

# 梅雨季節中緯度大尺度動力過程： 渦流與平均緯流的交互作用

\*王國英

\*\*周仲島

\*中央氣象局資訊中心

\*\*台灣大學大氣科學研究所

## 摘 要

本文的目的在於應用"ELIASSEN-PALM(EP)剖面"(EDMON, HOSKINS AND MCINTYRE, 1980)研究渦流和平均緯流之間動力上的交互作用。利用中央氣象局全球模式客觀分析場的網格資料, 分析1992年和1991年梅雨季節(5月和6月)中緯度非線性斜壓波的生命史, 利用 E-P 定理和轉換過的尤拉平均緯向方程, 研究平均緯流和渦流之間的交互作用。

研究顯示, 個別斜壓波生命史中成長與消散的速率因每個擾動生命史的不同在 E-P剖面上表現出不同的動力特徵。本文的一個重要結論是在梅雨季節, 一些中緯度的斜壓擾動與理論研究的結果(SIMMONS AND HOSKINS ; 1978, 1980)有相當的一致性。

## 一、前 言

在準地轉架構下的斜壓不穩定理論能夠用來解釋綜觀尺度擾動的動力過程(HOLTON, 1992), 圖 1 扼要的說明一個典斜壓波的生命史, 透過斜壓的擾動, 大氣在南北方向做空氣質量和能量的交換, 南北方向斜壓帶的強度因能量交換的持續進行而逐次減弱, 在斜壓擾動生命史的末期, 由於波動振幅減弱, 使得西風波又回到平均緯流的狀態。

由過去的一些梅雨研究(陳與周, 1986, 1987)結果顯示, 中緯度西風帶斜壓擾動的成長似乎會影響較低緯大氣的動力過程。因此一個很有趣的問題是: 究竟在梅雨季節時, 中緯度西風帶波動的動力特徵為何?

關於斜壓波在不同環境下的生命週期典型的理論研究以 SIMMONS AND HOSKINS (1978, 1980) 最具有代表性。SIMMONS AND HOSKINS (1978) 利用原始方程進行斜壓波非線性成長的積分實驗, 他們對四種不同的緯流, 每種緯流的熱力場都不同進行積分, 研究緯流風場在不同的斜壓分量下非線性斜壓波的生命史而 SIMMONS AND HOSKINS (1980) 同樣地利用上述模式, 研究非線性斜壓波在不同正壓分量, 但斜壓相同的情形下, 其成長與消散受正壓影響情形。

從他們的研究當中發現, 在斜壓波生命過程中各個階段, 渦流熱量通量和渦流動量通量的特徵、強度和位置會因基本流的強度與位置其斜壓分量和正壓分量強度的不同而有所不同。

EDMON, HOSKINS AND MCINTYRE (1980) 將渦流動量通量和渦流熱通量的效應表示在"ELIASSEN-PALM (EP) 剖面上, 利用EP剖面上的向量和EP通量的輻合, 輻散, 經由轉換過的尤拉緯向平均方程, 來研究渦流和平均緯流間動力上的交互作用。

EP通量的輻散度代表以下的性質: 1、在緯向上渦流對平均緯流的作用; 2、緯向平均的渦流位渦通量; 3、準地轉波動活躍的密度。EP向量則代表以下的性質: 1、水平分量代表渦流動量通量; 2、垂直分量代表渦流熱通量; 3、在準地轉動力下, 由向量的傾斜程度比較渦流熱通量和渦流動量通量相對的重要性。

## 二、EP 定理和轉換過的尤拉緯向平均方程

EP 理論的發展過程可參考ANDREWS AND MCINTYRE (1976), EP定理和轉換過的尤拉方程詳細的推導過程可參考 EDMON, HOSKINS AND MCINTYRE (1980)與 ANDREWS AND MCINTYRE (1976)。國內對EP理論有完整介紹的研究首推周與李 (1986)。

EP 理論的經典之作為 ELIASSEN AND PALM (1976), 他們提出一個用來研究平均緯流在任意水平風切和垂直風切情形下擾動成長的基本定理。利用一個在經向切面上的向量  $F$  來說明此定理, 其中向量  $F$  是由向北的渦流熱通量與渦流動量通量組成。

在準地轉假設,  $\beta$  平面, 同時垂直座標為  $P$  情形下

$$F = \{F_{(v)}, F_{(w)}\},$$

$$\text{其中 } F_{(w)} = -\overline{v'u'},$$

$$F_{(v)} = f\overline{v'\theta'}/\partial_p.$$

"——" 代表緯向的平均, " , " 代表相對於緯向平均的變動量。

EP 定理是說:  $F$  的輻散度

$$\nabla \cdot F = \frac{\partial F_{(w)}}{\partial y} + \frac{\partial F_{(v)}}{\partial p}$$

對於一個穩定, 保守且波狀的擾動為零。由ANDREWS AND MCINTYRE (1976), 轉換過的尤拉緯向平均方程在準地轉的近似情形下

$$\partial \bar{u} / \partial t - f \bar{v}^* - \bar{\mathcal{F}} = \nabla \cdot F,$$

$$f \bar{u}_p - R \bar{\theta}_p = 0,$$

$$\bar{v}_p^* + \bar{\omega}_p^* = 0,$$

$$\partial \bar{\theta} / \partial t + \bar{\theta}_p \bar{\omega}^* - \bar{\mathcal{Q}} = 0,$$

其  $(\bar{v}^*, \bar{\omega}^*)$  稱為剩餘環流, 定義為

$$\bar{v}^* = \bar{v} - \partial(\overline{v'\theta'}/\partial_p)/\partial p,$$

$$\bar{\omega}^* = \bar{\omega} + \partial(\overline{v'\theta'}/\partial_p)\partial y,$$

準地轉理論的位渦  $q'$  與 EP 通量的關係為

$$\nabla \cdot F = \overline{v'q'},$$

其中

$$q' = v_x' - u_y' + f(\theta'/\partial_p)_p.$$

在準地轉理論下, 位渦  $q'$  的演化與位渦通量的關係為  $\bar{q}_t + \overline{(v'q')}_p = 0$ 。

因此一個非線性斜壓波的生命史可從E-P剖面上, 看到其在不同的階段擾動的成長和擾動與平均緯流間動力上的交互作用。如圖2(a)所示, 在第0天時, 這時擾動的成長主要來自於中低層的斜壓分量, 由於南北方向的冷暖平流使得渦流熱通量有淨得向上作用, 同時渦流開始長大, 而平均緯流  $\bar{u}$  的值減小, 渦流從平均緯流的可用位能裡汲取能量透過垂直上升運動的斜壓轉換 (周與李1986) 變成渦流成長所需的渦流擾動動能。

在第5天時(圖2(b)) 渦流成長最快的地方是發生在中高層約300mb附近, 這時我們看到高層渦流的斜壓分量對平均緯流的作用與低層渦流對平均緯流的作用恰好相反, 在高層渦流使西風減速, 在低層渦流使西風加速, 因此渦流的效應在減低垂直的風切, 從另一個角度來說, 大氣的斜壓不穩定度慢慢的被釋放。

第5天可說是非線性斜壓波斜壓成長達到成熟的時間。在高層此時我們發現正壓的作用開始出現, 到了第8天(圖2(c)), 渦流動量通量對平均緯流的作用大於斜壓對平均緯流的作用, 此時, 擾動透過正壓能量的轉換過程 (周與李, 1986) 渦流從平均流裏汲取動能而長大。從整個斜壓波生命過程的平均 E-P 剖面(圖2(d))我們歸納以下幾點結論:

