

CWBGFS積雲參數法的改進研究

陳靜洵 鄭明典

中央氣象局資訊中心

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PBLCUP)。

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)；PBLCUP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

在正確性及時效性需兼顧的作業模式中，所有的數值預報計算軟體即需滿足高精確度及高效率性的要求。目前中央氣象局已作業化的全球預報模式所採用的積雲參數法爲Arakawa-Schubert (1974)參數法。此種參數法對於積雲加熱率垂直分佈的預報有較高的自由度，但所花費的電腦計算時間則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爲目前全球預報模式有關積雲參數法的改進重點之一。另外，目前A-S參數法爲針對Bulk-PBL所設計，爲了配合第二代全球預報模式多層次邊界層參數法的

發展，除須將現有積雲參數法修改成多層邊界層的結構外，積雲對流和邊界層交互作用的模擬亦爲目前積雲參數化的改進研究之一。

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參數法主要是將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爲高度的線性函數，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之假設，此種假設可簡化雲底質量通

量的求解步驟。由於時間關係，目前我們只完成第一種簡化方法的測試，方法(2)仍在程式撰寫當中。

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），邊界層之平均特性即為雲底大氣之特性。當邊界層之結構增加至多層次時，現有A-S參數法即需加以修改，使其具有多層之邊界層結構。

A-S積雲參數法與多層次邊界層偶合（coupling）時，我們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（feedback）至雲底以下之自由大氣？

有關各種修訂版（UPCUP及PBLCUP）的修改方法詳述於第二節；第三節則以GATE phase III的資料針對各種修訂版進行半預報測試及分析討論各版之修改結果；第四節為結語。

二、方法之描述

(一)逸入率計算方法之修改

A-S積雲參數化中，每個次積雲體的質量通量為高度及逸入率的函數，其質量收支方程如下：

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

目前A-S參數法中是以反覆求解法（iterative method）求解每個次積雲體的逸入率，為了數值解的收斂問題，此部分求解過程常須花費相當多的電腦計算時間。

Moorthi & Suarez (1991)則

假設每個次積雲體的質量通量為高度的線性函數，亦即

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

在此假設及忽略虛溫與水滴拖曳效應的情況下，逸入參數可表示成下式：

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

此處， E_i 為每個次積雲體的逸入參數； h_L 為雲底之濕靜能； h_i^* 為雲頂之飽和濕靜能； θ 與 h 則分別為環境大氣的位溫與濕靜能。 β_j 之定義如下：

$$\beta_i = \frac{C_p}{g} \left[p_{i+\frac{1}{2}}^k - p_i^k \right]$$

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

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

(二)多層邊界層結構之A-S積雲參數法

1.雲底高度與雲底特性的定義

基本上，我們將雲底定於舉升凝結層（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 $W(P)$ 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：

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

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

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

上列各式中， q_c 、 q_c^* 、 h_c 分為空氣塊的比濕、飽和比濕及濕靜能； \bar{q} 、 \bar{q}^* 、 \bar{h} 、 \bar{h}^* 分別代表環境大氣的比濕、飽和比濕、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；

$r_{k-\frac{1}{2}} = \frac{L}{C_p} \frac{\partial q^*}{\partial T}$ ， L 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 ，而雲底條件為

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

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

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

於目前的測試中，我們假設 $W(k) = 1$ ，

$$1 \leq k \leq LM。$$

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。關於積雲對流對雲底以下大氣之影響過程，目前我們僅考慮積雲引起之下沈氣流所產生的加熱效應。其通量表示式如下：

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

若我們在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

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

將第(9)式代入第(8)式可得

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

第(10)式即為傳統下沉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沉增溫效應時，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)式求積雲之下沉增溫效應時，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)）表示積雲之下沉增溫效應，其差分表示式如下：

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

$$= \eta \left(i - \frac{1}{2} \right) \left[h_c \left(i - \frac{1}{2} \right) - h \left(i - \frac{1}{2} \right) \right] + \eta \left(i + \frac{1}{2} \right) \left[h \left(i - \frac{1}{2} \right) - h \left(i + \frac{1}{2} \right) \right]$$

