

# 中央氣象局第二代全球波譜模式之介紹

陳建河<sup>\*</sup> 劉其聖<sup>\*\*</sup> 馮欽賜<sup>\*</sup> 汪鳳如<sup>\*</sup> 蕭志惠<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>：中央氣象局資訊中心 <sup>\*\*</sup>：美國海軍研究院

## 摘要

中央氣象局(CWB)第二代全球預報模式為一波譜模式其水平解析度為 T79(T 表示三角形截斷方式)，垂直 18 層，時間積分法使用半隱式方法處理重力波項，渦度及水汽平流項使用穩含式方法處理，最後再以跳蛙法積分，時間積分間距為 900 秒，在 CRAY-YMP 電腦上預報 24 小時所需手錶時間約 10 分鐘左右，另外模式的初始化方法為非線性模初始化。在物理參數化的部份計有輻射參數化採 Harsvardhan (1987)，行星邊界層參數化採 TKE- $\xi$ 法，積雲參數化採 Relax Arakawa-schubert 法，另外還考慮淺積雲對流參數化與次網格地形效應及大尺度降水參數化等。

第二代全球預報模式自今年 2 月份開始作業性測試，至目前為止模式尚稱穩定，以 7 月 4 日 12 Z 個案為例，模式的 500 mb 預報對於位在日本東北方的高低壓系統的演化情況在 96 小時預報掌握的相當好，而地面的情況則不如 500 mb 良好，由 5 月-7 月份每日的 anomaly correlation 看，500 mb 高度場的 24、48 小時預報都在 0.9 以上，96 小時預報也達 0.6 以下(甚至 120 小時預報)顯示 CWB 第二代全球模式預報有 4-5 天的預報能力，不過海平面氣壓的預報則平均約 4 天左右，至於 SI SCORE 顯示，500 mb 高度場的 24、48 小時預報得分分別在 20 分及 30 分左右，然而海面氣壓的 24 小時預報就達 40 分左右。

至於 CWB 第二代全球模式近期的發展計有(1)加入次網格地形效應，(2)增加垂直解析度至 24 層，(3)雲與輻射的長時期測試，(4) incremental 非線性正模初始化等工作。

## 1. 前言

中央氣象局(CWB)自民國 79 年起積極發展第二代的數值天氣預報系統，就第二代的全球預報模式而言，與第一代的預報模式相比較，不管是模式動力的部份或物理參數化的部分，完全是截然不同的二個模式，其差異性如表一所示，有關第一代模式的詳細描述可參考 liou (1989) 的文章，有關第二代模式的介紹將在下一節中介紹。

第二代全球預報模式自 83 年 2 月開始作業性測試，至目前為止模式相當的穩定，由於配合作業上硬體的設備，00 Z 做 72 小時的預報，12 Z 做 168 小時的預報。預報模式垂直 18 層使用三角形 (triangular truncation) T79 的解析度，時間積分間距 900 秒在 CRAY-YMP 超級電腦上使用 6 個 cpu，平均而言預報 24 小時僅需要 10 分鐘的手錶時間。

本文的重點在於介紹 CWB 第二代的全球波譜模式，除了將介紹模式的基本動力架構及物理參數化之外，並就個案

討論及長期校驗(5 月-7 月)來檢視預報模式的成效。本文共分五節，第一節為前言，第二節將敘述預報模式的動力及物理參數化，第三節為個案討論及校驗結果，第四節為結論及未來的展望。

## 2. 預報模式的動力及物理參數化

### 2.1 動力部份

第二代的全球波譜模式使用原始方程組，其中運動方程以渦度( $\xi$ )及輻散(D)方程取代，熱力方程以位溫( $\theta$ )的形式表示，氣壓趨勢方程為連續方程垂直積分的結果，另外加上水汽方程，靜力方程等，因此在 $\sigma$ ( $\sigma = \frac{P - P_{top}}{P_s - P_{top}}$ )坐標上的基本方程組如下：

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\alpha(G, H)$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \alpha(H, -G) - \nabla^2(\phi + E)$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{-u}{a \cos \phi} \frac{\partial \theta}{\partial \lambda} - \frac{v}{a} \frac{\partial \theta}{\partial \phi} + \dot{\sigma} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \frac{\partial \theta}{\partial p} + Q_{\theta} \\ \frac{\partial q}{\partial t} &= -\frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial q}{\partial \lambda} - \frac{v}{a} \frac{\partial q}{\partial \phi} - \dot{\sigma} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \frac{\partial \theta}{\partial p} + Q_q \\ \frac{\partial \Pi}{\partial t} &= -\int_0^1 \nabla \cdot (\pi \cdot \bar{V}) d\sigma \\ \frac{\partial \phi}{\partial p} &= -C_p \theta\end{aligned}$$

其中：

$$\begin{aligned}\bar{p} &= \left(\frac{p}{p_0}\right) \\ G &= U(\zeta + f) + (\dot{\sigma} \frac{\partial p}{\partial \sigma}) \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right) + \frac{C_p}{a^2} \theta \frac{\partial p}{\partial \Pi} \frac{\partial \Pi}{\partial \mu} \\ &\quad \cos^2 \phi - Q_v \\ H &= V(\zeta + f) + (\dot{\sigma} \frac{\partial p}{\partial \sigma}) \left(\frac{\partial U}{\partial p}\right) + \frac{C_p}{a^2} \theta \frac{\partial p}{\partial \Pi} \frac{\partial \Pi}{\partial \lambda} \\ &\quad + Q_u \\ I &= \left(\frac{U^2 + V^2}{2}\right) \frac{a^2}{\cos^2 \phi} \\ V &= \frac{v \cos \phi}{a} \\ U &= \frac{u \cos \phi}{a} \\ \theta &= T \left(\frac{1 + 0.608 q}{P}\right)\end{aligned}$$

$Q_u, Q_v$  為東西方向摩擦項， $Q_{\theta}$  為非絕熱項， $Q_q$  為水汽的源與穴， $f$  為科氏參數， $\phi$  為緯度， $\lambda$  為經度， $\mu = \sin \phi$ ， $\pi = p_s - p_{top}$ ， $u, v$  分別為東西風分量。