1: 在低層的  $\overline{v'q'} > 0$ , 高層  $\overline{v'q'} > 0$ ,

高低層的配置與斜壓不穩定的位渦結構特徵一致 (HOSKINS, MCINTYRE AND ROBERTSON, 1985; ROBINSON, 1989)

2: 從整個生命史的平均來看, 高層逆位渦梯度正

的位渦通量的貢獻主要是透過渦流與緯流間的正壓過程。

3：如果我們將準地轉斜壓不穩定理論，準地轉位渦方程 (HOLTON, 1992) 和E-P理論整合放在一張圖上用以說明斜壓波的動力過程, 那就是圖2所精確傳達的動力訊息。

E-P 剖面精采絕倫之處就在於它能夠利用簡單的向量和純量的輻散度把準地轉架構下位渦的想法和斜壓不穩定理論統整而將動力過程乾淨的呈現在眼前。

利用以上E-P 剖面的好處，我們將探討在1991年和1992年的5月和6月一些斜壓波動力上的性質。

### 三、資料，E-P 剖面的製作和個案的選取

利用中央氣象局全球模式客觀分析場每天二次(00Z, 12Z)的網格資料，計算北半球的渦流動量通量和渦流熱量通量；E-P剖面的製作完全採用EDMONS (1980) 相同的方法與規格；個案的選取則採用SIMMONS AND HOSKINS (1978, 1980) 討論的方法，先計算各個月平均動能和渦流動能隨時間的變化(圖3)，再從曲線變化上確認明顯的斜壓波生命史。此文中我們做了以下兩個個點的分析：

- 1 一個較長生命期非線性斜壓波的生命史：910501-910510 (圖4)。
- 2 一個較短生命期非線性斜壓波的生命史：920602-920607 (圖5)

### 四、較長生命期的非線性斜壓波

在第1天時(圖4(b))，中緯度700MB以下主要為EP通量輻散處，由南往北上升暖空氣的強度取代冬季南下的冷空氣成為中低層渦流對緯流斜壓作用的主控，因此低緯度環流的強弱決定了低層鋒面位置偏北或偏南 (陳與周, 1988)。

第二天時較北的一支開始往上發展，可見此時低緯度環流帶來上升的暖空氣主要是對中高緯度的作用，因此若副熱帶高壓是主要的分量，則此時氣流應是以西南上升氣流為主。第3天我們看到副熱

帶高壓的範圍往西延伸，因為此時中低緯度低層的斜壓作用明顯增加，而中高緯中對流層的斜壓作用範圍加大。

仔細地再檢查從DAY1到DAY4中緯度中高層大氣渦流與平均緯流間動力上的交互作用，可以得以下很明顯的特徵：

- 1、渦流與平均緯流的斜壓交互作用，DAY3以前是近似線性的行為，但從DAY3到DAY4則呈現非線性的成長。
- 2、渦流對平均緯流的斜壓作用一直在使平均緯流加速，換句話說，緯流從渦流獲得能量。
- 3、中緯度中高層渦流一方面透過斜壓的過程從平均流裏獲得可用位能並將其轉換成渦流本身成長所需的渦流擾動動能；另一方面渦流在成長的同時又把渦流動能透過正壓的過程將能量回到高層的西風緯流，整個斜壓波的斜壓和正壓能量轉換過程相似於其它的研究 (HOLTON, 1992, OORT AND PEIXOTO, 1974) 結果。

在非線性成長達到最大時 (圖4(h), 4(l))，渦流和平均緯流間正壓的交互作用逐漸加強 (SIMMONS AND HOSKINS 1980), DAY5 (圖4(l)) 時，較低緯度中高層E-P通量的輻散度為負值，緯流透過正壓的過程將動能傳給渦流，平均緯流被減速，西風波擾動的振幅增大；從位渦的觀點來看，在中高層有很大逆位渦梯度的位渦通量，北風把高緯度較大的位渦往低緯度平流，對於一個成熟的斜壓波，此時波動振幅最大，北風伴隨深槽將位渦往南傳送，空氣南北的質量與能量交換最大，在DAY6時 (圖4(l)) 渦流擾動一方面繼續獲得平均緯流的能量持續成長，同時渦流流往南運動。將質量上較冷的空氣，動力上高位渦值的流體往低位渦背景區域的低緯度平流，整個大氣能量的交換過程，斜壓不穩定和正壓不穩定的動力過程，位渦的動力，從E-P剖面上清楚地看到完整的經過。

DAY7時(圖4(n))斜壓波進入囚籠的階段，也就是說渦動擾動在與西風波的母體脫離，(PALMEN AND NEWTONS, 1969) 同時在較低緯度近似滯留，其能量漸次的減弱，到了DAY 10 (圖4(p)) 擾動幾乎完全消散，這個同時，我們注意到中緯度的中低層又有一新的斜壓波開始在發展。

## 五、較短生命期的非線性斜壓波

第四部份我們利用E-P剖面的性質充份地討論一個週期約為10天的斜壓波生命史，由我們討論的過程中可以清楚地看到非線性斜壓波發展、成熟與消散各個生命過程中緯流與渦流間斜壓和正壓動力上的交互作用，能量的轉換以及在準地轉架構下的斜壓不穩定理論和位渦的動力想法。這些理論、想法，過程完整的經由E-P剖面呈現出來，接下來，我們將利用已經獲得的經驗再去分析一個週期約為7天的非線性斜壓波，兩個分析方法上的差別為我們不做每天的E-P剖面分析。而是由渦流擾動動能量隨時間變化情形，將斜壓波分成非線性斜壓成長階段，指數成長階段，近似正壓消散等3個過程(SIMMONS AND HOSKINS, 1980)分析其E-P剖面的特徵。最後並對整個斜壓波的生命史分析其平均E-P剖面的特徵。這樣做的目的是希望將由理論研究(例如SIMMONS AND HOSKINS 1978, 1980)所獲得關於非線性斜壓波在不同環境下成長的概念模式，實際看真正大氣裡的斜壓波，當我們將其按動能的演化劃分為幾個階段後，能否告訴我們更多動力上的訊息。

從斜壓波非線性表現在E-P剖面的特徵(圖5)，我們很驚奇的發現結果與HOSKINS(1983)的結果極為類似，在非線性成長的過程，渦流熱量通量對平均緯流的斜壓作用顯然的是此過程中的主要動力機制，平均緯流因斜壓擾動的增加，由於中高層渦流擾動動能的增加，而使得緯流的風速減少，渦流繼續成長，這就好像一個西風槽繼續往低緯度加深，在近乎以指數成長的階段(圖5(b))，非線性成長達到最大，同時渦流一面往低緯度移動，一面透過正壓的過程從平均緯流裡汲取擾動所需的動能，在中高緯度的中高層有很強逆位渦梯度的位渦通量，北風分量將位渦往南平流形成中高層位渦局部地區的極大值；在中低層的E-P通量為正值，因此高層渦流的下方有正的位渦通量，因此，高層的擾動渦流持續在長大，而使得平均緯流的風速減少，至於低層，則是渦流能量還給緯流，使低層緯流的風速增加，故渦流對整層大氣淨的效應在於減少垂直的風切不穩定，從另外一個角度看，渦流與平均緯流間的交互作用目的在於減低平均緯流垂直上的風切不穩定度。

