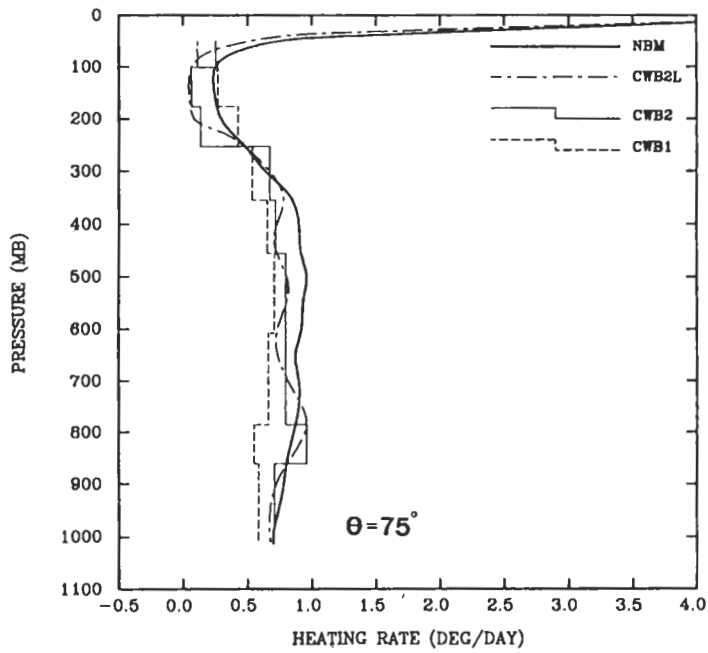


圖 3(a)-2

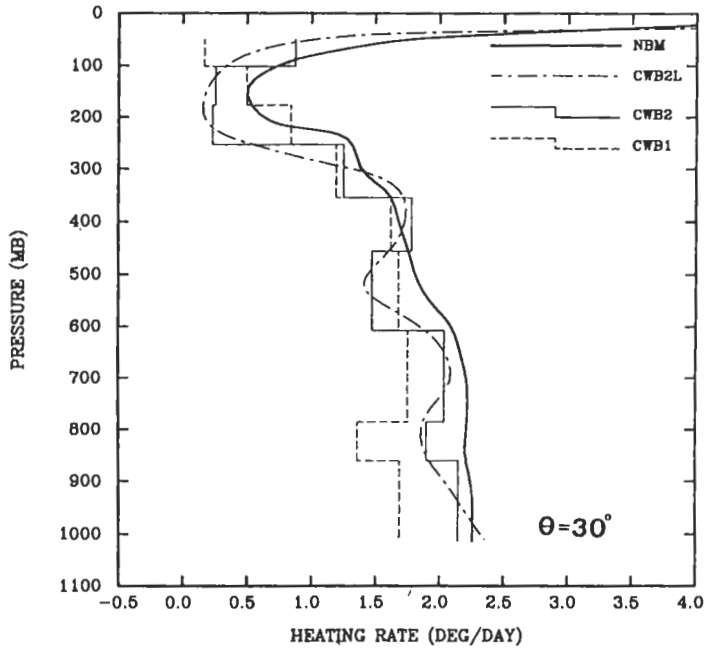


圖 3(b)-1

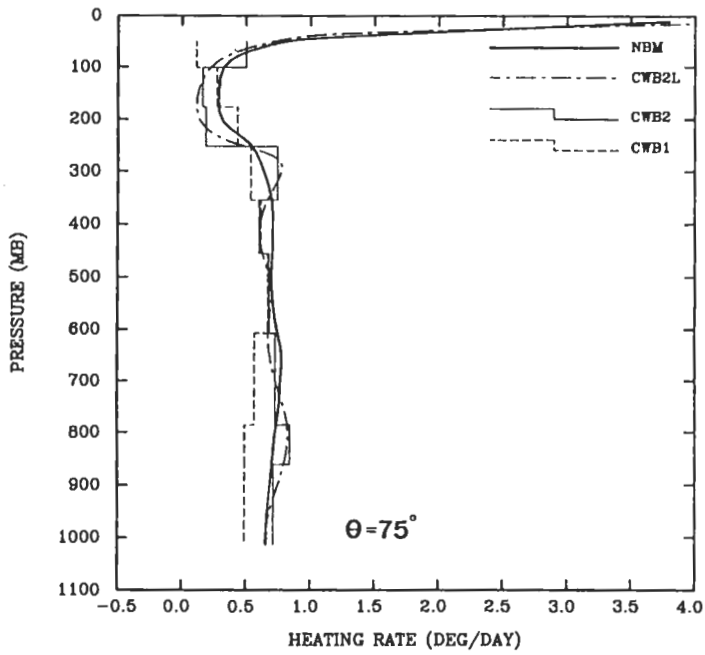


圖 3(b)-2

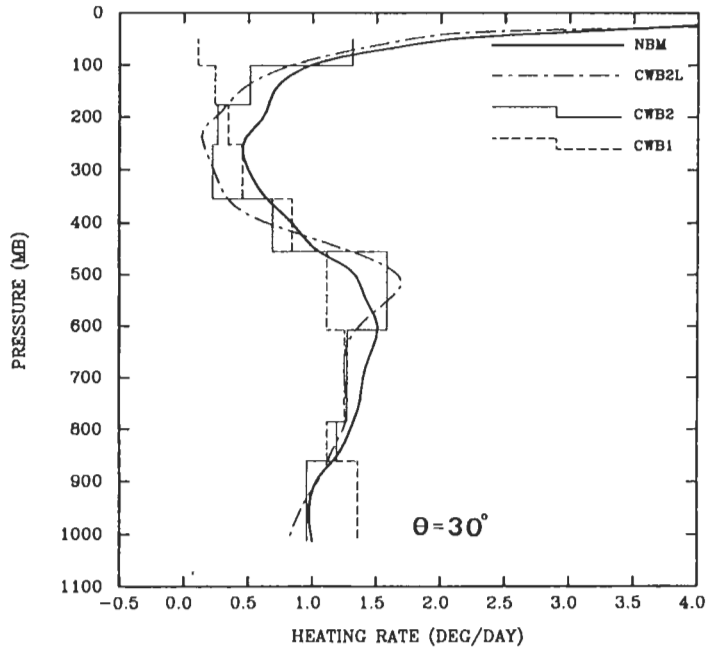