預報模式採用三角形截斷方式，水平解析度為 T79（即東西方向 240 個點，南北方向 120 點），垂直解析度為 18 層，時間積分採半隱式 (Semi-implicit) 處理控制重力波的變數  $\pi, \theta, D$ ，渦度 ( $\zeta$ ) 及水汽 ( $q$ ) 平流項也用隱含 (implicit) 法處理 (Simons and Jarand, 1983)，最後使用跳蛙 (leap-frog) 法進行時間積分，所使用的時間間距為 900 秒。另外預報模式使用 Robert 時間過濾 (time filter) 其過濾常數為 0.05，及四階水平擴散 (horizontal diffusion) 其使用的擴散系數為  $1.5 \times 10^{-16}$ 。詳細介紹可參考陳 (1993) 的文章。

對於初始化 (initialization) 方法、模式使用非線性正模初始化 (non-linear normod initialization 簡稱 NNMI)，此方法的基本原理是將預報方程組對靜止的大氣線性化，經過一些處理之後得到一垂直與水平結構方程求其固有值 (eigen value) 及固有向量 (eigen vector) 便能得到波動的頻率，進一步將不必要的重力

波過濾掉，所使用的方法是 Machenhauer(1977) 的方法，詳細的介紹可參考陳 (1994) 對 CWB NNMI 的介紹文章。

模式所使用的地形是取自  $10'$  的地形資料庫，經過波譜截斷的處理再經過一次的波譜過濾處理，即 Lanczos 過濾法，

$$Z(\lambda, \mu) = \sum_n \sigma_n Z_n^m P_n^m(\mu) e^{im\lambda}$$

$$\sigma_n = \frac{\sin(n\pi/m)}{n\pi/m}$$

$M$  為三角形截斷數 ( $M=79$ )。

## 2.2 物理參數化

從表一知道第二代的 CWB 全球波譜模式考慮相當多的物理參數化，以下將逐一的介紹。

### (a) 輻射參數化

採用 Harshvardhan et al (1987) 所發展的方法，在長波輻射的部份考慮  $H_2O, O_3, CO_2$  的吸收，參考 Chou (1984)，Chou 與 Peng (1983) 的研究將長波波譜分為四個波段區間。短波輻射則考慮  $H_2O$  與  $O_3$  的吸收與雷氏散射作用。另外雲量的判斷有二種方式：一是由相對溼度診斷層雲，二是由降水量配合已知的雲底和雲頂診斷積雲。對 CWB 輻射參數化詳細的測試結果可參考馮 (1993) 的文章。

### (b) 行星邊界層參數化

採用 TKE- $\xi$  的方法，即以紊流平均動能 ( $E$ ) 及紊流平均動能消散率 ( $\xi$ ) 的預報來表示紊流傳遞系數，此方法為 1.5 Clouser 法，至於詳細的介紹可參考汪 (1993) 對 CWB 行星邊界層參數化的測試研究。

### (c) 積雲參數化

採用 Relaxed Arakawa-schubert 積雲參數化法 (Moorthi, Suarez, 1992)，基本上考慮(1)假設每個次積雲體的質量為高度的線性函數以簡化逸入率的求解步驟，(2)以緩和法計算雲功函數，詳細可參考陳 (1992) 之文章。

### (d) 淺積雲對流

主要是考慮非降水性的淺積雲在行星邊界層內對於水汽的調整作用。方法是根據 hogen et al (1990) 與 Tientke et al (1991) 的文章；基本上發生淺積雲對流的條件有四其先後次序為(1)地表溫度必須大於地表面上的空氣溫度，(2)空氣的相對溼度要大於 70%，(3)舉升凝結面的厚度必須低於 200 mb，

(4)低於 200 mb 的大氣必須呈現不穩定。

(e) 次網格地形效應 (gravity-wave Drag)

gravity wave drag 之發生係由於大氣中存在有某層不穩定或致使波動破裂的區域，造成波動應力 (wave stress) 之垂直輻散而產生，此參數化方法是根據 Palmer et al (1986) 的方法，對 CWB 之 gravity wave drag 的描述可參考蕭 (1994) 的文章。

(f) 大尺度降水

主要是在處理非對流性降水的參數化，基本原理是當大尺度的空氣其相對溼度大於 100% 時會開始凝結產生水滴，由模式的最上層開始逐一往下檢查，最後才以降水的形落到地面。

### 3. 個案討論及模式的校驗

#### 3.1 個案討論

就 1994 年 7 月 4 日 12 Z 的個案而言，圖-1(a) 是 500 mb 的初始高度場，太平洋高壓中心強度 5926 gpm 位於日本南部地區，台灣地區在其勢力範圍之內，另外在日本東北邊存在一低壓系統，強度 5540 gpm，在其北方阿留申半島為一高壓脊籠罩。圖-1(b)(24 小時預報) 顯示太平洋高壓稍往東退，5880 等高線通過台灣東北部地區。日本東北方的低壓則略往東北移強度增強至 5529 gpm，而其北方的高壓也漸增強，強度 5721 gpm。48 小時至 72 小時的預報 (圖-1(c)、(d)) 顯示太平洋高壓再度增強西伸，另外日本東北方的低壓移到阿留申半島的南部強度漸漸減弱，而其北方的高壓系統勢力漸擴大與其南方的高壓脊連在一起。96 小時的預報圖-1(e) 顯示太平洋高壓中心強度不變但 5880 線略為北抬至台灣南部。而位於阿留申半島的低壓中心已減弱為一槽線，其東側的高壓脊也稍微減弱。圖-1(f) 為 120 小時預報顯示太平洋高壓中心位置不變，但 5880 線又略為北抬至台灣中部，而日本東側之低壓槽則再度形成一封閉低壓而其東側之高壓脊已在減弱當中。此外在太平洋高壓南側菲律賓東北方有一低壓環流相當清楚 (提姆颱風環流)。

