

東亞地面紫外線通量的氣候特徵與 相關因子的氣候關聯性探討

尤思喻 柳中明

國立台灣大學大氣科學系

(中華民國九十六年七月六日收稿；中華民國九十七年三月二十四日定稿)

摘 要

本研究選定東亞(88.125°E~151.875°E、3.5°N~47.5°N)範圍，使用 TOMS 衛星遙測數據，針對一、四、七、十月的資料進行研究，觀察東亞地區近地面紅斑權重紫外線輻射通量(280nm~400nm)及其影響因子間的空間變化關聯性。整體而言，透過長期平均及經驗正交函數分析，近地面紫外線輻射通量與反射率的特徵分佈相關最為明顯，與臭氧次之，而與懸浮微粒間的相關無合理的關聯性。同時考慮不同地區的差異，將討論的範圍分成六個區域，各區皆呈現總臭氧量逐年減少趨勢。高空總臭氧量的持續減少，原則上會造成地面紫外線輻射通量的逐年增加。不過，若觀察空間分佈關聯性，則地面紫外線輻射通量與反射率的相關性明顯，在各不同區域內，反射率的變動對地面紫外線輻射通量的影響，會較總臭氧量來得關鍵或是明顯。此外，由於 TOMS 反演近地面紅斑權重紫外線輻射通量的過程中，是使用反射率來處理地表反射、雲與懸浮微粒的衰減影響，而未使用懸浮微粒指數於計算過程中。所以，目前分析顯示該處理方式可能不利於突顯懸浮微粒的影響，即使是在懸浮微粒濃度較高的四月，懸浮微粒指數的變動與近地面紫外線輻射通量間，無合理的關聯性存在。

關鍵詞：地面紫外線輻射通量、EOF 分析、影響因子探討

一、前言

太陽輻射中，紫外線為波長小於可見光(400 to 700 nm)的波段，分成三部份：UVA (320 to 400 nm)、UVB (280 to 320 nm)及 UVC (< 280 nm)。UVC 在通過大氣層的過程中完全被大氣吸收；大部分的 UVB 則被臭氧吸收無法到達地面，所以當大氣中的臭氧減少時，到達地表的 UVB 將會增加；UVA 則可自由穿透大氣。TEMIS (Tropospheric Emission Monitoring Internet Service, 隸屬於 ESA, European Space Agency) (<http://www.temis.nl/uvradiation/info/index.html>) 指出：到達地面的紫外線波段為 UVA 及部分的 UVB，其中 UVA 約佔了全部的 94%，UVB 佔 6%。Setlow (1974)分析 256nm~370nm 間輻射對人體 DNA 的破壞，而引致皮膚癌；發現在 30°N，波段小於 305nm 的輻射，影響最大。由此可知，雖然能夠抵達地面的紫外線中，UVB 的部分僅佔 6%，卻能造成不可忽視的影響。

本研究主要採用 NASA TOMS (Total Ozone Mapping System) 資料 (<http://toms.gsfc.nasa.gov/>) 進行分析，針對抵達地面的 280~400nm 紫外線波段進行討論。

紫外線的入射量隨著季節及地域性質差異而有所不同，影響因子除了天頂角度外，尚包括臭氧濃度、懸浮微粒、反射率、雲...等(Floyd et al., 2002)。根據 Krzyścin (2000)指出：總臭氧量的季節性或區域性垂直剖面出現顯著變化，可造成 5% UV 輻射量變動。

世界氣象組織 WMO (World Meteorological Organization, 2006)指出：位於加拿大、中歐、日本的儀器顯示，過去 20 年來每年平流層的臭氧含量均遞減 1%。2006 年 10 月 5 日南極臭氧洞

減少達 40.8 百萬公噸，此為歐洲 GOME/SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY) 衛星遙測記錄的最大量，也超越了 2000 年 9 月 29 日的單日總臭氧減少最大量 (39.6 百萬公噸)。南極臭氧洞的定義為總臭氧量值低於 220D.U 的區域，其分佈範圍，在 2006 年 9 月間擴張達 28.9 百萬平方公里。臭氧洞面積的擴張，會影響近地面紫外線指數的明顯上升。此外，Prasad and Niranjana (2005)指出：在太陽入射天頂角大小不同的地區，1% 臭氧總量的改變，在天頂角較小的地區將造成 UVB 入射量 5%~6% 的變動。而在太陽天頂角較大的地區則造成 1%~3% 變動，所以在討論地面紫外線輻射通量及其影響因子時，必須先考慮季節變化的影響。

懸浮微粒主要散射紫外線與可見光，平均而言東亞地區懸浮微粒對地面的短波通量造成的影響達 -6.0 W/m^2 (Chang and Park, 2004)。此外在特定的地區，懸浮微粒對直射的 UVB 輻射量的反射率會超過 50% (Acosta and Evans, 2000)。有關雲的影響，Pallé et al. (2004)指出：地球反射率在 1985 年至 1995 年間持續下降，1997~2001 年太陽輻射入射量明顯增加，2001~2003 年間由於雲的厚度與覆蓋率增加，地球反射率也回升至之前的情形。Ghauri et al. (1998) 指出：70% 的雲遮蔽可減少 20% 到達地面的 UVB 通量，而 100% 雲遮蔽可減少 30%~40% 到達地面 UVB 通量。

前述各項影響因子均會衰減近地面紫外線輻射通量(Liu, et al., 1999)，本文乃使用 NASA TOMS 資料，配合氣候資料，就不同季節期間，衛星遙測所觀察到的近地面紫外線量及各項影響因子的氣候分佈特徵與氣候關聯性，進行分析探討。

二、資料來源及研究方法

(一) 資料來源

本文選定 88.125°E ~ 151.813°E、3.5°N ~ 47.5°N 的東亞範圍 (圖 1) 進行研究。考慮不同季節太陽輻射入射量的變動, 分別選擇元月、四月、七月與十月等四個月份代表冬季、春季、夏季及秋季, 以探討在不同季節期間, 地面紫外線輻射通量與其影響因子間的相互關係。資料主要來自 NASA TOMS 衛星 Nimbus-7 (11/1/1978 ~ 5/6/1993) 及 Earth Probe (7/25/1996 至今; 其中懸浮微粒的資料僅提供至 12/31/2005, 由 OMI 接替提供懸浮微粒資料), 採用 1979 年元月至 2004 年十月的逐日衛星遙測資料 (Version 8), 空間解析度為 1.25°×1.0° 經緯度, 項目包括: 紅斑權重紫外線輻射通量 (Erythemal UV, W/m²)、總臭氧量 (Total Ozone, D.U.)、反射率 (Reflectivity, %)、懸浮微粒指數 (Aerosol Index (AI), AI>0 乃表示有懸浮微粒存在)。

其中反射率 (Reflectivity, %), 乃選定不受臭氧影響的波段 (380nm 波段, Earth Probe 則是使

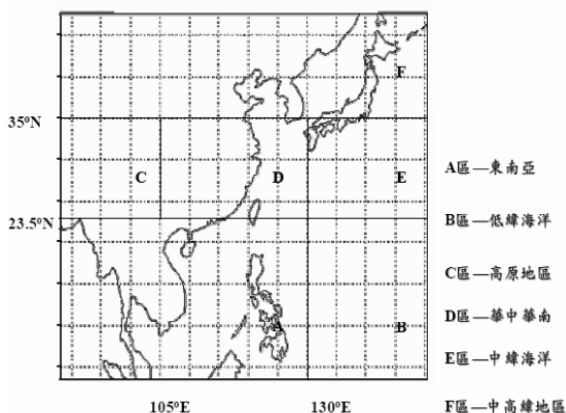


圖 1 本文討論的東亞範圍及六個分區

用 360nm 波段) 來進行反演推算。反射率包括兩個部分: (1) 無雲遮蔽地區, 採用地表反射率 (使用 NOAA (National Oceanic and Atmosphere Administration) NWC (National Meteorological Center) 的平均地貌資料以進行計算)。(2) 雲遮蔽狀態的地區, 則使用 ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) 雲量分佈資料, 計算該區域的反射率。觀察 TOMS 得出的反射率資料與 ISCCP 的總雲量資料 (Total Cloud Amount), 兩者間的空間分佈穩合度高, 整體而言, 高總雲量的地區對應著高反射率。

有關 TOMS 紅斑權重紫外線輻射通量的估算方法, 乃敘述於 Herman et al. (1996), 其乃先依據總臭氧量數據與天頂角、地形高度、大氣分子散射等因子, 估算地面反射率為 0 之時的晴天輻射量。然後再就大氣與地表的反射率變化, 對晴天輻射量進行衰減修正。Ziemke et al. (2000) 的分析, 顯示中高緯度地區總臭氧量減少的趨勢, 約使得 1979 ~ 1991 年間的近地面紫外線輻射量出現每十年減少 3% ~ 7% 的趨勢; 而在夏季當雲與懸浮微粒偏少時, 部份地區的近地面紫外線輻射量則出現增加趨勢。值得注意的是: 反射率的估算除考量地表反射率與雲的影響, 也將懸浮微粒的影響納入 (Herman et al., 2001); 所以在進行紫外線輻射通量估算時, 僅使用反射率資料來估算雲與懸浮微粒對輻射衰減 (吸收與散射) 影響, 而未直接使用懸浮微粒指數以估算懸浮微粒對輻射衰減的影響。至於懸浮微粒指數的估算 (Hsu et al., 1999), 則是使用 340nm 與 380nm 的遙測輻射量與晴空輻射量的差異來估算, 也即未使用 TOMS 紅斑權重紫外線輻射通量資料於估算過程中, 也未影響及後者的估算。這點在後續的分析中, 會發現到二者間並無合理的關聯性。

