

# 兩種積雲參數法在颱風模式之診斷分析

童雅卿  
中央氣象局

彭順台  
美國海軍研究學院

## 摘要

目前中央氣象局有限區域預報模式及颱風路徑預報模式均採用修正版之郭氏積雲參數法。本文嘗試在颱風路徑預報模式中加入Betts and Miller積雲參數法。就道格颱風個案，對此二參數法作一初步之診斷分析比較。

初步結果發現採用郭氏積雲參數法，在沒有人工加熱作用下，其颱風附近半徑 300公里內之深對流能迅速發展但其強度無法維持很久。Betts and Miller積雲參數法的使用，模式到12小時的預報才有明顯的深對流產生，但能維持一定的強度到48小時預報。

## 一、前言

對於次網格對流效應之處理，早期 Manabe et. al.(1965) 提出當大氣為條件性不穩定時，對流作用將調整大尺度之大氣狀態使之趨向於溼絕熱結構。Kuo(1965,1974)則是提出當有大尺度之水氣輻合存在時，可用一個簡單的雲模式來參數深對流之加熱及增溼效應。此即本局有限區域預報模式及颱風模式所使用之郭氏積雲參數法。Arakawa and Schubert(1974)用雲譜模式來模擬不同類型雲間交互作用所導致大尺度之環境變化。最近，Betts and Miller(1986)分析熱帶實驗計畫之資料設計出新的積雲參數法，不去考慮複雜的雲關係，而採用和 Manabe 類似的調整方法。假設對流和大尺度作用之間存在著近似平衡關係，因此對流會將格點垂直之溫度及溼度場調整向一個參考曲線。和 Manabe 所不同的是此參考曲線並非溼絕熱線而是由觀測分析歸類所得之垂直曲線。

Betts and Miller(1986)證明此積雲參數法在ECMWF 全球預報模式中對熱帶地區平均流場之預報較郭氏積雲參數法為佳。

本文的目的即將 Betts and Miller積雲參數法加入颱風模式，就颱風個案測試和郭氏積雲參數法之結果作一初步分析比較。

## 二、Betts-Miller 積雲參數法

本文所使用之 Betts-Miller 積雲參數法主要是依據 Betts and Miller(1986)之論文所設計。此積雲參數法主要概念在於當有積雲存在時，大氣局部之熱力結構將受對流影響趨向一近似平衡之參考狀態。所以對流之加熱項及增溼項可用方程式(1)(2)來表示

$$\left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial t}\right)_c = (T_R - \bar{T}) / \tau \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial t}\right)_c = (q_R - \bar{q}) / \tau \quad (2)$$

其中  $\bar{T}$ 、 $\bar{q}$  為格點溫、溼度， $T_R$ 、 $q_R$  為參考溫、溼度， $\tau$  為調整時間。左邊項即是對流所造成大尺度變數之變化量。

此參考曲線之決定依深淺對流而有不同的處理方式。深淺對流之判定則是依據所推算出之雲頂高度，若雲頂低於 $\sigma=0.75$  層即為淺對流，反之則為深對流。雲頂高度之推算主要是將底層之空氣塊沿乾絕熱線上升達到飽和(即為舉升凝結層，LCL)，再沿濕絕熱線上升，所推算每一層溫度即試視為雲溫。此舉升凝結層即是雲底。當雲溫等於環境溫度即為雲頂所在。若雲底上一層之雲溫小於環境溫度則無對流作用。另外， $\tau$  值之設定也因深淺對流而異，對深對流  $\tau=900$  秒；對淺對流  $\tau=1800$  秒。由於深淺對流處理方式不同，以下分別加以闡述。

(一)深對流處理

Betts and Miller(1986)分析觀測資料發現在熱帶當有深對流產生時，大氣存在著一近似平衡之溫度場結構。此溫度之垂直結構在結冰層(freezing level)以下大致和虛相當位溫(virtual equivalent potential temperature)之等值線平行。在結冰層以上其溼位溫則漸漸增加逼近低層空氣之溼絕熱線。主要原因可能是當飽和空氣塊上升時因含有雲滴而減少浮力，因此沿虛溫溼絕熱而非溼絕熱上升。在結冰層以上，雲滴結冰和降水的掉落均造成空氣塊之浮力增加。