相對應於每個預報時間的校驗分析如圖-2(a) ~ (e) 所示，就此次的預報而言、模式對於太平洋高壓東退 (24 小時預報) 及西伸 (48 ~ 72 小時預報) 掌握得相當不錯，至於 96 小時模式並沒有掌握到太平洋高壓持續

的西伸，到了 120 小時又東退的現象，而是模式維持不變的位置。另外模式對於太平洋高壓範圍的掌握似乎有預報過大的現象；而對於位於日本東北的低壓系統及其北方的高壓脊的演化過程，模式除了預報 24 小時低壓加深之外，48 小時至 96 小時預報其淺化的演化過程與實際分析相當的吻合。然而 120 小時的預報，模式似乎有預報系統過強的現象發生這與實際相當甚遠。

圖-3(a) ~ (f) 是海平面氣壓預報的結果，初始場 (圖-3(a)) 顯示大陸為一低壓區，太平洋高壓中心遠在西經 160 度，其勢力範圍似乎達到台灣地區 (1008 等壓線)，有一低壓系統位於日本的東北方中心 995 mb，在其東側有另一低壓中心於 130°E，58°N 左右。在菲律賓東側有一低壓環流。24 小時預報 (圖-3(b)) 顯示太平洋高壓在台灣地區並沒有明顯的變化，而日本東北方的低壓系統往東北方移動強度減弱為 997 mb，而其東側的低壓也順勢往東南移至日本北部，另外此低壓系統北方向的高壓勢力也開始往南伸展。48 小時預報 (圖-3(c)) 顯示阿留申半島南方低壓持續減弱，而其西北側的高壓 (庫頁島北部) 則持續向南伸展。太平洋高壓的勢力則似乎無多大變化。圖-3(d)(72 小時預報) 顯示庫頁島北部的高壓迅速減弱，在其西側的一低壓 (130°E、40°N) 迅速形成並往南伸長，96 小時預報 (圖-3(e)) 顯示該低壓西移到日本地區 (140°E、38°N) 且加深至 998 mb。而位於 140°E 庫頁島區的高壓似乎併入太平洋高壓內，另一太平洋高壓的中心則位於韓國南部強度 1010 mb。120 小時的預報則顯示各主要低壓均增強、太平洋高壓則東退 140°E 以東；整期而言模式對菲律賓東側的低壓發展一直持續增強，就實際分析而言這是提姆颱風的環流，但是模式對於強度與位置的預報均有相當的誤差。

圖 4(a) ~ (e) 是實際校驗分析圖，比較 7 月 5 日 12 Z 的分析與模式的 24 小時預報 (圖-3(b))，分析圖顯示日本東側低壓往東移至 160°E，位於日本西側的低壓則併入該低壓而位於庫頁島北部的高壓脊則往南伸展，這與預報結果大致相同。同樣地 48 小時預報圖 3(c) 與分析圖 (圖 4(b)) 對於此高壓脊與低壓移動的掌握相當的一致。而太平洋高壓在日本東南方有一高壓中心與模式相同，不過位置以預報模式略靠西側。值得注意的一個低壓系統在實際分析與預報均存在的是位於 130°E，46°N 左右的低壓，在 72 小時預報 (圖 3(d)) 強度並

往東南移至韓國東北方，而實際分析則已移到日本的東南邊。圖-4(d)7月8日分析顯示日本東南側僅有微弱低壓而預報模式卻呈現強低壓在998 mb (圖-3(e))在日本地區(140°E、40°N)。對120小時的校驗(圖-3(f)、圖-4(d))兩者相差就更多以至影響到對太平洋高壓的預報。至於提姆颱風，模式一直預報增強且朝台灣直撲而來，就實際的提姆颱風而言是往台灣而來，但分析圖乃因測資料的不足無法顯示出來，不過模式能夠如此預報是值得鼓勵，但也提供我們進一步更深度研究的動機。

### 3.2 模式檢驗

圖5(a)是海平面氣壓的 anomaly correlation，時間從1994年5月至1994年7月，(e線)表示24小時的預報，就整期而言，平均維持在0.9以上，48小時的預報(i線)平均維持在0.8左右。若以0.6為基準，則m線大致上可以符合，也就是說預報模式有4天的可預報度。圖-5(b)是500 mb的 anomaly correlation 其12及24小時預報大致上都在0.9以上，而0.6以上m線及0線不在少數，可見模式在500 mb的預報上有4~5天的預報能力。

對S1 Score而言，圖-6(a)是地面氣壓，5月~7月的統計大致上24小時(e線)在40左右，m線及0線(96、120小時)則高達70以上是偏高的現象，然而500 mb (圖-6(b)) e線(24小時預報)平均在20左右，m線(96小時預報)也在60分左右，可見500 mb對於系統強弱的掌握顯然比海平面氣壓來得好。

## 4. 結論與未來之展望

CWB第二代的全球預報模式其動力架構，及物理參數化方法與第一代的模式有很大的不同。第二代的模式用波譜法，三角形截斷方式，使用半穩式法處理重力波對時間積分的影響，而過度及水汽平流也使用穩舍法，如此也可以容許有較大的時間積分間距，然後再用跳蛙法將所有變數往前積分，最後再用Robert時間修均法，所使的系數為0.05。另外模式也採用4階擴散法，其係數為 $1.5 \times 10^{-16}$ 。至於模式的初始化方法，使用非線性正模初始化方法，可有效地減少地面氣壓在初期預報的振盪。物理參數化方面計有(1)輻射參數化(Harshvardhan)模式每隔1小時呼叫1次。(2)行星邊界層參數化：使用TKE- $\xi$  1.5

clouser法。(3)積雲參數化使用Relax Arakawa-schubert (Moorthi, Suarez 1991)。(4)淺積雲對流參數化處理非降水性的積雲過程(hogen et al 1990, Tientke et al 1991)。(5)次網格地形效應使用Palmer et al (1986)的方法。(6)大尺度降水參數化。

第二代全球預報模式自今年2月起開始作業性測試至今模式已相當穩定，模式的解析度為T79(即東西方向240點，南北方向120點)垂直18層，時間積分採900秒，在CRAY-YMP 6個CPU上執行24小時預報僅需10分鐘的手錶時間。

