

# 大氣折射率之氣候特性研究

陳政和 曾仁佑

中央大學大氣物理研究所 中央大學大氣物理研究所

## 摘要

隨著「中華三號衛星」計畫的提出，在不久的將來，我們將可利用 GPS/MET 衛星所觀測到之大氣折射率變化於氣象作業上，必將能大大地提升天氣預報之準確度。然而，現今我們對大氣折射率的分布與各天氣及氣候系統間的關係並不十分了解，所以本研究的目的即是要對大氣折射率本身的特性在天氣系統與氣候系統的尺度上做進一步的探討。期望能藉折射率，使我們對大氣有更深層的了解。

本文使用 1986-1989 四年 ECMWF/TOGA 溫度與溼度場的資料，計算出大氣折射率，看看透過折射率，可以反應出的大氣狀況為何。結果顯示，大氣折射率的變化，在氣團的特性、季風肇始等現象上均表現出不錯的一致性。

### 一、緒論

GPS/MET 由低軌道(Low-Earth orbit, LEO)衛星與全球定位系統(Global Position System, GPS)衛星組合而成。由於人造衛星的軌道可以很精確的計算出來，因此，用衛星作為定位基點的想法非常盛行。至今美國已經有 24 顆全球定位系統衛星，這個系統用了五十多座地面追蹤站，可以把衛星軌道的計算提升到 50 公分左右的精確度(民間使用)(Businger et al., 1996)。

衛星訊號由太空中經過大氣傳播到地表的過程中，大氣引起的效應依其影響的介質性質可以分為兩種，一種是離地面高度 50 公里的中性大氣區的對流層效應，另一種是 50 公里以上的高層大氣之氣體分子及原子離子化的電離層效應。造成這兩者改變的原因，是沿著傳播路徑上的折射指數  $n$ (refractive index)引起，因此可利用接收到訊號的時間差來表示訊號被折射後所行進的路徑與直線距離的差，進而估計出折射指數，而大氣折射率( $N$ , refractivity)則表示為  $N=10^6(n-1)$ 。

以下列舉一些大氣折射率在氣候上的應用。GPS/MET 反演所得的溫度垂直分布，在水汽含量為 0 的假設下，與探空及同化資料比對，發現在 5~30 公里間，垂直解析度由下往上為 100~500 公尺，水平解析度為 300 公里的條件下，溫度的準確度可以達到  $1^\circ\text{C}$  的誤差範圍以內(Kursinski et al., 1996)。在數值模式上的應用，有 Eyre(1994)、Zou et al.(1995)等人，將折射率同化預報在模式中，可以使溫度場、風場、及水汽場自然的調節到一個穩定的狀態，結果

比傳統數值預報法更正確的預測到即時氣旋的位置與強度，顯示了直接使用大氣折射率(或是 bending angle)在高解析度的全球預報模式中所得到的結果，會比從折射率分別反演出溫度及水汽所得的結果還好。

由上述的論文回顧，我們知道大氣折射率是一個相當有用的參數，只是 GPS/MET 尚未全部發射之前，要對全球做直接的大氣折射率(或 bending angle)觀測是很困難的。所以本研究的目的，要以氣候的觀點，用 ECMWF 資料中的溫度場及水汽壓力來計算反演出大氣折射率，進而分析其氣候特性，看看折射率在氣候的變化上扮演的角色，及是否可以直接作為氣候分析的參考依據。

### 二、資料來源與計算方法

#### (一)、資料來源

本文所用的資料為 ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasts)/TOGA(Tropical Oceans and Global Atmosphere) Basic 的同化資料，使用的變數為溫度場與溼度場。資料水平解析度為  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  經緯度網格，全球的網格數為  $144 \times 73$  點，每日有兩次(00Z 與 12Z)，垂直方分為向 14 層，時間為 1986-1989 四年，資料缺漏之處則使用線性內插法補齊。選取這四年的原因，主要是要分析 ENSO 及反 ENSO 之特性。從南方震盪指數(SOI)可知，1986 冬季到 1987 為 ENSO 年；而 1988 到 1989 為 anti-ENSO 年。由此可以看出明顯的大氣的年際變化情形。

