

CWBGFS積雲參數法的改進研究

陳靜洵 鄭明典

中央氣象局

摘要

爲了增加 Arakawa-Schubert 積雲參數法的計算時效性，我們選用 Moorthi & Suarez (1991) 的 Relaxed A-S 參數法，簡化 A-S 參數法的物理考慮，達到減少電腦計算時間的目的。(此版修正我們稱之 UPCUP) 爲了配合第二代全球預報模式的發展，我們修改原有 A-S 積雲參數法，使其具有多層邊界層的結構。(此修訂版我們稱之爲 PBL CUP)。

本文利用 GATE phase III 之資料做各修訂版的半預報測試 (semi-prognostic test)。初步結果顯示，UPCUP 的預報結果與未修訂版相近。但，UPCUP 可減少 40% 的計算時間 (cpu time)；PBL CUP 之結果則顯示，發展之程式已大致完成，須待全球預報模式之多層邊界層參數法建立完成後，再進行更進一步的測試與分析。

一、前言

爲了增加數值預報模式的預報準確度及時效性並配合電腦軟硬體之日新月異，已作業化的數值預報模式仍需不間斷地改進與更新。

中央氣象局在數值預報系統的第二期計畫中，全球預報模式的物理參數化部分即做了相當程度的更新，其中，積雲參數化部分雖然仍採用 Arakawa-Schubert 積雲參數法，但，爲了考慮程式的可攜性及配合第二代全球預報模式的發展，積雲參數化程式部分仍做了許多的修改。本文第二節即在描述積雲參數化所做的修改項目及內容，第三節則爲各修訂版測試結果的比較與分析。第四節爲結語。

二、第二代積雲參數法的改進項目與過程

目前中央氣象局已作業化的全球預報模式，採用 Arakawa-Schubert (A-S) 積雲參數法 (Arakawa and Schubert, 1974) 描述深積雲對流的熱力效應。A-S 參數法主要包含一個積雲雲譜模式及雲功函數準平衡的假設，爲目前物理考慮最仔細的積雲參數法。圖一爲 A-S 積雲參數基本架構的示意圖。基本上，A-S 積雲參數法可區分爲兩部分：一、雲譜模式 (cloud ensemble model) —— 利用大尺度環境的熱力變數診斷積雲的特性及每單位雲底質量通量的積雲加熱率及乾燥率。二、雲功函數與準平衡假設 —— Arakawa and Schubert (1974) 定義雲功函數爲由浮力引起的每單位雲底質量通量的動能生成率，透過雲功函數準平衡的假設，即可求得每個次積雲體的雲底質量通量。

A-S 積雲參數法的主要運算步驟如下：

1. 利用大尺度熱力變數場及雲頂浮力爲零的條件決定可能的雲頂高度。

2. 計算各個次積雲體的逸入率及經過雲底質量通量標準化 (normalize) 後的積雲質量通量。
3. 計算每單位雲底質量通量的積雲加熱率及加濕率。
4. 計算雲功函數。
5. 利用雲功函數與雲功函數標準值計算大尺度強迫作用 (large scale forcing)。
6. 計算各種雲間做功函數的改變率——質量通量矩陣 (kernel matrix)。
7. 透過雲功函數準平衡的假設，求解每個次積雲體的雲底質量通量。
8. 計算大尺度環境的加溫率及加濕率。

在積雲參數法的更新研究中，除了在程式設計時，多考慮了程式的可攜性外，在物理考慮方面亦做了多項改進，此改進版本我們稱為 NEWCUP；為了增加 Arakawa-Schubert 積雲參數法的計算時效性，我們以 NEWCUP 為藍本，再選用 Moorthi & Suarez (1991) 的 Relaxed A-S 參數法，簡化 A-S 參數法的物理考慮，以進行 A-S 積雲參數法的 speed-up 測試，此修正版我們稱之為 UPCUP；為了要配合第二代全球預報模式中多層次邊界層參數法的發展，我們亦針對 NEWCUP 的版本，進行修改，使其具有多層邊界層的結構，以利新邊界層參數法與 A-S 積雲參數法的偶合測試，此修正版我們稱之為 PBL CUP。以下即針對這些修訂版，分別加以詳述修改之目的與方法。

(一) NEWCUP 與作業版積雲參數法的主要差別表一所列為作業版與 NEWCUP 的主要差異項。一般而言，NEWCUP 含有較多的物理考慮，例如：在計算熱力浮力項時，NEWCUP 增加了雲內水滴的拖曳效應；於雲譜模式 (cloud ensemble model) 內計算上沖流的溫度時，則針對上沖流空氣是否為飽和而分別處理之；計算大尺度強迫作用 (large scale forcing) 時，所使用雲功函數 (cloud work function) 標準值的垂直解析度較作業版高；求解質量通量矩陣

