

第七章、總結與討論

年際至年代震盪為包含多重時間尺度與大氣、海洋、陸地、海冰複雜交互作用之現象，由於熱帶地區大氣運動頻率與海洋相近，大尺度交互作用較為顯著，因此在國際間，熱帶大氣與海洋間大尺度交互作用成為近十餘年來相當熱門之研究。本論文透過分析大氣與海洋觀測資料，藉以了解年際至年代兩不同時間尺度之變化特徵，並探討兩者間交互作用之影響。透過較單純之簡單耦合模式實驗，探討太平洋地區年際變化機制與其有不規則振幅與週期之原因。藉由具有較完整地球系統模擬能力之耦合環流模式(CGCM)實驗，探討太平洋地區年代變化機制，與影響其發生和長時間週期之原因。主要結論如後敘述。

7.1 觀測資料分析

本研究透過 NCEP/NCAR 再分析資料之近地面風場、最佳化內差月平均海平面溫度資料，利用奇異值分解法來探討大氣與海洋系統耦合特徵。計算結果之第一模態為「年代震盪」(Decadal Oscillation)，其中 1949~1978 年屬平均海溫較低之「冷年代」(Cold Epoch)，1979~2000 年屬平均海溫較高之「暖年代」(Warm Epoch)。年代震盪在太平洋地區呈現東太平洋和北太平洋反相位分佈，亦即暖(冷)年代時東太平洋海溫升高(降低)，北太平洋海溫降低(升高)，此種太平洋海溫反相位分佈特徵又被稱之為「太平洋年代震盪」(PDO)。第二個奇異值分解分佈，為典型年際震盪(ENSO 成熟期)特徵，在太平洋地區和年代震盪(SVD1)型態相近。

我們的研究發現，年代震盪並無季節選擇性特徵，其為大氣海洋系統整個氣候態的轉變，與 ENSO 訊號透過大氣海洋交互作用強烈地被鎖定(locked)在冬季顯然不同。由冷、暖年代 ENSO 差異可見，最大差異發生在消散期，其次為成熟期，發展期差異最小。從空間來看，最大差異發生在南美秘魯外海(Nino1+2 區)，其次為赤道東太平洋(Nino3.4 區)，西北太平洋(Nino5 區)差異相對小

了許多。亦即年代震盪可扮演調和 ENSO 角色，使得暖（冷）年代 ENSO 強度較強（弱），持續時間較長（短）。

由過去有關 ENSO 機制討論知道，ENSO 為熱帶地區海氣耦合之產物，在無其他外力影響下，例如 1965/66 年 ENSO 事件，暖海溫距平由赤道東太平洋像西延伸至中、西太平洋，其主要震盪週期約為兩年。但受到西風爆發（An and Wang 2000; Wang and Weisberg 2000; Eisenman et al. 2005; Seiki et al. 2007）等因素影響後，例如 1970 年後 ENSO 事件，暖海溫距平並非全為東太平洋向西太平洋沿伸，在 ENSO 發展時期，西太平洋有明顯之暖海溫由西太平洋向東太平洋沿伸之特徵，此外 80 年代後之 ENSO 事件在消散時期，東太平洋地區還是呈現暖海溫距平特徵，此現象猶如暖海水被鎖住(locked)在東太平洋地區，也因如此，發展 ENSO 之延遲效應更為明顯，使得 ENSO 生命週期更為延長。

本研究根據 Hartten(1996)所定義之西風爆發事件，比較了 1965/66、1972/73、1982/83 與 1997/98 四個 ENSO 事件之西風爆發狀況，研究結果得知僅 1965/66 之 ENSO 事件未發生西風爆發，其 ENSO 強度亦較其他 ENSO 事件弱。而 1972/73 雖有西風爆發事件在早春發生，但其 ENSO 生命週期仍較 80 年代後之 ENSO 事件短，空間分佈亦有所不同。80 年代後 ENSO 事件在成熟時期(冬季)其海溫增溫特徵仍在東太平洋地區，而 70 年代前 ENSO 海溫增溫特徵則西移至 150°W~120°W 附近。此特徵與 Wang and Weisberg(1999)特徵相同。雖 An and Wang (2000) 提出此結果是因西風爆發東移所致。但相較 1972/73 與 1982/83 之 ENSO 事件，兩時期之西風爆發事件並無太大差異，甚至 1982/83 年之西風距平較 1972/73 年弱，但 1982/83 之 ENSO 事件振幅強度較 1972/73 強，週期也較為長。故 An and Wang(1999)之結論與此不符。

7.2 年際震盪機制探討

本研究針對 ENSO 事件發展機制探討，為避免其他事件擾動影響，故採用

簡單之耦合模式(Hybrid Coupled Model, HCM)模擬實驗之。由實驗結果進一步證實，西風爆發對於 ENSO 事件是有提早 ENSO 發生與增強 ENSO 震幅之影響。但並不會導致東太平洋邊界之暖海水有鎖住現象而延長 ENSO 週期，因此對於 ENSO 週期變化並不明顯。此外，本研究透過參數化計算得知，熱帶西太平洋地區由於濕穩定度較熱帶太平洋地區低，故該區海氣交互作用程度較其他地區強，因此藉由增強西太平洋地區海氣耦合作用實驗可知，西太平洋海氣交互作用雖不是產生大氣場西風爆發之主因，但其會直接影響中、東太平洋地區海氣耦合作用，增強東太平洋邊界延遲震盪效應，進而改變 ENSO 發生之振幅與週期變化。在暖年代時期，熱帶太平洋地區之濕穩定度較一般氣候值低，使得海氣間交互作用更為強烈，由此更有助於增強與增長暖年代之 ENSO 事件之振幅與週期。

