

# 位渦與相當位渦的氣候平均 、標準差與年循環

李永安 吳思儀

國立中央大學大氣物理研究所

(中華民國八十八年十月八日收稿；中華民國八十八年十一月十八日定稿)

## 摘 要

本研究主要的目的是經由分析位渦、相當位渦和其主要組成因子(靜力穩定度,濕靜力穩定度,相對渦度)的平均場、標準差場和年循環來探討位渦與相當位渦的氣候基本特性和影響其變化的主要因素。我們所用的原始資料是1949至1998年的美國國家環境預報中心重新分析資料集(NCEP/NCAR Reanalysis dataset)的月平均資料。從這些變數的平均場和標準差場的三度空間分佈我們發現,在中高緯地區,位渦和相當位渦的分佈與變化主要是受穩定度的分佈與變化所主導。絕對渦度,基本上,只有在位渦和穩定度變化比較小的中對流層和低緯地區才對位渦產生相當程度的貢獻。同時,相當位渦,由於加入了水氣效應,比位渦更能反應出含豐沛水氣的低緯低對流層的特徵。另一方面,上下層大氣的變化主要是集中在中高緯地區,而中對流層則比較集中在低緯地區。在年循環方面,我們利用多頻奇波譜分析(Multi-channel Singular Spectrum Analysis, MSSA)來萃取資料中的年循環與半年循環訊號。我們發現年循環的變化在冬、夏至時分主要是分佈在中高緯度,而在春、秋分時節則主要是集中在熱帶地區。同時,在東半球中高對流層的中低緯度,其南北向的波列結構非常明顯。至於半年循環,基本上其訊號比年循環弱很多,而且下層的訊號也比上層的弱。比較特殊的現象是在中高對流層有近似於全球波狀結構的分佈。上述年循環與半年循環的這些比較特殊的分佈是否與某些年際與季間變化有所關聯,非常值得我們進一步研究。

關鍵辭：位渦、相當位渦、氣候變遷、多頻奇波譜分析

## 一、前言

由於各種變數間的非線性交作用，地球的大氣環流呈現出非常複雜的時空結構。因此如何從觀測資料中運用各種分析方法來萃取其中所含的訊息以加深我們對於大氣的了解，一直是氣象學者們所關心與努力的課題。近十幾年在這方面的研究有三大發展值得我們注意。第一是位渦-位溫(potential vorticity - potential temperature, PV- $\theta$ )分析的重新受到重視。自從 Hoskins et al. (1985)有系統的整理出位渦與位溫所具有的準保守特性和反演動力與熱力場的能力後，有關 PV- $\theta$ 分析的研究已是氣象界的顯學之一。我們從近十年中共有超過 200 篇相關的論文發表就可以得知。在這眾多的文章中我們發現，很大部分的研究是用 PV- $\theta$ 分析來診斷中緯度綜觀尺度系統的行爲。雖然 Hoskins (1991)指出 PV- $\theta$ 分析亦可用來洞察大氣環流的狀態，然而利用這種分析來探討大氣環流或氣候變遷的研究仍不多見。第二是資料分析方法和計算能力的進步。80 年代以來電腦科技的神速進展和新的資料分析方法的出現，使我們有能力同時對多重變數、多重尺度和時空結構進行分析。例如：奇值展開法 (Singular Value Decomposition; Bretherton et al., 1992)可以分析多重變數間的相關性，而奇波譜法 (Singular Spectrum Analysis, SSA; Vautard and Ghil 1989)和多頻奇波譜分析 (Multi-channel Singular Spectrum Analysis, MSSA; Plaut and Vautard, 1994; Robertson et al., 1994; Fraedrich et al., 1997)則可以對多重變數的時空結構進行多重尺度分析。第三是資料的質與量的快速提升。近十數年來，隨著觀測技術與模式的進展，我們所能獲得的資料在質與量上都有長足的提升。尤其是最近幾年才可供利用的美國國家環

境預報中心的重新分析資料 (NCEP/NCAR Reanalysis; Kalnay et al., 1996)，不僅提供了一致性的資料品質，也包含了眾多變數和完整的時空解析度。

雖然位渦只在絕熱非黏滯的情況具有保守性，但由於其同時包含動力與熱力場的變化，我們認為位渦分析在氣候變遷的研究方面仍應有很大的發展空間。另一方面，因為濕大氣的準保守量，相當位溫 (Equivalent potential temperature,  $\theta_e$ )與相當位渦 (Equivalent potential vorticity, EPV)包含了水汽效應，爲了反應出水汽對於氣候變遷的影響，我們認為相當位渦-相當位溫 (EPV -  $\theta_e$ )分析的可能性也應加以評估。事實上 EPV 的概念一直被廣泛應用於條件性對稱不穩定 (Conditional symmetric instability, CSI) 的研究 (如 Bennett and Hoskins, 1979; Emanuel, 1983; Moore and Lambert, 1993 等)。李與董 (1998)也曾嘗試經由  $\partial\theta_e / \partial z = 0$  的面 (中性濕靜力穩定面) 的分析來探討水汽對於大氣的影響和此面的氣候基本特性與所蘊涵的訊息。但是因爲中性濕靜力穩定面上的理論基礎仍有待建立，他們對於此面呈現的豐富結構所蘊涵的動力訊息仍無法明確的掌握。因此相當位渦-相當位溫的分析仍有待發展與評估。

本研究主要的動機是嘗試善加利用現有科技處理龐大資料的能力，經由位渦與相當位渦同時具有動力與熱力場變化特性和多頻奇波譜法可以對多重變數的時空結構進行多重尺度分析的能力，將時、空、變量間的相互影響加入分析，使資料中具有物理意義的時空一致性的結構突顯出來。我們希望藉由此研究，一方面增進我們對於位渦與相當位渦的氣候基本特性與影響其變化的主要因子 (靜力穩定度，濕靜力穩定度，相對濕度) 的了解，另一方面經由

所萃取具有物理意義的時空一致性的結構來增進我們對於大氣環流的演化與氣候變遷的了解。本篇文章是根據第一部分的研究結果所寫的。主要重點是經由位渦、相當位渦和其主要組成因子的平均場、標準差場和年循環來探討位渦與相當位渦的氣候基本特性和影響其變化的主要因素。

本文的章節架構如下。第二節介紹所使用的資料和主要的分析方法。第三節是位渦、相當位渦和其主要組成因子的氣候平均場和標準差場的特徵。第四節是位渦和相當位渦的年循環與半年循環的三度空間分布。第五節是結論與討論。

## 二、資料來源與分析方法

為了避免同化模式的改變所產生的人為誤差,本篇論文所使用的原始資料是 NCEP/NCAR 的月平均重新分析資料。時間是從 1949 年 1 月至 1998 年 12 月,共 50 年。變數為溫度(T)、緯向風(u)、經向風(v)、相對濕度(RH)和比濕(q)。水平範圍是 70°S~70°N。網格間距為 5°×5°。垂直上有 1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150 和 100 hPa 共 12 層的資料。但是由於 NCEP/NCAR 的相對濕度和比濕只提供到 300 hPa,因此其導出量也只到此層。

經由這些資料我們計算出等壓面上的位溫、相當位溫、靜力穩定度 ( $\partial\theta/\partial p$ )、濕靜力穩定度 ( $\partial\theta_e/\partial p$ )、相對渦度 ( $\zeta$ )、位渦和相當位渦。關於  $\theta$  和  $\theta_e$ ,我們是採用 Bolton (1980)的經驗式來計算。其公式如下,

$$\theta = T_k \left( \frac{1000}{p} \right)^{0.2854(1-0.28 \times 10^{-3} r)} \quad (1)$$

而

$$\theta_e = \theta \exp \left[ \left( \frac{3.376}{T_L} - 0.00254 \right) \times r (1 + 0.81 \times 10^{-3} r) \right] \quad (2)$$