可以很簡單地由 1000hPa 折射率場來了解全球的水汽分布情形，進一步可用折射率的變化來替代水汽的變化。

此外，等值線變化在高緯及低緯地區變化較不明顯，而在中緯度地區則較密集。若以氣團的觀點解釋，可以說在 40°N 以北的區域表現出極地氣團及大陸性氣團的較冷且乾燥的特性，40°S 以南表現出極地氣團的乾燥特性；在 10°S ~ 10°N 的熱帶地區，由於旺盛的對流存在，表現出潮溼的熱帶氣團的特性。

因此，在中緯度地區等值線較密集，即代表熱帶(海洋性、潮溼)氣團與溫帶(大陸性、乾燥)氣團之交界帶；在沙漠地區，例如 20°N 和 30°N 陸地上的沙漠、澳洲北部等等地區，都存在折射率極小值。由此顯示出折射率可以反應出某些特定的氣候狀況，諸如潮溼的海洋、乾燥的沙漠……等等。

### (三)、折射率與季風肇始的關係

當季風肇始時會有明顯的風向變化及降水增加，因此我們試著由折射率的變化來捕捉季風的肇始。

圖 5 為 120°E 上 850hPa 折射率候平均(已減去氣候平均)之時序圖，範圍為 30°S~60°N，選擇這個經度的原因是因為通過南海的區域及台灣附近，可以看到季風的變化。從圖 4 可看出，折射率的年週期的變化是呈現倒 V 字型，即每年大約在四月底到五月中，即 25 候左右開始向北增加。這個增加直到 9 月初，約 50 候左右才逐漸遞減。由 Tao and Chen(1995)的統計，南海之夏季季風平均肇始是從 5 月 10 日開始，鋒面剛開始緩慢的向北移動，到 5 月 20 日時稍微停滯，接著在 6 月初迅速向北移動。因此折射率候的增加現象與 Tao and Chen 的夏季季風肇始時間及向北增加有明顯的一致性。顯示由折射率變化可以清楚觀察到季風肇始的時間。

在 25 候左右的折射率距平會有突然向北增加的現象，甚至突然增加兩次。由 Lau and Yang (1996)的 1986-1994 年 110°E~120°E 的 5 日平均降雨氣候距平比較(圖 4)，亦可看到在 5 月初季風開始時，降水距平有突然向北增加的現象，直到 9 月初才開始減少。因此這個突然增加的結果，與 Lau and Yang 的氣候平均結果比較，可知這個突然增加的現象應該是代表降水的增加，而且是夏季季風開始所造成的。過了夏季之後，受到日照南移的影響，折射率正距平也隨之向南移動。顯示折射率可以觀測到季風的

肇始時的雨量增加現象，亦為海洋性溼熱氣團的移動情形。

從本節的分析，可知折射率在氣候的初步應用，可以對季風的肇始及雨量做定性上的分析，至於定量上的分析有待進一步研究。

### (四)、天氣個案分析

選擇 1989 年 9 月 11、12 和 13 日期間侵台之中度颱風沙拉進行分析，這個颱風特色是當年登陸台灣且帶來大量降雨。由這三天的地面天氣圖上可看到 11 日時沙拉颱風在台灣之東南方海面上，暴風半徑很大且強度一度幾乎接近強烈颱風，11 日下午由花蓮登台，12 日轉為輕度颱風，到 13 日上午中心由台灣北方移出海。從 GMS-3 之紅外線衛星雲圖可知，11 日颱風的雲帶已經籠罩全台，13 日雲帶則不明顯。由圖 6 這三天 1000hPa 的折射率圖上可約略看到隨著颱風的向北移動，折射率在黃海、東海及日本海地區有逐漸密集的現象。從等值線小於 365(陰影區)可看出，颱風外圍環流影響將乾的空氣向南帶動。在海面上，等值線大於 390 的區域，表示颱風外圍環流把溼空氣往北帶動。把等值線大於 390 的區域中極大值連線，與 GMS 衛星雲圖中雲的位置相近，可說是主要的水汽輸送帶。由此顯示若使用折射率來表示颱風的外圍環流與水汽狀態，應該也是可以實行的應用。

