

台灣地區長期暖化現象與太平洋海溫變化之關係

陳昭銘 汪鳳如

中央氣象局科技中心

(中華民國八十八年十月二十一日收稿；中華民國八十九年六月十四日定稿)

摘 要

本文之主要研究內容有兩部份：第一部份探討台灣地區長期暖化現象的特性，及都市效應在此暖化過程中之可能角色，第二部份則探討台灣地區長期暖化現象與太平洋海溫(SST)長期變化之關聯性。

在第一部份方面，本文定義台北、台中、台南、恆春、花蓮、台東等六測站地面溫度之平均值為「台灣地區平均溫度」，分析此平均溫度於 1920~1997 年間之長期變化特性，結果顯示台灣地區溫度於四季中均具有長期暖化趨勢，強度分別是冬季之 $0.6^{\circ}\text{C}/100$ 年、春季之 $1.3^{\circ}\text{C}/100$ 年、夏季之 $1.6^{\circ}\text{C}/100$ 年、秋季之 $1.4^{\circ}\text{C}/100$ 年。就台灣地區與北半球平均之暖化趨勢來比較時，兩者在冬季之暖化趨勢約略相當，但在春、夏、秋三季，台灣地區則分別為北半球平均暖化趨勢之 2 倍、4 倍、3 倍左右，由此顯見台灣地區暖化趨勢之顯著程度。經驗正交函數分析結果顯示台灣地區六主要測站之長期溫度變化均呈現相同相位的暖化趨勢，隱喻台灣地區暖化現象應是以全島為範圍的長期氣候變遷現象。進一步比較五組都會區測站與非都會區測站於 1950-1997 年間年均溫之暖化趨勢，結果非都會區測站之暖化趨勢($0.63^{\circ}\text{C}/100$ 年)僅為都會區測站($1.12^{\circ}\text{C}/100$ 年)之 56%，兩者之差距隱喻台灣地區都會區測站之暖化趨勢約有 44% 應與都市效應有關。

在第二部份方面，單點相關係數分析結果顯示，台灣地區各季之長期暖化現象均與太平洋海域之大尺度 SST 變化有相當程度的關聯性，尤其又與台灣以東、日本以南海域(124°E - 134°E 、 20°N - 32°N)SST 長期變化的正相關性最高。經驗正交函數分析結果進一步顯示，台灣以東、日本以南海域之 SST 長期變化，在春、夏、秋三季中均屬於太平洋大尺度 SST 十年際變化的一部份，但冬季則不然，因此台灣地區之長期暖化現象與太平洋大尺度 SST 十年際變化，在春、夏、秋三季具有明顯正相關關係。根據上述 SST 分析結果，我們推論太平洋海溫變化應是影響台灣區域氣候長期變化的可能物理機制之一。

關鍵詞：長期暖化現象、暖化趨勢、都市效應、太平洋海溫、十年際變化

一、前言

張等(1997)分析台灣地區主要測站地面溫度之長期變化，結果顯示台灣地區各地正以每一百年 $0.8\sim 1.6^{\circ}\text{C}$ 之暖化速率逐漸增溫。事實上，台灣地區之長期暖化現象並非偶發的氣候變異現象，而可能是全球氣候變遷的一環，根據世界氣象組織(World Meteorological Organization)以世界各地氣象測站溫度所做的統計研究，全球平均地表溫度的年平均值，在過去一百年也大約上升 $0.5^{\circ}\text{C}\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ (WMO, 1996)，在這增溫過程中，北半球陸地年平均地表溫度約增加 0.56°C ，南半球陸地年平均溫增加較少，約在 0.47°C 左右(Jones, 1994)，上述全球地表溫度在過去百年的增溫結果，顯示「全球暖化」現象的存在。在這全球暖化過程中，直接的衝擊是長期性氣候變異，間接的衝擊則是經由氣候變異促使各地自然與人文環境的變遷，由此可見，全球暖化現象不能僅以單純氣候問題視之，其後續長遠衝擊所可能導致的全球環境變遷，更是不容忽視的問題。目前世界各主要國家無不重視全球暖化現象的相關研究，研究議題包括全球暖化現象的可能成因、變化特性、對區域氣候的影響、可能的防治方法、未來發展趨勢等。相對地，關於台灣地區長期暖化現象的議題，例如台灣地區暖化現象的變化特性、影響台灣地區暖化現象的可能物理機制等，均值得我們深入研究。

若要研究可能影響台灣地區長期暖化現象的物理機制，可從可能影響全球暖化現象的諸多原因中來尋找適當研究對象。由於全球暖化現象的本質為大氣氣候的長期變異，因此研究影響全球暖化現象的可能機制時，多朝向能影響氣候變化的因子來探索，其中主要因子包括

太陽輻射量的變化、溫室氣體(特別是二氧化碳)含量的增加、火山爆發、地表狀態的改變(如森林砍伐)、海洋的變化等(魏和許 1997)，其中前兩項因子對地球溫度的影響應屬全球性範圍，後三項因子的影響範圍則較為區域性。實際上，過去百年的暖化現象並非全球一致，有些區域的溫度變化趨勢與全球平均之暖化趨勢並不一致，甚至出現相反趨勢。例如1970、1980年代，當大氣中溫室氣體濃度穩定增加，且全球平均地表溫度也較過去百年氣候平均值偏高時，中國華南長江流域一帶卻出現偏冷的氣候(Wang and Ye, 1993)。這個結果暗示著影響華南地區溫度長期變化的機制，似與影響全球暖化的主要機制(如溫室氣體的增加)無密切關係，而可能是由其他較區域性的機制來調節其氣候變化。上述華南地區氣候變化的例子也提醒我們，研究區域氣候的長期變化時，除了需針對不同地區的區域氣候變化特性做分析外，也應針對影響該區域氣候變化的可能區域性機制做個別研究。

就台灣地區區域氣候之長期變化特性而言，戚與陳(1995)和張等(1997)之分析顯示，台灣各主要測站溫度之百年時間序列，顯示出二種主要的長週期時間變化分量，一為百年時間尺度、接近線性上升的「暖化趨勢分量」(warming trend component)，另一為十年以上時間尺度、高低振盪的「十年際振盪分量」(decadal oscillation component)，後者之振盪變化，與溫室氣體含量(以Mauna Loa觀測之二氧化碳濃度為代表)呈現線性增加的變化方式明顯不同，因此台灣地區溫度之長期暖化現象，應不全然受溫室氣體含量增加所導致之溫室效應影響，而可能還受其他區域性機制的調節，這一推論與Wang and Ye (1993)所提華南地區可能受溫室氣

體以外的區域性機制來調節其長期氣候變異的推論相呼應。魏和許(1997)指出，影響氣候變化的主要區域性機制之一為海洋的變化，由於台灣為高人口密度的海島，其表面溫度的變化與鄰近海域海水表面溫度(sea surface temperature, SST) 的變化，有可能存在著某種關聯性；另一方面，台灣地區人口高度集中亦可能引發都市效應(urbanization effect)，加速都會區的暖化現象。究竟都市效應與海溫變化對台灣區域氣候的影響程度為何，本文將進一步探討。

本文之主要研究議題有二，一為分析台灣地區長期暖化現象的變化特性，以增進對此暖化現象的了解，並將評估都市效應所扮演之角色與重要性。另一議題為研究太平洋海溫與台灣地區溫度在十年際時間尺度變化之關聯性，藉此分析以診斷太平洋海溫變化是否為調節台灣長期氣候變化的可能機制之一。

本文之內容簡述如下：第二節介紹分析所用之資料，第三節分析台灣地區長期暖化現象之變化特性，第四節探討都市效應對台灣溫度變化的可能影響，第五節診斷台灣地區溫度變化與太平洋海溫變化之關係，結論及相關討論陳述在第六節。

二、資 料

(一) 測站地面溫度

中央氣象局所屬常設測站共有二十五站，在 1920 年以前設立者僅有八站，其中彭佳嶼之觀測資料不完整，澎湖為外島，因此本文選擇平均分佈在台灣全島四周的台北、台中、台南、恆春、花蓮、台東等六站為分析對象(圖 1)，研

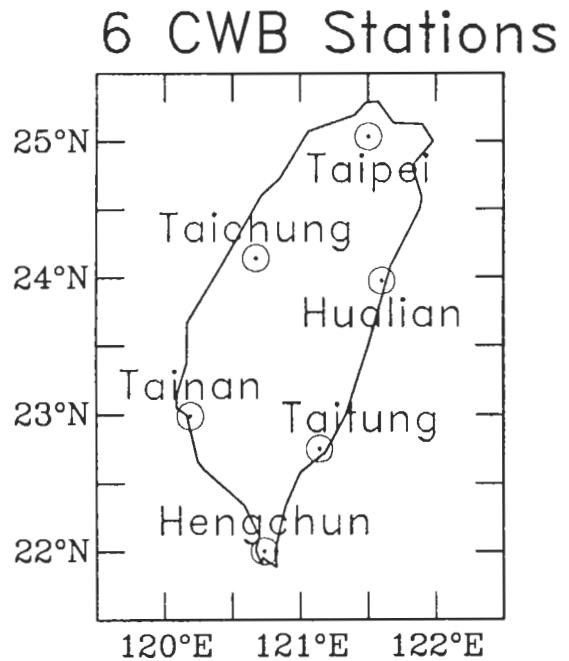


圖 1 本文分析所使用的台灣地區六代表性測站(台北、台中、台南、恆春、花蓮、台東)之分佈圖，此六站溫度之平均值定義為「台灣地區平均溫度」。

究台灣地區地面溫度的長期暖化現象，分析時間範圍為 1920~1997 年。

(二) SST 資料

本文所分析之海溫資料為英國氣象研究室(UK Meteorological Office)所蒐集整理之 1903~94 年全球月平均 SST 網格點資料，通稱 GISST 2.2 版 SST (Rayner et al., 1996)，解析度為 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ，該資料係由下列三部份組成：

(a) 1903~1948 年部份，由於觀測資料相當缺乏，故先以較粗解析度(5°)對海溫距平進行品質控制(quality control)，至於資料不足部份，再以二種方法補充。首先將 1901~90 年海溫距平，取 10° 解析度，依不同海洋盆地進行經驗正交函數(empirical orthogonal function, EOF)分析，再