其中

$$T_L = \frac{1}{\frac{1}{T_k - 55} - \frac{\ln(RH)}{2840}} + 55 \quad (3)$$

是舉升凝結面溫度,  $r$  是混合比(Mixing ratio),  $T_k$  是絕對溫度, RH 是相對濕度。然後我們利用 Brunet et al. (1995)的上下二個鄰近層不等間距的對數中差公式,求得各標準等壓面上的  $\partial\theta/\partial p$  和  $\partial\theta_e/\partial p$ 。第  $k$  層  $\partial\theta_e/\partial p$  的計算公式如下:

$$\left( \frac{\partial\theta_e}{\partial p} \right)_k = \frac{\theta_{ek}}{p_k} \left[ \frac{\ln(p_k/p_{k-1})}{\ln(p_{k+1}/p_k)\ln(p_{k+1}/p_{k-1})} \ln \left( \frac{\theta_{e(k+1)}}{\theta_{ek}} \right) + \frac{\ln(p_{k+1}/p_k)}{\ln(p_k/p_{k-1})\ln(p_{k+1}/p_{k-1})} \ln \left( \frac{\theta_{ek}}{\theta_{e(k-1)}} \right) \right] \quad (4)$$

$\partial\theta/\partial p$  的計算也是如此,只是把(4)式中的  $\theta_e$  改成  $\theta$  而已。位渦和相當位渦的計算則是利用靜力平衡與高 Richardson number 的假設下的公式 (McIntyre and Palmer, 1983, 1984),

$$PV = -g(f + \zeta) \frac{\partial\theta}{\partial p} \quad (5)$$

而

$$EPV = -g(f + \zeta) \frac{\partial \theta_e}{\partial p}, \quad (6)$$

其中  $f = 2\Omega \sin \phi$  是科氏參數， $\Omega$  是地球自轉率， $\phi$  是緯度。

在計算出這些變數後，我們就可求得各網格點上各個變數的平均和標準差。然後我們再將各網格點上各個變數的原始資料減去其氣候平均和除以其標準差使之標準化(normalized)。接下來我們對各層各變數做主分量分析，並只保留前 40 個主分量以濃縮資料。然後我們把這些保留的主分量依序排列成一個合成資料矩陣，再利用相同的分析方法求得這合成資料矩陣的特徵值、特徵向量與主分量。

$$Z = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1K} & | & a_{21} & \cdots & a_{2K} & | & \cdots & \cdots & \cdots & | & a_{W1} & \cdots & a_{WK} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{(m-W+1)1} & \cdots & a_{(m-W+1)K} & | & a_{(m-W+2)1} & \cdots & a_{(m-W+2)K} & | & \cdots & \cdots & \cdots & | & a_{m1} & \cdots & a_{mK} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中  $m$  是時間序列的長度， $W$  是滑動窗區的長度而  $K$  則是總頻道數。組成這個矩陣後我們就可以利用傳統 EOF 分析得到其特徵值、特徵函數和主分量。根據 Vautard and Ghil (1989)，經由滑動窗區的方式，MSSA 分析可選擇性的濾波來加強資料的訊噪比。同時，其分析所得的結果中如果有一對特徵值相近且其特徵函數呈 1/4 波長正交，那麼這對特徵值與特徵函數就代表了資料中具有物理意義的震盪。因此此方法可以有效的萃取資料中具有物理意義的演化結構。在本研究中我們所用的滑動窗區為 40 個月。

這方法相當於 Wang (1992) 的多變數經驗正交函數分析(Multi-Variable Empirical Orthogonal Function analysis, MV-EOF)。Wang 指出，藉由加入變數間的共變異(covariance)的分析，此方法可以加強資料的訊噪比和有效的萃取出資料中的重覆型態。最後我們利用合成資料所得的前 40 個主分量進行多頻奇波譜分析(MSSA)。

多頻奇波譜分析其實就相當於 Weare and Nasstrom (1982) 的推廣經驗正交函數分析。其基本原理就是利用滑動窗區(Sliding window)的方法把資料中時間延遲相關的影響加入，以萃取資料中震盪與演化的結構。多頻奇波譜分析的資料矩陣組成如下所示：

### 三、平均場與標準差場

在本節中我們將先經由等壓面上的位渦、相當位渦和其組成因子的平均場、標準差場來探討位渦與相當位渦的氣候基本特性和影響其變化的主要因素。圖 1 是各變數氣候與緯向平均的緯度-高度剖面圖，其中(a)是位渦，(b)是相當位渦，(c)是絕對渦度，(d)是靜力穩定度，(e)是濕靜力穩定度。由(a)我們可以很清楚的看到零值線幾乎正好座落在赤道上，區分了北半球的正位渦和南半球的負位渦。位渦的絕對值，大致上隨著緯度與高度的增加而增加。但在對流層頂以上，由於靜力穩定度迅速

增大，位渦的絕對值也增加非常迅速。這使得對流層與平流層的位渦值有很大的差異。同時，因為南北半球的位渦是反號的，這種迅速增大使得位渦在赤道附近的平流層有很強烈的

經向梯度。在中對流層，位渦隨高度的變化最不明顯且其經向梯度大致上隨著緯度的增加而減少。在低對流層的中低緯度，位渦的經向梯度隨著緯度的增加而增加，直到南北緯 65 度左右達到極大。在中高對流層與低對流層的高緯地區，因為此處水氣稀少，相當位渦的分佈形態基本上與位渦類似。至於低對流層的中低緯度，由於水氣豐沛，此處的相當位渦與位渦呈反號的情況。

從方程式(5)和(6)我們知道，位渦與相當位渦的主要組成因子是絕對渦度、靜力穩定度和濕靜力穩定度。經由這些因子的緯度-高度分佈我們可以探討位渦與相當位渦的分佈主要是受何種因子所影響。圖 1(c)是絕對渦度的緯度-高度分佈圖。我們很容易就可看出，絕對渦度的分佈主要是受到柯氏參數隨緯度變化的影響。相對渦度的貢獻只有在西風噴流所在高度附近的對流層與下平流層才比較明顯。西風噴流的存在使得噴流與赤道間的相對渦度（北半球為正，南半球為負）和柯氏參數呈反號關係而噴流與極地間的相對渦度（北半球為負，南半球為正）和柯氏參數則呈同號關係。因此絕對渦度在低緯區的對流層隨著高度向極地傾斜而中緯度區則與之相反。同時，這種分佈也使得絕對渦度經向梯度的極大值落在低對流層的赤道區和高對流層的中緯度地區。在靜力穩定度方面，在中緯度地區，其值在邊界層頂附近隨高度迅速增加，但在中對流層增加速度減緩(某些地區甚至變成隨高度減少)，到對流層頂附近後才又急遽上升。另一方面，在熱帶地區，其值隨高度增加但其垂直梯度大約在 900 hPa 以上隨高度漸減。在 500 至 300 hPa 之間，其值隨高度減少。300 hPa 以上才又隨高度急

