

# 寒潮之數值模擬及其能量分析

蔡清彥  
國立台灣大學  
大氣科學系

陳建河  
中央氣象局  
資訊站

(中華民國七十八年三月二日收稿；三月三十日定稿)

## 摘 要

本文使用NCAR (National Center for Atmospheric Research) CFM (Community Forecast Model) 波譜模式預報 1978—1979 冬季最強寒潮的個案，並計算其 500 mb 的波譜動能。從有地形模式 (簡稱CFM-M) 的預報結果發現在寒潮爆發期間，波數 3 動能有明顯的增加，因此波譜動能最大值由波數 2 變為波數 3。波數 3 動能的增加主要是由於非線性項所造成，但不是任一單獨三波交互作用 (interaction triad) 可以解釋的。從沒有地形模式 (簡稱CFM-NM) 的預報結果發現，500 mb 低壓槽在沒有西藏高原阻擋下亦會在  $70^{\circ} - 90^{\circ} E$  間往南移動後滯留。此低壓槽的波數為 5，因此造成在寒潮爆發期間，波譜動能的最大值由波數 3 不合理的往波數 4、5 位移的現象。而地面圖上西伯利亞冷高壓在沒有西藏高原的阻擋下會往南方移動並且強度逐漸減弱，因此台灣地區寒潮爆發的現象並不發生。

實際大氣在寒潮爆發過後，波譜動能最大值則由波數 3 移回波數 2。CFM-M 及 CFM-NM 對此現象之模擬結果則十分相近。我們也使用中央氣象局 (CWB) 四階空間差分網格點全球模式 (簡稱GFS) 預報相同的個案，同時也計算 500 mb 的動能波譜。從有地形及沒有地形的預報結果發現，雖然不如NCAR CFM 的結果理想，但的確也能夠模擬出寒潮爆發的現象。

關鍵詞：寒潮、全球模式、波譜模式、能量分析、山脈效應

## 一、前言

Saltzman (1957) 曾將能量方程式在波數域 (Wave number domain) 上展開。Tsay & Kao (1978) 計算動能方程式中的各項物理因子對動能的貢獻，發現各波數之間的消長，非線性項佔有一個很重要的角色。Tsay (1986) 用 10 年 (1967 / 68 ~ 1977 / 78) 21 個寒潮的個案資料計算 500 mb 會成的地轉動能波譜，發現波數 3 的動能在寒潮爆發前 60 小時開始成長，並在前 36 小時至寒潮爆發後 12 小時具有最大值。波數 6 則在

寒潮爆發前 24 小時開始成長。同時Tsay (1986) 使用 1979 年 1 月 23 日到 2 月 8 日的實際資料計算 500 mb 動能波譜 (圖 1)，顯示階段 I (表 1 為階段分類表) 的動能最大值由波數 2 轉移至波數 3。階段 II 則是波數 3 保持最大動能值。在階段 III 時，動能的最大值又從波數 3 轉回到波數 2。階段 IV 則波數 2 具有最大的動能值。此種結果類似於合成分析的結果。

Tsay (1986) 接著又詳細分析每個階段內動能方程式中各項物理因子對動能的貢獻情形 (表 2)，其主要的結論為：(1) 波數 3 經由非線性交

表 1：階段分類表（引用Tsay, 1986）

Stages	Time interval	Number of days
I a	00 Z, 24 Jan. - 00 Z, 25 Jan.	1.5
I b	12 Z, 25 Jan. - 00 Z, 26 Jan.	1.0
II a	12 Z, 26 Jan. - 00 Z, 28 Jan.	2.0
II b	12 Z, 28 Jan. - 00 Z, 29 Jan.	1.5
II c	00 Z, 30 Jan. - 00 Z, 31 Jan.	1.5
III a	12 Z, 31 Jan. - 00 Z, 1 Feb.	1.0
III b	12 Z, 1 Feb. - 12 Z, 2 Feb.	1.5
III c	00 Z, 3 Feb. - 00 Z, 4 Feb.	1.5
IV	12 Z, 4 Feb. - 12 Z, 6 Feb.	2.5

表 2：實際動能收支表（引用Tsay, 1986）

(a) n = 3

Stages Terms	Stages						
	I a	I b	II a	II b	II c	III a	III b
$\partial K / \partial t$	-1.5	7.4	2.0	-3.0	-0.4	-2.0	-3.4
$L_1$	5.4	7.5	-6.9	-12.9	-14.2	-10.7	2.3
$-M_1$	-2.4	0.5	-2.9	-2.7	2.6	2.8	-0.2
C	-2.4	0.7	14.6	19.8	15.0	8.7	5.8
RES	-2.1	-1.3	-2.8	-7.2	-3.8	-2.8	-11.3

(b) n = 6

Stages Terms	Stages		
	II b	II c	III a
$\partial K / \partial t$	8.1	-1.0	-3.5
$L_1$	9.4	5.2	-4.0
$-M_1$	-1.0	-0.2	1.5
C	7.4	10.9	8.5
RES	-7.7	-16.9	-9.5

(c) n = 7

Stages Terms	Stages			
	II c	III a	III b	III c
$\partial K / \partial t$	10.2	8.7	-4.1	-6.3
$L_1$	9.3	3.0	-3.5	-5.1
$-M_1$	-1.3	1.7	3.6	-0.2
C	4.6	14.4	15.7	3.3
RES	-2.4	-10.4	-19.9	-4.3

(d) n = 2

Stages Terms	Stages			
	III a	III b	III c	IV
$\partial K / \partial t$	-2.5	0.5	11.5	-0.9
$L_1$	7.7	17.4	18.1	14.9
$-M_1$	5.6	2.8	-0.8	-3.6
C	11.0	19.2	18.1	12.7
RES	-26.8	-38.9	-23.9	-24.9

互作用項(L)取得動能而成長，但並非任一單獨三波交互作用（interaction triad）所造成的。另外波數 3 透過斜壓轉換項(C)取得動能以彌補經由非線性交作用項及消散項(D)所損失的動能而維持其最大值。波數 3 的衰減主要是經由 L 項的損失動能所造成的。(2)波數 2 的動能來源主要是 C 項及 L 項。(3)綜觀尺度波數 6、7 的變化，L 項在其成長及衰減過程中仍扮演提供及損失動能的角色，而 C 項

所提供的動能則在於彌補消散項(D)的動能損失。

本文係利用美國國家大氣研究中心（NCAR）的 CFM 波譜模式及中央氣象局（CWB）1988 年 3—4 月發展中的全球四階空間差分網格點模式，GFS 模式（Liou et al., 1989）對上述的個案做模擬。將在下一節對這二個模式做一簡單的介紹。我們從模式的模擬結果同樣地計算 500 mb 的動能波譜及動能方程式中的各項物理因子，再與實

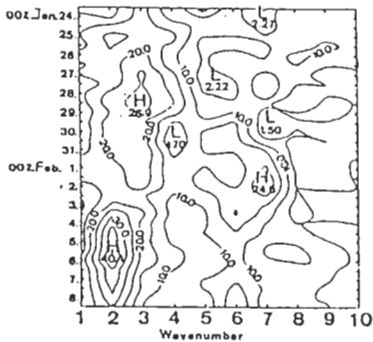


圖1 1979年500 mb 波譜動能時間變化圖  
(引用 Tsay, 1986)

際的結果相比較。另外還對模式分別做不含地形及不含大氣輻射參數化的測試。根據Manabe & Terpstra (1973) 的研究，他們利用數值模擬山脈對大氣環流的影響，發現在有山脈情形下的模擬要比沒有山脈存在時的模擬更接近實際大氣的情況，尤其是在高對流層及平流層。另外西藏高原具有維持及增強西伯利亞高壓的作用，Mintz (1965) 用簡單的全球模式模擬有地形及沒有地形時地面氣壓的分布，Mintz認為西藏高原有助於維持冬季西伯利亞高壓的存在。東亞地區寒潮爆發時，西伯利亞冷高壓一直是一個非常重要的角色，因此我們希望經由模式的模擬能夠證實地形對東亞地區寒潮爆發的影響。並且因為中央氣象局正在發展大型數值天氣預報，因此本文的第二個主要目的是診斷GFS模式的預報能力以為模式修正的參考。

## 二、模式介紹

### (一) NCAR CFM模式

NCAR CFM (Community Forecast Model) 為一全球原始方程式波譜模式，最早的版本是澳洲的波譜模式由W. Bourke, B.M. Avaney, K. Puri 及 R. Thurling (David L. Williamson & Gloria S. Williamson, 1984) 等人所發展的。NCAR 將其做適當的修改

，加入資料的客觀分析及初始化而成為一中長期的全球預報模式，詳細可見Bourke, et. al., (1977) 與Williamson (1983) 的文章。(Williamson et. al., 1984)。

大致上CFM 模式，垂直方向採 $\sigma$  坐標共9層(從模式的頂層到底層分別為0.009, 0.074, 0.189, 0.336, 0.500, 0.664, 0.811, 0.926, 0.991) 在東西方向所包括的波數為30，而南北方向採用Gaussian grid，時間積分的時距為15分鐘，所用的時間差分方法為Semi-implicit 方法。在物理參數化方面，垂直擴散(vertical diffusion) 採用K理論，地表通量(surface flux) 採用bulk aerodynamic formula，地表溫度的計算在洋面上是採氣候值，陸地及冰面則採用地表能量通量方程(surface energy flux formula)。水平擴散(horizontal diffusion) 採用 $\nabla^2$  方式。對流調整則考慮乾絕熱調整(dry convective adjustment)，濕絕熱調整(moisture convective adjustment) 及穩定降水(stable condensation) 等三種。輻射參數化採Ramanathan et. al., (1983) 與Pitcher et. al., (1983) 的方法。

### (二) CWB GFS 模式

CWB GFS 模式(參考Liou et. al., 1989) 最早的版本是UCLA的大氣環流模式，其為一全球原始方程式網格點模式，將其經過適當的修改之後做為全球天氣預報模式。大致上垂直方向採 $\sigma$  坐標共9層，水平方向採用Arakawa C grid (Haltiner and Williams, 1980)，解析度為 $3^\circ \times 2.5^\circ$  的經緯網格。空間差分法採四階差分法，此數值法除總能量保守外其位能(potential enstrophy) 也保守。時間差分方法則採leapfrog scheme 但是週期性地使用Matsuno scheme。時間積分的間距則為3分鐘。

物理部份包括使用Arakawa-Schubert積雲參數化方法。Randall-Deardoff的well-mixed PBL參數化及Katayama輻射參數化方法。另外還包含乾對流調整及濕對流調整及大尺度凝結與降