斜壓波在非線性成長的階段，渦流擾動所需的能量主要是來自平均緯流的可用位能，斜壓波擾動振幅的增加，完全是由渦流對平均緯流的斜壓作用，此時斜壓的機制主控斜壓波的成長，因而擾動能以非線性的速率快速成長，從整層大氣夾看，剛開始是中低層的擾動漸漸的往中高層傳播，在高層擾動發展完成後，低層的能量又由擾動動能到平均緯流的動量，因此渦流在高層使西風減速在低層使平均緯流加速。

在近似正壓的消散階段(圖5(c))，中低緯度的高層有明顯緯流與渦流的交互作用，透過正壓能量轉換的機制，擾動渦流往低緯度成長。

整個非線性斜壓波生命史的平均E-P剖面特徵(圖5(d))表現出與理論研究結果非常完美的相似，這說明了非線性斜壓不穩定理論對一部份大氣斜壓波的生命史還是可以得到非常好的解釋，而從另外一個角度來看，即使非線性斜壓波的成長相對於複雜真實的大氣情形也只是一個簡單的例子(SIMMONS AND HOSKINS, 1978)。

## 六、結論

本文是我們一系列深入思考梅雨季節大尺度動力過程的第一部份，我們研究的動機起源於以下兩個非常有趣的問題：

- 1、究竟大尺度的動力過程對梅雨季節的天氣系統有何作用？
- 2、這種作用是以何種過程進行？換句話說大尺度的動力與梅雨季節天氣系統的動力是如何進行交互作用？

要瞭解這段期間大尺度的動力過程，就必需先對中緯度西風帶非線性斜壓波的生命史做更深入的分析，很幸運地EP剖面提供研究使用強而有力的工具。不管是從物理上或是從數學上的觀點，EP剖面與轉換過的尤拉緯向平均方程都帶給研究人員動力上深一層的體會。

EP剖面上等值線在空間上隨時間的變化情形，傳達以下非常重要的動力訊息：

- 1、渦流的成長或消散；而尤拉緯向平均方程說這就

代表平均緯流的減弱或加強。

## 2、渦流與平均緯流間交互作用的程度。

從研究的結果我們得到一個明顯的結論：在梅雨季節期間中緯度一些非線性斜壓波的成長與消散，它們的生命史表現在E-P 剖面上的特徵與非線性不穩定理論的研究結果有相當的一致性。這點結論與 EDMON, HOSKINS AND MCINTYRE (1980)的結果相同。

我們用表 1 總結我們所獲得的結論。

## 誌 謝

本文進行當中，感謝許晃雄教授寶貴的意見，所有的計算均在中央氣局資訊中心的 HP 710 與 HP 750 工作站上進行。最後要感謝林金鳳小姐辛苦的打字才使得本文得以完成。

## 參 考 文 獻

- 周仲島與李淑貞, 1986: 渦流運動與季節緯向平均環流的診斷研究--EP 剖面圖的應用. 大氣科學, 14, 33 - 52
- 陳泰然與周仲島, 1987: 中美合作東亞季風研究計畫(二): 臺灣梅雨東亞大尺度環流之年際變化與系統間變化. 臺大大氣科學研究所研究報告 NTUATM-1987-06, 171 頁.
- 陳泰然與周仲島, 1986: 中美合作東亞季風研究計畫(一): 臺灣梅雨東亞大尺度環流之年際變化. 臺大大氣科學研究所研究報告 NTUATM-1986-05, 213 頁.
- Andrews, D.G., and M.E. McIntyre, 1976: Planetary waves in horizontal and vertical shear: the generalized Eliassen - Palm relation and the mean zonal acceleration. J. Atmos. Sci., 33, 2031-2048

- Edmon, H.J., B.J. Hoskins and M.E. McIntyre, 1980: Eliassen-Palm cross sections for the troposphere. J. Atmos. Sci., 37, 2600-2616
- Eliassen, A., and E. Palm, 1961: On the transfer of energy in stationary mountain waves. Geofys. Publ., 22, No. 3, 1-23
- Henderson-Sellers, A. and P.J. Robinson, 1986: Contemporary Climatology. John Wiley & Sons, Inc., New York. 439pp.
- Holton, J. R., 1992: An introduction to dynamical meteorology. 3rd ed., Academic Press, 511pp
- Hoskins, B.J., M.E. McIntyre and A.W. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. Quar. J. Roy. Meteor. Soc., 111, 877-946
- Hoskins, B.J., and R.P. Pearce, 1983: Large-scale dynamical processes in the atmosphere. Academic Press, 397pp
- Oort, A.H., and J.P. Peixoto, 1974: The annual cycle of the energetics of the atmosphere on a planetary scale. J. Geophys. Res., 79, 2705-2719
- Palmen, E., and C. W. Newton, 1969: Atmospheric circulation systems. Academic Press, 603pp
- Robinson, W. A., 1989: On the structure of potential vorticity in baroclinic instability. Tellus, 41, 275-284
- Simmons, A.J., and B.J. Hoskins, 1980: Barotropic influences on the growth and decay of nonlinear baroclinic waves. J. Atmos. Sci., 37, 1679-1684
- Simmons, A.J., and B.J. Hoskins, 1978: The life cycle of some nonlinear baroclinic waves. J. Atmos. Sci., 35, 414-432

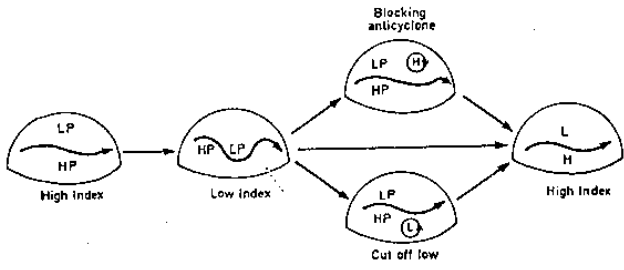
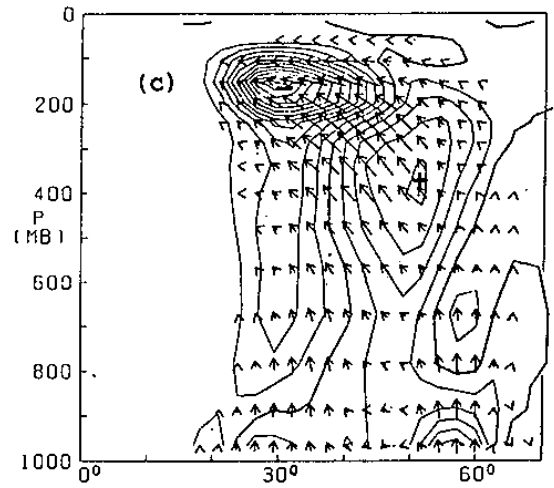
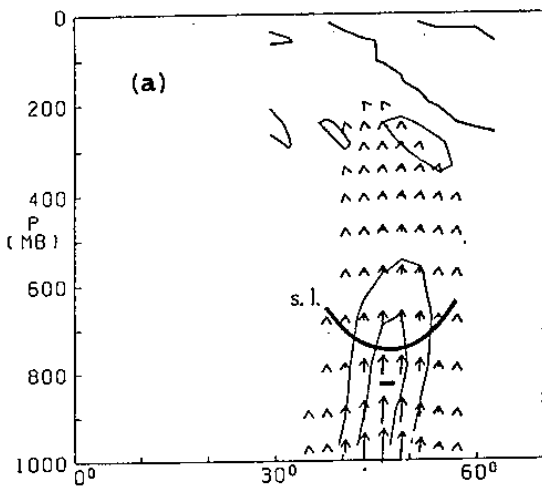