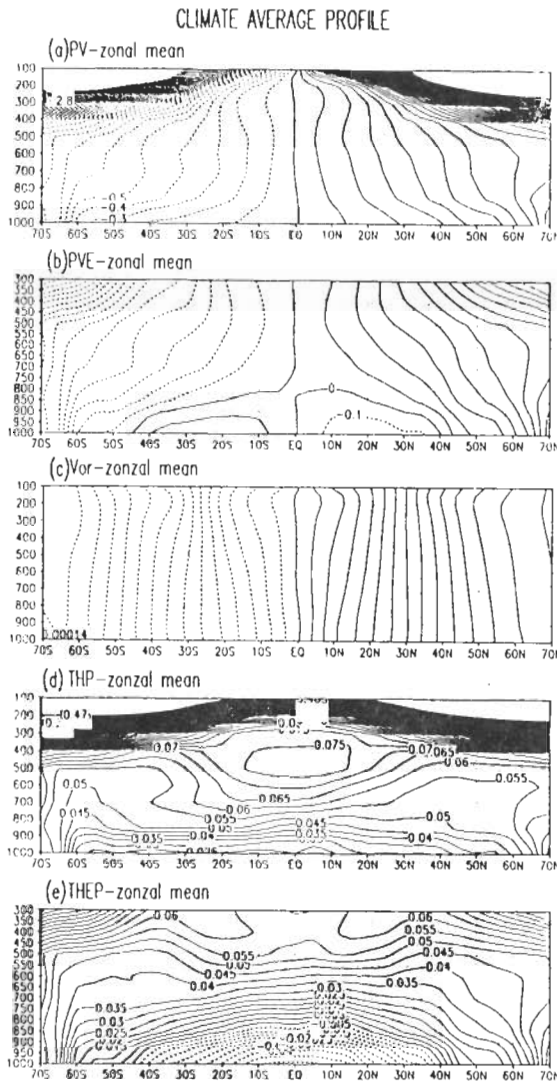


圖 1 氣候與緯度圈平均的(a)位渦，(b)相當位渦，(c)絕對渦度，(d)靜力穩定度和(e)濕靜力穩定度的緯度-高度剖面圖。其中位渦和相當位渦的等值線間距為 0.1 PVU；絕對渦度的等值線間距為  $10^{-5} s^{-1}$ ；靜力穩定度和濕靜力穩定度的等值線間距為 0.005 %/hPa。

遽增加。這種垂直變化不僅使得熱帶的中高對流層的靜力穩定度有一局部高值區存在，也使得其中對流層的南北向梯度與上下層大氣相反。由於靜力穩定度在等熵座標中相當於比容（密度<sup>-1</sup>），它所表現的這種分佈我們認為應與緯度-高度方向的質量傳送有密切的關係。至於濕靜力穩定度，其值也是從對流層底往上增加。比較特殊的是，在中低緯度的低對流層，濕靜力穩定度之值為負。也因為此，此處濕靜力穩定度的垂直梯度比靜力穩定度的為大。這些分佈特徵與 Peixoto and Oort (1992, 圖 7.6) 非常類似。比較圖 1(a)至(e)我們發現，絕對渦度似乎只有在中對流層與低緯區才對位渦和相當位渦的分佈有顯著影響。其餘地區的位渦和相當位渦的分佈則明顯的受靜力穩定度和濕靜力穩定度的影響。

圖 2 為各變數的標準差場。基本上位渦的標準差隨著緯度與高度的增加而增加。比較特殊的分佈是在平流層有一對高標準差中心從副熱帶上平流層往中緯度對流層頂延伸和在 50°S 和 60°N 的 150 hPa 附近分別有一個 PV 標準差極小中心。在對流層中則分別在中高緯度的中對流層和熱帶的地表有標準差極小中心存在。相當位渦的標準差分佈大致與位渦的類似，只有在低對流層的赤道地區和 20°-30°S 之間兩者有比較明顯的差異。在赤道附近，相當位渦的標準差極小中心是在 800 hPa 而不是在地表。而在 20°-30°S 之間，相當位渦的標準差則是有極大值存在。在絕對渦度標準差的分佈方面，沿著對流層頂有一帶狀標準差極大存在，其中心分別位於 35°S 和 35°N 的 200 hPa 左右。這現象顯示相對渦度的變異與高層噴流的位置和變動有密切的關係。另一方面，在赤道的中對

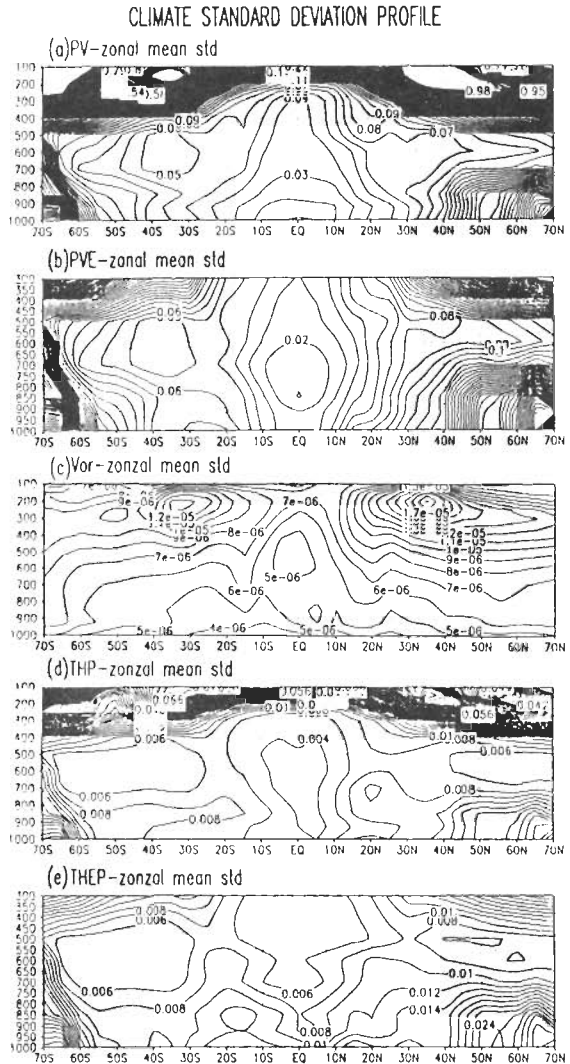


圖 2 為緯度圈平均的(a)位渦，(b)相當位渦，(c)絕對渦度，(d)靜力穩定度和(c)濕靜力穩定度的標準差的緯度-高度剖面圖。其中位渦和相當位渦的標準差的等值線間距為 0.01 PVU；絕對渦度的標準差的等值線間距為  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ；靜力穩定度和濕靜力穩定度的標準差的等值線間距為  $0.002 \text{ }^{\circ}\text{K/hPa}$ 。

流層則有一標準差極小值中心。這種極值分佈使得赤道與 35°S 和 35°N 之間的整個對流層呈現出低高低的波狀結構。另外值得注意的是，在氣候 ITCZ 的所在位置，也就是 5°N、900 hPa

附近也有一標準差極大值存在。至於靜力穩定度和濕靜力穩定度的標準差分佈，除了在熱帶對流層有些差異外，大致與位渦和相當位渦的類似。這顯示位渦和相當位渦的變異，在熱帶對流層以外地區基本上是受到靜力穩定度的變異所主導。另一方面，與絕對渦度標準差場比較，我們發覺上層大氣靜力穩定度標準差

極大值中心大約位於絕對渦度極大值的上方，而赤道附近靜力穩定度和濕靜力穩定度的極小值中心與形狀則大約與之重合。在中緯度與赤道之間的波狀結構方面，濕靜力穩定度在南半球比較明顯而靜力穩定度則在北半球比較明顯。這些現象顯示絕對渦度的變化在上層大氣與熱帶對流層和靜力穩定度的變異有密切