圖 3(c)-1

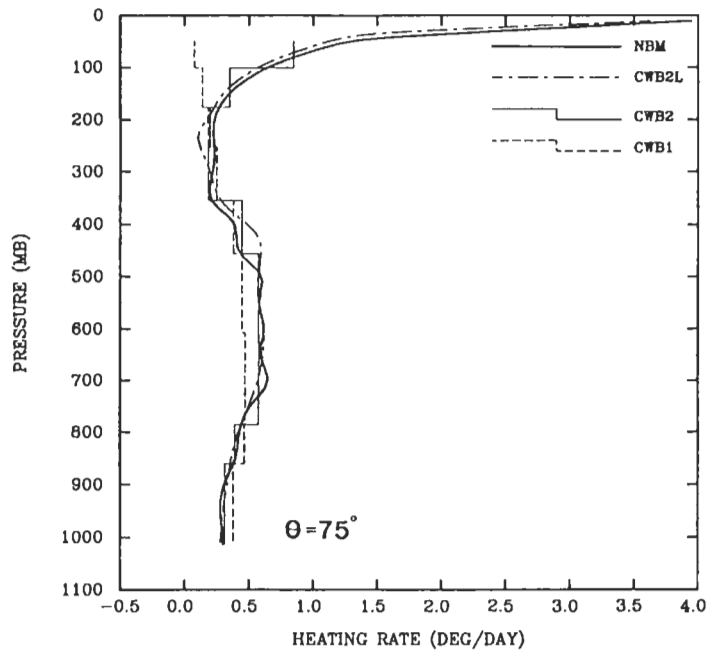


圖 3(c)-2

圖 3 垂直大氣短波加熱率分佈之比較。地表反射率(A_s)是0.2，天頂角(θ)是 30° 與 75° 兩種。
 (a)熱帶大氣(TRO)。(b)中緯度夏季大氣(MLS)。(c)副極區冬季大氣(SAW)。其中，NBW是頻段模式。