根據 EOF 分析結果反推的重組(reconstructed)海溫距平, 回補資料不足部份; 若 EOF 法仍不能補充之處, 則採用 Parker et al.(1995)所設定之包桑方程(Poisson equation)法進行內插補充。經由上述各步驟而得之海溫距平, 最後再內插到 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 網格點。

(b)1949~1981 年部份, 海溫距平依 2° 解析度進行品質控制後, 便轉化成 5° 解析度, 運用 EOF 法進行重組, 以補充觀測資料之不足。EOF 重組方法如下, 首先對全球 SST 距平以低頻濾波(low-pass filter)法擷取數十年際趨勢分量(multidecadal trend component), 再保留該分量之第一 EOF 特徵模(eigenmode)以代表長期趨勢分量。而去除數十年際趨勢分量後之 SST, 則依各主要海洋盆域為劃分範圍, 取各範圍內之前二十個 SST EOF 特徵模重組成非趨勢分量, 再加上先前保留之全球長期趨勢分量後便是重組之 SST。在資料稀少地區(如南半球洋域), 即使運用 EOF 法亦無法遞補 SST, 則採用包桑方程法來推演 SST 值, 整組資料最後再經由內插處理提高解析度到 1° 。

(c)1982~1994 年部份, 此部份資料之特點, 在於引進衛星觀測資料反衍之 SST 值, 再將其與傳統觀測資料合併而成。此時段由於具有充分之觀測資料, 不需運用 EOF 法來重組, 在執行 2° 解析度之品質控制後, 便直接運用內插法提高解析度到 1° 便告完成。

本文將用 1920~1994 年 GISST SST 資料研究太平洋海溫之長期變化特性, 及其與台灣地區長期暖化現象之關係, 然而在使用這組資料時, 存在著某些不確定性, 特別是 1950 年以前資料之正確性仍有存疑。Karl et al. (1994)指出,

實際觀測之 SST 資料所涵蓋的有效洋面, 在二次大戰之前約佔北半球洋面 30%, 二次大戰期間降到 10%, 1950 年以後則上升到 50%~70% 以上。Parker et al. (1994)對北太平洋地區 SST 觀測資料進行品質控制, 分析結果顯示 1920 年代完全無觀測資料可供分析應用之地區為 $130^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$, $150^{\circ}\text{W}\sim 100^{\circ}\text{W}$ 之熱帶洋面, 到了 1930、1940 年代完全無資料地區則僅剩下熱帶東太平洋, 1950 年以後便有相當充分之 SST 觀測資料。根據上述研究結果, 本文應對二次大戰之前熱帶太平洋區 SST 之分析結果, 持保留態度; 相對而言, 台灣鄰近之西太平洋區及中緯度洋面之 SST 變化, 則具有較高之可信度。

三、台灣地區之長期暖化現象

(一) 暖化趨勢

過去研究在討論台灣氣候的長期變化時, 多以個別測站為討論對象, 而未對台灣全島平均氣候做進一步探討。為了增進對台灣全島平均氣候長期變化的了解, 本文選取台北、台中、台南、恆春、花蓮、台東等六站溫度之平均值代表「台灣地區平均溫度」, 藉此平均溫度的時間序列, 討論台灣地區自 1920 年以來所發生之長期暖化現象。

圖 2 之直方圖(histogram)顯示台灣地區平均溫度於 1920~1997 年間, 四季季均溫之變化情形, 此處四季劃分採氣象學慣用之定義。這四組時間序列之平均值分別是冬季之 18.2°C 、春季之 23.0°C 、夏季之 27.8°C 、秋季之 24.5°C , 這些數值可代表台灣地區平均溫度在四季之長期氣候值。從圖 2 時間序列可看出台灣地區平均溫度之主要氣候變異現象為年際變化, 另外

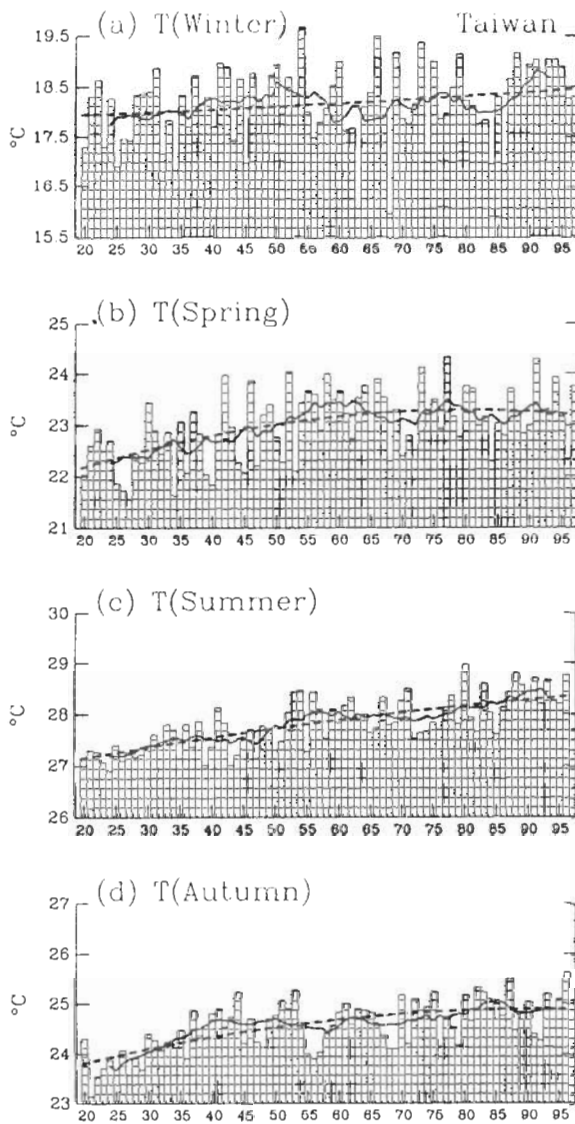


圖2 四季之「台灣地區平均溫度」於1920~1997年之時間序列(直方圖):(a)冬季、(b)春季、(c)夏季、(d)秋季。該時間序列之9年滑動平均值,用以代表台灣地區平均溫度之十年際變化分量,以粗實線顯示;粗虛線則顯示由最小平方配法所估算之長期趨勢分量。

較明顯的變異現象為緩慢上升的長期暖化趨勢,其中尤以夏季溫度之暖化趨勢最為顯著。為了進一步了解台灣地區平均溫度之長期變化

特性,我們進行下列兩種分析:一為計算圖2各時間序列之9年滑動平均值,藉以濾除年際變化分量(interannual variability component),以昭顯較長週期之十年際變化分量(decadal variability component),該分析以粗實線顯示在圖2;第二部份則採用最小平方配(least square fit)法,估算各時間序列之長期變化趨勢,其結果則以粗虛線顯示。

就長期變化趨勢而言(圖2之粗虛線),台灣地區平均溫度在四季中均顯示出暖化趨勢,其中冬季、夏季之暖化趨勢在1920~1997年間呈現幾近線性之上升現象,而春季、秋季之暖化趨勢在1960年以前快速上升,但1980年以後上升幅度趨緩。經由線性迴歸法所估算台灣地區平均溫度之暖化趨勢,冬季為 $0.6^{\circ}\text{C}/100$ 年,春季為 $1.3^{\circ}\text{C}/100$ 年,夏季為 $1.6^{\circ}\text{C}/100$ 年,秋季為 $1.4^{\circ}\text{C}/100$ 年,其中冬季之暖化趨勢最弱,其他三季之暖化趨勢相當,且均較冬季強一倍以上。為了衡量台灣地區暖化趨勢的強弱,我們以北半球平均溫度之暖化趨勢作為比較對象,根據Jones (1994)對北半球約2000個測站溫度之分析結果,其平均值於1901~1990年間之暖化趨勢分別為冬季之 $0.6^{\circ}\text{C}/100$ 年、春季之 $0.7^{\circ}\text{C}/100$ 年、夏季之 $0.4^{\circ}\text{C}/100$ 年、秋季之 $0.4^{\circ}\text{C}/100$ 年。相較之下,台灣地區平均溫度與北半球平均溫度在冬季之暖化趨勢約略相當,但在春、夏、秋三季,台灣地區之暖化趨勢約為北半球之2~4倍,尤以夏季將近4倍強之暖化趨勢高出最多。整體而言,除了冬季以外,台灣地區之暖化現象均比以北半球為範圍之全球暖化現象更加顯著。

台灣地區的長期暖化現象,也可從十年際變化分量的時間序列(粗實線)看出,此分量除了

顯示跟趨勢分量(粗虛線)一致的暖化趨勢外,也顯示沿著趨勢分量起伏變化的十年際振盪現象。換言之,台灣地區之長期暖化現象顯現兩種主要變化分量:趨勢分量和十年際振盪分量。事實上,這兩類分量也普遍存在於其他大尺度氣候場的十年際變化現象中,例如太平洋海溫(Chen et al., 1992)、大西洋海溫(Deser and Blackmon, 1993; Kushnir, 1994)、北半球 500 mb 高度場(Knox et al., 1988; Shabbar et al., 1990)等。然而本文為免於分析與討論之冗贅,將不對「趨勢分量」和「十年際振盪分量」做個別討論,而是將此二分量結合在一起,以 9 年滑動平均值所代表之「十年際變化分量」做為分析對象。

(二) 功率譜分析

為了解台灣地區平均溫度十年際變化之週期、強度等特性,本文以圖 2 直方圖所示 1920~1997 年時間序列為對象,進行功率譜分析(power spectral analysis)(圖 3),並以 95% 可信基準檢驗各分量之顯著程度(圖 3 之虛線)。在冬季,台灣地區平均溫度之最顯著變化為 5~7 年之年際變化,10 年以上之變化現象並不顯著。春季時,台灣地區平均溫度之顯著變化有兩類:一類為 2 年左右之年際變化,另一類為由第一調和分量(first harmonic component)所代表的長期趨勢分量,且該分量之強度為所有變化分量中最強者。夏季時,第一調和分量所代表之趨勢分量仍是所有變化分量中最強者,而較顯著之年際變化則在 3 年週期左右。秋季時,較顯著之十年際變化發生在兩個週期,一為結合第一與第二調和分量所代表的 40 年以上週期之長期變化,另一為 10 年左右的週期,至於年際變化強度則在 2~3 年週期較顯著。