PV-CLIMATE AVERAGE

PV-CLIMATE STANDARD DEVIATION

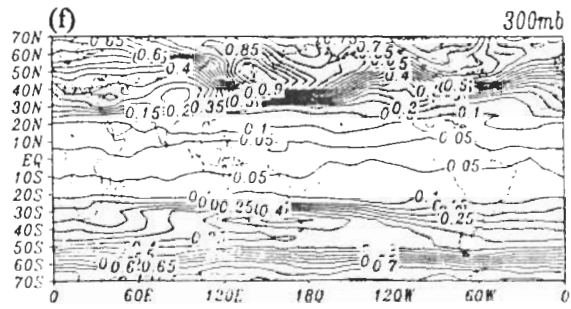
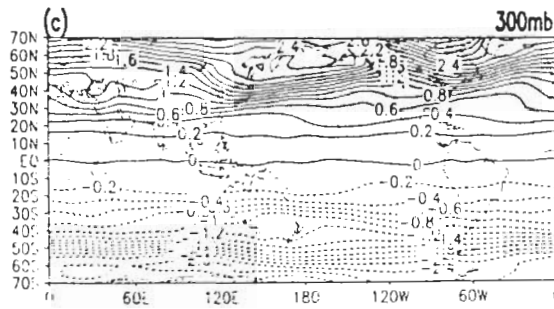
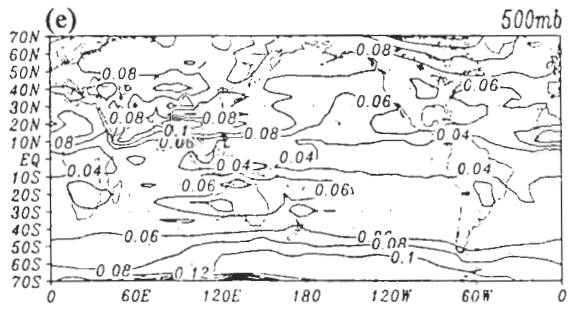
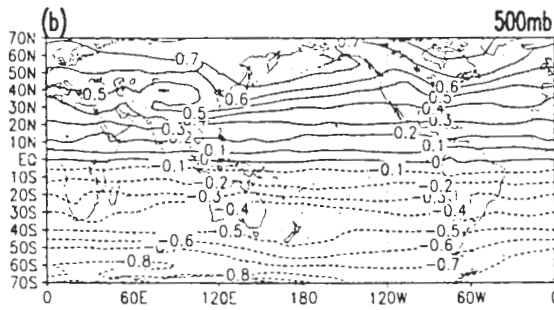
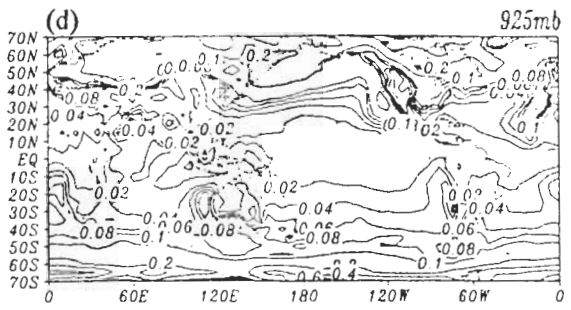
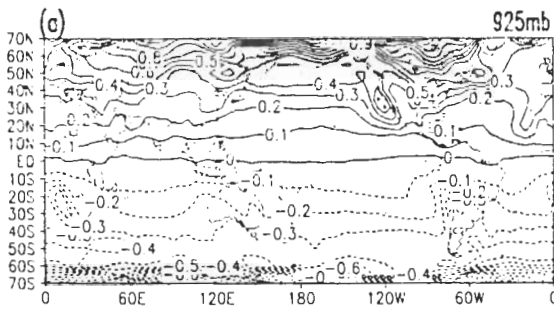


圖 3 (a)、(b)、(c)和(d)、(e)、(f)分別為位渦的氣候場和標準差場在 925、500 和 300 hPa 的分佈圖。(a)、(b)的等值線間距為 0.1 PVU；(c)的等值線間距為 0.2 PVU；(d)、(e)的等值線間距為 0.02 PVU；(f)的等值線間距為 0.05 PVU。

的關係。比較平均與標準差場，我們則大致可以看出標準差的分佈與平均場的梯度分佈有關，也就是說平均場梯度大的地區標準差也大，反之亦然。

接下來我們進一步檢視位渦和相當位渦的緯向不均勻特性。圖 3 是位渦的氣候場和標準差場在 925、500 和 300 hPa 的分佈。在低對流層，我們看到位渦的絕對值在南北緯 60° 以上

快速增加。在 60°S–60°N 之間，其極大值位於東亞、北美東岸和大洋的東側而極小值則主要位於青藏高原和洛磯山脈。這與北半球主槽、地形和全球冷洋面的分佈是一致的。在中高對流層，我們發覺北半球主槽和地形的影響仍在，可是冷洋面的影響已消失不見。標準差場的極值分佈大致與氣候場一致。這現象一方面是反應位渦極值隨季節變遷的影響，另一方面

PVE-CLIMATE AVERAGE

PVE-CLIMATE STANDARD DEVIATION

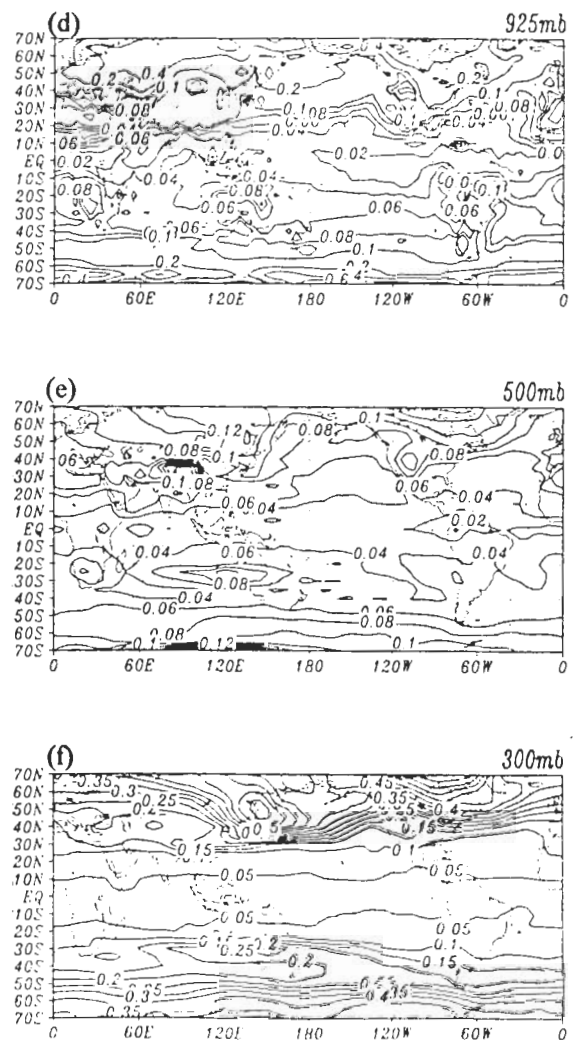
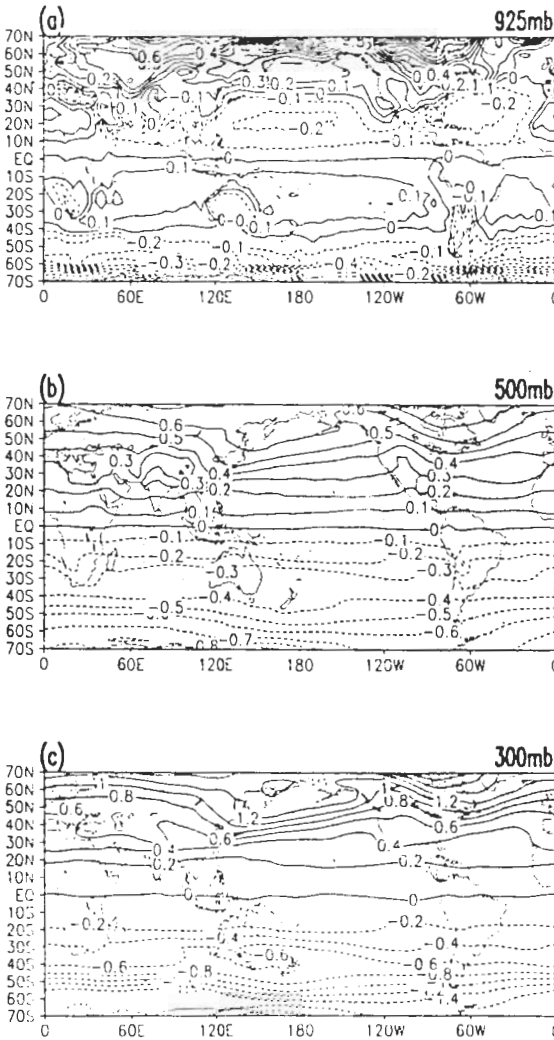


圖 4 除了為相當位渦外，其餘與圖 3 同。



則可能與位渦極值的存在所產生的正壓或斜壓不穩定擾動有關。比較特殊的是，在 500 hPa 南北緯 20°-40° 間的陸地有位渦標準差的極大值出現。與上下層比較，其位置更靠近赤道地區。這些中心似乎與季節性熱源和上升氣流區的位置有相當密切的關係。在相當位渦方面，從圖

