

氣候自然變異與年代際變化

許晃雄^{1,2} 羅資婷³ 洪致文⁴ 洪志誠⁵
李明營³ 陳雲蘭³ 黃威凱¹ 盧孟明³ 隋中興¹

¹ 國立臺灣大學大氣科學系

² 中央研究院環境變遷研究中心

³ 交通部中央氣象局

⁴ 國立臺灣師範大學地理學系

⁵ 國立臺北教育大學自然科學系

(中華民國一〇一年一月三十日收稿；中華民國一〇一年四月三日定稿)

摘 要

地球氣候不斷的變化，呈現多重時間尺度的特性。過去一百多年的地球氣候除了有長達百年的暖化趨勢，亦呈現明顯的年代際變化，如 20 世紀初至 1940 年代的暖化趨勢，1950 年代至 1970 年代的冷卻趨勢，以及 1980 年代以後更明顯的暖化趨勢。降雨也呈現明顯的年代際變化，而且區域性強。

IPCC 第四次評估報告對過去數十年全球暖化加速的看法，忽略了年代際振盪的貢獻。過去 30 年剛好處於大西洋多年代振盪朝正相位（亦即溫度上升）發展的時期，加上全球溫度上升趨勢，因此顯得暖化速率特別快。無論檢視過去氣候變化或推估未來氣候變遷趨勢，吾人都需考慮年代際的影響，因為年代際振盪造成的是近期影響，人為溫室效應則是遠期影響。年代際振盪的影響不僅不可忽視，甚至可能提供較為準確的近期氣候推估。IPCC 已經將年代預報納為重要的研究方向，並將於第五次評估報告首次提出研究成果。

此項觀察與長期暖化趨勢的存在並不牴觸。年代際振盪以北半球最為明顯，南半球的海溫與全球海面高度皆呈現顯著的長期上升趨勢與微弱的年代際振盪。理論上，如果人為溫室效應確實影響了地球氣

候，海水溫度與熱容量是最容易延續該訊息的氣候變數，這是因為海水的熱容量遠大於氣體與土壤，具有較長的「記憶」。南半球的海溫與全球海面高度的顯著長期上升趨勢很可能反應了此一人為影響。

人造溫室氣體是過去數十年氣溫上升的主因之一。最近的觀測顯示，自京都議定書以來，全球溫室氣體的排放不但無法抑制，反而加速成長。人類排放的溫室氣體造成的溫室效應已經十分明顯，而且大多數氣候模式都顯示人為溫室效應的影響大於其他已知的自然因素，因此過去一百多年來的溫度上升有一部分受到人為溫室效應的影響是極其可能的。依據 IPCC 的情境推估，在 2100 年暖化程度為 1.1°C 至 6.4°C 。此一暖化幅度遠大於年代際振盪造成的溫度變化，也大於火山爆發帶來的短期冷卻。即使考慮未來如果發生像造成小冰期的 *Maunder Minimum*，其造成的全球冷卻效應約為 0.3°C ，仍遠小於人為溫室效應造成的暖化。

整體而言，如果溫室氣體的增加無法抑制，全球暖化程度將遠遠超過自然變化的幅度，無任何已知的過去百年來的自然變化可以抵銷。地球史上曾發生過的毀滅性災難如果再次發生，或許可以抑制全球暖化趨勢。但是，這類事件無法預知也非人類所樂見。抑制全球暖化以減緩對地球生態環境的可能衝擊，勢在必行。因此，如何抑制溫室氣體的排放，降低大氣溫室氣體濃度的增加速率，是目前人類面臨的最大的課題與挑戰。

關鍵字：氣候變遷、年代際變化、全球暖化

一、前言

地球氣候不斷地變化，呈現多重時間尺度的特性。八億年來，地球在暖房(*green-house*)與冰室(*ice-house*)氣候間來回擺盪。相對於過去八億年的溫暖氣候，地球目前處於一個相對較冷的年代。一億年前的極區溫度比現在高出 20°C 至 60°C ，溫度高於冰點，深海溫度約為 15°C ，海面高度比現在高出 300m。西伯利亞發現鱷魚與大型蕨類植物的化石證實當時的氣候比現在溫暖許多。三、四百萬年前，北半球高緯度地區的溫度比現在高出 4°C 至 10°C ，雨量也比現在多。那個溫暖潮濕的年代，約在 300 萬年前結束，地球進入另一個冷期至今。即使在這個逐漸冷卻的年代，地球氣候也是冷暖交替，最明顯的是具準週期性的米蘭科維奇循環(*Milankovitch Cycle*)。米

蘭科維奇循環是因為日-地關係變化，影響地球接收到的太陽輻射量，而形成的冷暖交替的現象，過去數十萬年以十萬年週期最為明顯，但是 100 ~ 300 萬年前間的主要週期則為 41,000 年與 23,000 年週期。距今 12~13 萬年的因紐暖期(*Eemian Period*)則比現今氣候暖和，有證據顯示當時極區比現今氣候高 2°C 至 6°C 。因紐期之後，地球再次步入冰期，一直到約 18,000 年前的末次盛冰期(*Last Glacial Maximum*)之後，氣候再次慢慢暖化，歷經新仙女木期(*Younger Dryas*)數百年的短暫冷期、溫暖的全新世盛期(*Holocene Maximum*)、中世紀暖期(*Medieval Warm Period*)、小冰期(*Little Ice Age*)，直到相對溫暖的 20 世紀。在這個漫長的過程中，自然因素（如，太陽強度變化、板塊與造山運動，溫室氣體循環、溫鹽環流、日地關係、太陽黑子的長期變化、海洋大氣

陸地交互作用等)造成了氣候變化。它們影響的時間長短各自不同,但都比本章討論的現象的時間尺度大了許多,無法據之解釋百年來的氣候變化,以及未來百年的可能變化。火山爆發可能導致全球氣候短暫變冷,以1991年菲律賓皮納吐波火山(Pinatubo)的爆發為例,造成全球溫度下降約 0.4°C 至 0.5°C ,但僅維持2年。除非每年有大型火山持續爆發,否則火山爆發對長期氣候的影響不顯著。

根據2007年公布的IPCC第四次評估報告(IPCC 2007),過去150年全球平均氣溫上升速率為 0.045°C (10yrs) $^{-1}$,過去100年為 0.074°C (10yrs) $^{-1}$,過去50年為 0.128°C (10yrs) $^{-1}$,最近30年則為 0.177°C (10yrs) $^{-1}$ 。該報告因此認為全球暖化有逐漸加速的跡象,並且認為為溫室氣體的過度排放是近半世紀來全球暖化的主要因素。

然而,全球平均氣溫並非直線上升,而是呈現上下振盪的緩慢上升趨勢。Wu et al. (2007)認為可能是一個數十年週期振盪與拋物線式上升趨勢的組合(稱為多年代趨勢),而不是暖化逐漸加速(圖1)。此一上下振盪的溫度上升現象,到底是導因於屬於地球系統自然變異的年代/年代際振盪,或者是人為暖化與這些自然振盪互相作用的結果,是一個相當值得探討的問題。吾人必須了解此一現象,以便更清楚地了解造成近百年氣候變遷的主要原因,以及其對未來氣候變遷的可能影響。

本文探討已知的年代/年代際振盪,它們對氣候的影響、可能的成因,以及這些現象是否可以預報,使得氣候變遷推估更加準確。第一節為前言,第二節探討大西洋多年代季振盪、太平洋年代/年代際變異、北大西洋振盪與北極振盪、歐

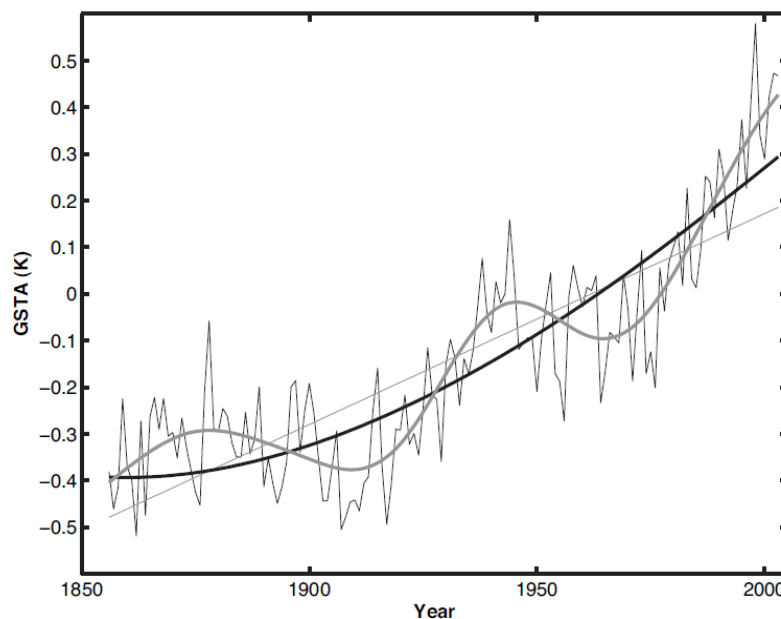


圖1 全球平均地表溫度距平(相對於1961~1999年平均值)的逐年變化(輕黑線)、線性迴歸線(灰直線)、利用 Empirical Mode Decomposition (EMD)求得的 overall adaptive trend(黑曲線),以及多年代曲線(overall adaptive trend 加上一個多年代振盪,厚灰曲線)。(摘自 Wu et al. 2007)

亞-太平洋多年代振盪等大尺度環流振盪現象。第三節介紹已發生的大範圍氣候遷移事件，如 1976/1977 事件、1980 年代晚期事件、1960 年代事件。第四節討論觀測到的東亞／臺灣氣候的年代(際)變化，分為夏季與颱風季：1950 年代初期、1970 年代後期，1990 年代中期，10~20 年準週期的雨量年代際變化以及更長期的變化，冬季：1980 年代的東亞氣候遷移與暖化、北大西洋振盪與臺灣寒潮發生頻率的年代際關係、1980 年代北臺灣平地冬季降水突增與東亞冬季季風的減弱，春季：北臺灣春雨年代際變化與 PDO 之相關。第五節討論全球氣溫變化趨勢的區域特徵與可能原因。第六節討論如何釐清年代／年代際振盪與長期趨勢的關係。結語則列於第七節。

二、年代／年代際振盪

本節討論已知的存在於海洋與大氣中幾個較為重要的年代／年代際振盪，這些振盪與全球氣溫以及氣候特徵的變化有明顯的關係。

(一) 大西洋多年代季振盪

在過去一百多年間，北大西洋海面溫度呈現 65~75 年的準週期性振盪，此一振盪稱為北大西洋多年代振盪 (Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO; e.g. Kushnir 1994, Schlesinger and Ramankutty 1994, Kerr 2000)。受限於有限的資料，我們目前只觀測到 1.5 個循環 (暖相位：1930~1960 年；冷相位：1905~1925 年、1970~1990 年，圖 2)。1990 年代中期至今，AMO 似乎又回復到暖相位，是否持續還待觀察。古氣候資料顯示，類似 AMO 的氣候振盪亦存在於過去四世紀 (Delworth and Mann 2000, Gray et al. 2004)，因此 AMO 應該不是僅存在於最近 100 年的暫時現

象。至於它的成因，一般認為是大西洋自然變異造成的。海洋模式的長期模擬發現，在無人為影響機制的作用下，溫鹽環流變化是形成 AMO 的主要原因 (e.g. Delworth and Mann 2000, Latif 2001, Sutton and Hodson 2003, Knight et al. 2005)。

研究發現，AMO 對北大西洋周遭的氣候影響明顯。Emanuel (2005) 認為近年來的全球暖化趨勢是大西洋颶風增強的原因。但是 Goldenberg et al. (2001) 的研究顯示，AMO 暖相位時，北大西洋颶風數較多，冷相位時則較少，因此近年來大西洋颶風的增強與增多可能與 AMO 處於暖相位有關。AMO 也影響北美洲與歐洲的夏季氣候、北美洲的乾旱、加勒比海的雨量、撒赫勒 (Sahel) 乾旱的長期變化等 (e.g. Venegas and Mysak 2000, Sutton and Hodson 2005, Trenberth and Shea 2006)。

(二) 太平洋年代／年代際變異

太平洋是另一個呈現明顯年代／年代際變化的區域。這些變異統稱為太平洋年代／年代際變異 (Pacific Decadal Variability, PDV)。其中最明顯的現象為太平洋年代振盪 (Pacific Decadal Oscillation, PDO; Mantua et al. 1997)，是 20°N 以北海面溫度年代變化的主要型態。如圖 3(a) 所示，它的主要結構為中緯度北太平洋由亞洲東岸往東延伸至東太平洋的海溫距平，其次為沿著北美洲西岸與熱帶東太平洋，符號相反的海溫變化。如果不計入 20 世紀初較為不可靠的資料，從 1920 年代至今，PDO 歷經 1.5 次循環，兩次相位轉變發生於 1943 年前後與 1976/1977 左右。PDO 的定義為當熱帶海溫高於平均值且北太平洋海溫低於平均值時為正相位，因此 1925 年至 1943 年與 1976/1977 年之後的正相位相當於中緯度北太

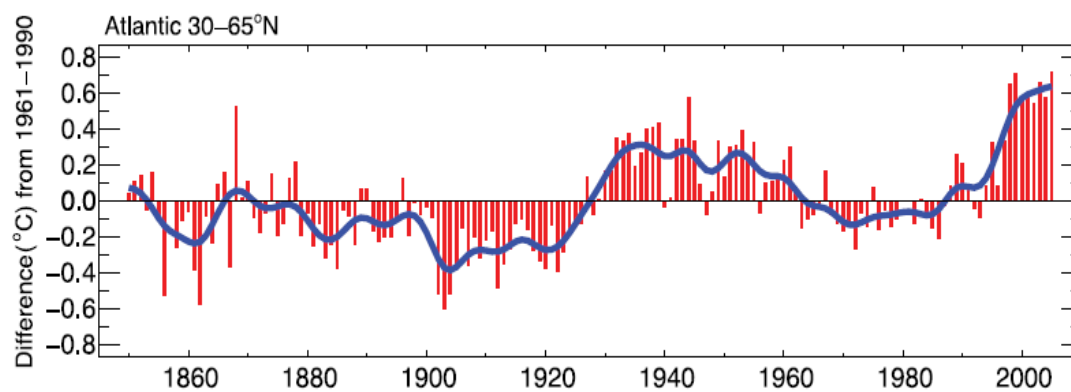


圖 2 北大西洋 30°N~65°N 平均海面溫度(AMO)的逐年變化。(摘自 Trenberth et al. 2007)

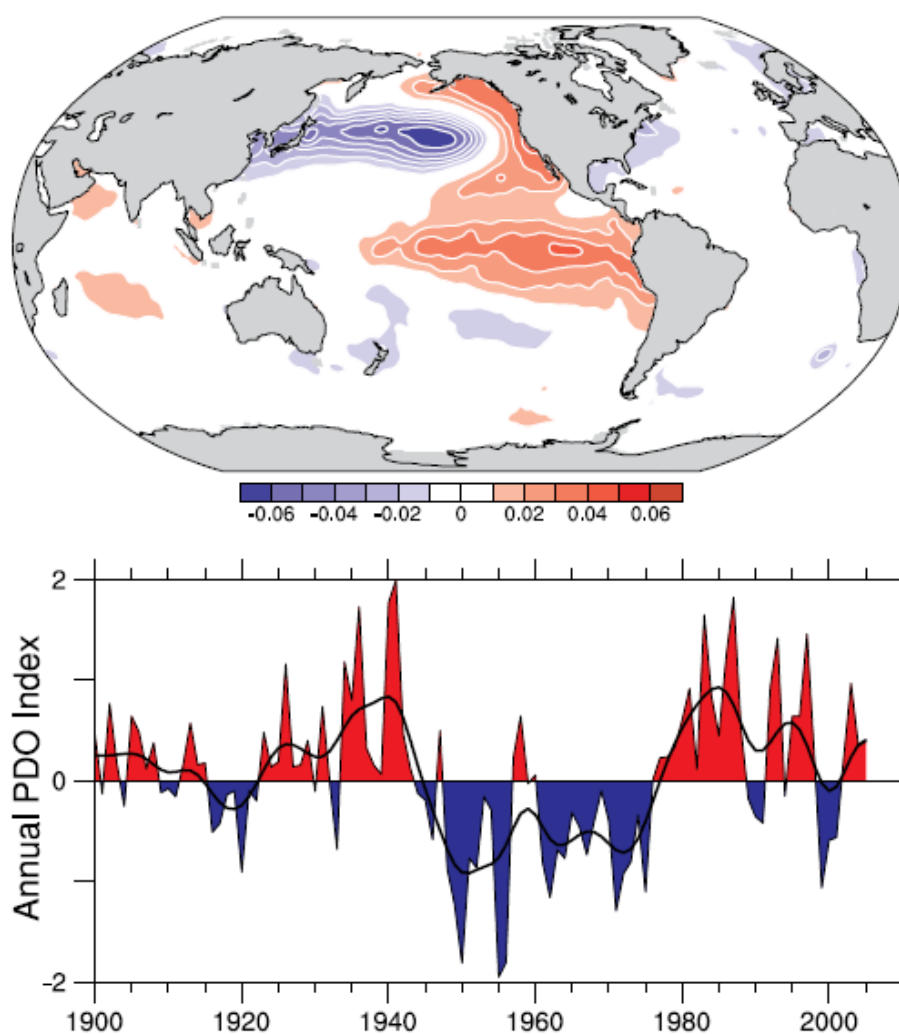


圖 3 PDO 的(a)空間結構與(b)時間變化。(摘自 Trenberth et al. 2007)

平洋的低溫期，1943 年至 1976 年間則為高溫期（圖 3(b)）。

其他研究(Power et al. 1999)發現年代／年代際變異不只發生於北太平洋，而是存在於整個太平洋，因此提出年代際太平洋振盪(Inter-decadal Pacific Oscillation, IPO)的觀念。最近研究(Chen et al. 2008, Shakun and Shaman 2009)進一步認為，南半球中緯度海面溫度也存在一個類似 PDO 鏡像的結構。Hsu and Chen (2011)將之稱為 South Pacific Decadal Oscillation (SPDO，參見圖 17c)。這些研究顯示，PDO 與聖嬰／南方振盪(El Niño/Southern Oscillation, ENSO，簡稱聖嬰現象)，以及南太平洋的年代／年代際振盪雖然相關，但各自呈現不同特徵（如週期）。

聖嬰現象除了 2~7 年的年際變化，也呈現明顯的年代／年代際變化，最明顯的是 1976/1977 之前，東太平洋海面溫度較低，反聖嬰的發生較為頻繁；1976/1977 之後，東太平洋海面溫度較高，聖嬰的發生較為頻繁(Trenberth and Stepaniak 2001)。除此之外，聖嬰現象在 1990 年代之後，空間結構的特徵呈現明顯的變化，因此引

發兩類聖嬰的倡議：聖嬰與類聖嬰(El Niño Modoki; Ashok et al. 2007)，或東太平洋與中太平洋聖嬰(Eastern and Central Pacific El Niño; Kao and Yu 2009)，或冷舌與暖池聖嬰(Cold Tongue and Warm Pool El Niño; Kug et al. 2009)。

(三) 北大西洋振盪與北極振盪

北大西洋振盪(North Atlantic Oscillation, NAO; Walker and Bliss 1932, Barnston and Livezey 1987)是最早被發現的大尺度大氣環流結構之一，不僅影響大西洋兩岸的北美與歐洲氣候，對歐亞氣候也有顯著影響。北大西洋振盪代表北大

西洋高緯度地區與副熱帶地區海平面氣壓呈現類似蹺蹺板的反相位變化。簡而言之，當北大西洋振盪為正相位時，冰島低壓與大西洋副熱帶高壓都增強，中緯度的西風帶增強，天氣系統較為活躍；相反的，當北大西洋振盪為負相位時，冰島低壓、大西洋副熱帶高壓與中緯度的西風帶減弱，天氣系統較為不活躍。圖 4 顯示 NAO 在 1960 年代處於最強的負相位，在 1970 年代末期，由負轉正，在 1990 年代中期達到正相位鼎盛期。

北極振盪(Arctic Oscillation, AO；亦稱北環狀模：Northern Annular Mode, NAM; Thompson and Wallace 1998)是一個較新的觀點，描述北極與中緯度海平面氣壓呈現反相位的振盪關係。當北極振盪為正相位時，極區氣壓與氣溫低、中緯度西風強，因此極區變冷中緯度變暖。負相位時則相反：極區氣壓與氣溫升高、中緯度西風減弱，極區變暖中緯度變冷。NAO 與 AO 由於定義極其類似，兩者相關性極高。如圖 4 所示，NAO 與 AO 的長期變化在過去百年幾乎完全一樣。