其次，CWB1與CWB2地面短波吸收量(NTSUR)的比較，若將DNSUR減去NTSUR再除以DNSUR $[(\text{DNSUR} - \text{NTSUR}) \div \text{DNSUR}]$ 代表地表的平均反射率，我們可發現當天頂角等於 30° 時，CWB2的平均反射率小於 A_s 值；當天頂角等於 75° 時，則CWB2的平均反射率大於 A_s 值(而CWB1的平均反射率等於 A_s 值)。這是因為天頂角小時，CWB2的直達地表反射率小於散射地表反射率 A_s 值，使得平均地表反射率就小於 A_s 值，反映出CWB2地表面對DNSUR值的吸收能力比CWB1的強。反之，天頂角大時則相反。

觀察圖3垂直大氣短波加熱率的分佈，相較於頻段模式的結果，CWB1幾乎在所有的大氣剖面都是低估加熱率，CWB2雖以縮小CWB1的偏差，但冷卻率的分佈仍偏低，不過誤差保持在 $0.5^\circ\text{C}/\text{day}$ 以內。同樣地CWB2L與CWB2分佈相近，垂直解析度似乎對短波輻射的計算並不敏感，這與長波的表現不同。

四、討 論

由於前一節的測試顯現新版輻射模式低估大氣短波輻射的吸收量，本節希望對此一問題的原因做進一步說明與探討。

新版輻射模式的短波參數化部份是參照Lacis and Hansen (1974)的研究。他們的水氣吸收函數是根據一大氣壓和296K狀態之下實驗室的測量資料計算得到的。由Chou (1986)的研究指出，他們的水氣吸收函數幾乎和他使用單色光譜積分得到的吸收率分佈一致，這表示Lacis and Hansen的水氣吸收函數非常精確，不過Chou進一步證明若是使用Lacis and Hansen所建議的單參數定標去求水氣的有效光程(effective optical depth)，以近似垂直大氣的非均勻效應，則計算出的垂直大氣水氣加熱率相較於單色光譜積分的結果，在500mb之下的對流層會有低估現象。對照圖3-(a)與(b)較潮溼大氣的短波加熱率分佈，與Chou的結論似乎一致。這說明若要改進新版輻射模式的短波參數化，需要對水氣吸收光程的非均勻修正做合理估計。

Chou and Arking (1981)對短波水氣光程的計算，提出wing-scaling近似，建議將單參數定標中的參考氣壓選取在高對流層，以減少非均勻效應的誤差

，同時需使用同一參考氣壓與溫度狀態下的水氣吸收係數值，以估計水氣吸收率(或透射率)。為了驗證此一方法對水氣吸收估計的改進，我們採用Chou (1986)的表三和Asano and Uchiyama (1987)的表一，兩組利用不同方法得到的水氣吸收係數資料取代新版的水氣吸收函數，前者使用k-distribution，後者用ESFT (exponential-sum fitting of transmissions)。這兩組資料都經作者驗證相當接近單色光譜積分的結果，並且因為這些資料都是根據高對流層氣壓值為參考氣壓的基礎，作者將可以用前述的建議重新計算短波輻射通量，以測試水氣吸收改進的效果。本節是採用Chou (1986)包含氣壓和氣溫修正的單參數定標近似，式子如下：

$$f(P, T) = (P/P_r)^m \exp[0.00135(T - T_r)]$$

$$\text{Chou (1986): } P_r = 300\text{mb}, T_r = 240\text{K}, m = 0.8$$

$$\text{Asano and Uchiyama (1987): } P_r = 500\text{mb},$$

$$T_r = 260\text{K}, m = 0.9$$

$f(P, T)$ 代表單參數定標函數(scaling function), P_r, T_r 分別是參考氣壓與氣溫, P_r, T_r 與 m 的值完全與文獻相同。以下將簡稱Chou (1986)的水氣吸收資料與對應的單參數定標函數為C方法，同理Asano and Uchiyama (1987)的為A & U方法。