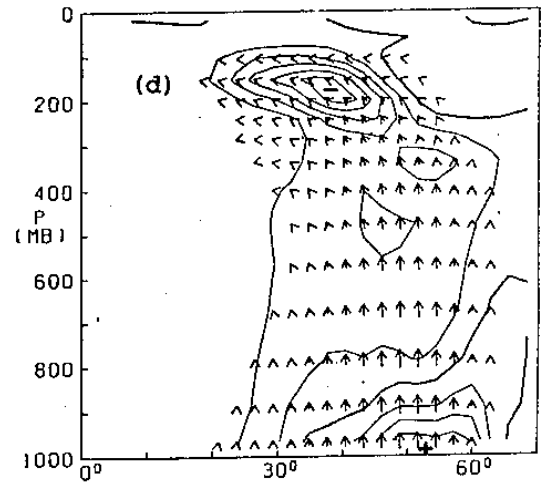
圖 1：一個典型斜壓波生命史的概念模式  
( 摘自:HENDERSON-SELLERS,1986)



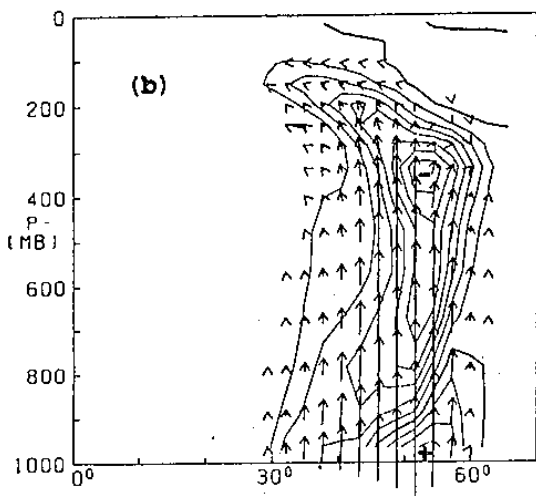
TOTAL E-P FLUX DIVERGENCE  
DAY 8.00



TOTAL E-P FLUX DIVERGENCE  
DAY .00



TOTAL E-P FLUX DIVERGENCE  
TIME-AVERAGE



TOTAL E-P FLUX DIVERGENCE  
DAY 5.00

圖 2：一個理論研究的非線性斜壓波生命史  
( 摘自:EDMON,1980)

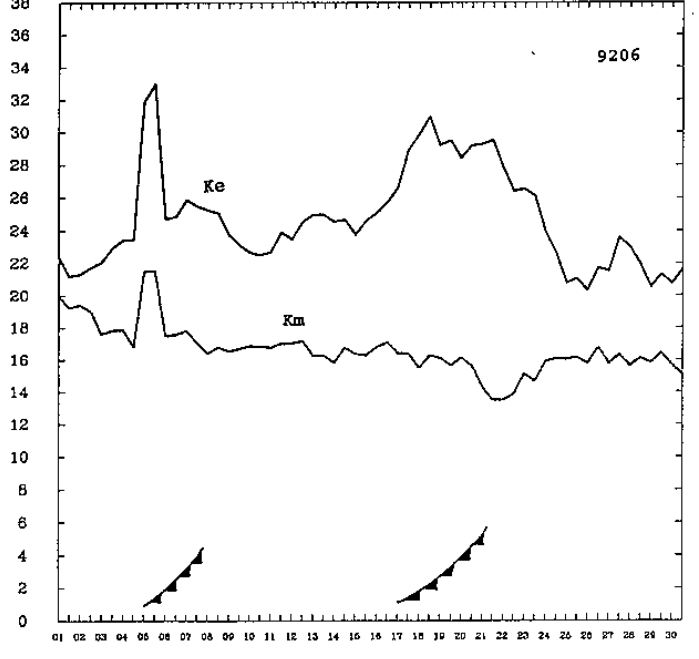
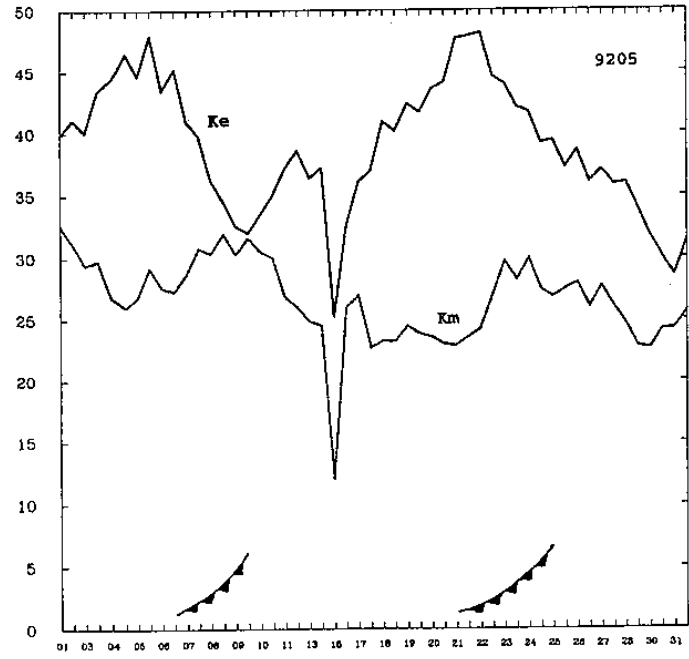
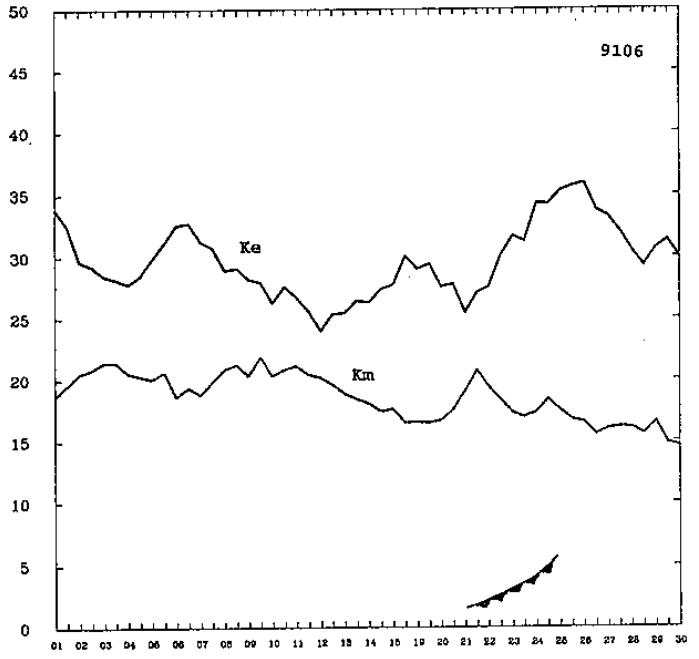
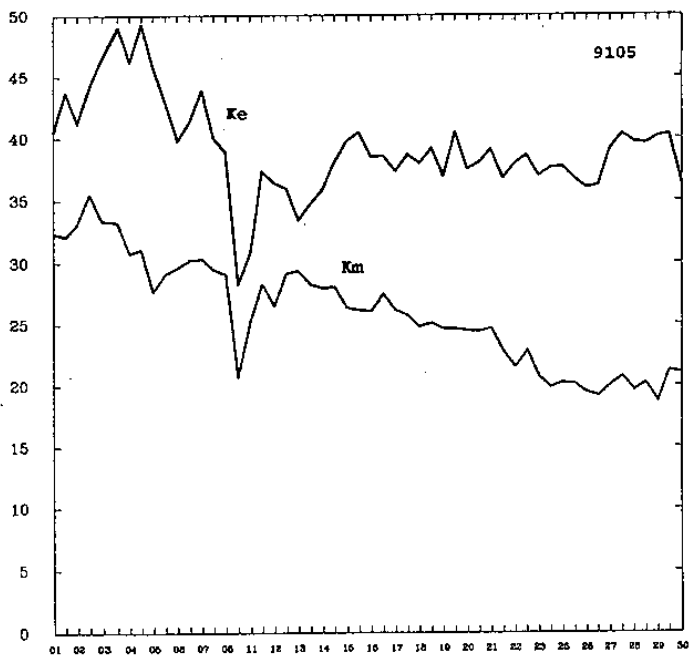
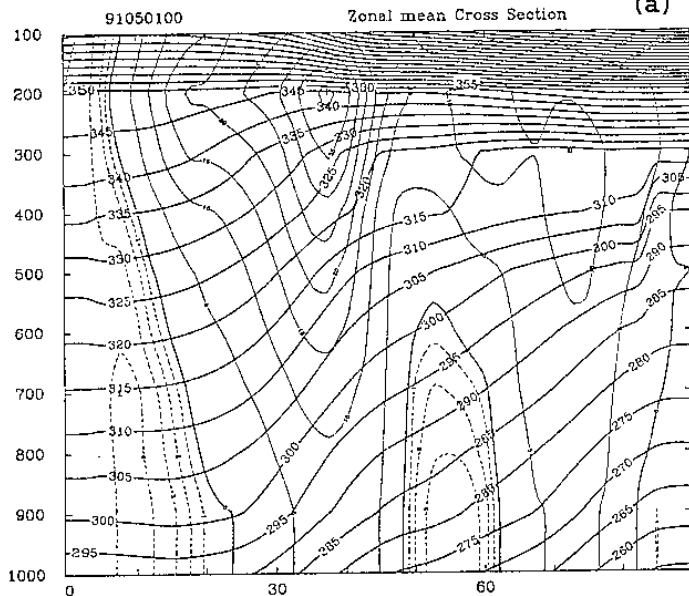
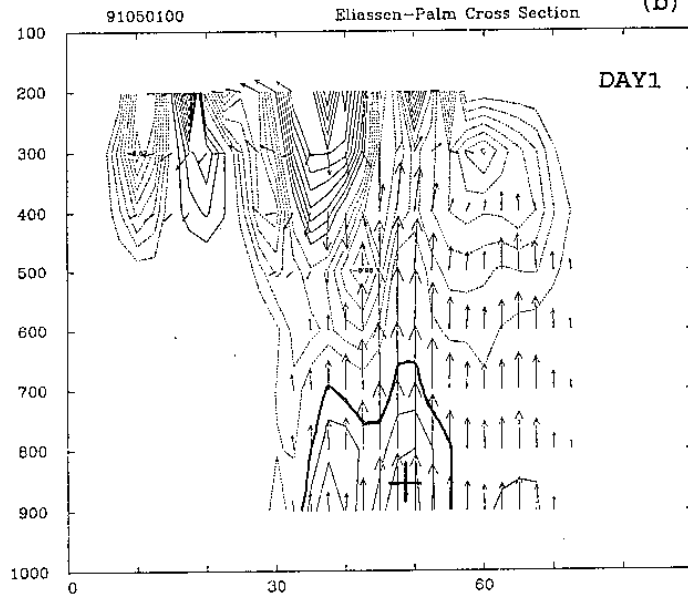