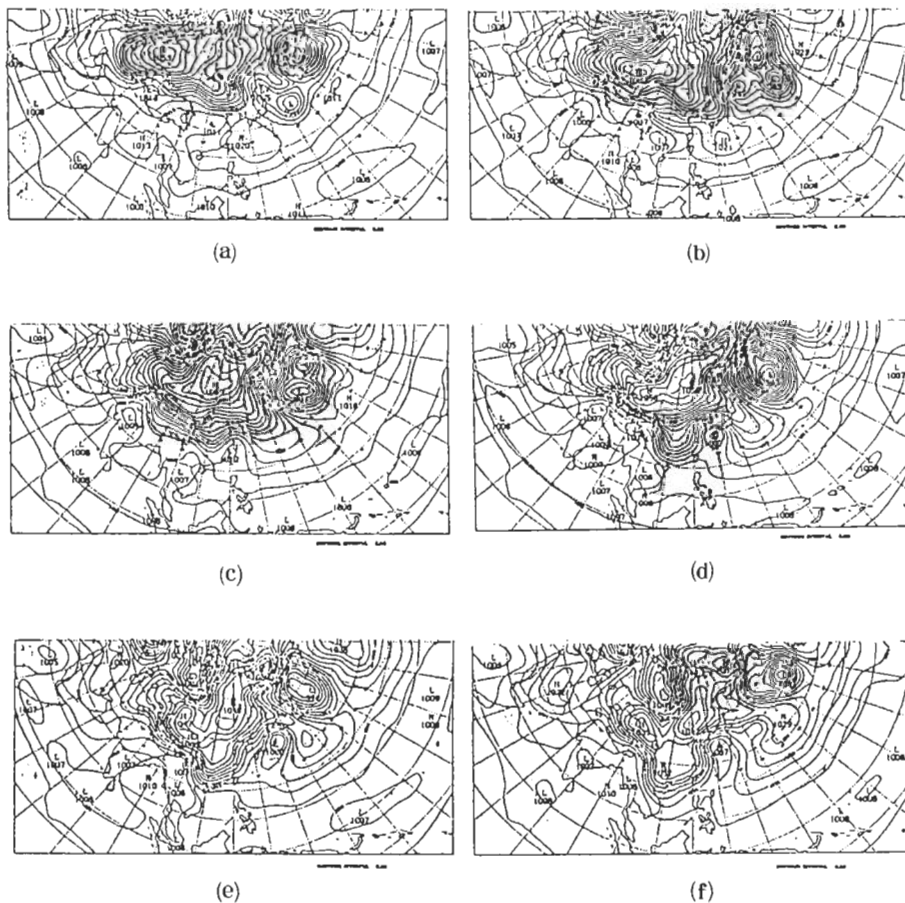


圖 2 1979 年個案分析實際地面氣壓分析圖

(a) 1 月 26 日 12 Z (b) 1 月 27 日 12 Z (c) 1 月 28 日 12 Z  
 (d) 1 月 29 日 12 Z (e) 1 月 30 日 12 Z (f) 1 月 31 日 12 Z

水等方法。地表的物理變數如地面溫度 ( ground temperature ) 及雪深度 ( snow depth ) 等，是用一個粗略的方程式來預報，例如地面溫度在陸地上採用地表能量平衡方程 ( surface energy balance equation ) 來預報，在海洋上則使用氣候值。對地面濕度而言，則採氣候值。

### 三、資料來源、處理及模式使用

#### (一) 資料來源及處理

CFM 及 GFS 模式的資料來源為 ECMWF 的

客觀分析資料。CFM 用全球資料，GFS 僅使用北半球資料。資料時間從 1979 年 1 月 20 日至 2 月 8 日，垂直方向包括 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 150, 100 mb 共十層，計有 H, T, U, V 等四個變數場。地面氣壓場的資料則從 1 月 23 日 12 Z 起。該資料在  $1.875^\circ \times 1.875^\circ$  的經緯網格點上。

為使 GFS 的預報能夠順利執行，必須將現有的資料做適當的處理，這些包括：

(1) 將  $1.875^\circ$  的網格間距資料轉變為  $2.5^\circ$  的網格間距資料。

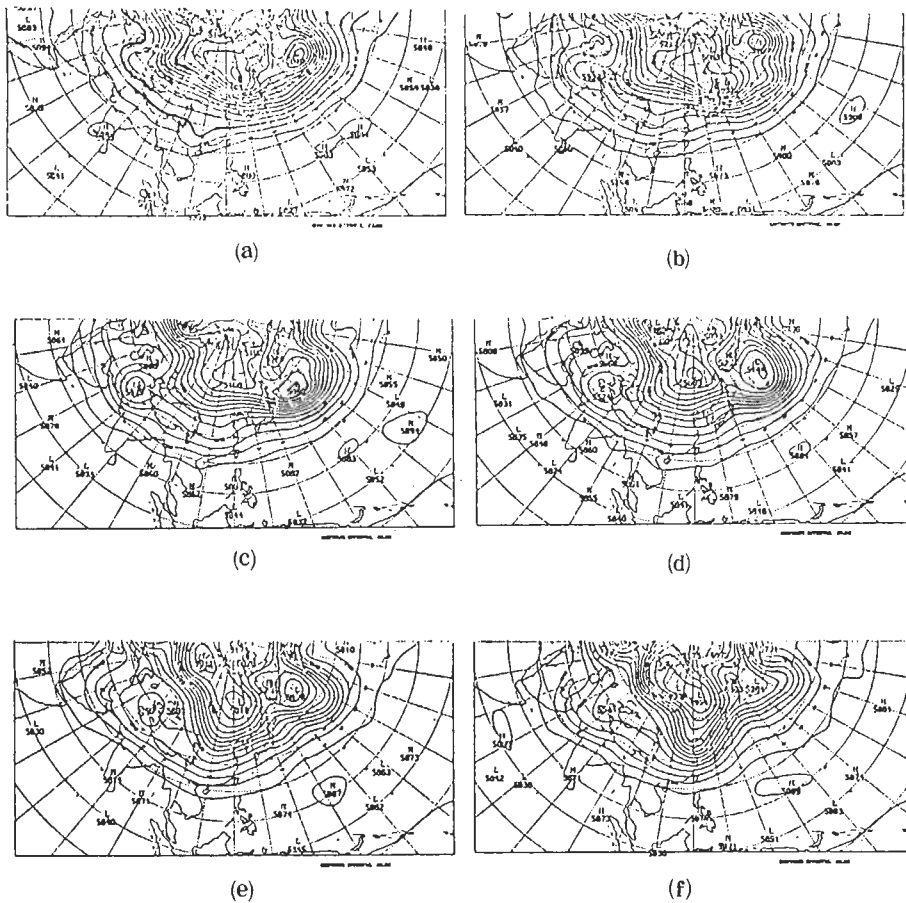


圖3 1979年個案分析實際500 mb分析圖

(a) 1月26日 12 Z (b) 1月27日 12 Z (c) 1月28日 12 Z  
 (d) 1月29日 12 Z (e) 1月30日 12 Z (f) 1月31日 12 Z

(2) 南半球資料採用氣候值。

(3) 925 mb 資料用上下兩層內插。

(4) 1月20日 00Z 的地面氣壓場用1000 mb 資料外插。

(二) 模式的使用

NCAR-CFM 模式的模擬分為三種類型：

(1) CFM-M 模式：模式包含地形及所有的物理機制，即為完整模式。

(2) CFM-NM 模式：將地形高度設為0，其他與CFM-M 模式相同。

(3) 沒有大氣輻射過程的模式：在CFM-M 模

式中除去輻射參數化的計算。

上述每一個模式分別模擬4個個案：(1)個案1：1月23日 12 Z 至 1月28日 12 Z，(2)個案2：1月26日 12 Z 至 1月31日 12 Z，(3)個案3：1月31日 12 Z 至 2月5日 12 Z，(4)個案4：2月4日 00Z 至 2月9日 00Z。

上述每一個個案均預報120小時。另外從CFM 的模擬結果分析得知：模式中含有輻射參數化與不含輻射參數化的模擬結果，二者相差不多，因此GFS 模式祇針對有地形及沒有地形二種類型來模擬。

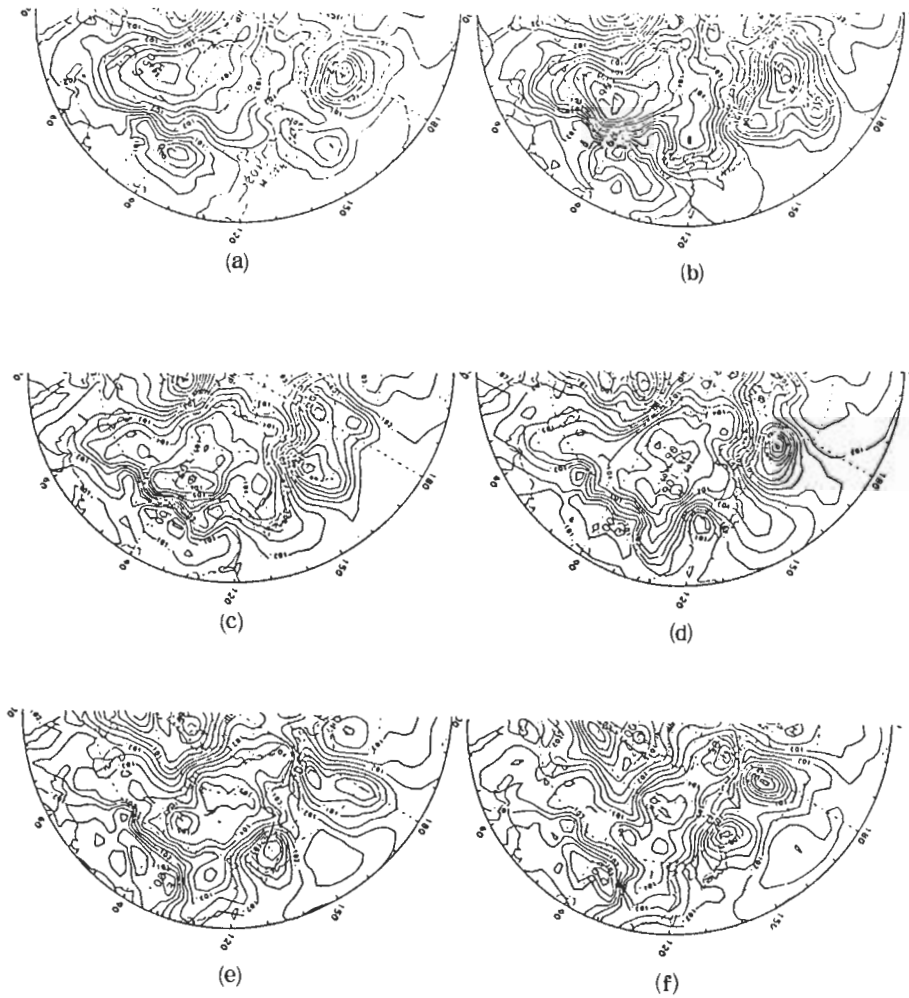


圖4 NCAR CFM-M模式，個案2地面氣壓預報圖

(a) 0小時預報 (b) 24小時預報 (c) 48小時預報  
(d) 72小時預報 (e) 96小時預報 (f) 120小時預報

#### 四、波譜動能方程式

以  $q(\lambda, \Phi, p, t)$  表示任意的氣象變數，而  $\lambda, \Phi, p, t$  分別為經度，緯度，氣壓，時間。為了方便起見將  $q(\lambda, \Phi, p, t)$  以  $q(\lambda)$  表示。將此變數用傅氏轉換 (Fourier transform) 在某一緯度圈上展開而得到在波數域 (wavenumber domain) 上的變數值：

$$Q(n) = Q_c(n) + i Q_s(n) \\ = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} q(\lambda) e^{-in\lambda} d\lambda$$