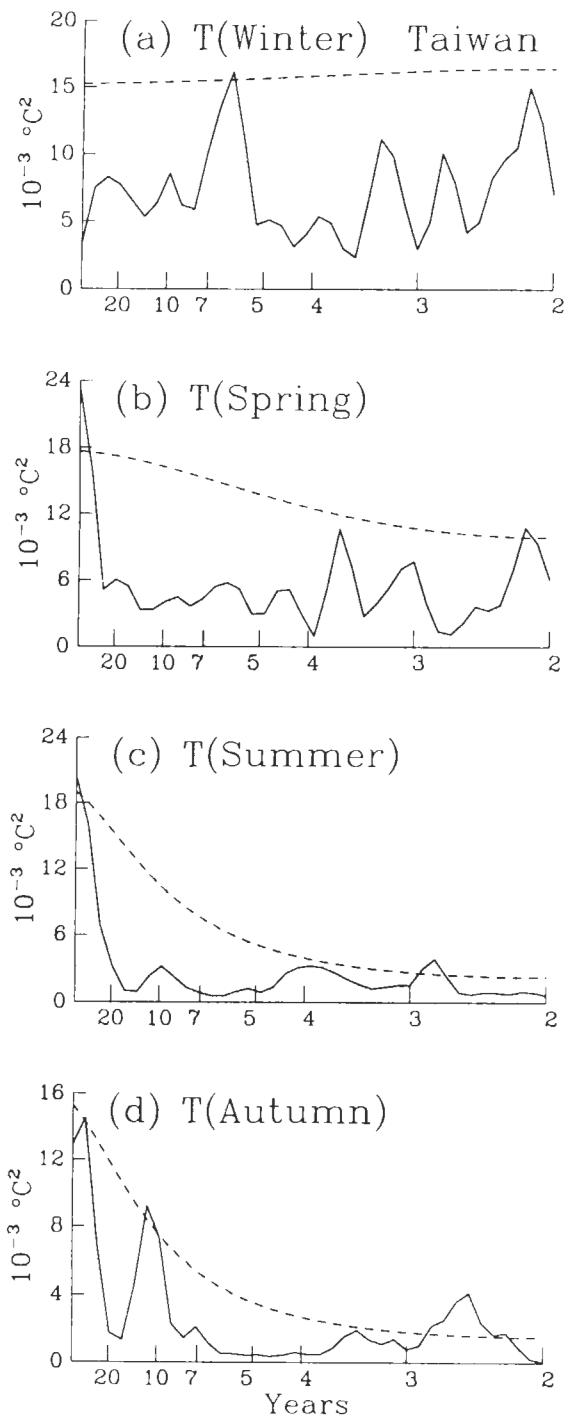


圖 3 圖 2 台灣地區平均溫度時間序列之波譜分析結果:(a)冬季、(b)春季、(c)夏季、(d)秋季。各波譜分量之時間尺度顯示在橫座標,強度則顯示在縱座標。虛線所示為 95% 可信基準之數值,可用來檢驗各波譜分量之顯著程度。

從功率譜分析結果可以看出，台灣地區平均溫度在冬季之主要變化現象為年際變化，但春、夏、秋三季則以十年際變化現象較顯著，尤其是代表長期趨勢變化的第一調和分量最為顯著。為了定量比較台灣地區平均溫度之年際變化分量與十年際變化分量之強度，我們取圖 2 之 1920~1997 年即時 (real time) 時間序列進行分析，定義此即時時間序列與其十年際變化分量(9 年滑動平均值)之差為年際變化分量，再分別計算十年際變化分量與年際變化分量時間序列的均方根 (root mean square)，依此均方根值

代表各分量之變化強度進行比較，表一陳列各強度之計算結果。如表一所示，台灣地區平均溫度在冬季之年際變化強度約為十年際變化的 3 倍。春季時，年際變化強度與十年際變化強度之差距縮小，前者約為後者之 1.5 倍。在夏、秋二季，十年際變化與年際變化之強度相當。就十年際變化分量本身之強度而言，春、夏季時強度最強，冬季最弱。由表一之結果，我們得知台灣地區平均溫度的氣候變遷，在冬、春兩季主要顯現出年際變化特性，但夏、秋兩季時，十年際變化現象之顯著性則與年際變化相當。

表一 台灣地區平均溫度於 1920~1997 年間之十年際變化分量與年際變化分量之強度 (以均方根值表示)

單位：°C

季節 \ 強度	十年際變化分量	年際變化分量
冬	0.24	0.73
春	0.35	0.56
夏	0.34	0.33
秋	0.30	0.34

(三) 經驗正交函數分析

前面章節之時間序列分析與功率譜分析，僅概述台灣地區溫度十年際變化的時間變化特性，為了進一步了解其空間變化特性，我們取台北、台中、台南、恆春、花蓮、台東等六站季均溫的十年際變化分量，進行 EOF 分析。各季分析所得之第一 EOF 分量解釋當季全部十年際變異量(variance)的比例，分別為冬季之 82%、春季之 90%、夏季之 90%、秋季之 88%，上述變異量的高比例解釋值，顯示第一 EOF 分量具有足夠代表性來描述各季十年際變化的主要特性。

圖 4 所示為 EOF 分析所得台灣地區各季溫度十年際變化之第一特徵值(first eigenvalue)時間序列，以顯示各季溫度之主要十年際變化特性。冬季第一特徵值(圖 4a)顯示該季溫度具有某種十年際振盪現象，1940 年以前為負距平，1940 到 1950 年代後期為正距平，1960 年代則又轉回負距平，隨後緩慢振盪上升，直到 1980 年代後期才又快速上升。春季第一特徵值(圖 4b)則呈現兩種不同十年際變化特性，其溫度距平在 1950 年代以前幾乎是呈線性地快速上升，但隨後則演變為振盪現象，振盪週期約在 15~20 年之間。夏季第一特徵值(圖 4c)則顯現相當清楚的上升趨勢，其上升過程大致分為三階段：

第一階段為 1935 年以前之快速上升，隨後保持平穩狀態直到 1940 年代後期；第二階段則是自

1940 年代後期到 1950 年代後期的快速上升，接著維持平穩狀態直到 1970 年代中期；第三階段則是從 1970 年代中期起快速上升，並維持到 1990 年代。秋季第一特徵值(圖 4d)也顯現清楚的上升趨勢，但其上升過程與夏季略有不同，秋季溫度在 1940 年以前快速上升，隨後呈現小幅度的十年際振盪現象，直到 1970 年代才又出現明顯的上升現象，且持續到 1990 年代。

上述各季溫度十年際變化之第一特徵值時間序列，均顯現出長期上升趨勢，且其時間變化特性與圖 1 台灣地區平均溫度十年際變化分量(粗實線)之演化情形相當一致，此二組時間序列之相關係數，在四季中均高達 0.99，此相關結果透露第一 EOF 分量足以顯示台灣地區溫度的主要十年際變化。

相對第一特徵值顯示時間變化特性，第一特徵向量(first eigenvector)則顯示空間變化特性。圖 5 所示為各季溫度十年際變化之第一特徵向量的水平分佈圖，這些第一特徵向量呈現一個共同特性，即台灣地區六個主要測站之特徵向量值均為同號，且為正號，此結果配合第一特徵值所顯示的上升趨勢，顯現台灣地區之長期暖化現象，其發生範圍應涵蓋台灣全島。若進一步分析第一特徵向量值的分佈情形，可發現冬季呈現西高東低之分佈情形，秋季則為北高南低，而春、夏二季的特徵向量則呈現不規律的分佈情形，且此二季之特徵向量分佈情形亦互不相同。從上述特徵向量之多樣性分佈情形，我們推論台灣各區之長期暖化現象，似乎與其所在地理位置無密切關係，應另有其他機制促造台灣全島的長期暖化，本文接著便要探討可能影響台灣長期暖化現象的兩種機制：都市效應與太平洋海溫變化。

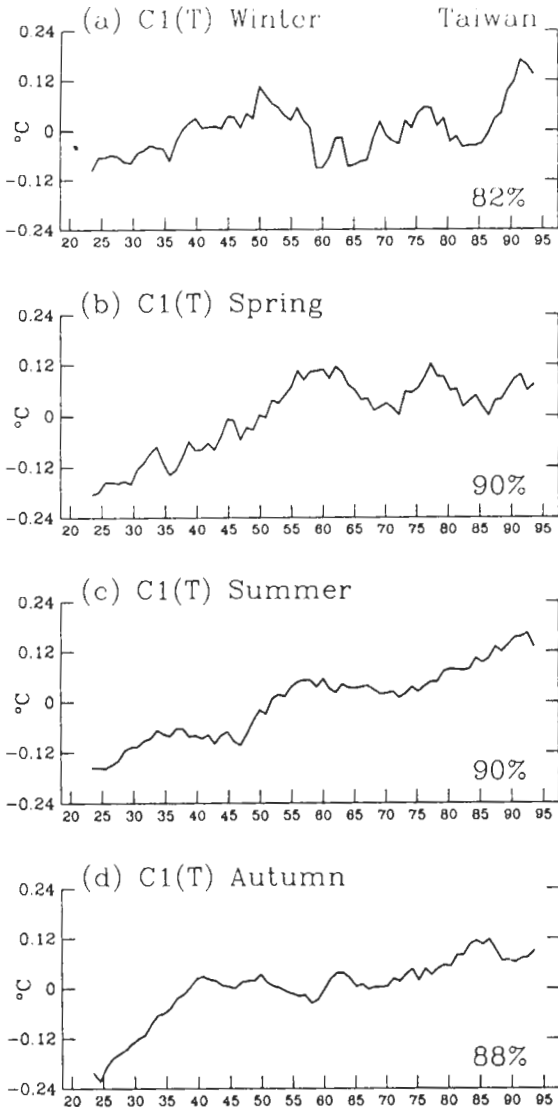


圖 4 台灣地區六代表性測站溫度之十年際變化分量的經驗正交函數分析結果。本圖所示為各季溫度第一特徵模所屬之特徵值時間序列：(a)冬季、(b)春季、(c)夏季、(d)秋季。各圖右下角所示之百分比數值，代表第一特徵模所解釋之變異量佔全部十年際變化變異量的百分比，此百分比數值將以同樣方式顯示在後續的其他特徵值時間序列中。