因此對於深對流，其溫度之初始參考曲線可設定如下：

當  $P_B > P > P_M$

$$\theta_{es} = \theta_{es}(B) + \alpha \left( \frac{\partial \theta_{es}}{\partial p} \right)_{\theta_{esv}} (p - p_B)$$

當  $P_T > P > P_M$

$$\theta_{es} = \theta_{es}(M) + \{ \theta_{es}(T) - \theta_{es}(M) \} (p - p_T) / (p_M - p_B)$$

其中  $\theta_{es}$  為飽和相當位溫 (saturated equivalent potential temperature)；P 為氣壓。而註標 B、M、T 分別表示在雲底、結冰層及雲頂的值。 $\alpha=1.5$  為一權重，可使得參考曲線在低對流層較不穩定。

溼度之初始參考曲線則用飽和氣壓偏差係數 S (saturation pressure departure parameter) 來定義。

當  $P_B > P > P_M$

$$S(p) = \{ (p - p_B)S_M + (p - p_T)S_B \} / (p_B - p_M)$$

當  $P_T > P > P_M$

$$S(p) = \{ (p_M - p)S_T + (p - p_T)S_M \} / (p_M - p_T)$$

其中  $S = P^* - P$  為飽和氣壓偏差係數， $P^*$  為在 P 層空氣之飽和層氣壓。當 S 小於零表示空氣塊未飽和；S 大於零表示空氣塊已飽和。同樣地，註標 B、M、T 分別表示在雲底、結冰層及雲頂的值。於本研究中  $S_M = -40$  百帕， $S_T = -20$  百帕， $S_B = -25$  百帕。

圖1為任一初始參考曲線之垂直分佈。實線和sp虛線為溫度、溼度參考曲線；346虛線為低層空氣塊之飽和相當位溫。由此圖中可發現整個溫度之垂直分佈均較底層空氣之溼絕熱線冷，有一最小值在結冰層。此結果和 Betts and Miller(1986)所分析觀測資料相近。

不過，為了滿足全部enthalpy保守之條件，此二參考曲線需加以修正。也就是

$$\int_{p_B}^{p_T} (H_R - \bar{H}) dp = 0$$

依此可算出每層之修正量為

$$\Delta H = (p_B - p_T)^{-1} \int_{p_B}^{p_T} (H_R^i - H_S) dp$$

繼而得到新的參考曲線。其中  $H_R^i$  為參考曲線所算出之 enthalpy； $H_S$  為格點資料所算出之 enthalpy； $p_B$  為雲底氣壓； $p^-$  為雲頂下一層氣壓。當  $\Delta H$  來修正溫度場時需注意 S 必須保持定值。於雲頂只修正溼度場而不修正溫度場。

深對流所產生之降水率則是

$$PR = \int_{p_B}^{p_T} \left( \frac{q_R - \bar{q}}{\tau} \right) \frac{dp}{g} = -\frac{C_p}{L} \int_{p_B}^{p_T} \left( \frac{T_R - \bar{T}}{\tau} \right) \frac{dp}{g}$$

若降水小於零，則此點視為無對流作用發生。

(二)淺對流之處理

對於淺對流的點，Betts and Miller(1986)發現其熱力結構近似雲上一層空氣之飽和點和雲底空氣之飽和點所連接之混合線(mixing line)也就是淺對流可能是一種混合過程能將雲底、雲內及雲頂之空氣加以混合。因此其溫度參考曲線可用

$$M = \{ \theta_c(1) - \theta_c(B) \} / \{ p_{SL}(1) - p_{SL}(B) \}$$

$$\theta_{es}(p) = \theta_{es}(B) + M(p - p_B)$$

其中 M 為混合線之斜率；註標 1 表示從雲底和雲頂上一層空氣等比例混合之層； $p_{SL}(1)$ 、 $p_{SL}(B)$  則為同比例混合層及雲底空氣之飽和層氣壓 (saturation level pressure)。