圖4三條曲線分別代表上述作者的水氣吸收率分佈。當參考氣壓越低時，吸收率在同樣吸收光程下也越小，因此Chou (1986)的吸收率曲線最小，反之Lacis and Hansen (1974)的最大。圖5是測試結果，此處僅列舉 $\theta = 30^\circ$ 的結果做討論， $\theta = 75^\circ$ 的結果類似。首先由圖5的加熱率垂直分佈顯示，C方法與A & U方法的確改進了200mb至900mb的加熱率，尤其較溼的TRO和MLS大氣，圖5-(a)和(b)，400mb到800mb中對流層附近改進最明顯，將原本 $0.3 \sim 0.4^\circ\text{C}/\text{day}$ 的差距縮為 $0.1 \sim 0.2^\circ\text{C}/\text{day}$ 以內。其次對照表四，各方法得到的大氣吸收通量，也顯現相較於新版，C方法約增加4%~6%的通量，A & U方法則約增加2%~4%的通量。因此，由這些測試似乎支持Chou and Arking (1981)的研究，若將參考氣壓選在較高的對流層，可以減少有效光程估算上的誤差，而使短波參數化更正確。最後，值得一提的是，C方法比A & U方法理想，由圖5(a)與(b)可知在700mb以下，A & U方法似乎低估水氣吸收量，而C方法於垂直分佈都相當一致，這可能是A & U方法的水氣吸收率(或透射率)不及C方法的精確。

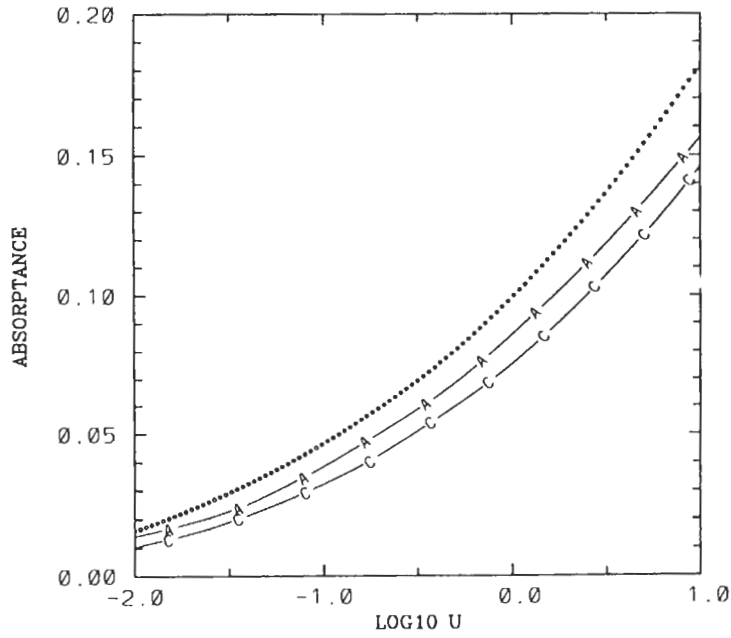


圖4 水氣吸收率隨吸收光程(U)對數值之分佈。圖曲線是Lacis and Hansen (1974)方法，C曲線是C方法使用的，A曲線是A & U方法使用的。

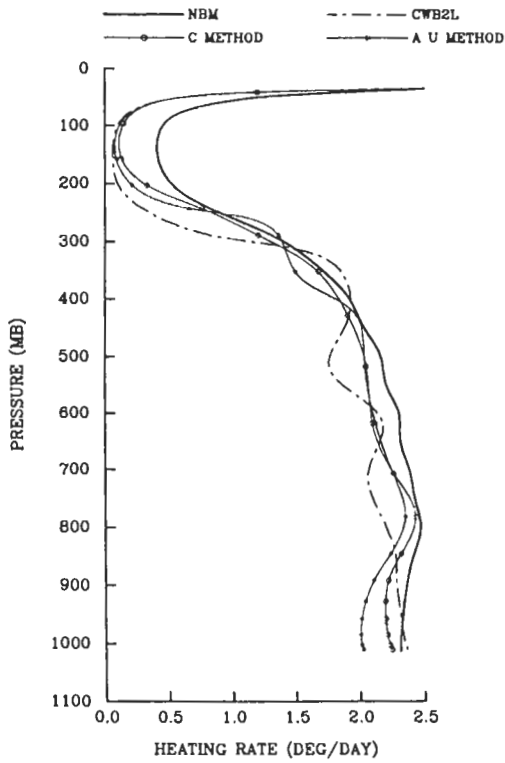


圖5(a)