上式中， η 為積雲質量通量， h_c 為雲空氣之濕靜能， h 為環境空氣之濕靜能， i 由 1 至 $LM-1$ 。

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。本文之分析著重於修改前後之差異比較，與實際觀測資料之比較將待更進一步之分析工作完成後，再撰文詳述。

(一) A-S 積雲參數法之加速化測試 (UPCUP)

圖一及圖二為未修改前積雲參數化所做之半預報測試結果。圖一為降水預報之時間序列圖；圖二為預報之 Q_1 及 Q_2 的時間平均垂直剖面圖。圖三、圖四則為修改後 (UPCUP) 的相對應圖。

由圖一及圖三可知，修改前後積雲降水的時間變化幾乎一致；降雨的一些極值顯示，UPCUP 較未修改前小了一些。我們亦可在 Q_1 、 Q_2 的時間平均垂直剖面圖中，看到類似的差異，由圖二、圖四顯示，UPCUP 對於中下層大氣積雲加熱率 (Q_1) 及加濕率 (Q_2) 的預報皆較未修改前小。另外，在電腦計算時間方面，UPCUP 則較未修改前少 40%。

根據分析顯示，使用 Moorthi & Suarez 有關逸入率的計算方式，可明顯的減少求解逸入率所需的電腦計算時間。由於使用此法所獲得的次積雲體存在個數亦較未修改前少了一些，因而積雲總加熱率及加濕率的減少即為一合理的現象。接著，我們要繼續兩者之預報結果與實際觀測結果之比較分析，在兼顧正確性及時效性的要求下，評估此法是否可放入中央氣象局全球預報系統之作業模式。

(二) 多層邊界層結構之 A-S 積雲參數法 (PBL-CUP)

圖五及圖六為 PBL-CUP 修訂版之預報

結果。圖五顯示，PBL CUP 所預報之積雲降雨量的時間變化情形與未修訂前（圖一）大致相同；其極值則較未修訂前增大不少。由圖二及圖六亦可看出 PBL CUP 預報之 Q_1 ， Q_2 亦較未修訂前增加許多。

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 節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。

四、結論

中央氣象局第二代的全球預報系統目前正在積極的發展與建立中，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，配合各個模組的發展，我們即針對此積雲參數法進行各項修改，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。

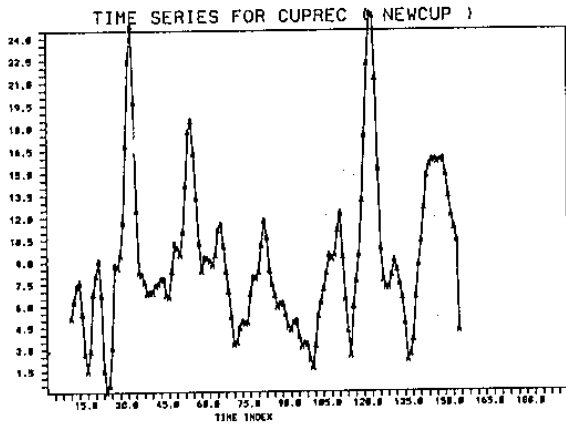
本文之研究顯示，減少 A-S 參數法所花的電腦計算時間的可行性很高。而具有多層邊界層結構之 A-S 參數法完成後，我們即可進行 A-S 參數

法與多層次邊界層參數法的偶合研究。

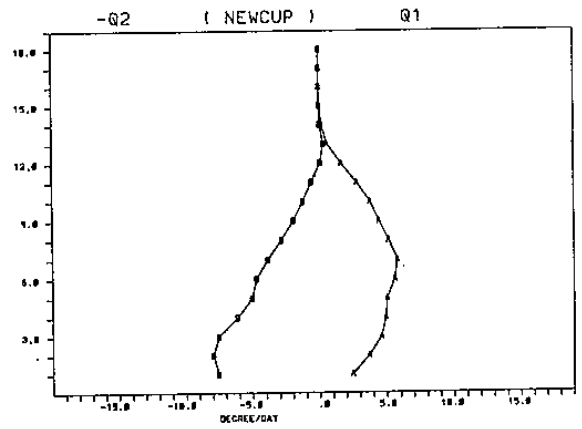
五、參考文獻

- 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.
- Moorthi, 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