(kernel matrix) 時，採用 over-adjustment method 及 direct method (Lord, 1978) 等兩種方法。不過，NEWCUP 所考慮的積雲種類較作業版少一種，作業版中多考慮了邊界層頂附近的淺積雲。

(二) A-S 積雲參數法的 speed-up 測試——UPCUP

由於 A-S 積雲參數法所花費的電腦計算時間較其它各種積雲參數法多出許多。減少 A-S 參數法所花的電腦計算時間即為第二期計畫中全球預報模式有關積雲數法的改進重點之一。關於 speed-up A-S 參數法的問題，我們分兩個方向進行改進測試：其一為重寫程式，使其更具程式的可攜性及結構性，並將程式內原有的一度空間資料結構改為兩度空間的資料結構，以利程式向量化的執行。另外，我們亦從簡化 A-S 參數法的物理考慮著手，試圖達到減少電腦計算時間的目的。目前我們選用 Moorthi & Suarez (1991) 的 Relaxed A-S 積雲參數法，測試分析減少 A-S 參數法計算時間的可行性。Relaxed A-S 參數法主要將 A-S 參數法做了兩種簡化：(1) 假設每個次積雲體的質量通量為高度的線性函數，以簡化逸入率 (entrainment rate) 的求解步驟。(2) 以緩和 (relaxed) 的方法達到 A-S 參數法中的準平衡假設，而非每次計算之雲功函數與大尺度強迫作用皆達準平衡狀態，此種假設可簡化雲底質量通量的求解步驟。

上述的簡化方法(一)主要是更改 A-S 參數中，有關雲與環境大氣間逸入率的計算假設。A-S 參數法中，每個次積雲體的質量收支方程為：

$$\frac{\partial \eta(Z, \lambda)}{\partial Z} = \lambda(Z) \eta(Z, \lambda) \quad (1)$$

Arakawa & Schubert 假設不同的次積雲體具有不同的逸入率，但對同一個次積雲體而言，逸入率則不隨高度有所變化，在此假設下，每個積雲體的質量為高度及逸入率的函數，需以反覆求解法 (iterative method) 求解每個次積雲體的逸入率，為了能求得一個收斂數值解，此部分

求解過程常需花費相當多的電腦計算時間，此法所得的每個次積雲體的質量通量在高度上呈現指數函數的變化曲線。Moorthi & Suarez (1991) 則假設每個次積雲體的質量通量僅為高度的線性函數，亦即

$$\frac{\partial \eta(Z)}{\partial Z} = \lambda \eta = E = \text{const} \quad (2)$$

在此假設及忽略虛溫與水滴拖曳效應的情況下，逸入參數 E_i 可表示成下式：

$$E_i = \frac{h_{LM} - h_i^*}{\sum_{j=LM-1}^i \beta_j \theta_j (h_i^* - h_j)} \quad (3)$$

此處， E_i 為每個次積雲體的逸入參數， h_{LM} 為雲底濕靜能； h_i^* 為雲頂飽和濕靜能； θ 與 h 分別為環境大氣的位溫與濕靜能。 β_j 之定義如下：

雲頂處， β_i 為：

$$\beta_i = \frac{C_p}{g} [P_{i+\frac{1}{2}}^k - P_i^k]$$

$$\beta_j = \frac{C_p}{g} [P_{j+\frac{1}{2}}^k - P_{j-\frac{1}{2}}^k]$$

上兩式中， C_p 為定壓比熱； g 為重力加速度； P 為壓力； $k = 0.286$

方法二則真正的簡化了 A-S 積雲參數法的物理考慮。A-S 參數法與其他各種積雲參數法的主要不同點之一即為它考慮了在同一個計算時步 (time step) 內，網格上可有特性不同的積雲體同時存在，並且考慮了各個次積雲體間的交互作用。Moorthi & Suarez 的簡化方法則未考慮計算時步當時的次積雲體間的交互作用，每個積雲體間的交互影響效應須至下一個計算時步才顯現出來。此種簡化方法，在計算時步間距很小時，兩者之結果差異即不大。此種方法雖可簡化雲底質量通量的求解過程，但已失去了 A-S 參數法的原有特性，故我們只針對方法一進行 speed-up 的測試。