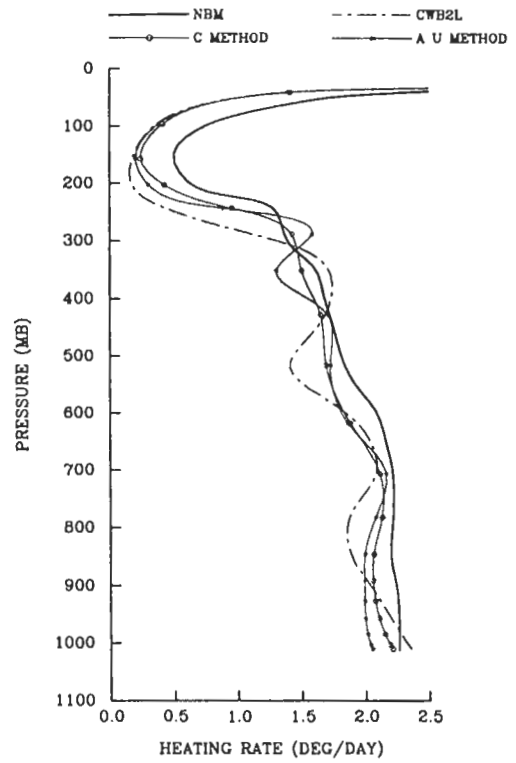


圖5(b)

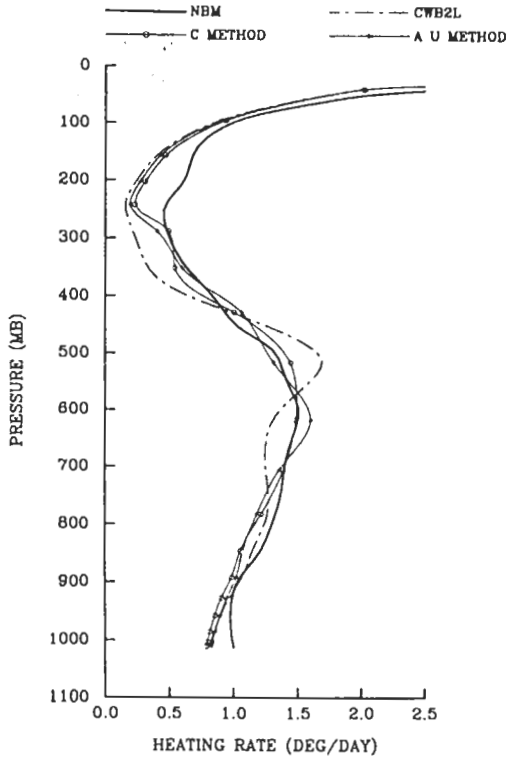


圖 5(c)

圖 5 利用不同研究者的水氣吸收計算資料，重新計算垂直大氣短波加熱率的分佈，其中，天頂角是 30° ，地表反射率仍是0.2。NBM與CWB2L同圖3的結果，C方法是指採用Chou (1986)的文獻，A & U方法是指採用Asano and Uchiyama (1987)的文獻。(a)熱帶大氣(TRO)。(b)中緯度夏季大氣(MLS)。(c)副極區冬季大氣(SAW)。

五、總 結

藉由ICRCCM所設定的各種測試條件以及最精確單線模式和次精確頻段模式的結果為標準值，我們對CWB1與CWB2新舊版輻射參數化模式，進行晴天條件之下的各種測試比較，其中CWB1與CWB2的垂直解析層數是9層，CWB2L為新版含20層，結果顯示：