溼度參考曲線則設定飽和氣壓偏差係數  $S = -20$  百帕於各層均等值來推算。

由於淺對流均為非降水雲因此其參考曲線之修正可用

$$\Delta T = (p_B - p_T)^{-1} \int_{p_B}^{p_T} (T - T_R) dp$$

$$\Delta q = (p_B - p_T)^{-1} \int_{p_B}^{p_T} (q - q_R) dp$$

得到參考曲線後則可依方程式(1)(2)來計算對流效應對大尺度變數之影響。表一為本文所使用之各項參數值。

另外，和郭氏積雲法差異除了參數法本身方式的不同，處理程序也有變動。由於此參數法為一種調整方法，因此在邊界層參數法、乾對流處理計算完後才計算。而郭氏積雲法則在這些步驟之前計算。

表一、Betts and Miller積雲參數法使用之參數

深淺對流分界之 $\sigma$ 值	0.75
深對流之調整時間	900 秒
深對流之穩定度權重	1.5
深對流雲底之氣壓偏差	-25 百帕
深對流結冰層之氣壓偏差	-40 百帕
深對流雲頂之氣壓偏差	-20 百帕
淺對流之調整時間	1800 秒
淺對流各層之氣壓偏差	-20 百帕

### 三、結果與討論

本文茲以1994年8月5日12UTC之個案來探討郭氏積雲參數法和 Betts and Miller 積雲參數法在颱風路徑預報模式之表現。颱風中之對流旺盛但洋面上觀測資料稀少，颱風模式會在颱風位置人工植入一個近似颱風環流之大氣結構；因此本文選取此模式作為研究基礎來探討兩種積雲參數法不同積雲處理方式對模式預報之影響。關於颱風模式之主要架構及人工植入一個近似颱風環流之大氣結構之技巧在陳得松等(1994)有詳細的描述。不過，本文之重點不在探討其對颱風路徑之預報，因此在預報過程中並不加入人工加熱項來維持颱風結構。

於此個案中，在東經130度、北緯16.3度，也就是在菲律賓東方太平洋洋面上有一強烈颱風道格(DOUG)其中心氣壓940百帕以每小時18公里的速度向西北西移動，七級風暴風半徑300公里，十級風暴風半徑150公里。有明顯的颱風眼。

圖2為人工植入之颱風環流半徑600公里的南北方向之垂直剖面圖。實線為等溫線，虛線為相對溼度之等值線，陰影表示相對溼度超過80%，箭頭代表風之南北及垂直分量。由此圖中可發現在颱風半徑600公里內之相對溼度均超過80%。而半徑300公里內更可達100%，且中低層溫度明顯地較周圍高，特別是在450毫巴處有一暖心；在高層則相對地偏低有一冷心在200毫巴。所植入之颱風風場為對稱性環流。圖中所顯示之微弱南風可能為大尺度之環境風場。

圖3(a)(b)分別為郭氏積雲參數法和 Betts and Miller積雲參數法在颱風模式48小時預報半徑300公里內平均之積雲降水(實線)和大尺度降水(虛線)之時間序列圖。取半徑300公里主要是和七級風暴風半徑相當而此平均值並不包括中心點(颱風眼)的值。由圖3(a)可發現在剛開始預報時並無對流降水，而後在2小時迅速增強而達到最大值約每小時7.5釐米。此乃是因為所植入之颱風環流相當對稱，其後摩擦使得輻合作用增強。郭氏積雲參數法主要是由水汽輻合量來處理積雲對流。因此前兩個小時隨著水汽輻合場增大，對流作用也增強。但在預報12小時後積雲降水即迅速減弱。在48小時預報大尺度降水均不大。

但是採用Betts and Miller積雲參數法整個降水隨時間的變化則有顯著的不同。圖3(b)顯示前12小時之積雲降水很小，主要為大尺度降水所控制。在12小時以後對流降水逐漸增強，到15小時預報達到最大值約每小時8.5釐米，其後逐漸減弱，但到48小時預報仍能維持一定的強度約每小時3.5釐米，較郭氏積雲參數法每小時0.8釐米為強。

比較此二圖可發現 Betts and Miller積雲參數法需較要長的時間來調整出適合對流發展的環境場，但卻能維持較長時間之對流作用。

進一步分析模式中各種動力及物理過程對颱風溫度及溼度場之影響。如圖4(a)(b)所示，乃是採用郭氏積雲參數法於颱風中心周圍半徑300公里內各種動力及物理過程垂直積分之平均加熱率及增溼率隨時間之變化圖。cup、dyn、pbl、lsp及dif線分別代表積雲、動力、邊界層、大尺度降水處理及水平擴散(diffusion)的作用。由於郭氏積雲參數法中水汽凝結，潛熱釋放即為降水。因此其對流所產生的加熱率和圖3(a)之積雲降水相似。而對流引起上升運動，伴隨著絕熱冷卻(adiabatic cooling)。因此動力部分主要為冷卻作用，大致和對流加熱大小相當。大尺度降水處理乃是過飽和即凝結成降水，因此有加熱作用，不過對颱風影響較小。其他過程對溫度場之影響很小。