圖 3 : 1991 年與 1992 年五月和六月渦流擾動動能 (Ke) 與平均緯向動能 (Km) 的每日變化曲線。橫座標為日期, 縱座標為能量 ( $J \cdot 10^{(-5)}$ ) / 單位面積。鋒面記號標示通過臺灣的主要鋒面系統。

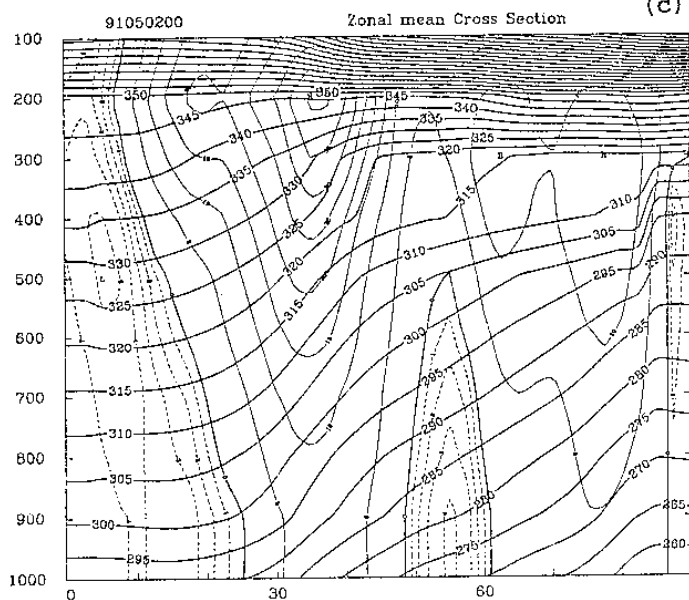
(a)



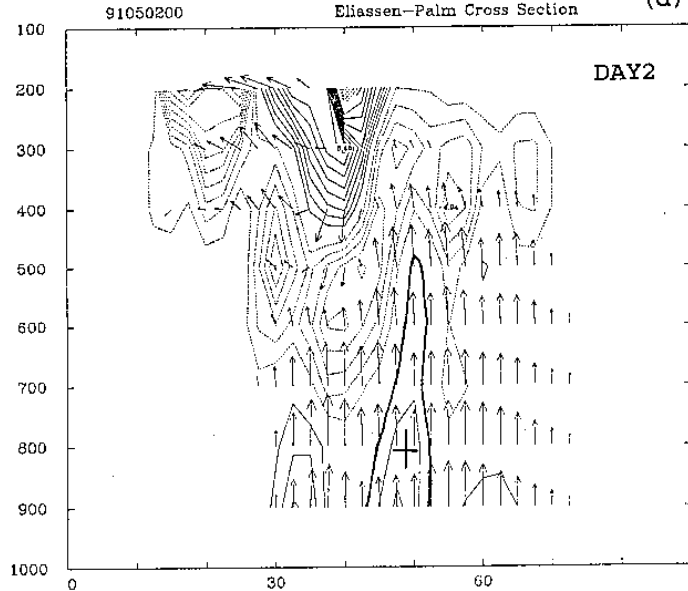
(b)