此外，本研究另參考 NOAA 外逸長波輻射 (OLR, Outgoing Longwave Radiation, W/m^2) 長期平均資料，以及 NCEP/NCAR 再分析資料之地面降水率 (mm/day) 數據，與 NCEP/NCAR 再分析資料之長期平均海平面氣壓場 (hPa) 數據，以利瞭解長期平均綜觀氣候場。這些數據之空間解析度，均為 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 經緯度。

關於 NOAA OLR 月平均資料，時間範圍為由 1974 年的六月至 2006 年的四月。原則上，OLR 與對流的強度、雲量、溫度有關，OLR 出現低值時表示該區域的 SAT (Surface Air Temperature) 低或是上方有雲頂高的對流雲分佈，也即可能有深對流與高反射率；反之，則表示該處僅有淺對流或是無雲與低反射率的情形。Wang and Rui (1990) 指出若一區域的 OLR 值，隨時間變化，出現負值異動，則與該區域空氣出現垂直上升運動有很高的正相關；反之，若 OLR 變化趨勢呈正值異動，則與該區域空氣出現垂直下降運動有很高的正相關。另外，OLR 值在緯度較低的區域，反應水氣分佈的情形較好，所以 OLR 值的變化情形可作為中、低緯背景氣候場及反射率場的參考。

(二) 研究方法

1. 長期平均空間分佈分析

本研究針對長期衛星觀測資料及背景氣候場進行基本統計分析，包括：長期平均 (圖 2、3)、月平均與標準差 (表一)、相關係數等，以觀察紫外線輻射通量、各影響因子及背景氣候的長期空間分佈，並進行 EOF (Empirical Orthogonal Function, 經驗正交函數) 分析 (圖 5、6)，以觀察地表紫外線輻射通量的時間空間分佈特徵。其中，在計算長期月平均過程中，要求研究區域中的每一個網格點，每月的有效資料數必須達到 20 筆以上。其中，Earth Probe 衛星在懸浮微粒項目，於 2002 年七、十月及 2003 年四、七、十月的資料中出現明顯的雜訊，且明顯集中在研究區域中的低緯海洋區域，而為了去除雜訊對平均資料的影響，本研究乃特別將出現問題的點資料摘除之。

關於 EOF (Empirical Orthogonal Function, 經驗正交函數) 分析，又稱為「主分量分析」，為氣象上常使用的統計分析方法，藉著取得特徵向量 (Eigenvector) 與特徵值 (Eigenvalue)，也就是空間或時間分佈的合成，來呈現一組資料的統計特

表一 六個區域，近地面紫外線通量、總臭氧量、反射率、懸浮微粒之 1979~2004 年間，長期 (平均值) \pm (標準差) 列表。表中亦列出趨勢變化率，達 95% 顯著程度者則標以 * 號。

	地面紫外線通量 (mW/m^2)	trend $mW/m^2/year$	總臭氧量(D.U)	trend D.U./year	反射率(%)	trend %/year	懸浮微粒(AI)	trend AI/year
A 區	242.3 \pm 13.2	0.53	261.6 \pm 3.94	-0.22	24.5 \pm 1.32	0.03	0.43 \pm 0.12	0.01
B 區	237.2 \pm 13.9	0.50	262.4 \pm 3.76	-0.20	25.4 \pm 1.46	0.05	0.38 \pm 0.11	0.00
C 區	219.3 \pm 10.3	0.47	273.1 \pm 6.55	-0.56*	32.4 \pm 1.12	0.04	0.37 \pm 0.09	0.00
D 區	117.7 \pm 11.5	-0.73*	284.2 \pm 6.36	-0.49	37.2 \pm 1.42	0.05	0.41 \pm 0.10	0.01
E 區	147.0 \pm 9.62	-0.10	278.9 \pm 7.19	-0.56	28.9 \pm 1.09	0.01	0.37 \pm 0.07	0.00
F 區	90.6 \pm 7.35	-0.07	336.8 \pm 8.68	-0.88*	28.7 \pm 1.33	0.08	0.39 \pm 0.15	0.01

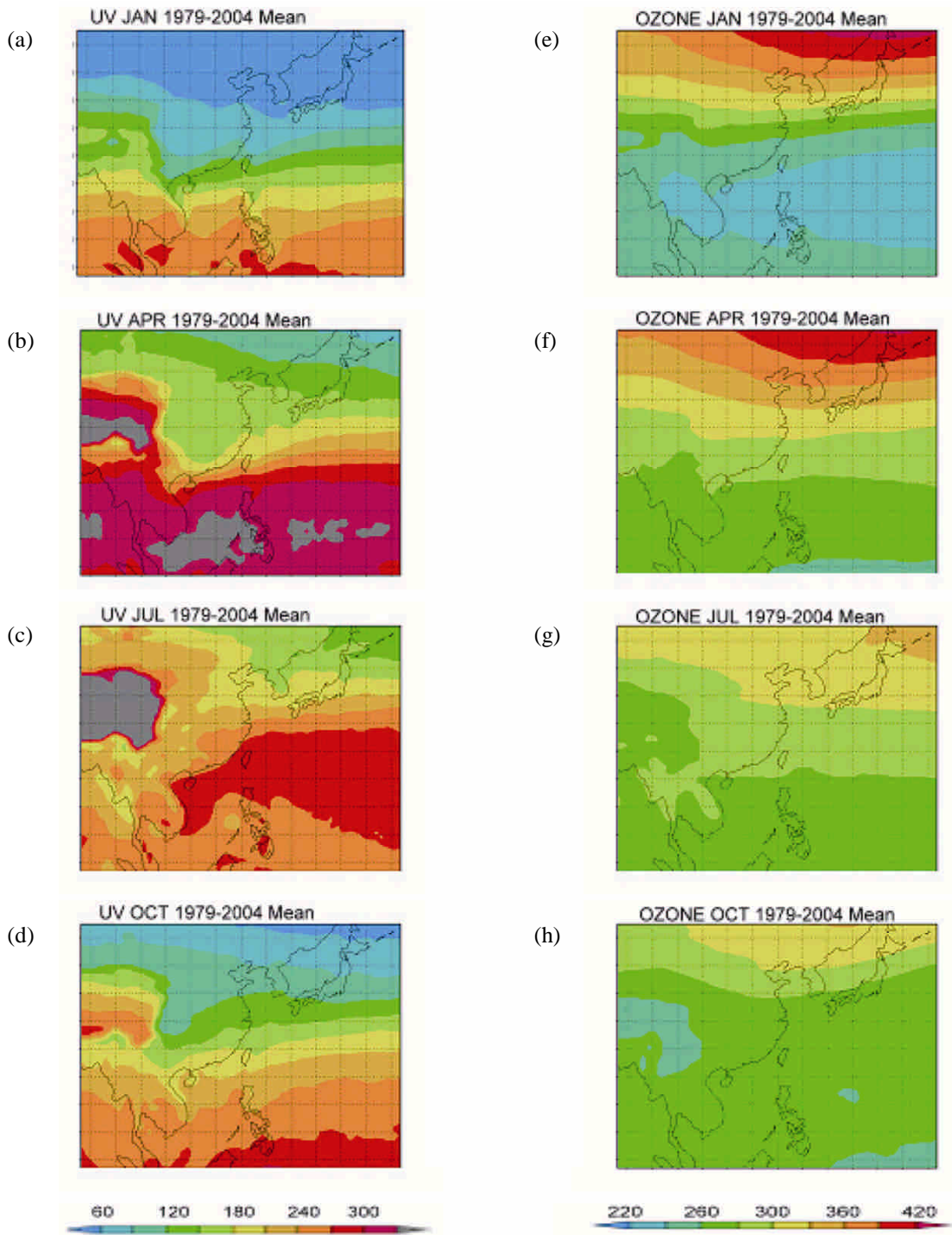


圖 2 TOMS 1979~2004 年長期月平均地面紫外線通量(UV,mW/m²)，(a)一月、(b)四月、(c)七月、(d)十月；長期月平均總臭氧量(OZONE, Dobson Unit)，(e)一月、(f)四月、(g)七月、(h)十月。

