

## 第一章、前言

氣候系統由氣圈、水圈、地圈、冰圈、和生物圈等五個分量所組成，太陽則是維持氣候系統運作的能源提供者。在太陽輻射能驅動下，氣候系統內部產生一系列複雜過程，各個分量間，透過質量、動能和熱能交換，緊密地聯結成一個封閉系統。氣候系統中，海洋占了地表約 70% 左右的面積，加上其比熱是陸地的 4 倍，因此海洋在地球系統中扮演著能量儲存槽以及氣候調節器的角色。其中，太平洋由於面積最大，加上其海域多位於熱帶地區，可吸收了大量太陽輻射，與其他大洋（大西洋、印度洋）相較，太平洋對於氣候的調節作用最為顯著。因此之故，探討熱帶太平洋海氣交互作用與短期氣候變遷關係成爲二十世紀末期（特別是 1980 年代以後）相當熱門的研究課題。

海氣交互作用過程包含不同時間和空間尺度的動能和熱能交換，大氣主要透過風應力提供驅動表層洋流所需之動能，以改變海洋之動力和熱力分布；反之，海洋則透過可感熱和潛熱和大氣交換熱能，影響大氣穩定度，進而影響大氣的運動。熱帶地區大氣運動頻率與海洋高頻部份接近，容易形成大範圍交互作用 (Anderson and Stern 1999)，海氣交互作用不僅影響區域氣候，透過大氣波動的傳遞，往往可產生遙地衝擊，造成全球短期氣候異常，其中最顯著例子就是「聖嬰/南方震盪」(El Nino/Southern Oscillation，簡稱 ENSO) 現象 (Horel and Wallace 1981)。

### 1.1、研究動機與目的

過去二十多年來，探討「聖嬰/南方震盪」(ENSO) 對區域乃至於全球氣候影響向來是研究短期氣候變遷之熱門議題。ENSO 爲典型大氣與海洋交互作用所產生之現象，但由於大氣和海洋系統有複雜尺度之交互作用以及高度的非線性，ENSO 發生週期一向不規律（約在 2~4 年之間）。ENSO 產生之大氣和海洋變化中心集中在熱帶太平洋地區，主要特徵是持續半年到一年左右熱帶東太平洋海溫

異常增暖，此異常海溫增暖改變了太平洋地區東西向海溫梯度，透過大氣與海洋介面能量交換改變了低層大氣壓力梯度，使得大氣環流架構和降水區位置產生改變，進而造成持續性的氣候異常。

最近幾年由於高品質、長時間的大氣網格點資料（如：NCAR/NCEP 與 ECMWF 再分析資料）陸續出現，其資料長度往往超過 40~50 年，科學家開始注意到另一個較長週期的大氣海洋交互作用現象—「年代震盪」（Decadal Oscillation）。由於太平洋為大氣與海洋系統內年代震盪訊號最顯著地區，近年有許多學者也將這種因北太平洋地區海溫年代週期轉變並引起中緯度地區氣候變化現象稱為「太平洋年代震盪」（Pacific Decadal Oscillation，簡稱 PDO）。其實 PDO 最早是由海洋漁業學家 Steven Hare 於 1996 年所提出，當時他根據海洋魚獲量長期記錄（Francis and Hare 1994）發現北美西岸鮭魚產量和北太平洋海溫年代週期變化有關。

Trenberth（1990）是最早注意到大氣具有年代週期變化特徵之科學家，他分析北半球海平面氣壓和溫度長期變化時發現 1977~1988 年間整個北半球地面溫度有上升趨勢，但同時間在北太平洋地區卻有顯著溫度降低的情形，北太平洋降溫使得冬季「阿留申低壓」（Aleutian Low）加深並往東移動，另一方面北美西岸和阿拉斯加冬季卻變得溫暖而潮濕。後續研究更進一步顯示北太平洋海溫年代變化和北美洲西岸氣候有密切相關，在北太平洋海溫偏低年代，北美洲西岸氣候較為暖濕；反之在北太平洋海溫偏高年代，北美西岸氣候較為乾冷（Latif and Barnett 1994；Graham 1994；Trenberth and Hurrell 1994）。