(四) 歐亞—太平洋多年代振盪

歐亞—太平洋多年代振盪(Eurasia-Pacific Multidecadal Oscillation, EAPMO)是本計畫發現的存在於北半球中緯度高對流層的環流結構，呈現多年代的振盪結構。Hsu and Lee (2011)分析過去半世紀上對流層高度場，發現除了最主要的暖化結構，次重要的結構為一個位於 30°N~60°N 間的幾乎緯向對稱的結構，但以歐亞大陸與北太平洋區域振幅最大（圖 5a）。該結構在 1958 年至 2002 年間呈現一次振盪，在 1960 年代晚期至 1980 年代中期為負相位，此一期間之前與之後則呈現正相位。再進一步利用最新的 20 世紀重分析資料分析之後，發現此一振盪可以往前延續至 20 世紀

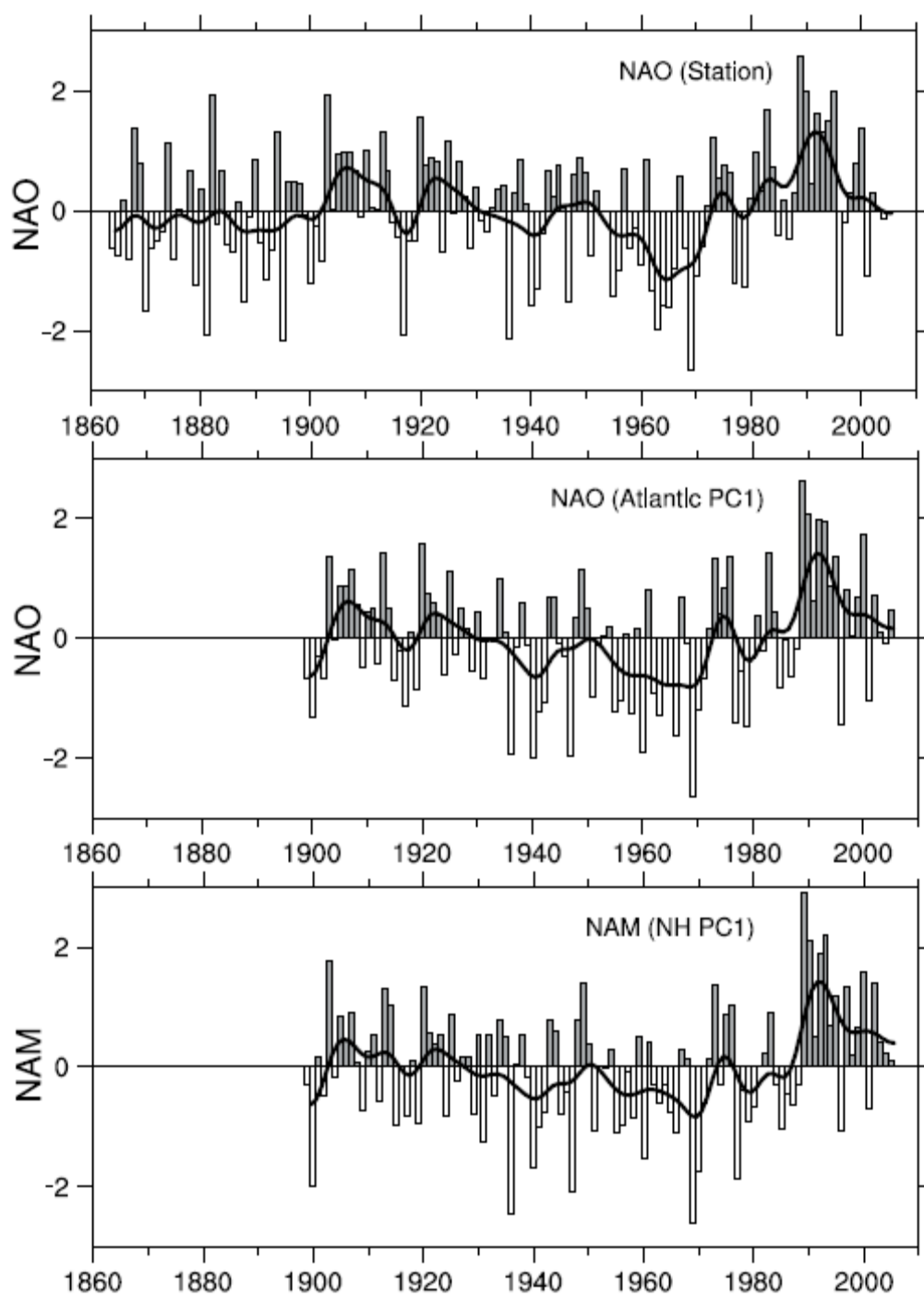


圖4 (a)由測站氣壓定義之 NAO 指數，(b)由主分量分析定義之 NAO 指數，(c)北極振盪指數。(摘自 Trenberth et al. 2007)

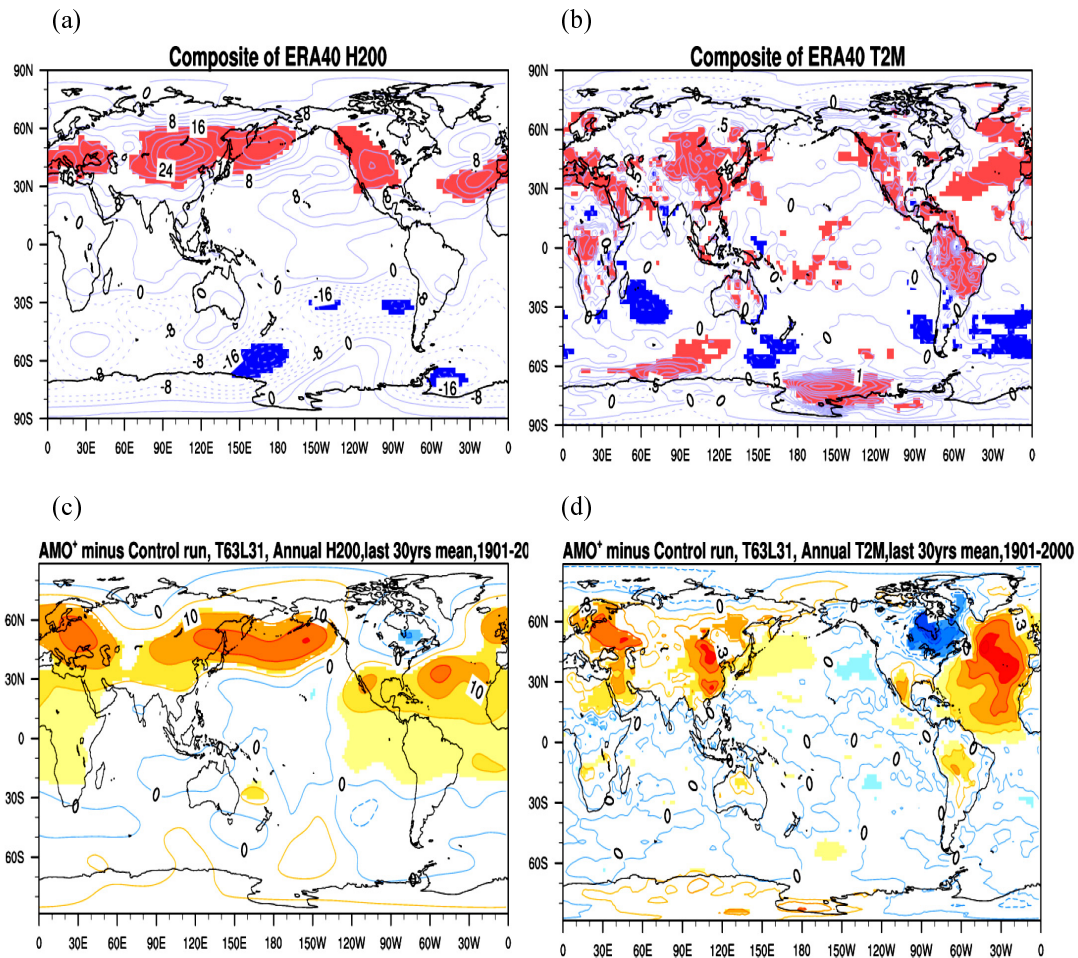


圖5 EAPMO 正相位時的(a) 200hPa 高度與(b) 2m 溫度距平。北大西洋為正海溫距平時，模式模擬的(c) 200hPa 高度與(d) 2m 溫度距平。(摘自 Hsu and Lee 2011)

初，且時間演變與 AMO 相當一致。此一結構不僅存在於上對流層，而且具有相當正壓結構，在低對流層與的地面附近都有影響。當 EAPMO 為正相位時，北半球噴流與風暴路徑北移，北大西洋、歐洲、東北亞氣溫偏高（圖 5b）。負相位時，則相反。

由於此一結構與北大西洋海溫的高相關性，且演變趨勢與 AMO 十分類似，因此可能是由 AMO 所引發。為證實此一推論，Hsu and Lee (2011)利用大氣環流模式，在北大西洋置入正海

溫距平，模擬 AMO 正相位時的情況。模擬結果顯示大氣對北大西洋海溫的反應與 EAPMO 十分相似（圖 5c 與圖 5d）：高海溫時，歐亞大陸與北大西洋上空，出現高度距平，歐洲與東北亞溫度偏高。此一模擬結果證實類似 AMO 的海溫變化不僅影響到大西洋兩岸，也透過大氣擾動的傳導，影響東亞與北太平洋，甚至整個北半球氣候。

三、氣候遷移

氣候遷移(climate regime shift)，是指一個氣候穩定狀態在相對短暫時間跳躍至另一個穩定狀態的現象，此前後的穩定氣候場需維持 5 年以上，且其跳躍過程的時間遠短於穩定狀態維持的時間(Yasunaka and Hanawa 2002)。過去許多學者已經開始著手研究氣候遷移現象，如撒哈拉沙漠於 1960 年代過後的降雨量突然減少(Nicholson et al. 1998, Baines and Folland 2007)，北大西洋的海溫於 1920 年代突然增加(Drinkwater 2006)等。Minobe (1997)將北美樹木的年輪作經驗正交函數分析 EOF 找到了 1920 年代及 1940 年代發生的遷移，且發現了大氣存在 50~70 年的振盪。Yasunaka and Hanawa (2002)則利用冬季海溫做簡單的 EOF 分析及 t 檢定，尋找符合兩條件的年份，共發現了 6 個年代的遷移，分別為 1925/1926、1945/1946、1957/1958、1970/1971、1976/1977 及 1988/1989。

(一) 1976/1977 事件

在所有遷移事件中，以 1970 年代中期(1976/1977)的遷移最為人熟知，此事件發生後，太平洋海溫及環太平洋陸地上溫度、降雨的環流均有明顯變化，與太平洋年代際振盪的相位轉變一致(e.g. Nitta and Yamada 1989, Trenberth 1990, Tanimoto et al. 1993, Miller et al. 1994, Trenberth and Hurrell 1994, Mantua et al. 1997, An and Wang 2000, Chang et al. 2000b, Seager et al. 2001, Wu and Wang 2002, Gong and Ho 2002, Hung et al. 2004, Ju et al. 2005)。在 1970 年代遷移過後，PDO 由負相位轉為正相位，太平洋的海溫在遷移發生過後有明顯的改變，包括了赤道太平洋東岸以及北美洲西岸的海溫升高，北太平洋阿留申低壓附

近的海溫降低，此一環流維持了超過 10 年的時間。如前所述，聖嬰現象的特徵在 1976/1977 事件後有了很大的變化：1976/1977 之前，東太平洋海面溫度較低，反聖嬰的發生較為頻繁；1976/1977 之後，東太平洋海面溫度較高，則變成聖嬰的發生較為頻繁(圖 6)。雖然，1976/1977 遷移事件與 PDO 轉相位同時發生，但它似乎是一個全球性的現象，因為類似的遷移事件也發生於其他地區。如 1976/1977 之後，不僅阿留申低壓明顯轉強(此與 PDO 轉相位為一致的現象)，赤道印度洋海溫也明顯上升，且持續至今(圖 7)。全球季風系統產生的年降雨差距在北半球也於 1976/1977 之後，明顯減少(圖 8)，而東亞夏季季風也呈現減弱趨勢(圖 9)。

(二) 1980 年代晚期事件

1980 年代晚期的突變，亦為一次較為人熟悉的突變，發生時間點較近且發生區域廣。Walsh et al. (1996)使用極區浮標的資料，提出北半球極區的海平面氣壓在 1987 年後突然下降，而中緯度地區海平面氣壓反之上升。Comiso (2003)針對北極極區的氣溫研究，發現在 1987 年過後，整個極區的氣溫相對於 1987 年之前要溫暖，且一直維持到 2001 年。另外，Hare and Mantua (2000)使用東北太平洋 69 個生物時間序列(例如：魚類的捕獲量)以及 31 個物理的時間序列(如 PDO)做經驗正交函數分析，得到 1977 年與 1989 年兩個突變的年份，代表著東北太平洋在 1970 年代中期與 1980 年代晚期的氣候遷移，不僅存在於氣候變化中，更影響到生態與環境。另外在全球的其他地區亦在 1980 年代晚期有類似的遷移現象，包括俄國氣溫的突然升高(Shmakina and Popova 2006)，歐洲北海區域的浮游植物與動物改變原本棲息的習性，造成海洋生態的改變(Edwards et al. 2002)。這些

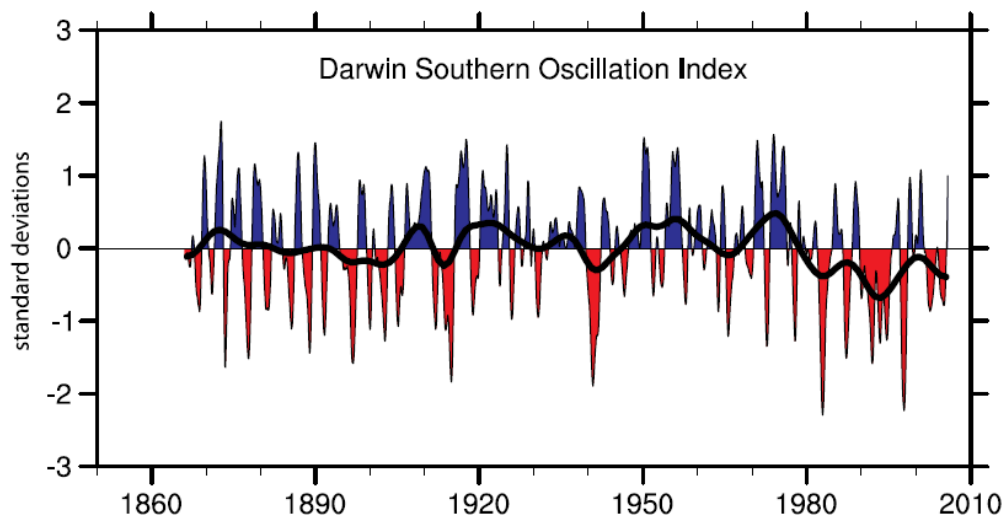


圖 6 南方振盪指標（正負值分別代表反聖嬰與聖嬰）的逐年變化。（摘自 Trenberth et al. 2007）

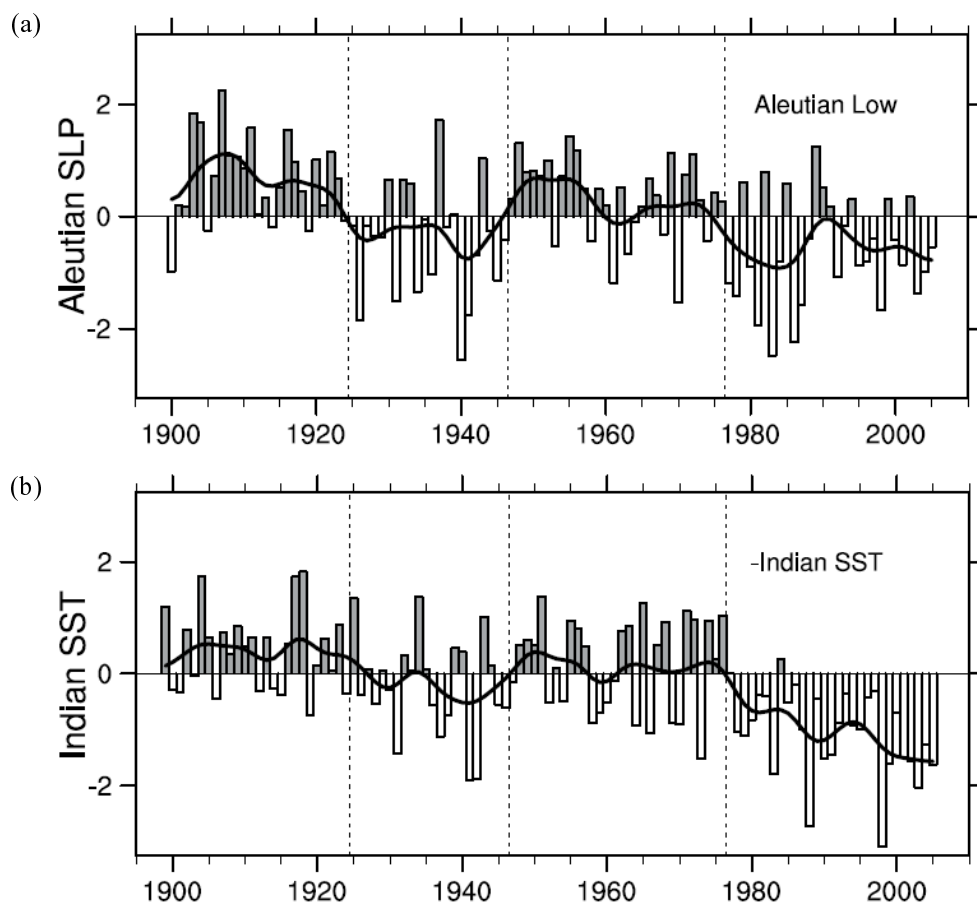


圖 7 (a)阿留申低壓指標與(b)赤道印度洋海溫（已經乘上負號）的逐年變化。（摘自 Trenberth et al. 2007）

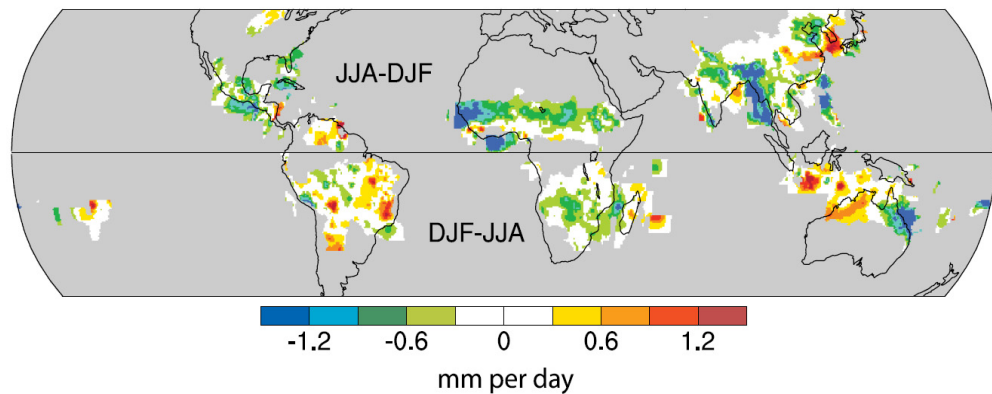


圖 8 夏季與冬季雨量差：北半球為 6~8 月減 12~2 月，南半球為 12~2 月減 6~8 月。(摘自 Trenberth et al. 2007)

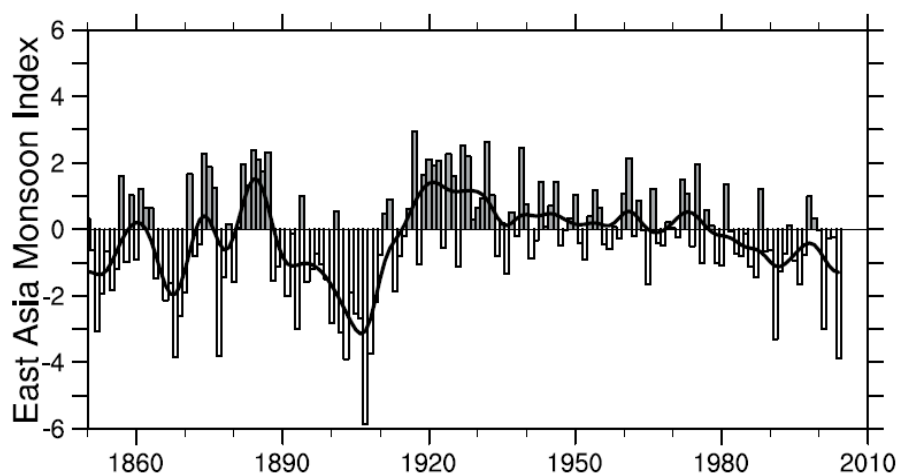


圖 9 東亞夏季季風指標。(摘自 Trenberth et al. 2007)