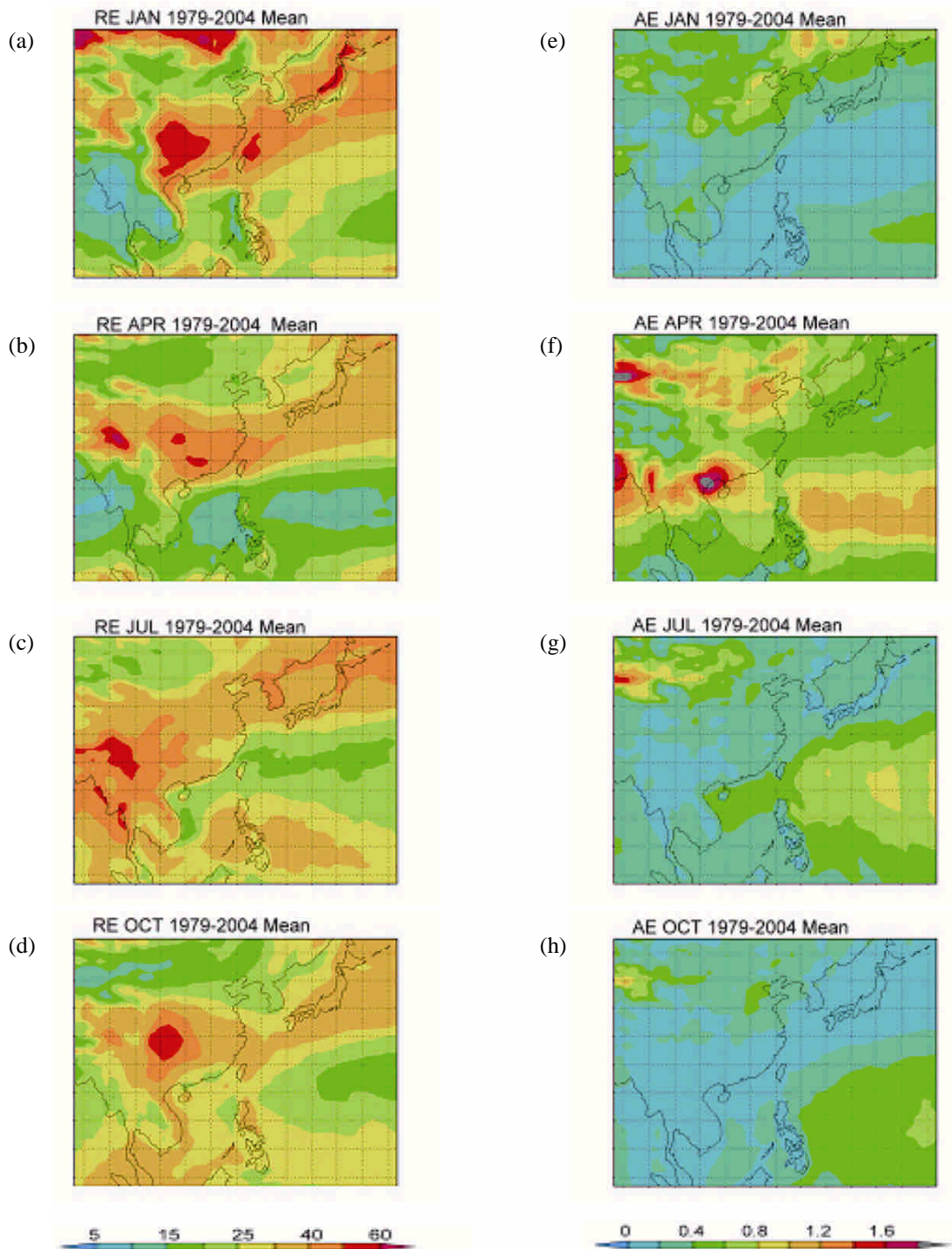


圖 3 TOMS 1979~2004 年長期月平均反射率(RE, %)，(a)一月、(b)四月、(c)七月、(d)十月；長期月平均懸浮微粒(AE, aerosol index)，(e)一月、(f)四月、(g)七月、(h)十月。

徵。同時，可求得一組資料在「空間」以及「時間」上具有代表性的統計量。計算時先將資料處理成逐年月平均距平值，再做經驗正交函數分析，以求取年際間的分量。求取出之特徵向量為場變數的空間分佈，每一個特徵向量對應之解釋方差，乃代表此分量對總方差的貢獻。而特徵向量在不同時間所具有的代表度稱為主成分(Principal Component)，即特徵向量的主分量時間序列。

2. 分區討論

考慮不同的區域特性，本文將討論的範圍分為六個區域(圖 1)：A 區為東南亞地區(88.125°E ~ 105°E、3.5°N ~ 23.5°N)、B 區為低緯海洋地區(105°E ~ 151.813°E、3.5°N ~ 23.5°N)、C 區為高原地區(部分青康藏高原與雲貴高原範圍 88.125°E ~ 105°E、23.5°N ~ 35°N)、D 區為華中華南(大陸東南區域及沿海及台灣 105°E ~ 130°E、23.5°N ~ 35°N)、E 區為中緯海洋區域(130°E ~ 151.813°E、23.5°N ~ 35°N)、F 區為中高緯範圍(88.125°E ~ 151.813°E、35°N ~ 47.5°N)。透過分區長期平均資料分析，可觀察地表紫外線輻射通量及影響因子在不同區域的差異；並透過標準化過程，觀察逐年各項因子的變化以及異常情形。

三、長期近地面紫外線輻射通量分析

(一) 1979 ~ 2004 年長期空間分佈

整體而言，地面紫外線輻射通量(圖 2a~d)多呈緯向分佈，愈往高緯則地面紫外線輻射通量就愈小，同時青康藏高原區因為高度的因素，所以地面輻射通量較高。經仔細查閱與進行簡易計算，發現 TOMS 所提供的數據乃是各地午時的輻射通量，而非是以某地午時為基準之同時輻射通

量。其差別在於經向上每差 30 度就差一小時，所以圖 1 的左側與右側，在同一時間就差了兩小時。因此，圖 2a~d 必須是呈現各地午時的狀況，才能呈現經向變化小(除因高度因素)的特徵。同理，反射率資料應是各點之午時數據，但總臭氧量則不具逐時變化特性。

此外，隨著季節轉移，間熱帶輻合帶(InterTropical Convergence Zone, ITCZ)也會南北偏移，由地面紫外線輻射通量的四月及七月平均圖中，可以看出地表紫外線輻射通量最大值分佈位置北移的情形。四月低緯地區地面紫外線輻射通量，較七月(夏季)來得強。原則上，高輻射區必配合低雲量區(或低反射率區，參考圖 3a~d)，所以 ITCZ 應在高輻射區的下方，至於高輻射區則應是太平洋高壓的下沉無雲區(參考圖 4a~d)。觀察氣候背景場的地面降水率(圖 4e~h)，七月在低緯地區的降水率較四月高，表示七月的降水情形較四月來得密集，而七月的低緯地區 OLR(圖 4i~l)數值也較四月為低，推測七月的低緯地區受到天氣系統(即 ITCZ)的影響，出現較高的反射率(圖 3a~d)，進而影響到地面紫外線輻射通量，造成低緯地區地面紫外線輻射通量最大值出現在四月而非七月。

總臭氧量(圖 2e~h)長期平均明顯呈現緯向分佈，總臭氧量由低緯向高緯增加，顯示是受平流層以上的臭氧分佈影響。但是，青康藏高原的總臭氧量較同緯度的其他區域為低，特別是在七月及十月。此乃因為當地海拔高度高，配合夏季熱舉升與動力作用，使得上升氣流在高空的輻散作用，促成臭氧濃度減少(周等，2004)。在當地，由於較低的臭氧量配合較突出的高度，使得地面紫外線輻射通量在青康藏高原地區(圖 1 內 C 區)，相較同緯度其他地區，呈現明顯高值，其中以七月最為明顯。

