

CWB GFS輻射參數化模式之比較

馮 欽 賜

中央氣象局

摘 要

中央氣象局自1990年開始著手全球數值預報模式的更新計畫，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等人(1974)發展的輻射模式。為了評估兩版輻射模式的差異，一方面瞭解新版模式如何改進現行版的誤差，另一方面發現新版模式可能存在的缺失，以繼續改善。因此，吾人參照國際間輻射模式比較計畫(Intercomparison of Radiation Codes Used in Climate Models, ICRCCM)設定的方法，進行測試比較。藉由ICRCCM提供最精確單線模式(line-by-line model)或次精確頻段模式(narrowband model)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波短的垂直大氣加熱/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。此外，為了進一步瞭解垂直解析度與新版模式計算精確性之關聯，吾人加大原本比較測試中所設定的9層垂直解析度至20層，同時比較不同垂直分層的結果。

一、前言

輻射傳遞模式可分為：(一)一般氣候模式或數值預報模式採用的高度參數化寬帶模式(broadband model)。(二)較精確的頻段模式(narrowband model)。(三)最精確也最耗時的單線模式(line-by-line model)。基於輻射效應在氣候能量平衡的機制中，扮演極重要的角色，與體認到各氣候模式使用的輻射參數化模式之差異，會影響各模式對氣候變遷預測的結果，促使1980年代一項國際間輻射模式比較計畫(Intercomparison of Radiation Codes Used in Climate Models, ICRCCM)。這項計畫的目的，在瞭解上述各類輻射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，並且探討產生差異性的各種因素(Luther et al., 1988; Ellingson et al., 1991)。由於

不同研究單位發展的單線輻射傳遞模式在ICRCCM的個案比較中，相互的結果呈現相當好之一致性。因此最精確單線模式的計算結果，在缺乏更詳細的觀察資料時，是足以提供其它參數化輻射模式測試比較的標準值(Ellingson et al., 1991; Fouquart et al., 1991)。

由ICRCCM這個機會，各氣候模式或數值預報模式所採用的輻射參數化模式，得以透過較精確的標準值，而瞭解模式誤差的來源，進一步改善輻射模式的精確性。以ECMWF為例，於1989年5月上線的第三版輻射參數化模式，即是針對第二版在ICRCCM實驗測試中所發現的缺失，進行相當大的更新。經測試之後，它的確減少許多ECMWF全球模式中原有存在的系統性誤差(Morcrette, 1990; 1991)

)。

中央氣象局自 1990 年開始著手全球數值預報模式的更新計畫，其中輻射參數化部分，將採用 Harshvardhan 等人 (1987) 發展的輻射模式，取代現行作業模式中 Katayama 等人 (1974) 發展的輻射模式。為了評估兩版輻射模式的差異，一方面瞭解新版模式如何改進現行版的誤差，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 ICRCCM 提供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，最後一節是結論。

二、CWB GFS 輻射參數化模式之介紹

現行作業版 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，除了考慮更詳盡的計算方法之外，其向量化的程式結構，更提高此一模式執行的速度與效率。以下吾人簡稱現行作業版的輻射模式為 CWB 1，新版的輻射模式為 CWB 2，它們之間主要的特徵，敘述如表 1 並簡要說明如下：

長波參數化部分：CWB 1 只考慮對流層中最主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，以及對潮濕熱帶大氣低對流層有顯著貢獻的 e-type continuum 吸收效應。

CWB 1 僅將整個長波波譜視為一個波段區間，此一

波段區間的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)。

CWB 2 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; Robert 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：CWB 1 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通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 CWB 1 並沒有額外處理此一直達部分的地表反射率。

CWB 2 包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 ICRCM 所設定的晴天試驗個案中，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，不同天頂角與地表反射率之下，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。

CWB 1 與 CWB 2 的垂直解析度是使用 9 層，且將模式頂層設為 50 mb。同時為了探討垂直解析度對輻射計算的影響，我們將 CWB 2 加大垂直層數至 20 層，得到 CWB 2L 的結果，兩種垂直解析度如圖 1 所示。此外，ICRCM 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)結果之比較

1 長波方面

表 2 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 CWB 2L 中為了配合 ICRCM 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，CWB 2 在各個量的計算值表現地比 CWB 1 的結果較正確，並且誤差範圍保持在 5%。