區域的突變更代表著 1980 年代晚期的遷移，是一個大範圍的突變。

1980 年代的遷移現象，亦存在於東亞地區。Watanabe and Nitta (1999)提出東亞地區的溫度在 1980 年代晚期之後上升，伴隨著冰雪在遷移之後減少。Jhun and Lee (2004)定義出亞洲冬季季風指標，並發現冬季季風強度在 1980 年代晚期突然減弱。在 1987 年後，鄂霍次克海的海冰也減少，此說明了 1980 年代晚期的遷移不是只存在於陸地上，也可在海上觀測到(Tachibana et al. 1996)。另

外也有許多學者發現此遷移亦存在於生態系統中，Tian et al. (2004)提出西北太平洋黑潮的溫度在 1980 年代突然增加，且黑潮的流速也增強，此結果影響到日本海域附近的針魚(Saury)，使其數量突然增加，可見黑潮的變化對於生態系統有一定程度的影響。Zhang et al. (2000)則提出韓國海域附近的浮游植物在 1980 年代晚期後突然增加，此變化與海洋結構的變化有關。

此一氣候遷移事件也發生於其他區域。如，歐洲夏季氣溫在 1980 年代後明顯上升，甚至於近

年來熱浪頻仍。北半球中緯度的風暴路徑北移且發生頻率增強。為了瞭解此一事件的影響範圍，Lo and Hsu (2010)利用變遷點偵測法(change point detection)分析北半球冬季氣溫，客觀地偵測1980年代末期發生氣候轉移的區域，發現下列幾個區域有明顯的遷移現象(圖10)。氣溫上升的區域為歐洲、東北亞、黑潮延伸地帶、美國東南部、灣流地區，氣溫下降區域為加拿大東部。

此一氣候遷移事件影響範圍相當大，甚至反

映在全球平均溫度上。如圖1所示，全球平均溫度在1980年代後呈現更大的上升幅度。依據IPCC第四次評估報告，全球平均而言，暖夜(日)發生的頻率越來越高，冷夜(日)的頻率則明顯下降。強降雨對總雨量的貢獻顯著增加，乾旱發生頻率也有同樣增加的趨勢。Lo and Hsu (2010)發現此一暖化現象不只發生於近地表，同時也發生於整個北半球對流層的氣溫與環流，以及與海面下深達數百公尺的溫度(圖11)。

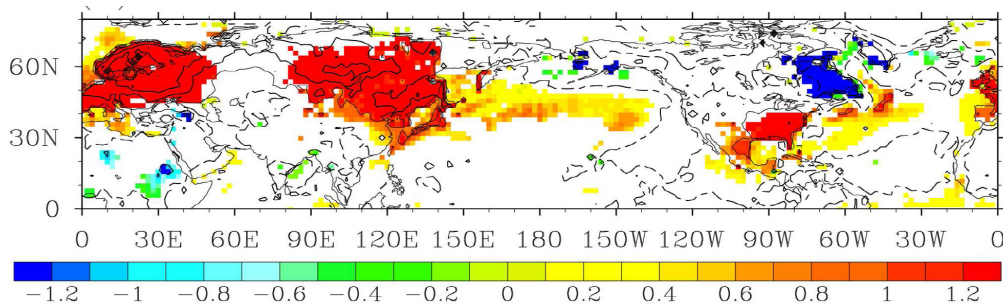


圖10 1988~1997年減去1978~1987年的溫度差異，彩色陰影區為1987年前後冬季溫度有明顯遷移現象的地區。(摘自Lo and Hsu 2010)

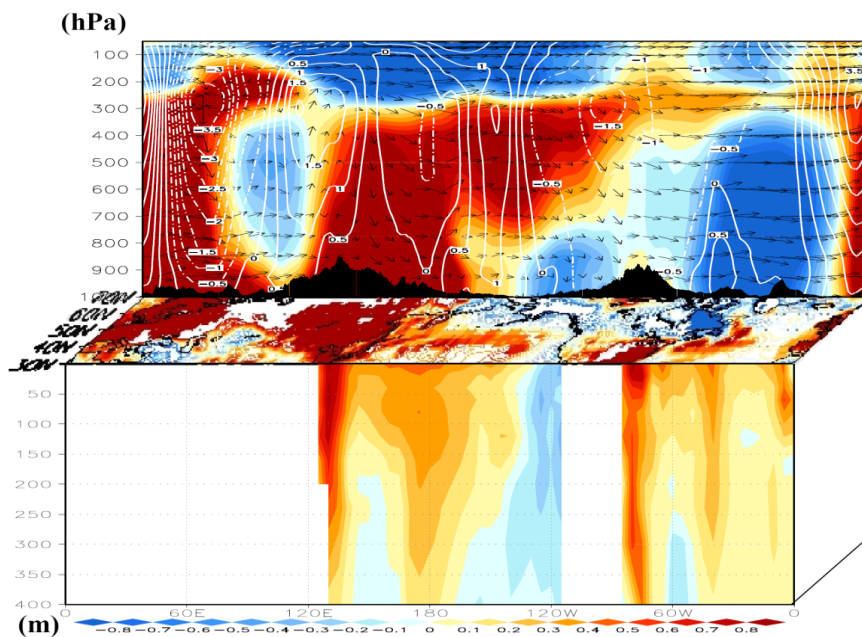


圖11 1988~1997年減去1978~1987年的大氣、海面與海下溫度差異(彩色陰影)，以及北半球中緯度緯向風與經向風差異。(摘自羅2009)

有些學者認為，1980 年代晚期的遷移導因於北極振盪(e.g. Thompson and Wallace 1998, Overland et al. 2002, Rodionov et al. 2005)。在 1980 年代晚期，AO 指數由負相位轉正相位且維持了超過十年的時間（圖 4），配合著海平面氣壓在極區下降與在中緯度上升，西風增強(Walsh et al. 1996)，這種極渦增強的現象，使得北方的冷空氣不容易往南潰流，造成中緯度的增暖(Thompson and Wallace 2000a, 2000b)。此外，西風增強帶來海上的暖平流，也使得歐亞大陸的溫度增暖。過去的研究中發現，當 AO 指數為正時，亞洲冬季季風的強度往往表現較弱(Gong et al. 2001, Jeong and Ho 2005)，地表溫度較高，且整個亞洲冬季季風系統的變化，包括西伯利亞高壓、阿留申低壓、500hPa 季風槽等也都有減弱的相對應情況(Jhun and Lee 2004)。此說明了 AO 與冬季季風系統以及東亞地區溫度的變化，有很密切的關係。但是，這項看法無法解釋為何 AO 振幅在 1980 年代被放大，振幅增強的程度前所未見，且影響海下溫度深達數百公尺。其次，AO 在 1990 年代晚期之後逐漸減弱，但是全球平均溫度仍然繼續上升。

究竟是甚麼因素導致這一影響甚鉅的氣候遷移事件？目前仍舊沒有令人滿意的答案。它可能是自然變異的一部分，但是 AO 顯然不是唯一的因素，或許 AO 也僅是此一超大型事件的一小部分，它僅是呈現了部分的現象，並非是原因。如果該事件是純粹的自然變異，吾人顯然對此一自然變異所知有限。另一個原因則是人為溫室效應的影響。或者，自然變異在暖化趨勢下的放大作用？Lo and Hsu (2010)利用經驗正交分析，發現 PDO 與 AO 是影響過去近百年北半球冬季的地面溫度的主要結構（圖 12），兩者合計解釋了約 80%

的變異量。在 1980 年代以前，PDO 是主要影響因素，但在 1980 年代後，為 AO 取代。但是，若要解釋 1980 年代之後的暖化趨勢，則必須同時考慮 PDO 與 AO。PDO 與 AO 是存在於地球氣候系統的自然變異結構，在 1980 年代後，因為某個因素，兩者的結合形成了北半球冬季的暖化趨勢。AO 對北半球陸地氣溫影響較大，PDO 的主要影響則為北太平洋溫度。當 AO 於 1980 年代轉為正相位且被放大，加上 PDO 於 1970 年代中期轉為負相位，使得北太平洋海溫升高。此一 AO 正相位與 PDO 負相位的結合，形成暖化的北半球冬季。

Lo and Hsu (2010)進一步分析 21 個氣候模式的長期模擬結果，發現 PDO 與 AO 在許多模式中也是主要的自然變異結構，無論有無人為溫室效應，該二結構都存在，在過去的 20 世紀如此，未來的 21 世紀也是。但是，模式的主要問題是無法模擬出 PDO/AO 合併效應與 1980 年代暖化現象的關係。因此，模式模擬的近數十年的暖化應該是因為加入人為溫室效應所產生，與實際觀測到的明顯的自然變異結構的變遷不一致。但是，模式模擬顯示的人為溫室效應的貢獻也不能忽視。很顯然，吾人必須同時考慮自然變異與人為溫室效應才能充分了解 1980 年代晚期遷移事件與近 30 年的明顯暖化的肇因。

(三) 1960 年代事件

撒赫勒(Sahel)位於撒哈拉沙漠南側，是一個半乾旱地帶，在 1970 年代至 1990 年代間遭逢長達三十年的乾旱。如圖 13 所示，位於西非 10°N ~ 20°N 間的撒赫勒在 1960 年代中期之前，雨量大於長期平均值，卻在 1950 年代逐漸減少，在 1960 年代降至低於平均值，直到 1980 年代中期

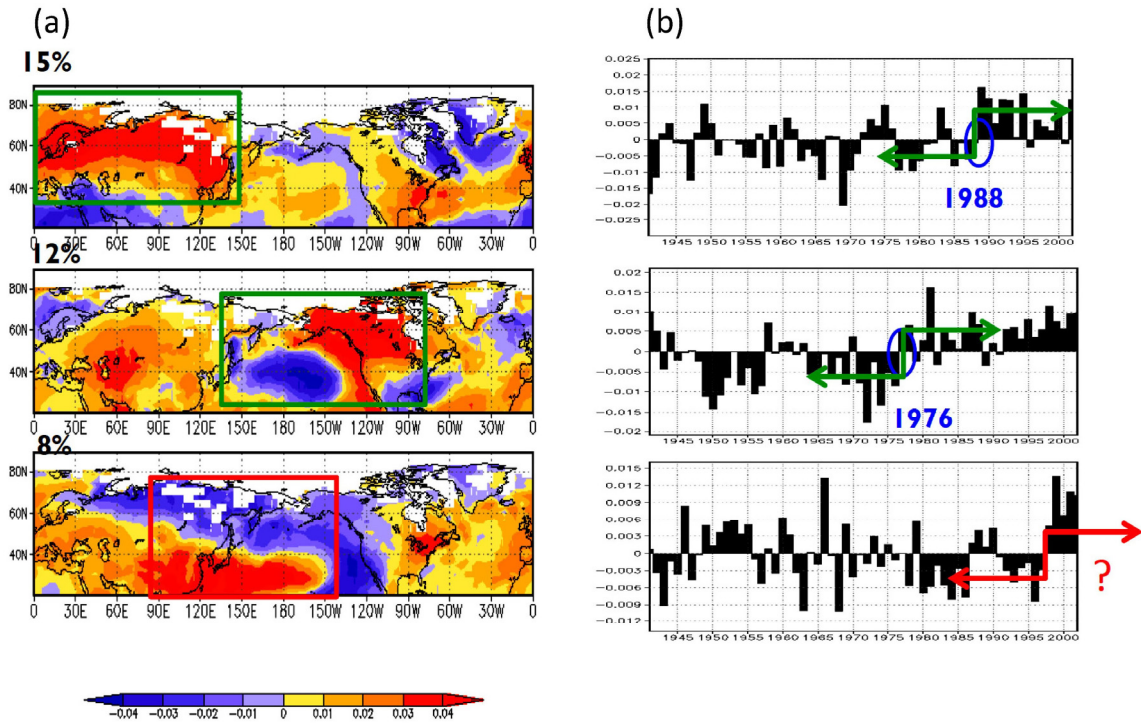


圖 12 (a)北半球(20°N~70°N) 地面氣溫的前 3 個 EOF 與(b)時間序列 (主分量)。(摘自 Lo and Hsu 2010)

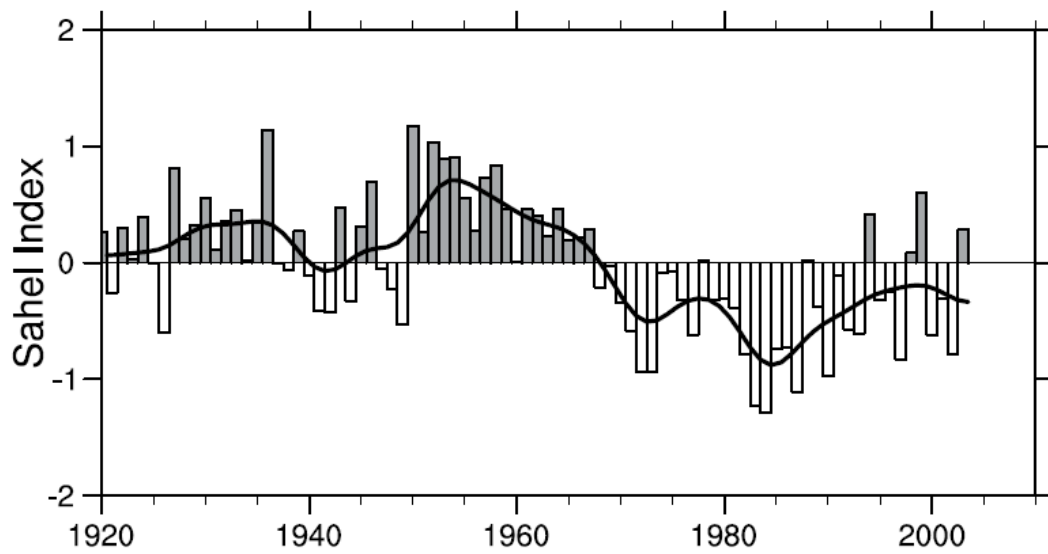


圖 13 Sahel (10°N~20°N、18°W~20°E)雨量 (4 月至 10 月) 的長期變化。(摘自 Trenberth et al. 2007)

達到最低值，之後雨量有緩慢上升的跡象。兩項機制被提出解釋造成長期乾旱的原因(Nicholson 2001, Zeng 2003)。其一是，過度放牧與土地利用（林地轉換成農地），地表反照率因此增加，蒸發與水氣量提供變少，形成正回饋迴圈，導致長期乾旱。另一個機制則是全球海溫年代變化趨勢影響大尺度環流，形成不利於撒赫勒產生降雨的環流型態。模式模擬顯示，地表變遷對乾旱的形成貢獻有限(Taylor et al. 2002)。許多研究將觀測到的海溫年代／年代際變化置入模式中，成功模擬出撒赫勒乾旱，因此認定海溫變化的影響是造成撒赫勒乾旱的主要因素。問題是哪一區域的海溫異常是主因？有研究認為印度洋海溫異常是主因(Giannini et al. 2003, Bader and Latif 2003)，有些認為南大西洋海溫相對於北大西洋海溫較快的增暖趨勢是主因(Hoerling et al. 2006)，更有些研究發現地中海海溫變化也有貢獻(Rowell 2003)。這些研究呈現的差異性，顯示影響撒赫勒乾旱機制的複雜性，以至於無法以單一機制來解釋。值得注意的是，雖然給定海溫異常可以模擬出乾旱，但是若讓海氣耦合模式去預測海溫，並無法模擬出觀測到的乾旱；此一結果可能導因於非線性的氣候系統中的氣候轉移可能是隨機的，因此模式無法模擬出正確的發生時間。但是若給定觀測到的海溫卻又可以模擬出撒赫勒乾旱。因此，重點在於主宰海溫變化的主因。那麼，海溫的變化是自然變異還是人為因素造成的？有些研究認為人造懸浮微粒的冷卻作用是主因(Rotstayn and Lohmann 2002)，有些則認為兩者都重要(Held et al. 2005)。

四、東亞／臺灣氣候的年代(際)變化

(一) 夏季與颱風季

1. 1950 年代初期

Yamamoto et al. (1986)由日本的表面氣溫、海平面氣壓、降水、日照時數、降雪最大深度等空間平均資料觀察到夏季的海平面氣壓下降，降水增加，日照時數增加，顯示在 1950 年左右大氣環流突然變化並反應在各觀測數值上。Lo and Hsu (2008)發現臺灣夏季氣溫在 1950 年代初期也有突然升高的現象，進一步分析發現，在此時期之後，東亞陸地溫度下降，西北太平洋溫度上升，使得東西陸海熱力差異減少。西北太平洋海表溫的南北向偶極距平相位反轉，由北冷南暖轉為北暖南冷，亦表示此區的南北溫度梯度減弱。以海平面氣壓而言，東亞大陸與菲律賓海為上升，副熱帶西北太平洋至日本東側則為下降，與 Yamamoto et al. (1986)分析日本觀測之海平面氣壓相符。整體而言，大陸低壓變弱，熱帶西北太平洋季風槽變弱，副高脊增強並向西南延伸，中緯度槽加深。海表溫距平相位翻轉的現象與 PDO 於 1940 年代中期轉向的特性一致，但是大氣反應的時間落後其數年，這可能與 PDO 在中太平洋轉向之後，海溫距平需要數年時間才能傳至西太平洋的特性有關。

在雨量方面，於圖 14 也可看到，在 1948 年、1949 年之後，中國東部 30°N 以北的區域，夏季雨量由 1940 年代的負距平轉為 1950 年代的正距平，整體雨量增加了 10%以上，相似於日本雨量的增加情形。

2. 1970 年代後期

許多研究(如 Chang et al. 2000a, 2000b, Gong and Ho 2002, Guo et al. 2003, Weng et al. 2004a,

2004b, Inoue and Matsumoto 2007, Sui et al. 2007, Qian and Qin 2008, Zhou et al. 2009 等) 1970 年代後期，東亞地區夏季雨量有明顯的遷移現象。圖 15 以 1977/1978 為分界，呈現此分界前後各 15 年之降水量差異。由圖中呈現，長江流域降水量於 1970 年代後期以後增加，尤其中游一帶增加逾 30%。反之，華北與華南兩區域的降水量減少，

於近海岸的區域減少的比例較大。

同樣在圖 14 可見，以 1977/1978 年為界，在此前後的雨量發生正負距平反相。華南與華北由之前十餘年的正距平進入之後的負距平，長江流域則由負距平轉為正距平，於此看出由「正-負-正」變為「負-正-負」的降水結構，此結構即為

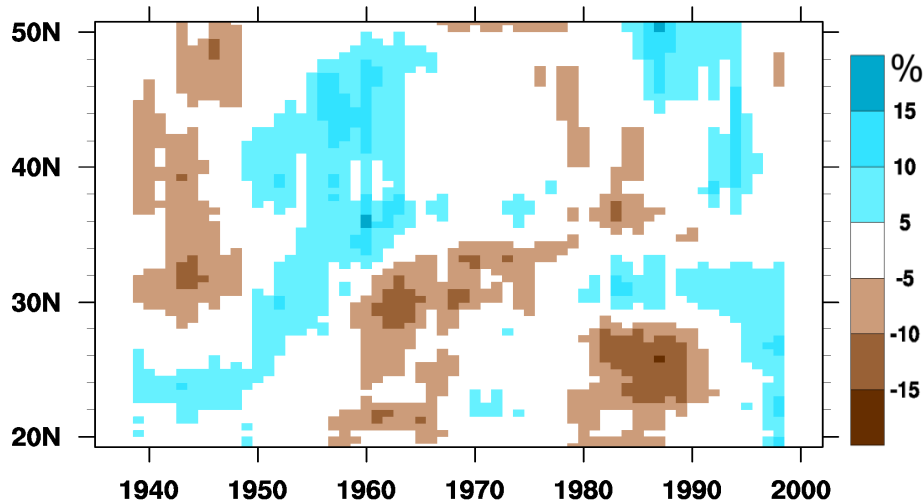


圖 14 105°E~125°E 緯向平均夏季雨量距平百分比，資料為 9 年移動平均。(資料為 CRU 雨量，TCCIP 計畫提供)

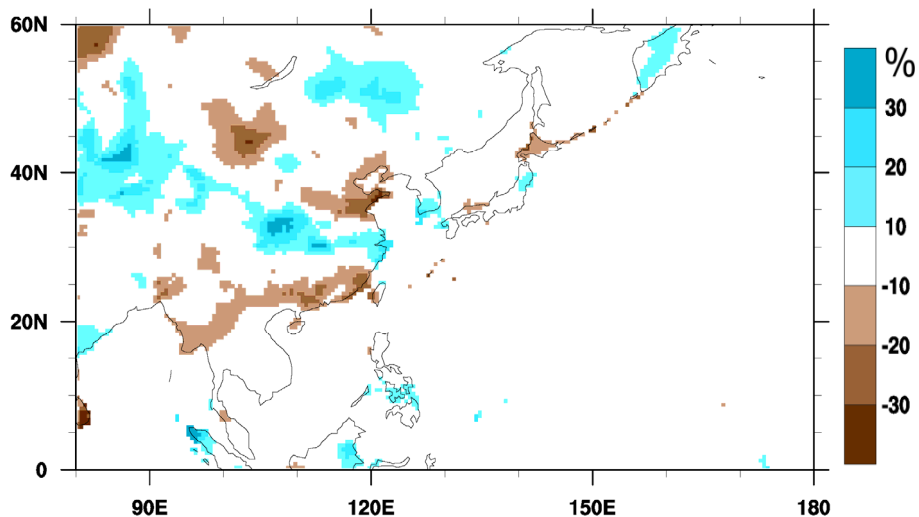


圖 15 1978~1992 年與 1963~1977 年夏季(JJA)降水量之差異，相對於 1963~1992 年之整體平均換算為百分比。(TCCIP 計畫提供)