對溼度場(圖4(b))，大尺度降水處理將過飽和水汽凝結成降水，因此有乾燥大氣的效應。於郭氏積雲參數法之積雲對流乃是將大尺度水汽輻合量經對流作用而加熱及增溼大氣，因此於郭氏積雲參數法對流作用似乎增溼大氣，但反映在動力過程即水汽之平流作用則是損失了對流作用所使用之水汽輻合量因此呈負貢獻。另外颱風位於溫暖的洋面，為取之不竭之水汽供應區，因此在邊界層有增溼效應。

圖5(a)(b)和圖4(a)(b)類似，但用Betts and Miller積雲參數法來參數對流作用。於此參數法中同樣水汽凝結，潛熱釋放即為降水，因此12小時後才有明顯的對流加熱作用。同樣地，動力絕熱過程中上升運動伴隨的絕熱冷卻也在12小時後才有明顯的影響，但較對流加熱作用小。大尺度降水處理在前12小時為主要之加熱效應。其他過程對溫度場之影響很小。整體上而言，加熱作用似乎較冷卻作用強。

增溼率隨時間之變化圖(如圖5(b)所示)則顯示動力過程之水汽輻和及邊界層為主要水汽來源。大尺度降水及積雲降水為主要的乾燥作用，而且明顯地乾燥作用較增溼作用強。總括來說，對流的效應是加熱及乾燥大氣。

進一步仔細檢查Betts and Miller積雲參數法在第1、2積分時距及1小時預報之水平分佈圖(圖6(a)(b)(c))中顯示在第一個積分時距時在颱風附近主要為淺對流所控制而半徑250公里外才有深對流產生。到了第二個積分時距，整個颱風範圍幾乎均為淺對流所控制。到了1小時預報，則幾乎沒有對流作用。一直到積分12小時之後，才有明顯的深對流作用。主要原因可能是由於人工植入之颱風結構在中層大氣之環境溫度很高(圖2)，根據前面所述雲頂的定義，雲頂的高度限制在低層不利對流發展。而後此種結構逐漸破壞(圖7)，才有深對流在颱風中心附近產生。

圖8為採用郭氏積雲參數法(實線)和 Betts and Miller積雲參數法(虛線)所預報颱風中心氣壓之時間變化圖。由此圖中可發現兩種參數法均無法維持颱風之強度。採用郭氏積雲參數法其中心氣壓會持續升高。而 Betts and Miller積雲參數法在前12小時因積雲對流作用小，因此颱風強度迅速減弱到 977百帕，較郭氏積雲參數法預報之 965百帕為弱。其後在旺盛積雲對流作用下，減弱速度趨緩，48小時預報為 984百帕，反較郭氏積雲參數法預報之 991百帕強。因此在颱風模式採用不同積雲參數法，由於對積雲對流作用掌握之差異，將會影響颱風強度之預報。

#### 四、結論

本文主要是將郭氏積雲參數法和 Betts and Miller積雲參數法加入颱風路徑預報模式，利用颱風模式在颱風附近人工植入一颱風環流以彌補觀測資料之不足，在沒有加入人工加熱作用的情形下，來探討兩種參數法對積雲對流之掌握。

分析結果發現郭氏積雲參數法約需 2小時來發展其積雲對流，但其對流作用只能維持若干小時，其強度即迅速減弱。而 Betts and Miller積雲參數法卻需較長的時間才能發展其深對流作用，卻能維持一定的強度到 48小時預報。

#### 參考資料

- 陳得松、葉天降、黃康寧、彭順台、張偉正，1994：中央氣象局第二代颱風路徑預報模式之介紹與評估。中央氣象局天氣分析與預報研討會論文集編，頁次未定。
- Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.
- Betts, A. K. and M. J. Miller, 1986: A new convective adjustment scheme. Part I: Observational and theoretical basis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 677-691.
- Betts, A. K. and M. J. Miller, 1986: A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 693-709.
- Kuo, H. L., 1965: On formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. *J. Atmos. Sci.*, **22**, 40-63.
- Kuo, H. L., 1974: Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1232-1240.
- Manabe, S., J. Smagorinsky and R. F. Strickler, 1965: Simulated climatology of a general circulation model with a hydrological cycle. *Mon. Wea. Rev.*, **93**, 769-798.