### 四、結論

茲將主要之分析結果再簡敘於下：

1. 折射率與水汽在 30°S~30°N 的熱帶及副熱帶地區之中對流(400hPa)以下，及分別在南、北緯 30 到 60 度間之中緯區的下對流層(700hPa 以下)以下，其相關係數的值皆大於 0.8。而折射率與溫度則是在南、北緯 80 度以上或在較高層的地方(約為 400hPa 以上)相關係數值於 0.8。顯示折射率在下對流層與水汽有很好的相關性，在上對流層以上與溫度有很好的相關性。
2. 從折射率平均場的分析，可以看出氣團的特性及基本的水汽分布的情形。
3. 由此四年 850hPa 折射率五日平均，與 Lau and Yang(1995) 的氣候平均結果比較，結果顯示折射率可以觀測到季風的肇始時的雨量增加現象。同時與葉等人(1996)所做之 2~10 月旬降水量比較，亦顯示出折射率在氣候上的應用也可用來觀測降水的現象。

## (二)、計算方法

折射率的計算直接使用 Smith and Weintraub(1953)的經驗式：

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (2-1)$$

此式的誤差值在一般大氣的狀況下約為 0.5%(Resch,1984)。

計算折射率的完整的方程式為

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} - 40.3 \times 10^6 \frac{n_e}{f^2} + \text{high-order-term} \quad (2-2)$$

其中 T 為空氣溫度 (K), P 為大氣壓力 (hPa), e 為水汽壓力 (hPa), f 為發射頻率,  $n_e$  為電子密度。(2-2)表示大氣層中, 折射率會受到氣壓、溫度、水汽含量、電離層電子密度的影響。在氣候上的應用, 主要考慮對流層與平流層的影響, 因此必須修正電離層誤差項, 因為這個誤差很小(約 5%), 可以直接省略(2-2)式的最後面兩項, 得到(2-1)的經驗式。

另外, 因為 ECMWF/TOGA 的水汽資料為相對溼度, 我們需要用一個經驗式換算成水汽壓力:

$$e = 6.1121 \times \frac{\exp\left[T \times \left(18.729 - \frac{T}{227.3}\right)\right]}{(T + 257.87) \times 0.01} \quad (2-3)$$

其中, T 為攝氏溫度( $^{\circ}\text{C}$ ), 即原來的溫度值減去 273.15, e 則為水汽壓力。把溫度(T)及上式的 e 帶入(2-1)即可求得大氣折射率, N。在熱帶地區 1000hPa 處, 等值線的值均超過 350 以上; 850hPa 約在 300~350 之間, 隨高度遞減。

## 三、結果分析

### (一)、大氣折射率與溫度及水汽的關係

圖 1 為 zonal mean 的四年平均之折射率與水汽及溫度相關係數的緯向平均垂直分布圖。從折射率與水汽之相關係數分布圖(圖 1a)中, 可發現在  $30^{\circ}\text{S}$ ~ $30^{\circ}\text{N}$  的熱帶及副熱帶地區之上對流層(約 300hPa 以下)。及分別在南、北緯 30 到 60 度間之中緯區的下對流層(700hPa 以下)。其相關係數的值皆大於 0.6。因此我們可推論, 折射率在南北緯 30 度之對流層及在南、北緯 30 度到 60 度之中緯區下對流層內的區域受水汽的影響甚大, 所以在此區域內大氣折射率堪為水

汽變化之指標。且由於此區, 海洋的面積佔了絕大多數, 又區域內多屬於未開發國家, 因此測站數亦十分稀少, 氣象觀測資料非常缺乏。故若能透過大氣折射率來觀察水汽變化情形, 對於天氣與氣候的預測會是一項非常重要的訊息。

由圖 1(b) 折射率與溫度之相關係數分布圖中, 可看到相關係數大於 0.6 的區域則是在高緯區大致分布於南、北緯 80 度以上及在較高層的地方(400hPa 以上), 因此在這些區域溫度對於折射率有較大的影響。所以在這些區域是可以利用折射率代替與溫度有關的變化情形。

此外, 在圖 1(a)之緯度 80 度以上, 折射率與水汽的負相關係數值也超過 0.6, 然而由於在此處溫度非常低, 因此水汽很容易達到飽和。且由計算折射率之公式, 折射率與溫度及水汽的變化之間並不是線性的關係, 因此在這個區域, 溫度仍然是影響折射率變化的主要因子。

圖 2 由上到下分別為 700, 850 及 1000hPa 之折射率與水汽之相關係數, 即圖 1(a)之剖面。從圖 2 可知, 在水平方向上, 折射率與水汽的相關仍然佔有很大的比例, 即使到了 700hPa, 熱帶及副熱帶之相關係數值仍大於 0.8 以上, 顯示折射率除了在 zonal mean 與水汽有很大的相關外, 在低對流層的等壓面上也有很好的相關性。因此若能使用折射率資料在低對流層的區域, 將可增進我們在氣候上的了解。