(三) 多層邊界層結構的 A-S 參數法——PBL CUP

目前被使用的 A-S 積雲參數法多是針對

Bulk-PBL 所撰寫，雲底多設於模式之最底層頂 (亦即邊界層頂)，邊界層的平均特性即為雲底大氣的特性。當預報模式內，邊界層的結構增加至多層次時，現有 A-S 積雲參數法即需加以修改，使其具有多層的邊界層結構，以利與預報模式內的邊界層參數法產生關聯，使得兩參數法間能有合理的耦合 (coupling) 處理。

在本部分的更新研究中，我們所需面臨的主要問題有二：

- (1) 如何決定雲底高度及雲底特性？
- (2) 積雲對流的效應如何回饋 (feed back) 至雲底以下之自由大氣。

1. 雲底高度與雲底特性的定義

基本上，我們將雲底於舉升凝結層 (LCL)，為了維持雲底以下，能量與質量保守的定則，我們定義一個廣義的舉升凝結層——空氣塊透過混合率為 $(W(P))$ 的混合過程上升至飽和的高度。在此種定義下，積雲底以下之質量通量的差分型式為

$$\eta_k = \sum_{j=k}^{LM} W_j \Delta P_j \quad (4)$$

當空氣塊被舉升至第 k 層時，空氣塊特性的差分型式為：

$$(q_c)_{k-\frac{1}{2}} = \sum_{j=k}^{LM} W_j \bar{q}_j \Delta P_j \quad (5)$$

$$(hc)_{k-\frac{1}{2}} = \sum_{j=k}^{LM} W_j \bar{h}_j \Delta P_j \quad (6)$$

$$(q_c^*)_{k-\frac{1}{2}} = \bar{q}_{k-\frac{1}{2}}^* + \frac{\tau_{k-\frac{1}{2}}}{(1+\tau_{k-\frac{1}{2}})_L} [(hc)_{k-\frac{1}{2}} - \bar{h}_{k-\frac{1}{2}}^*] \quad (7)$$

上列各式中， q_c, q_c^*, hc 分別為空氣塊的混合比、飽和混合比及濕靜能； $\bar{q}, \bar{q}^*, \bar{h}, \bar{h}^*$ 分別代表環境大氣的混合比、飽和混合比、濕靜能及飽和濕靜能； ΔP 為每層之壓力差值； W_j 為第 j 層之混合率；

$$\tau_{k-\frac{1}{2}} = \frac{L}{C_p} (\partial q^* / \partial T), L \text{ 為水蒸氣之凝結熱}$$

; LM 為模式之垂直層數。當 $(q_c)_{k-\frac{1}{2}} \geq (q_c^*)_{k-\frac{1}{2}}$ 時，我們定義雲底在第 k 層頂。

當 $W_j = 0$ ($j = 1 \sim LM - 1$); 且 $W_{LM} = 1/\Delta P_{LM}$ 時，雲底的高度即為傳統定義下的 LCL，此時的雲底條件為

$$q_c = \bar{q}_{LM}$$

$$h_c = \bar{h}_{LM}$$

$$q_c^* = \bar{q}_{LM}^* + \frac{\gamma_{LM}}{(\bar{1} + \gamma_{LM})_L} [h_c - \bar{h}_{LM}^*]$$

於目前的測試中，我們假設 $W(k) = 1, k = 1 \sim LM$

2. 積雲對流於多層邊界層內之反饋作用 (上沖流部分)

A - S 積雲參數化裏，積雲對流影響大氣之主要過程有二。一個是雲內飽和的空氣及凝結的雲滴透出雲塊而進入大氣；另一個是積雲引起之下沈氣流所產生的加熱效應。關於積雲對流雲底以下大氣之影響過程，若僅考慮積雲引起之下沈氣流所產生的加熱效應，則其通量可表示如下：

(Lord & Arakawa; 1982)

$$\frac{1}{m_B} \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \right) = \frac{\partial \eta (\hat{h} - \bar{h})}{\Delta P} \quad (8)$$

此處， m_B 為積雲雲底的質量通量； \hat{h} 為積雲的濕靜能。 \bar{h} 為環境空氣的濕靜能。

積雲的濕靜能收支方程中，僅考慮逸入效應時，積雲之濕靜能保守方程可寫為 (Lord & Arakawa, 1982)

$$\frac{\partial \eta h}{\partial p} = \bar{h} \frac{\partial \eta}{\partial p} \quad (9)$$

將第 9 式代入第 8 式可得

$$\frac{1}{m_B} \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \right)_u = -\eta \frac{\partial \bar{h}}{\partial p} \quad (10)$$