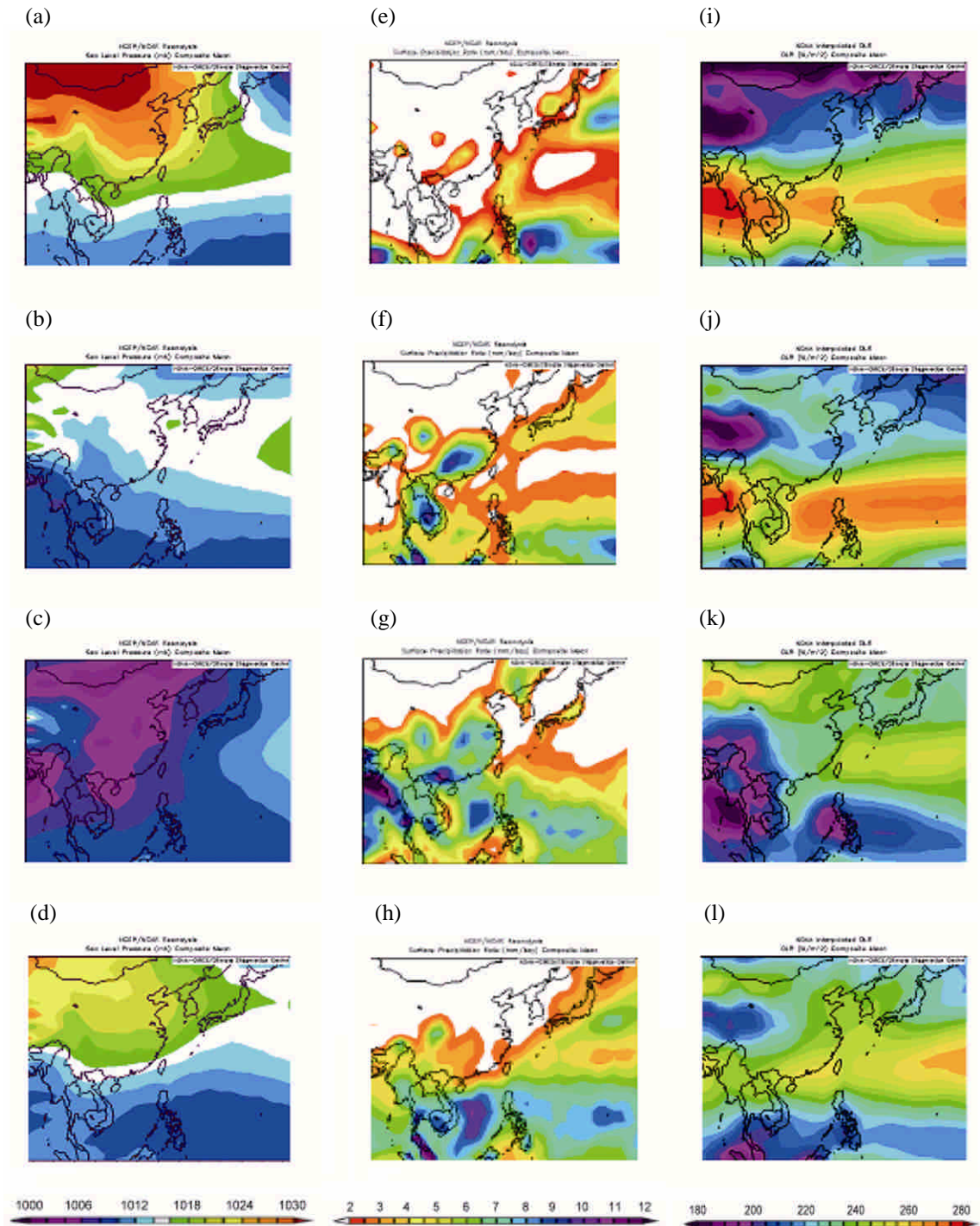


圖 4 NCEP/NCAR 再分析資料，1979~2004 年長期月平均海平面氣壓場(hpa)，(a)一月、(b)四月、(c)七月、(d)十月；地面降水率(mm/day)，(e)一月、(f)四月、(g)七月、(h)十月；外逸長波輻射(OLR, wm^{-2})，(i)一月、(j)四月、(k)七月、(l)十月。

一、四、十月地面紫外線輻射通量在青康藏高原以東、華中華南一帶區域出現低值南伸的情形，反射率在同樣的區域則出現較高值。此外，地表紫外線輻射通量元月在海南島、中南半島及菲律賓附近，可看到兩支低值南伸的分佈，而元月的反射率在同一區域亦可發現兩支高值南伸的分佈。地面紫外線輻射通量與反射率間負相關性高，是與當地雲雨發展有關(Herman et al., 2001)。不過，北方與高山地帶之元月高反射率區，則明顯與冰雪反射高有關，紫外線強度的分佈特徵就不受其影響，分析時確實需注意分辨。

懸浮微粒(圖 3e~h)長期四個月平均中，在低緯海洋一帶，皆有高值分佈情形，以四、七月較為明顯，推測受到海洋排放 DMS(二甲基硫 dimethylsulfide, 是一種重要的天然硫排放物質，主要來源為海洋浮游植物)的影響。四、七、十月的 40°N 內陸一帶，則出現較高值分佈。觀察懸浮微粒四個月的長期平均中，以四月長期月平均的分佈情形與其他三個月最為迥異，其中四月月平均華北黃河流域一帶及 10°N~25°N 間陸地區域出現高值，分別與大陸沙塵暴(Kim et al., 2004)及東亞生質燃燒(Heald et al., 2003)影響有關。

觀察海平面氣壓場(圖 4a~d)，一、十月華中華南及台灣地區主要在大陸高壓籠罩之下，因冬季大陸高壓出海，高壓前緣受到海洋性質影響，高壓海洋變性，於前緣形成天氣系統，成雲降水而出現高反射率(圖 3a,d)。另受到大陸高壓與太平洋高壓勢力消長而形成的鋒面系統影響，反射率於四月在華南至日本沿線一帶出現較高值。此外，四月在四川一帶 105°E 以東的區域，出現低壓分佈，該區域亦出現反射率高值。

觀察反射率長期四個月平均與地面降水率以及 OLR 長期月平均資料，反射率與地面降水率在四月、七月時的相關性較其他月份為高。反射率高值出現的區域，對應 OLR 值則於該處出現低值，兩者間相關性相當高，尤其在低緯地區，兩者明顯相關。元月份因為冰雪影響，反射率與各因子之相關較差；其中，NCEP 再分析資料中之地面降水率，顯然無法顯示出北方的低降雪量。

(二) 1979~2004 長期 EOF 分析

使用經驗正交函數(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析長期主要空間分佈型態，求取影響最大的時間、空間特徵型態，其中明顯正值、負值出現位置表示具分佈特徵，配合主分量時間序列可瞭解何時最符合這樣的空間分佈。本節選擇地面紫外線輻射通量、總臭氧量、反射率及懸浮微粒在一、四、七、十月的長期 EOF 1，也就是在所有樣本中佔最大比重的空間分佈進行討論，以觀察各項因子在空間分佈上的特徵。

地面紫外線輻射通量 EOF 1，元月(圖 5a)在菲律賓附近低緯海洋區域出現最大正值；四月(圖 5b)則在低緯區域呈現負值分佈、高原地區呈較高正值分佈，表示此二處在空間分佈上，具反相位特徵；七月(圖 5c)則在華南沿海至日本沿線、台灣及菲律賓附近低緯海域、中南半島一帶出現明顯正值；十月(圖 5d)則在華南沿海呈現較高正值，而低緯區域出現明顯負值，此二處呈反相位分佈。總臭氧量 EOF 1(圖 5e~f)，一、四月呈緯向分佈；四、七月在中高緯海域上出現特徵；而十月則在中高緯區域出現特徵。顯然，在空間分佈上，總臭氧量與紫外線輻射通量間的特徵差距極大，這在前節的分析中已可觀察到，但透過 EOF1 的分析，卻可獲致比較明確的訊息。

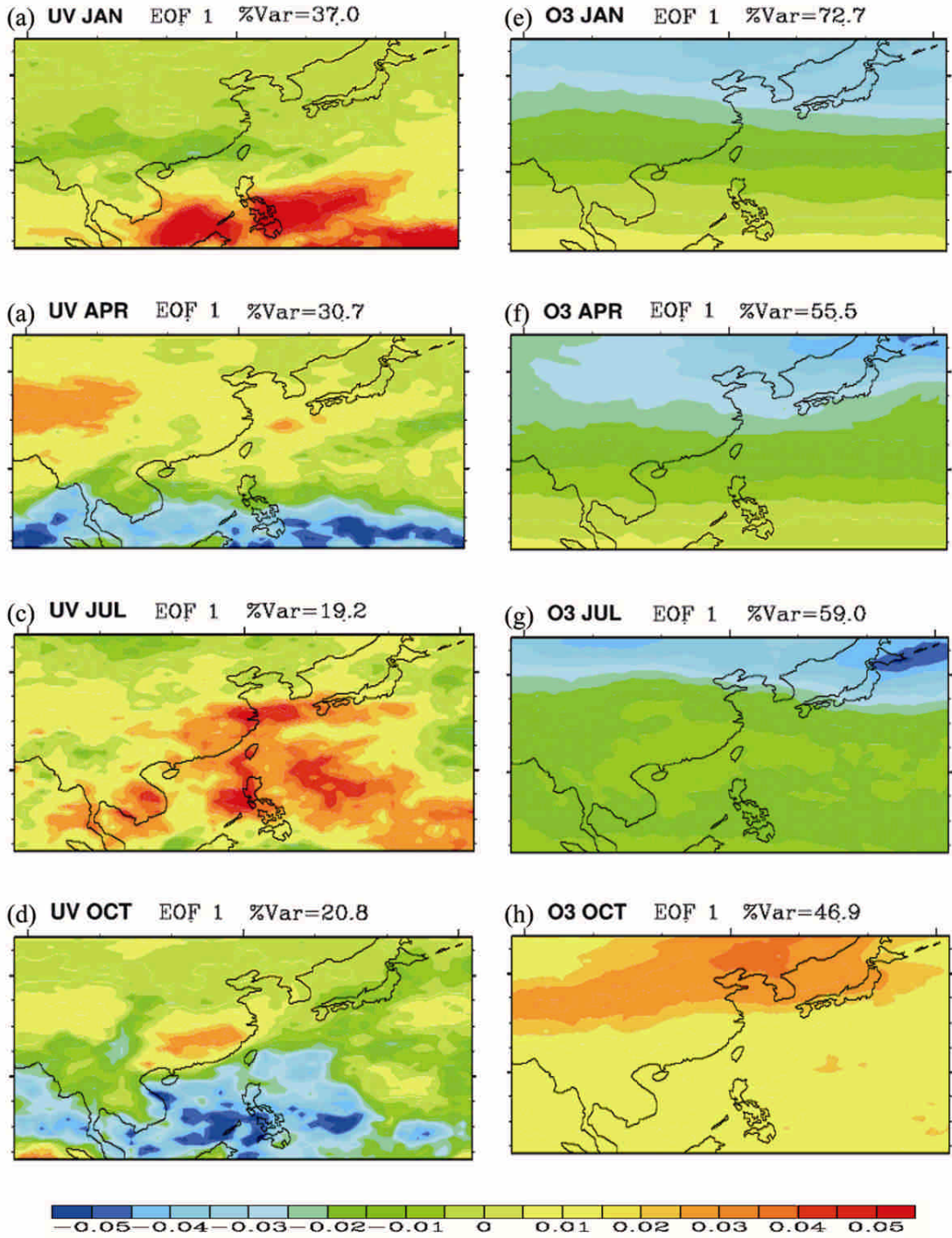


圖 5 TOMS 地面紫外線通量(UV)1979~2004 長期資料，經 EOF (經驗正交函數) 分析後的第一特徵 EOF 1，(a)一月(b)四月、(c)七月、(d)十月。(e)~(f)為總臭氧量(O₃)之 EOF1。