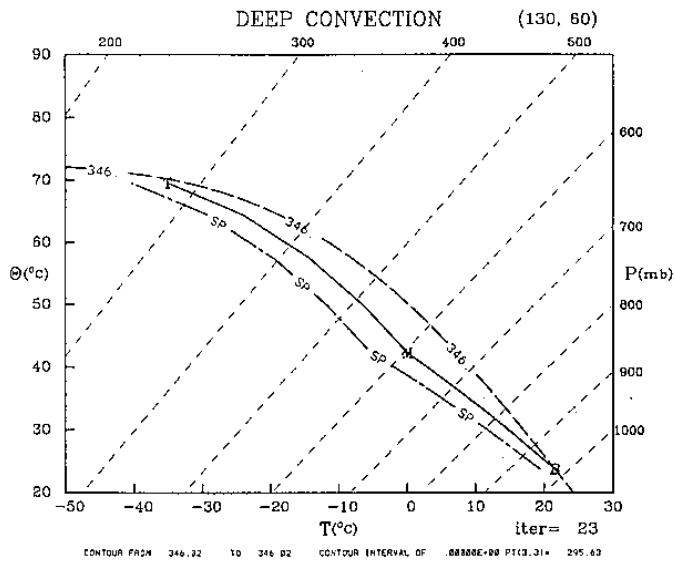


圖1 任一初始參考曲線之垂直分佈。橫軸為溫度(°C)；縱軸為相當溫度(°C)；細虛線為等壓線(百帕)。實線和sp虛線為溫度、溼度參考曲線；346虛線為低層空氣塊之飽和相當位溫。

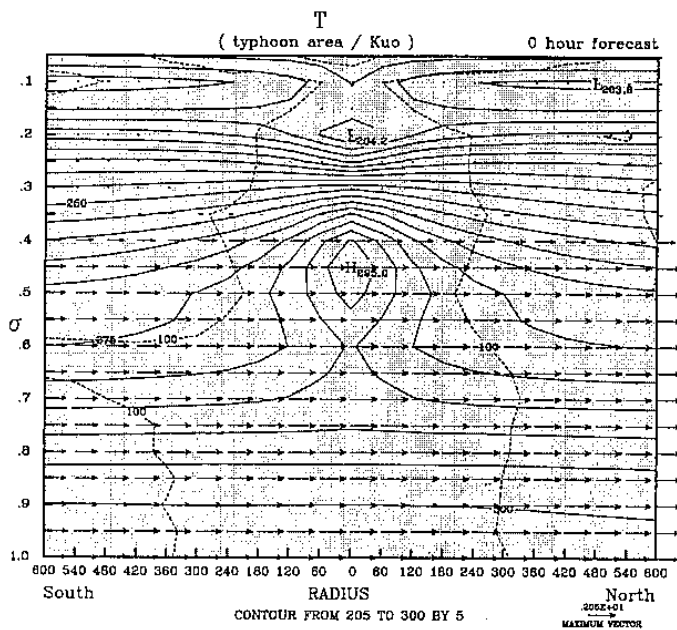


圖2 人工植入之颱風環流半徑600公里的南北方向之垂直剖面圖。實線為等溫線(°K)，間距為5度，虛線為相對溼度之等值線，其間距為10%。陰影表示相對溼度超過80%。箭頭為風之南北、垂直分量。