$n$  表示波數，且  $Q(n)$  與  $q(\lambda)$  具有相同的單位。

在波數域上的動能方程式可以參考 Saltzman (1970) 的文章，而本文所採用的方程式則依照 Tsay & Kao (1978) 的公式，在此僅列出動能

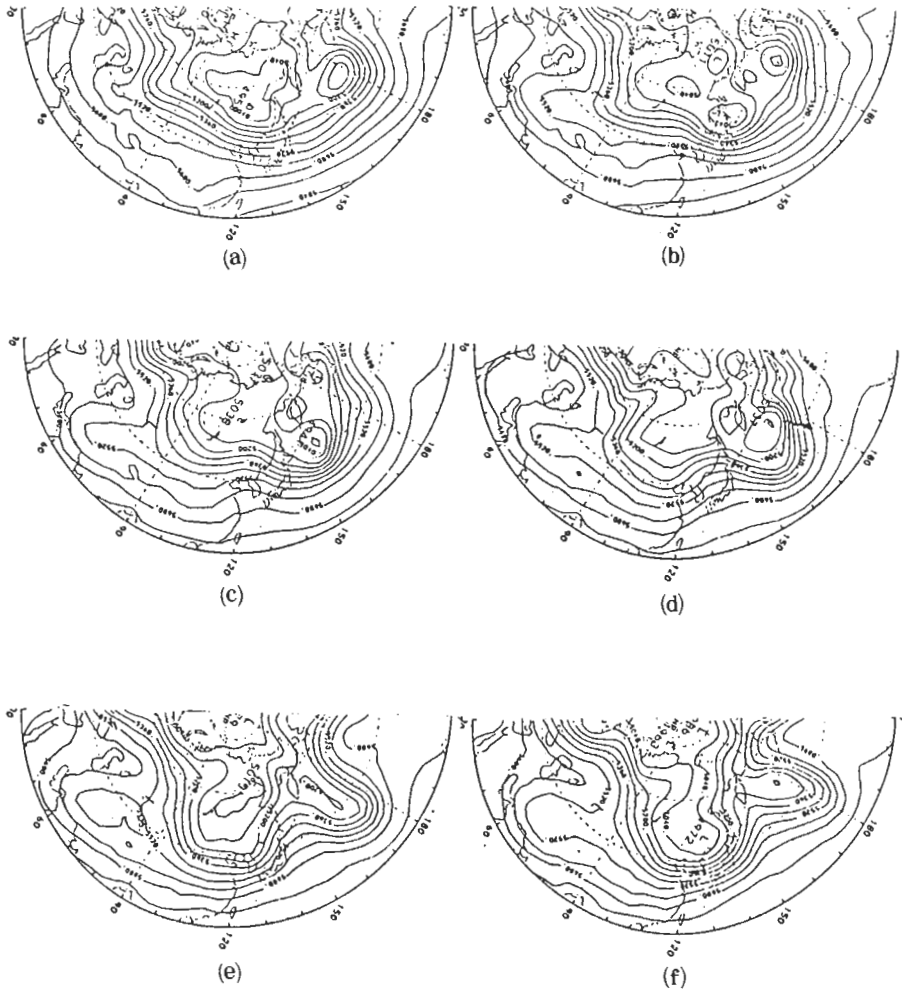


圖 5 NCAR CFM-M 模式，個案 2 500mb 預報圖  
 (a) 0 小時預報 (b) 24 小時預報 (c) 48 小時預報  
 (d) 72 小時預報 (e) 96 小時預報 (f) 120 小時預報

方程式及各項物理因子的名稱。與單位質量的渦流 ( eddy ) 動能方程式如下：

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial t} K(n) = & L_1(n) + L_2(n) - M_1(n) - M_2(n) \\
 & - M_3(n) + C(n) - D(n) + BVZ(n) \\
 & + BWZ(n) + BVK(n) + BWK(n) \\
 & + BL_1(n) + BL_2(n) \dots \dots \dots (1)
 \end{aligned}$$

n : 波數。

- K : 動能項。
- L<sub>1</sub> , L<sub>2</sub> : 非線性交互作用項。
- C : 可用位能與動能之間的轉換項。
- D : 消散項。
- BVZ , BWZ : 位能的淨邊界效應項。
- BVK , BWK : 動能的淨邊界效應項。
- M<sub>1</sub> , M<sub>2</sub> , M<sub>3</sub> : 與平均緯流間的交互作用項。
- BL<sub>1</sub> , BL<sub>2</sub> : 非線性交互作用項的邊界通量項。

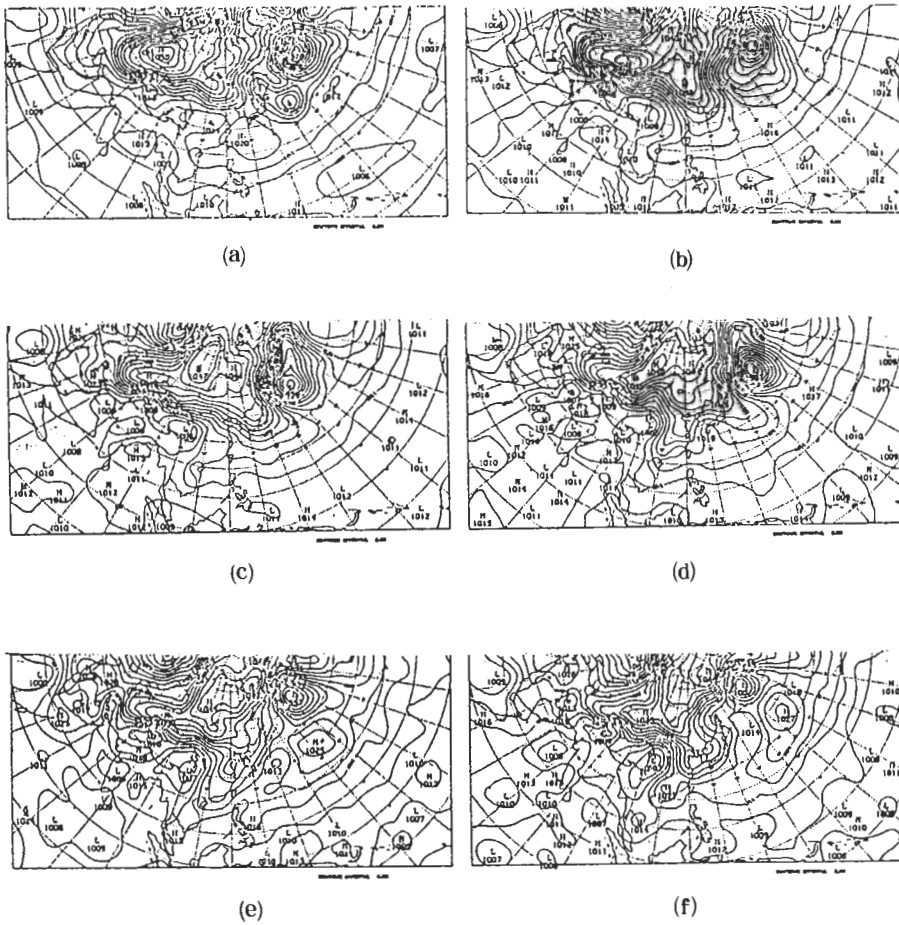


圖 6 CWB GFS-M 模式，個案 2 地面預報圖

(a) 0 小時預報 (b) 24 小時預報 (c) 48 小時預報  
 (d) 72 小時預報 (e) 96 小時預報 (f) 120 小時預報

在此僅計算上述  $L_1(n)$ ， $M_1(n)$ ， $C(n)$ ， $BVZ(n)$ ， $BVK(n)$  等項，因此動能方程式變成

$$\frac{\partial}{\partial t}(n) = L_1(n) - M_1(n) + C(n) + BVZ(n) + BVK(n) + RES(n) \dots \dots \dots (2)$$

其中剩餘項， $RES(n)$ ，包括方程式(1)中所有未計算的項以及資料及計算上的誤差。上述各項的單位為  $m^2 s^{-2}$ 。

五、預報結果分析

(一) 有地形之預報結果

1 天氣圖之比較

只選擇包含台灣地區寒潮爆發的個案 2 來比較預報圖與實際天氣圖之間的差異，但在下節討論能量的收支時則包括所有四個個案。

圖 2a — 2f 為 1 月 26 日 12 Z 至 31 日 12 Z 的實際地面天氣圖，而 500 mb 的實際分析圖則如圖 3a — 3f 所示。比較 NCAR CFM 的地面氣壓預報圖 (圖 4a — 4f) 與實際地面天氣圖可發現兩者主要的差別在於 CFM 對於台灣北部的低壓預報並



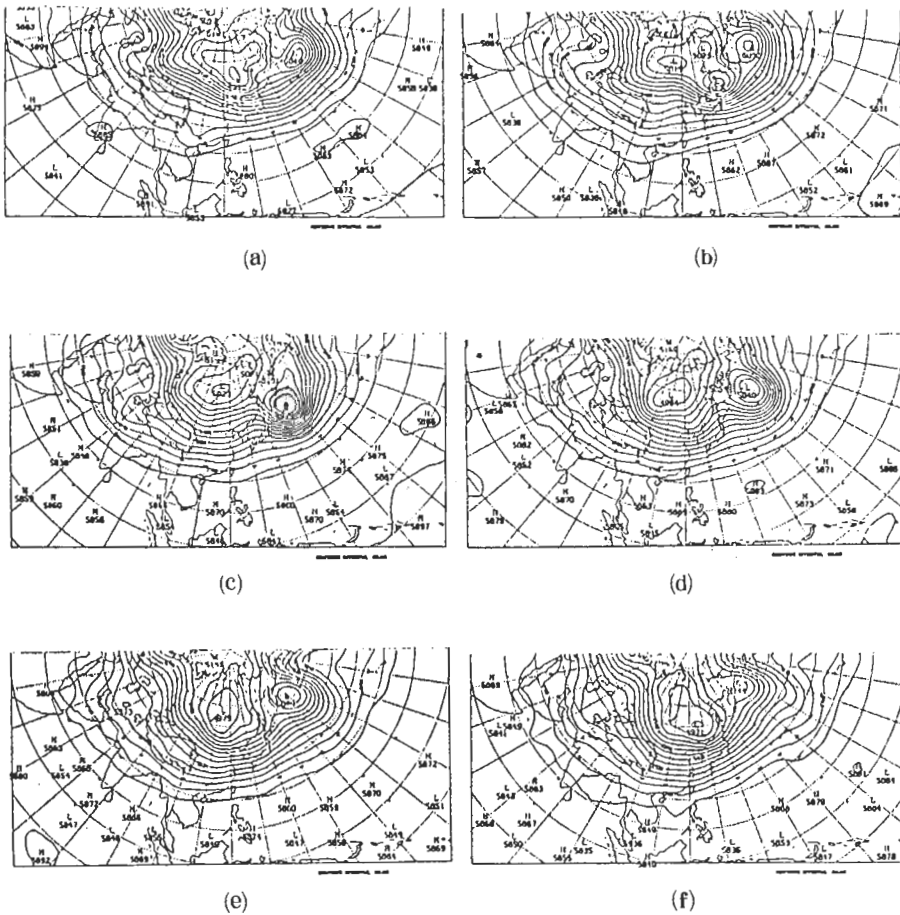


圖 7 CWB GFS-M 模式，個案 2 500 mb 預報圖  
 (a) 0 小時預報 (b) 24 小時預報 (c) 48 小時預報  
 (d) 72 小時預報 (e) 96 小時預報 (f) 120 小時預報