由以上所述可知, 只要正確的區分折射率所在的區域, 並建立長期折射率觀測資料, 就可以作為這些地區的氣候變化指標。然而, 折射率實際上的觀測並非十分完美的。現今的垂直觀測仍然受到幾個因素的限制。排開系統的誤差, 大氣本身的狀態使垂直解析度變小, 因為大氣的成份(水汽)是一直變動的, 且其垂直梯度變化極大, 因此形成了折射率觀測的一個障礙, 例如 GPS/MET 經常觀測不到 800hPa 以下之大氣折射率。如果不能克服此問題, 將會嚴重影響中華衛星三號觀測低層的氣候變化的準確性, 也會影響天氣系統暨觀測之可信度。

### (二)、折射率平均場的分析

圖 3 是 1986~1989 四年平均的 1000hPa 折射率場。我們要嘗試從本圖得到關於折射率基本場表現出的氣候特性。從圖上可以看出折射率的分布在熱帶地區有極大值出現, 隨緯度增加而遞減。這個結果, 與上一節討論的折射率與水汽的相關及全球水汽分布狀況吻合, 因此即

4. 對於颱風這樣結構複雜、發展快速的中尺度天氣系統，雖然不能藉由折射率訂出準確的位置，然而在水汽輸送的掌握是天氣圖所不及的。

由以上結果可知，我們對於折射率在大氣中的特性有了進一步的了解，尤其在與水汽有關的變化方面，折射率有不錯的表現，是一個值得繼續研究的題目。若能解決在下對流層中觀測上的誤差，將可使折射率在氣候上的應用更完美。

#### 參考文獻

葉篤正、黃榮輝等, 1996: 長江黃河流域旱澇規律和成因研究。山東省濟南市: 山東科學技術出版社。387pp。

Businger S., S. R. Chiswell, M. Bevis, J. Duan, R. A. Anthes, C. Rocken, R. H. Ware, M. Exner, T. VanHove, and F. S. Solheim, 1996: The Promise of GPS in Atmospheric Monitoring. *Bull of the American Met. Soc.*, 77, no.1, January

Chang and T. N. Krishnamurti, Eds., Oxford University Press, 60-92.

Eyre, J., 1994: Assimilation of radio occultations measurements into a numerical weather prediction system. *Tech. Memo. 199*, Eur. Cent. for Medium Range Weather Forecasts, Reading England.

Kursinski, E.R., and Co-authors, 1996: Initial results of radio occultation observations of Earth's atmosphere using the Global Positioning System. *Science*, 271, 1107-1110.

Lau, K. M. and S. Yang, 1996: Seasonal variation, abrupt transition, and intraseasonal variability associated with the Asian summer monsoon in the GLA GCM. *Journal of Climate*, 9, 965-985.

Resch, G. M. and F. K. Brunner, 1984: Water vapor radiometry in geodetic applications. *Geodetic Refraction*, New York, 53-84.

Smith, E. K., and S. Weintraub, 1953: The constants in the equation for atmospheric refractive index at radio frequencies. *Proc. IEEE*, 41, 1035-1037.

Tao, S. Y., and L. X. Chen, 1987: A review of recent research of the East Asian summer monsoon in China. *Monsoon Meteorology*, C.P. Peixoto, J. Pinto, Oort and H. Abraham, 1992: Physics of Climate. *American Institute of Physics*. New York, 520pp.

Zou, X., Y.-H. Kuo and Y.-R. Guo, 1995: Assimilation of atmospheric radio refractivity using a nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, 123, 2229-2249.