(一)長波方面—CWB1忽略臭氧吸收，因而高估300mb以上大氣的冷卻率，另一方面未考慮e-type

表四 新版模式、C方法與A & U方法所求得的整個大氣吸收通量，其中括號內是相對於CWB2L結果的增加百分比。

| | TRO | MLS | SAW |
|-------------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| CWB 2L | 177.1 | 161.1 | 93.7 |
| Chou(1986) | 187.0 (5.6%) | 171.0 (6.1%) | 97.8 (4.3%) |
| Asano & Uchiyama (1987) | 181.4 (2.5%) | 167.1 (3.7%) | 97.2 (3.8%) |

Unit : W / m^{**2}

continuum吸收效應，導致低估溫暖潮溼大氣之中低對流層冷卻率與高估地表淨輻射通量。CWB2則無上述CWB1的缺失，垂直大氣冷卻率分佈的誤差都幾乎小於 $0.5^\circ C / day$ ，並且輻射通量計算值小於5%的誤差。其次，加大CWB2的垂直解析度至20層得到CWB2L的結果，發現溫暖潮溼大氣的長波冷卻率與垂直解析度有密切相關，CWB2L並且明顯縮小CWB2因垂直解析度不夠出現在TRO大氣低對流層長波冷卻率高估的現象。

(二)短波方面—CWB1簡化的設計，導致明顯低估大氣的加熱率和吸收量。CWB2相較CWB1雖然略見改善，但仍低估兩者，不過大氣加熱率的偏差尚保持在 $0.5^\circ C / day$ 以內。CWB1與CWB2則相對地高估到達地面的向下輻射通量。其次，垂直20層的CWB2L除了改進平流層解析度而增加臭氧的短波吸收量外，其餘結果類似CWB2，垂直解析度對短波輻射的計算並不敏感。

針對新版(CWB2L)短波輻射參數化低估對流層大氣加熱率與吸收量的問題，我們的進一步測試支持Chou and Arking (1981)的研究，若將計算水氣有效吸收光程之單參數定標函數中的參考氣壓選取在高對流層，則可以減少估計大氣非均勻效應時的誤差，而改進短波參數化計算的精確性。

最後應該再提醒的是，本文的測試比較僅是晴天條件下的結果，至於輻射模式在有雲情形下，雲對輻射傳遞過程的影響，有兩點需考慮(1)雲滴的光

程遠大於大氣中氣體的吸收與散射光程，對長波雲幾被視為黑體，雲頂處會有很強冷卻效應；對短波雲則遞減大部份到達地面的太陽能量，因此輻射參數化模式對判斷雲量多寡是相當重要的，不過也是相當困難，往往只能藉由經驗公式。(2)各種雲類有不同的雲滴粒徑分佈，因此在輻射傳遞過程也具有不同的光學參數，礙於觀測的不足，現今對雲的光學特性仍瞭解的不夠。在文中並未觸及輻射與雲之間交互作用的表現，作者希望未來能對這一複雜問題有進一步的測試與瞭解。