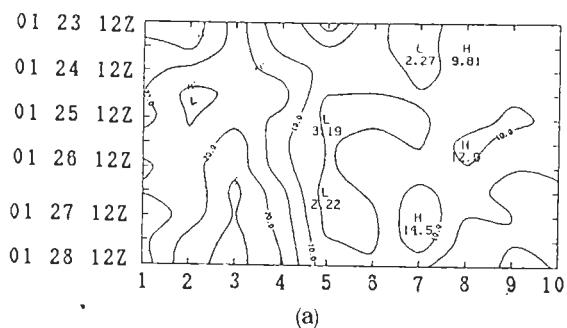
不理想(圖 2c，圖 4c)，但是 CFM 預報冷空氣開始往南伸展的時間(1 月 28 日 12 Z)與實際是相符合的。由於二種圖的尺度不一樣，所以比較上可能有點差距，不過對於天氣圖變化趨勢的掌握，CFM 模擬的相當準確。比較 CFM 的 500 mb 預報圖(圖 5a — 5f)與 500 mb 的實際天氣圖可發現，CFM 預報槽線的位置除 120 小時的預報較呈東北—西南走向外，其他均與實際天氣圖相當吻合。

GF S 的地面氣壓及 500 mb 預報圖分別為圖 6 及圖 7。GF S 的地面預報與實際地面圖的最大

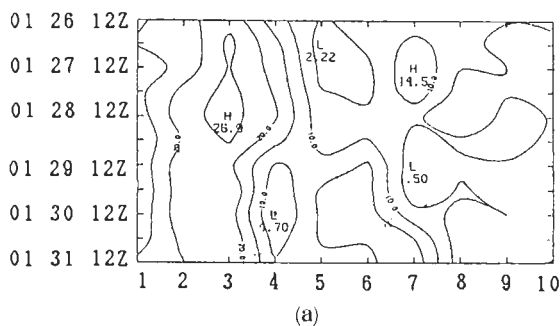
差別，在於冷高壓脊線往南伸展時的氣壓梯度強度在預報圖上要弱很多(圖 6c — 6f)。但預報脊線南伸時間則與實際大氣相接近。GF S 的 500 mb 預報與實際分析圖之差異主要是低壓槽線的強度，一般而言預報值要弱很多。預報槽線位置則與實際大氣相接近。對於此個案而言，CFM 的預報不管在強度或位置的準確度上要比 GF S 者好許多。

2 動能之分析

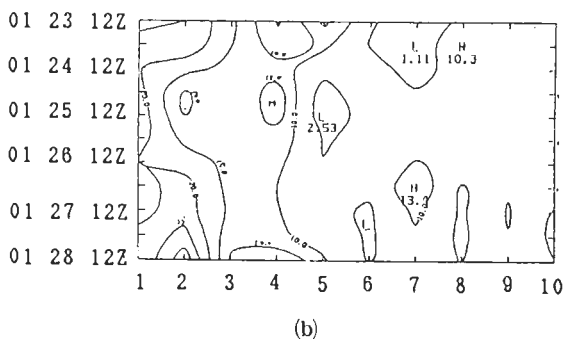
(1) 個案 1 —— 1 月 23 日 12 Z 之預報動能分析



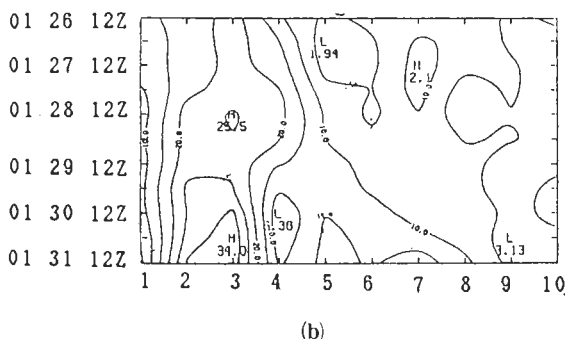
(a)



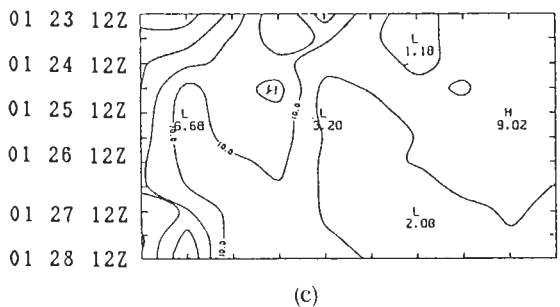
(a)



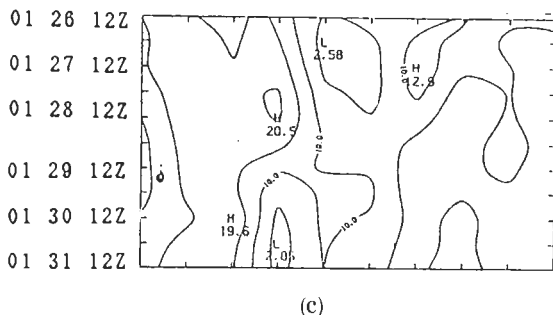
(b)



(b)



(c)



(c)

圖 8 個案 1，有地形之 500 mb 波譜動能時間變化圖 ( $m^2 s^{-2}$ ) (a)實際大氣(b) NCAR CFM-M(c)CWB GFS-M

圖 9 個案 2，有地形之 500 mb 波譜動能時間變化圖 ( $m^2 s^{-2}$ ) (a)實際大氣(b) NCAR CFM-M(c)CWB GFS-M

圖 8a - 8c 分別為實際大氣、NCAR-CFM、CWB-GFS 的 500 mb 波譜動能時間變化圖。圖 8 a 顯示實際大氣中波數 3 動能有明顯的增加，因此波譜動能最大值是從波數 2 移至波數 3，然而 CFM 及 GFS 均未能預報此種現象之發生。另外比較圖 8b 及 8c 可見 CFM 和 GFS 相類似。從動能的收支表看 (比較表 3a 與 2a)，CFM 的預報其波數 3 之所以不能夠成長，主要在 I b 階段，RES

項及 C 項損失過多的動能導致。另外波數 2 在 II a 階段的成長 (實際大氣沒有成長) 則主要是 L<sub>1</sub> 項及 C 項在提供動能。表 3b 顯示 GFS 的預報結果，得知波數 3 無法成長的原因同樣是 RES 項及 C 項損失過多的動能所致。至於波數 2 在 II a 階段的成長，GFS 則主要為 L<sub>1</sub> 項的提供動能所致。

(2)個案 2 —— 1 月 26 日 12 Z 之預報動能分析

表3：個案1，有地形之500 mb 預報動能收支表

(a) NCAR CFM-M (b) CWB GFS-M

(a)

N = 3

STAGES TERMS	I a	I b
$\partial K / \partial t$	-2.69	1.56
$L_1$	3.59	6.61
$-M_1$	-2.14	-0.54
C	3.53	-1.33
BVZ	-4.49	-1.72
BVK	-0.05	-0.05
RES	-3.12	-1.42

N = 2

STAGES TERMS	I a	I b	II a
$\partial K / \partial t$	-8.79	4.74	8.28
$L_1$	-3.47	6.04	12.89
$-M_1$	-1.43	1.21	2.47
C	3.32	2.68	13.04
BVZ	-1.77	0.45	-2.17
BVK	-0.06	-0.07	-0.04
RES	-5.39	-5.93	-17.90

(b)

N = 3

STAGES TERMS	I a	I b
$\partial K / \partial t$	-2.81	-3.19
$L_1$	3.96	4.38
$-M_1$	-1.92	-1.57
C	5.73	-1.73
BVZ	9.83	-2.44
BVK	-0.02	0.03
RES	-20.40	-1.81

N = 2

STAGES TERMS	I a	I b	II a
$\partial K / \partial t$	-9.04	0.12	7.71
$L_1$	-2.53	0.71	6.57
$-M_1$	-1.30	0.96	2.68
C	0.25	-1.56	0.22
BVZ	11.54	-1.92	-3.95
BVK	0.03	-0.05	-0.27
RES	-17.03	-1.98	2.46

對個案2的實際波譜動能而言，波數3一直具有最大值（圖9a）。NCAR CFM的結果也顯示波數3具有最大動能值，甚至於在II c階段時，動能又有明顯地增加。從動能的收支表（表4a）看，波數3在II a，II b階段具有最大值主要是C項所提供動能與 $L_1$ 所損失動能有抵消作用所致，此結果與實際分析相同（表2a），而波數3在II c階段的成長可以和實際的動能收支表（表2）相比較，發現NCAR CFM的 $L_1$ 項此時具有提供動能

的作用，而實際分析 $L_1$ 中則呈現損失動能的作用，可見NCAR CFM預報波數3在II c階段的不合理再度成長是 $L_1$ 的貢獻動能所致。

在此期間，GFS之預報波數3動能亦有增加，但較實際大氣及CFM者為小。GFS的500 mb波譜動能收支情形則如圖9c所示。從動能收支表（表4b）看，對GFS而言其波數3不能夠有效增加至較大數值的原因主要是C項不能夠提供足夠的動能所致。另外L項的損失動能效應與實際的結果

表 4：個案 2，有地形之 500 mb 預報動能收支表

(a) NCAR CFM - M (b) CWB GFS - M

(a)

N = 3

STAGES TERMS	II a	II b	II c
$\partial K / \partial t$	1.40	-0.15	5.79
$L_1$	-10.47	-15.24	2.00
$-M_1$	-1.19	-1.86	-0.73
C	11.48	14.33	13.45
BVZ	0.51	3.59	3.79
BVK	0.02	-0.07	0.08
RES	0.75	-0.90	-12.80