4 我們可以看出其與位渦主要的差異是在副熱帶的低對流層。我們在副熱帶高壓所在的洋面上可以發現相當位渦的絕對值有極大值出現，但是位渦場則沒此特徵。同時我們也看到相當位渦的標準差場在赤道太平洋上有比較明顯的結構。這些分佈顯示相當位渦比位渦有能力表現出低緯低對流層的特徵。圖 5 是靜力穩定度

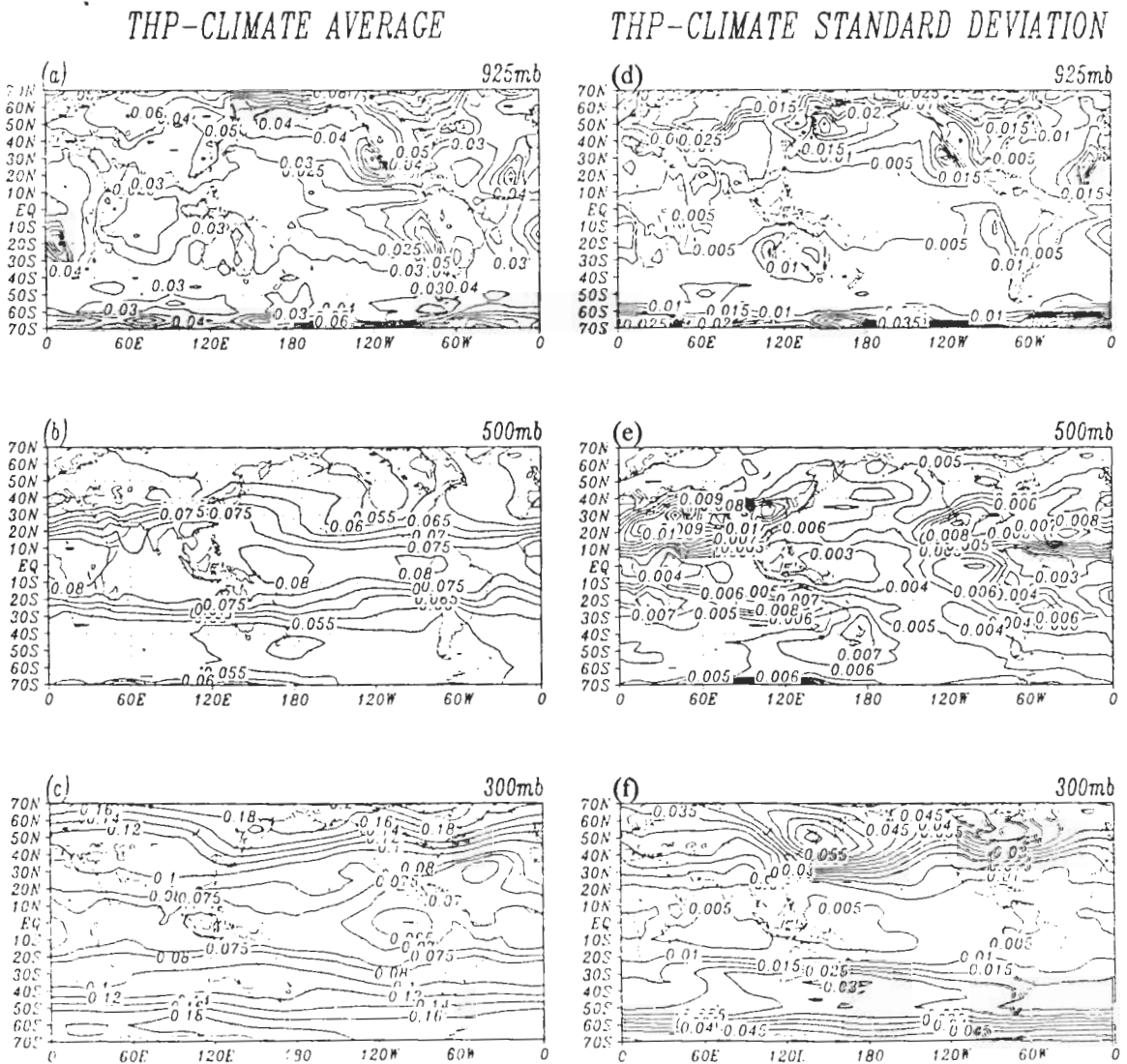


圖 5 (a)、(b)、(c)和(d)、(e)、(f)分別為靜力穩定度的氣候場和標準差場在 925、500 和 300 hPa 的分佈圖。(a)、(b)、(d)、(f)的等值線間距為 0.005 %/hPa；(c)的等值線間距在中高緯地區為 0.02 %/hPa，在低緯地區為 0.005 %/hPa；(e)的等值線間距為 0.001 %/hPa。

的分佈。在低對流層的中高緯度其分佈大致與位渦相似。但是在低緯地區，尤其是東南太平洋的冷舌與東北太平洋的 ITCZ，靜力穩定度場表現出的特徵是所有變數中最為明顯的。另一方面，我們發現中對流層的靜力穩定度是隨著緯度的增加而減少的。這種南北分佈與上下對流層是相反的。其極大值區位於赤道非洲、中南半島、赤道西太平洋和亞馬遜盆地東側，而最大梯度則發生在南北緯  $20^{\circ}$ - $30^{\circ}$  之間。這些地區與熱帶對流中心和 ITCZ 的南北位移的分佈非常相像。在標準差場上我們也看到中對流層的變異主要集中在低緯地區而上下對流層則大部分在中高緯地區。這種分佈顯示熱帶地區的變化主要是反應在中對流層。因此我們在研究熱帶的天氣與氣候時，中對流層的診斷分析是不應被忽略的。同時由於低緯地區的中性濕靜力穩定面的高度是在中對流層而中高緯地區的高度則是在低對流層，這似乎也印證了李和董(1998)所言中性濕靜力穩定面蘊涵了更多對流層結構的訊息。因為濕靜力穩定度的分佈大致和靜力穩定度相似而絕對渦度的分佈則較無明顯特徵，限於篇幅關係，我們就不另外討論（請參閱吳思儀，1999）。

#### 四、年循環與半年循環

年循環，由於其恆定性，基本上我們都視其演化為理所當然。最近二十年來，因為發現聖嬰現象(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)的演化與可預報度和赤道東太平洋冷舌的年循環有近似相位鎖定的關係（e.g., Rasmusson and Carpenter, 1982; Robertson et al., 1994; Torrence and Webster, 1997），有關年循環方面的研究才