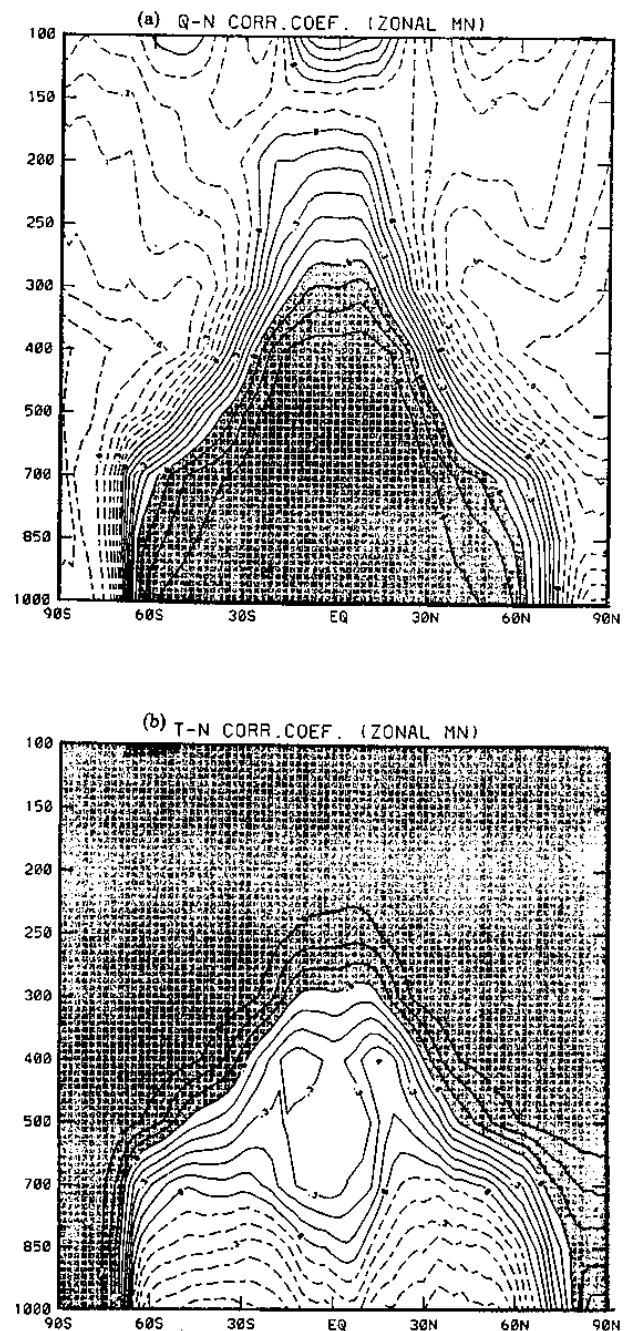


圖 1、大氣折射率與水汽(a)及溫度(b)相關係數的緯向平均分布。陰影區為相關係數大於 0.6 的區域。間距 0.1。

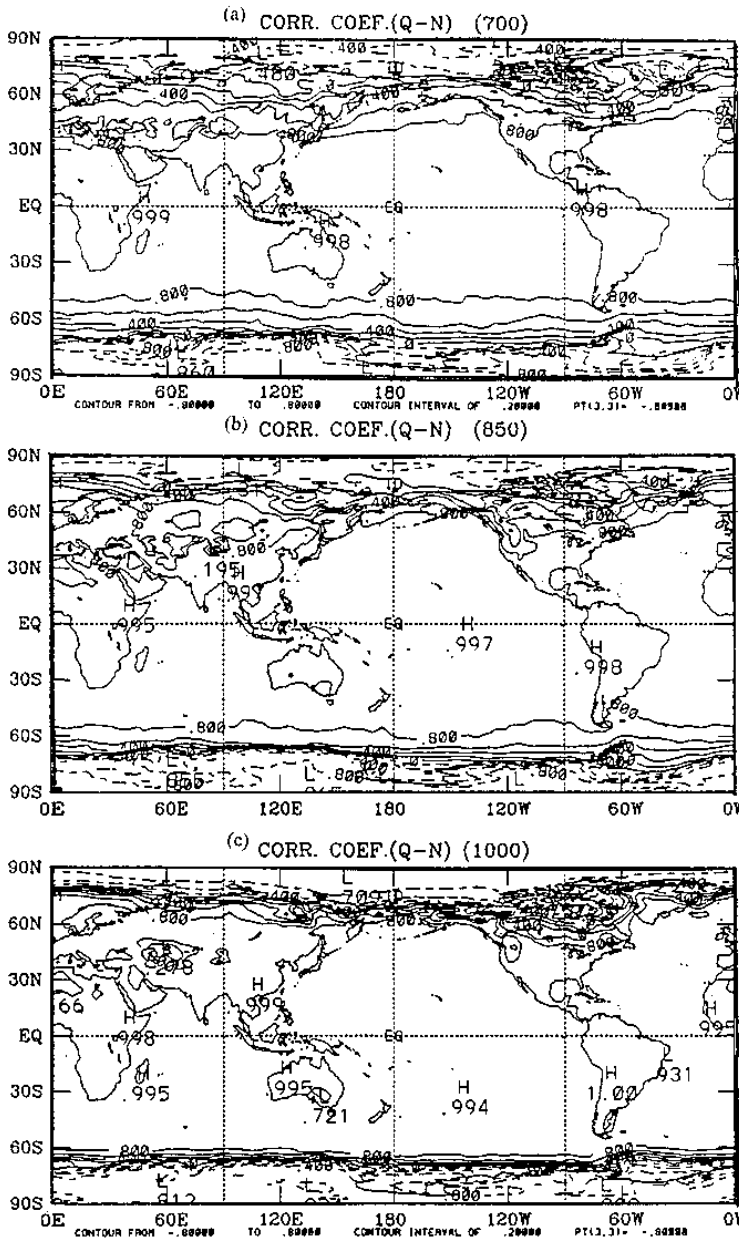


圖 2、折射率與水汽相關係數分布圖。  
(a)700hPa(b)850hPa(c)1000hPa