至於反射率的 EOF 1，元月（圖 6a）在華南沿海一帶以及菲律賓附近低緯海域出現反相位特徵；四月（圖 6b）在 45°N 以北的內陸區域上出現最大正值，而在高原以東區域有較大負值分佈，正、負值區域具反相位分佈特徵；七月（圖 6c）在中南半島西部一帶有明顯高值分佈、在菲律賓及韓國一帶呈較高正值、而在華南台灣沿線及 45°N 以北的內陸區域出現明顯負值；十月（圖 6d）在高原以東及 20°N 以南的低緯區域出現明顯負值，而在華南沿海一帶出現較高正值分佈，此二處呈反相位分佈。

仔細比較紫外線輻射通量與反射率的 EOF1，除了在高緯度地區，二者間呈現相當高的負相關，也即正、負值區域出現相對應的現象，如在華南地區（高值）而低緯海洋區（低值）呈現反相位分佈。

分析反射率與地表紫外線輻射通量在一、四、七、十月的主分量時間序列，發現二者間不只空間分佈特徵位置相似，且該空間分佈特徵的主分量時間序列分佈上，大致呈現互補情勢。換言之，年代間，符合地表紫外線輻射通量 EOF 1 高值出現時，且為地面紫外線輻射通量高/低值處，在當年同期就較偏向反射率 EOF 1 高值出現，且在同處出現反射率低/高值。以 1998 年元月為例，同時為最具地面紫外線輻射通量 EOF 1，及反射率 EOF 1 空間分佈特徵的年代，地面紫外線輻射通量高/低值則對應上反射率低/高值。

懸浮微粒 EOF 1（圖 6e~h），元月中高緯區域出現明顯正值；四月在 35°N 以北及 20°N 一帶的陸地區域，以及低緯海洋區域上出現較高正值分佈；七月在中低緯海域以及中高緯內陸區域上

出現較大負值分佈；十月在中高緯陸地區域出現明顯負值分佈。大致上，懸浮微粒的特徵空間分佈與地面紫外線輻射通量間相關情形不明顯，即使是在懸浮微粒的濃度較高的四月，也是呈現相關性不高的現象。

(三) 1979~2004 相關係數分析

本節計算與繪出 1979~2004 年地面紫外線輻射通量，分別與總臭氧量及反射率間的逐月相關係數之空間分佈圖（圖 7）。若以相關係數大於 0.4 與小於 -0.4 的區域，視為正相關或負相關明顯的區域，則觀察地面紫外線輻射通量與總臭氧量的相關係數分佈，負相關情形在一、四、七月間非常明顯，但是以北緯 30~40 度青康藏高原地區的負相關十分明顯（相關係數小於 -0.8），表示在高原地區，總臭氧量多寡變動對地面紫外線輻射通量的大小變化影響大。值得注意的是在十月份，除了高原地區、北緯 45 度以北地區及低緯部分海洋外，其他地區均呈現正相關性，不過相關係數至多才達 0.4。也即此正相關區域似乎顯示總臭氧量的變化與近地面紫外線輻射量呈現同步變化，但是屬於弱的正相關，顯然是應有其他更重要的因素在影響地面紫外線輻射量的變化，而其變動恰好與總臭氧量的變動接近同步，但後者不應是主要影響因素。

分析地面紫外線輻射通量與反射率的相關係數分佈（圖 7e~h），整體而言，除了高原地區外，其他區域負相關情形十分明顯，也即相關係數小於 -0.6，甚至小於 -0.8。其中，又以十月的相關係數分佈最具一致性，除了北緯 30~40 度高原地區外，其他地區的相關係數多分佈在 -0.6 以下，表示雲量的增加與減少，顯著影響地面紫外線輻射通量的減少與增加。至於在高原地區的正相關

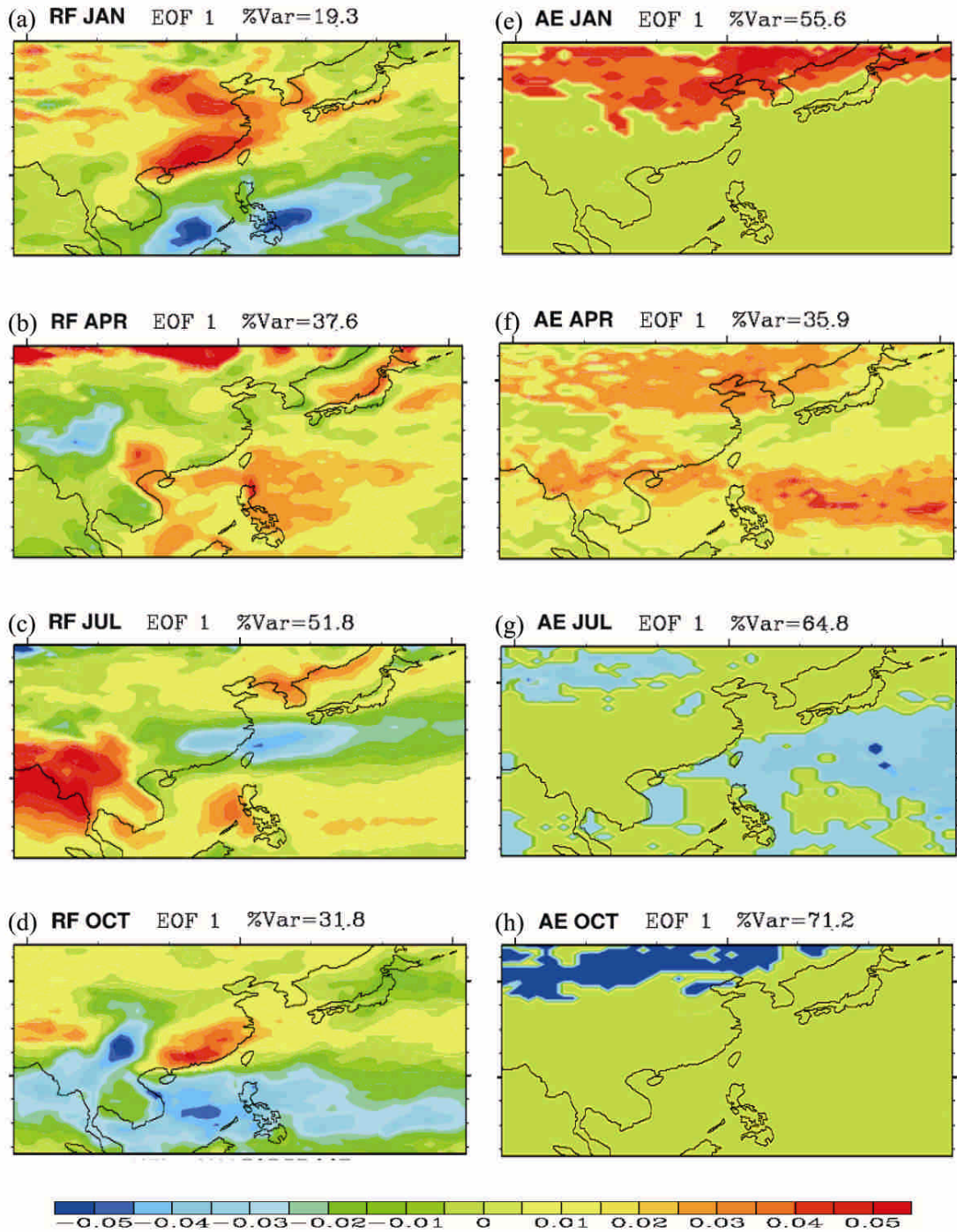


圖 6 TOMS 反射率(RF)1979~2004 長期資料，經 EOF (經驗正交函數) 分析後的第一特徵 EOF 1，(a)一月(b)四月、(c)七月、(d)十月。(e)~(f)為懸浮微粒(AE)之 EOF1。