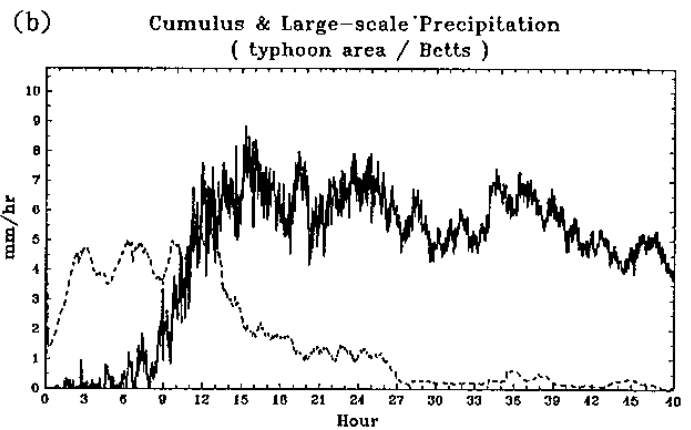
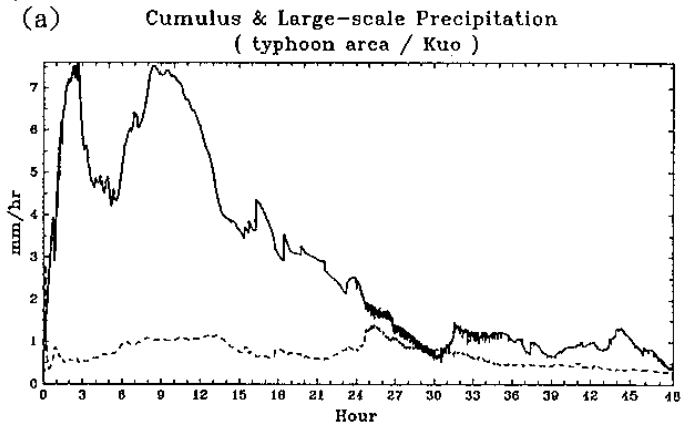


圖3分別為(a)郭氏積雲參數法和(b)Betts and Miller積雲參數法在颱風模式48小時預報半徑300公里內平均之積雲降水(實線)和大尺度降水(虛線)之時間序列圖。單位為 mm/hr。

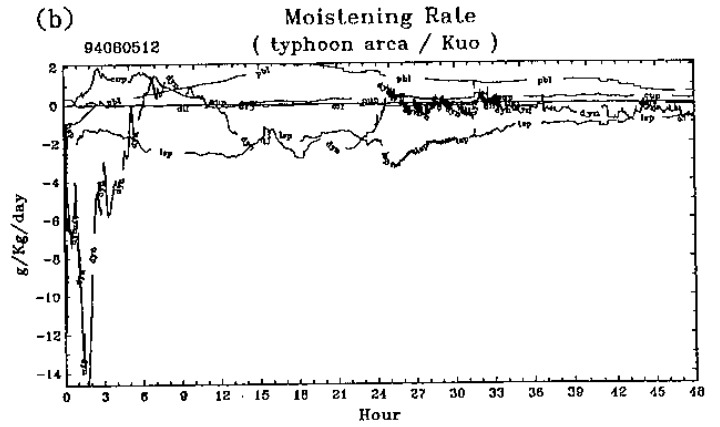
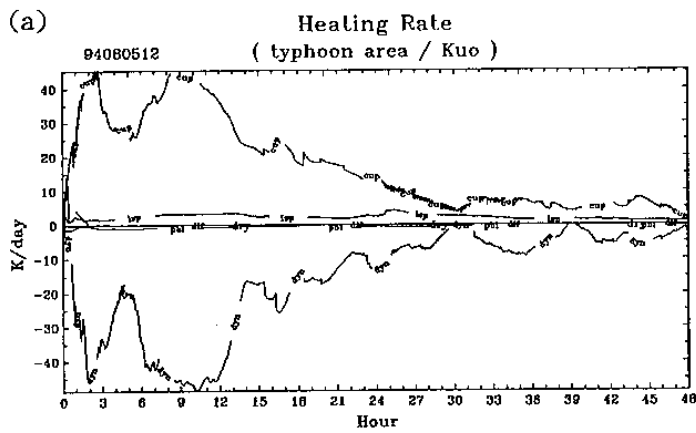


圖4 採用郭氏積雲參數法於颱風中心周圍半徑300公里內各種動力及物理過程垂直積分之平均(a)加熱率( $^{\circ}\text{K}/\text{day}$ )及(b)增溼率( $\text{g}/\text{kg}/\text{day}$ )隨時間之變化圖。cup、dyn、pbl、lsp及dif線分別代表積雲、動力、邊界層、大尺度降水處理及水平擴散的作用。