在 PDO 暖（冷）期，熱帶東太平洋海溫偏高（低），北太平洋海溫則顯著降低（升高），與聖嬰成熟期之海溫距平相似，對應之大氣風場和氣壓場也和南方震盪相仿。Zhang et al.（1997）根據可靠觀測資料發現 20 世紀以來共經歷過 3 次年代震盪相位轉換，分別在 1925 年由冷轉暖相位、1947 年由暖轉冷相位、以及 1977 年由冷再轉回暖相位。Biondi et al.（2001）利用北美洲樹木年輪資料甚至可以追溯自 1661 年起之 PDO 現象，他發現最劇烈年代氣候變化有三次，分別

發生在 1750、1905 和 1947 年左右。

雖年代震盪之時間尺度約為 30~50 年，較年際變化之 3~7 年週期長，但在空間分佈特徵，如海平面溫度、海平面氣壓、近地面風場等皆與 ENSO 相似，尤其在熱帶地區之年代變化特徵與 ENSO 成熟期更為相似，因此，許多學者透過觀測資料分析，發現 ENSO 有年代週期之變化，例如在 1970 年後之 ENSO 事件之生命週期與強度震幅都較 1970 年前之 ENSO 事件強(Rasmusson and Carpenter 1982; Zhang et al. 2007)，此方面在國際間已有許多學者研究探討此原因，其結果大都認為西風爆發(westerly wind bursts)對於 ENSO 事件之年代性變異特徵有直接性的影響 (An and Wang 2000)。

本研究將透過不同複雜程度之模式模擬實驗方式，分階段討論年際至年代際氣候變異之特徵和可能機制。首先，由於簡單海氣耦合模式雖能模擬出氣候與年際變化特徵，但由於物理參數化較為簡單加上垂直解析度不足，因此無模擬出接近觀測之特徵，例如，海洋環流和斜溫層改變等。不過，由於模式之物理機制簡單，相對有利於單純影響氣候特徵之機制討論。首先，本文將透過簡單海氣耦合實驗探討西風爆發事件對於 ENSO 事件有何影響。此外，由於年際變化為熱帶海氣交互作用下之產物，但在國際間鮮少研究探討不同地區所產生之海氣交互作用反應對年際震盪影響，本研究也將探討熱帶深對流區之海氣交互作用對於 ENSO 事件之影響，以釐清在大氣海洋系統中，影響年際變化之機制為何。此外，針對較複雜之海洋環流變化與年代變化討論，則需使用具有較完整物理參數化之海洋環流模式 (Ocean General Circulation Model)，以利於模擬出較完整之氣候特徵。本研究透過海洋環流模式 (Ocean General Circulation Model) 模擬，探討海洋內部之長期變化特徵；亦將透過耦合大氣海洋環流模式 (Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model) 模擬分析，探討於大氣海洋系統中，主要影響年代震盪之機制為何？

## 1.2 文獻回顧

### 1.2.1 理論分析

在國際研究討論中，年際震盪發生與維持之機制，已有相當成度之研究與瞭解。但，較長週期之年代變化機制討論則相對較為缺乏，因此討論年代震盪發生與維持之機制為本論文之重點之一，雖然目前已有有些理論已被提出來解釋年代震盪形成，例如有些研究強調海洋斜溫層（thermocline）改變是造成年代變化的關鍵（Gu and Philander 1997；Fedrov and Philander 2000），Thenberth(1990)透過觀測分析，提出年代變化之成因，主要為冬季阿留申低壓東移加深，使得暖空氣進入美國西岸，冷空氣進入北太平洋地區，並且透過大範圍之大氣流場改變，遙相關影響到熱帶地區之海氣交互作用。有研究認為年代震盪起源於中緯度地區，透過上層海洋環流熱傳輸影響到熱帶地區（Kleeman et al. 1999）。