東亞的「三極結構(tripole pattern)」(Lau, 1992, Tian and Yasunari 1992, Nitta and Hu 1996, Weng et al. 1999, Hsu and Liu 2003, Hsu and Lin 2007)。

研究認為，此年代際的改變應與西北太平洋副熱帶高壓脊(副高脊)於 1970 年代後期增強並向西南延伸有關。Chang et al. (2000)分析，副高脊向西延伸，使中國東南岸低層有一反氣旋距平，此阻擋梅雨鋒向南移動，停留於長江較久因而導致該區有較多降水。其次，該反氣旋距平西北側的氣壓梯度增加，加強鋒面。而下沉流(downwelling)亦增加使南中國海北部的海溫增暖，提供降雨區更多水氣。更進一步，增加的季風降雨產生正回饋，使季風區的反氣旋距平維持強度。

將 1960 年代至 1990 年代的高度場 5880m 等值線以 10 年為一組呈現於圖 16，其可代表副熱帶高壓向西延伸的位置。可見在 1960 年代及 1970 年代，副高的西側大多在 130°E 以東，而在 1980 年代之後，則有不少年份超過了 130°E，甚至移至 120°E 以西。Sui et al. (2007)討論了導致此一現

象的可能機制。

Zhao et al. (2010)認為，東亞降水的變異與全球表面溫度由 1960 年代至 1970 年代較冷時期轉到 1980 年代至 1990 年代較暖時期有關。於較暖時期，華南雨季提早開始延後結束，整個雨季延長了 23 天；華北則延後開始提早結束，雨季縮短了 14 天。他們認為華南雨季的提早，與西北太平洋副高西伸及青藏高原東部春季較強的低層低壓有關。華南雨季延後結束與華北雨季縮短，則與西北太平洋副高西伸及接近青藏高原東部夏季較弱的槽有關。

青藏高原冬春季積雪量在最近數十年呈現正趨勢，導致此區土壤濕度增加與空氣溫度降低。加上熱帶印度洋與西北太平洋增溫，東亞地區的海陸熱力差異變小。另外，夏季東亞低層低壓系統減弱。在這些條件下，東亞夏季季風環流減弱，因此於東亞呈現北風距平。梅雨鋒面在長江流域停滯，使長江流域雨量增加，華北雨量減少。Zhou et al. (2009)以模式模擬說明此現象為大氣對印度洋—西太平洋增暖的反應。

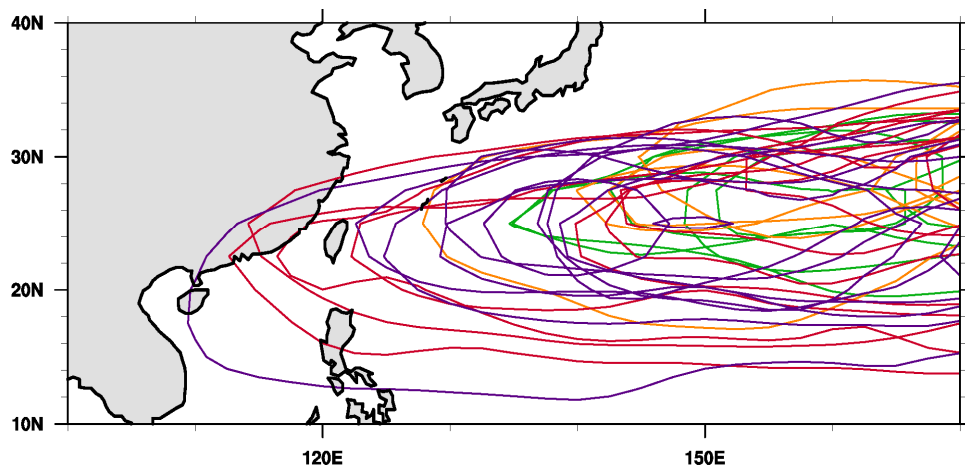


圖 16 1960 年至 1999 年各年夏季平均的 500hPa 高度場 5880m 等值線，綠、橘、紅、紫色分別為 1960 年代、1970 年代、1980 年代、1990 年代。(TCCIP 計畫提供)

3. 1990 年代中期

1990 年代發生的年代際轉變，研究大多將其發生時間定於 1993/1994 年前後。其在降水量的反應，主要為中國華南一帶的夏季降水量增加。

由圖 14 可見，原本在 1970 年代後期轉為較乾的 30°N 以南的區域，在 1990 年代又轉為偏濕。但此轉變不如 1970 年代後期的年代際轉變劇烈，例如長江流域並未變成相反的距平，亦即此變化僅反應在南方。此現象在 Kwon et al. (2005, 2007)、Yim et al. (2008)、Wu et al. (2010) 等研究亦有探討。

Kwon et al. (2005, 2007) 的分析指出東亞及西北太平洋夏季降水的兩個主要結構分別為與 ENSO 發展及西北太平洋夏季季風(WNPSM)的變動有關。且夏季中國北部 200hPa 緯向風(中緯度噴流所在位置)在 1970 年代中期增強，1990 年代中期減弱。1990 年代中期之後的降水增加僅見於夏季。西太平洋海表溫於近幾十年來上升，此時期的颱風活躍，颱風通過華南的數量增加，可為降水增加之因素。中國華南的降水增加連帶提供高層輻散距平，緯向風的減弱可解釋為因降水而增加的加熱，提供穩定作用之正壓反應。以正壓模式模擬可得類似結果，即高層穩定的輻散可與中緯度環流平衡。此連結了中緯度噴流的減弱與中國東南降水的增加關係。

Yim et al. (2008) 發現東亞夏季降水與熱帶太平洋海溫的關係在 1993/1994 前後發生改變，從與 Niño 3 相關較強轉為與 Niño 4 相關較大，究其原因可能是因為近十餘年的熱帶太平洋的溫度正距平區多發生於中太平洋，而不是發生於傳統的東太平洋。此一西移的暖海溫現象被稱為 El Niño Modoki (Ashok et al. 2007, Weng et al. 2007, 2009,

Yeh et al. 2009)。

Wu et al. (2010) 分析中國華南的夏季降水分析，發現雨量增加的同時，華南區域的低層輻合、中層上升、高層輻散皆增強，低層風場呈現兩個反氣旋距平，分別位於南中國海—副熱帶西北太平洋與華北—蒙古。此二反氣旋環流外流至華南輻合，加強水氣輻合、增強上升運動，雨量因此增加。他們認為北方的高壓距平與青藏高原冬春的積雪量增加有關。南方的高壓距平則為熱帶印度洋增溫，加強低層輻合，高層輻散，在南中國海—西北太平洋產生下沉所致。

4. 10~20 年準週期年代際變化

臺灣主要雨季(7 月至 10 月)的雨量在 20 世紀後半存在明顯的 10~20 年準週期性變化(圖 17a; 陳 1997, 陳、汪 2000)。Hsu and Chen (2011) 發現這並不只是局地的特殊現象，因為相同的變動也出現在從韓國到澳洲東部的西太平洋沿岸區(圖 17b)。同時這個大範圍的雨量變異型態與南太平洋及海洋大陸附近 10~20 年的海溫距平變化型態有很高的相關(圖 17c)。Hsu and Chen (2011) 認為可能是南太平洋海溫最主要變異模態 (SPDO) 對大尺度大氣環流的影響，間接導致西太平洋雨量的變化。

該研究進一步分析與 SPDO 相關聯的輻散氣流特徵，發現在東部及西南太平洋存在一個緯向輻散環流變異，以及在西南太平洋及菲律賓海附近有類似哈德里環流的變異型態。由於輻散氣流與海溫變異在時空方面存在緊密關連，他們認為這些輻散氣流的變化可能是受到海溫的影響，並進而導致在海洋大陸及澳洲東部地區的降水變化。至於南太平洋的海溫如何影響西北太平洋的降水，則是一個比較複雜的問題。初步的推測懷

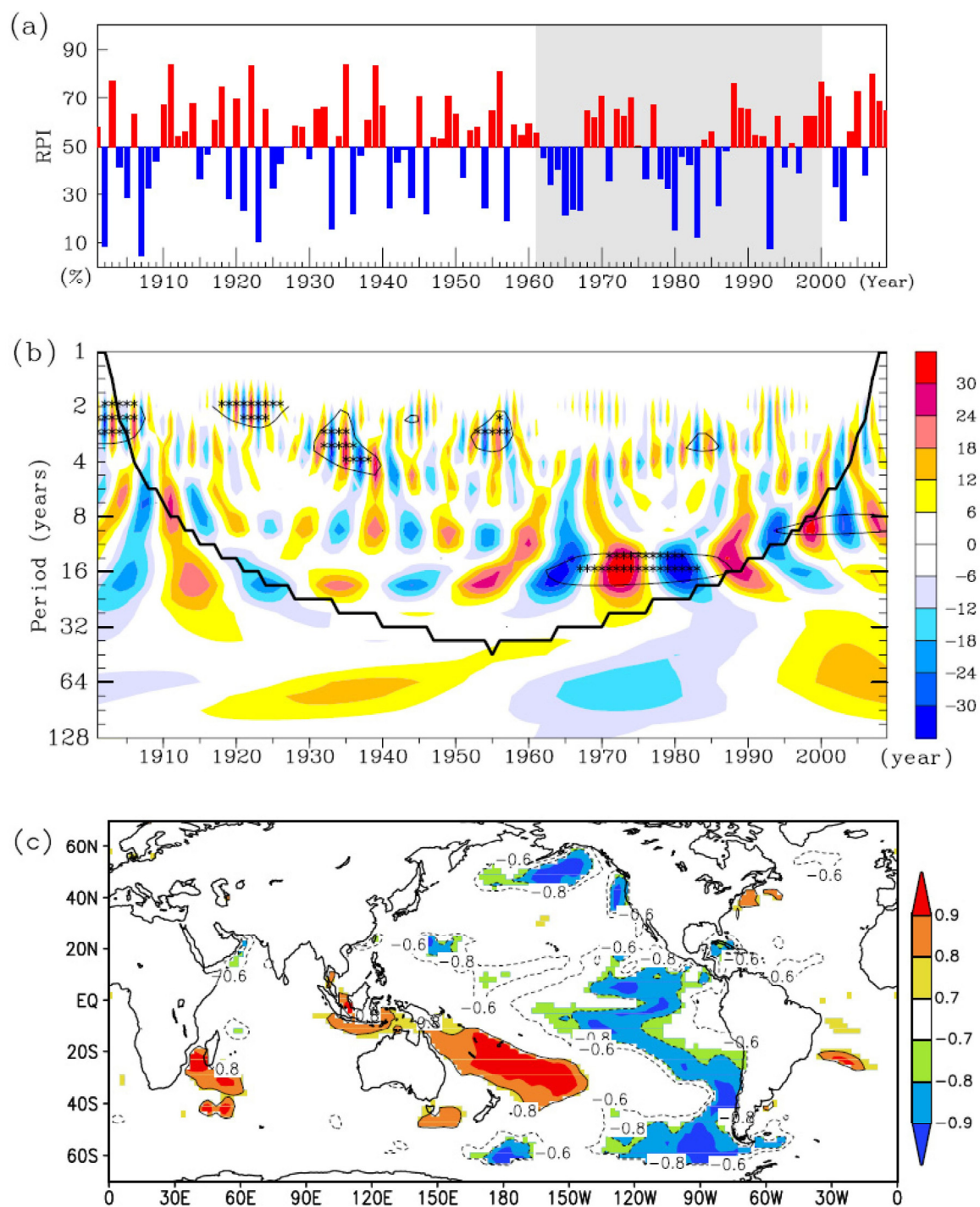


圖 17 臺灣 7 月至 10 月雨量的(a)逐年變化，(b)小波分析波譜，(c)經過 10~20 年濾波的雨量與全球海溫的相關係數圖。(摘自 Hsu and Chen 2011)

疑是在西南太平洋的海溫變異誘發了西太平洋哈德里環流的改變，再間接影響了菲律賓海附近的對流及季風槽的活動，並進一步透過在西北太平洋沿岸與菲律賓海附近的垂直反轉環流結構，而對韓國、臺灣、菲律賓的降水產生衝擊。

5. 更長期的年代際變化

由於過去缺少儀器觀測，要了解 19 世紀以前的氣候狀態並不容易，目前有方法以自然沉積物、植物或冰層等物分析過往的氣候，亦有以歷史文獻中的事件記錄來了解。如 Shen et al. (2008) 推得過去五世紀以來的乾濕指數 (dryness/wetness index, DWI) 來分析中國華北與長江流域 16 世紀至 20 世紀的降水距平特性。發生旱澇事件 (anomalous precipitation events) 的主要兩個空間結構為：(1) 單一的南北同時為乾或濕的變化，(2) 南旱北澇或北旱南澇的偶極結構。當旱澇事件頻率增加時，也同時有較強的太陽輻射、火山噴發或人為影響 (20 世紀)，其中在 20 世紀發生南旱北澇或北旱南澇的現象為過去五世紀來最頻繁。而南北兩區域在 18 世紀的暖期有極少的乾旱事件與較多的水患，20 世紀的暖期有較多的乾旱發生。華北在冷期比暖期更常有水患。

(二) 冬季

1. 1980 年代的東亞氣候遷移與暖化

在 1980 年代後期，整個東亞地區，包括鄰近海洋，溫度則一致性的偏高。前人研究也發現東亞氣候在 1980 年代發現明顯的遷移現象。羅 (2009) 發現 1980 年代後期的氣候遷移現象，普遍發生於北半球，同時期發生於東亞的氣候遷移是其中的一部分。該研究將 1987 年訂為遷移現象發生年份，比較 1987 年前後各十年的東亞冬季環流與氣候特徵的差異。圖 18 為地面氣溫、海表面氣

壓、500hPa 高度、雨量及 200hPa 水平風場 1988~1997 年的平均場減去 1978~1987 年的平均場。1980 年代晚期遷移過後，除了歐洲及美國東南部地區的溫度有明顯的上升，東亞地區的溫度也有顯著的升高 (圖 18a)，且範圍不只是在東亞，從臺灣往北延伸到日本、韓國附近沿海，包括黑潮延伸地帶，均有溫度上升的現象。以海平面氣壓場來說 (圖 18b)，東亞地區的西伯利亞高壓及阿留申低壓為冬季影響東亞氣候的兩大系統。在遷移過後，西伯利亞北方一直到極區的氣壓強度減弱，阿留申低壓區的正距平代表強度減弱，此一現象反映 1980 年代末期後，明顯減弱的冬季季風，冷平流強度減弱，所以整個東亞地區甚至北太平洋西風帶溫度上升。於較低緯的華南地區，有高壓距平，亦即大陸冷高壓往南位移。以高層 500hPa 高度場來看 (圖 18c)，冬季東亞主槽盤據在日本上空，於遷移過後，東亞主槽變淺，從日本一直延伸到臺灣地帶，均有槽減弱的情形，也象徵高層系統減弱。200hPa 水平風場的變化如圖 18e，可看見東亞地區的副熱帶噴流平均位於臺灣北方上空，於遷移過後，噴流強度減弱，噴流以北的西風距平增強，亦即噴流往北移動。這些都反應較弱的東亞主槽，與暖化現象一致。降水的變化 (圖 18d)，以華南地區最為明顯，於遷移過後，有降水增多的趨勢。此區位於天氣系統變異量增加的區域，推測高壓偏南，20°N~30°N 的天氣系統變的較活躍，產生較多降水所致。另一雨量增加區為西伯利亞 (100°E~150°E、60°N~80°N)，也是天氣系統變異量增加的區域，但是此區原本雨量不多，影響程度應較低。

圖 19a 為東亞地區 90°E~140°E 的東西向與南北向風場、垂直速度場，以及溫度場長期氣候平均，呈現流場與溫度場隨緯度和高度的變化，

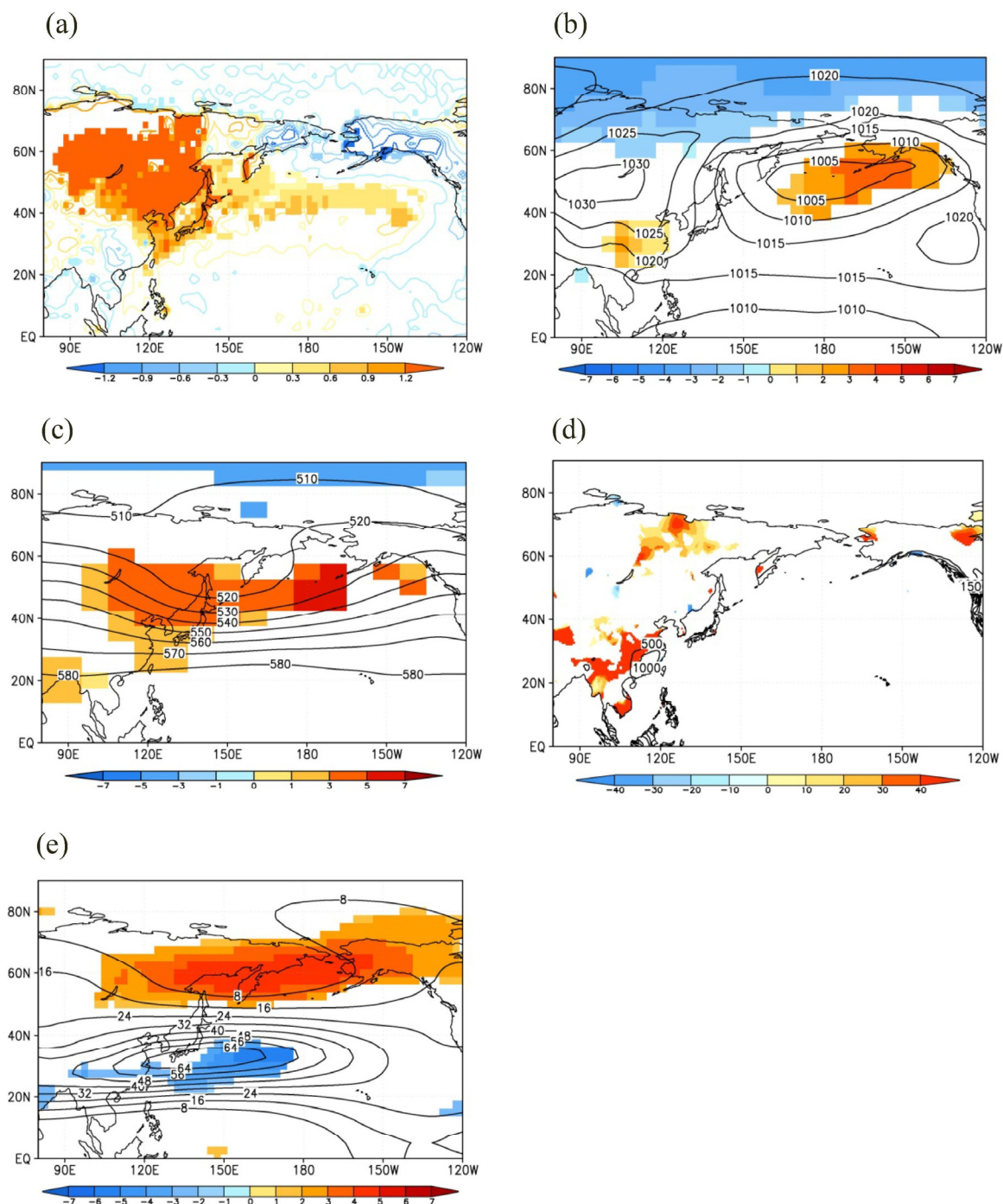


圖 18 東亞地區 1988~1997 年減去 1978~1987 年的環流變化：(a)溫度，(b)海平面氣壓，(c) 500hPa 高度場，(d)降雨，與(e) 200hPa 水平風速。(摘自羅 2009)

圖 19b 則為 1987 年後的變化 (即 1988~1997 年減去 1978~1987 年)。由氣候場, 可看到噴流的位置位於 $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 高空, 高層氣流於噴流處會合下沉。氣候遷移過後, 噴流區風速減弱, 為東風距平, 但噴流北部約 40°N 以北西風增強, 有噴流北移的現象。幾乎整個東亞地區包括 30°N 以北均在遷移後升溫, 且溫度增加以接近地表處最為明顯, 溫度上升在 $40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 間幾乎發生於整個對流層, 往北溫度上升的區域逐漸下降。另外, 針對垂直速度來看, 噴流之下的下沉氣流於遷移後減弱, 有上升運動距平, 但於溫度增暖區有下沉運動距平, 此下沉運動可能跟增溫有關。除了對流層大範圍的增溫, 也可看到平流層溫度在遷移後降溫, 此一對流層增暖-平流層冷卻的現象與全球暖化的現象一致。

2. 北大西洋振盪與臺灣寒潮發生頻率的年代際關係

東亞寒潮發生頻率呈現明顯的年代際變化(e.g. Zhang et al. 1997, Chen et al. 2004, Jeong et al.