個案討論以1994年7月4日12Z的預報為例，模式在500 mb高度場的表現96小時(含)以前的預報，尚能掌握到日本東北方低壓及其北方高壓的演化過程，然而對500 mb的太平洋高壓的範圍大小則有預報過大的現象。至於海平面氣壓的預報模式在72小時尚能掌握日本東北方的高低壓系統的演化，但是96小時以後低壓系統顯然預報過強，這是CWB模式一直存在的一個問題。另外從5月到7月的 anomaly correlation 顯示500 mb的24及48小時預報的分數在0.9以上甚至96及120小時預報也有0.6以上，這顯示CWB模式的500 mb高度場的預報能力有達5天左右，然而對地面而言則平均只有4天左右。同樣地，S1 Score也顯示500 mb高度場的24及48小時預報平均在40以下而地面的24小時就已達40左右。

面對未來CWB第二代的全球模式仍然有許多需要改進的地方，例如目前正在進行中的雲與輻射之間的測試，主要的重點在於將模式做一較長時間的積分(2~3個月)以了解模式的雲輻射的特性。另外如上述所言模式的96小時以後的地面低壓系統往往有加深的問題這也是有待解決的問題之一。最後，CWB第二代全球模式目前正在積極進行測試的有(1)加入次網格地形效應(前述的個案及統計結果均不含此參數化)。(2)增加模式的垂直解析度，由原來的18層增加至24層。(3)使用incremental Nonlinear normal-mode initialization (Ballish et al 1991)。(4)對於土壤溫度的預報(PBL參數化)加入植物及土壤種類的影響。另外就是上述所言(5)雲及輻射效應對模式的影響。

## 參考文獻

Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environ-

ment. Part 1 J.A.S. 34. 674-701.

Chou, M. D., 1984: Broadband water vapor transmission functions for atmospheric IR flux computations. J. A. S. 41. 1775-1778.

Chou, M. D. and Peng, 1983: A parameterization of the absorption in the 15  $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> spectral region with application to climate. sensitivity stndis. J. A. S. 40, 2183-2192.

Harshvardhan, R. Davies, D. Randall, and T. Corsetti, 1987: A fast radiation parameterization for atmospheric circulation model. J Geophys. Res. 92, 1009-1016.

Liou, C. S., C-T. Terng, W-S Kau T. E. Rosmond, C-S. Chen J-H. Chen, C-Y Tsay, 1989: Global forecast system. at central weather. Bureau. P. M. R. 205-228.

Moorthi, S., and M. J. Suarez, 1992: Relaxed Arakawa-Schubert: A parameterization of moist convection for general circulation model. Mon. Wea. Rev., 120, 978-1002.

Palmer. T. N., G. J. Shutts, and R. Swinbank 1986: Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parameterization, Q. J. R. 112, 1001-1039.

陳建河，劉其聖，1993：中央氣象局第二代全球預報模式之現況。天氣分析與預報研討會論文，563-569。

陳建河，郭鴻基，1994：中央氣象局非線性正模初始化之介紹。天氣分析（刊印中）。

陳靜洵，1991：中央氣象局全球預報系統的降水處理。CWB/NWP technical Rep. No-00004。

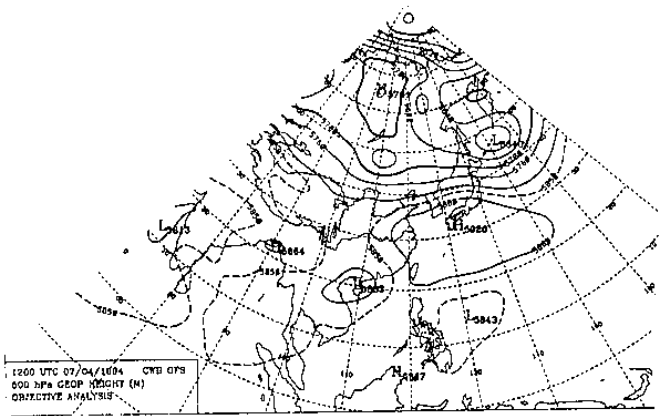
汪鳳如，1992：E- $\epsilon$  紊流閉合的多層邊界層參數化之數值研究。大氣科學，20, 217-232。

馮欽賜，1992：輻射參數化模式之測試比較。大氣科學，20, 387-404。

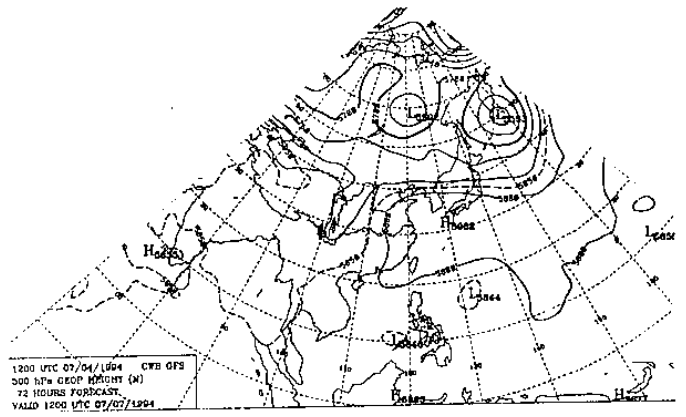
蕭志惠，1994：次網格地形效對中央氣象局第二代全球模式之影響。天氣分析與預報研討會(83)。(刊印中)

The 2nd generation GFS	The 1st generation GFS
OI multivariant objective analysis	Barnes successive correction method
N.N.M.I.	Variational method
Spectrum model	4th order grid point model
T79 in horizontal resolution	250 Km in horizontal resolution
24 levels in vertical	9 levels in vertical
Arakawa Schubert cumulus parameterization	Arakawa Schubert cumulus parameterization
TKE -Dissipation PBL parameterization	well mixed PBL parameterization
Harshvardhan (1987) radiation parameterization	Katayama(1974) radiation parameterization