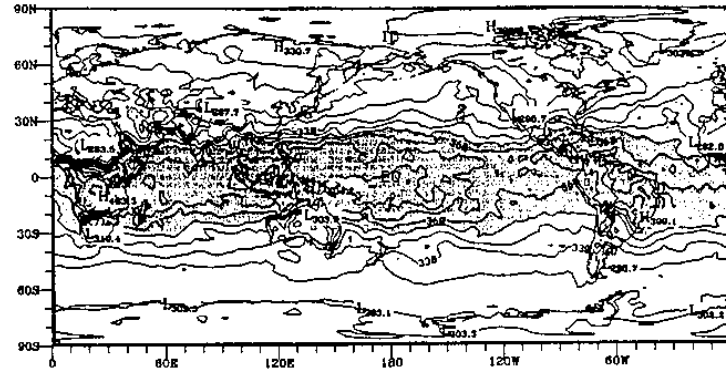


圖 3、1000hPa 折射率平均場(1986~1989)。陰影區為折射率值超過 350。間距 10。

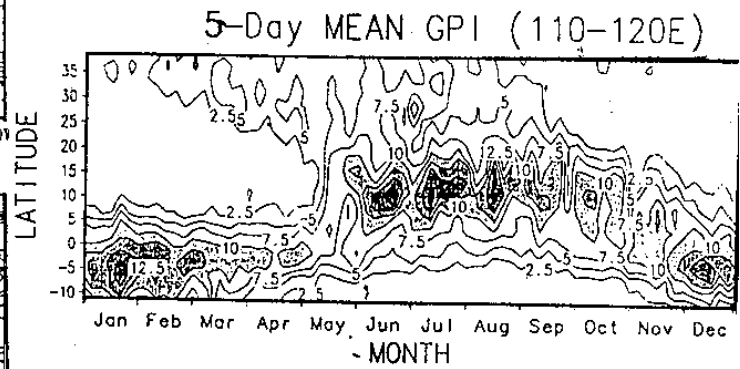


圖 4、1986~1994 年 110<sup>0</sup>E~120<sup>0</sup>E 之 5 日平均降雨氣候距平。(摘自 Lau and Yang,1996)