第 10 式即為傳統下沈氣流所引起的增溫效應表示法。需注意的是利用此式表示積雲下沈增溫效應時，積雲之濕靜能保守方程需滿足第(9)式。若積雲之濕靜能保守方程考慮更多種物理過程或是逸入效應之表示式與第(9)式右邊項不同，則利用第(10)式求積雲之下沈增溫效應時，就有能量及質量不保守的問題出現。為了便於未來積雲之濕靜能

方程的修改，我們以通量式 (方程式(8)) 表示積雲之下沈增溫效應，其差分表示如下：

$$\int_{P_{i-\frac{1}{2}}}^{P_{i+\frac{1}{2}}} \frac{1}{m_B} \left(\frac{\partial \bar{h}}{\partial t} \right) dp$$

$$= \eta_{i-\frac{1}{2}} \left[\hat{h}_{i-\frac{1}{2}} - \bar{h}_{i-\frac{1}{2}} \right]$$

$$+ \eta_{i+\frac{1}{2}} \left[\bar{h}_{i-\frac{1}{2}} - \bar{h}_{i+\frac{1}{2}} \right]$$

三、半預報測試的結果分析與討論

為了驗證各項改進所採行的理論和假設是否合理，以及程式撰寫是否正確，本文以

GATE phase III 時間指標 9 至 152 的觀測資料進行各版本的半預報測試 (semi-prognostic test)。

(一) NEWCUP v.s OBS

由於作業版積雲參數法程式的可攜性不高，不易獨立抽出作半預報測試，本文將 NEWCUP 之測試結果與觀測資料相較，以分析其預報誤差。圖一與圖二分別為 GATE phase III 觀測資料診斷所得的 Q1 與 Q2。圖三與圖四則為 NEWCUP 半預報測試所得的 Q1 與 Q2。

在整個 GATE 實驗期間，共有 7 個颶線降雨的個案發生，其時間指標分別為 31、47、54、64、104、110、120。針對這些颶線個案而言 NEWCUP 對於 Q1 的預報，不管是加熱率的強度或是加熱率的垂直分布情形皆有不錯的預報結果。

根據圖二與圖四的分析顯示：NEWCUP 對於 Q2 變化情形的預報較不理想，基本上 NEWCUP 於低對流層有預報過乾的誤差存在。圖五為觀測與 NEWCUP 預報之 Q1 及 Q2 的時間平均垂直剖面圖。由此圖我們可很明顯的看出：NEWCUP 對於高層大氣有預報過冷及過濕的趨勢，對於低對流層則有預報過乾的問題存在。

(二) UPCUP v.s. NEWCUP

圖六與圖七分別為 UPCUP 半預報測試所得

的Q1與Q2時間序列圖，與圖三、圖四相較可知，UPCUP對於極值的預報明顯的較NEWCUP小，另外，NEWCUP中有較多的副極值中心，UPCUP無法掌握到。由圖八UPCUP所預報之Q1及Q2時間平均垂直剖面圖，我們更可看出UPCUP對於中下層大氣積雲加熱率(Q1)及加濕率(Q2)的預報皆較NEWCUP小。另外，在電腦計算時間方面，UPCUP較NEWCUP減少40%。

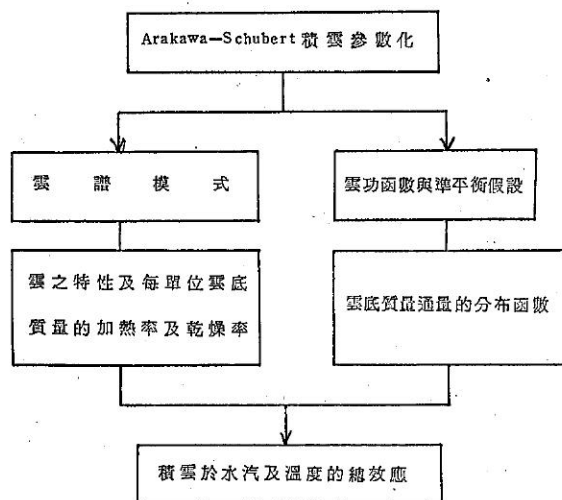
根據積雲種類數目及積雲底質量通量等A-S積雲參數法的診斷分析顯示(圖與表格未列)，使用Moorthi & Suarez有關逸入率的計算方式，所獲得的次積雲體存在個數較NEWCUP少，尤其對於低對流層淺積雲的個數UPCUP較NEWCUP明顯的減少，因而積雲的總加熱率及加濕率的減少即為一合理的現象。目前積雲參數法程式中具有兩個計算逸入率的副程式，副程式CEM1即為UPCUP所使用的Moorthi & Suarez之逸入率計算法，副程式CEM2則為