又逐漸受到重視。接下來我們就利用 MSSA 分析所得的結果來探討大氣的年循環與半年循環過程。

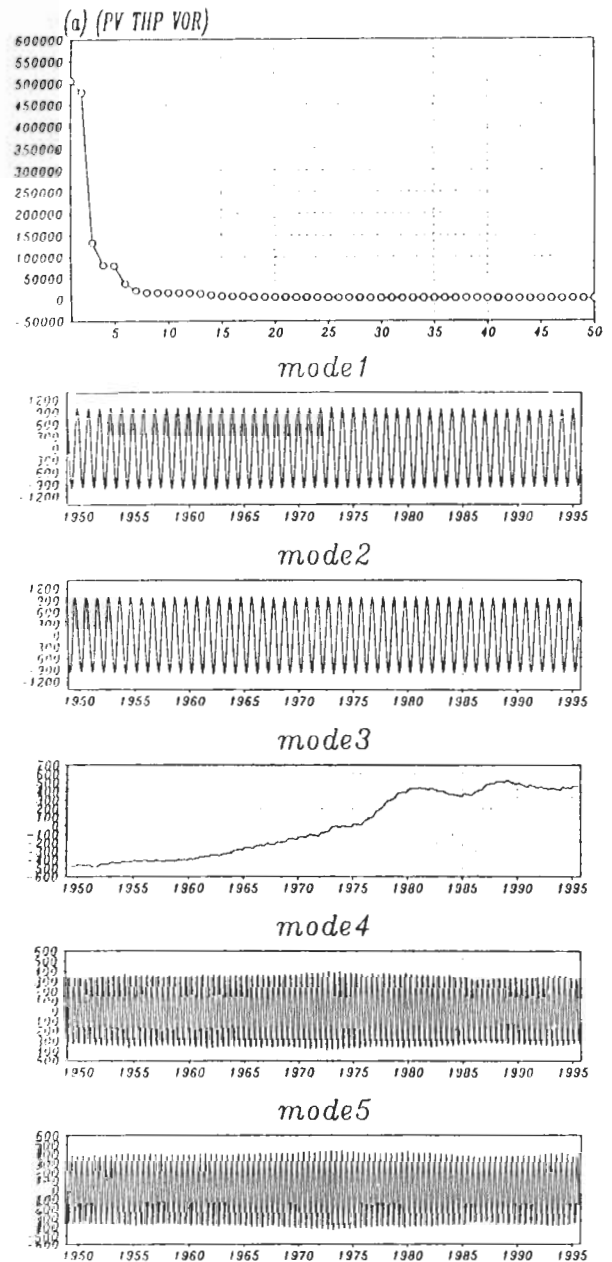


圖 6 由位渦、靜力穩定度和絕對渦度合成的 MSSA 分析所得的特徵值與前五個主分量。

圖 6 是由位渦、靜力穩定度和絕對渦度合成的 MSSA 分析所得的特徵值與前五個主分量。從特徵值的分佈我們輕易的就可看出這組資料的變易主要集中在前五個主分量。其中第一和第二特徵值非常相近而且它們的主分量呈 1/4 波長正交的情況。第四和第五特徵值和主分量也是類似的情形。從 MSSA 分析的特點 (Vautard and Ghil, 1989) 我們知道, 一對相近的特徵值與類似的主分量顯示的是資料中的震盪訊號。由於第一和第二主分量的極大值分別是在 12 月和 9 月而第四和第五主分量的極大值分別是在 4 月、10 月和 6 月、12 月, 因此這兩對主分量分別代表了這組資料的年循環與

半年循環震盪訊號。至於第三主分量, 並沒有與之相近的特徵值與類似的主分量。此主分量顯示的是資料的長期趨勢。由相當位渦、濕靜力穩定度和絕對渦度合成的 MSSA 分析所得的結果與圖 6 非常類似, 在此就不再重複。

利用上述兩對主分量分別和原始資料做相關分析, 我們就可得到年循環與半年循環的三度空間分佈。圖 7 是位渦年循環的空間分佈。由圖我們看到第一主分量的高相關值在北半球大部分是分佈在中高緯度, 而南半球則集中在 20°-40°S 之間和高緯地區。在北半球的低對流層其正負分佈更與海陸分佈有密切的關係。這是因為第一主分量代表的是冬、夏至時分, 太

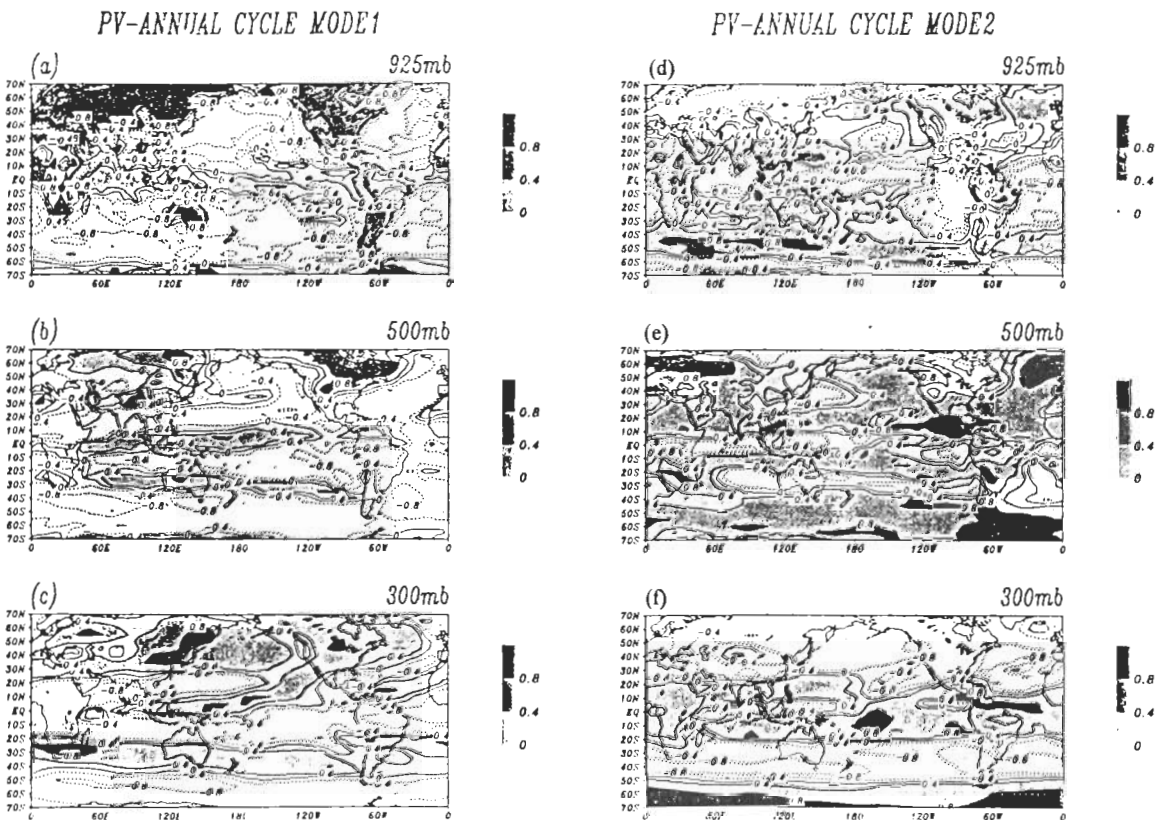


圖 7 位渦年循環的空間分佈。(a)、(b)、(c)和(d)、(e)、(f)分別為第一和第二主分量在 925 500 和 300 hPa 的分佈。

陽遠離赤道加上南北半球海陸分佈的差異所造成的。比較特殊的是，在中高對流層的中低緯度，特別是東半球，其南北向的波列結構非常明顯。東亞和南亞南北向的低頻震盪是否與年循環在此區的南北向波列結構有關，值得進一步研究。至於第二主分量，由於所對應的時間是春、秋分時節，太陽在赤道附近，因此其高相關值比較集中在熱帶地區。赤道東南太平洋冷舌地區的年循環訊號也主要是表現在第二主分量上。相當位渦除了在熱帶低對流層因符號與位渦相反所產生的差異外，基本上與圖 7 類似。圖 8 是靜力穩定度的情況。在中高緯地區，靜力穩定度的分佈與位渦非常相似。這顯示靜

力穩定度在中高緯地區對位渦的分佈有絕對的影響。另一方面，在熱帶地區靜力穩定度的分佈與位渦則有相當的差異。這主要是因為行星渦度在赤道附近趨近於零且南北半球變號，以至於位渦的變異受相對渦度所控制的程度比靜力穩定度來的深。我們也可以從絕對渦度的分佈(請參考吳思儀, 1999)和位渦在熱帶地區非常類似的情況得知。雖然如此，靜力穩定度在中高對流層 60°E-180°E 之間也有明顯的南北向的波列。這顯示靜力穩定度對於此處位渦分佈能仍有相當的貢獻。靜力穩定度另一比較特殊的分佈是春秋季位於低對流層熱帶中北太平洋與東南太平洋冷舌地區之間的雙極結構。與圖