致 謝

感謝劉其聖博士及鄭明典博士對本研究工作的建議協助。本研究在國科會計劃NSC-82-0202-M-052-004及中央氣象局資訊中心電腦支援下完成。

參考文獻

- 曾忠一，1988：大氣輻射續篇。中央研究院物理研究所印行，共289頁。
- 陳雯美、林松錦與蔡清彥，1989：中央氣象局全球數值天氣預報系統1988~1989預報校驗評估。氣象學報，35，263-280。
- 王作臺、陳雯美與林松錦，1991：中央氣象局全球數值天氣預報模式系統性誤差分析I：東亞地區。民國八十年天氣分析與預報研討會論文集編，99-110。
- 謝信良、陳正改，1985：台灣地區氣象災害之調查研究：國科會防災科技研究報告，73-40。
- 吳宗堯、王時鼎，1981：民國60年(1980)台灣乾旱研討，大氣科學8，95-104。
- Arpe, K., 1988: Planetary - scale diabatic forcing errors in the ECMWF model. ECMWF Workshop on Diabatic Forcing, ECMWF, U.K., 103-150.
- Asano, S., and A. Uchiyama, 1987: Application of an extended ESFT method to calculation of solar heating rates by water vapor absorption. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 38, 147-158.
- Chen, T. C., and M. Murakami, 1988: The 30-50 day variation of convective activity over the Western Pacific Ocean with emphasis on the Northwestern Region. *Mon. Wea. Rev.* 116, 892-906.
- Chou, M. D., 1984: Broadband water vapor transmission function for atmospheric IR flux computations. *J. Atmos. Sci.*, 41, 1775-1778.
- Chu, P. S., 1989: Hawaiian drought and the Southern Oscillation International *J. of Climatology.* 9, 1-13.
- Chu, P. S., 1986: Atmospheric solar heating rate in the water vapor band. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 1532-1542.
- Chu, P. S., 1992: A solar radiation model for use in climate studies. *J. Atmos. Sci.*, 49, 762-772.
- Chu, P. S., and A. Arking, 1980: Computation of infrared cooling rates in the water vapor bands. *J. Atmos. Sci.*, 37, 855-867.
- Chu, P. S., and A. Arking, 1981: An efficient method for computing the absorption of solar radiation by water vapor. *J. Atmos. Sci.*, 38, 798-807.
- Chu, P. S., and L. Peng, 1983: A parameterization of the absorption in the $15\mu\text{m}$ CO_2 spectral region with application to climate sensitivity studies. *J. Atmos. Sci.*, 40, 2183-2192.
- Deser, C., and J. M. Wallace, 1987: El Nino events and their relation to the southern Oscillation, *J. Geophys. Res.*, 92, 14189-14196.
- Ellingson, R. G., J. Ellis, and S. Fels, 1991: The intercomparison of radiation codes used in climate models: Longwave results. *J. Geophys. Res.*, 96, 8925-8928.
- Ellingson, R. G., and Y. Fouquart, 1991: The intercomparison of radiation codes in climate models: An overview., *J. Geophys. Res.*, 96, 8925-8928.
- Fels, S. B., J. T. Kiehl, A. A. Lacis, and M. D. Schwarzkopf, 1991: Infrared cooling rate calculations in

- operational general circulation models: Comparisons with benchmark computations. *J. Geophys. Res.*, 96, 9105-9120.
- Fouquart, Y., B. Bonnel, and V. Ramaswamy, 1991: Intercomparing shortwave radiation codes for climate studies. *J. Geophys. Res.*, 96, 8955-8968.
- Harshvardhan, R. Davies, B. A. Randall, and T. G. Corsetti, 1987: A fast radiation parameterization for atmospheric circulation models. *J. Geophys. Res.*, 92, 1009-1016.
- Holton, J. R., 1979: An introduction to dynamic meteorology. Academic Press, 391pp.
- Katayama, A., 1974: A simplified scheme for computing radiative transfer in troposphere. Tech. Rep. No. 6, Dept. Met., UCLA.
- Kurihara, K., 1989: A climatological study on the relationship between the Japanese summer weather and the subtropical high in the western North Pacific. *Geophysical Magazine*, vol. 43, No. 2, 45-104.
- Lacis, A. A., and J. E. Hansen, 1974: A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 31, 118-133.
- Lau, K. M. and P. H. Chan, 1986: Aspects of the 40-50 day Oscillation during the Northern Summer as inferred from outgoing longwave radiation. *Mon. Wea. Rev.*, 114, 1354-1367.
- Lau, K. M. and T. J. Phillips, 1986: Coherent Fluctuations of Extratropical geopotential height and tropical convection in interseasonal time scales. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 43, No. 11, 1164-1181.
- Lau, K. M. and M. T. Li, 1984: The moonsoon of East
- Liou, K.-N., and S.-C. S. Ou, 1983: Theory of equilibrium temperatures in radiative-turbulent atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, 40, 214-229.
- Luther, F. M., R. G. Eddingson, Y. Fouquart, S. Fels, N. A. Scot, and W. J. Wiscombe, 1988: Intercomparison of radiation codes in climate models (ICR-CCM): Longwave clear-sky results - A workshop summary. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 69, 40-48.
- Manabe, S., and R. F. Strickler, 1964: Thermal equilibrium of the atmosphere with a convective adjustment. *J. Atmos. Sci.*, 21, 361-385.
- Mitchell, J. F. B., S. Manabe., T. Tokioka, and V. Meleshko, 1990: Climate change: The IPCC scientific assessment. Cambridge University Press, 131-172.
- McClatchey, R. A., R. W. Fenn, J. E. A. Selby, F. E. Volz, and J. S. Garing, 1972: Optical Properties of the Atmosphere, 3rd Ed., AFCRT Environ. Res. Papers No. 411, 108pp.
- Morcrette, J. J., 1990: Impact of changes to the radiation transfer parameterizations plus cloud optical properties in the ECMWF model. *Mon. Wea. Res.*, 118, 847-873.
- Morcrette, J. J., 1991: Radiation and cloud radiative properties in ECMWF. *J. Geophys. Res.*, 96, 9121-9132.
- Paltridge, G. W., and C. M. R. Platt, 1976: Radiative Processes in Meteorology and Climatology. Elsevier, 318pp.
- Ramanathan, V., E. J. Pitcher, R. C. Malone, and M. L. Blackmon, 1983: The response of a spectral general circulation model to refinements in radiative processes. *J. Atmos. Sci.*, 40, 605-630.
- Ridgway., W. L., Harshvardhan, and A. Arking, 1991: Computation of atmospheric cooling rates by exact and approximate methods. *J. Geophys. Res.*, 96, 8969-8984.
- Roberts, R. E., J. E. A. Selby, and L. M. Biberman,