Deser(1995)透過經驗正交函數（Empirical Orthogonal Function，EOF）分析 1950~1992 之海平面溫度，由 EOF 第一模態顯示為年際震盪特徵，而第二模態為似 ENSO（ENSO-like）之年代震盪特徵，其中 EOF2 以中高緯度之海溫降溫最為明顯，而研究結果得知，由於中緯地區於年代變化尺度中，西風有增強之特徵，海水之潛熱與熱通量上升也因如此導致中緯地區之海平面溫度有降溫之年代特徵。也有研究顯示不需海洋內部動力調節過程，僅靠大氣海洋介面交互作用即可產生年代變化特徵（An and Wang 2000），但上述理論僅能解釋部分年代震盪特徵，因此存有許多爭議之處，需要更完整的資料分析和模式來印証。

### 1.2.2 觀測研究

雖年代震盪主要特徵發生於北太平洋與東太平洋地區，但位於太平洋西岸之亞洲地區，透過觀測資料分析顯示，亞洲地區氣候現象仍有年代震盪特徵。Shen 等人（2006）透過中國東部 1470 至 2000 年，共 530 年之旱澇指數，計算與 PDO 指數之相關，兩者之相關係數高達 0.7 以上，故可證實亞洲地區亦受到年代海溫

變化之影響。近年部分研究也開始探討年代海溫變化對台灣地區氣候之影響，例如盧與麥（2003；2004）分析中央氣象局長期降雨資料（1920~1995年）發現冬半年台灣地區降雨趨勢和全球趨勢相同，與 PDO 之相位變化有相當高之類似性。

最近 Hung et al.（2004）研究也發現台灣北部地區春雨和 PDO 關係非常顯著，在 PDO 暖相位春天，菲律賓東方海面產生之反氣旋式環流會引進南海暖濕西南氣流，維持由日本到台灣北部之低壓槽，使得台灣春雨增加。反之在 PDO 冷相位春天，菲律賓東方海面產生之氣旋式環流會引進乾冷東北風，形成高壓脊，使得台灣春雨減少。由於海洋溫度亦是颱風生成之主因之一，Ho 等人（2003）研究颱風在西太平洋地區生成之年代變化特徵，其研究發現，由於海溫與大氣環流場有年代變化之特徵，而導致近年之暖年代時期颱風生成有偏向南海地區之趨勢。

由於 PDO 和 ENSO 空間架構相似，到底 ENSO 是完全受到 PDO 控制？或者是 ENSO 和 PDO 是交互影響物理現象？是待釐清之研究課題。Zhang 等人（1997）利用 EOF 分析 1900~1993 之海平面溫度月平均資料得到年際震盪特徵與似聖嬰（ENSO-like）之年代震盪特徵，分析其他如水平面氣壓、風切等物理場，皆發現在 1976~1977 年有短暫並劇烈之變化特徵，使原由冷年代時期（cold epoch）進入暖年代時期（warm epoch），透過各物理場於年際與年代時期分佈特徵比較，發現暖年代時期之物理場變化特徵有強化 ENSO 之效果。

Newman 等人（2003）透過統計方式計算海表層溫度之長時間變化，其結果得知海溫之年代變化特徵，於春、冬兩季最為明顯，現象與聖嬰事件相似，並結論年代震盪與聖嬰現象有所相關，並年代震盪會影響年際震盪特徵之強弱，此結論與 Alexander（1998）透過經驗模式模擬之結果相似。Gershunov and Barnett（1998）在探討兩者交互作用關係時發現 PDO 暖期會加強聖嬰（El Nino）現象，反之 PDO 冷期會加強反聖嬰（La Nina）現象，它們的結果強調 PDO 可調和 ENSO 強度。

另外一方面，An and Wang（2000）運用經驗大氣模式耦合海洋模式，測試

年代變化對於 ENSO 發生之影響時發現，1980 年後之 ENSO 事件西風帶位置有東移之趨勢，使得 1980 年代後之 ENSO 持續時間較長，Lau and Wang (1998) 將 1955~1997 年之海溫資料線性化，得到近四十年海溫上升約  $0.1^{\circ}\text{C}$  之結果，當加入年代變化之因素，其海溫上升約  $0.2^{\circ}\text{C} \sim 0.3^{\circ}\text{C}$ ，其導致暖化事件增加與冷卻事件減少，因為暖化導致 1980 年後之 ENSO 事件有強化之特徵。由以上之討論似乎建議 ENSO 和 PDO 為交互影響過程，而非單向的調和作用。