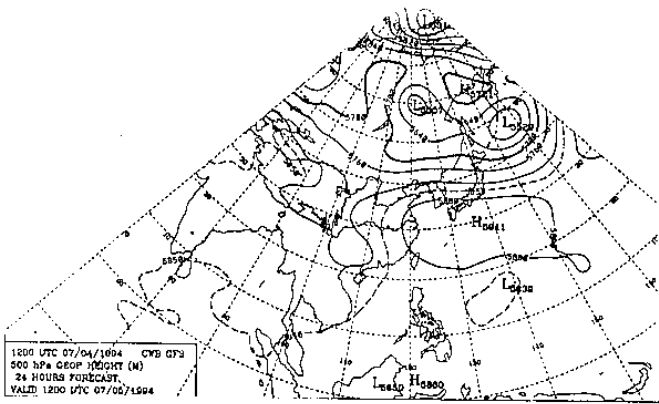
表 1：第一代模式與第二代模式之比較。



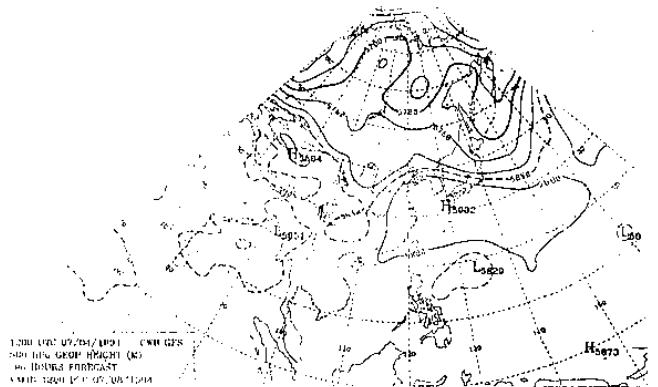
a



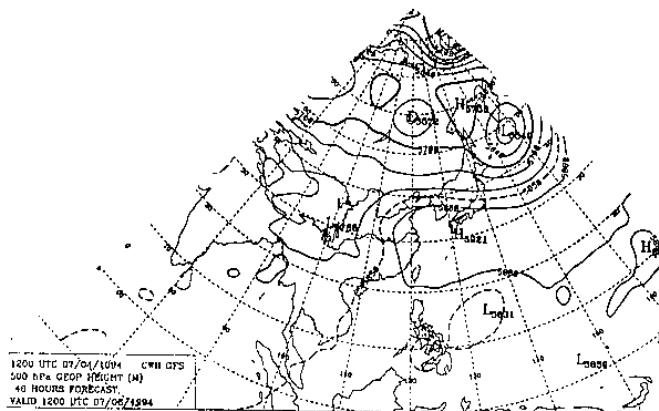
d



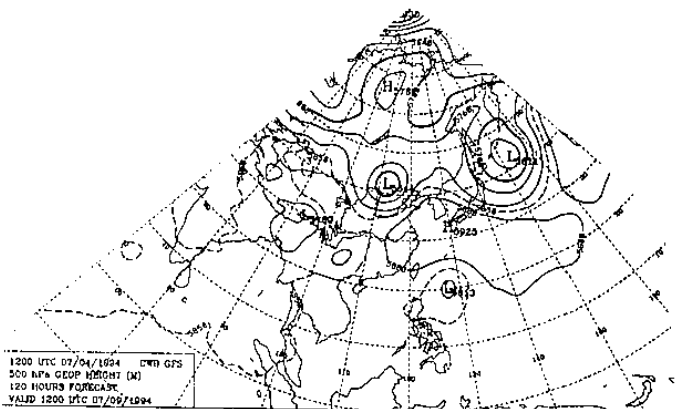
b



e

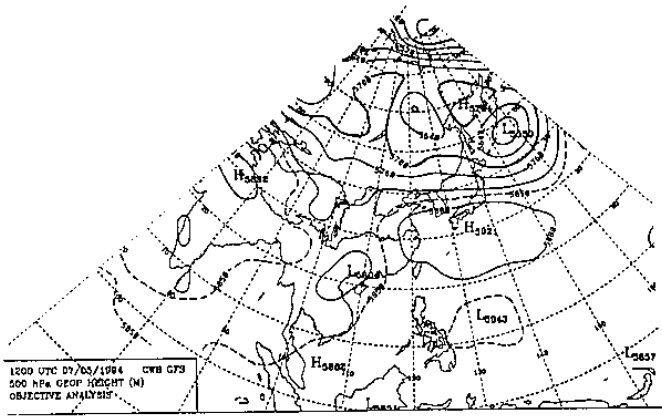


c

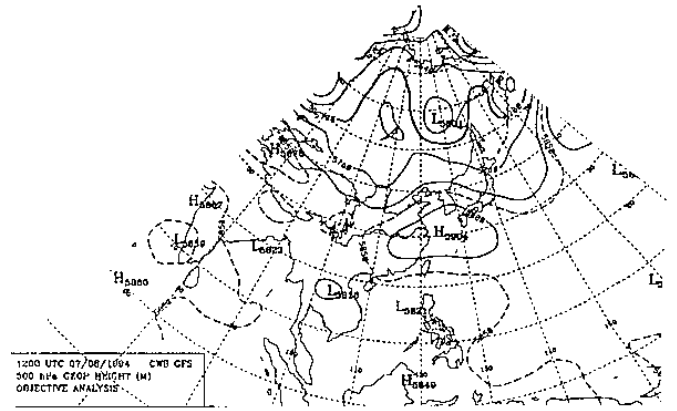


f

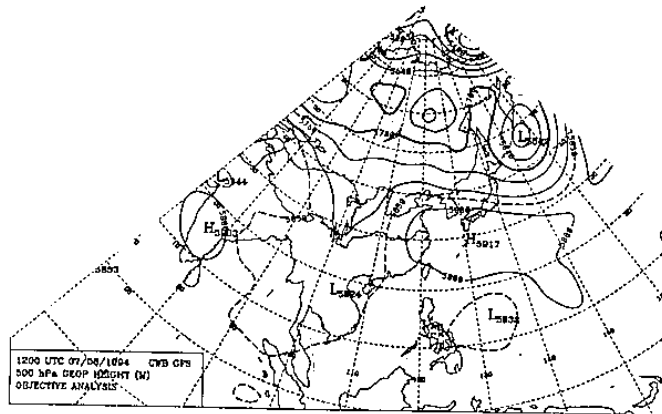
圖 1：1994 年 7 月 4 日 12 Z，500 mb 高度場 (a) 分析，(b)24 小時，(c)48 小時，(d)72 小時，(e)96 小時，(f)120 小時預報。