2005), 一般認為反聖嬰發展年冬季, 位於菲律賓海的氣旋可以加強東亞冬季季風, 導致東亞寒潮頻率在反聖嬰發展年的冬季偏多, 聖嬰年反之 (Zhang et al. 1997, Wang et al. 2000)。此外, 中高緯度的北極振盪(AO)或北大西洋震盪(NAO)與西伯利亞高壓之年際變化亦顯著相關: NAO/AO 負相位時, 西伯利亞高壓偏強, 東亞地面溫度偏低 (Wu and Wang 2002, Jeong and Ho 2005, Chang et al. 2006)。

除了年際變化, NAO 有明顯的年代際訊號 (Hurrell 1995)且與東亞冬季風年代際相關 (Chang et al. 2006)。Hong et al. (2008)最近的研究發現 NAO 的年代際變化也影響臺灣寒潮頻率。圖 20 是臺灣寒潮頻率、西伯利亞高壓指標和 NAO 指標年代際 (7 年滑動平均) 的演變, 由圖得知臺灣寒潮頻率、NAO 與西伯利亞高壓皆呈現年代際變化, 其轉折時間大約落在 1976/1977, 與北半球氣候突變的時間一致。1976/1977 之前 NAO 為負相位, 西伯利亞高壓偏強, 臺灣寒潮頻率偏多 (平

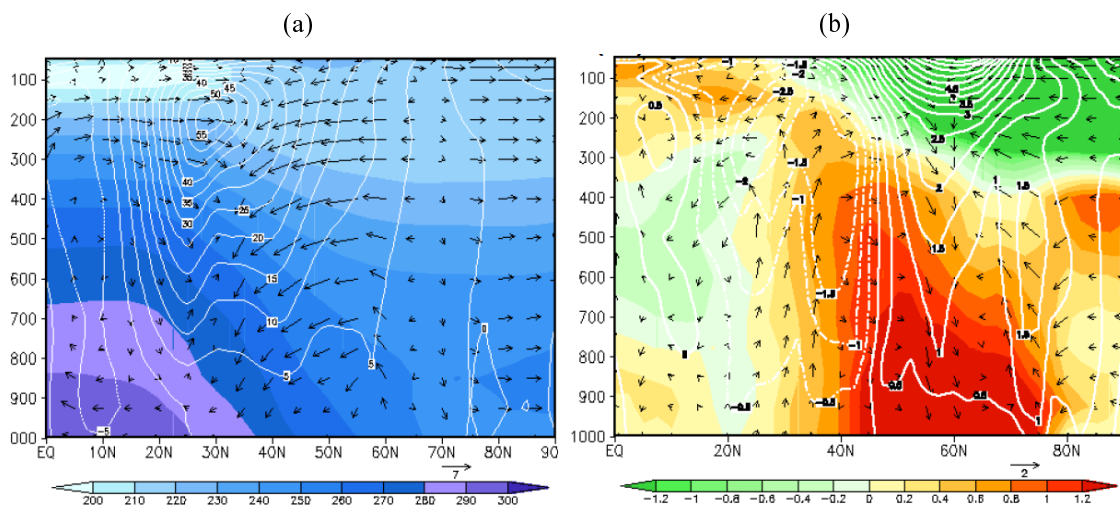


圖 19 (a) $90^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 平均 y-z 環流平均場, 彩色陰影: 溫度, 等直線: 等風速線, 箭頭: 垂直向流場; (b)同(a), 但為 1988~1997 年減去 1978~1987 年的變化。(摘自羅 2009)

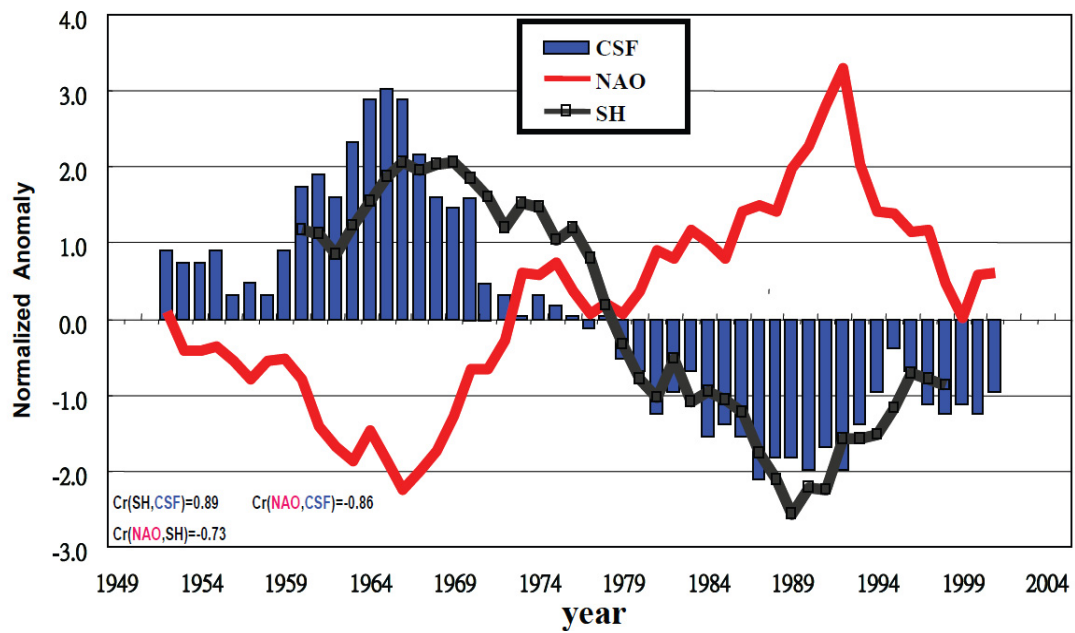


圖 20 臺北寒潮頻率(直方圖)、西伯利亞高壓指標(黑色線)和 NAO(紅色線)之年代際(七年滑動平均)演變。在此，寒潮定義根據中央氣局，每日最低溫小於 10°C 以下稱之；西伯利亞高壓指標為 $40^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ ， $80^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$ 海平面平均氣壓(Wu and Wang 2002)；NAO 為冬季(DJF)葡萄牙里斯本(Lisbon)與冰島 Stykkisholmur 二測站標準化之地面氣壓的差值。(摘自 Hong et al. 2008)

均每年 5.4 次)，之後相反（每年 2.9 次）。在年代際時間尺度，NAO、臺灣寒潮頻率與西伯利亞高壓 3 者互為顯著相關，臺灣寒潮頻率與 NAO 為負相關($r = -0.86$)，與西伯利亞高壓為正相關($r = 0.89$)，NAO 與西伯利亞高壓則為負相關($r = -0.76$)。

NAO 如何影響臺灣的寒潮頻率？Hong et al. (2008)發現，NAO 除了在大西洋地區有自相關外，其下游也出現幾個顯著遙相關區域，分別為：地中海上空(40°N 、 30°E)、貝加爾湖上游(45°N 、 60°E)與東亞主槽(40°N 、 120°E)，其空間結構類似沿大圓路徑傳播的羅士培波。NAO 負相位期間，西伯利亞高壓、東亞主槽以及貝加爾湖上游高空脊皆加強，這些條件都是有利於寒潮發生的大尺度環境。與其他振盪相比，僅有 NAO/AO 與

臺灣寒潮頻率的相關達顯著水準。推究其原因，西伯利亞高壓只是寒潮爆發的必要條件，華南地區北風分量對西伯利亞冷氣團南移有更決定性的影響(Compo et al. 1999)。Hong et al. (2009)發現 NAO/AO 與華南地區 850hPa 南北向風場的顯著相關，是決定 NAO/AO 與臺灣寒潮頻率年代際相關的關鍵。Hong et al. (2008)以數值實驗指出，NAO 在地中海-撒哈拉一帶產生的羅士培波(Rossby wave)波源，激發產生的波動沿著兩條路徑往下游傳播：其一延著大圓路徑，另一沿著副熱帶噴流，前者主要影響西伯利亞高壓的強度，後者影響華南地區的北風(圖 21)，以上數值實驗與觀測結果是一致的，NAO 透過此動力過程影響下游地區臺灣寒潮頻率年代際變化。

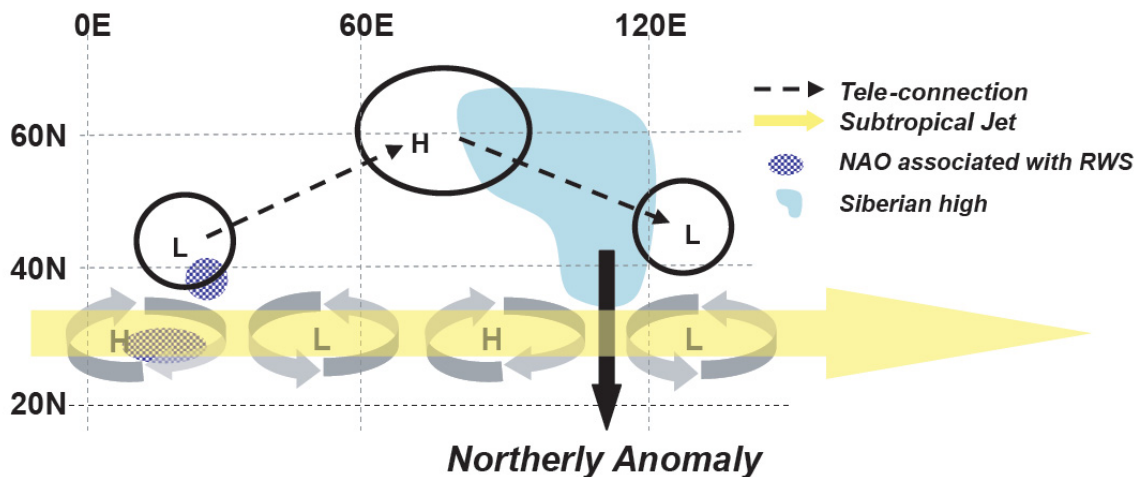


圖 21 NAO 影響臺灣寒潮發生頻率之動力過程的示意圖。圖中沿副熱帶噴流以及大圓路徑傳播的波列，乃 NAO 在大西洋地區造成之羅士培波波源（藍色斑點區）所產生之羅士培波。（摘自 Hong et al. 2008）

3. 1980 年代北臺灣平地冬季降水突增與東亞冬季季風的減弱

在過去，許多關於東亞冬季季風之研究，不外乎為討論其變異性、與不同天氣系統之關係（例如：寒潮、噴流）等等；這些研究從年際到年代際時間尺度都被廣泛地討論，但關於東亞冬季季風的降雨特徵，其相關之研究是卻是相當少的。臺灣的夏季與冬季，受到東亞季風的強烈影響，一般天氣預報之傳統觀念認為，當冬季東北風越強，將會帶給臺灣越多的降雨；反之，東北風越弱，則臺灣的降雨將越少。但依照 Hung and Kao (2010) 研究顯示，因東亞冬季季風環流在近幾十年間減弱(Hsu and Chen 2002, Jhun and Lee 2004, Lo and Hsu 2010)，導致東亞許多山地與沿海迎風面地區（如日本之日本海沿岸、呂宋島東部、中南半島東部），其冬季降雨減少，但臺灣北部平地地區與中國華南地區，其冬季雨量在 1980 年代初期後卻急劇增加。以臺北為例，冬季降雨日數快速減少，但總雨量與大雨日數卻反增。

其原因推測為，在全球暖化之影響下，南海之海表面溫度(SST)與對流層低層水氣（如絕對濕度 q ）增加，再加上華南地區南風異常增強（由於東亞冬季季風之減弱），進而提供東移鋒面更多的水氣來發展其雲雨帶，故北臺灣平地地區在 1980 年代後，其冬季雨量急劇增加。但另一方面，臺灣北部山地區域，其冬季雨量並無明顯變化。這主要是因為山地地區冬季的降水來源，除了鋒面所帶來的降水外，還有東北季風所引起之地形抬升性降水。當東亞冬季季風減弱使得東北季風帶來的降水減少，但鋒面所帶來之降水卻增加，故臺灣北部山地地區其冬季雨量較無明顯變化（圖 22）。

(三) 北臺灣春雨年代際變化與 PDO 之相關

臺灣春雨與聖嬰現象有著顯著的統計相關，如聖嬰年冬季後的春季，臺灣雨量偏多。此一明顯的年代際變化，並非一成不變。Jiang et al. (2003) 發現臺灣春雨與聖嬰現象的顯著統計關係僅存在於 1978 年之後。Hung et al. (2004) 進一步指出，

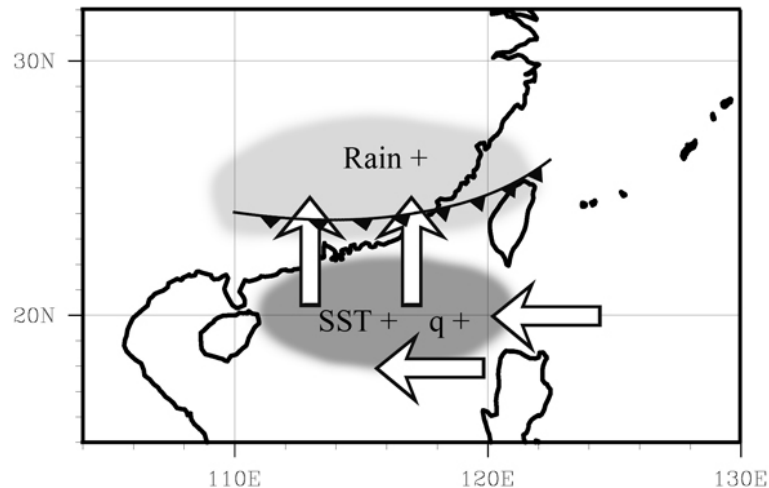


圖 22 此概念模式圖可用來解釋當南海之海溫(SST)增加，伴隨著水氣（底層絕對濕度 q ）變多，又有南來氣流之增強往北傳送，造成華南地區東移出之鋒面帶來更多之雨量，使得中國華南地區與臺灣北部平地地區冬季降雨有增加之趨勢。（摘自 Hung and Kao 2010）

在臺灣北部的春季降雨，與北太平洋年代際振盪(PDO)有著非常顯著的相關(圖 23)。PDO 在北太平洋的變化與赤道地區 ENSO 海溫變化是類似但反相，因此當 PDO 指數是正號的時候，北太平洋海溫較冷，但熱帶中到東太平洋較暖。這個較暖的海溫，會在菲律賓海造成一個海面氣壓的正距平反應。此氣壓正距平在菲律賓海地區的西部邊緣帶來西南向的距平風場，這樣的西南風分量很容易加深臺灣地區春季的槽線，因而造成臺灣的春雨較強現象(圖 24)。相反的，當 PDO 為負相位時，西北太平洋海面氣壓為負距平，臺灣附近為東北風距平，水氣傳送少，春雨因此較弱。從 PDO 的相位變化來看，PDO 似乎從 1990 年代中後期又開始變相。近幾年，臺灣地區有漸入「弱春雨」之傾向，可能與 PDO 變弱有關。

本研究分析 1950 年至今的降雨資料，發現 1990 年代晚期以後，臺灣各地春雨(2 月至 4 月)雨量與雨日相較於 1980 年代明顯變少(圖 25a)。此一現象不只發生於臺灣，華南地區的春雨不僅

變少，肇始日期也普遍延後至 3 月底(圖 25b)，相較於 1960 年代至 1970 年代晚了 1 個多月。類似現象也發生於 1960 年代至 1970 年代。進一步分析發現伴隨此一現象的海溫與大氣環流類似 PDO 的特徵。此一結果不僅再次確定 Hung et al. (2004)的發現，也驗證 PDO 對臺灣春雨的影響確實持續發生，而且已經進入負指數相位，與前段所推論之「弱春雨」一致。亦即，在 PDO 的影響下，臺灣在 1990 年代晚期已經進入「弱春雨」時期至今。如果此一 PDO 影響持續，臺灣未來可能再度進入「強春雨」時期。

五、全球氣溫變化趨勢的區域特徵與可能原因

圖 1 顯示全球平均氣溫除了長期上升趨勢，也呈現類似年代際的振盪。這樣的特徵其實是各區域氣溫變化的總和，無法呈現區域特性。如果將全球平均溫度分成南北半球中高緯與熱帶地區分別檢視，我們發現三個地區呈現不同的變化趨

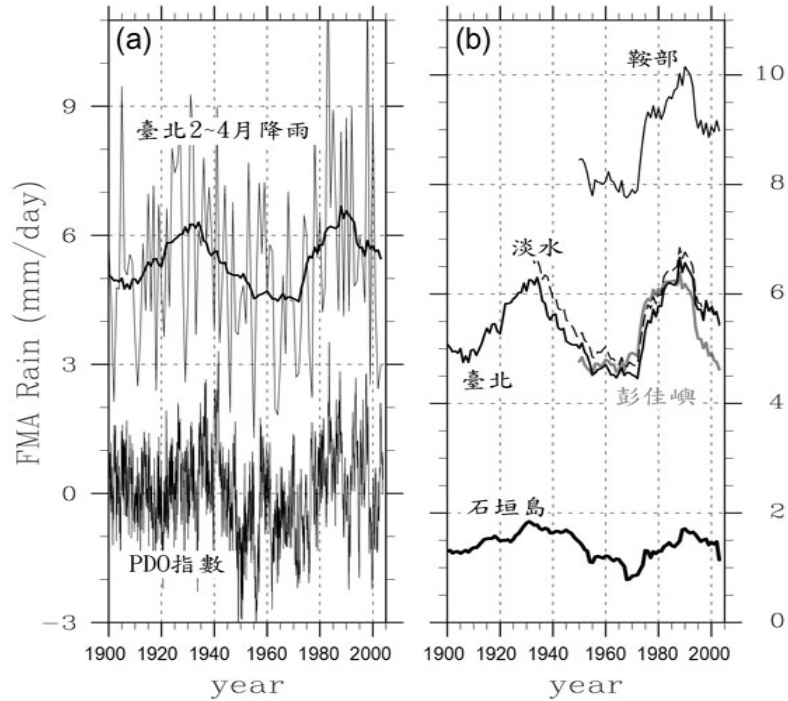


圖 23 (a) PDO 指數與臺北春雨（2 月至 4 月的降雨）的年代際變化（粗線為 21 年滑動平均）。(b) 鞍部、淡水、臺北、彭佳嶼與石垣島春季降雨之 21 年滑動平均。（摘自 Hung et al. 2004）

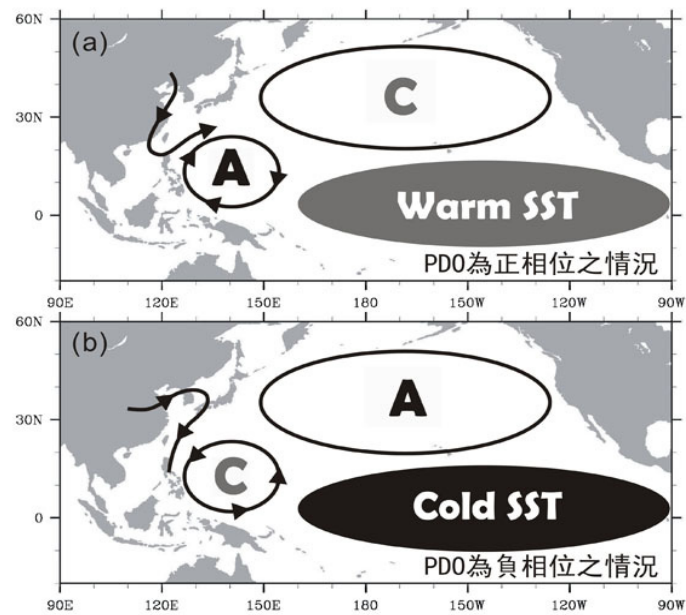
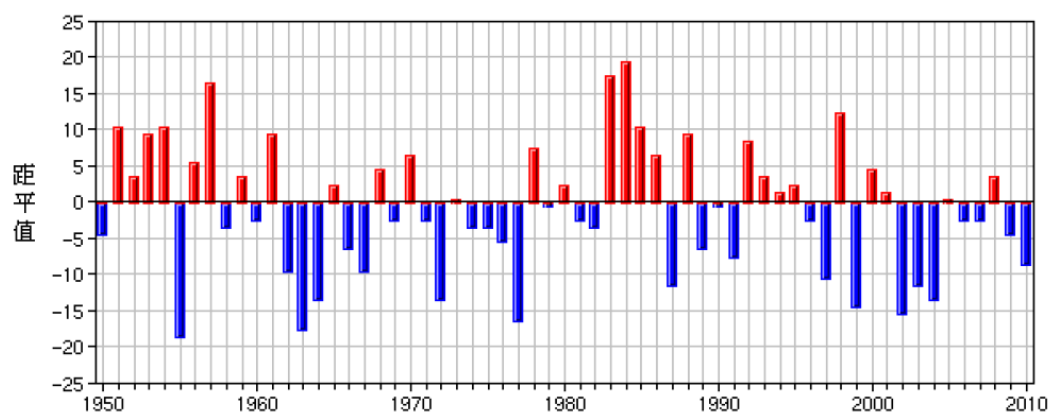