CWB 1 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 CWB 1 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, 1987; Morcrette, 1991) 都指出，在溫暖潮濕的大氣 e-type continuum 吸收效應會增加低對流層紅外長波熱輻射能量 (thermal emission)，因此若忽略此一吸收效應，對溫暖潮濕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 CWB 1 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 CWB 1 所使用的寬帶透射函數的誤差有關。另外，圖 2 中也顯示 CWB 1 由於忽略臭氧吸收效應，而使 300 mb 以上大氣高估冷卻率，誤差可達 $1^\circ\text{K}/\text{day}$ 以上。並且，發現 TRO 與 MLS 的 500 mb 和 300 mb 之間，以及 SAW 的 600 mb 和 400 mb 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 CWB 1 精確許多，唯有在 TRO 大氣的第八層出現 $0.8^\circ\text{K}/\text{day}$ 的誤差之外，其餘都能保持 $0.3 \sim 0.4^\circ\text{K}/\text{day}$ 的誤差範圍之內。當我們加大 CWB 2 的垂直解析度至 20 層，以比較 CWB2L 與 CWB 2 的差異，可以發現 CWB 2L 在平

流層多加幾層且將頂層設在0.01mb，因而改善平流層臭氧吸收效應的估計，所以表2 CWB 2L的大氣層頂淨長波輻射通量更接近LBL標準值；並且最重要的，CWB 2L也減少CWB 2第八層的高估至 0.4°K/day 的誤差以內。這似乎顯示CWB 2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，尤其是溫暖潮濕大氣的中低對流層。

2 短波方面

表3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。CWB 1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，產生再一次吸收的過程，因此CWB 1中大氣吸收短波的能量(ABTOT)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， $\theta = 30^{\circ}$ 且 $A_s = 0.8$ 時，相對於頻段模式(NBM)的計算值，低估值高達 105 W/m^2 ，相對誤差是40%左右。CWB 2中大氣對短波的吸收量(ABTOT)雖然比CWB 1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 W/m^2 的誤差值，即使是CWB2L彌補了CWB2平流層未有理想解析度所低估的臭氧吸收量，也未能全然改進低估的現象。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，二是短波水氣吸收函數，這是新版輻射傳遞模式值得進一步研究改善的部份。反之，CWB 1、CWB 2與CWB 2L都

高估到達地表面的向下短波輻射通量(DNSUR)。

其次，地表面短波吸收量(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，CWB 2的平均反射率小於 A_s ；當天頂角等於 75° 時，則CWB 2的平均反射率大於 A_s （而CWB 1的平均反射率等於 A_s ）。這是因為天頂角小時，CWB 2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CWB 2地表面對DNSUR值的吸收能力比CWB 1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，CWB 1幾乎在所有的大氣剖面都是低估加熱率，CWB 2雖已縮小CWB 1的偏差，但冷卻率的分佈仍偏低，不過誤差保持在 0.5°K/day 以內。同樣地CWB 2L與CWB 2分佈相近，垂直解析度似乎對短波輻射的計算並不敏感。

四、結論

藉由ICRCCM提供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CWB 1與CWB 2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。結果顯示：

(一)長波方面—CWB 1忽略臭氧吸收因而高估300 mb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。CWB 2則已改善上述的缺失，使垂直大氣冷卻率分佈的誤差都幾乎小於 0.5°K/day ，並且輻射通量計算值小於5%的誤差。其次，加大CWB 2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 已明顯縮小 CWB 2 出現在 TRO 低對流層長波冷卻率高估的現象。

(二)短波方面— CWB 1 簡化的假設，導致明顯低估大氣的加熱率和吸收量，CWB 2 雖然略見改善，但仍低估兩者，不過大氣加熱率的偏差保持在 $0.5^{\circ}\text{K} / \text{day}$ 以內。CWB 1 與 CWB 2 反之則高估到達地面的向下輻射通量。其次，CWB 2L 除了改進平流層解析度而增加臭氧的短波吸收量之外，其餘結果類似 CWB 2，垂直解析度對短波輻射的計算並不敏感。

References:

- Chou, M.D., 1984: Broadband water vapor transmission function for atmospheric IR flux computations., *J. Atmos. Sci.*, 41, 1775-1778.
- Chou, M.D., and A. Arking, 1980: Computation of infrared cooling rates in the water vapor bands., *J. Atmos. Sci.*, 37, 855-867.
- Chou, M.D., 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.
- Eddingson, R.G., J. Ellis, and S. Fel, 1991: The intercomparison of radiation codes used in climate models: Longwave results., *J. Geophys. Res.* 96, 8929-8953.
- Eddingson, R.G., and Y. Fouquart, 1991: The intercomparison of radiation codes in climate models: An overview., *J. Geophys. Res.* 96, 8925-8928.
- Fouquart, Y., B. Bonnel, and V. Ramaswamy, 1991: Intercomparing shortwave radiation codes for climate studies., *J. Geophys. Res.*, 96, 8955-8968.
- Harshvardhan, R. Davies, D.A. Randall, and T.G. Corsetti, 1987: A fast radiation parameterization for atmospheric circulation models., *J. Geophys. Res.*, 92, 1009-1016.
- Katayama, A., 1974: A simplified scheme for computing radiative transfer in troposphere., Tech. Rep. No. 6, Dept. Met., UCLA.
- 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 (ICRCCM): Longwave clear-sky results- A workshop summary., *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 69, 40-48.
- Morcrette, J.-J., 1990: Impact of changes to the radiation transfer parameterizations plus cloud optical properties in the ECMWF model., *Mon. Wea. Rev.*, 118, 847-873.
- Morcrette, J.-J., 1991: Radiation and cloud radiative properties in ECMWF, *J. Geophys. Res.*, 96, 9121-9132.
- Ridgway., W.L., Harshvardhan, and A. Arking, 1991: Computation of Atmospheric cooling rates by exact and approximate methods., *J. Geophys. Res.* 96, 8969-8984.
- Rogers, C.D., 1967: The use of emissivity in atmospheric radiation calculations., *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 93, 43-54.

Intercomparison of Parameterized Radiation models in CWBGFS

Chin-Tzu Feng

Center Weather Bureau

ABSTRACT

Since 1990, the Center Weather Bureau has been working on the development of the second generation of global model. In the new model, a new radiation scheme based on Harshvardhan et al. (1987) will replace the current one (Katayama, 1974). Recently, ICRCM has provided the opportunity to validate the outputs of highly parameterized radiation codes against the results of very detailed models, including a number of line-by-line calculations, especially those carried out by different modeling groups for the program. Therefore, the intercomparison between them following ICRCM method is necessary and interesting. Different intercomparison exercises have been proposed concerning longwave and shortwave radiative fluxes and heating/cooling rates in standard clear-sky atmospheres with more detailed models as benchmark.

Table 1. Description of the methods for two CWB radiation models in clear sky

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 more than 0.9 μm, a simple parameterized formula used	Considered for more than 0.9 μm, and evaluated with two stream approximation by Rayleigh optical depth presetted
Surface albedo	No differences between direct and diffuse radiation albedos	A parameterized formula for direct radiation albedo, based on Paltridge and Platt (1976)

表 1：晴天時，CWB GFS 輻射參數化模式之比較說明。

表 2：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。

Table 2. Net longwave fluxes at the top of the atmosphere (TOP), tropopause and the surface (SURFACE) for three different standard atmospheres.

	TOP				
	LBL	EC	CWB1	CWB2	CWB2L
TRO	298.3	302.9	284.4	292.1	297.9
ERROR %		1.5%	-4.7%	-2.1%	-0.2%
MLS	289.0	292.3	276.9	278.7	287.4
ERROR %		1.1%	-4.2%	-3.7%	-0.5%
SAW	203.0	204.0	198.3	193.9	203.4
ERROR %		0.5%	-2.3%	-4.5%	0.2%
	TROPOPAUSE				
	LBL	EC	CWB1	CWB2	CWB2L
TRO	288.1	294.3	280.1	291.1	292.8
ERROR %		2.2%	-2.8%	1.0%	1.6%
MLS	272.8	277.2	259.0	274.4	276.6
ERROR %		1.6%	-5.0%	0.6%	1.4%
SAW	178.2	185.0	174.4	179.1	183.0
ERROR %		3.8%	-2.1%	0.5%	2.7%
	SURFACE				
	LBL	EC	CWB1	CWB2	CWB2L
TRO	66.5	72.3	84.0	69.0	67.5
ERROR %		8.7%	26.3%	3.8%	1.5%
MLS	79.1	84.1	89.5	82.9	81.6
ERROR %		6.3%	13.1%	4.8%	3.2%
SAW	82.9	85.4	79.2	87.1	86.6
ERROR %		3.0%	-4.7%	5.1%	4.5%

Unit : W / m**2
 LBL : GFDL line-by-line model.
 EC : ECMWF radiation parameterization.
 CWB1 : CWB operational radiation parameterization.
 CWB2 : CWB new radiation parameterization.
 CWB2L : results of the CWB2, but the vertical grid is 20 layers.