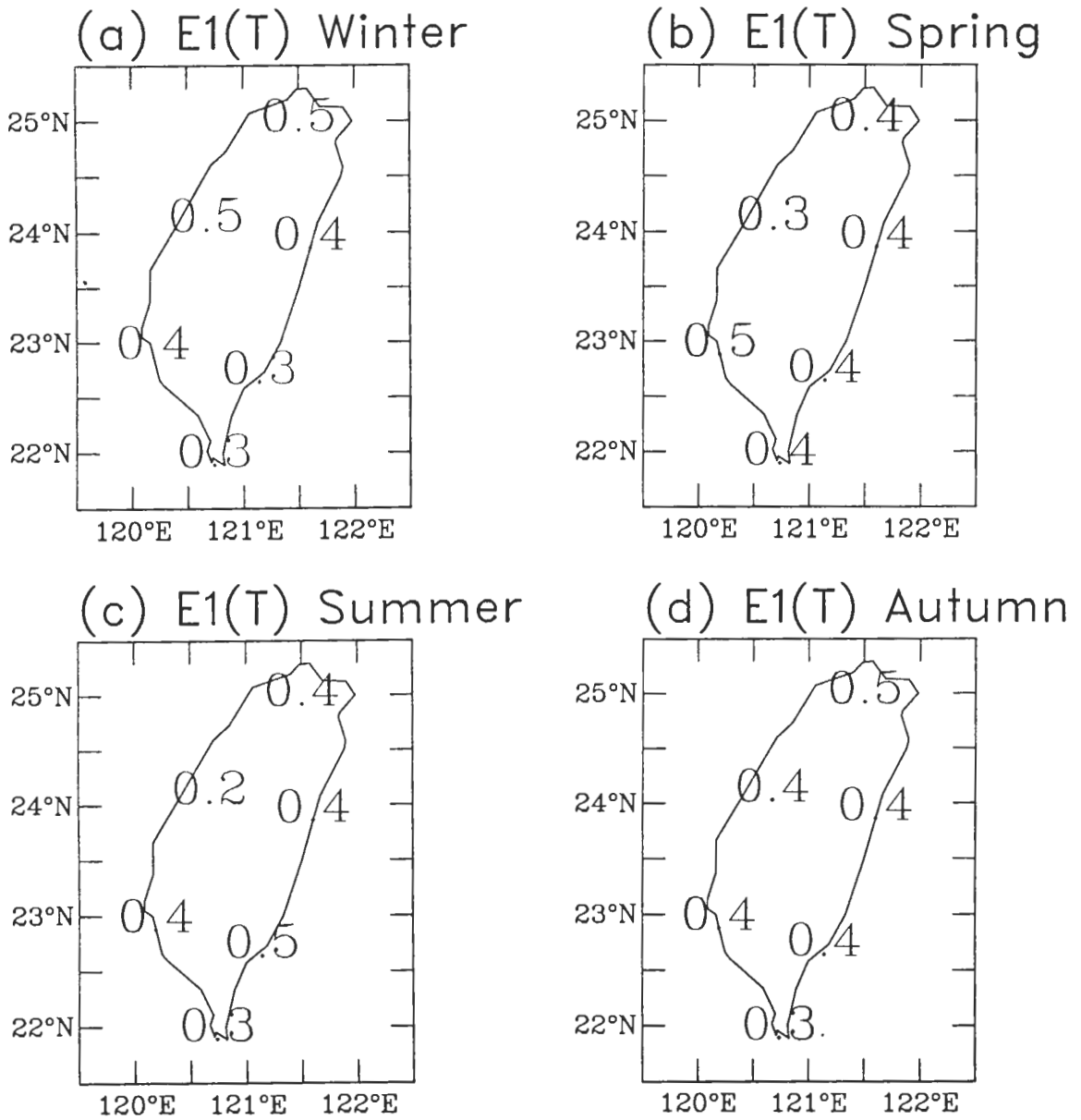


圖5 台灣地區各季溫度十年際變化的第一特徵向量：(a)冬季、(b)春季、(c)夏季、(d)秋季。

四、都市效應

Kukla et al.(1986)和 Wood(1988)分析北半球測站平均溫度的長期暖化趨勢時，發現該暖

化趨勢的部份成因應源自都市效應。Oke(1979)指出影響都市效應的主要因素包括都市的成長率(如人口、開發面積的增加速度)、地面使用方式(如道路鋪蓋程度)、建築物的分佈密度等，因

此都市效應之強度通常隨城市人口數增加而增強，而其所導致之暖化現象則在 10 萬以上人口的城市較為顯著(Karl et al., 1988)。由於本文所選取六個測站中，除了恆春以外，其餘五個測站所在城市於 1997 年人口數均超過 10 萬(見表二)，因此都市效應對本文所分析的台灣地區長期暖化現象的影響程度為何，值得進一步探討。

我們首先分析各測站長期暖化趨勢與測站所在城市人口數的關係，表二所列為各測站溫度之四季均溫與年均溫在 1920-1997 年間的暖化趨勢，並按各測站城市人口數高低，由上而下排列。由於都市效應在十萬以上人口之城市較為明顯，本文依此劃分十萬人以上之城市為都會區，十萬以下為非都會區，表二中唯一非都會區測站為恆春，此站之暖化趨勢，不論是季均溫或年均溫方面，均明顯低於其餘都會區測站，唯一例外者為夏季台中之暖化趨勢較恆春為低，就表二各測站暖化趨勢所顯示的城鄉差距，可清楚看出台灣地區的長期暖化現象的確反應出都市效應的影響。

若就五個都會區測站之暖化趨勢來比較，人口數最多的台北站，其暖化趨勢在冬、秋二

季均高過其餘都會區測站之暖化趨勢，但在春、夏二季，卻比人口較少之台南、花蓮、台東等站為低，僅比台中為高。就年均溫之暖化趨勢來看，台北最高、恆春最低之結果，呼應著 Jones et al.(1989)所提都市效應所導致之增溫效果應與城市人口數之指數次方成正比之統計結果，但在另一方面，人口數僅十萬左右之花蓮、台東與 70 萬左右之台南，卻具有相近的暖化趨勢，且都比 90 萬左右人口的台中站之暖化趨勢為高，透露城市人口數或都市效應當非決定台灣地區暖化現象的唯一因素，應還有其他的影響機制存在。

了解都市效應確能影響台灣地區之暖化現象後，應就其影響程度進行評估，一般估算都市效應的方法，多擇取都會區測站和其鄰近之非都會區測站形成對照組進行比較，在假設後者不受到都市效應影響的前提下，以二測站於同一時期暖化程度的差異，作為估算都市效應的參考(Lowry, 1977; Karl et al., 1988)。本文依照城市人口數、地緣關係、觀測資料完整性等因素，選取五個對照組，分析各站年均溫於 1950-1997 年間之暖化趨勢，結果顯示如表三。這些

表二 台灣地區六主要測站於 1920-1997 年間之暖化趨勢 (單位： $^{\circ}\text{C}/100$ 年)

季節 站別	冬	春	夏	秋	年平均	1997 年 人口數
台北	1.06	1.39	1.63	1.79	1.47	263 萬
台中	0.70	1.06	0.93	1.27	0.99	91 萬
台南	0.52	1.53	1.88	1.41	1.34	72 萬
花蓮	0.59	1.54	1.76	1.46	1.34	11 萬
台東	0.44	1.42	1.96	1.51	1.33	11 萬
恆春	0.34	0.93	1.17	1.16	0.90	3 萬
六站平均	0.6	1.3	1.6	1.4	1.2	

表三 都會區與非都會區於 1950-1997 年間暖化趨勢之比較 (單位: °C/100 年)

比較組別	站別	年平均溫 暖化趨勢	非都會區/都會區	1997 年人口數
1	台北	1.65	0.50	263 萬
	竹子湖	0.82		~千人
2	台中	1.24	0.70	91 萬
	阿里山	0.87		~數千
3	台南	0.90	0.67	72 萬
	澎湖(馬公)	0.60		5 萬
4	基隆	0.86	0.56	38 萬
	彭佳嶼	0.48		~百人
5	台東	0.97	0.39	11 萬
	蘭嶼	0.38		3 千
平均	都會區	1.12	0.56	10 萬以上
	非都會區	0.63		5 萬~百人

對照組中之都會區站，人口均在 10 萬以上，而非都會區之人口，除了澎湖(馬公市)為 5 萬以外，其餘粗估約在數千到百人之間。在各組對照組中，非都會區測站之暖化趨勢均明顯低於都會區測站，且前者之暖化程度約為後者之 40%~70%，由二者之差異可推論都會區測站之暖化現象約有 30%~60%增溫應與都市效應有關。就五個對照組的平均值而言，都會區之暖化趨勢為 1.12°C/100 年，非都會區為 0.63°C/100 年，後者約為前者之 56%，隱喻台灣都會地區之暖化現象約有 44%左右強度可能歸於都市效應的影響。上述結果顯示雖然都市效應在台灣地區長期暖化現象中扮演重要角色，卻也並非是決定台灣地區暖化現象的唯一因素，下一節我們便要探討另一可能因素—太平洋海溫變化所扮演的角色。

五、太平洋 SST 變化

台灣為西太平洋上的海島，其表面溫度的變化，可能與鄰近太平洋海域 SST 變化具有關聯性。過去研究發現太平洋 SST 具有長期暖化與 10~20 年振盪週期的變化(Douglas et al., 1982; Tanimoto et al., 1997)，與台灣地區溫度之長期變化特性相似，因此太平洋 SST 與台灣地區溫度兩者在十年際時間尺度變化的關係，值得細心探討。