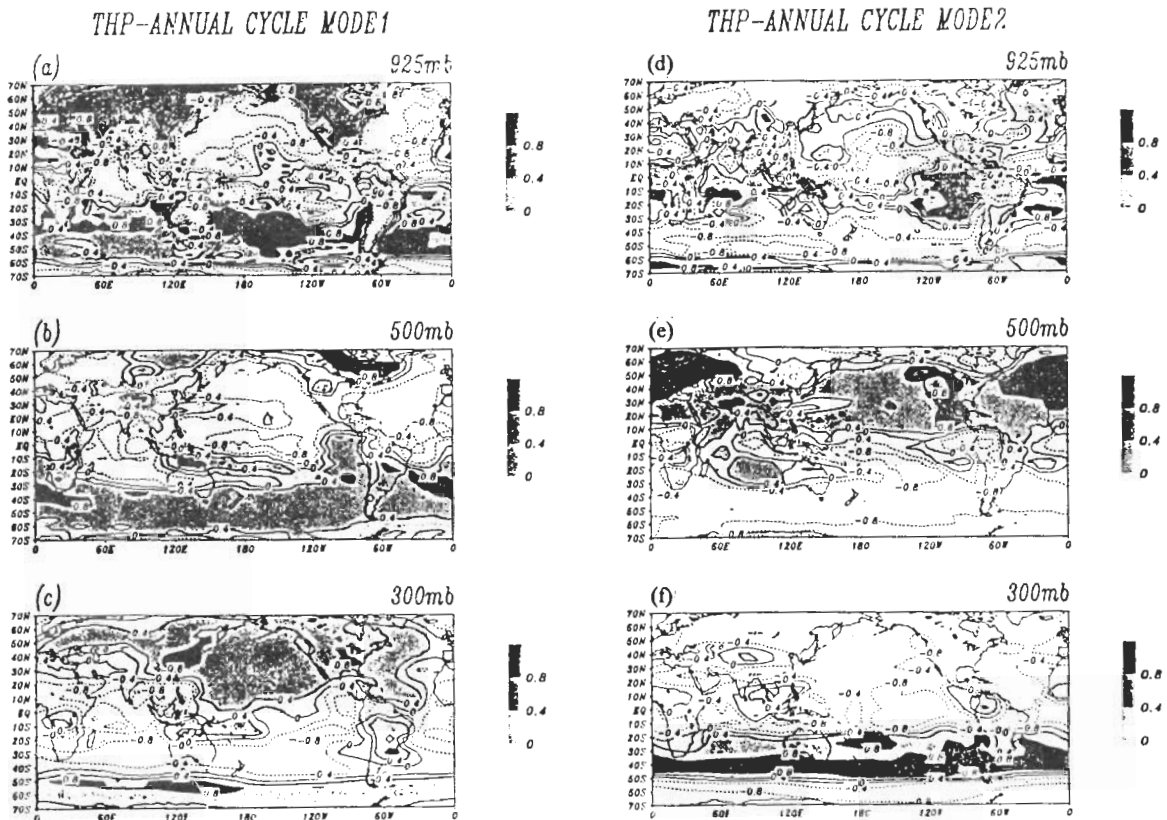


圖 8 除了是靜力穩定度外，其餘與圖 7 同。

七比較，我們發現位渦並未顯現這樣的分佈。這可能是因為熱帶地區位渦本來就不明顯，因此其氣候訊號，相對於其他地區或其他變數，比較難以被凸顯出來。

接下來我們來看半年循環的三度空間分佈。圖 9 是位渦的分佈。很明顯的半年循環的訊號比年循環弱很多，而且下層的訊號也比上層的弱。在低對流層，比較明顯的半年循環是發生在中低緯度的太平洋、大西洋與非洲。在中高對流層，我們則看到半年循環的範圍並不局限於中低緯度，而是呈現出近似於全球波狀結構分佈。這種上下層分佈的差異顯示，下層

低緯度熱力的變化在中高對流層會經由波的傳遞而影響到中高緯度。特別值得注意的是在太平洋-北美地區，我們看到了有點類似於 PNA 的形態(Pacific-Northern America teleconnection pattern; Wallace and Gutzler, 1981)，雖然其中心位置與 PNA 有所差異。由於半年循環是整體年循環的一部分，而年循環與聖嬰現象有近似相位鎖定的關係，同時 PNA 形態又與聖嬰現象有密切的關聯，因此 PNA 形態的產生是否是因半年循環波狀結構受聖嬰震盪所引發的大氣環流變化所導致，值得我們進一步去探討。至於其他變數的半年循環分佈，基本上與位渦類似，在此就不另外討論。