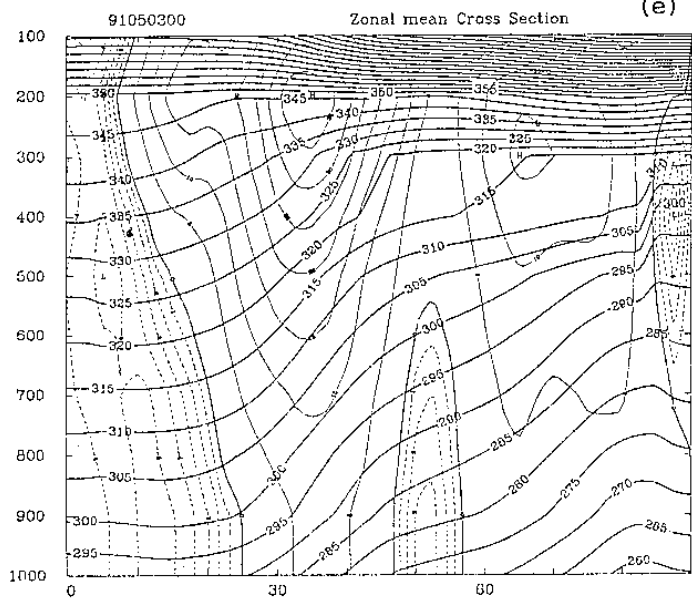
(c)



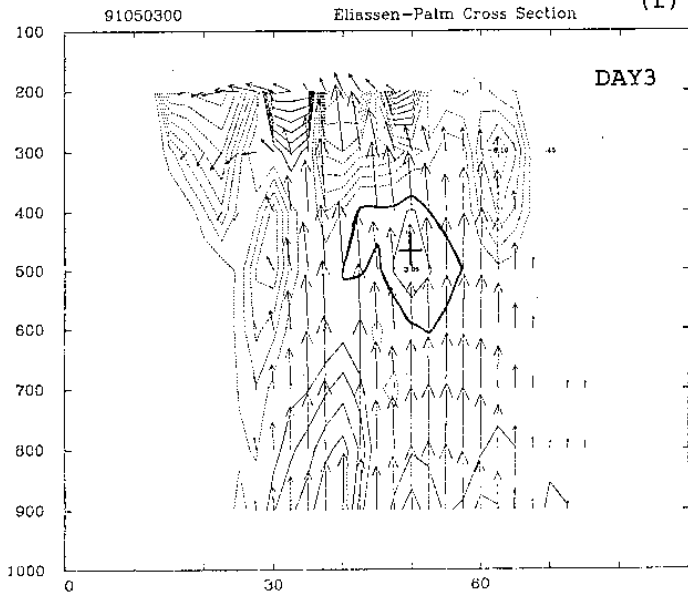
(d)



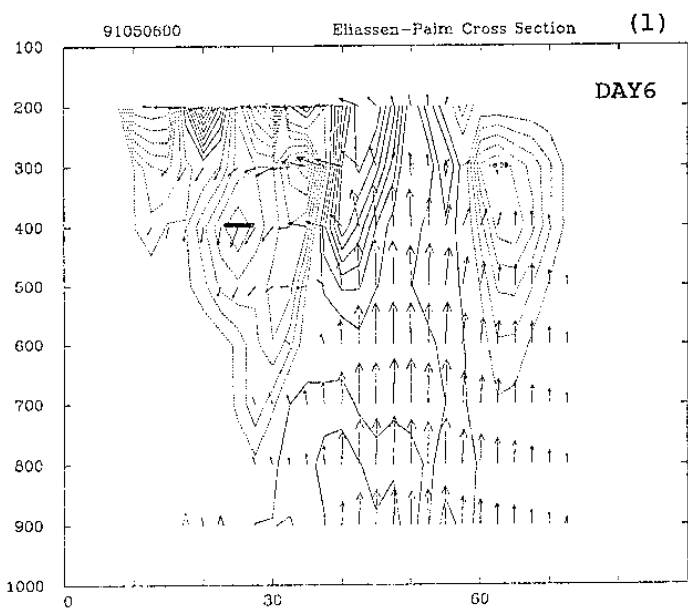
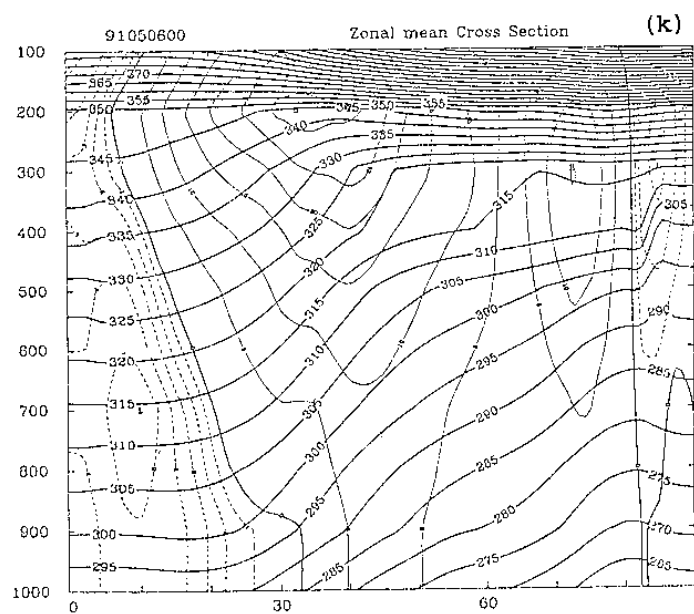
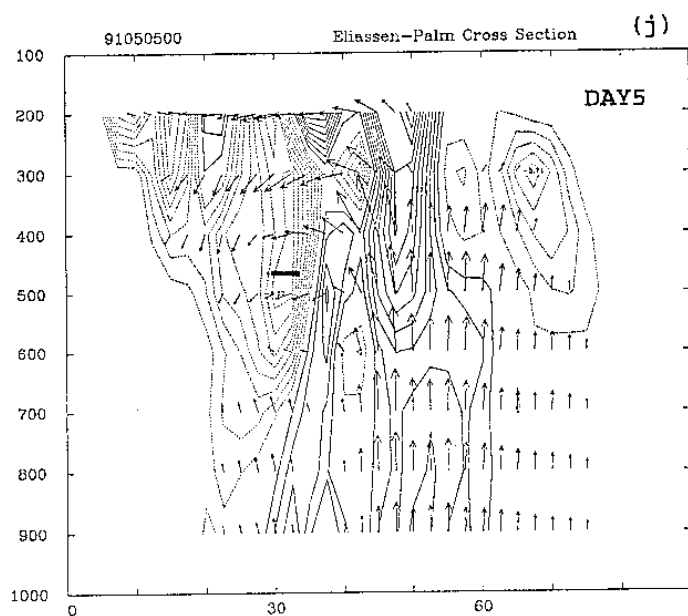
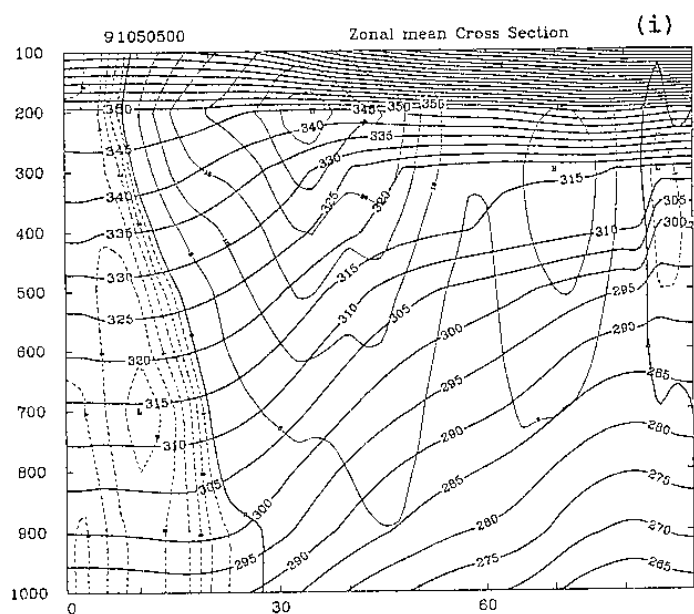
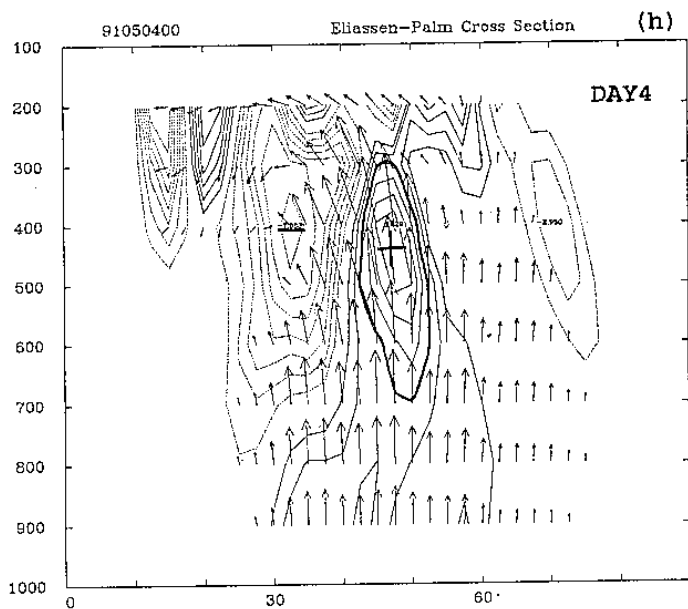
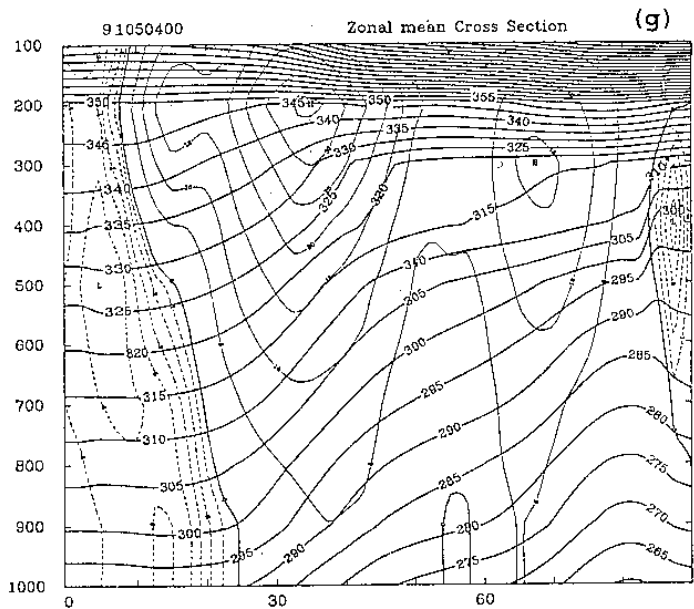
(e)