(一) 單點相關係數分析

研究台灣地區溫度與 SST 十年際變化的關聯性，可用台灣地區平均溫度之 9 年滑動平均值(圖 1 之粗實線)為指標，計算該指標與 SST 9 年滑動平均值之單點相關係數 (point correlation coefficient)來評估，各季相關係數之水平分佈圖顯示在圖 6。從此圖可看出，西太平洋 SST 的十年際變化大致與台灣四季溫度的十年際變化

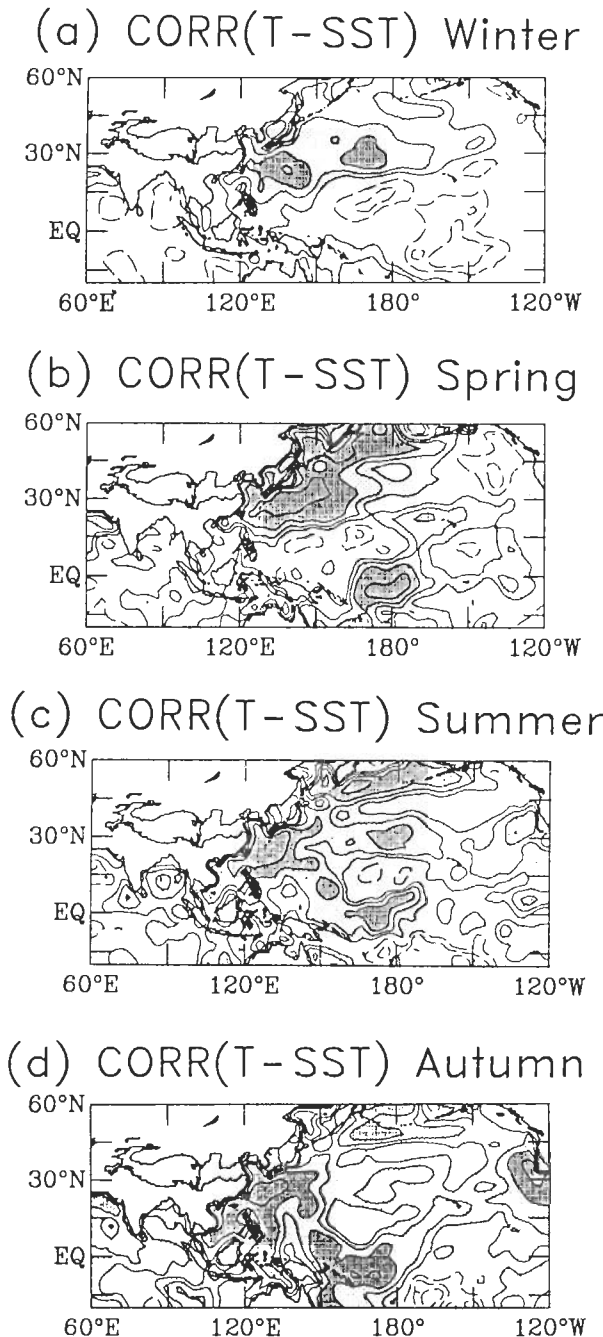


圖 6 以台灣地區平均溫度之十年際分量為指標，與印度洋-太平洋區海溫(SST)十年際分量之相關係數分佈圖：(a)冬季、(b)春季、(c)夏季、(d)秋季。等值線間距為 0.2，深陰影區代表相關係數大於 0.6，淺陰影區之相關係數則在 0 與 0.6 之間

呈正相關關係，分佈情形大致順著亞洲大陸沿岸呈東北、西南走向。至於東太平洋與印度洋區之相關係數，則隨著季節的變異或為正或為負，無一致的結果，且其相關數值也較西太平洋區為低。

若以圖 6 相關係數大於 0.6 的深陰影區為討論對象，可發現與台灣地區溫度十年際變化具有較高正相關關係的 SST 變化，大致集中在台灣附近的太平洋海域。冬季時，高於 0.6 相關係數的主要區域出現在台灣以東、日本以南的海域。春季時，高相關係數的區域，則從台灣東方海域，經由日本外海，向東北方向延伸到北太平洋。夏季時，高相關係數區域則自台灣以東、日本以南海域，向西南方延伸到南中國海。秋季時，高相關係數區域大致與夏季相似，唯其向南延伸的範圍，則擴大到菲律賓東方海域及更南方之赤道洋面。進一步比較圖 6 各相關係數圖的分佈情形，可發現位於台灣以東、日本以南海域之相關係數，在四季中均高於 0.6，意謂台灣以東、日本以南海域的 SST 十年際變化，在四季中均與台灣地區溫度之十年際變化具有相當顯著的關聯性。

(二) 時間序列分析

我們接著計算台灣以東、日本以南海域 (124°E-134°E, 20°N-32°N) 之 SST 區域平均值，根據其 9 年滑動平均值之時間序列來討論該海域 SST 之十年際變化特性，各季 SST 時間序列均顯示在圖 7，其中各時間序列之長期氣候平均值均已移除，所顯示數值為距平值。

檢視圖 7 各季 SST 時間序列的變化特性，大致可分成三個階段來討論：1935 年以前、1935~1970 年、1970 年以後。在 1935 年以前，

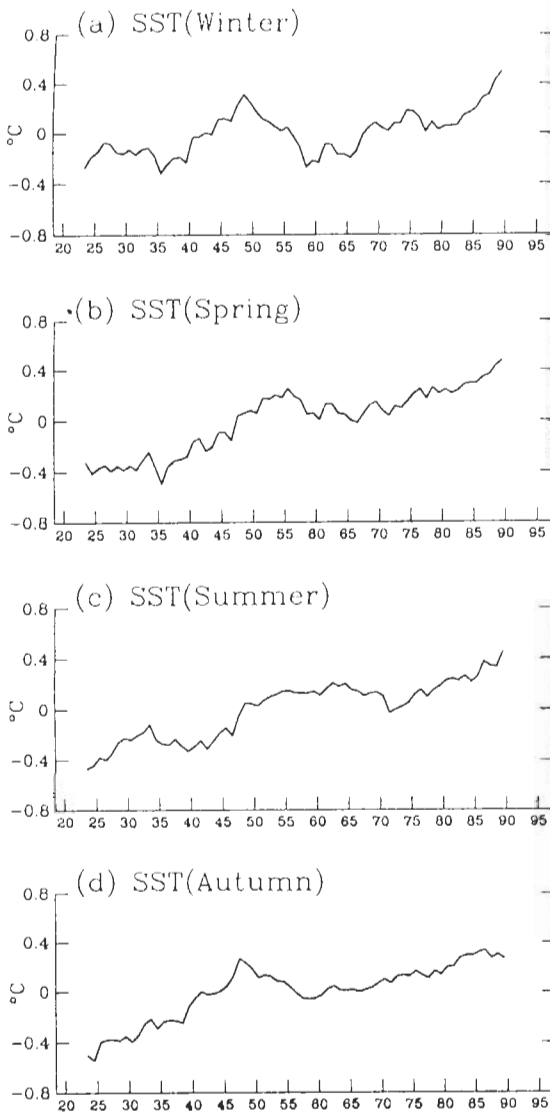


圖 7 台灣以東、日本以南海域(124°E-134°E, 20°N-32°N) SST 區域平均值之十年際分量 (以 9 年滑動平均值代表) 時間序列：(a) 冬季、(b) 春季、(c) 夏季、(d) 秋季。

各季 SST 區域平均值均呈現振盪現象，但振盪幅度並不明顯。在 1935~1970 年間，冬季 SST 呈現顯著的十年際振盪變化，SST 距平值也自 1935 年的 -0.3°C 上升到 1970 年的 0°C 左右，共計上升約 0.3°C 。同時期，春季和夏季的 SST

距平值則呈現明顯的上升趨勢，溫度上升幅度約 0.4°C ~ 0.5°C 。至於秋季 SST 則顯現與冬季 SST 相似的十年際振盪變化，惟振盪幅度不若冬季來得顯著，除此之外，秋季 SST 在 1935~1970 年間也呈現上升現象，幅度約為 0.4°C 。自 1970 年以後，各季 SST 距平值均出現近乎直線般的顯著上升趨勢，從 1970 年到 1990 年間的上升幅度約在 0.3°C ~ 0.4°C 之間。綜合上述討論可發現各季 SST 區域平均值在 1925~1990 年間均顯現出不同程度的上升趨勢，意味著台灣以東、日本以南海域的 SST，也在過去八十年發生長期暖化現象。

我們接著比較圖 7 之 SST 時間序列與圖 2 台灣地區平均溫度(粗實線)兩者之十年際變化特性。冬季時，該 SST 與台灣地區溫度兩者在 1970 年以前之演化特性相當類似，1935 年以前均呈現小幅度振盪現象，1935~1970 年間則呈現較大振幅與較長時間週期之振盪現象，其中 SST 振盪具有較規律之週期。但自 1970 年以後，二者之演化特性出現明顯差別，SST 自 1978 年左右即開始顯著增溫，但台灣地區溫度卻延到 1985 年左右才有明顯增溫現象。春季時，SST 與台灣地區溫度在 1955 年以前呈現相似上升趨勢，其中台灣地區溫度在 1935 年以前的上升趨勢又較 SST 來得明顯，但在 1955~1990 年間，台灣地區溫度呈現二個循環週期的十年際振盪現象，而 SST 卻呈現降低再升高之單一循環週期的上升現象，兩者之演化特性具有清楚的差異。夏季時，台灣地區溫度與 SST 之十年際變化，自始至終均呈現相近的增溫現象，且大致可分為三個階段：1945 年以前之負距平時期、1945~1970 年間接近長期氣候值之零距平時期、1970 年以後快速上升的正距平時期。秋季時，