7.3 年代震盪機制探討

本論文分析 NCEP 之海面溫度資料暖年代（1979~2000 年）平均值與冷年代（1949~1978 年）平均值之差，我們發現海面溫度年代變化特徵與 3.1 節之 SVD1 特徵相近，其太平洋空間變化與 ENSO 成熟時期相似，本研究為了瞭解年代震盪下海洋內部之垂直變化。故分析了 JEDAC 海溫資料之熱帶太平洋海溫年代震盪垂直結構，其結果發現海溫平均年代差異之垂直剖面特徵與年際變化相似，皆屬於較淺層(海面至海面下 300 公尺)之變異結果。

由於海洋觀測資料較為缺乏，故本研究透過 Parallel Ocean Program (POP) 海洋模式模擬海洋之內部架構，進一步解析太平洋地區年代震盪之機制，並透過經由 SVD 計算所得之年代特徵風場驅動海洋模式，以得到較純之海洋年代回應。由模擬海平面溫度年代變異差可見，模式無論在海表層或是海洋內部結構皆能成功模擬出與觀測相同之年代變異特徵。本研究透過能量收支方程探討太平洋赤道熱帶地區之年代增溫之原因，其分析結果發現，熱帶太平洋地區之海溫年代增溫之主因為，熱帶地區之信風帶與東向西之洋流減弱，以致減少赤道中太平洋

表層海溫之熱量散失，因信風帶減弱，導致東太平洋湧升流所導致上層海水之冷卻效應減弱，進而造成熱帶地區於年代震盪下有海溫增溫之特徵。

爲了更詳細探討海氣交互作用對於年代震盪之影響，本研究透過複雜耦合模式-CCSM 模擬，探討太平洋地區大氣與海洋之年代變化機制。透過模式模擬與能量收支探討發現，熱帶太平洋地區海溫年代增溫之主因爲，熱帶地區之信風帶與東向西之洋流減弱，以致減少赤道中太平洋表層海溫之熱量散失，以及北太平洋環流減弱，以致高緯地區南移之冷海水對赤道地區之冷卻作用減弱，進而造成赤道中太平洋地區於年代震盪下有海溫增溫之特徵。而北太平洋換日線地區由於西風風場增強，導致表層海洋熱量散失，進而造成該區有年代降溫之特徵。相較於上一章透過觀測風場驅動 POP 模式實驗結果，除了熱帶地區海溫年代變異爲緯向風場與經向風場變異所導致外，北太平洋高緯地區之海溫年代變異之原因爲水平風場與表層熱通量變異所影響。綜合以上討論可進一步發現，熱帶和中緯度地區年代震盪維持機制有些差異，熱帶和中緯度地區年代震盪維持機制有些差異，在熱帶地區，海氣交互作用扮演維持年代震盪關鍵角色；在中緯度地區，除了海氣交互作用外，大氣橋（atmospheric bridge）在北太平洋地區增加阿留申低壓強度，進而加強表面熱通量散失（透過可感熱形式），也扮演不可忽視之角色。

7.4 討論與未來工作

綜合以上結論可知，熱帶地區大氣與海洋交互作用不僅導致了太平洋地區聖嬰與反聖嬰之年際震盪結果，也可能激發更長週期之年代震盪現象。由於此兩種不同時間尺度震盪在太平洋空間特徵相似，較短週期之年際變化特徵有年代尺度之差異出現。我們透過不同複雜程度模式探討年代震盪之發生與維持機制，在熱帶地區之結果似乎呼應 An and Wang (2000)與 Yeh et al.(2004)所提之熱帶海氣交互作用扮演維持年代震盪關鍵角色。此外在中緯度地區除了海氣交互作用影響外，熱帶海溫變化透過大氣橋作用在北太平洋地區影響阿留申低壓強度，進而

改變海洋表面熱通量，亦可能為北太平洋地區年代震盪維持因素之一。

雖然我們的研究已初步描繪出大氣海洋系統中年際至年代際間關係，但同時也發現許多待釐清之議題，例如兩個截然不同時間尺度的現象（El Nino 和 PDO），其能量如何轉換？以及中高緯度和熱帶地區交互作用（如 Thermohaline Circulation Overturning）扮演角色為何？都是非常有趣但需要更多的模擬和分析，方能一一釐清。此外，以上結果主要針對氣候自然變化之機制探討，但處於 21 世紀現在，氣候變化中，多了人類活動所引發的全球暖化影響。在全球溫度上升影響下，無論是長週期之年代震盪，或是較短週期之季節轉換，皆因暖化效應而有所改變。故本研究之未來工作，預計將人類活動所導致之全球暖化影響加入實驗中，詳細探討該暖化現象對於自然界中原有之年代震盪與年際震盪造成有什麼改變與影響。