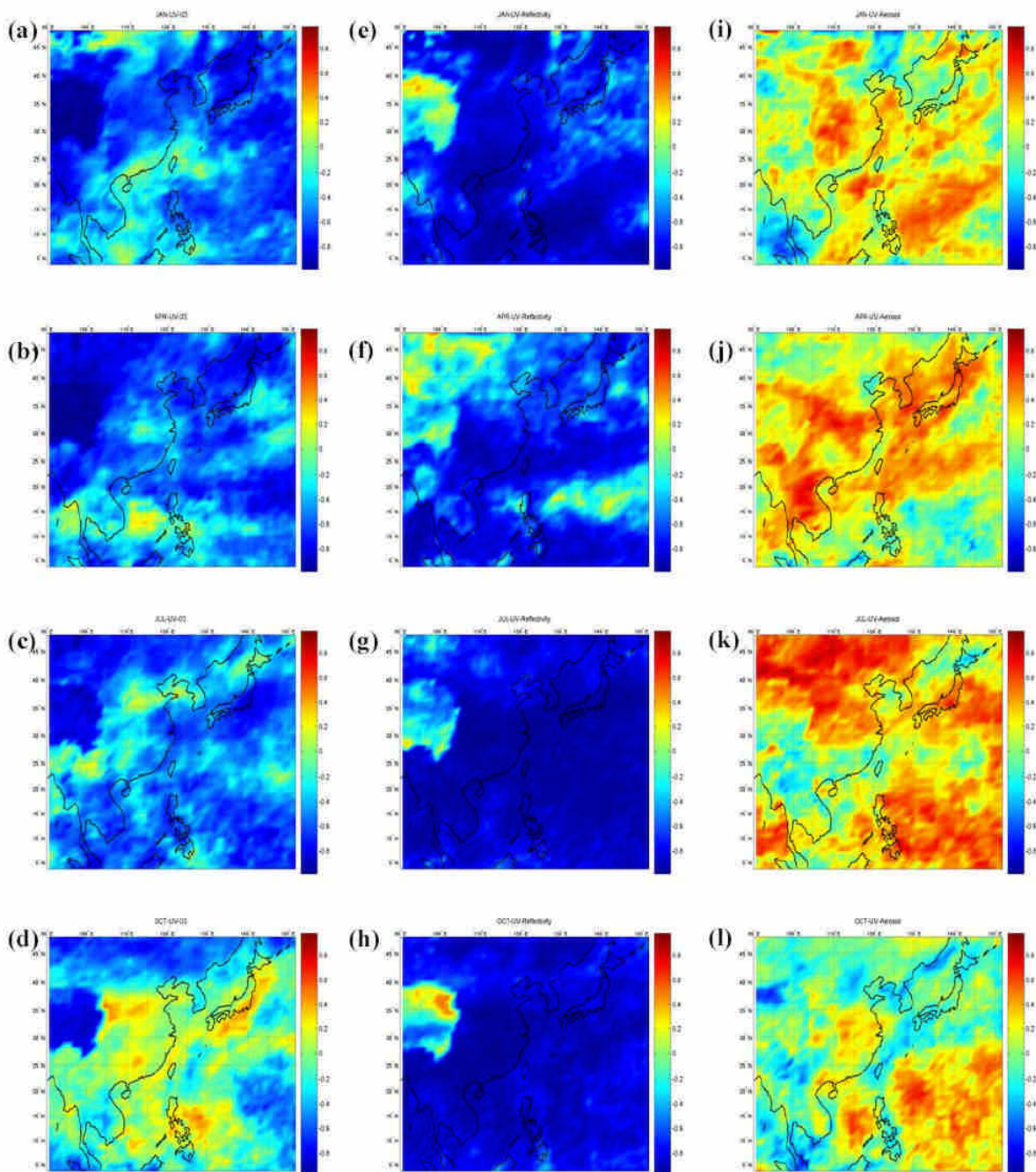


圖 7 地面紫外線輻射通量與總臭氧量之相關係數分布，(a)一月、(b)四月、(c)七月、(d)十月；地面紫外線輻射通量與反射率之相關係數分布 (c)一月、(f)四月、(g)七月、(h)十月；地面紫外線輻射通量與懸浮微粒之相關係數分布 (i)一月、(j)四月、(k)七月、(l)十月。

特徵，其相關係數並不大，約小於 0.4，顯示並非因為雲量增加或減少而造成紫外線輻射量增加或減少，而是當地總臭氧量減少或增加促使紫外線輻射量增加或減少（參考圖 7a~d），卻同時出現反射率（雲或冰雪）的增加或減少的現象。

至於地面紫外線輻射通量與懸浮微粒的相關係數計算，多處地區呈現正相關（圖 7i~l），七月在北緯 35 度以北內陸地區及低緯海洋處的正相關情形最為明顯，表示懸浮微粒數值的高低，會與近地面紫外線輻射通量的多寡，呈現同步變化。即使是在懸浮微粒較多的四月，也是出現類似現象。這基本上是不合理的，也即是兩個因子的同步變化，在數值上或是可能，但在物理機制上卻是無法解釋的。這情形恰與前述部份地區出現總臭氧量或反射率與紫外線通量的同步變化是不合理的情形類似。其主要原因就是：懸浮微粒指數並未被應用於紫外線輻射通量的估算過程中 (Herman et al., 1996)。此點在第 2.1 節內已清楚說明。若果是使用 TOMS 懸浮微粒指數資料於地面紫外線輻射通量估算過程中，則負相關情形就一定會出現。

觀察各項影響因子與地面紫外線輻射通量的相關性，整體而言，以反射率與地面紫外線通量的相關性最高，且是明顯負相關；而在北緯 30~40 度高原地區，則是以總臭氧量與地面紫外線通量的相關性最高。懸浮微粒與地面紫外線通量的相關分析，雖然為正相關但無合理的關聯性，因為後者的計算過程中並未使用前者數據，但若前者數據為可靠，則顯示後者使用反射率估算大氣中粒子衰減效應的方法，仍有需要改進的空間。目前，美國太空總署顯然尚未企圖改善。

四、分區討論

(一) 長期逐年的區域特徵

依區域特徵將討論範圍分為六個區域進行討論（圖 1），並繪出各區域各項目 1979~2004 年長期逐年平均的變化情形（圖 8）。在地表紫外線輻射通量方面，可看出其緯向分佈的特徵，量值的多寡分佈隨緯度增加而減少；量值由多而少的區域分別為 — 東南亞區域、低緯海洋、高原地區、中緯海洋、華中華南、中高緯地區，其中東南亞區域地面紫外線輻射通量高於低緯海洋，高原的量值高於同緯度其他區域，中緯度海洋的地面紫外線輻射通量高於陸地的區域（除去高原地區）。表一中亦列出趨勢變化率，僅在包括臺灣的華中華南區出現達 95% 顯著程度的 $-0.73 \text{ mW/m}^2/\text{year}$ 趨勢，其餘均為不顯著，但顯示出東南亞區域、低緯海洋與高原地區為增加，餘為減少的現象。

在總臭氧量方面，具緯向分佈的特徵，量值隨緯度增加而增加，由多而少的區域分別為 — 中高緯地區、華中華南、中緯海洋、高原地區、低緯海洋、東南亞地區；長期逐年平均值的分佈顯示：六個區域的總臭氧量皆有下降趨勢，其中以中高緯區域減少的幅度最為明顯。其中，表一中亦列出趨勢變化率，僅在高原地區與中高緯地區分別出現達 95% 顯著程度的 -0.56 與 -0.88 D.U./year 趨勢，其餘均為不顯著，但均為減少趨勢。

反射率的部分，由多而少的區域分別為 — 華中華南、高原地區、中緯海洋、中高緯地區、低緯海洋、東南亞地區，可以發現，在中緯度 C、D、E 區域中，海洋(E)的反射率值小於陸地(C、D)的部分，而低緯度區域(A、B)則是海洋(B)的反