台灣地區溫度與 SST 之十年際變化呈現下述相似特性，兩者在 1940 年以前均以接近線性的方式上升，但 1940 年以後之上升趨勢較為緩和，兩者之主要差異顯現在自 1920 年起快速增溫時期的長短，台灣地區溫度之快速增溫現象僅持續到 1940 年，但 SST 則持續到 1947 年左右。若應用相關係數來評估各季 SST 與台灣地區溫度變化特性的相似程度，得到之相關係數分別是冬季之 0.77、春季之 0.87、夏季之 0.96、秋季之 0.92，該項結果清楚顯示台灣地區溫度的十年際變化，與台灣以東、日本以南海域 SST 之十年際變化具有高度的正相關性，而兩者之關聯性在冬季較低，但也有接近 80 % 的正相關程度，春季之關聯性則提高到 90 % 左右，夏、秋兩季之關聯性最高，均在 90 % 以上。

(三) 太平洋 SST 之經驗正交函數分析

Wallace et al. (1990) 和 Graham et al. (1994) 的研究指出，太平洋 SST 在過去幾十年間發生顯著且系統性的十年際變化，其空間尺度涵蓋整個北太平洋及熱帶洋面，當然也涵蓋台灣、日本鄰近海域。本節將運用 EOF 分析法，進一步解析太平洋區大尺度 SST 十年際變化之時、空間變化特性，並檢驗太平洋區 SST 之系統性十年際變化與台灣地區長期暖化現象之關係。

本節的討論對象為各季 SST 十年際變化分量之前兩個 EOF 特徵模(eigenmode)，我們並依各 SST 特徵模在空間分佈、時間變化方面的相似性，將其分為兩類不同的 SST 十年際模(decadal mode)。第一類十年際模包括春、秋季 SST 之第一特徵模與冬、夏季 SST 之第二特徵

模，這些特徵模所解釋之變異量佔全部十年際變化總變異量之比例分別是冬季之 29%、春季之 37%、夏季之 22%、秋季之 34%。第一類 SST 十年際模所屬之四個特徵值顯示在圖 8，這些特徵值具有如下之共同演化特性：在 1975 年以前，各季 SST 特徵值呈現大約兩循環週期的振盪現象，此一循環振盪現象的最低點分別發生於 1950 年和 1970 年左右，最高點的發生時間較不清楚，但大致發生於 1940 年和 1960 年左右。自 1975 年以後，各季 SST 特徵值則呈現清楚的快速上升現象，且持續到 1985 年左右，隨後之上升現象則較為平緩，唯一例外為夏季 SST 特徵值之快速上升現象持續到 1985 年以後。

陳列在圖 9 為第一類 SST 十年際模所屬之特徵向量，這四個特徵向量之空間分佈情形具有如下之共通特性：正 SST 距平之分佈大致環繞北太平洋盆地的邊緣地區(東海、日本、白令海、阿拉斯加南岸、加拿大與美國西岸)與熱帶太平洋區，並向西延伸到南中國海、孟加拉灣、印度洋區。上述正 SST 距平包圍北太平洋中央的負 SST 距平中心，此負距平中心之強度與空間結構，在冬、春兩季較為顯著，夏、秋兩季則較為微弱。總而言之，北太平洋中央的負 SST 距平與環繞在其四周之正 SST 距平，透露出第一類 SST 十年際模於北太平洋區內負外正對比之分佈特性。

第一類 SST 十年際模與台灣地區長期暖化現象之關聯性，可經由計算圖 8 SST 特徵值與圖 2 台灣地區平均溫度十年際變化分量之相關係數來判定，計算所得之相關係數分別為冬季之 0.02、春季之 -0.01、夏季之 0.83、秋季之 0.60。這些結果顯示，第一類 SST 十年際模與台灣地區長期暖化現象之關聯性，在冬、春兩季幾乎

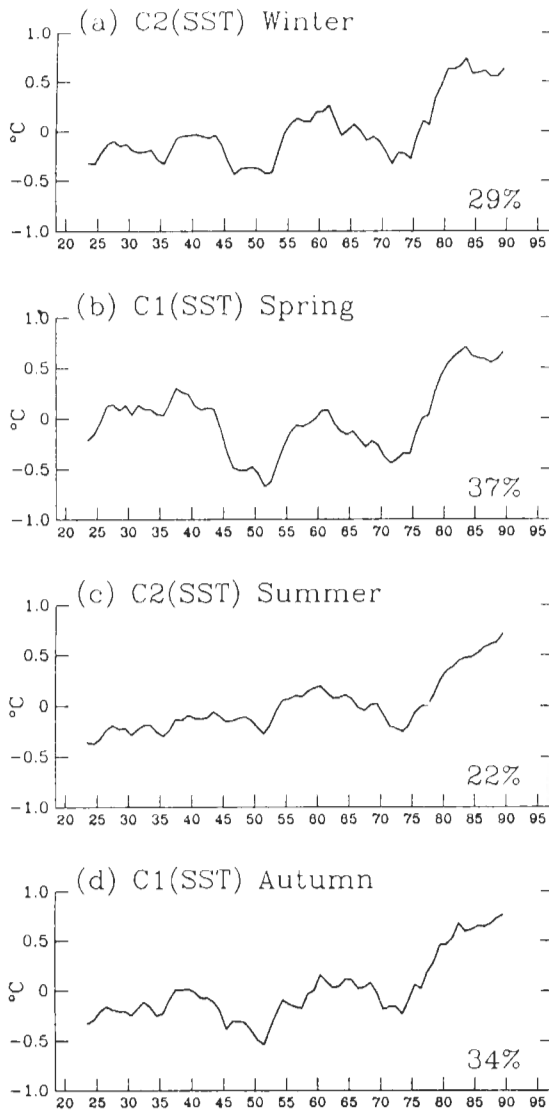


圖 8 本文所定義之第一類 SST 十年際模所屬之特徵值時間序列：(a)冬季 SST 之第二特徵值、(b)春季 SST 之第一特徵值、(c)夏季 SST 之第二特徵值、(d)秋季 SST 之第一特徵值。

是無，在夏、秋兩季則相當顯著，其中又以夏季之關聯性最高。本文前面分析指出，台灣地區長期暖化現象與台灣以東、日本以南海域之 SST 變化，具有高度的聯動性，在上述海域，第一類 SST 十年際模所屬冬、春兩季之特徵向

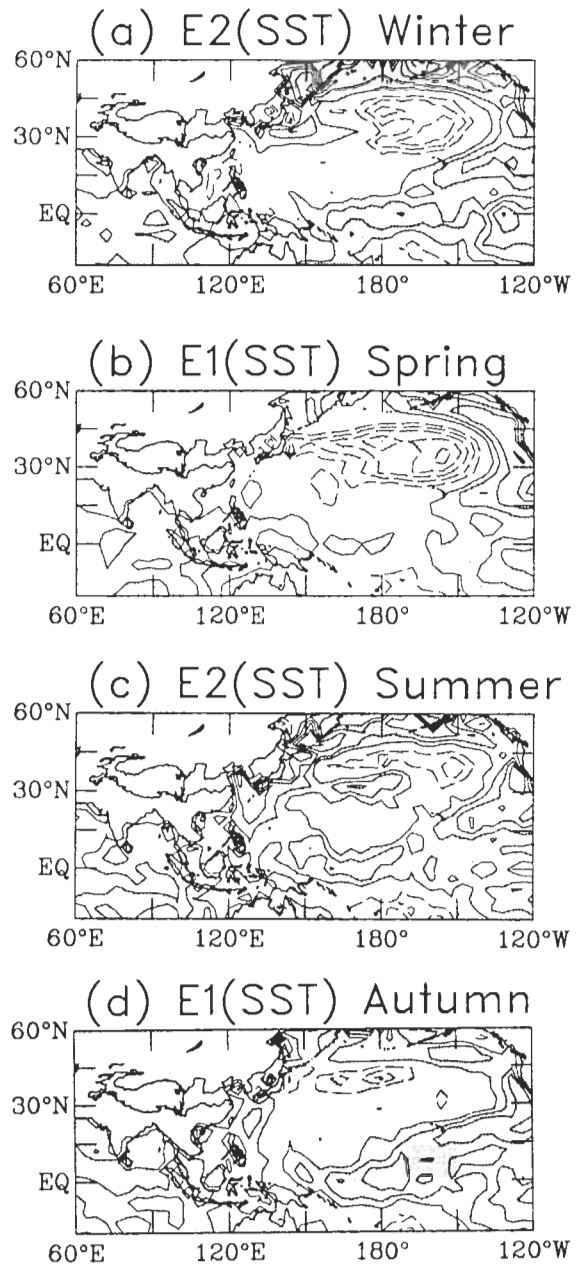


圖 9 第一類 SST 十年際模所屬之特徵向量分佈圖：(a)冬季 SST 之第二特徵向量、(b)春季 SST 之第一特徵向量、(c)夏季 SST 之第二特徵向量、(d)秋季 SST 之第一特徵向量。等值線間距為 0.2，深陰影區之特徵向量值大於 0.2，淺陰影區之特徵向量值小於-0.2。

量(圖 9a-b)，均未呈現任何顯著的距平中心，相反的，夏、秋兩季之特徵向量(圖 9c-d)，均在這個海域出現組織完整、強度顯著的正距平中心，其中又以夏季之距平中心的強度最高，上述結果隱喻著，台灣地區長期暖化現象與 SST 十年際模之關聯性，取決於各 SST 十年際模是否在台灣以東、日本以南海域具有顯著的十年際變化分量，且上述海域 SST 十年際變化之強度大小，決定各 SST 十年際模與台灣地區長期暖化現象關聯性的高低。

第二類 SST 十年際模包括冬、夏季之第一 SST 特徵模與春、秋季之第二 SST 特徵模，上述特徵模解釋各季十年際變化總變異量之比例分別是冬季之 37%、春季之 31%、夏季之 41%、秋季之 26%，該四季 SST 特徵模所屬之特徵值均陳列於圖 10，這些特徵值之十年際變化顯現如下共同特性：在 1937 年以前，呈現無明顯變化的水平線型，例外者為夏季 SST 特徵值所示之下降線型。在 1940 年到 1950 年代中期，各季 SST 特徵值均出現明顯的上升情形，但自 1950 年代中、後期，則開始轉為下降線型，直到 1980 年代末期才又轉為上升線型，例外者為春季 SST 特徵值，它的上升線型提前自 1970 年代中期開始發生，另一例外者為冬季 SST 特徵值，它的下降線型並非趨於直線，而是略有起伏振盪。