(f)







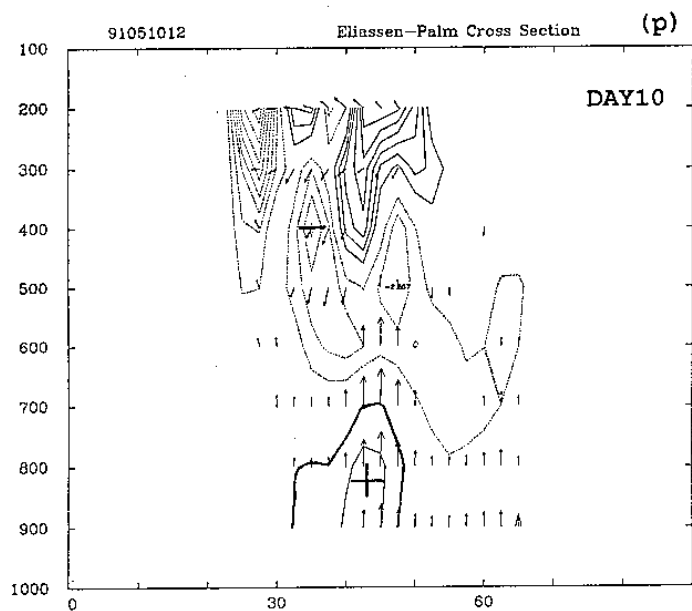
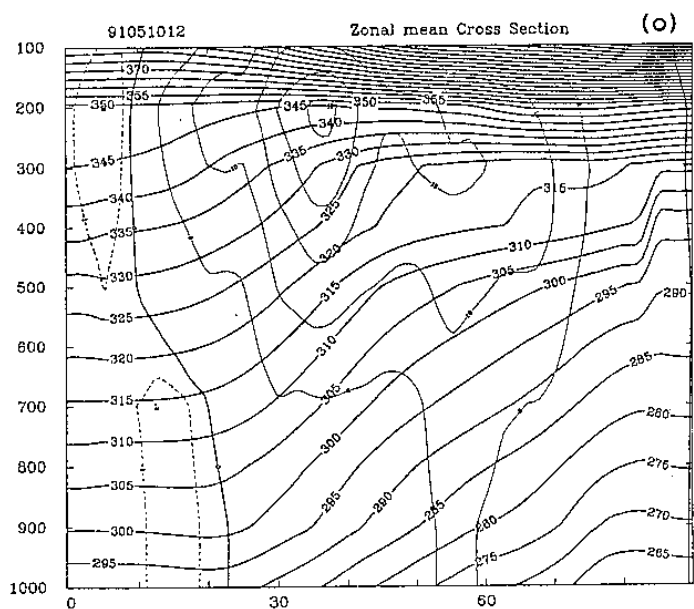
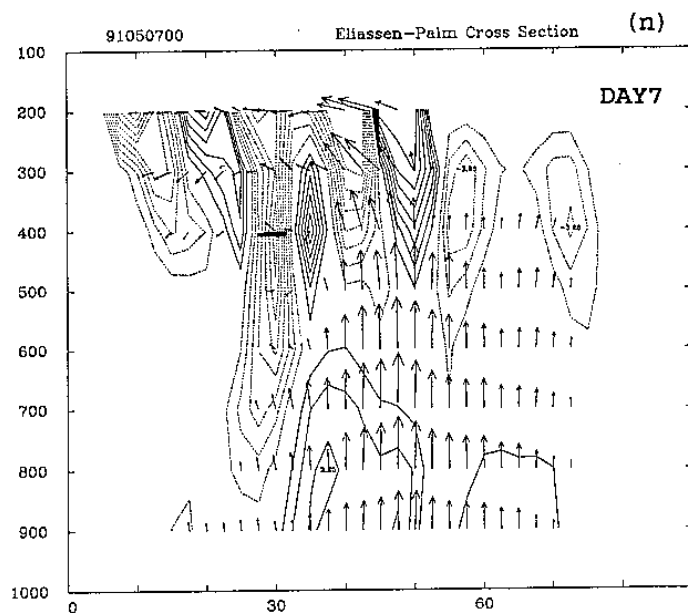
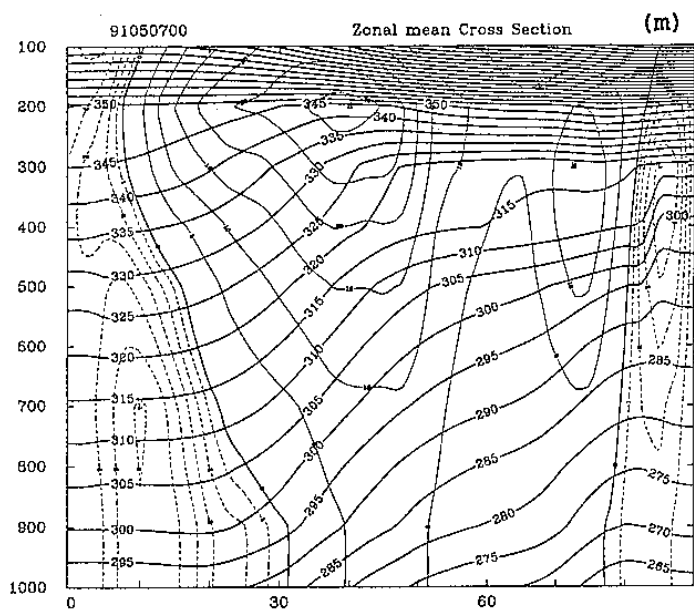