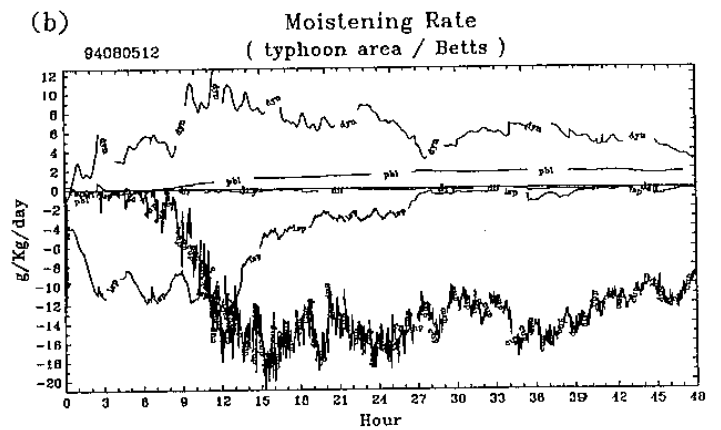
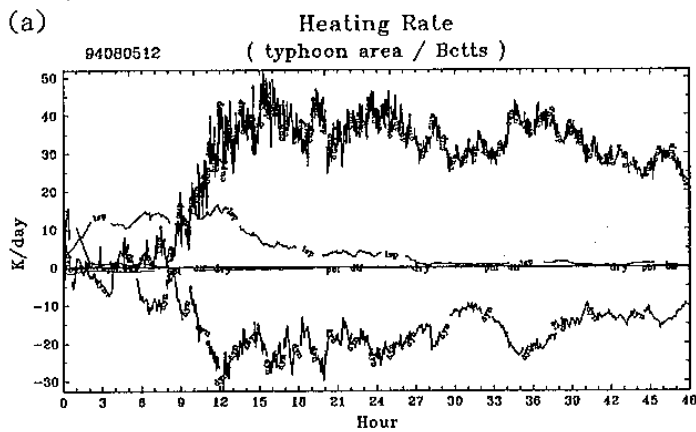