圖 24 臺灣春雨與 PDO 相位的概念示意圖。(a) 為 PDO 相位為正值，(b) 為 PDO 相位為負值時之情況。（摘自 Hung et al. 2004）

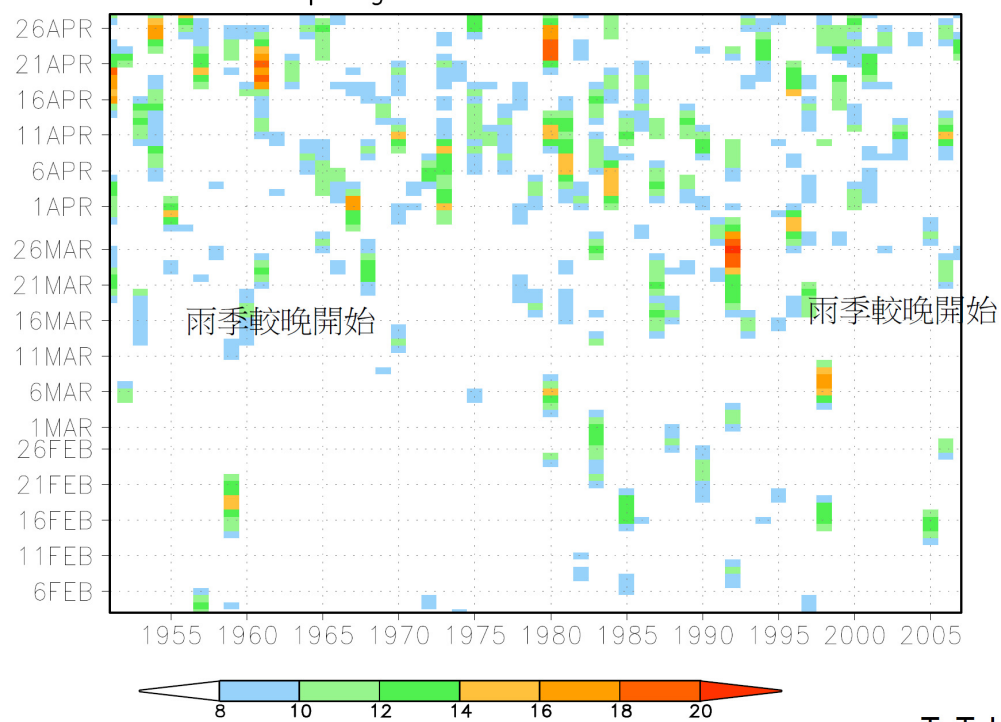
(a)

台北站 FMA季 雨日 1950年 ~ 2010年



(b)

spring-rainfall-southern china



T.-T. Lo

圖 25 (a)臺北春雨(2月至4月)雨量的逐年變化,(b)華南2月至4月候雨量(5日平均)的每年變化。(羅資婷提供)

勢。如圖 26c 所示， $20^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 呈現最明顯的年代際振盪，長期趨勢最不明顯，但是 1970 年代以後的暖化趨勢卻是三個分區中最顯著的。 $20^{\circ}\text{S}\sim 90^{\circ}\text{S}$ 的長期趨勢最顯著，但是年代際振盪最不明顯。熱帶地區也是長期趨勢比年代際振盪明顯。如果再將海陸平均溫度分開觀察，我們發現 $20^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 陸地溫度雖然呈現年代際振盪，1970 年代以後溫度上升趨勢最為明顯，30 年間上升約 0.7°C ，相當於 $0.24^{\circ}\text{C} (10\text{yrs})^{-1}$ 的暖化趨勢，比全球平均快了許多（圖 26b）。其他兩個區域變化趨勢十分類似，仍是以長期上升趨勢為主。如果僅考慮海洋（圖 26a）， $20^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 呈現更長週期的年代際振盪，其他兩區域則仍以長期上升趨勢為主。此一結果顯示，年代際振盪在北半球中高緯度最明顯，但是海洋與陸地的變化各有其特徵。

圖 27 為 AMO 與南北半球中高緯海洋溫度的長期變化，背景的直方圖則為全球平均溫度。該圖顯示北半球中高緯海溫與 AMO 變化在 1985 年之前相當一致，1985 年之後，AMO 暖化趨勢則不如北半球中高緯海溫來的快。南半球中高緯海溫則大致呈現長期上升趨勢，但亦顯現 1930~1940 年代與 1965~1975 年代有兩次的急速暖化現象。由此一分析，吾人再次確認 AMO 對北半球溫度變化趨勢的顯著影響。但是，北半球陸地溫度為何於 1970 年代後幾乎線性的快速增溫，則無法解釋，需要進一步探討。

將 $20^{\circ}\text{N}\sim 90^{\circ}\text{N}$ 分成北大西洋、北太平洋與歐亞大陸、北美洲觀察，如圖 28 所示，兩個大洋溫度變化都呈現明顯的年代際振盪，但是太平洋海溫呈現較明顯的長期上升趨勢，北大西洋則無明顯的長期上升趨勢。歐亞大陸與北美洲的年代際振盪特徵也大致相同，但在 1970 年代後呈現明顯的暖化趨勢，其中又以歐亞大陸的暖化趨勢較

大。

以上分析顯示，各大洋與陸塊的溫度變化特徵與全球平均溫度的上升趨勢不盡相同。後者其實僅是不同地區溫度長期變化特徵的算術平均。其中以南半球海洋溫度的長期暖化趨勢最為明顯，相對而言，北半球海洋溫度的長期暖化趨勢不明顯，而是以年代際振盪為主，此一現象在北大西洋尤其顯著。南半球的長期暖化趨勢與全球海面高度的上升趨勢，十分相似。依據理論，如果人為溫室效應確實影響地球氣候，工業革命以來產生的多餘能量應該多儲存於海洋中。由於海面高度的變化代表海面下熱容量的總變化，在缺乏長期觀測的實際熱容量資料的情形下，海面高度可以用來偵測熱容量是否呈現長期上升趨勢。南半球大部分為海洋，因此其平均溫度由海洋主導，其長期暖化趨勢與海面高度上升趨勢相似，顯示南半球受到人為因素的影響可能較為明顯。相對的，北大西洋海溫由於受到溫鹽環流與北大西洋多年代振盪的影響，年代際變化比南半球明顯的多。北太平洋也受 AMO 影響，因此具有年代際振盪特性，但也明顯受到長期暖化的影響，因而呈現較為明顯的長期暖化趨勢。

最近研究顯示，1980 年代以來全球快速暖化的趨勢，可能不盡然是人為溫室效應的影響，而是部分受到自然氣候變異的影響(e.g. Ting et al. 2009, Lo and Hsu 2010, Delsole et al. 2010)。Ting et al. (2009)發現大西洋快速暖化與 AMO 有密切關係，其振幅在 30 年內遠大於人為溫室效應的影響（圖 29a）。Delsole et al. (2010)進一步發現多年代內部結構(Internal Multidecadal Pattern)(圖 29b)對過去 30 年的全球溫度上升的貢獻約為 $0.08^{\circ}\text{C} (10\text{yrs})^{-1}$ ，與人為溫室效應的貢獻 $0.1^{\circ}\text{C} (10\text{yrs})^{-1}$ 相當。IPCC 第四次評估報告的暖化趨勢有加速趨

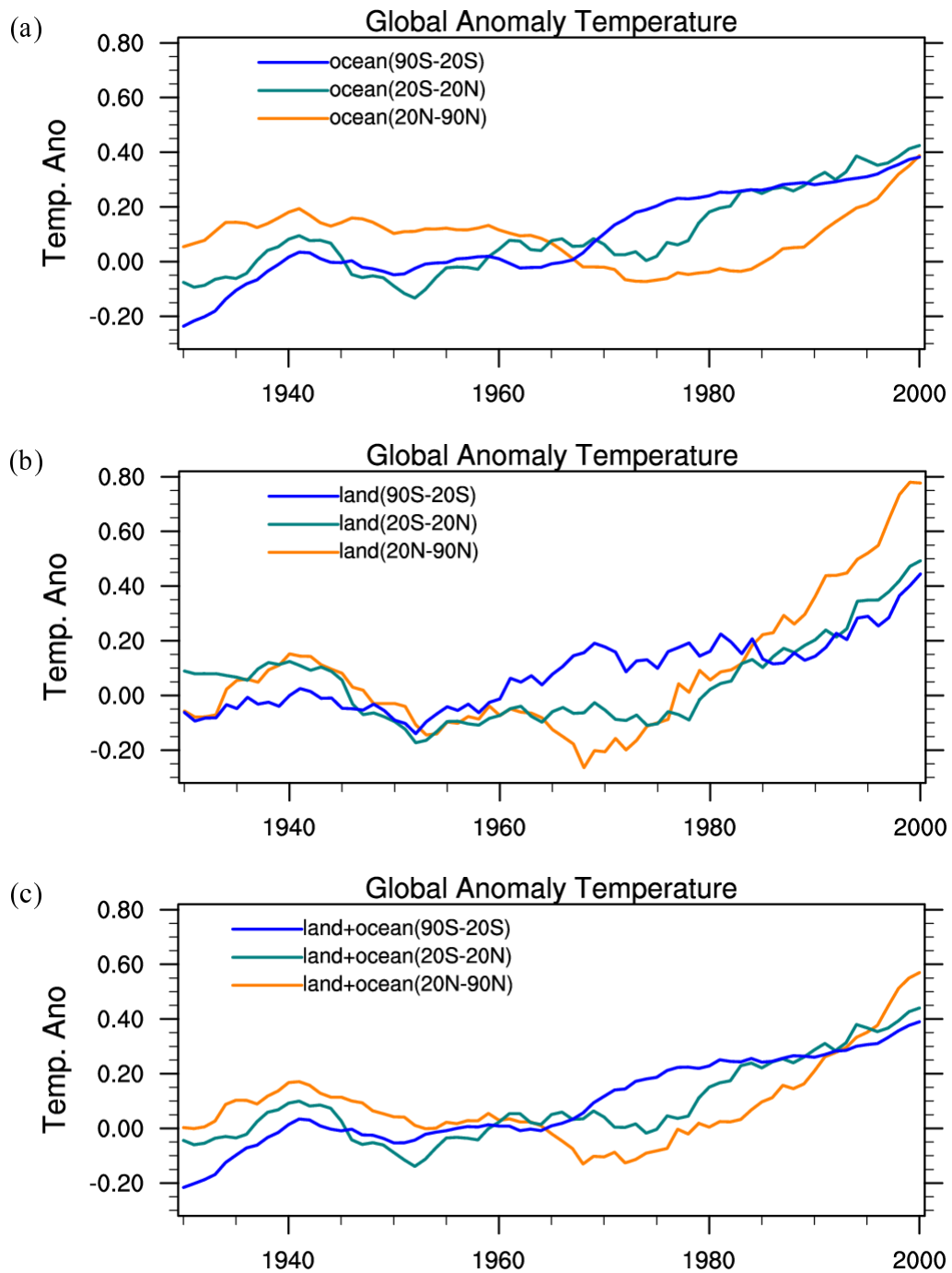


圖 26 南半球(20°S~90°S)、熱帶(20°S~20°N) 與北半球(20°N~90°N)的(a)海洋、(b)陸地與(c)海洋+陸地平均溫度的長期變化。(李明營提供)

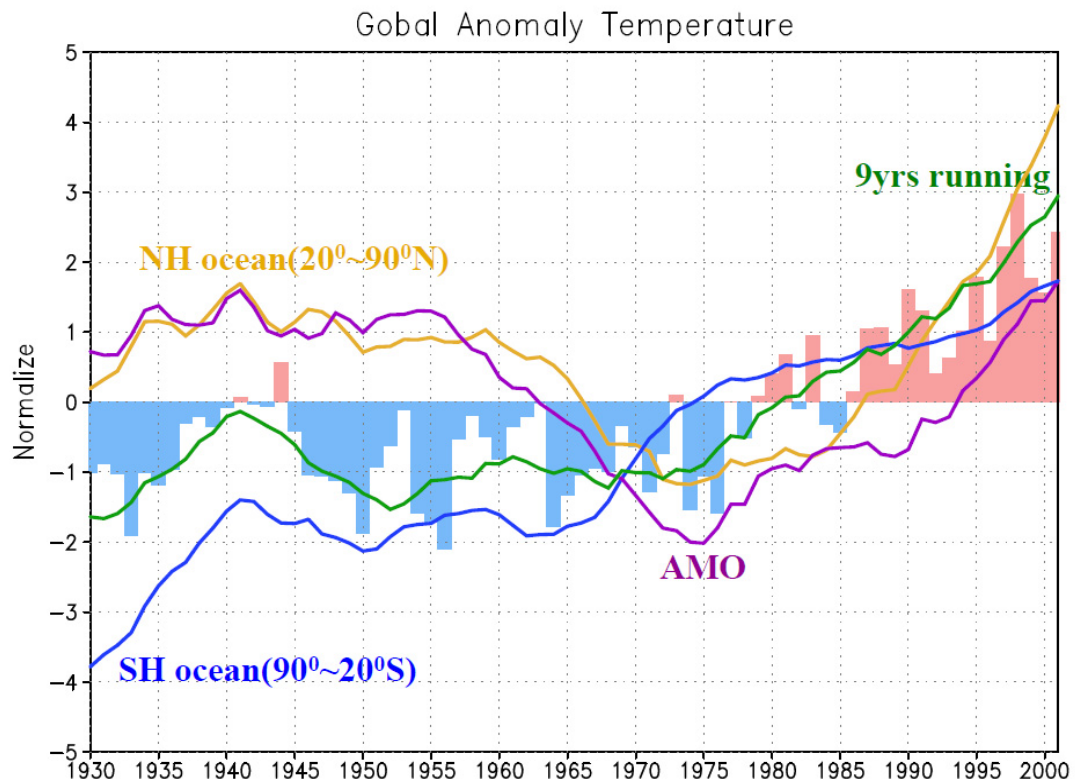


圖 27 全球平均、北半球海洋與南半球海洋平均地表與海面溫度，以及 AMO 的長期變化。(李明營提供)

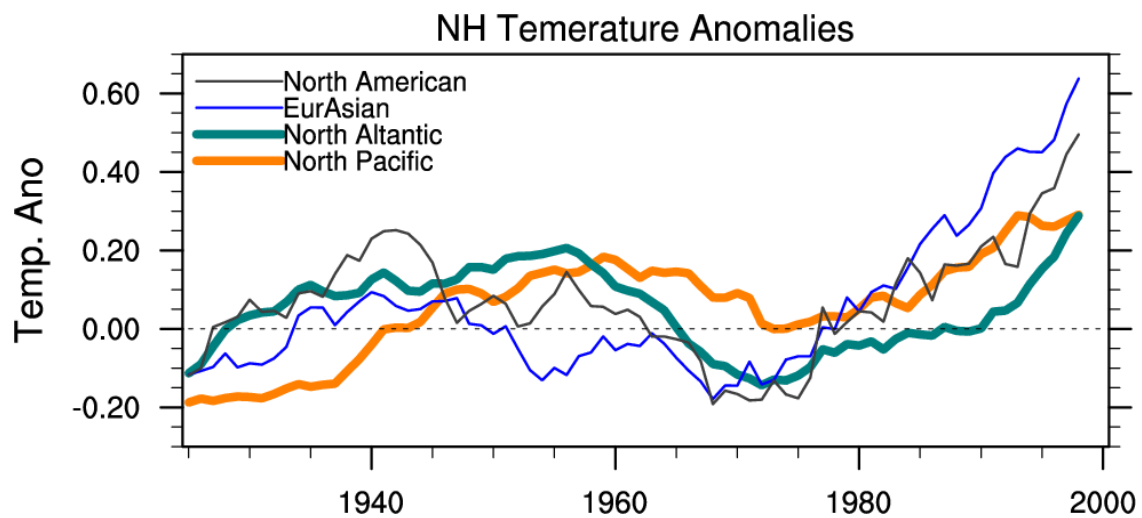


圖 28 北美洲、歐亞大陸、北大西洋與北太平洋地表與海面溫度的長期變化。(李明營提供)

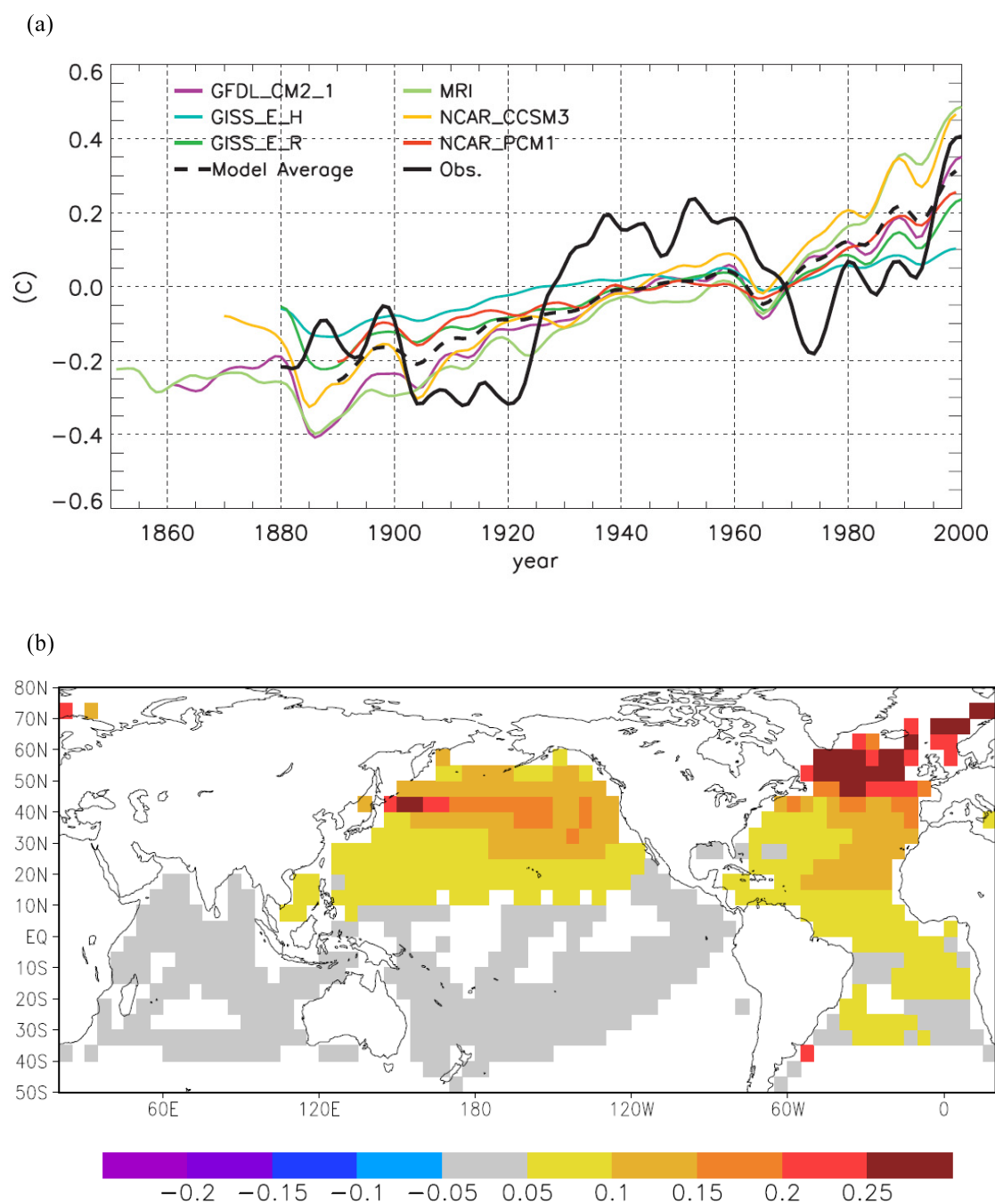


圖 29 (a)觀測（黑粗線）與模式模擬（彩色細線）的全球氣溫長期變化（摘自 Ting et al. 2009），
(b) Internal Multidecadal Pattern。（摘自 Delsole et al. 2010）