NEWCUP所使用的反覆計算法求解逸入率。在未來預報模式的整合測試時，即可針對精確度或時效性的需求有所調整。

(三) PBLCUP v.s. NEWCUP

圖九與圖十為PBLCUP所預報之Q1與Q2時間序列圖。與圖三及圖四相較可知，PBLCUP所預報之Q1及Q2較NEWCUP增加許多。

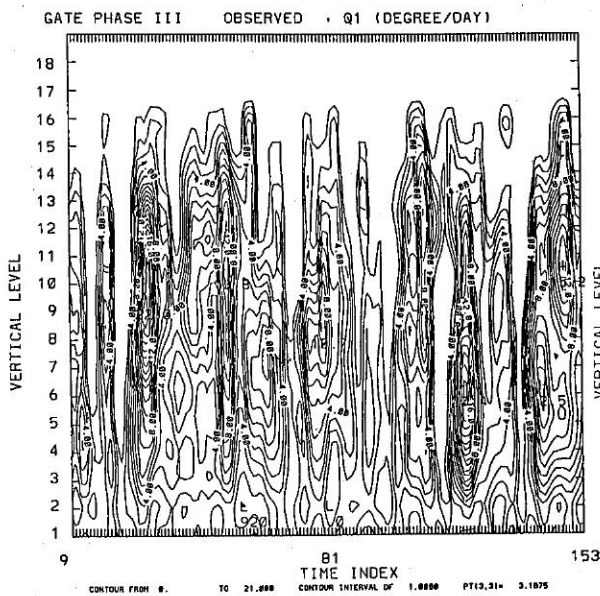
此修訂版主要為A-S積雲參數法與多層次邊界層參數法之偶合測試的先驅研究工作。在滿足能量及質量守恆的定則下，我們完成積雲底條件的設定。目前初步的研究顯示：依照2.2所述之雲底決定條件及反饋作用之模擬方法加入現行A-S參數法中，程式撰寫已告完成，須待進一步分析為何有預報過暖的情形存在。目前，氣象界有關積雲和邊界層交互作用的理論研究，幾乎沒有，我們的測試工作仍在尋求答案之階段，希望透過模式的漸漸改善與建立，能進行各種敏感測試(Sensitivity test)及半預報測試，以深入探討積雲和邊界層交互作用的理論研究。