圖5(a)(b) 和圖4(a)(b)類似，但用 Betts and Miller 積雲參數法。

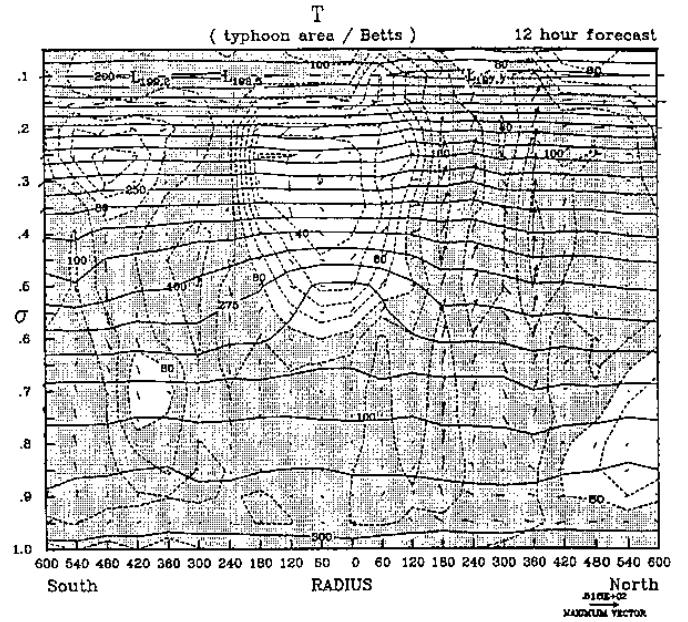
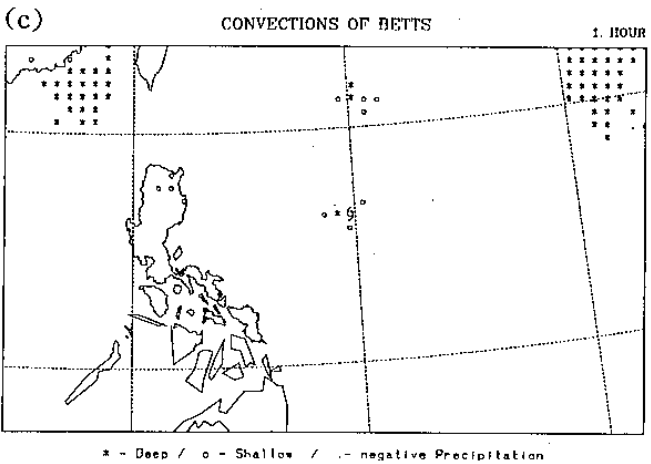
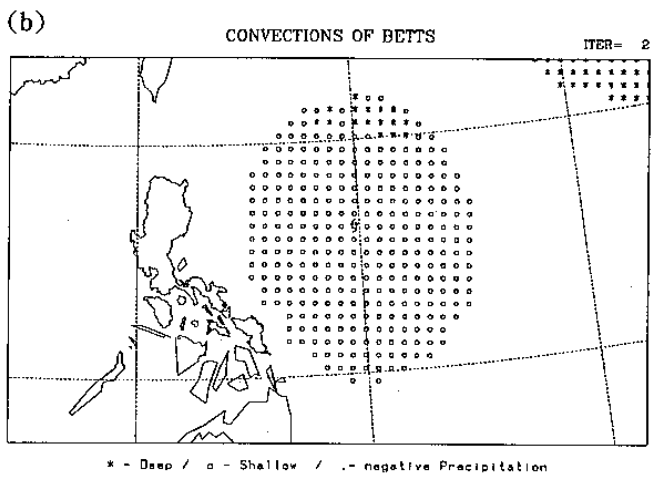
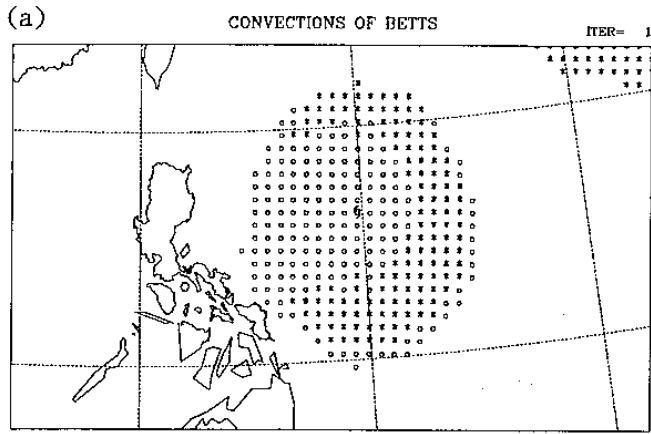


圖7 使用Betts and Miller積雲參數法之12小時預報之颱風環流半徑600公里之南北方向之垂直剖面圖。實線為等溫線( $^{\circ}\text{K}$ )，間距為5度，虛線為相對溼度之等值線，其間距為10%。陰影表示相對溼度超過80%。箭頭指的是風之南北、垂直分量。

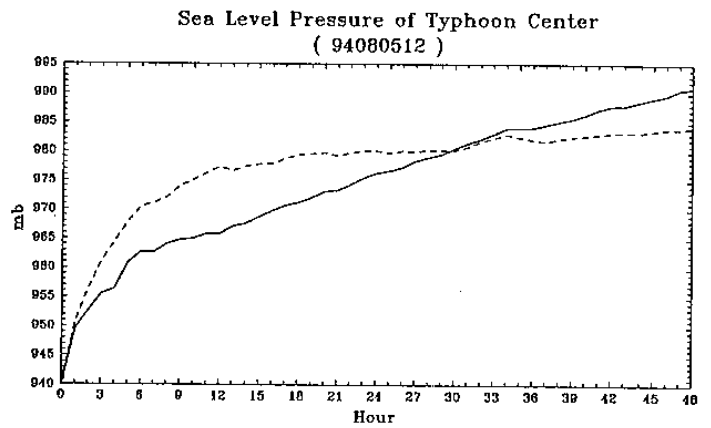


圖8 為採用郭氏積雲參數法(實線)和 Betts and Miller積雲參數法(虛線)所預報颱風中心氣壓(百帕)之時間變化圖。

圖6 Betts and Miller積雲參數法在(a)第1個積分時距、(b)第2個積分時距及(c)1小時預報之水平分佈圖。其中\*表示深對流；o表示淺對流；·表示深對流點但其降水為負值，因此無對流作用。