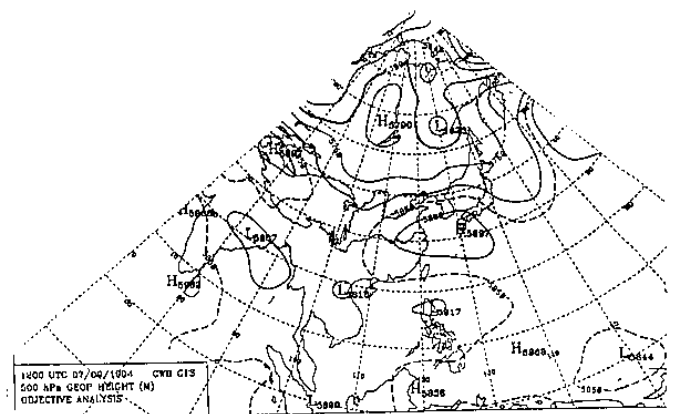
a



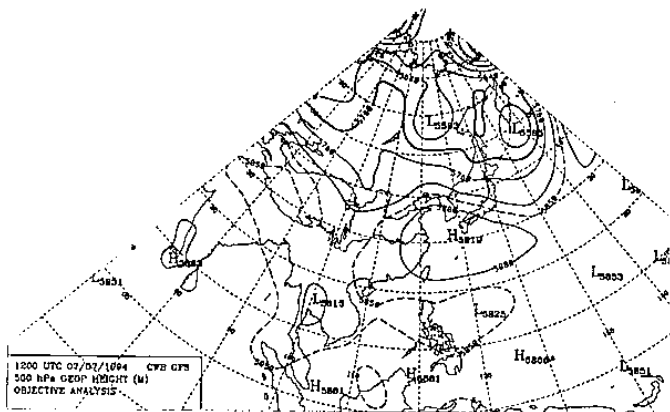
d

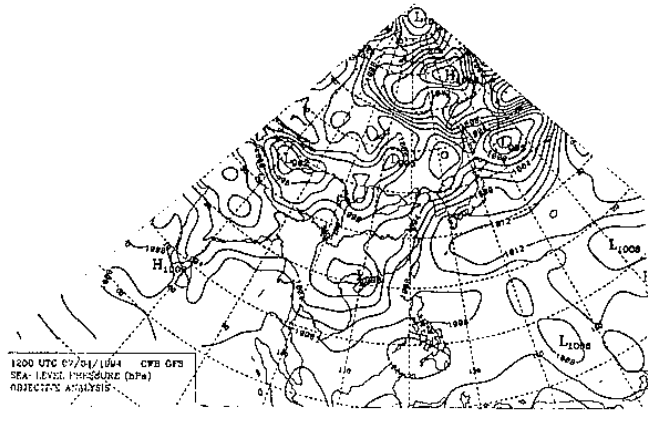


b

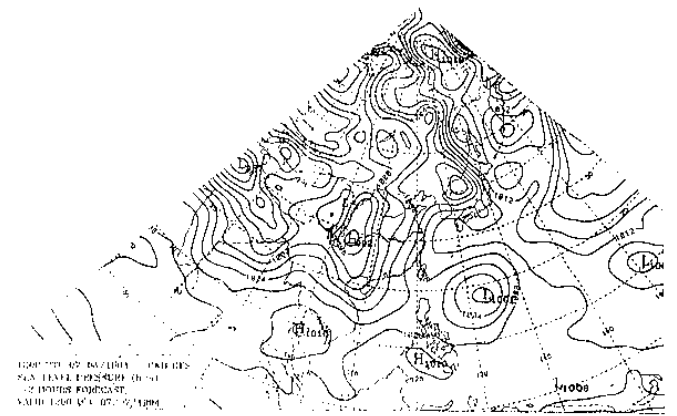


e

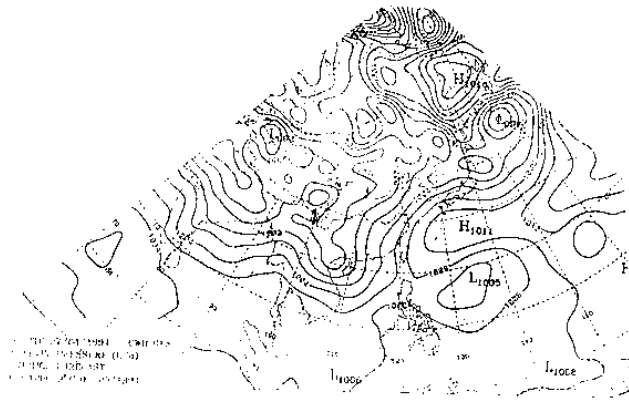




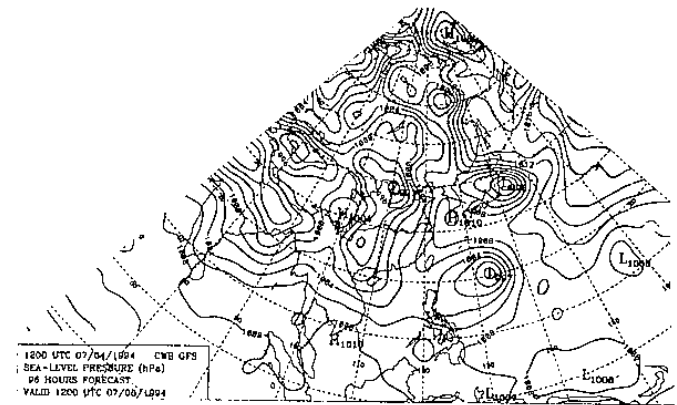
a



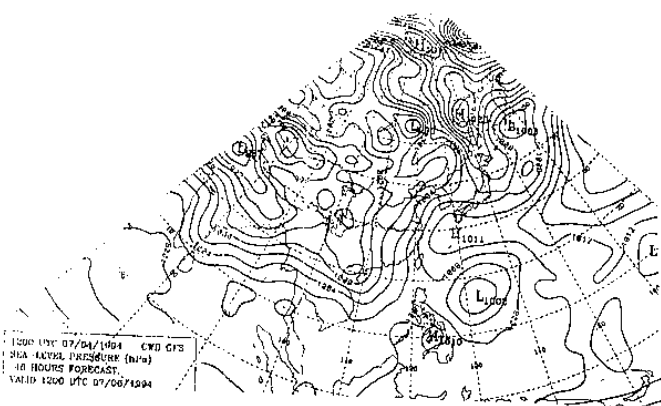