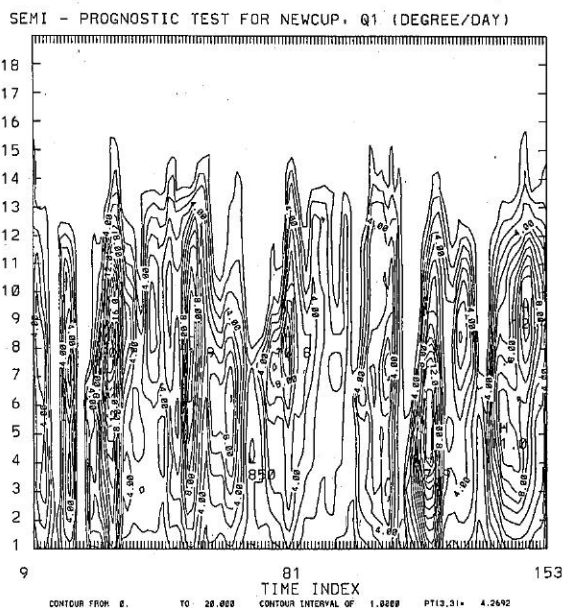
圖一：A-S積雲參數法的基本架構

表一：NEWCUP 與 OPS CUP 的主要差異項

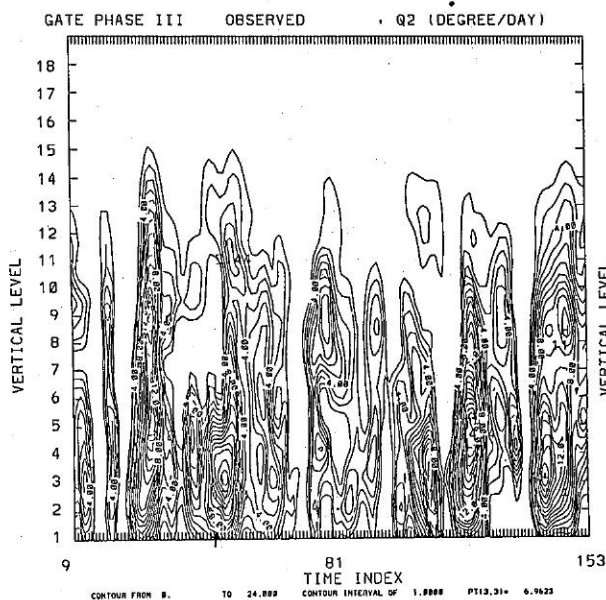
	OPSCUP	NEWCUP
thermal buoyancy	$g \left(\frac{T_{vu} - \bar{T}_v}{\bar{T}_{vu}} \right)$	$g \left(\frac{T_{vu} - \bar{T}_v}{\bar{T}_v} - \ell \right)$
temperature of updraft	T_u $= \bar{T} + \left(\frac{h_u - Lg_u - \bar{S}}{C_p} \right)$	non-saturated $\bar{T} + \frac{(h_u - Lq_u - \bar{S})}{C_p}$ saturated $\bar{T} + \frac{(h_u - \bar{h}^*)}{C_p (1+r)}$ $\bar{q}^* + \frac{r (h_u - \bar{h}^*)}{L(1+r)}$
reference state	6 levels 75 , 150 , 300 , 500 , 700 , 900	9 levels 6 , 75 , 150 , 275 , 437.5 , 617.5 , 775 , 900 , 975
cloud type	LM-1 (E-type cloud)	LM-2
kernel matrix	overadjustment	overadjustment direct method (Lord 1978)