Table 3. Comparisons of shortwave radiation fluxes at surface, and total atmospheric absorption fluxes for different solar zenith angles and surface albedos As.

	NBM	EC	CWB1	CWB2	CWB2L	CWB2L-NBM
TRO $\theta = 30, As = 0.2$						
DNSUR	917.1	931.0	952.7	961.8	951.9	34.8
ABTOT	235.0	223.2	171.5	183.8	206.4	-28.6
NTSUR	747.2	758.1	762.2	809.1	800.7	53.5
MLS $\theta = 30, As = 0.2$						
DNSUR	930.6	940.9	967.3	970.7	963.3	32.7
ABTOT	222.1	214.3	156.9	171.2	196.6	-25.5
NTSUR	758.1	766.3	773.8	816.6	810.3	52.2
MLS $\theta = 75, As = 0.2$						
DNSUR	230.4	237.6	252.7	244.8	240.1	9.7
ABTOT	90.5	88.0	58.4	70.5	84.1	-6.4
NTSUR	188.3	194.1	202.2	167.2	163.9	-24.4
MLS $\theta = 30, As = 0.8$						
DNSUR	969.6	995.8	1011.9	1015.3	1007.4	37.8
ABTOT	261.8	249.5	156.9	203.2	234.8	-27.0
NTSUR	207.4	212.7	202.4	213.1	211.4	4.0
MLS $\theta = 75, As = 0.8$						
DNSUR	239.1	247.9	283.2	254.2	249.3	10.2
ABTOT	96.6	93.6	58.4	73.9	88.8	-7.8
NTSUR	51.8	53.5	56.6	43.7	42.8	-9.0
SAW $\theta = 75, As = 0.8$						
DNSUR	261.3	269.2	301.3	273.8	271.6	10.3
ABTOT	75.1	72.3	40.3	52.9	67.1	-8.0
NTSUR	56.3	57.8	60.3	46.9	46.5	-9.8

Unit : W / m**2
 NBM : narrow band model (Fouquart et al., 1991).
 DNSUR : downward flux at surface.
 ABTOT : total absorption.
 NTSUR : net flux at surface.

表 3：短波輻射通量值之結果比較。

LEVEL	PP (mb)	SIGMA
1	50.0	0.0
2	75.34	
3	100.7	0.05263
4	138.7	
5	176.7	0.13158
6	214.7	
7	252.7	0.21053
8	303.4	
9	354.1	0.31579
10	404.8	
11	455.5	0.42105
12	531.5	
13	607.5	0.57895
14	696.2	
15	784.9	0.76316
16	822.9	
17	861.0	0.84211
18	957.0	
19	1013.0	1.0

Fig 1-(a)

LEVEL	PP (mb)	SIGMA
1	0.01	0.0
2	10.14	
3	20.27	0.02
4	40.53	
5	60.79	0.06
6	96.24	
7	131.7	0.13
8	157.0	
9	182.3	0.18
10	202.6	
11	222.9	0.22
12	243.1	
13	263.4	0.26
14	288.7	
15	314.0	0.31
16	352.0	
17	390.0	0.385
18	428.0	
19	466.0	0.46
20	516.6	
21	567.3	0.56
22	617.9	
23	668.6	0.66
24	706.6	
25	744.6	0.735
26	782.5	
27	820.5	0.81
28	845.9	
29	871.2	0.86
30	891.4	
31	911.7	0.90
32	926.9	
33	942.1	0.93
34	957.3	
35	972.5	0.96
36	985.1	
37	997.8	0.985
38	1003.0	
39	1008.0	0.995
40	1010.0	
41	1013.0	1.0

Fig 1-(b)

圖 1：垂直解析度之分佈。(a) 9 層垂直解析度，CWB 1 與 CWB 2 所使用。(b) 20 層垂直解析度，CWB2L 所使用。

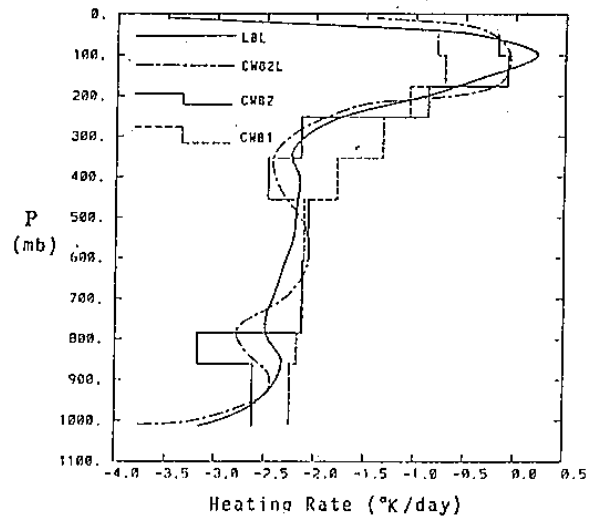


Fig 2-(a)