(b)

N = 3

STAGES TERMS	II a	II b	II c
$\partial K / \partial t$	-2.74	-1.27	-0.02
$L_1$	-8.49	-6.35	-4.70
$-M_1$	-1.48	-1.09	-1.97
C	-2.82	3.62	5.59
BVZ	-13.06	-20.41	-12.56
BVK	-0.10	0.03	0.08
RES	23.21	22.94	13.55

N = 6

STAGES TERMS	II b	II c
$\partial K / \partial t$	3.00	4.61
$L_1$	3.93	4.93
$-M_1$	0.03	0.68
C	7.95	14.20
BVZ	-0.61	-2.09
BVK	-0.02	0.23
RES	-8.27	-13.33

N = 6

STAGES TERMS	II b	II c
$\partial K / \partial t$	3.83	-2.47
$L_1$	2.80	1.20
$-M_1$	0.18	-1.68
C	0.12	0.86
BVZ	3.10	5.16
BVK	0.00	0.07
RES	-2.37	-8.07

N = 7

STAGES TERMS	II c
$\partial K / \partial t$	6.40
$L_1$	-4.54
$-M_1$	-0.14
C	17.00
BVZ	0.21
BVK	-0.04
RES	-6.17

N = 7

STAGES TERMS	II c
$\partial K / \partial t$	1.21
$L_1$	-1.88
$-M_1$	0.22
C	0.36
BVZ	0.83
BVK	0.03
RES	1.66

是相同的。

對於綜觀尺度波數6的動能變化，實際大氣在 II b 的成長階段及 II c 的最大值階段， $L_1$  項及C項是動能的來源(表2)。NCAR CFM 的結果(表4a)顯示有相類似的結果。對GFS而言也有類似的結果(表4b)，不過在數值上小很多，尤其是C項。至於波數7的動能變化，實際分析(表2)顯示在 II c 階段的成長， $L_1$  項及C項是動能的來源。NCAR CFM 的分析卻顯示C項是主要

的動能來源。另外GFS的結果也顯示C項是正的動能來源(表4b)，但其數值則小甚多。

(3)個案3——1月31日12Z之預報動能分析

圖10a—10d為個案3的500mb波譜動能時間變化圖。圖10a顯示實際大氣中波數2動能增加，波數3動能減小，因此波譜動能的最大值由波數3移回波數2。NCAR CFM 的預報也顯示有相似的结果，其差別在於NCAR CFM 動能的轉移在

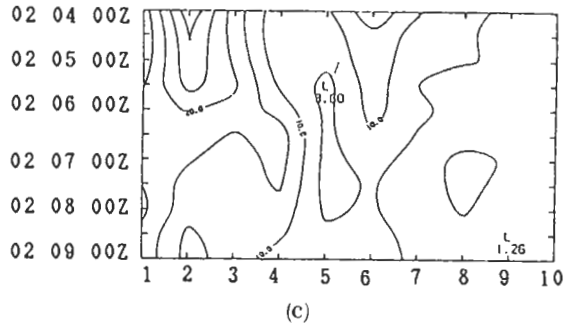
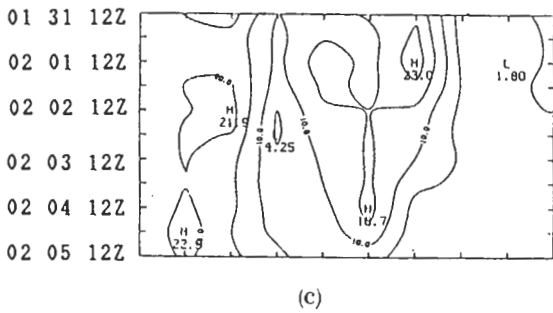
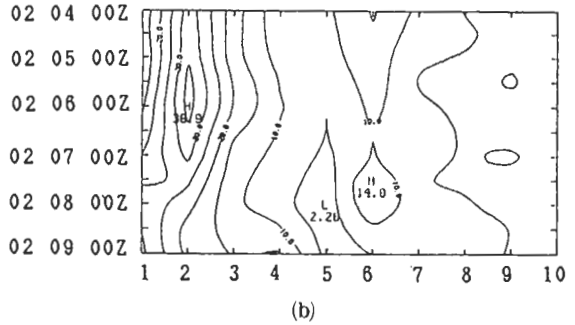
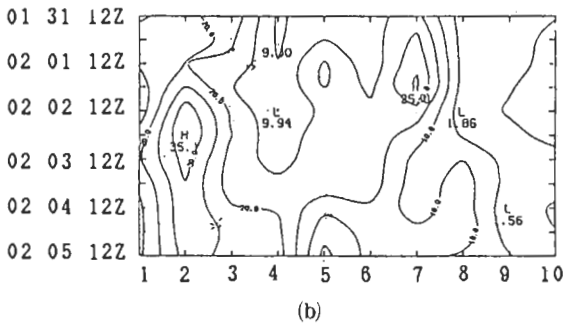
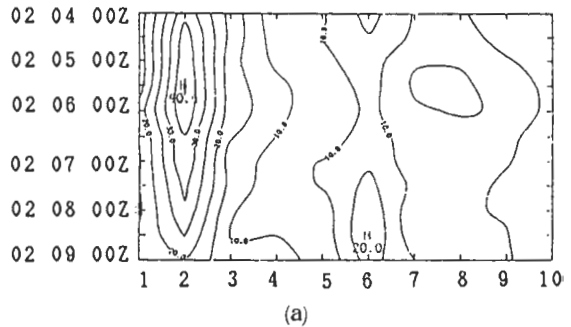
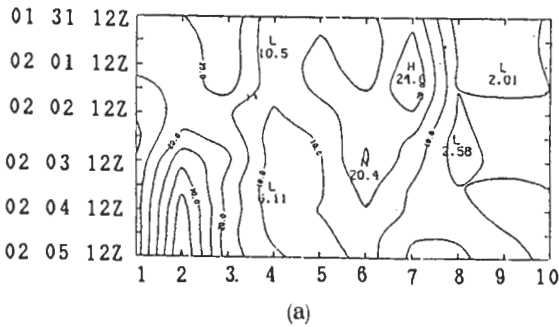


圖10 個案3，有地形之500mb波譜動能時間變化圖 ( $m^2 s^{-2}$ ) (a)實際大氣(b) NCAR CFM-M(c) CWB GFS-M

圖11 個案4，有地形之500mb波譜動能時間變化圖 ( $m^2 s^{-2}$ ) (a)實際大氣(b) NCAR CFM-M(c) CWB GFS-M

表 5：個案 3，有地形之 500 mb 預報動能收支表

(a) NCAR CFM-M (b) CWB GFS-M

(a)

N = 2

STAGES TERMS	III a	III b	III c
DEK	2.94	10.49	-3.11
L 1	9.17	19.03	6.05
M 1	4.86	4.68	-0.38
C	11.90	14.51	22.44
BVZ	-9.15	-8.94	-10.47
BVK	0.87	0.07	0.65
RES	-14.71	-19.48	-21.40

N = 3

STAGES TERMS	III a	III b	III c
DEK	-4.66	0.75	0.65
L 1	-8.98	4.69	12.38
M 1	1.90	0.11	-1.59
C	8.39	-6.66	5.42
BVZ	0.08	-2.19	-0.31
BVK	0.17	0.11	0.19
RES	-6.94	4.69	-15.43

N = 6

STAGES TERMS	III a
DEK	-2.18
L 1	-6.10
M 1	0.75
C	6.89
BVZ	2.07
BVK	0.35
RES	-6.14

N = 7

STAGES TERMS	III a	III b	III c
DEK	10.66	-5.72	-6.32
L 1	3.52	-11.82	-5.68
M 1	4.31	4.00	0.13
C	25.67	20.20	1.70
BVZ	-2.27	-0.88	8.76
BVK	0.23	0.27	0.16
RES	-20.80	-17.49	-11.40

表 5 (連續)

(b)

N = 2

STAGES TERMS	III a	III b	III c	IV
DEK	-3.36	1.38	0.15	-0.49
L 1	6.58	8.49	2.21	2.34
M 1	5.45	3.24	1.88	0.74
C	15.55	16.22	10.99	6.84
BVZ	19.93	-3.78	-9.71	-18.18
BVK	0.66	0.38	0.35	-0.11
RES	-51.50	-23.17	-5.57	7.87

N = 3

STAGES TERMS	III a	III b	III c
DEK	-4.04	1.48	-3.28
L 1	-8.79	3.26	0.86
M 1	2.81	0.35	-1.62
C	-7.82	-9.35	-0.84
BVZ	19.36	26.48	19.27
BVK	0.11	0.10	0.21
RES	-9.70	-19.36	-21.16

N = 6

STAGES TERMS	III a
DEK	-2.82
L 1	-4.58
M 1	2.33
C	0.29
BVZ	10.11
BVK	0.37
RES	-11.34

N = 7

STAGES TERMS	III a	III b
DEK	5.16	-6.28
L 1	5.35	-3.71
M 1	1.93	2.52
C	24.44	15.88
BVZ	0.15	3.81
BVK	0.14	0.12
RES	-26.84	-24.90

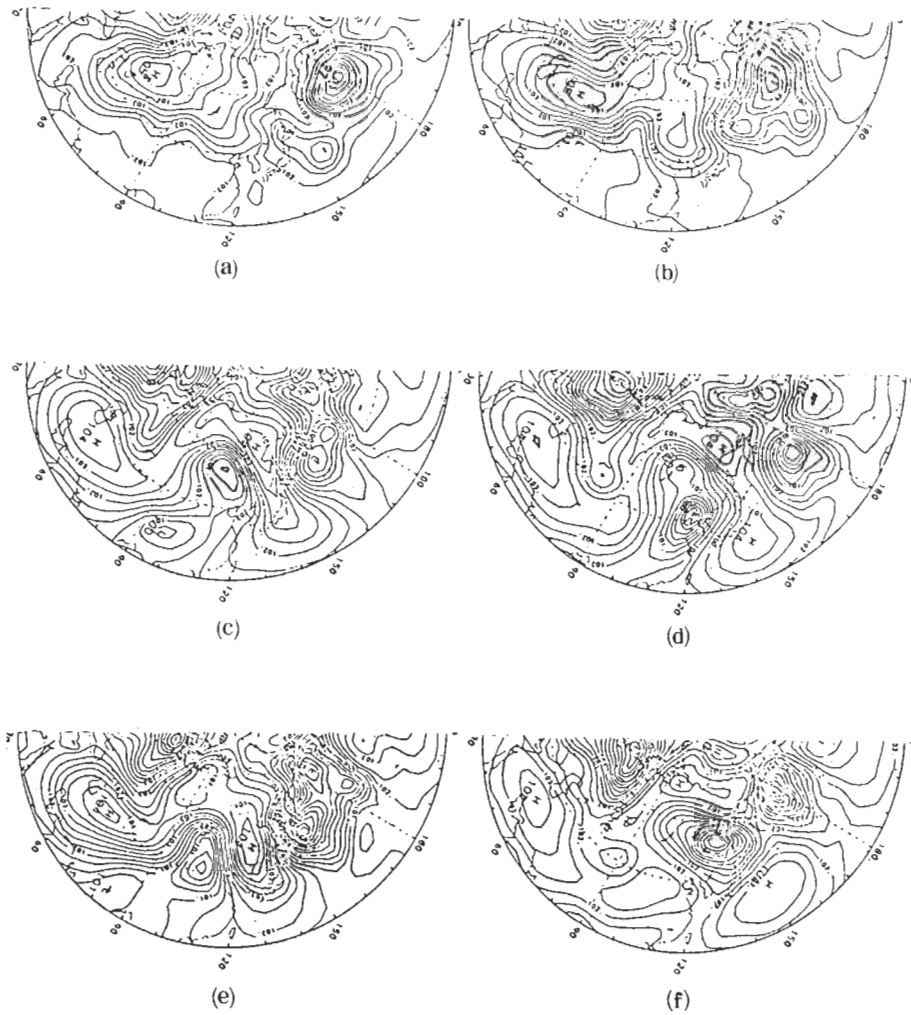


圖12 NCAR CFM-NM 模式，個案 2，地面氣壓預報圖  
 (a) 0 小時預報 (b) 24 小時預報 (c) 48 小時預報  
 (d) 72 小時預報 (e) 96 小時預報 (f) 120 小時預報