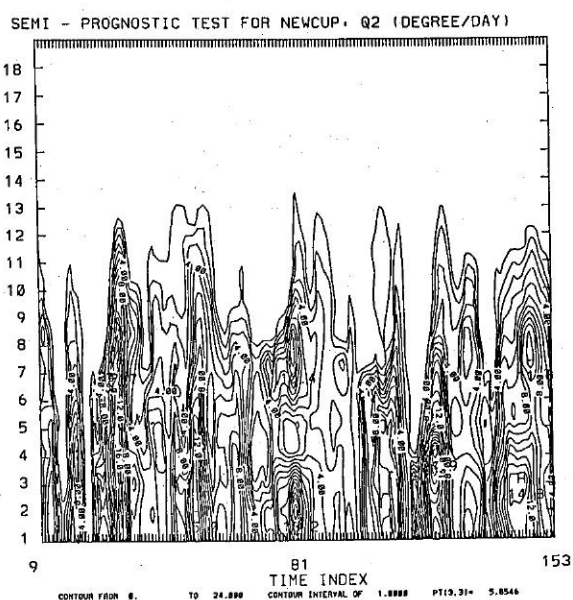
圖二：GATE phase III 資料—Q1



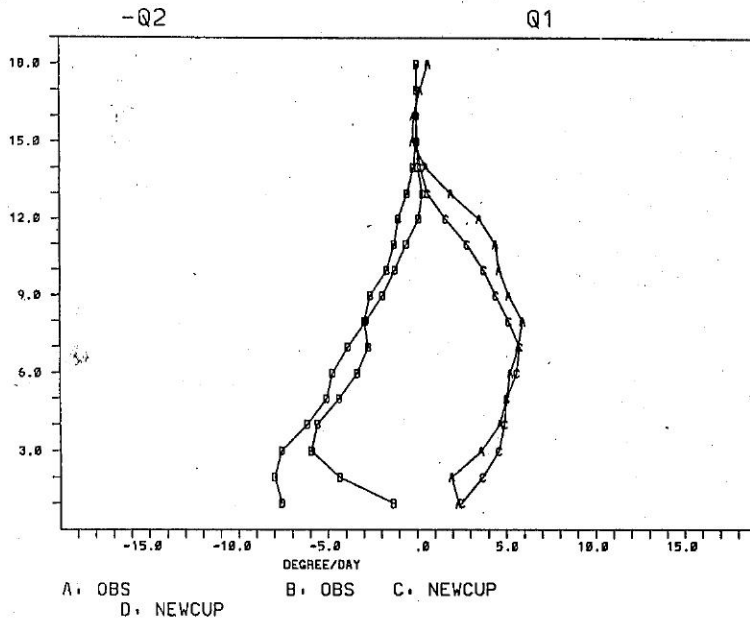
圖四：Q1時間序列圖—NEWCUP



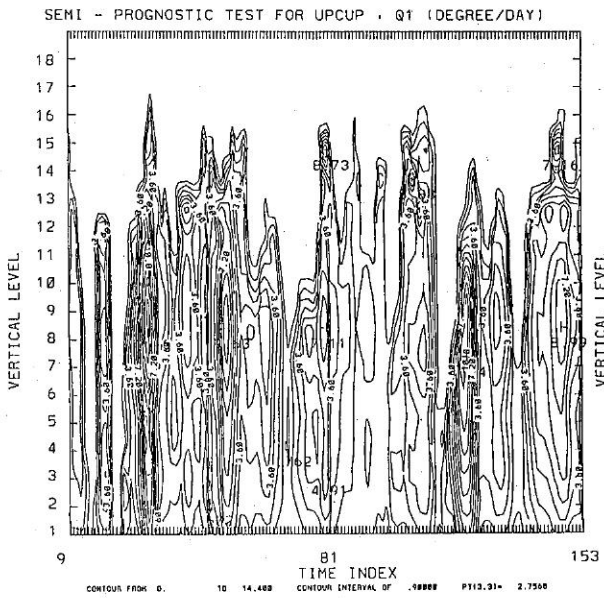
圖三：GATE phase III 資料—Q2



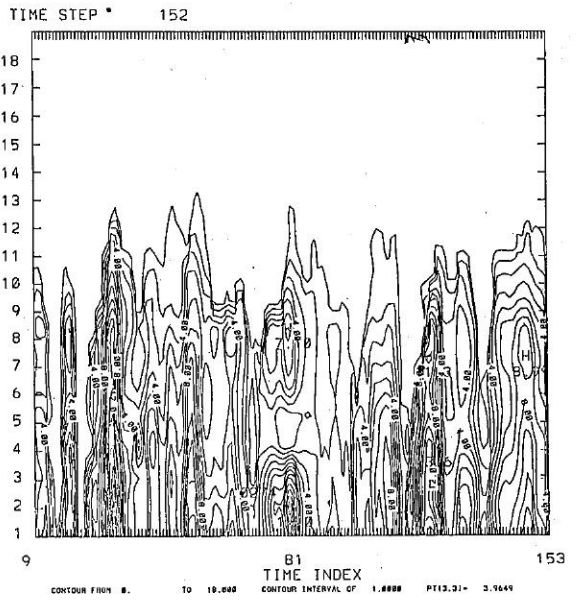
圖五：Q2時間序列圖—NEWCUP



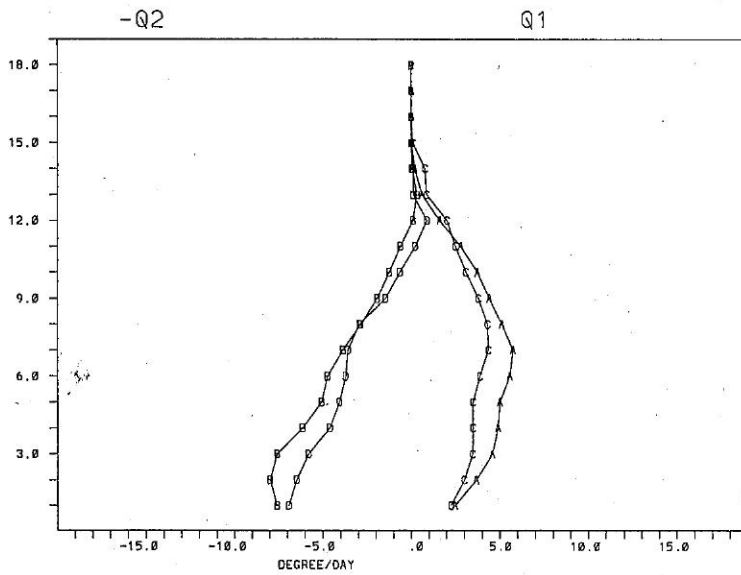
圖六：Q1, Q2時間平均剖面圖



圖七：Q1時間序列圖—UPCUP



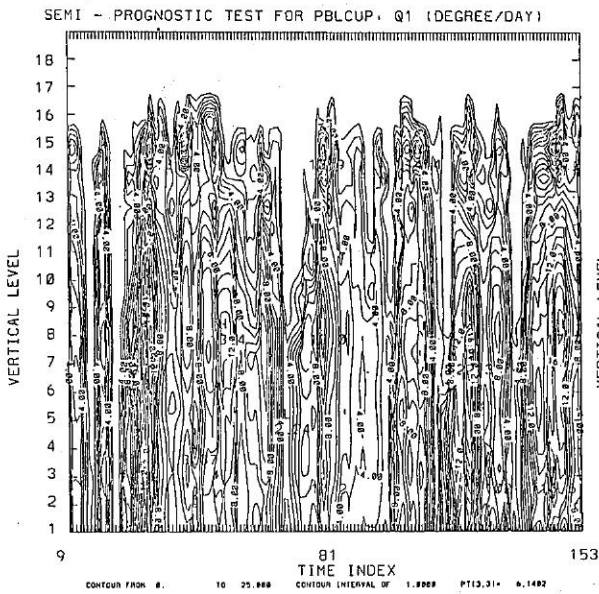
圖八：Q2時間序列圖—UPCUP



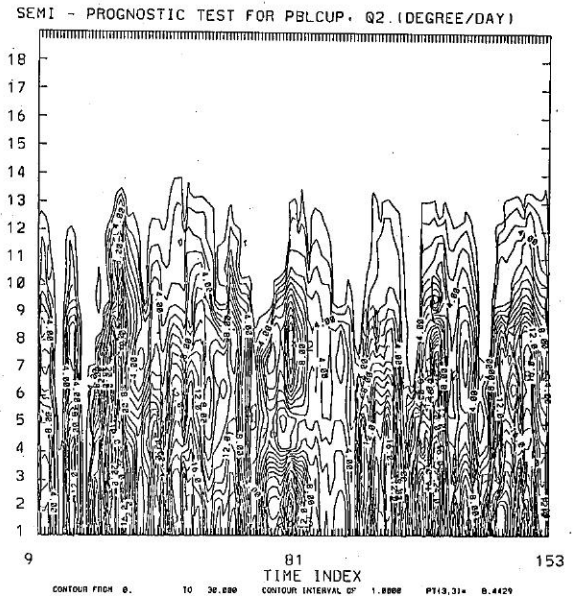
圖九：Q1, Q2時間平均剖面圖

A, B分別代表NEWCUP所得之Q1, Q2

C, D則為UPCUP所得之Q1, Q2



圖十：Q1時間序列圖—PBL CUP



圖十一：Q2時間序列圖—PBL CUP

四、結語

中央氣象局第二代的全球預報系統目前正在積極的發展建立中，爲了提高模式預報的準確性及配合天氣預報作業的時效性。作業模式中，所有的數值預報計算軟體皆需具有高精確度及高效率性的要求。第二代全球預報模式中的積雲參數法，我們仍採用預報自由度較高的A-S參數法，不過爲了配合各個預報模組的發展，我們針對此積雲參數法進行數項修改，主要改進研究重點有二：(1)如何減少A-S參數法所花的電腦計算時間；(2)A-S參數法與高解析度邊界層參數法的偶合研究。

本文之研究顯示，減少A-S參數法所花的電腦計算時間的可行性很高。而具有多層邊界結構之A-S參數法完成後，我們即可進行A-S參數法與多層次邊界層參數法的偶合研究。

五、參考文獻

- Arakawa, A., and W.H. Schubert, 1974 :
Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. *J. Atmos. Sci.*, 31, 671-701.
- Arakawa, A., and M. J. Suarez, 1983 :
Vertical differencing of the primitive equations in sigma coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 34-45.
- Lord, S. J. 1982 : Interaction of a cumulus cloud ensemble with large-scale environment, Part III : Semi-prognostic test of the Arakawa-Schubert cumulus parameterization. *J. Atmos. Sci.*, 39, 88-103.
- Lord, S. J., W. C. Chao, and A. Arakawa, 1982 : Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part IV : The discrete model. *J. Atmos. Sci.*, 39, 104-113.
- Moorathi, S. and M. J. Suarez, 1991 :
Relaxed Arakawa-Schubert: a parameterization of moist convection for general circulation models. Ninth Conference on Numerical Weather Prediction, 87-90.
- Yanai M., S.K. Esbensen, and J.H. Chu, 1973 : Determination of bulk properties of tropical cloud clusters

MODIFICATION FOR CUMULUS PARAMETERIZATION IN THE CENTRAL WEATHER BUREAU GLOBAL FORECAST SYSTEMS (CWBGFS)

Ching-hsuan Chen and Ming-dean Cheng

Central Weather Bureau

ABSTRACT

A relaxed Arakawa-Schubert parameterization is constructed based on the method presented by Moorathi and Suarez (1991). A semi-prognostic test of the relaxed A-S scheme shows a 40% decrease of CPU time compared to a similar testing with the standard A-S scheme.

To apply the parameterization in a vertical coordinate system with multiple-layer structure in the planetary boundary layer, We also present a scheme. This generalized sub-cloud layer formulation satisfies the conservation of mass, moisture and moist static energy.