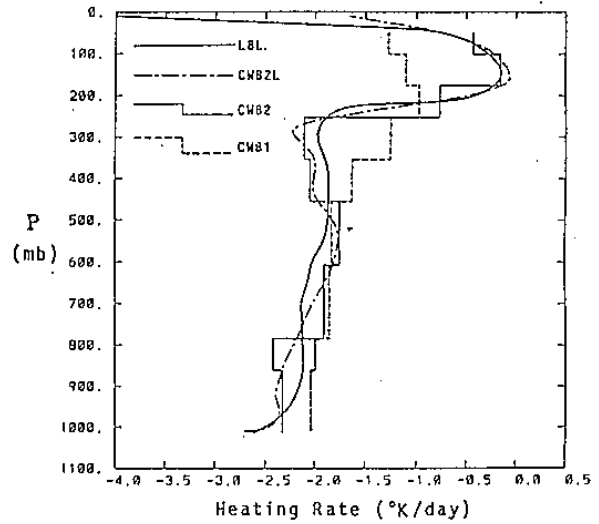


Fig 2-(b)

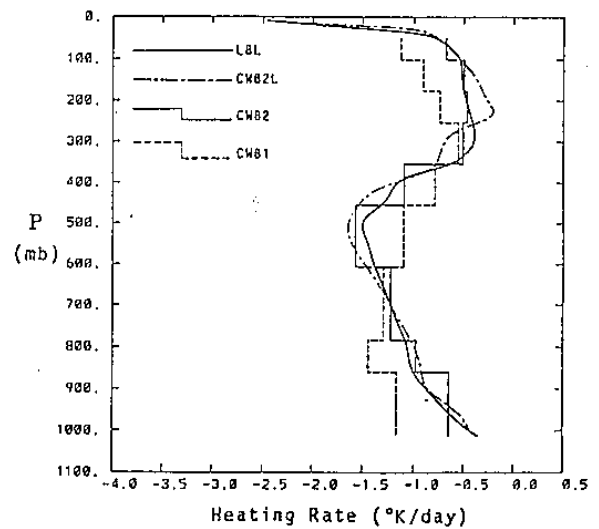


Fig 2-(c)