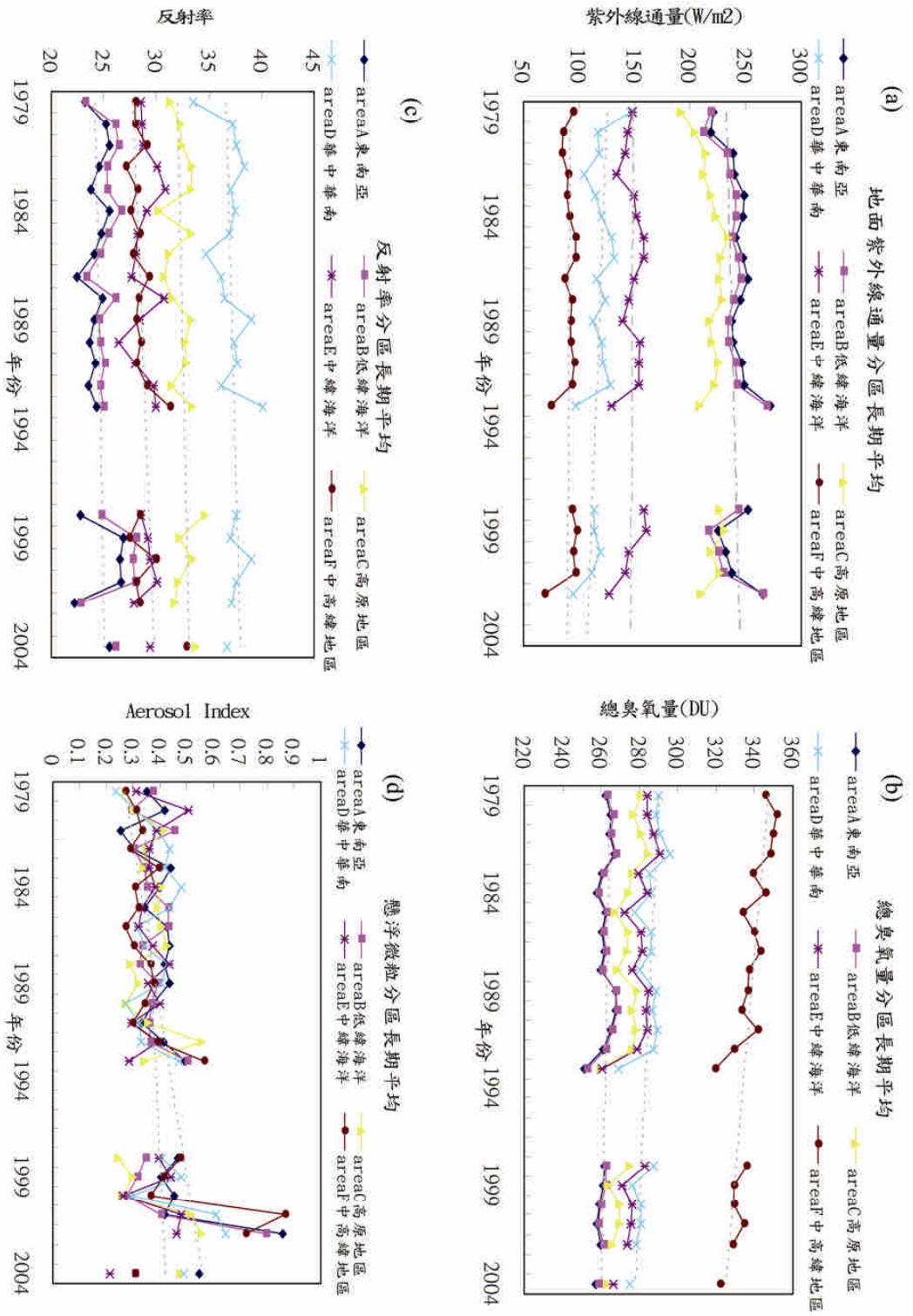


圖 8 (a)地面紫外線、(b)總臭氧量、(c)反射率、(d)懸浮微粒之分區逐年變化。

射率高於有陸地分佈(A)的區域，而中高緯度(F)的反射率則介於中緯度及低緯度之間；整體來說，六個區域的反射率皆呈上升的趨勢(表一)，但均未達 95% 顯著程度。

懸浮微粒的部分，整體而言，六個區域的趨勢率均大於 0 (表一)，但均未達 95% 顯著程度。其中中高緯地區(F)在 2001 及 2002 年出現明顯的高值，而東南亞(A)、低緯海洋(B)以及大陸東南區域及台灣(D)則在 2001 年出現明顯高值，這些現象與當時春季沙塵暴偏多有關(Liu et al., 2006)。

表二列出分區一、四、七與十月的特徵，其中，近地面紫外線輻射通量四月份 C 區高原地區的標準差值最大(14.4)，總臭氧量一月份 F 區中高緯地區的標準差最大(17.5)，反射率十月份的 D 區華中華南區的標準差最大(5.3)，懸浮微粒四月份 B 區低緯海洋區的標準差最大(0.24)；各項長期逐年分佈情形，以總臭氧量的分佈變動較大，懸浮微粒的變動較小。

觀察表二所列逐月分區分項之趨勢變化率，各區臭氧逐年減少的現象非常明顯，雖然達 95% 顯著程度者非常少，猜測是因為中間缺乏資料之故。其次則是懸浮微粒指數在各區不同月份均呈現增加趨勢，且達 95% 顯著程度者較多，可見這是一個大區域的趨勢。反射率在各區不同月份多呈現增加趨勢，但無達到 95% 顯著程度者，顯示其特性變化尚無可信賴的明確趨勢。至於本文所關注的地面紫外線輻射通量，在元月分多呈增加，在十月份為減少趨勢，而在輻射量大的四月與七月則增加與減少者均有，其中達 95% 顯著程度者僅在十月的東南亞區，顯示整體趨勢仍待更多年的資料使其更明朗化。

大致上，雖然達到 95% 顯著程度的長期資料不多，但是部份地區地面紫外線輻射通量持續減少現象，顯然與總臭氧量持續減少的趨勢無相關，而是反射率增加的趨勢扮演比較可能的影響角色。而若將一月份地面冰雪反射與四月份懸浮微粒反射的影響去除，則十月份明顯的地面紫外線輻射通量持續減少現象，則顯然是受雲量的變動影響所至。也即雲量的增多趨勢，是影響近地面紫外線輻射通量減少的可能主因。雖然目前的資料尚不足以獲致可信的結論，但若透過數值模擬，或可定量確定雲量變動的影響，是否與 TOMS 所遙測的紫外線輻射通量變動趨勢相近。

(二) 標準化分析

將各區逐年一、四、七、十月的平均減去 1979 ~ 2004 年的長期平均，得出的差值再除以標準差，可得出標準化後的數值。該值若是落於 ± 1 間，則表示當年的平均值為正常分佈，而若是該值大於 1 或是小於-1，則表示當年的平均值出現異常增加及異常減少的情形。整體而言，各區的各项數值，多分佈於 ± 1 間。其中，近地面紫外線輻射通量標準化分佈，增加異常最明顯出現在 1979 年十月 D 區華中華南地區(標準化後數值：2.904)，當時反射率出現了明顯的減少異常情形，而總臭氧量及懸浮微粒則沒有明顯的異常情形。近地面紫外線輻射通量標準化分佈減少異常最明顯出現在 2004 年十月 E 區中緯海洋區(標準化後數值：-2.762)，當時反射率出現了明顯的增加異常情形，總臭氧量呈現異常減少情況，而懸浮微粒則沒有明顯的異常情形。

總臭氧量逐年數值趨向負值，呈現逐年減少趨勢，其中四個月減少明顯的區域集中在中高緯區域(C、D、E、F區)，以 2002 年七月 E 區的

表二 六個區域一、四、七、十月，近地面紫外線通量、總臭氧量、反射率、懸浮微粒之 1979~2004 年間分區（平均值）±（標準差）列表。表中亦列出趨勢變化率，達 95%顯著程度者則標以*號。

一月	地面紫外線通量 (mW/m ²)	trend mW/m ² /year	總臭氧量(D.U)	trend D.U./year	反射率(%)	trend %/year	懸浮微粒(AI)	trend AI/year
A 區	233.6 ± 6.3	-0.46	243.7 ± 3.50	-0.21	16.05 ± 2.15	0.18	0.23 ± 0.09	0.01*
B 區	221.4 ± 10.2	0.20	240.4 ± 4.40	-0.29	25.20 ± 3.40	-0.07	0.23 ± 0.11	0.01*
C 區	134.5 ± 7.2	0.27	267.5 ± 11.20	-0.82	26.00 ± 4.35	0.12	0.27 ± 0.12	0.01
D 區	80.7 ± 7.1	0.10	272.0 ± 11.45	-0.87	43.50 ± 5.10	0.15	0.34 ± 0.16	0.01
E 區	99.1 ± 4.8	0.26	259.3 ± 12.20	-0.91	33.55 ± 2.15	0.08	0.20 ± 0.13	0.01
F 區	35.9 ± 2.4	0.07	364.3 ± 17.50	-1.25	33.55 ± 3.15	0.21	0.50 ± 0.23	0.01
四月	地面紫外線通量 (mW/m ²)		總臭氧量(D.U)		反射率(%)		懸浮微粒(AI)	
A 區	311.0 ± 12.0	-0.36	270.2 ± 3.90	-0.16	18.3 ± 3.20	0.05	0.66 ± 0.22	0.02
B 區	312.8 ± 10.1	-0.51	270.2 ± 4.55	-0.19	19.0 ± 2.70	0.05	0.71 ± 0.24	0.02*
C 區	293.2 ± 14.4	0.78	292.6 ± 10.5	-0.66	33.1 ± 3.90	-0.10	0.53 ± 0.19	0.02*
D 區	182.3 ± 10.6	0.32	306.9 ± 10.1	-0.74	39.6 ± 3.25	0.00	0.68 ± 0.22	0.02
E 區	209.1 ± 11.1	0.11	304.1 ± 10.1	-0.59	31.0 ± 2.50	-0.04	0.49 ± 0.21	0.02*
F 區	143.1 ± 5.75	0.35	371.6 ± 13.8	-1.25*	25.9 ± 1.60	-0.05	0.71 ± 0.23	0.03*
七月	地面紫外線通量 (mW/m ²)		總臭氧量(D.U)		反射率(%)		懸浮微粒(AI)	
A 區	239.6 ± 8.95	-0.16	277.2 ± 4.70	-0.23	36.5 ± 2.45	0.05	0.19 ± 0.08	0.01*
B 區	271.7 ± 9.00	-0.05	274.1 ± 4.40	-0.23	27.4 ± 2.55	0.07	0.41 ± 0.13	0.01
C 區	323.8 ± 6.40	-0.39	276.9 ± 4.65	-0.32	41.5 ± 2.90	0.04	0.14 ± 0.07	0.01*
D 區	238.1 ± 13.2	-0.08	291.2 ± 4.35	-0.18	30.8 ± 3.90	-0.04	0.21 ± 0.09	0.01
E 區	260.8 ± 10.3	0.17	288.7 ± 1.10	-0.37	23.4 ± 2.95	-0.09	0.43 ± 0.17	0.01
F 區	201.1 ± 6.20	0.37	314.2 ± 9.25	-0.81*	31.3 ± 1.70	-0.03	0.30 ± 0.11	0.01
十月	地面紫外線通量 (mW/m ²)		總臭氧量(D.U)		反射率(%)		懸浮微粒(AI)	
A 區	243.0 ± 11.1	-1.09*	264.8 ± 4.30	-0.24	29.3 ± 5.05	0.16	0.17 ± 0.14	0.01*
B 區	251.0 ± 8.20	-0.43	263.0 ± 4.65	-0.33	27.0 ± 3.00	0.00	0.37 ± 0.19	0.02*
C 區	213.0 ± 6.25	-0.26	258.8 ± 5.60	-0.42	32.6 ± 3.85	0.12	0.15 ± 0.10	0.01*
D 區	146.2 ± 8.65	-0.46	269.0 ± 5.30	-0.30	34.7 ± 5.25	0.13	0.18 ± 0.11	0.01
E 區	165.8 ± 4.55	-0.22	264.5 ± 4.50	-0.38*	26.8 ± 2.10	0.04	0.25 ± 0.12	0.01*
F 區	93.3 ± 2.55	-0.15	297.0 ± 6.80	-0.61*	24.8 ± 2.40	0.18	0.26 ± 0.19	0.01