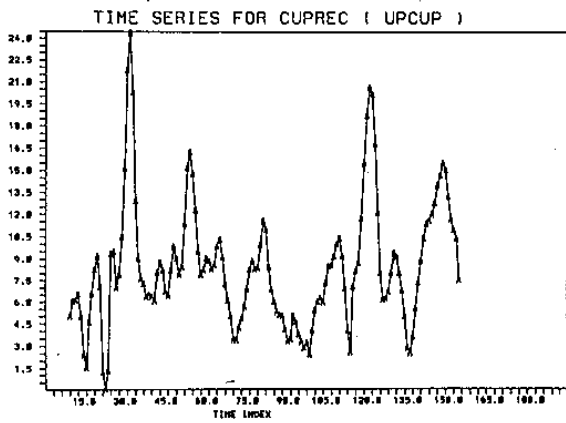
from large-scale heat and moisture budgets. J. Atmos. Sci., 30, 611-627.



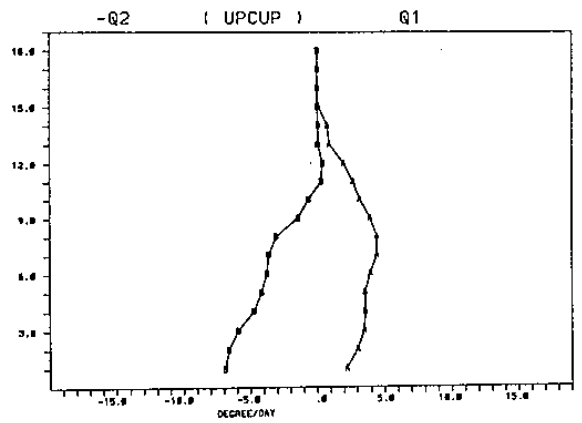
圖一：積雲降雨量的時間序列圖
(未修訂版之預報結果)



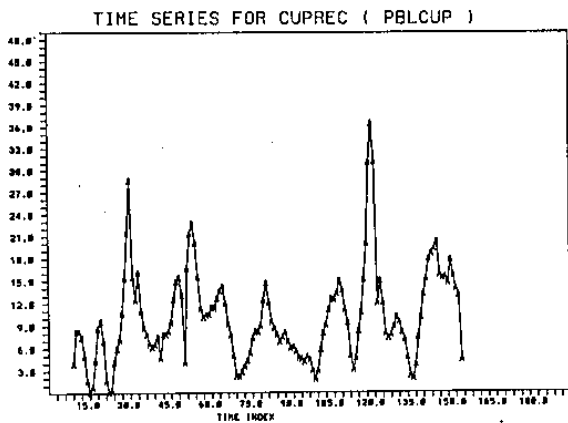
圖二： Q_1 及 Q_2 的時間平均垂直剖面圖。
(未修訂版之預報結果)



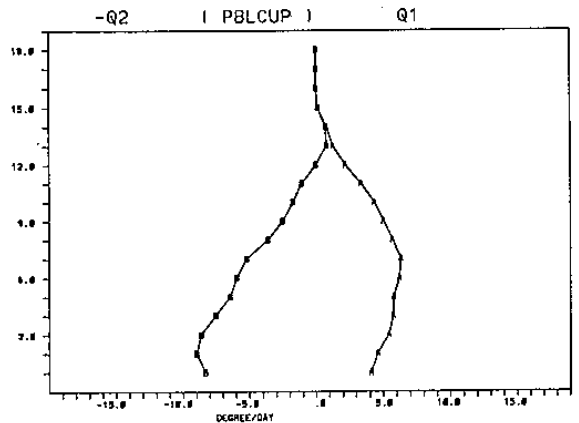
圖三：同圖一，但為 UPCUP 之預報結果



圖四：同圖二，但為 UPCUP 之預報結果



圖五：同圖一，但為 PBL CUP 之預報結果



圖六：同圖二，但為 PBL CUP 之預報結果

Modification for Cumulus Parameterization in CWBGFS

Chen Ching-Hsuan

Cheng Ming-Dean

Center Weather Bureau

ABSTRACT

A relaxed Arakawa-Schubert parameterization is constructed based on the method presented by Moorthi 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 generalized formulation of the sub-cloud layer budgets for use in the A-S scheme. This generalized sub-cloud layer formulation satisfies the conservation of mass, moisture and moist static energy.