勢的說法雖然正確，但是可能是人為溫室效應加上自然氣候變異所造成；若以過去百年溫度上升 0.7°C 而言，則非 IMP 或 AMO 所能解釋，因此仍然極可能是以人為溫室氣體的貢獻為主。

六、年代／年代際振盪與長期趨勢

(一) 全球暖化是否加速？

如本章前言與前面幾節的討論，氣候變化具有多重時間尺度的特性。在有限時間內觀察到的趨勢，如果以較長的時間來看，可能只是一個長週期變化的上升或下降的部分。因此，觀察趨勢變化必須同時考慮不同的時間尺度。以 IPCC 與本報告所探討的現象，吾人必須至少考慮年代／年代際變化與百年變遷趨勢。由於這兩個時間尺度十分接近，若不謹慎檢視，很容易將兩者混而為一。從前面數節的討論，吾人瞭解年代際變化存在於全球尺度、海洋/陸塊尺度、東亞甚至小至臺灣。有些現象是一體的，比如它們都受同一個大尺度（甚至半球與全球）現象（如，PDO、AMO、NAO/AO 等）。依據目前的瞭解，這些年代際變化現象大多屬於自然氣候變異，有的可以從古氣候資料觀察到，有的可以在無外在強迫作用的氣候模擬呈現出來。這些年代際變化可以解釋 20 年、30 年的變化，但是無法解釋更長期的變遷趨勢。比如，AMO 或許可以解釋最近 30 年的快速增溫的現象，但無法解釋過去百年來的長期暖化趨勢。

從本章的討論以及最近的研究發現皆指出，IPCC 第四次評估報告對過去數十年全球有加速暖化的看法，忽略了年代際振盪的貢獻。過去 30 年剛好處於 AMO 朝正相位（亦即溫度上升）發展的時期，加上全球溫度上升趨勢，因此顯得暖

化速率特別快。此項觀察並不否認長期暖化趨勢的存在。如前節討論，年代際振盪以北半球最為明顯，南半球的海溫與全球海面高度皆呈現顯著的長期上升趨勢與微弱的年代際振盪。理論上，如果人為溫室效應確實影響了地球氣候，海水溫度與熱容量是最容易延續該訊息的氣候變數，這是因為海水的熱容量遠大於氣體與土壤，具有較長的「記憶」。因此，雖然南半球海溫與熱容量的長期上升趨勢有可能導因於一個更長期的跨世紀振盪（甚至與小冰期有關，唯科學界目前並不確實知道有這樣的現象），但人類排放的溫室氣體造成的溫室效應已經十分明顯，而且大多數氣候模式都顯示人為溫室效應的影響遠大於其他已知的自然因素，因此過去百多年來的溫度上升有一部分受到人為溫室效應的影響是極其可能的。

(二) 年代預報

無論檢視過去氣候變化或推估未來氣候變遷趨勢，吾人都需考慮年代際的影響，因為年代際振盪造成的是近期(near-term)影響，人為溫室效應則是遠期(long-term)影響。在考慮了年代際振盪的近期影響後，最近有些研究（如 Keenlyside et al. 2009）預測未來 10 年、20 年全球溫度上升趨勢可能減緩，因為 AMO 可能朝負相位發展，過去年代際振盪與長期趨勢疊加放大暖化趨勢的現象，可能逆轉為相互抵銷，因而呈現暖化趨勢遲緩甚至短暫冷卻的現象。年代際振盪的影響不僅不可忽視，甚至可能提供較為準確的近期氣候推估。IPCC 已經將年代預報(decadal prediction)納為重要的研究方向，並將於第五次評估報告首次提出研究成果。年代預報的出發點為年代際振盪多存在於海洋（如 PDO、AMO），相對於大氣演變相當緩慢，因此如果能準確掌握這些現象在某一時刻的狀態，有可能可以預測該振盪未來數十年

的變化趨勢，再間接推估海洋變化對大氣現象（如溫度、雨量等）的影響。經由此一過程，吾人或許可以更準確掌握近期氣候變遷趨勢，並據之擬定衝擊調適與因應策略。這項研究仍舊處於初期的發展階段，研究成果正逐漸發表中，其實際成效與可應用程度在幾年內將較為明朗。

(三) 年代／年代際振盪對長期氣候推估的影響

IPCC 動用十幾個頂尖氣候研究單位，使用 20 多個氣候模式，研判造成過去數十年來全球氣溫上升的主要原因。他們在模式中考慮了各種影響氣候的可能機制（如太陽輻射強度變化、火山爆發、懸浮微粒、臭氧、溫室氣體等），進行多項控制組與對照組氣候模擬，經過詳細比對之後，發現「過去半世紀的全球暖化極可能導因於人類排放的溫室氣體」。這是過去四次評估報告中措辭最堅定的一項陳述。

根據最近的資料顯示，大氣 CO₂ 濃度已經逼近 390ppm，相對於工業革命前的 280ppm（以及過去數十萬年的變化 260ppm~300ppm），已經增加 40%。人類排放的 CO₂，陸地與海洋分別吸收了 29%與 26%，剩下的 45%則留在大氣中(Le Quéré et al. 2009)。兩個因素造成濃度的加速累積，一是排放量增加，另一則是陸地與海洋吸收 CO₂ 的能力在過去數十年中持續變弱。其他溫室氣體（如 CH₄、N₂O 等）的排放與大氣濃度也都呈現類似的增加狀況。這些觀測顯示，自京都議定書以來，全球溫室氣體的排放不但無法抑制，反而加速成長。

人造溫室氣體是過去數十年氣溫上升的主因之一，人為溫室氣體排放若無法抑制甚至成長，人為地球暖化將有多嚴重，對未來的地球氣候與

天氣會有何影響與衝擊，都是亟待瞭解的問題。一般的天氣與氣候預報都是利用模式輸入當時大氣與海洋狀況，預報數日或幾個季節之後的情形。氣候變遷推估則與現況無關，而是估計不斷累積的溫室氣體對天氣與氣候可能造成的影響，以及對生態環境、水資源、農漁業、人類健康、社會經濟與人民福祉的衝擊。由於人類將如何排放溫室氣體牽涉層面甚廣（如人口、能源使用狀況、經濟成長等），未來的溫室氣體排放速率與累積量無法預報。IPCC 解決此一難題的方式是擬定排放情境，估算在不同情境下溫室氣體的逐年排放速率與其在大氣中的濃度，再將之置入氣候模式中，估計各種溫室氣體排放情境造成的氣候變遷。

IPCC 於 2000 年發佈排放情境特別報告，考慮社經因素可能的變化（如人口、經濟成長、能源效率與結構、土地利用與農業生產等），將情境分成四大類（報告稱之為「家族」families）：A1、A2、B1、B2。A1 情境族系再發展成為三組情境：A1FI（化石能源密集）、A1T（非化石能源）和 A1B（能源平衡）。這六種情境被廣泛用於 IPCC 的氣候變遷模擬，推估氣候變遷的可能影響範圍。

根據這些情境，IPCC 專家估計出包括各種溫室氣體在內的 12 種氣體(CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, HF₆, HCFCs, CFCs, SO₂, CO, NO_x, NMVOCs)的逐年排放量與在大氣中的累積量。A1T、A1B、B1 情境在 21 世紀初排放量仍持續上升，世紀中後逐漸下降；B2、A2、A1FI、IS92a（前一版的情境）均呈現持續增加的趨勢，其中以 A1FI 的成長速率最大。無論哪一種情境，大氣中的 CO₂ 濃度都將持續攀升，到了 2100 年增加最少的為 B1，約為工業革命前濃度(280ppm)的 2 倍，最多的為 A1FI，幾乎達 1000ppm，約工

業革命前的 3.8 倍。將這些逐年累積的溫室氣體濃度放入氣候模式中，就可以推估出逐年的氣候變化，比較未來與現在氣候狀況，推估未來可能的氣候變遷。IPCC 根據這些情境推估未來氣候，結果發現以低排放情境 B1 暖化程度最低，2100 年溫度將再增溫 1.1°C 至 2.9°C ，最佳估計值為 1.8°C ；A1FI 暖化最劇烈高達 2.4°C 至 6.4°C ，最佳估計值為 4°C 。以絕對上下限而言，在 2100 年暖化程度為 1.1°C 至 6.4°C 。IPCC 並發現近期氣候將以每 10 年 0.1°C 的速率增溫。

值得注意的是，IPCC 第四次評估報告對未來氣候的推估並未考慮年代際變化的影響，也無法考慮無法預期的火山爆發的可能影響。即使 IPCC 準確掌握了（持續強化的）人為溫室效應對未來氣溫的影響，仍然忽略了年代際變化帶來的短期的暖化與冷卻效果，以及火山爆發帶來得及短期的冷卻效應。根據過去資料顯示年代際振盪的幅度不超過 0.5°C （如圖 1），火山爆發（以 1991 年的皮那土波火山為例）造成的全球冷卻大約相當於 0.4°C ，且僅維持 2 年。這些自然變化可能影響未來 20~30 年全球氣溫的推估，因為變化幅度相當。但是，在 2040 年代以後，當人為溫室效應的影響超過 1°C ，並持續增強，年代際振盪與火山爆發的影響，將遠小於溫室效應的增溫程度，成為次要的因素。

另一個可能的自然因素是太陽黑子的影響。這個問題由於最近的一次的低太陽黑子活躍期的延長與極低的活躍程度，引發未來若發生類似小冰期期間的 Maunder Minimum 的太陽黑子極端低活躍期，小冰期可能再現的爭論。Wang et al. (2005) 估計 Maunder Minimum 至今，太陽輻射強度增加大約 1Wm^{-2} ，遠小於人為溫室效應增加的能量。Feulner and Rahmstor (2010) 的模擬研究也

顯示即使未來生發生類似 Maunder Minimum 的現象，其冷卻程度約 0.3°C ，遠小於人為溫室效應在 2100 年時 1.8°C 至 4°C 的暖化效果。以此觀之，目前已知的自然變化確實會影響未來氣候暖化的程度，但整體而言，如果溫室氣體的增加無法抑制，全球暖化程度將遠遠超過自然變化的幅度，無任何已知的自然變化可以抵銷。全球暖化必須抑制，以減緩對地球生態環境的可能衝擊。因此，如何透過節能減碳，加速抑制溫室氣體的排放速率，以便降低大氣溫室氣體濃度的增加程度，是目前人類面臨的最大的課題與挑戰。

七、結語

由於氣象觀測資料長度有限，在分析上很難判斷觀測到的趨勢是真正的長期趨勢，或者只是年代際（或多年代）變化的一部分。目前習慣運用的線性趨勢分析受到資料長度的影響，會將數十年週期變化的一部分誤認為是趨勢，因此產生暖化是否加速的爭論。從理論、模擬與觀測資料分析著手了解年代際（多年代）振盪的物理機制是釜底抽薪的方法。但是，目前的理論了解不多，氣候模式模擬年代際振盪的能力有限，資料仍舊不夠長到可以完全解析多年代振盪的許多細節，想藉由了解年代際振盪來完全釐清自然與人為氣候變異的相對貢獻，目前仍是力有未逮。雖然所知不足，吾人仍不能以此來論述人為溫室效應影響不值得世人重視。目前最尖端的科學研究結果都指出未來的溫室效應的衝擊將遠大於本章所討論的年代際變化的幅度。在此一情況下，年代際變化或許只能微調人為氣候變遷的幅度。年代際變化在未來暖化的大環境中是否會有明顯的改變，進而加強或減緩為全球暖化的衝擊，則是另一個值得吾人注意但目前了解甚少的問題。

致謝

本文是在國科會支助的台灣氣候變遷推估與資訊平台建置計畫的支助下完成。在此，感謝台灣氣候變遷科學報告工作小組、計畫辦公室、國家災害防救科技中心與楊竣凱的協助。

參考文獻

陳雲蘭，1997：臺灣地區近百年測站資料氣溫與雨量的波譜分析結果。

陳昭銘、汪鳳如，2000：臺灣地區降雨之長期變化特性—秋雨之準二十年振盪。大氣科學，28，343-361。

盧孟明、麥如俊，2003：臺灣與全球雨量長期變化研究(一) 1920~1995 變化趨勢。大氣科學，31，199-220。

羅資婷，2009：1980 年代晚期冬季氣候突變。國立臺灣大學大氣科學研究所博士論文，pp.

Alexander, M. A., 1992: Midlatitude atmosphere ocean interaction during El Nino. 1. The North Pacific Ocean. *J. Climate*, **5**, 944-958.

An, S.-I., and B. Wang, 2000: Interdecadal change of the structure of ENSO mode and its impact on the ENSO frequency. *J. Climate*, **13**, 2044-2055.

Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata, 2007: El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res.*, **112**, C11007, doi:10.1029/2006JC003798.

Bader, J., and M. Latif, 2003: The impact of decadal-scale Indian Ocean sea surface

temperature anomalies on Sahelian rainfall and the North Atlantic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **30**(22), 2169.

Baines, P. G. and C. K. Folland, 2007: Evidence for a Rapid Global Climate Shift across the Late 1960s. *Journal of Climate*, **20**, 2721-2744.

Barnston, A. G., and R. E. Livezey, 1987: Classification, seasonality and persistence of low frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Weather Rev.*, **115**, 1083-1126.

Carton, J. A., B. S. Giese, and S.A. Grodsky, 2005: Sea level rise and the warming of the oceans in the SODA ocean reanalysis, *J. Geophys. Res.*, **110**, 10.1029/2004JC002817.

Cayan, D. R., A. J. Miller, T. P. Barnett, N. E. Graham, J. N. Ritchie, and J. M. Oberhuber, 1995: *Seasonal-interannual fluctuations in surface temperature over the Pacific: effects of monthly winds and heat fluxes*. Natural Climate Variability on Decadal-to-Century Time Scales, National Academy Press, Washington, DC, 133-150.

Chang, C.-P., Y. Zhang, and T. Li, 2000a: Interannual and Interdecadal Variations of the East Asian Summer Monsoon and Tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the Subtropical Ridge. *J. Climate*, **13**, 4310-4325.

Chang, C. P., Y. Zhang, and T. Li, 2000b: Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part II: Meridional Structure of the Monsoon. *J. Climate*, **13**, 4326-4340.

- Chang, C. P., Z. Wang, and H. Hendon, 2006: *The Asian winter monsoon*. The Asian Monsoon, B. Wang, Ed. Praxis, Berlin, 89-127.
- Chen, J., A. D. Del Genio, B. E. Carlson, and M. Bolsilovich, 2008: The spatiotemporal structure of 20th century climate variations in observations and reanalyses. Part II: Pacific pan-decadal variability, *J. Climate*, **21**, 2634-2650, doi:10.1175/2007JCLI2012.1.
- Chen, T.-C., W.R. Huang, and J. H. Yoon, 2004: Interannual variation of the east Asian cold surge activity. *J. Climate*, **17**, 401-413.
- Cohen, J., and M. Barlow, 2005: The NAO, the AO, and global warming: how closely related? *J. Climate*, **18**, 4498-4513.
- Comiso, J. C., 2003: Warming trends in the Arctic from clear sky satellite observations. *J. Climate*, **16**, 3498-3510.
- Compo, G. P., G. N. Kiladis, and P. J. Webster, 1999: The horizontal and vertical structure of east Asian winter monsoon pressure surges. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **125**, 29-54.
- Delworth, T. L., and M. E. Mann, 2000: Observed and simulated multidecadal variability in the Northern Hemisphere. *Climate Dyn.*, **16**, 661-676.
- DelSole, T., M. K. Tippett, J. Shukla, 2010: A Significant Component of Unforced Multidecadal Variability in the Recent Acceleration of Global Warming. *J. Climate*, in press.
- Delworth T. L. and coauthors., 2006: GFDL's CM2 global coupled climate models – Part 1: Formulation and simulation characteristics. *J. Climate*, **19**, 643-674.
- Drinkwater, K. F., 2006: The regime shift of the 1920s and 1930s in the North Atlantic. *Progress in Oceanography*, **68**, 134-151.
- Edwards M., Beaugrand G, Reid P.C., Rowden A. A., Jones M.B., 2002: Ocean climate anomalies and the ecology of the North Sea. *Marine Ecology Progress Series*, **239**, 1-10.
- Emanuel, K., 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, **436**, 686-688.
- Feulner, G., and S. Rahmstorf, 2010: On the effect of a new grand minimum of solar activity on the future climate on Earth. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L05707, doi:10.1029/2010GL042710.
- Giannini, A., R. Saravanan, and P. Chang, 2003: Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science*, **302**, 1027-1030.
- Gray, S. T., L. J. Graumlich, J. L. Betancourt, and G. T. Pederson, 2004: A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 A.D. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L12205, doi:10.1029/2004 GL019932.
- Goldenberg, S. B., C.W. Landsea, A. M. Mestas-Núñez, and W. M. Gray, 2001: The recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications. *Science*, **293**, 474-479.

- Gong, D. Y., S. W. Wang, and J. H. Zhu, 2001: East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2073-2076.
- Gong, D., and C. Ho, 2002: Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. *Geophys. Res. Lett.*, **29**(10), 1436, doi:10.1029/2001GL014523.
- Graham, N. E., T. P. Barnett, R. Wilde, 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**, 1416-1442.
- Gullett, D. W., L. Vincent, P. J. F. Sajecki, 1990: *Testing homogeneity in temperature series at Canadian climate stations*. CCC report 90-4, Climate Research Branch, Meteorological Service of Canada, Ontario, Canada.
- Guo, Q.-Y., J.-N. Cai, X.-M. Shao, W.-Y. Sha, 2003: Interdecadal Variability of East Asian Summer Monsoon and Its Impact on the Climate of China. *Acta. Geographica Sinica*, **58**, 569-576. (in Chinese)
- Hansen, J., R. Ruedy, J. Glascoe, and M. Sato, 1999: GISS analysis of surface temperature change. *J. Geophys. Res.*, **104**, 30997-31022.
- Hare, S. R. and R. C. Francis., 1995: Climate Change and Salmon Production in the Northeast Pacific Ocean. In: R.J. Beamish [ed.] *Ocean climate and northern fish populations*. Can. spec. Pub. *Fish. Aquat. Sci.*, **121**, 357-372.
- Hare S. R., and N. J. Mantua, 2000: Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989. *Progress in Oceanography*, **47**, 103-146.
- Hegerl, G. C., F. W. Zwiers, P. Braconnot, N. P. Gillett, Y. Luo, J. A. Marengo Orsini, N. Nicholls, J. E. Penner and P. A. Stott, 2007: Understanding and Attributing Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Held, I.M., et al., 2005: Simulation of Sahel drought in the 20th and 21st centuries. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **102**(50), 17891-17896.
- Hoerling, M.P., J.W. Hurrell, J. Eischeid, and A. Phillips, 2006: Detection and attribution of twentieth-century northern and southern African rainfall change. *J. Clim.*, **19**, 3989-4008.
- Hong, C.-C., H.-H. Hsu, H.-H. Chia, and J.-I. Wu (2008): Decadal Relationship between the North Atlantic Oscillation and Cold Surges Frequency in Taiwan. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L24707, doi:10.1029/2008GL034766.
- Hong, C.-C., H.-H. Hsu, and H.-H. Chia (2009): A Study of the East Asian Cold Surges during

- 2004/05 Winter: The Impacts of East Asian Jet Stream and Subtropical Upper-level Rossby Wave Trains. *Terr. Atmos. Ocean Sci.*, **20**, 333-343.
- Hsu, H.-H. and C.-T. Chen, 2002 : Observed and projected climate change in Taiwan. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **79**, 87-104.
- Hsu, H.-H., and X. Liu, 2003: Relationship between the Tibetan Plateau heating and East Asian summer monsoon rainfall. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2066-2069.
- Hsu, H.-H., and S.-M. Lin, 2007: Asymmetry of the Tri-pole Rainfall Pattern during East Asian Summer. *J. Climate*, **17**, 4443-4458.
- Hsu, H.-H., and Y.-L. Chen, 2011: Decadal to Bi-Decadal Rainfall Variation in the Western Pacific: A Footprint of South Pacific Decadal Variability? *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L03703, doi:10.1029/2010GL046278, 2011.
- Hsu, H.-H., and M.-Y. Lee, 2011: AMO and newly-identified Eurasian-Pacific Multidecadal pattern. In preparation.
- Hung, C.-w. and P.-k. Kao, 2010: Weakening of the winter monsoon and abrupt increase of winter rainfalls over northern Taiwan and southern China in the early 1980s. *J. Climate*, **23**, 2357-2367.
- Hurrell, J. W., 1995: Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation. *Science*, **269**, 676-679.
- Hung, C.-w., H.-H. Hsu, and M.-M. Lu, 2004: Decadal oscillation of spring rain in northern Taiwan. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L22206, doi: 10.1029/2004GL021344.
- Hung, C.-w. and P.-k. Kao, 2010: Weakening of the winter monsoon and abrupt increase of winter rainfalls over northern Taiwan and southern China in the early 1980s. *J. Climate*, **23**, 2357-2367.
- Inoue, T., and J. Matsumoto, 2007: Abrupt Climate Changes Observed in Late August over Central Japan between 1983 and 1984. *J. Climate*, **20**, 4957-4967.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Jeong, J.-H., and C.-H. Ho, 2005: Changes in occurrence of cold surges over east Asia in association with Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14704, doi:10.1029/2005GL023024.
- Jhun J G, and E. J. Lee, 2004: A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon. *J. Climate*, **17**, 711-726.