- 1976: Infrared continuum absorption by atmospheric water vapor in the 8-12 μ m window. *Appl. Opt.*, 15, 2085-2090.
- Rodgers, C. D., 1968: Some extension and applications of the new random model for molecular band transmission. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 94, 99-102.
- Stephens, G. L., 1984: The parameterization of radiation for numerical weather prediction and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 826-867.
- Williamson, D. L., J. T. Kiehl, V. Ramanathan, R. E. Dickinson, and J. J. Hack, 1987: Description of NCAR Community Climate Model (CCM1), NCAR Tech. Note, NCAR/ N-285 + STR, 112pp.
- Zdunkowski, W. G., R. M. Welch, and G. Korb, 1980: An investigation of the structure of typical two stream methods for the calculation of solar fluxes and heating rates in clouds. *Beitr. Phys. Atm.*, 53, 147-166.

Intercomparison of Radiation Parameterization Models

Chin-Tzu Feng

Computer Center
Center Weather Bureau

(manuscript received 20 October 1991; in final form 27 December 1991)

ABSTRACT

Two versions of radiation parameterization are examined following the procedure of Intercomparison of Radiation Codes Used in Climate Models (ICRCCM). The old version (CWB1) is the one used in the CWB operational global model, the new version (CWB2) is the one that will be used in the future second generation global model. Intercomparisons of the radiative transfer computed for the clear sky of the standard atmospheres by the two versions are made concerning longwave and shortwave radiative fluxes at vertical boundaries, and heating/cooling rates at each model levels with more detailed line-by-line or narrowband models used as benchmarks. In addition, higher vertical resolution (20 levels) is tested in the new version (CWB2L) for vertical resolution sensitivity. The conclusions are:

1. For longwave, the cooling rates in the lower troposphere of the tropical and midlatitude summer atmosphere are underestimated in CWB1 because of neglecting e-type continuum absorption. As a result, net longwave fluxes at the surface are overestimated in CWB1. The error ranges in CWB2 are within 5% for fluxes at vertical boundaries, and within 0.5°C /day for vertical cooling profiles. The results of CWB2L show that the vertical resolution is rather sensitive for the humid lower troposphere in tropics.

2. For shortwave, the total absorption of the solar flux by the atmosphere is underestimated both in CWB1 and CWB2. The problem is more serious in CWB1 because of its simpler design. However, both schemes lead to overestimate downward shortwave fluxes at the surface. Besides increasing ozone absorption in the stratosphere, the results of CWB2L are similar to those of CWB2 and are insensitive to the vertical resolution.

More detailed analyses on absorption in CWB2L show that the discrepancy on shortwave absorption comes from the calculation of the effective water vapor optical depth.

Key Words: radiation parameterization model, longwave, shortwave