時間上要比實際大氣快 1.5 天左右，並且 NCAR CFM 波數 2 很快地達到最大值。從動能的收支表(表 5)來看，NCAR CFM 的動能收支(表 5a)顯示波數 3 衰減(Ⅲ a)階段， $L_1$  項及 RES 項是動能的損失項。至於波數 2 的成長， $L_1$  項及 C 項是動能的來源。此結果與實際的分析是相同的。

GFS 的波譜動能時間變化圖則為圖 10c。此圖顯示波數 3 的動能曾一度衰減， $L_1$  項及 C 項和 RES 項是動能的損失項，而在 Ⅲ b 階段的成長，

BVZ 項是主要的動能來源，其次是  $L_1$  項。波數 2 在 Ⅲ b 的成長主要靠  $L_1$  項及 C 項的提供動能，在 Ⅲ c 階段的成長，同樣是  $L_1$  項及 C 項為主要的動能來源。

對綜觀擾動波數 6 衰減階段(Ⅲ a)，NCAR CFM 的動能收支表(表 5a)顯示  $L_1$  項與 RES 項是動能的損失項。CWB GFS 的結果也顯示有類似的情形(表 5 b)。對波數 7 而言，同樣地，NCAR CFM 與 CWB GFS 類似，即在 Ⅲ a 的成

長階段， $L_1$  及  $C$  項是動能的來源，在 IIIb 的衰減階段， $L_1$  及  $RES$  項是動能的損失。

(4) 個案 4 —— 2 月 4 日 00 Z 之預報動能分析

圖 11a — 11d 為個案 4 之 500 mb 波譜動能時間變化圖。實際大氣 (圖 11 a) 顯示波數 2 具有最大動能值。NCAR CFM 的預報結果也顯示波數 2 具有最大的動能值，但其動能衰減較實際大氣者為快 (圖 11b)。

GFS 的預報結果 (圖 11c) 顯示波數 2 在預報的開始具有最大值，但是隨即衰滅掉。表 6a — 6b 分別為 NCAR CFM 及 CWB GFS 的動能收支表。表中顯示波數 2 的動能來源主要是  $L_1$  項及  $C$  項，此項結果與實際大氣是一樣的。另外 GFS 在階段 V 隨即衰滅的原因則主要是  $C$  項正值不夠大及  $RES$  項的負值所造成的。

(二) 沒有地形之預報結果分析

1 天氣圖之比較

圖 12 及 13 分別顯示 NCAR CFM 的地面氣壓

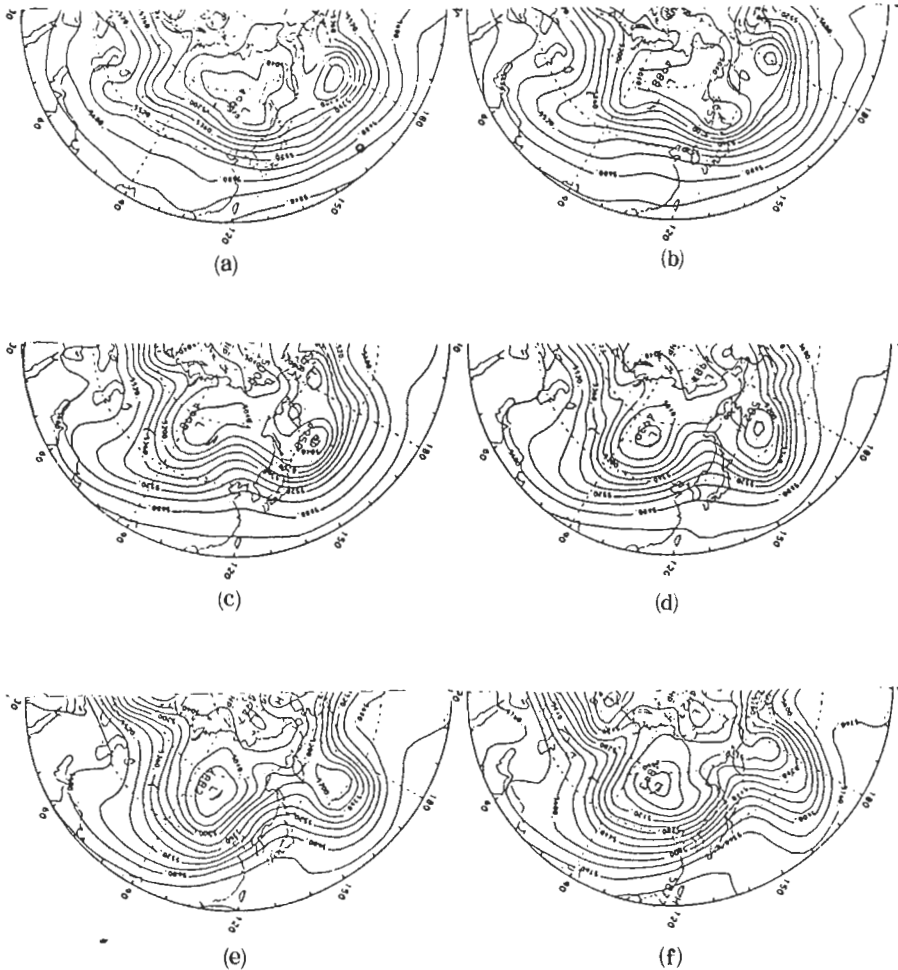


圖 13 NCAR CFM—NM 模式，個案 2，500 mb 預報圖

(a) 0 小時預報 (b) 24 小時預報 (c) 48 小時預報

(d) 72 小時預報 (e) 96 小時預報 (f) 120 小時預報



表 6：個案 4，有地形之 500 mb 預報動能收支表

(a)NCAR CFM-M (b)CWB GFS-M

(a)  
N = 2

STAGES TERMS	IV	V
DEK	-0.83	-6.57
L 1	7.45	-7.63
M 1	-4.99	-3.66
C	12.50	10.49
BVZ	-4.12	-1.76
BVK	0.16	0.05
RES	-11.84	4.23

(b)  
N = 2

STAGES TERMS	IV	V
DEK	-5.05	-3.88
L 1	5.06	-0.42
M 1	-2.93	-0.99
C	13.80	6.34
BVZ	-4.14	-0.87
BVK	0.30	-0.02
RES	-17.13	-7.93