- Jiang, Z., G. T.-J. Chen, and, M.-C. Wu 2003: Large-scale circulation patterns associated with heavy spring rain events over Taiwan in strong ENSO and non-ENSO years. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 1969-1782.
- Ju, J. H., J. M. Lu, J. Cao, and J. Ren, 2005: Possible Impacts of the Arctic Oscillation on the Interdecadal Variation of Summer Monsoon Rainfall in East Asia. *Adv Atmos Sci*, **22**(1), 39-48.
- Kao, H.-Y.-, and J.-Y. Yu, 2009: Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO. *J. Climate*, **22**, 615-632.
- Keenlyside, N. S.**, M. Latif, J. Jungclaus, L. Kornbluh, E. Roeckner, 2008: Advancing Decadal-Scale Climate Prediction in the North Atlantic Sector. *Nature*, **453**, 84-88.
- Kelly, P. M., P. D. Jones, C. B. Sear, B. S. G. Cherry and R. K. Tavakol, 1982: Variations in surface air temperature, Part 2. Arctic regions, 1881-1980. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 71-83.
- Kerr, R., 2000: A North Atlantic climate pacemaker for the centuries. *Science*, **288**, 1984-1985.
- Knight, J., et al., 2005: Natural variations in the thermohaline circulation and future surface temperature. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20708, doi:1029/2005GL024233.
- Knutson, T. R., and S. Manabe, 1998: Model assessment of decadal and trends in the tropical Pacific Ocean. *J. Climate*, **11**, 2273-2296.
- Kug, J.-S., Jin, F.-F. & An, S.-I., 2009: Two types of El Nino events: cold tongue El Nino and warm pool El Nino. *J. Climate*, **22**, 1499-1515 .
- Kushnir, Y., 1994: Interdecadal variations in North Atlantic sea surface temperature and associated atmospheric conditions. *J. Climate*, **7**, 141-157.
- Kwon, M., J.-G. Jhun, B. Wang, S.-I. An, and J.-S. Kug, 2005: Decadal change in relationship between east Asian and WNP summer monsoons. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L16709, doi:10.1029/2005GL023026.
- Kwon, M., J.-G. Jhun, and K.-J. Ha, 2007: Decadal change in east Asian summer monsoon circulation in the mid-1990s. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L21706, doi:10.1029/2007GL031977.
- Latif, M., 2001: Tropical Pacific/Atlantic ocean interactions at multidecadal time scales. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 539-542.
- Lau, N. C., 1997: Interactions between global SST anomalies and midlatitude atmospheric circulation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 21-33.
- Le Quéré, C., M. R. Raupach, J. G. Canadell, G. Marland, 2009: Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. *Nature Geosciences*, **2**, 831-836.
- Lo, T. T., and H. H. Hsu, 2008: The early 1950s regime shift in temperature in Taiwan and East Asia, *Climate Dynamics*, **31**, 449-461.
- Lo, T.-T., and H.-H. Hsu, 2010: Change in Dominant Decadal Modes and the Late 1980s Abrupt 1 Warming in the Extratropical

- Northern Hemisphere. *Atmos. Sci. Lett.*, DOI: 10.1002/asl.275.
- Lu, M.-M., and C.-P. Chang, 2009: Unusual Late-Season Cold Surges during the 2005 Asian Winter Monsoon: Roles of Atlantic Blocking and the Central Asian Anticyclone. *J. Climate*, **22**, 5205-5217.
- Luksch, U., and H. von Storch, 1992: Modeling the low frequency sea surface temperature variability in the North Pacific. *J. Climate*, **5**, 893-906.
- Mantua, Nathan J., Hare, Steven R., Zhang, Yuan, Wallace, John M., Francis, Robert C. 1997: A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1069-1079.
- McFarlane, G. A., and R. J. Beamish., 1992: Climatic influence linking copepod production with strong year-classes in sablefish, *Anaplopoma fimbria*. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **19**, 743-753.
- Meehl, G. A., C. Covey, T. Delworth, M. Latif, B. McAvaney, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer, and K. E. Taylor, 2007: The WCRP CMIP3 multi-model dataset: A new era in climate change research, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **88**, 1383-1394.
- Miller, A. J., D. R. Cayan, T. P. Barnett, N. E. Graham, and J. M. Oberhuber, 1994: The 1976-77 climate shift of the Pacific Ocean. *Oceanography*, **7**, 21-26.
- Minobe, S., 1997: A 50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and the North America. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 683-686.
- Nicholson, S. E., C. J. Tucker, and M. B. Ba, 1998: Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 815-829.
- Nicholson, S. E., 2001: Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. *Clim. Res.*, **17**, 123-144.
- Nitta, T., and Z.-Z. Hu, 1996: Summer climate variability in China and its association with 500 hPa height and tropical convection. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **74**, 425-445.
- Nitta, T. and S. Yamada, 1989: Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 375-383.
- Overland, J. E., M. Wang and N.A. Bond, 2002: On the Recent Temperature Changes in the Western Arctic during Spring. *J. Climate*, **15**, 1702-1716.
- Pawson, S., Labitzke, K. & Leder, S., 1998: Stepwise changes in stratospheric temperature. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2157-2160.
- Pittitt, A. N., 1979: A nonparametric approach to the change point problem. *Appl. Stat.*, **28**, 126-135.
- Power, S., C. Folland, A. Colman and V. Mehta., 1999: Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia. *Clim. Dyn.*, **15**, 319-324.

- Qian, W. H., and A. Qin, 2008: Precipitation division and climate shift in China from 1960 to 2000. *Theor. Appl. Climatol.*, **93**, 1-17.
- Rodionov, S. N., 2004: A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L09204, doi:10.1029/2004GL019448.
- Rodionov, S.N., and J. E. Overland, 2005: Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem. *ICES J. Mar. Sci.*, **62**, 328-332.
- Rodwell, M. J., D. P. Rodwell, and C. K. Folland. 1999: Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate. *Nature*, **398**, 320-323.
- Rotstayn, L.D., and U. Lohmann, 2002: Tropical rainfall trends and the indirect aerosol effect. *J. Clim.*, **15**, 2103-2116.
- Rowell, D.P., 2003: The Impact of Mediterranean SSTs on the Sahelian rainfall season. *J. Clim.*, **16**, 849-862.
- Seager, R., Y. Kushnir, N. H. Naik, M. A. Cane, and J. Miller., 2001: Wind-driven shifts in the latitude of the Kuroshio-Oyashio extension and generation of SST anomalies on decadal timescales. *J. Climate*, **82**, 4249-4265.
- Shakun, J. D., and J. Shaman, 2009: Tropical origins of North and South Pacific decadal variability. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L19711, doi:10.1029/2009GL040313.
- Shen, C., W.-C. Wang, Z.-X. Hao, and W. Gong, 2008: Characteristics of anomalous precipitation events over eastern China during the past five centuries. *Clim. Dyn.*, **31**, 463-476.
- Schlesinger, M. E., and N. Ramankutty, 1994: An oscillation in the global climate system of period 65–70 years. *Nature*, **367**, 723-726.
- Schneider, N., 2000: A decadal spiciness mode in the tropics. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 257-260.
- Shindell, D. T., R. L. Miller, G. Schmidt, and L. Pandolfo, 1999: Simulation of recent northern winter climate trends by greenhouse-gas forcing. *Nature*, **399**, 452-455.
- Shmakina, A. B., and V. V. Popova., 2006: Dynamics of climate extremes in northern Eurasia in the late 20th century. *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*, **42**, 157-166.
- Smith, T. M., T. C. Peterson, J. H. Lawrimore, and R. W. Reynolds, 2005: New surface temperature analyses for climate monitoring. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14712, doi:10.1029/2005GL023402.
- Sui, C.-H., P.-H. Chung, and T. Li (2007), Interannual and interdecadal variability of the summertime western North Pacific subtropical high, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L11701, doi: 10.1029/2006GL029204.
- Sutton, R.T., and D.L.R. Hodson, 2003: Influence of the ocean on North Atlantic climate variability 1871–1999. *J. Climate*, **16**, 3296–3313.
- Sutton, R.T., and D.L.R. Hodson, 2005: Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. *Science*, **290**, 2133–2137.

- Tachibana, Y., M. Honda and K. Takeuchi, 1996: The abrupt decrease of the sea ice over the southern part of the Sea of Okhotsk in 1989 and its relation to the recent weakening of the Aleutian Low. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 579-584.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 1997: A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 2985-2988.
- Tanimoto, Y., N. Iwasaka, K. Hanawa and Y. Toba, 1993: Characteristic variations of sea surface temperature with multiple time scales in the North Pacific. *J. Climate*, **6**, 1153-1160.
- Taylor, C. M., et al., 2002: The influence of land use change on climate in the Sahel. *J. Clim.*, **15**, 3615-3629.
- Thompson, D.W.J., and J.M. Wallace, 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297-1300.
- Thompson, D. W. J. and J. M. Wallace, 2000: Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability. *J. Climate*, **13**, 1000-1016.
- Thompson, D. W. J., J. M. Wallace, and G. C. Hegerl, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends. *J. Climate*, **13**, 1018-1036.
- Tian, Y., U. Yasuhiro and S. Maki, 2004: Decadal variability in the abundance of Pacific saury and its response to climatic/oceanic regime shifts in the northwestern subtropical Pacific during the last half century. *Journal of Marine Systems*, **25**, 235-257.
- Timmermann, A., M. Latif, R. Voss, and R. A. Grotzner, 1998: Northern hemispheric interdecadal variability: a coupled air-sea mode. *J. Climate*, **11**, 1906-1931.
- Tian, S.-F., and T. Yasunari, 1992: Time and space structure of interannual variations in summer rainfall over China. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **70**, 585-596.
- Ting, M., Y. Kushnir, R. Seager, and C. Li, 2009: Forced and internal twentieth-century SST in the North Atlantic. *J. Climate*, **22**, 1469-1481.
- Trenberth, K. E., 1990: Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **71**, 988-993.
- Trenberth, K. E. and J. W. Hurrell, 1994: Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Clim. Dyn.*, **9**, 303-319.
- Trenberth, K. E., and D. P. Stepaniak, 2001: Indices of El Niño evolution. *J. Climate*, **14**, 1697-1701.
- Trenberth, K. E., and D. J. Shea, 2006: Atlantic hurricanes and natural variability in 2005, *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L12704, doi: 10.1029/2006GL026894.
- Trenberth, K. E., P. D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D.

- Parker, F. Rahimzadeh, J. A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai, 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Climate Change 2007: *The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Tziperman, E., Cane, M. A. and Zebial, S. E., 1995: Irregularity and locking to the seasonal cycle in an ENSO prediction model as explained by the quasi-periodicity route to chaos. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 293-306.
- Venegas, S. A., and L. A. Mysak, 2000: Is there a dominant timescale of natural climate variability in the Arctic? *J. Climate*, **13**, 3412-3434.
- Venrick, E. L., and J. A. McGowan, D. R. Cayan, and T. L. Hayward, 1987: Climate and chlorophyll a: long-term trends in the central north Pacific Ocean. *Science*, **238**, 70-72.
- Wang B., R. Wu, and X. Fu, 2000: Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? *J. Climate*, **13**, 1517-1536.
- Wang, B., and Q. Ding, 2006: Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L06711, doi:10.1029/2005GL025347.
- Wang, Y. M., J. L. Lean, and N. R. Sheeley, Jr., 2005: Modeling the Sun's magnetic field and irradiance since 1713. *The Astrophysical Journal*, **625**, 522-538.
- Walker, G. T., and E. W. Bliss, 1932: World Weather V. *Mem. Roy. Meteor. Soc.*, **4**, No. 36, 53-84.
- Walsh, J. E., W. L. Chapman, and T. L. Shy, 1996: Recent decrease of sea level pressure in the central Arctic. *J. Climate*, **9**, 480-486.
- Watanabe, M. and Nitta, T., 1999 : Decadal changes in the atmospheric circulation and associated surface climate variations in the Northern Hemisphere winter, *J. Climate*, **12**, 494-510.
- Watanabe, M., 2004: Asian jet waveguide and downstream extension of the north Atlantic oscillation. *J. Climate*, **17**, 4674-4691.
- Weng, H.-Y., K.-M. Lau, and Y. Xue, 1999: Multi-scale summer rainfall variability over China and its long-term link to global sea surface temperature variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 845-857.
- Weng, H.-Y., K. Ashok, S. K. Behera, S. A. Rao, T. Yamagata, 2007: Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Clim. Dyn.*, **29**, 113-129.
- Weng, H., G. Wu, Y. Liu, S. K. Behera, T. Yamagata, 2009: Anomalous summer climate in China influenced by the tropical Indo-Pacific Oceans. *Clim. Dyn.*, DOI 10.1007/s00382-009-0658-9 (online).

- Weng, H.-Y., A. Sumi, Y. N. Takayabu, M. Kimoto, and C.-Y. Li, 2004a: Interannual-Interdecadal Variation in Large-Scale Atmospheric Circulation and Extremely Wet and Dry Summers in China/Japan during 1951–2000. Part I: Spatial Patterns. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 775–788.
- Weng, H.-Y., A. Sumi, Y. N. Takayabu, M. Kimoto, and C.-Y. Li, 2004b: Interannual-Interdecadal Variation in Large-Scale Atmospheric Circulation and Extremely Wet and Dry Summers in China/Japan during 1951–2000. Part II: Dominant Timescales. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 789–804.
- Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry, and H.-R. Chang, 2005: Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment. *Science*, **309**, 1844–1846.
- White, W. B., 1995: Design of a global observing system for gyrescale upper ocean temperature variability. *Progress in Oceanography*, **36**, 169–217.
- Wu, B. G. and J. Wang, 2002: Winter Arctic oscillation, Siberian high and East Asia winter monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1897, doi: 10.1029/2002GL015373.
- Wu, R., and B. Wang, 2002: A Contrast of the East Asian Summer Monsoon and ENSO Relationship between 1962–1977 and 1978–1993. *J. Climate*, **15**, 3266–3279.
- Wu, R. G., Z. P. Wen, S. Yang, and Y.Q. Li, 2010: An Interdecadal Change in Southern china Summer Rainfall around 1992/93. *J. Climate*, **23**, 2389–2403.
- Wu, Z., N. E. Huang, S. R. Long, and C.-K. Peng, 2007: On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series. *PNAS*, **104**, no. 38, 14889–14894.
- Yamamoto, R., T. Iwashima, Sanga N. K., and M. Hoshiai, 1986: An Analysis of Climatic Jump. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 273–281.
- Yasunaka, S., and K. Hanawa, 2002: Regime shifts found in the Northern Hemisphere SST field. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 119–135.
- Yeh, S.-W., J.-S. Kug, B. Dewitte, M.-H. Kwon, B. P. Kirtman, and F.-F. Jin, 2009: El Niño in a changing climate. *Nature*, **461**, 511–514.
- Yim, S.-Y., J.-G. Jhun, and S.-W. Yeh, 2008: Decadal change in the relationship between east Asian-western North Pacific summer monsoons and ENSO in the mid-1990s. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L20711, doi:10.1029/2008GL035751.
- Yukimoto, S., Endoh, M., Kitamura, Y., Kitoh, A., Motoi, T., Noda, A., and Tokioka, T., 1996: Interannual and interdecadal variabilities in the Pacific in an MRI coupled GCM. *Clim. Dyn.*, **12**, 667–683.
- Zhang, Y., K. R. Sperber and J. S. Boyle, 1997: Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: Results from the 1979–1995 NCEP/NCAR Reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2605–2619.

- Zhang, Y., J. M. Wallace and D. S. Battisti, 1997: ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *J. Climate*, **10**, 1004-1020.
- Zhang, C. I., J. B. Lee, S. Kim, et al., 2000: Climatic regime shifts and their impacts on marine ecosystems and fisheries resources in Korean waters. *Prog. Oceanogr*, **7**, 171-190.
- Zeng, N., 2003: Drought in the Sahel. *Science*, **302**, 999-1000.
- Zhao, P., S. Yang, and R. C. Yu, 2010: Long-Term Changes in Rainfall over Eastern China and Large-Scale Atmospheric Circulation Associated with Recent Global Warming. *J. Climate*, **23**, 1544-1562.
- Zhou, T. J., R. C. Yu, J. Zhang, H. Drange, C. Cassou, C. Deser, D. L. R. Hodson, E. Sanchez-gomez, J. Li, N. Keenlyside, X.G. Xin, and Y. Okumura, 2009: Why the Western Pacific Subtropical High Has Extended Westward since the Late 1970s. *J. Climate*, **22**, 2199-2215.

Climatic Natural Variability and Interdecadal Variation

Huang-Hsiung Hsu^{1,2} Tzu-Ting Lo³ Chih-Wen Hung⁴
Chi-Cheng Hong⁵ Ming-Ying Lee³ Yun-Lan Chen³
Wei-Kai Huang¹ Mong-Ming Lu³ Chung-Hsiung Sui¹

¹National Taiwan University Atmospheric Science

²Research Center for Environment Changes, Academia Sinica

³Central Weather Bureau

⁴National Taiwan Normal University Department of Geography

⁵National Taipei University of Education Department of Science Education

(manuscript received 30 January 2012 ; in final form 3 April 2012)

ABSTRACT

Earth climate changes all the time in multiple time scales. In addition to the centennial warming trend in the past one hundred years, the global-mean surface temperature fluctuated in multidecadal time scales, e.g., the warming from the beginning of the 20th century to 1940s, cooling between 1950s and 1970s, followed by a dramatic increase after 1980s. Rainfall also exhibited in interdecadal time scales but with significant regional characteristics.

The conclusion of the IPCC AR4 about the accelerating warming trend in the past few decades may have ignored the possible contribution of the multidecadal oscillation. In the past 30 years, the Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO) happened to be in the developing stage of positive phase (i.e., warming tendency). Its superposition on the centennial warming trend likely led to the impression of accelerating warming trend. It is important to seriously consider the effect of multidecadal oscillation when examining past climate change and projecting future climate change. The multidecadal oscillation contributes relatively short period of climate variability, while the anthropogenic greenhouse effect leads to long-term climate variation. Multidecadal fluctuation, which is likely to contribute to more accurate projection of near-future climate, cannot be ignored. Study in multidecadal fluctuation and decadal prediction is one of the key issues and will be reported in the IPCC Fifth Assessment Report.

The observation of multidecadal fluctuation and centennial warm trend do not contradict with each other. While multidecadal oscillation was most significant in the extratropical Northern Hemisphere, both mean surface temperature in the Southern Hemisphere and global-mean sea level have been exhibiting mostly long-term upward trends in the past one hundred years. Theoretically speaking, the anthropogenic warming signals will be retained more clearly in the ocean than over the land, because of the larger heat capacity of sea water and the longer climate “memory”. It is likely that the significant warming trends seen in the mean surface temperature in the Southern Hemisphere and the global-mean sea level reflect the anthropogenic warming effect.

Anthropogenic greenhouse effect is one of the major reasons for the warming in the past few decades. Recent observation reveals that the anthropogenic greenhouse gas emission has not been suppressed since the Kyoto Protocol; instead it has been increasing more rapidly since then. The warming due to anthropogenic greenhouse effect is evident and most of climate models indicate that the impact of anthropogenic greenhouse effect is larger than those caused by observed natural factors. It is fair to conclude that the global warming observed in the past one hundred years was partially caused by the anthropogenic greenhouse effect. IPCC AR4 reported that the projected future warming, based on different emission scenarios, will be 1.1-6.4°C, which is much larger than the amplitudes of known multidecadal fluctuation and the shorter-term cooling effect of known volcanic eruption. If an event equivalent to Little Ice Age due to Maunder Minimum occurs in the future, it may cause 0.3°C cooling, which is still smaller than the projected anthropogenic warming.

In summary, the anthropogenic global warming will be larger than the natural variability observed in the past one hundred years if the emission of anthropogenic greenhouse gas cannot be suppressed. If a catastrophic event that occurred in the Earth history occurred in the future, it might be able to suppress the projected warming trend. However, such an event cannot be predicted and is not what we want, either. Suppressing anthropogenic greenhouse emission has to be achieved in order to minimize the impact of future global warming on the ecological environment on Earth. How to suppress the emission of anthropogenic greenhouse gases through carbon reduction and mitigation to decelerate the increasing rate of greenhouse concentration in the atmosphere is the most important issue and the greatest challenge for the mankind.

Key Words: Climate change, Interdecadal variation, Global warming