圖 4：週期為10天的非線性斜壓波生命史。其中橫座標表示緯度，縱座標表示氣壓高度 (MB)。 (a), (c), (e), (g), (i), (k), (m), (o) 為經向風場 (細實線代表西風, 細虛線代表東風) 與溫度場 (粗實線) 的垂直剖面。 (b), (d), (f), (h), (j), (l), (n), (p) 為 EP 通量與 EP 向量的垂直剖面。

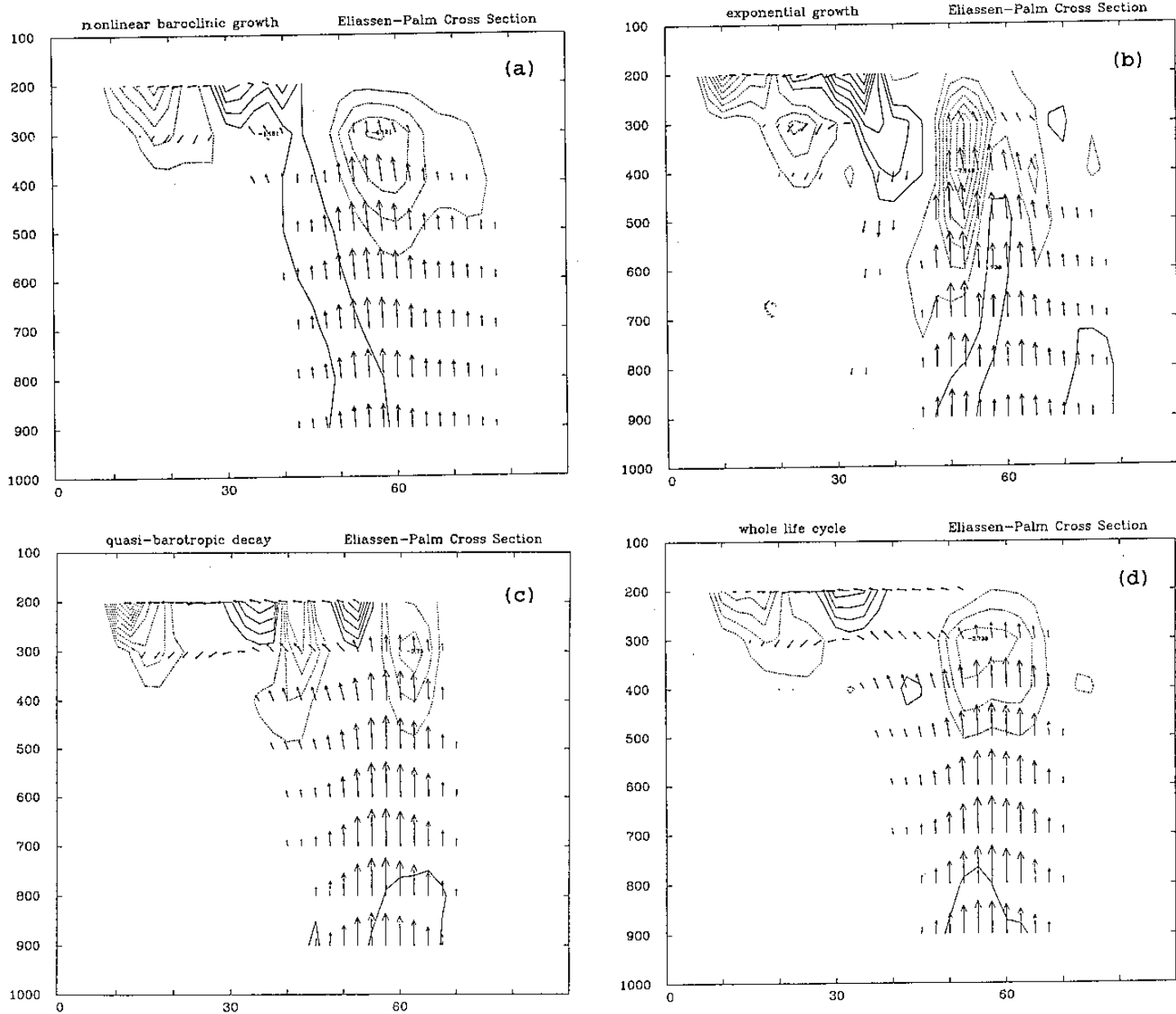


圖 5：週期為 7 天的非線性斜壓波生命史。其中橫座標為緯度，縱座標為氣壓高度 (MB)。由圖 3 的 9206 渦流擾動動能變化曲線 ( $K_e$ ) (SIMMONS AND HOSKINS, 1980)，92060112 至 92060412 為斜壓波非線性成長階段 (a)，而後的 24 小時擾動則呈現近似指數般的快速成長 (b)，最後擾動透過正壓的過程逐漸減弱 (c)。圖 (d) 為整個斜壓擾動生命始的平均。

		平均緯流 ↗	平均緯流 ↘
E P 通量的 等值線	⊕ ↗	渦流，緯流均成長。 基本場，提供可用位能。 者所需的過程：斜壓	
	⊕ ↘	渦流消散，成長回到緯流 緯流成動能：正	
	⊖ ↗		渦流成長，速度給渦流 緯流被提供能量：正
	⊖ ↘		渦流消散，消波的囚網至消散 緯流消波的囚網至消散

表 1：平均緯流與EP通量的交互作用。當我們掌握了渦流與緯流隨時間的演化，就不難知道能量傳遞的方向和斜壓波活躍的密度。“⊕”與“⊖”分別代EP通量的輻散與輻合，“↗”與“↘”分別代表值的增加與減少。