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)。

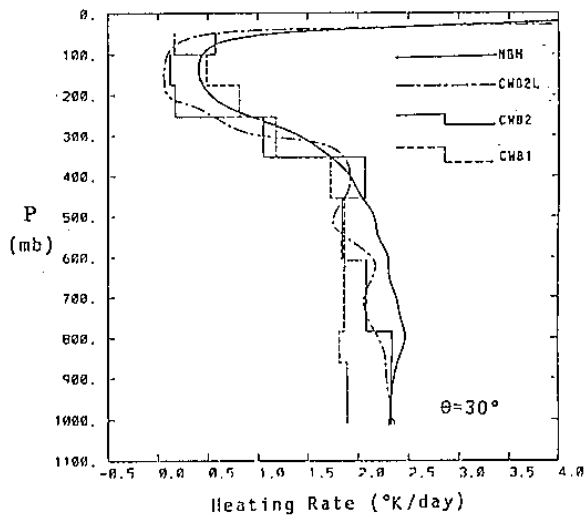


Fig 3-(a)-1

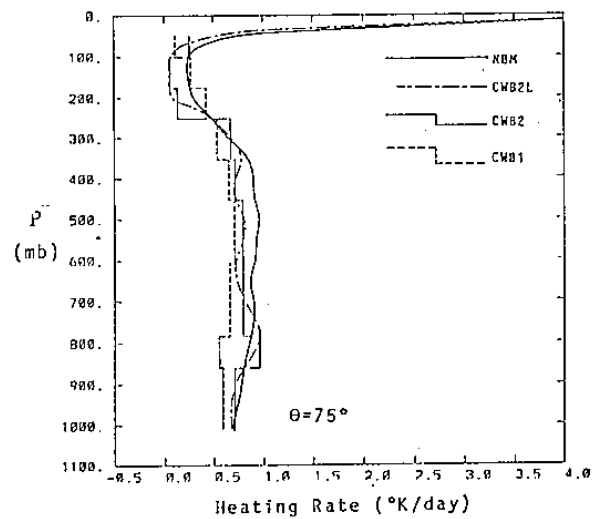


Fig 3-(a)-2

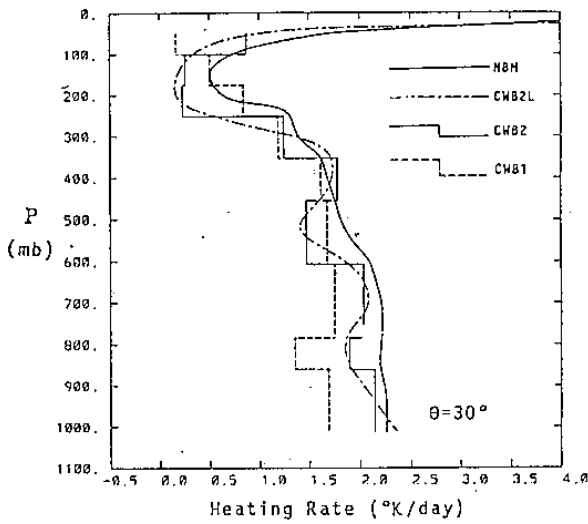


Fig 3-(b)-1

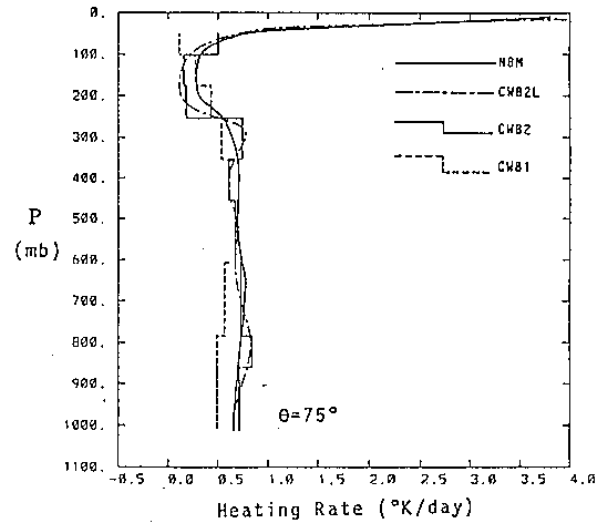


Fig 3-(b)-2

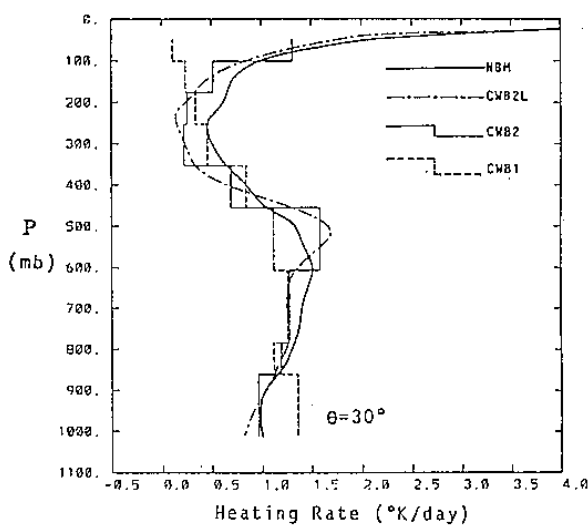


Fig 3-(c)-1

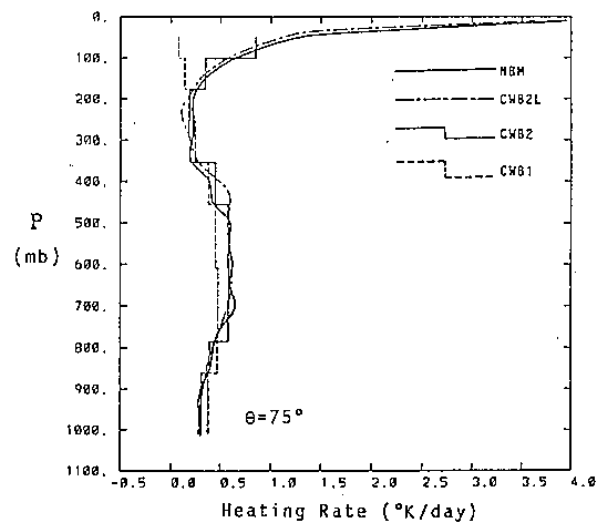


Fig 3-(c)-2

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