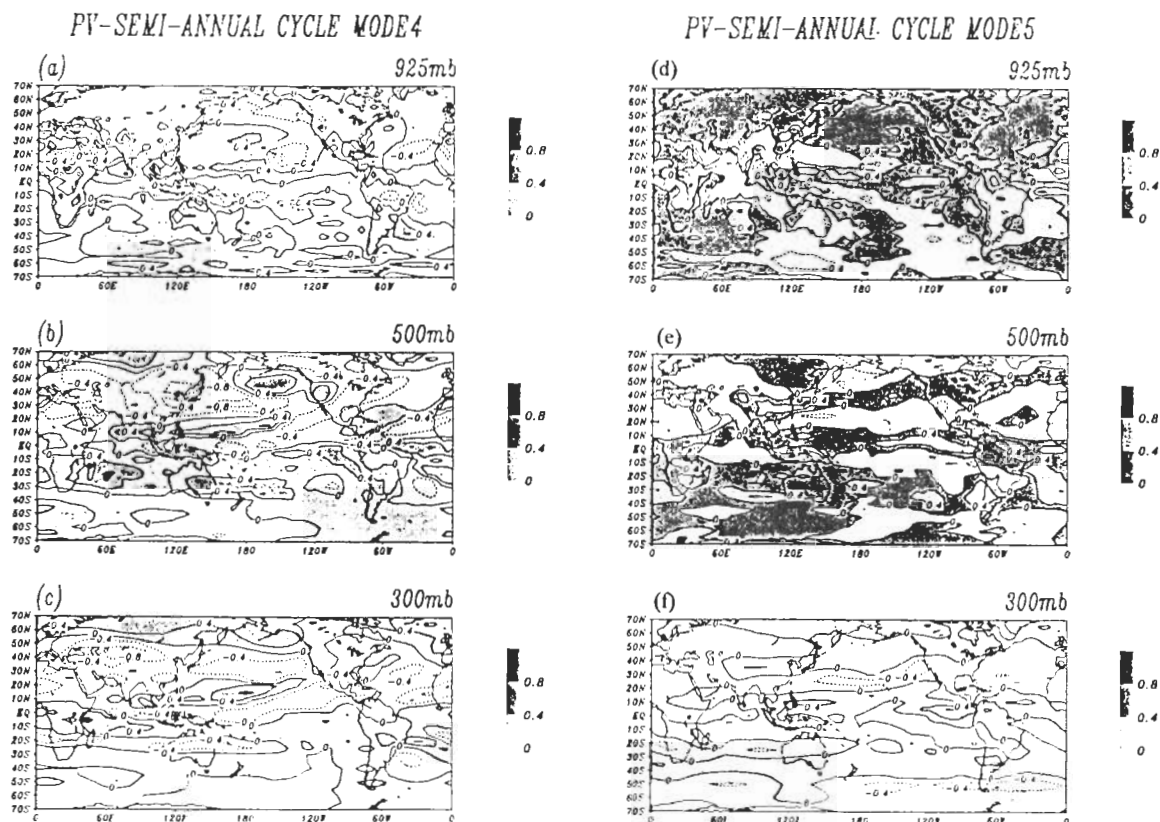


圖 9 位渦半年循環的空間分佈。(a)、(b)、(c)和(d)、(e)、(f)分別為第四和第五主分量在 925、500 和 300 hPa 的分佈。

## 五、討論與結論

在本文中，我們分別分析和比較了位渦、相當位渦、絕對渦度、靜力穩定度和濕靜力穩定度的氣候平均場、標準差場、年循環與半年循環。從這些場的三度空間分佈我們發現，在中高緯地區，位渦和相當位渦的分佈與變化主要是受穩定度的分佈與變化所主導。絕對渦度，基本上只有在位渦和穩定度變化比較小的中對流層和低緯地區才對位渦產生相當程度的貢獻。比較位渦和相當位渦我們發覺，由於加入了水氣效應，相當位渦比位渦更能反應出含豐沛水氣的低緯低對流層的特徵。另一方面，我們也看到中對流層與上下層大氣之間的差異。大體而言，上下層大氣主要的變化集中在中高緯地區，而中對流層則比較集中在低緯地區。由於低緯地區的中性濕靜力穩定面的高度是在中對流層而中高緯地區的高度則是在低對流層，這呼應了李和董(1998)所發現的中性濕靜力穩定面蘊涵了更多對流層結構訊息的結論。在年循環方面，我們發現在冬、夏至時分，北半球的變化主要是分佈在中高緯度，而南半球則集中在  $20^{\circ}$ - $40^{\circ}$ S 之間和高緯地區。在春、秋分時節，變化主要是集中在熱帶地區。赤道東南太平洋冷舌地區的年循環訊號也主要表現在春、秋分時節。比較特殊的是，在中高對流層的中低緯度，特別是東半球，其南北向的波列結構非常明顯。這是否與東亞和南亞南北向的低頻震盪有關，值得進一步研究。至於半年循環，比較特殊的現象是在中高對流層有近似於全球波狀結構的分佈，特別是在太平洋-北美地區我們發現有類似於 PNA 的形態的存在。這是否意味著 PNA 形態的產生是因半年循環

波狀結構受聖嬰震盪所引發的大氣環流變化所導致，值得我們進一步去探討。

總結來說，雖然位渦所具有的準保守特性和反演能力可以有效的診斷中緯度綜觀尺度系統的行為，但從本研究的結果我們初步發覺利用位渦來探討非絕熱效應主導的氣候變異並沒有比單純的利用靜力穩定度或絕對渦度去探討提供更多的訊息。事實上，我們從圖 7(a)在大陸中高緯的正相關區對應的是大陸性冷高壓區而不是正位渦距平反演所對應的低壓區可以看出，由於位渦在中高緯地區深受靜力穩定度的影響，如果不加思索冒然的利用位渦反演的概念去探討其氣候變化的空間分佈所代表的動力場，可能會得到相當錯誤的結論。另一方面，我們從各個變數的空間分佈看到低緯地區的變化主要是顯現在中對流層。這顯示在研究熱帶的天氣與氣候時，中對流層的診斷分析應多加重視。再者，雖然年循環與半年循環我們一直都視其為理所當然，但從第四節的分析我們發現它們其實有蠻豐富的結構而且其中有些分佈可能與一些年際與季間的變化有所關聯，非常值得我們進一步加以探討。

## 致 謝

本文是在國科會計畫 NSC 88-2111-M008 - 034. 支援下完成。

## 參考文獻

李永安, 董昀嵐, 1998: 中性濕靜力穩定面的氣候特徵。大氣科學, 第二十六期, 第二號, 133-146。

- 吳思儀, 1999: 位渦、相當位渦的氣候特徵與年際變化。國立中央大學大氣物理研究所碩士論文, 72 頁。
- Bennetts, D. A., and B. J. Hoskins, 1979: Conditional symmetric instability—a possible explanation for frontal rainbands. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **105**, 945-962.
- Bolton, D., 1980: The computation of equivalent potential temperature. *Mon. Wea. Rev.*, **108**, 1046-1053.
- Bretherton, C. S., C. Smith, and J. M. Wallace, 1992: An intercomparison of methods for finding coupled patterns in climate data. *J. Climate*, **5**, 541-560.
- Brunet, G., R. Vautard, B. Legras, and S. Edouard, 1995: Potential vorticity on isentropic surfaces: Climatology and Diagnostics. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 1037-1058.
- Emanuel, K. A., 1983: The Lagrangian parcel dynamics of moist symmetric instability. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 2368-2376.
- Fraedrich, K., L. M. John, M. F. William, and W. Risheng, 1997: Extended EOF analysis of tropical disturbances: TOGA COARE. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 2363-2372.
- Hoskins, B. J., M. McIntyre, and A. Robertson, 1985: On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **111**, 877-946.
- Hoskins, B. J., 1991: Towards a PV- $\theta$  view of the general circulation. *Tellus*, **43AB**, 27-35.
- Kalnay, E., et al., 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- McIntyre, M. E., and T. N. Palmer, 1983: Breaking planetary waves in the stratosphere. *Nature*, **305**, 593-699.
- , 1984: The "surf zone" in the stratosphere. *J. Atm. Terr. Phys.*, **46**, 825-849.
- Moore, J. T., and T. E. Lambert, 1993: The use of equivalent potential vorticity to diagnose regions of conditional symmetric instability. *Wea. Forecasting*, **8**, 301-308.
- Peixoto, J. P., and A. H. Oort, 1992: *Physics of Climate*. American Institute of Physics, 520pp, 140-141.
- Plaut, G., and R. Vautard, 1994: Spells of low-frequency oscillations and weather regimes in the Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 211-220.
- Preisendorfer, R. W., 1988: *Principal component analysis in meteorology and oceanography*. Elsevier Science Publisher
- Robertson, A. W., C.-C. Ma, C. R. Mechoso, and M. Ghil, 1994: Simulation of the tropical Pacific climate with a coupled ocean-atmosphere general circulation model. Part I The seasonal cycle. *J. Climate*, **8**, 1178-1198.
- Vautard, R., and M. Ghil, 1989: Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics with applications to paleoclimatic time series, *Physica D*, **35**, 395-424.
- Wallace, J. M., and D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 784-812.
- Wang, B., 1992: The vertical structure and development of the ENSO anomaly mode during 1979-1989, *J. Atmos. Sci.*, **49**, 698-712.
- Weare, B. C., and J. N. Nasstrom, 1982: Examples of extended empirical orthogonal function analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 481-485.

# The Mean, Standard Deviation and Annual Cycle of Potential Vorticity and Equivalent Potential Vorticity

Yung-An Lee      Si-Yi Wu

Institute of Atmospheric Physics, National Central University

(Manuscript received 8 October 1999 ; in final form 18 November 1999)

## ABSTRACT

The main purpose of this study is, through analyzing the mean, standard deviation (std) and annual cycle of potential vorticity (PV), equivalent potential vorticity (EPV), absolute vorticity, dry static stability and moist static stability, to learn the basic characteristics of these variables and to determine which variable having the most influence on the behavior of PV and EPV. The data we used are the National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis monthly mean temperature data between 1950 and 1998. From mean and std fields of these variables we found that, the distribution and variability of PV and EPV in mid to high latitudes are primarily controlled by the distribution and variability of dry static stability and moist static stability. The absolute vorticity only has substantial contribution to the distribution and variability of PV and EPV in mid-tropospheric and tropical regions. EPV, having included the moisture effect, can faithfully exhibit distinct lower tropospheric characteristics of tropics. It is interesting to note that the dominant variability of these variables occurs in different latitudes between middle and lower or upper atmosphere. In lower or upper atmosphere, the dominant variability occurs in mid to high latitudes, while in mid-troposphere, the variability mainly occurs in low latitudes. As for the annual cycle, we used multi-channel singular spectrum analysis (MSSA) to extract annual and semi-annual oscillation components from data. We found that, in mid and high latitudes, the dominant signal of annual cycle occurs in winter and summer seasons, while in low latitudes, the signal occurs in spring and fall seasons. Furthermore, there is a clear north-south wavelike structure in mid-tropospheric low latitudes. The semi-annual cycle signal is generally much weaker than annual cycle. Nonetheless it exhibits a wavelike structure with near global extent. We suspect it may have some connection with Pacific-Northern America teleconnection pattern.

**Key words :** Potential vorticity, Equivalent potential vorticity, Climate change, Multi-channel singular spectrum analysis