第二類 SST 十年際模所屬之特徵向量陳列於圖 11，這四個特徵向量之空間分佈特性大致分為三大區域：北太平洋中高緯度區、熱帶太平洋區、印度洋區。於北太平洋中高緯度區，一個近橢圓形的正距平中心由日本東岸向東延伸，此中心在冬、夏、秋三季之結構較完整，向東延伸亦較遠，可達東太平洋區域，但春季時結構較鬆散，且幾乎局限於西、中太平洋區

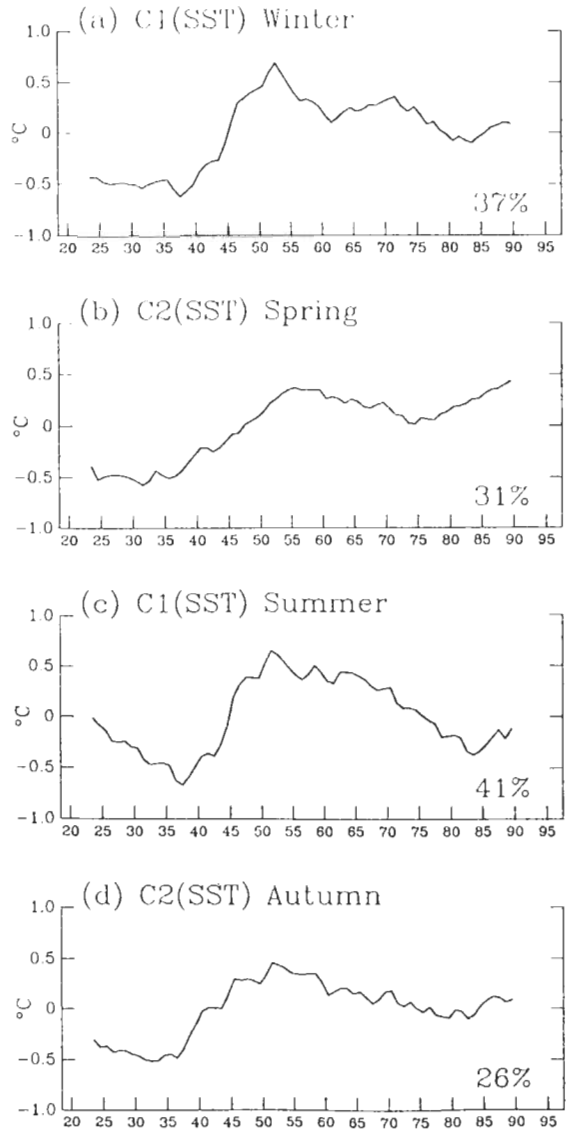


圖 10 本文所定義之第二類 SST 十年際模所屬之特徵值時間序列：(a)冬季 SST 之第一特徵值、(b)春季 SST 之第二特徵值、(c)夏季 SST 之第一特徵值、(d)秋季 SST 之第二特徵值。

域。於印度洋區，基本上為負 SST 距平區，其中春季負距平的強度較弱，而冬季負距平之分佈較偏北，靠近亞洲大陸的南岸。於熱帶太平洋區，SST 距平時而為正、時而為負，未顯現一致的特性，且其空間分佈情形較為散亂，無

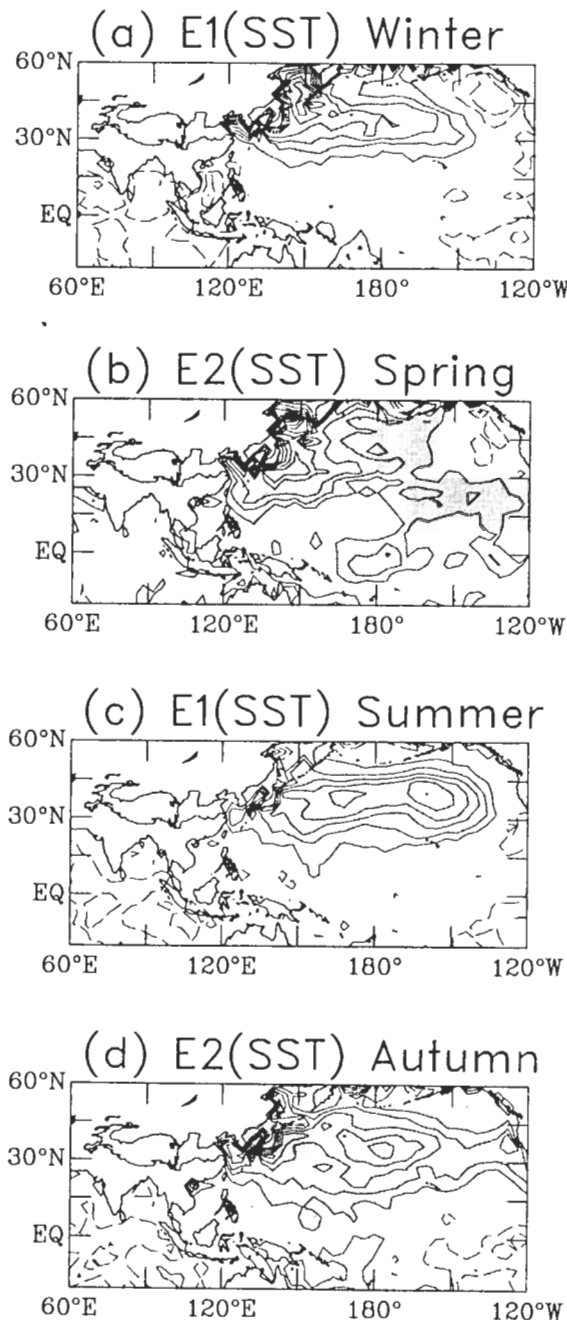


圖 11 第二類 SST 十年際模所屬之特徵向量分佈圖：(a)冬季 SST 之第一特徵向量、(b)春季 SST 之第二特徵向量、(c)夏季 SST 之第一特徵向量、(d)秋季 SST 之第二特徵向量。等值線間距為 0.2，深陰影區之特徵向量值大於 0.2，淺陰影區之特徵向量值小於 -0.2。

完整結構可言。總而言之，我們可歸納第二類 SST 十年際模之空間分佈特性如下：北太平洋中高緯度之正距平區與印度洋之負距平區的對比分佈。

第二類 SST 特徵值與圖 2 台灣地區平均溫度十年際變化分量之相關係數分別是冬季之 0.23、春季之 0.90、夏季之 0.29、秋季之 0.54。檢視圖 11b 和 11d 之分佈情形，可發現春、秋季之特徵向量於台灣以東，日本以南海域均有顯著的正距平值，相對的，冬、夏季 SST 特徵向量於此海域之正距平值較為微弱(見圖 11a 與 11c)，這個差異呼應相關係數的計算結果，即第二類 SST 十年際模與台灣地區長期暖化現象之關聯性，在春、秋兩季比冬、夏兩季為高。

根據本節 SST 十年際變化分量之 EOF 分析結果，我們發現台灣地區長期暖化現象與太平洋 SST 十年際模之間，具有相當程度的關聯性，台灣地區春、夏季長期暖化現象分別與春季第二 SST 特徵模、夏季第一 SST 特徵模之演化情形高度類似，台灣地區秋季長期暖化現象則與秋季前兩個 SST 特徵模均有相當程度關聯性，至於冬季 SST 之十年際變化似乎與台灣冬季長期暖化現象無密切關係。本節分析顯示台灣地區長期暖化現象與太平洋區 SST 十年際模息息相關，此結果隱喻著，太平洋 SST 之十年際變化應是都市效應之外，另一個明顯影響台灣地區長期暖化現象的物理機制。

六、結 論

本文之主要研究內容有兩部份，第一部份探討台灣地區長期暖化現象的特性，及其受都市效應之可能影響，第二部份探討台灣地區長

期暖化現象與太平洋海溫變化之關係。在第一部份，本文以台北、台中、台南、恆春、花蓮、台東等六測站地面溫度之平均值代表「台灣地區平均溫度」，藉此定義分析台灣地區溫度在1920~1997年間之長期變化特性。分析結果顯示，台灣地區平均溫度於過去近八十年間，在四季中均呈現長期暖化趨勢，該趨勢在冬季較為緩和，速率約為 $0.6^{\circ}\text{C}/100$ 年，但在春、夏、秋三季明顯增強，速率分別是春季之 $1.3^{\circ}\text{C}/100$ 年、夏季之 $1.6^{\circ}\text{C}/100$ 年、秋季之 $1.4^{\circ}\text{C}/100$ 年。若將台灣地區與北半球約兩千個測站地面溫度平均之暖化趨勢相比，兩者在冬季之變化速率大致相當，但在春、夏、秋三季，台灣地區之暖化速率分別為北半球之2倍、4倍、3倍左右，這些倍率透露台灣地區長期暖化現象之顯著程度。

從經驗正交函數(EOF)分析結果發現，在四個季節中，六個測站之長期溫度變化均呈現相同相位的暖化趨勢，隱喻台灣地區之暖化現象應為涵蓋全島範圍的氣候變異現象，然而各測站本身暖化趨勢的強度，或測站與測站間彼此暖化趨勢之相對大小，卻隨著季節的不同而有所差異。冬季時，西部測站之暖化趨勢較東部測站為強，秋季各測站之暖化趨勢轉為由北向南遞減，至於春、夏兩季，各測站之暖化趨勢未呈現任何規律的空間分佈特徵。由 EOF 結果可知台灣地區之長期暖化現象雖是全島性現象，卻不具有四季共通的空間分佈特性。

都市效應在台灣地區長期暖化現象中所扮演的角色，可藉由比較不同測站之暖化趨勢來探討。就1950-1997年間年均溫之暖化趨勢而言，如表三所示，五個十萬以上人口都會區測站之平均暖化值為 $1.12^{\circ}\text{C}/100$ 年，而對照比較