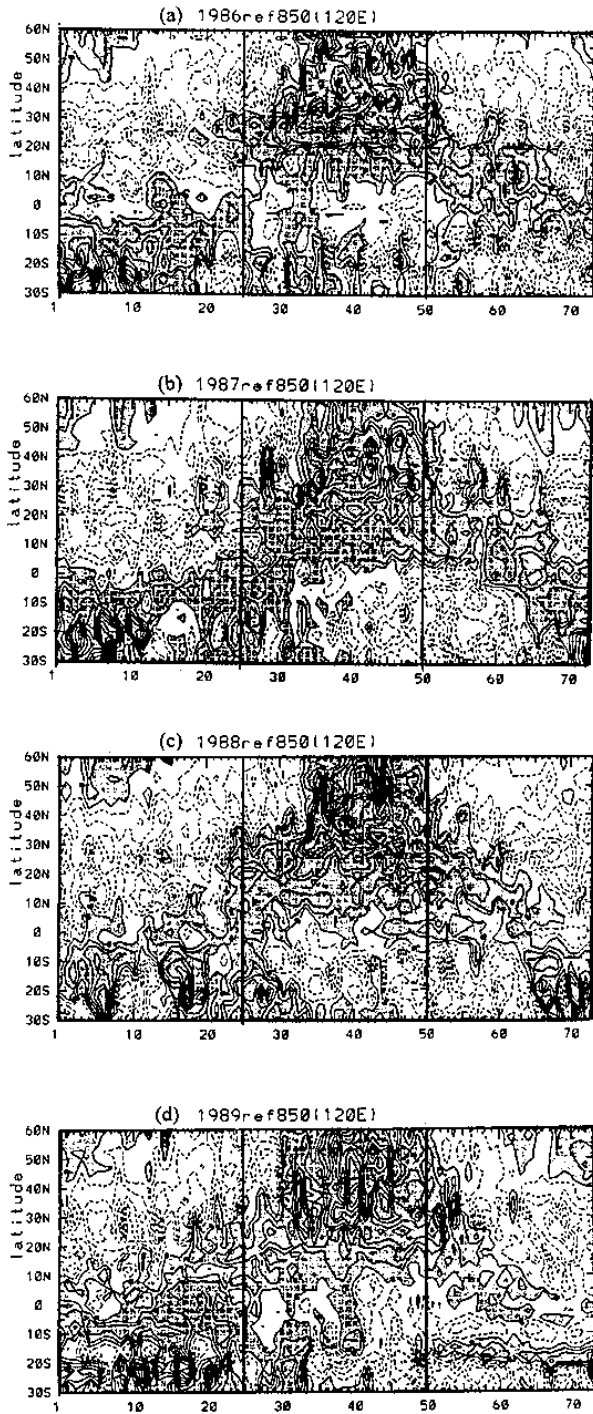


圖 5、1986~1989 折射率 850hPa 候(減去氣候平均)。(a)1986 年(b)1987 年(c)1988 年(d)1989 年。間距 5。陰影區為正值。

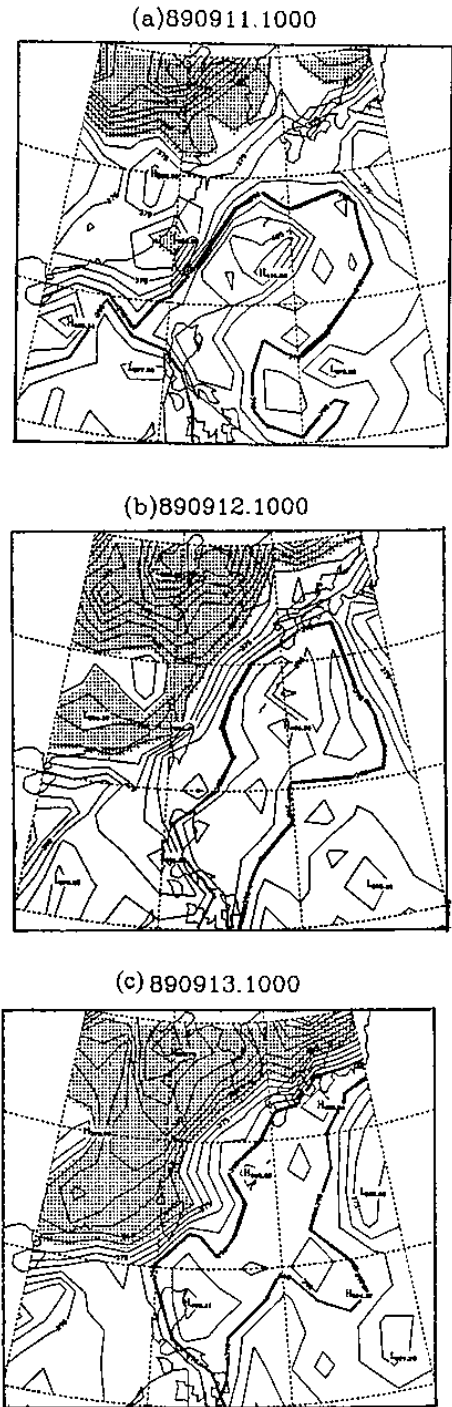


圖 6、1989 年 9 月 11~13 日 1000hPa 之折射率場。(a)9 月 11 日(b)9 月 12 日(c)9 月 13 日。間距 5。陰影區為小於 365。粗線代表等值線值 390。