預報圖及 500 mb 預報圖。GFS 的地面氣壓及 500 mb 高空預報圖分別為圖 14 及 15。

由 NCAR CFM 的地面預報圖 (圖 12a — 12f) 顯示冷高壓在沒有西藏高原的阻擋下，冷高壓在

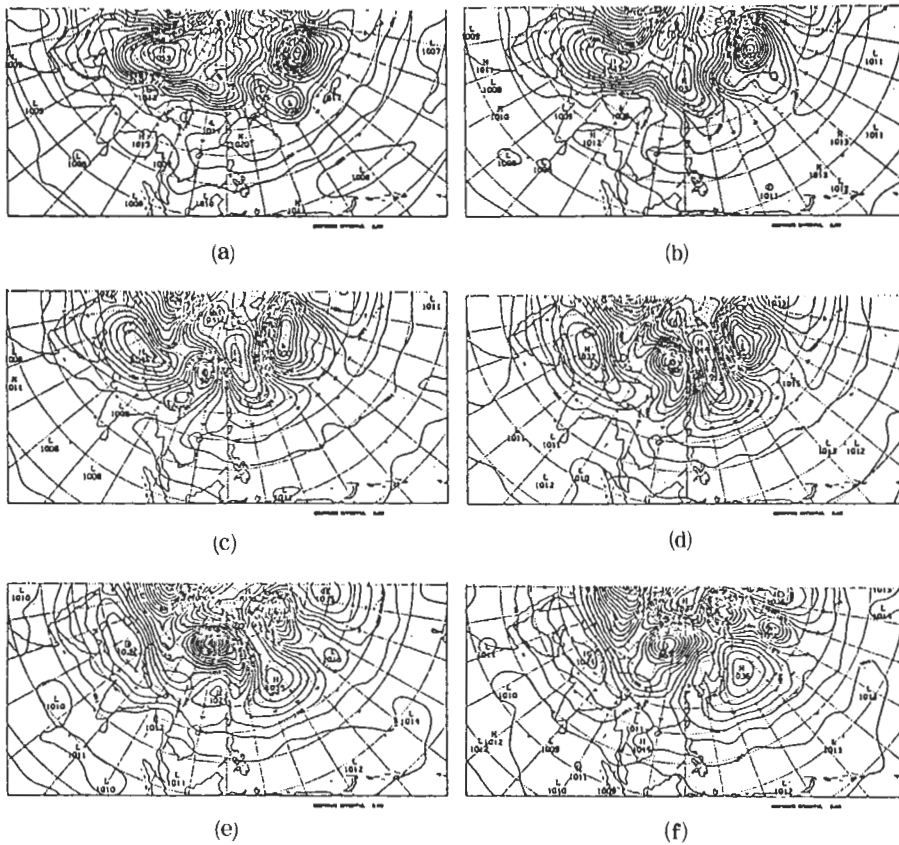


圖 14 GFS-NM 模式，個案 2，地面氣壓預報圖

(a) 0 小時預報 (b) 24 小時預報 (c) 48 小時預報

(d) 72 小時預報 (e) 96 小時預報 (f) 120 小時預報

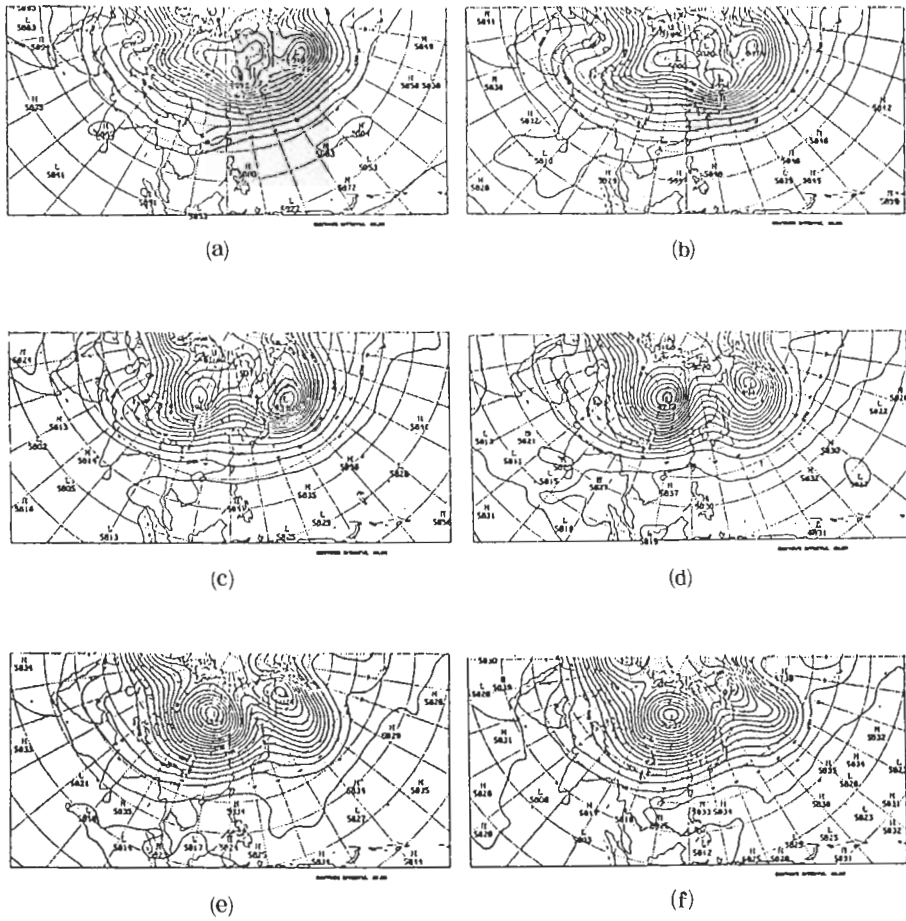


圖 15 GFS—NM 模式，個案 2，500 mb 預報圖  
 (a) 0 小時預報 (b) 24 小時預報 (c) 48 小時預報  
 (d) 72 小時預報 (e) 96 小時預報 (f) 120 小時預報

70°—80°E 附近隨時間一直往南移動並且強度減弱，而台灣地區則一直處於西太平洋高壓迴流的控制，寒潮爆發的現象並不發生。可見台灣地區寒潮爆發的現象發生，是在有西藏高原的阻擋下，冷高壓先往東移，過了高原之後再往南伸所造成。至於 500 mb 的預報圖（圖 13a — 13f）顯示在 80°E、55°N 的槽線先往南移再往東移至 90°E 附近，其強度並有顯著增強。而且到 96 小時及 120 小時（圖 13e 及 13f）則此低壓槽呈滯留狀態，強度甚強，其尺度約為波數 5。

GFS 的地面氣壓預報圖（圖 14）與 NCAR CFM 並沒有很大的差異，同樣地發現台灣地區處於高壓迴流的控制，寒潮爆發的現象並不發生。GFS 500 mb 的預報圖（圖 15）顯示低壓槽與 CFM 者有相似的變化。

2. 動能之分析

(1) 個案 1 —— 1 月 23 日 12 Z 之預報動能分析

在沒有地形存在時，CFM 預報之波譜時間動能變化如圖 16 a 所示。波譜動能的最大值從波數 2

表 7：個案 1，沒有地形之 500 mb 預報動能  
收支表 (a) NCAR CFM - NM (b) CWB  
GFS - NM

表 7 ( 連續 )

(a)

N = 2

STAGES TERMS	I a	I b	II a
DEK	-8.35	-0.50	0.42
L 1	-5.30	2.01	5.10
M 1	-1.28	0.42	1.10
C	2.44	0.34	3.39
BVZ	-1.28	1.87	-0.65
BVK	-0.08	0.00	0.00
RES	-2.85	-4.46	-8.52

(b)

N = 3

STAGES TERMS	I a	I b	II a
DEK	-2.55	3.39	-5.42
L 1	4.84	5.92	-5.28
M 1	-1.35	-0.03	-1.23
C	7.15	2.04	-1.90
BVZ	8.94	-10.19	-0.15
BVK	-0.05	-0.01	-0.04
RES	-22.09	5.65	3.17

N = 3

STAGES TERMS	I a	I b	II a
DEK	-0.59	8.26	-7.12
L 1	6.11	8.04	-11.40
M 1	-1.42	0.41	-4.20
C	3.67	1.23	12.61
BVZ	-4.35	-1.25	-0.56
BVK	-0.06	0.05	-0.01
RES	-4.54	-0.32	-3.56

N = 2

STAGES TERMS	I a	I b	II a
DEK	-7.65	-4.27	2.16
L 1	-2.24	-2.26	3.79
M 1	-1.72	0.67	1.60
C	-3.58	-2.99	0.34
BVZ	12.84	-1.34	6.03
BVK	-0.05	0.01	-0.04
RES	-12.90	1.64	-9.54

N = 4

STAGES TERMS	I b	II a
DEK	-1.62	-15.25
L 1	0.30	10.47
M 1	0.58	2.72
C	21.20	26.31
BVZ	-5.74	-9.85
BVK	0.07	0.01
RES	-18.04	-24.41

N = 4

STAGES TERMS	I b	II a
DEK	1.17	1.73
L 1	-3.37	7.83
M 1	2.23	-2.72
C	17.43	18.47
BVZ	4.28	18.84
BVK	0.02	-0.09
RES	-19.42	-40.61

轉移到波數 3 接著又傳到波數 4。同樣地，GFS 的預報也有相同的情形（分別為圖 16b）。CFM 的動能收支表（表 7 a）顯示波數 2 在 I a 期衰減，主要是經由 L<sub>1</sub> 項損失動能，而波數 3 在 I b 階段的成長主要是 L<sub>1</sub> 項提供動能所致，其次是 C 項。

不過波數 3 隨即在 II a 階段衰減主要也是 L<sub>1</sub> 項在損失動能，其次是 RES 項。對於波數 4，在其成長期（II a），C 項及 L<sub>1</sub> 項均提供大量的動能。

表 7b 是 GFS 的動能收支表。表中均顯示波數 2 在 I a 階段的衰減除 BVZ 項外，其他各項均為

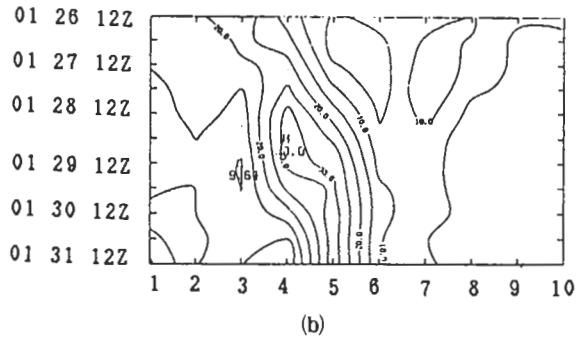
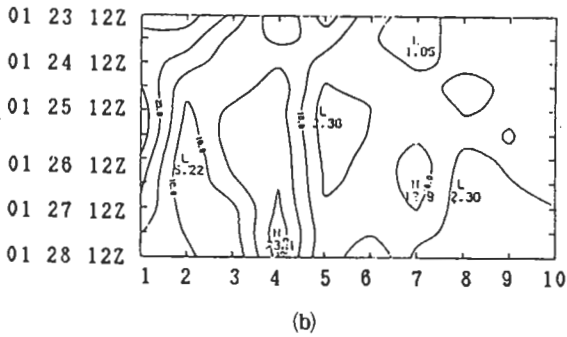
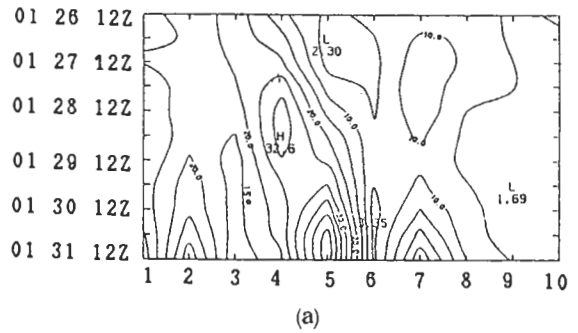
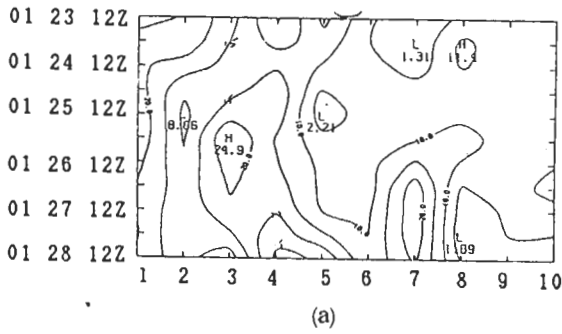


圖16 個案1，沒有地形之500 mb 預報波譜  
動能時間變化圖 ( $m^2 s^{-2}$ ) (a)NCAR  
CFM-NM (b)CWB GFS-NM

圖17 個案2，沒有地形之500 mb 預報波譜  
動能時間變化圖 ( $m^2 s^{-2}$ ) (a)NCAR  
CFM-NM (b)CWB GFS-NM

動能損失項。波數3在Ⅱ b 階段的成長， $L_1$  項及 RES 項是主要的動能供應項。在Ⅱ a 階段的衰減， $L_1$  項是主要的動能損失項。對波數4而言，在Ⅱ b 的成長階段，C 項是主要的動能來源，而在Ⅱ a 的成長階段，C 項、BVZ 項及 $L_1$  項是主要的動能來源。

(2) 個案2 —— 1月26日12Z 之預報動能分析

圖17a — 17b 分別為NCAR CFM及CWB GFS 的預報波譜動能時間變化圖。此個案之動能變化特性與個案1類似，即動能的最大值一直傳向較小尺度的波動上。NCAR CFM的結果(圖17a)顯示動能的最大值由波數3傳向波數4接著傳到波數5。GFS的結果與NCAR相類似。