的五個五萬以下人口非都會區測站之平均值為 $0.63^{\circ}\text{C}/100$ 年，後者僅為前者之56%，在假設非都會區測站不受都市效應影響的前提下，由兩者之差距可推論台灣地區都會區測站之暖化趨勢約有44%增溫可能來自都市效應的作用。另一個有趣現象是台灣地區非都會測站之平均暖化值約與整個北半球平均值相當($0.56^{\circ}\text{C}/100$ 年; Jones, 1994)，主要原因應與北半球測站大多位於非都會區有關，例如美國所有長期測站中約有85%位於二萬五千以下人口之城鎮(Karl et al., 1988)。Jones et al. (1989)估計全球平均暖化趨勢受到都市效應影響的程度僅佔總值之10%左右，遠低於本文所估計台灣地區之44%，都市效應在台灣地區之所以如此顯著，當是反應台灣人口密度高居世界第二，高度城市化的結果。另外本文用來計算台灣地區暖化趨勢之六測站中有五站位於都會區(台北、台中、台南、台東、花蓮)，有鑑於台灣地區都市效應的顯著作用，便讓估算之台灣地區暖化趨勢明顯高於以非都會區測站為主之北半球平均暖化趨勢。

在第二部份的分析方面，單點相關係數分析結果顯示，台灣地區之長期暖化現象在四個季節中均與西太平洋 SST 之十年際變化具有相當程度關聯性，其中又和台灣以東、日本以南($124^{\circ}\text{E}-134^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{N}-32^{\circ}\text{N}$ 之範圍)海域 SST 變化之正關聯性最高。由經驗正交函數分析發現，台灣以東、日本以南海域之 SST 變化，在春、夏、秋三季均為太平洋大尺度 SST 十年際變化的一部份，因此台灣地區在這三季之長期暖化現象，便與太平洋大尺度 SST 十年際變具有明顯正相關關係。但冬季時，台灣以東、日本以南海域之 SST 變化，並不屬於太平洋大尺度 SST

十年際變化的一部分，因此台灣冬季之長期暖化現象，便不與冬季太平洋大尺度 SST 十年際模具有明顯相關性。

本文研究結果指出，台灣地區之長期暖化現象與太平洋 SST 的十年際變化有相當程度的正相關性，隱喻著太平洋 SST 變化可能是影響台灣長期氣候變遷的物理機制之一，若要進一步瞭解台灣地區長期暖化現象與太平洋 SST 變化的關係，可用全球環流模式來模擬評估太平洋 SST 變化對台灣鄰近區域氣候變遷的影響。本文亦發現台灣以東、日本以南海域之 SST 變化，與台灣地區之長期氣候變化息息相關，因此這區域之 SST 變化，應可作為氣候監測的適當指標，更重要的是，將來若能以適當之海洋-大氣偶合模式來預報此區域之 SST 變化，則其預報結果便可供作預報台灣地區長期氣候變化的重要參考因子，這方面的相關努力，終將有助提升國內短期氣候預報的研發工作。

誌 謝

本研究為中央氣象局「短期氣候預報計劃」之相關研究工作，作者感謝台大大氣科學系許晃雄教授對研究結果所提供的指導與討論，並感謝中央氣象局預報中心陳雲蘭小姐提供中央氣象局測站資料，而 SST 網格點資料則是由國科會大氣研究資料庫提供。

參考文獻

張隆男、張哲明、林沛練、沈鴻禧，1997：全球氣候變遷對台灣影響之研究：季節變化。全球氣候變遷在台灣研討會，1997年9月，中央研究院 p6-11。

戚啓勳、陳孟青，1995：台灣之氣候。交通部中央氣象局出版，台北，531頁。

魏國彥、許晃雄，1997：全球環境變遷導論，教育部印行，ISBN 957-02-0487-7。

Chen, T.-C., H. van Loon, K.-D., Wu, and M.-C. Yen, 1992: Changes in the atmospheric circulation over the North Pacific-North America area since 1950. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 1137-1146.

Deser, C., and M. Blackmon, 1993: Surface climate variations over the North Atlantic ocean during winter: 1900-1989. *J. Climate*, **6**, 1743-1753.

Douglas, A. V., D. R. Cayan, and J. Namias, 1982: Large scale changes in North Pacific and North America weather patterns in recent decades. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 1185-1862.

Graham, N. E., T. P. Barnett, R. White, M. Ponater, and S. Schubert, 1994: On the roles of tropical and midlatitude SSTs in forcing interannual to interdecadal variability in the winter Northern Hemisphere circulation. *J. Climate*, **7**, 1416-1441.

Jones, P. D., P. M. Kelly, and C. M. Goodness, 1989: The effect of urban warming on the Northern Hemisphere temperature average. *J. Climate*, **2**, 285-290.

Jones, P. D., 1994: Hemispheric surface air temperature variations: A reanalysis and an update to 1993. *J. Climate*, **7**, 1794-1802.

Karl, T. R., H. F. Diaz, and G. Kukla, 1988: Urbanization: Its detection and effect in the United States climate record. *J. Climate*, **1**, 1099-1123.

Karl, T. R., and R. W. Knight, 1994: Global and hemispheric temperature trends: Uncertainties related to inadequate spatial sampling. *J. Climate*, **7**, 1144-1163.

Knox, J. L., K. Higuchi, A. Shabbar, and N. E. Sargent, 1988: Secular variation of Northern Hemisphere 50 Kpa geopotential height. *J. Climate*, **1**, 500-511.

Kukla, G., J. Gavin, and T. R. Karl, 1986: Urban warming. *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 1265-1270.

- Kushnir, Y., 1994: Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperatures and associated atmospheric circulations. *J. Climate*, **7**, 141-157.
- Lowry, W. P., 1977: Empirical estimation of urban effects on climate: A problem analysis. *J. Appl. Meteor.*, **10**, 244-261.
- Oke, T. R., 1979: Review of urban climatology. WMO Tech. Note No. 169, 100pp.
- Parker, D. E., P. D. Jones, C. K. Folland, and A. Bevan, 1994: Interdecadal changes of surface temperature since the late nineteenth century. *J. Geo. Res.*, **99**, No. D7, 14373-14399.
- Parker, D. E., C. K. Folland, A. Bevan, M. N. Ward, M. Jackson, and K. Maskell, 1995: Marine surface data for analysis of climatic fluctuations on interannual to century time scales. *Natural Climate Variability on Decade-to-Century Time Scales*, D. C. Martinson et al., Eds, National Academy Press, 241-250.
- Rayner, N. A., E. B. Horton, D. E. Parker, C. K. Folland, and R. B. Hackett, 1996: Version 2.2 of the global sea-ice and sea surface temperature data set, 1903-1994, CRTN 74, 21 PP. [Available from Hadley Center for Climate Prediction and Research, Meteorological Office, UK.]
- Shabbar, A., K. Higuchi, and J. L. Knox, 1990: Regional analysis of Northern Hemisphere 50 kPa geopotential heights from 1946 to 1985. *J. Climate*, **3**, 543-557.
- Tanimoto, Y., N. Iwasaka, and K. Hanawa, 1997: Relationships between sea surface temperature, the atmospheric circulation and air-sea fluxes on multiple time scales. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 831-849.
- Wallace, J. M., C. Smith, and Q. Jiang, 1990: Spatial patterns of atmosphere-ocean interaction in the northern winter. *J. Climate*, **3**, 990-998.
- Wang S., and D. Ye, 1993 : An analysis of global warming during the last one hundred years. In "*Climate Variability*", China Meteorological Press, Beijing, 302pp.
- Wood, F. B., 1988: Comment: On the need for validation of the Jones et al. Temperature trends with respect to urban warming. *Climatic Change*, **12**, 297-312.
- World Meteorological Organization, 1996: WMO statement on the status of the global climate in 1995. World Meteorological Organization, Switzerland, WMO-No. 838, 11pp.

The Long-term Warming over Taiwan and Its Relationship with the Pacific SST Variability

Jau-Ming Chen Feng-Ju Wang

Research and Development Center, Central Weather Bureau

(Manuscript received 21 October 1999 ; in final form 14 June 2000)

ABSTRACT

The purpose of this study is twofold. The first one is to examine characteristics of the long-term warming over Taiwan and the role of urbanization effect in this warming. The second one is to analyze the relationship between the warming over Taiwan and the variability of the Pacific sea surface temperature (SST). Our analyses show that, for the seasonal mean temperature averaged from 6 major weather stations over Taiwan, there is a clear warming trend in the 1920-1997 temperature time series. Magnitude of the warming trend is $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{yr}$ in winter, $1.3^{\circ}\text{C}/100\text{yr}$ in spring, $1.6^{\circ}\text{C}/100\text{yr}$ in summer, and $1.4^{\circ}\text{C}/100\text{yr}$ in autumn. The warming trend of Taiwan is in comparable magnitude with that averaged over the Northern Hemisphere (NH) in winter, but is 2, 4, and 3 times larger than the NH warming trend in spring, summer, and autumn, respectively. EOF analyses show that all the 6 stations over Taiwan are consistent with respect to the polarity of warming trend, suggesting that the long-term warming over Taiwan is likely to be an island-scale climate change phenomenon. By comparing the warming trends of 5 urban and 5 rural stations, we find that warming of the rural stations is only 56% of the urban one, implicating that 44% of the warming of the urban stations is likely related to urbanization effect.

To examine the relationship between the long-term warming over Taiwan and SST variability over the Pacific, we compute point correlation and find high positive correlations over the North Pacific. In particular, temperature changes over Taiwan is highly coherent with SST changes over the open oceans between Taiwan and Japan in the area of $124^{\circ}\text{E}-134^{\circ}\text{E} \cdot 20^{\circ}\text{N}-32^{\circ}\text{N}$. SST changes in this area are parts of the large-scale decadal SST variability over the Pacific in spring, summer, and autumn, but not in winter. These results implicate that the long-term warming of Taiwan should be highly linked with the large-scale decadal SST variability over the Pacific. Further implication is that the Pacific SST variability is one of the possible mechanisms to affect the long-term climate changes over Taiwan.

Key words : Long-term warming, Warming trend, Urbanization effect, Pacific SST, Decadal variability