d



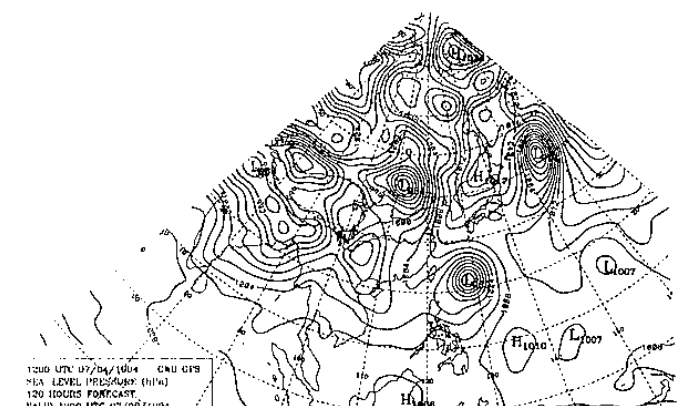
b



e



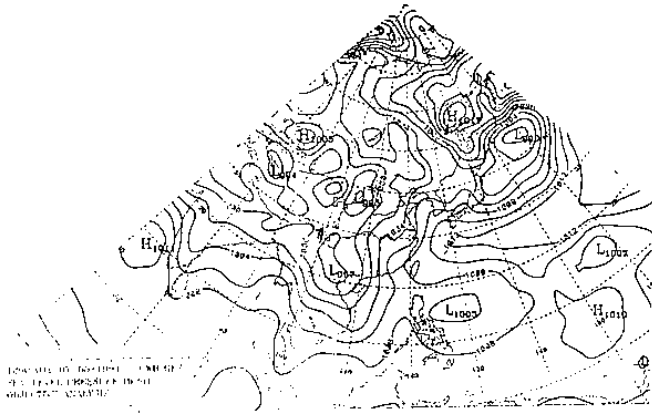
c



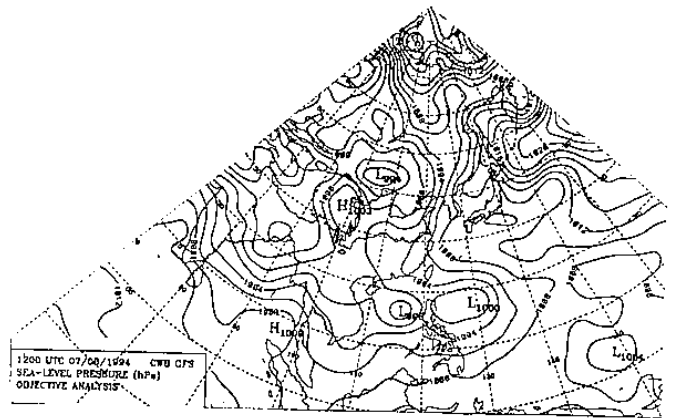
f

圖 3：同圖 1，但為海平面氣壓場。

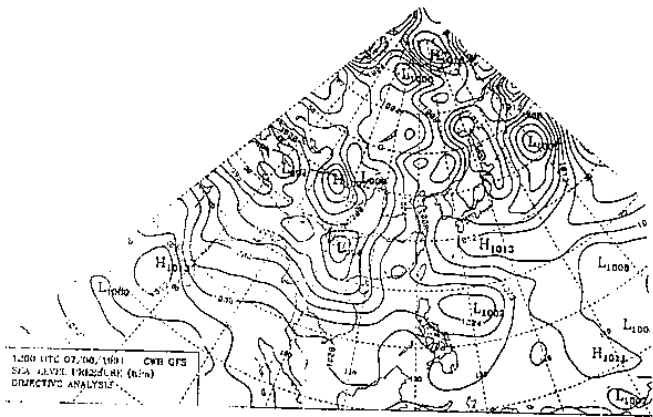




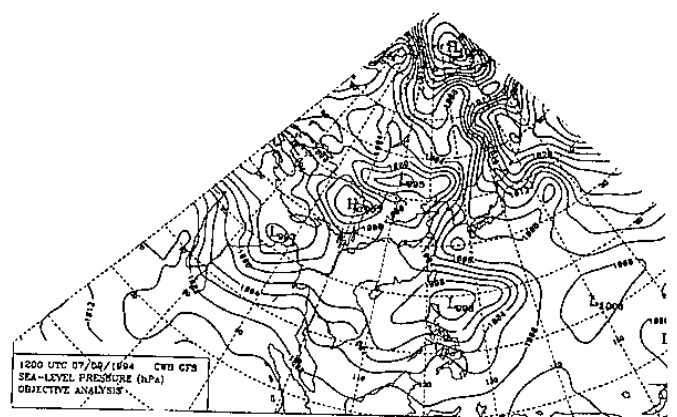
a



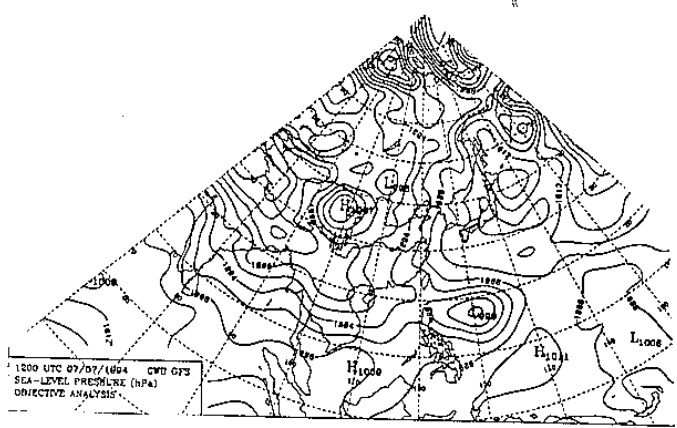