異常減少情形最為明顯（標準化後數值： -2.8294 ）。至於懸浮微粒逐年數值趨向大於 1 的情形，異常增加明顯的區域多集中在中高緯地區，其中以 2001 年 10 月的 F 區中高緯地區的異常增加情形最為明顯（標準化後數值： 3.475 ）。

觀察標準化後各項數值的分佈情形，發現近地面紫外線輻射通量與反射率間多呈反相位分佈，當紫外線通量呈現異常增加（減少）的情形時，同時反射率出現異常減少（增加）的呼應情形；而愈往高緯度，則紫外線通量與總臭氧量間的反相位分佈愈明顯，以一、四月的呼應情形最為明顯，在 F 區中高緯地區，甚至紫外線通量與總臭氧量的相關情形，更優於與反射率的相關。

本節的資料處理，有利於找出紫外線通量異常的年代與月份，也即有利於後續數值模擬研究案例的選擇，以及探討各因子相互影響的確切情形。

五、結 論

本文進行長期平均分析、EOF 分析、相關分析等，整體而言，中高緯地區及高原一帶的地面紫外線輻射通量與總臭氧量的負相關情形較其他項目明顯；中低緯地區的地面紫外線輻射通量則與反射率的負相關性較他項顯著。長期平均懸浮微粒指數與地面紫外線輻射通量間，則無顯著的合理關聯性，其可能因素是後者的計算過程中，並未使用前者數據，而是使用反射率資料來反映包括地面反射、雲及懸浮微粒的影響。所以，顯然是反射率的推演結果，並不足以反映懸浮微粒的影響。這應是 TOMS 地面紫外線輻射通量的反演問題，目前 NASA 似乎尚未進行改善。

觀察地面紫外線輻射通量 EOF 1 在四個不同

月份的分析結果，配合空間特徵與時間分佈序列資料，證實地面紫外線輻射通量的時空特徵與反射率相呼應的情形，較其與其他影響因子間來得顯著，尤其以一、十月時空特徵的相關性最為明顯。

考慮不同區域特質對各項因子及地面紫外線輻射通量的影響，故將研究的區域依不同的性質分成六個分區，觀察地面紫外線輻射通量及其主要影響因素，隨著區域特性的不同而形成的差異情形，其中，總臭氧量減少以及懸浮微粒增加的趨勢則是六個分區該項的共同分佈特徵；不同區域所顯示出的各項分佈情形也不盡相同，變動情形也隨著地區的特質而有所不同。

透過上述的資料分析過程後，除了更瞭解東亞地區的地面紫外線輻射通量的分佈情形、特徵外，也對其與影響因素的相關訊息有進一步的認識。一直以來，高空總臭氧量的持續減少，被視為造成地面紫外線輻射通量增加的主因，其實地面紫外線輻射通量的變動，同時受到許多因素的影響，並不只有總臭氧量的影響爾爾。分析結果顯示：地面紫外線輻射通量與反射率的相關性明顯；在不同區域特質的作用下，反射率的變動對地面紫外線輻射通量的影響，反而較總臭氧量來得關鍵或是明顯。

誌 謝

本文作者感謝美國 NASA 提供 TOMS 遙測資料、NOAA 提供氣候資料，及劉振榮、余嘉裕、吳明進與林依依等教授提供意見，以及二位匿名審查學者的寶貴意見。本研究是在國科會研究計畫 NSC 94-2621-Z-002-010-與 NSC95-2621-Z002-022 支持下完成之。

參考文獻

- 周秀驥、李維亮、陳隆勳、劉煜，2004：青藏高原地區大氣臭氧變化的研究。氣象學報（中國），62 (5): 513-527。
- Acosta, L. R., and W. F. J. Evans, 2000: Design of the Mexico City UV monitoring network: UV-B measurements at ground level in the urban environment, *J. Geophys. Res.*, 105, D4, p. 5017-5026.
- Chang, L.M., and S. U. Park, 2004: Direct radiative forcing due to anthropogenic aerosols in East Asia during 2001, *Atmos. Environ.*, 38, 4467-4482.
- Floyd, L., K. Tobiska and P. Cebula, 2002: Solar UV irradiance, its variation, and its relevance to the earth, *Adv. Space Res.* 29, 10, 1427-1440.
- Ghauri B., R. Zareen and M. I. Mirza, 1998: UV insolation monitoring in Asia-Pacific Region, *Space Tech.*, 18, 227-232 (6).
- Heald, C.L., D.J. Jacob, P.I. Palmer, M.J. Evans, G.W. Sachse, H.B. Singh, and D.J. Blake, 2003: Biomass burning emission inventory with daily resolution: Application to aircraft observations of Asian outflow, *J. Geophys. Res.*, 108(D21), 8811, doi: 10.1029/2002JD003082.
- Herman, J. R., P. K. Bhartia, J. Ziemke, Z. Ahmad and D. Larko, 1996: UV-B increases (1979-1992) from decreases in total ozone. *Geophys. Res. Letters*, 23, 16, 2117-2120.
- Herman, J. R., D. Larko, E. Celarier and J. Ziemke, 2001: Changes in the Earth's UV reflectivity from the surface, clouds, and aerosols. *J. Geophys. Res.*, 106, D6, 5353-5368.
- Hsu, N. C., J. R. Herman, O. Torres, B. N. Holben, D. Tanre, T. F. Eck, A. Smirnov, B. Chatenet, and F. Lavenue, 1999: Comparisons of the TOMS aerosol index with Sun-photometer aerosol optical thickness: Results and applications. *J. Geophys. Res.*, 104, D6, 6269-6279.
- Kim, D., B.-J. Sohn, T. Nakajima, T. Takamura, T. Takemura, B.-C. Choi, and S.-C. Yoon, 2004: Aerosol optical properties over East Asia determined from ground-based sky radiation measurements. *J. Geophys. Res.*, 204, 109 (D02):209.
- Krzyściński, J.W., 2000: Total ozone influence on the surface UV-B radiance in late spring-summer 1963-1997: An analysis of multiple timescales, *J. Geophys. Res.*, 105, D4, 4993-5000.
- Liu, C.M., C. Y. Young and Y.-C. Lee, 2006: Influence of Asian Dust Storms on Air Quality in Taiwan. *Science of the Total Environment*, 368, 884-897.
- Liu, H., W. L. Chang, S. J. Oltmans, L. Y. Chan and J. M. Harris, 1999: On springtime high ozone events in the lower troposphere from Southeast Asian biomass burning, *Atmos. Environ.*, 33, 2403-2410.
- NASA TOMS Earth Probe ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/eptoms/EARTHPROBE_USERGUIDE.PDF
- Pallé, E, P. R. Goode, P. Montañés-Rodríguez and S. E. Koonin, 2004: Changes in Earth's Reflectance over the Past Two Decades, *Science*, 304, 5675, 1299-1301 DOI: 10.1126/science.1094070.
- Prasad, N. V. K and K. Niranjana, 2005: Solar UV-B irradiance at a tropical Indian station, Visakhapatnam (17.7° north, 83.3° east) - a relation with TOMS ozone. *T.A.O.*, 16, 1, 215-229.
- Setlow, R.B, 1974: The wavelengths in sunlight effective in producing skin cancer: a theoretical analysis, *Proc. Nat. Acad. Sci., USA*, 71, 9, 3363-3366.
- Wang, B., and Rui, H., 1990: Synoptic climatology of transient tropical intraseasonal convection anomalies: 1975-1985, *Meteorol. and Atmos. Phys.*, 44, 1-4, 43-61.
- WMO(World Meteorological Organization), 2006: *Antarctic Ozone Bulletin* 4, (<http://www.wmo.ch/web/arep/06/ant-bulletin-4-2006.pdf>).

The Climatological Characteristics of Surface Ultra-Violet Flux over East Asia and their Climatological Relationship with Other Physical Factors

S. -Y. Yu C. -M. Liu

Dept. of Atmospheric Sciences, National Taiwan University

(Manuscript received 06 July 2007; in final form 24 March 2008)

ABSTRACT

This study adopts the remote sensing data released by NASA TOMS over the East Asia region (88.125°E – 151.875°E, 3.5°N ~ 47.5°N) and focuses on the climatological characteristics of the surface erythermal-weighted ultra-violet (UV) flux (280-400nm) in January, April, July and October. Through long-term mean and empirical orthogonal function analysis, the results suggest that the characteristics of UV are highly correlated with the distribution of reflectivity, then with the total column ozone. There is negligible relationship between UV and aerosol index. The East Asia region has been sub-divided into six sub-regions. All regions show a clear long-term decreasing trend of total ozone, but no significant increasing trend of UV been detected. The change of UV in each sub-region all correlated well with the change of reflectivity, which suggests the importance of weather system change on affecting the amount of surface UV flux. In the meantime, the retrieved aerosol index was not used in the estimation of UV, hence no recognizable relationship between these two datasets are established, even in April when dust-storm prevails.

Key words: Surface UV flux, EOF, Influencing factor analysis.