表8a — 8b 分別為NCAR CFM及CWB GFS 的動能收支表。表8a 顯示NCAR CFM 預

報的結果，波數3在Ⅱ a，Ⅱ b 階段的衰減是 $L_1$  項損失動能所致。波數4在Ⅱ a 階段的成長主要是 $L_1$  項及C 項的貢獻，然而在Ⅱ b 階段的衰減則主要是RES 項及BVZ 項的損失動能所致。波數5在Ⅱ a，Ⅱ b，Ⅱ c 階段一直是處於成長的狀態， $L_1$  項與C 項是動能的供應項，並且C 項之貢獻有隨時間增加的現象，尤其是在Ⅱ c 階段數值最大。

表8a — 8b 分別為NCAR CFM及CWB GFS 的動能收支情形。波數3在Ⅱ a 及Ⅱ b 的衰減階段， $L_1$  項及BVZ 項是主要的動能損失項。波數4在Ⅱ a 階段的成長， $L_1$ 、C 及BVZ 項均有正的貢獻，在Ⅱ b 階段衰減，RES 及 $L_1$  項均是動能損失項，但主要為RES 項。波數5在Ⅱ a 及Ⅱ b 的成長階段，以 $L_1$ 、RES、BVZ 及C 項為主要的動能貢獻項。而在Ⅱ c 階段則維持最大值不再成長是由BVZ 項的提供動能所致。

表 8：個案 2，沒有地形之 500 mb 預報動能收支表

(a) NCAR CFM - NM (b) CWB GFS - NM

(a)

N = 2

STAGES TERMS	b	c
DEK	1.96	5.78
L 1	12.21	12.18
M 1	1.30	-0.05
C	9.23	15.46
BVZ	-7.94	-7.49
BVK	0.03	0.30
RES	-12.88	-14.63

N = 3

STAGES TERMS	a	b
DEK	-2.66	-3.60
L 1	-11.87	-9.48
M 1	-1.95	-0.21
C	9.77	5.17
BVZ	0.74	4.20
BVK	0.00	-0.01
RES	0.66	-3.27

N = 4

STAGES TERMS	a	b
DEK	11.46	-2.67
L 1	8.81	0.01
M 1	2.85	1.03
C	17.34	38.55
BVZ	-7.33	-12.43
BVK	0.14	0.11
RES	-10.36	-29.94

N = 5

STAGES TERMS	a	b	c
DEK	5.56	12.02	11.60
L 1	4.07	5.45	4.86
M 1	0.16	1.02	-0.56
C	4.60	7.63	35.45
BVZ	-0.15	-0.98	-6.36
BVK	0.00	-0.01	0.19
RES	-3.12	-1.08	-21.98

表 8 ( 連續 )

(b)

N = 2

STAGES TERMS	b	c
DEK	-2.77	0.92
L 1	1.25	5.27
M 1	1.05	0.21
C	5.89	-1.41
BVZ	7.59	1.31
BVK	0.03	-0.22
RES	-18.57	-4.25

N = 3

STAGES TERMS	a	b
DEK	-4.97	-2.66
L 1	-10.43	-3.94
M 1	-2.04	-1.40
C	-0.05	-0.33
BVZ	-10.46	-13.87
BVK	-0.19	-0.01
RES	18.20	16.90

N = 4

STAGES TERMS	a	b
DEK	8.70	-0.13
L 1	9.69	-0.28
M 1	2.29	2.52
C	9.60	20.86
BVZ	11.10	14.48
BVK	-0.09	0.06
RES	-23.90	-37.77

N = 5

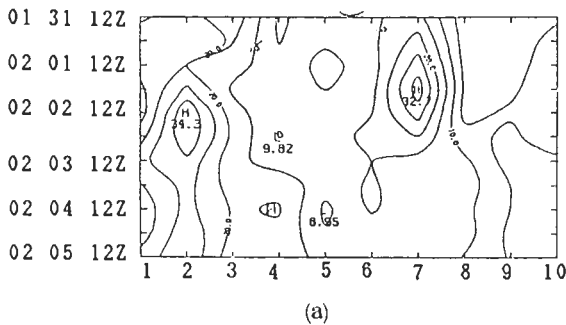
STAGES TERMS	a	b	c
DEK	4.84	10.65	1.96
L 1	1.23	3.68	0.15
M 1	0.10	0.30	0.74
C	0.73	1.29	4.62
BVZ	1.29	2.35	21.66
BVK	-0.01	-0.01	-0.05
RES	1.50	3.03	-25.17

從上述二個個案，有地形與沒有地形預報結果的比較，很顯然地得到一個結論，即寒潮爆發時，有地形之模擬波數 3 能保持其最大動能值。當沒有地形時，動能會從行星尺度的波數 2、3 傳到較小尺度的波數 4、5。

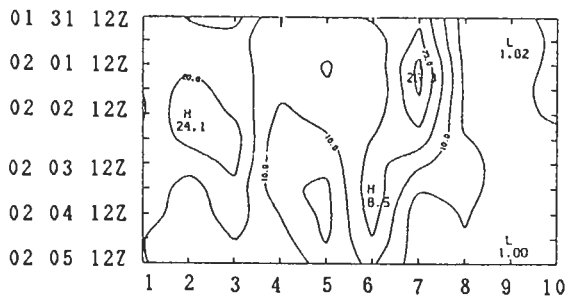
### (3) 個案 3 —— 1 月 31 日之預報動能分析

圖 18a 為 NCAR CFM 預報的波譜動能時間變化圖。圖中顯示波動的動能最大值由波數 3 回到波數 2，此結果與有地形之預報結果（圖 10 b）十分相似。其動能的收支情形（表省略）亦與有地形者（表 5 a）十分近似。

GFS 預報的波譜動能變化如圖 18b 所示，其動能最大值亦有由波數 3 傳到波數 2 的現象。



(a)



(b)

圖 18 個案 3，沒有地形之 500 mb 預報波譜動能時間變化圖 ( $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ) (a) NCAR CFM-NM (b) CWB GFS-NM

## 六、結論

由 Tsay (1986) 的研究成果得知，寒潮合成個案的 500 mb 的波譜動能在寒潮爆發前 36 小時到爆發後 12 小時期間，波數 3 具有最大動能值。又由於 1978—1979 冬季最強寒潮個案也具有類似的波譜動能變化特性，Tsay (1986) 曾詳細分析此個案期間 (1979 年 1 月 23 日至 2 月 8 日) 的波譜動能收支情形。本文主要是利用 NCAR CFM 及 CWB GFS 來模擬此個案之變化，一方面用以進一步了解寒潮爆發之能量變化情形，一方面校驗 CWB GFS 模式之預報能力。

NCAR CFM 模式是一個波譜模式，此種模式在數值方法上較優於網格點模式，利用此模式來模擬 1979 年最強寒潮的個案，並從模擬的結果計算 500 mb 的波譜動能，同時還做了三種測試，即一為完整模式 (即有地形之模式)，二為沒有地形之模式，三為沒有大氣輻射作用之模式。我們發現沒有大氣輻射作用的結果與完整模式的結果相似，於是我們認為大氣輻射並不是寒潮爆發的重要機制。從有地形之模式的模擬結果發現在寒潮爆發期間波數 3 的確具有最大動能值，甚至於在爆發的當時，波數 3 的動能再度成長。其成長的動能來源是先經由非線性交互作用，再經由位、動能轉換作用取得動能。

另外，透過沒有地形的模擬，發現北面冷高壓系統在沒有西藏高原的阻擋之下逐漸往南移動，其勢力也逐漸減弱，台灣地區寒潮爆發的現象並不發生，並且由 500 mb 波譜動能的分析上發現寒潮爆發前及爆發期間，動能會從行星尺度的波數 2、3 傳到較小尺度的波數 4、5 上。此現象主要是因為在沒有西藏高原的阻擋下，低壓槽線會在  $70^\circ$ — $80^\circ\text{E}$  附近南移，然後東移至  $90^\circ\text{E}$  附近滯留，而此時低壓槽的尺度即為波數 5。我們認為寒潮爆發期間，西藏高原具有阻擋系統在  $70^\circ$ — $90^\circ\text{E}$  間南下，因而保持波數 3 具有最大動能值的作用。當寒潮過後，動能的最大值又回到波數 2，此結果則在有無地形的模擬中均存在。

為測試中央氣象局正在發展全球數值天氣預報模式，我們採用此模式在1988年3—4月的形式來模擬相同的個案，並同樣地計算500 mb的動能波譜。所得到的結果雖然遜於NCAR CFM模式，但仍然能模擬出主要的變化，並且從天氣圖的分析上發現該模式能預報出寒潮爆發的現象。一般而言，CWB GFS模式的結果分析發現位動能轉換項普遍偏低，位能的測邊界通量偏大。另外，在沒有地形的模擬結果發現，GFS模式與CFM模式相近似，而有地形的模擬結果則顯示CWB GFS模式與NCAR CFM相差較多。

## 誌謝

我們感謝審查者之細心閱讀與建議。本文是在國科會研究計畫編號 NSC77-0202-M002-07 補助下完成的。

## 參考文獻

- Bourke, W., B. Mcavaney, K. Puri and R. Thurling, 1977: Global modeling of atmospheric flow by spectral methods. In *Methods in Computational physics*. Vol. 17, General Circulation Models of the Atmosphere, Academic Press, 267-324.
- Haltiner, G.J. and R.T. Williams, 1980: Numerical prediction and dynamic meteorology. John Wiley and Sons, p. 226.
- Liou, C.-S., T.E. Rosmond, C.-T. Terng, W.-S. Kau, C.-Y. Tsay, J.-S. Chen, J.-H. Chen, M.A. Rennick, 1989: Global forecast system at Central Weather Bureau, in preparation.
- Manabe, S., T.B. Terpstra, 1974: The effects of Mountain on the general circulation of the Atmosphere as identified by numerical experiment. *J. Atmos. Sci.*, 31, 3-42.
- Mintz, Y., 1965: Very long-term globe integration of the primitive equations of atmospheric motion. *WMO, Tech., Note, No. 66*, 141-167.
- Ramanathan, V., E.J. Pitcher, R.C. Malone and M.L. Blackman, 1983: The response of a spectral general circulation model to refinements in radiative processes. *J. Atmos. Sci.*, 40 (in press).
- Saltzman, B., 1957: Equation governing the energetics of the large scale of atmospheric turbulence in the domain of wavenumber. *J. Meteor.*, 14, 513-523.
- Saltzman, B., 1970: Large-scale atmospheric energetics in the wavenumber domain. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 8, 289-302.
- Tsay, C.-Y., and S.-K. Kao, 1978: Linear and nonlinear contribution to the growth and decay of the large-scale atmosphere wave and jet stream. *Tellus*, 30, 1-14.
- Tsay, C.-Y., 1986: On the role of the barotropic process in winter season monsoon cold surges, *Papers Meteor. Res.* Vol. 9, No. 1, 46-62.
- Williamson, D.L. and G. Williamson, 1984: Circulation statics from January and July simulation with the NCAR community climate model (CCMOB), NCAR technical Note.
- Williamson, D.L., 1983: Description of NCAR Community Climate Model (CCMOB), NCAR, technical Note.