d



b



e



c

圖 4：同圖 2，但為海平面氣壓場。

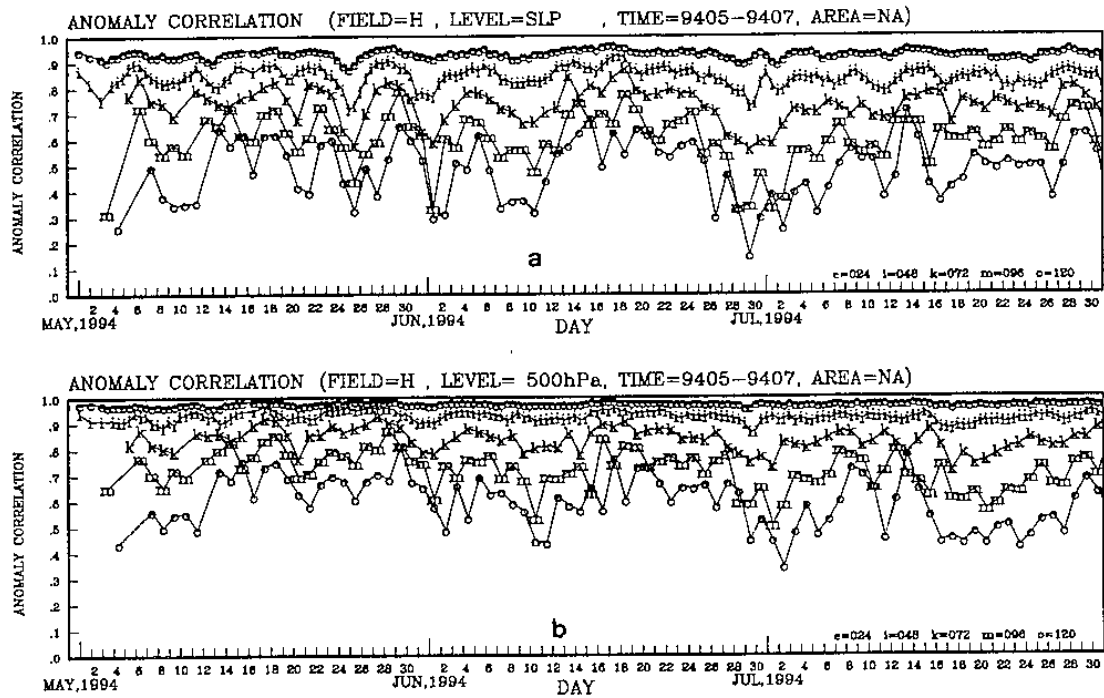


圖 5：1994 年 5 月至 7 月之 anomaly correlation，  
 (a) 為海平面氣壓，(b) 為 500 mb 高度場，e 線為 24 小時預報，i 線為 48 小時預報，k 線為 72 小時預報，m 線為 96 小時預報，o 線為 120 小時預報。

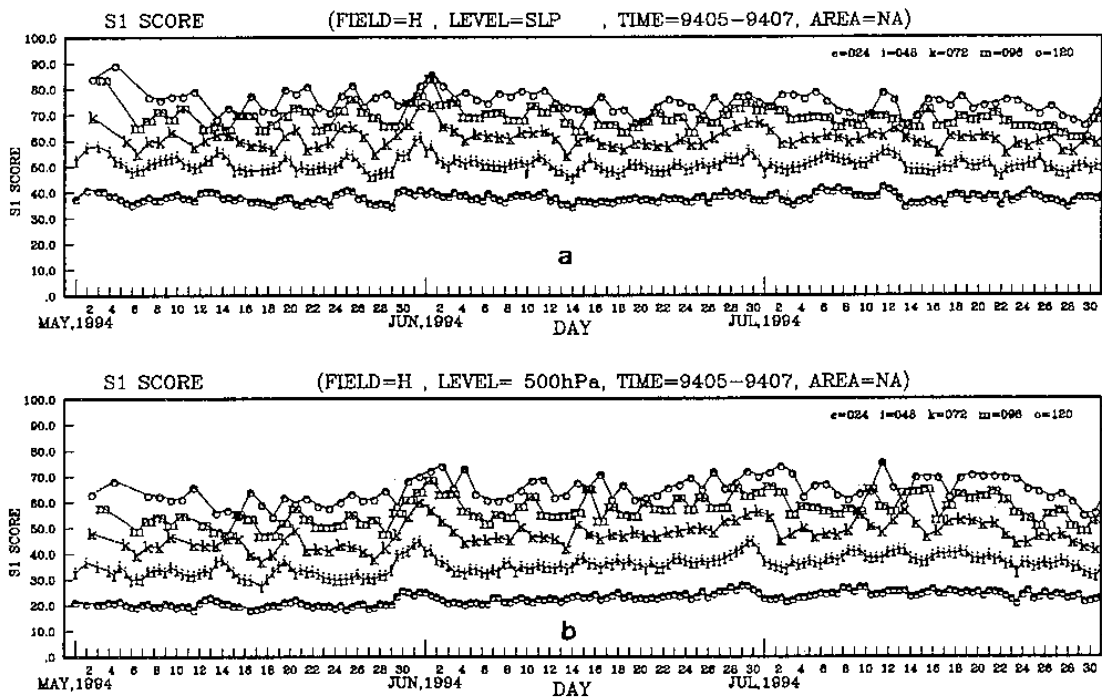


圖 6：同圖 5，但為 S1 SCORE。