### 1.2.3 模式研究

由於海洋觀測資料缺乏，Gulev (2003) 使用 NCEP 之 1958~1997 年再分析資料驅動海洋模式，透過海洋模式之模擬分析海洋內部年代變異之特徵，研究結果發現海洋內部有年與 7 年之週期變化特徵，而其原因皆與經向之熱量傳輸有關，3 年週期之變化為熱帶與中緯兩地區，個別區域傳輸為主，此與年際震盪相似。而 7 年之週期變化為大範圍全球緯度之經向傳輸所導致之結果。許多研究學者透過模式模擬研究年代震盪之形成理論，但由於模式實驗設計不同，因此在國際間對於年代震盪之理論眾說紛紜。

Miller et al. (1993) 使用觀測風場與海面熱通量驅動海洋模式，以得到海洋內部之年代變化特徵，並透過上層海溫之熱量收支分析可得，近表層風切與表層熱通量於熱帶地區之年代增溫有正向之貢獻。Latif et al. (1996) 以 ECHAM-3 與 HPOE 耦合之耦合模式實驗所所得之結論指出，年代震盪為中緯度地區海氣交互作用下產物，由大氣風場驅動以及透過海洋長時間調節，故有年代尺度之震盪特徵。Xu 等人 (1998) 亦使用簡單模式與 MOM 海洋模式耦合實驗得到相同之結果。

除以上之年代震盪理論外，Jin (1997) 利用簡單海氣耦合模式，加入『白擾動』驅動模式，得知南北海平面溫度梯度會改變風場，由於海洋調節較慢，而導致時間尺度有年代之週期特徵，其主張年代震盪為海洋動力調節與海氣交互作用之結果。以上實驗結果皆主張年代震盪為大氣驅動海洋，而海洋回饋大氣之時

間尺度因海洋調節較慢，故時間週期約為年代之尺度，此海氣交互作用現象以高緯度地區為主。

除此理論外，亦有學者提出不需海洋內部動力調節，僅靠大氣海洋交界面處之交互作用即可，Yeh et al. (2003) 透過 C-Z model 與 SUN GCM 耦合分析得知，熱帶海氣交互作用下即可產生年代震盪之週期特徵。Wu (2003) 利用 FOAM，實驗區域性海氣耦合之影響得知，僅於熱帶地區耦合，亦可得到年代震盪之結果，由此可得熱帶之區域性海氣交互作用為年代震盪之主因，而並非由高緯地區之風場異常主導。Chang (2002) 利用經驗大氣模式與 OGCM 耦合，並透過熱力收支方程分析結果，證實熱帶海氣交互作用與海洋調節為年代震盪之重要角色。除風場與海氣交互作用之影響外，Xu (1998), Chang (2000), 與 Huang (2003) 透過海平面熱通量驅動海洋之實驗結果研究，海平面熱通量亦會影響海洋年代震盪之週期與海洋內部混合層之交互作用。

許多研究利用奇異值分解法 (Singular Value Decomposition, 簡稱 SVD) (Bretherton et al. 1992; Syu et al. 1995; 張和余 2003)，清楚分析出海洋交界處重要之耦合時空分佈特徵，並有許多研究利用此分解法結果，推導出統計型經驗模式 (Fedorov et al. 2003; Latif 1998) 並與 GCM 耦合，成為相當具有高短期預報能力之耦合模式 (Syu and Neelin 1995)。統計預報模式通常具有合理程度之預報能力，特別在強邊界條件時，如聖嬰-南方震盪時期 (ENSO)。在強外力邊界主導 (海溫變化為主) 下之氣候現象，動力模式預報較統計模式預報遜色許多 (Anderson 1999; Brankovic and Palmer 2000)，原因之一為動力模式難以掌握季節內變化與年際變化分量之複雜交互作用。因此為了更有能力掌握 ENSO 等短期氣候現象之預報，除了發展完整之海洋大氣耦合模式外，亦需研發更為完整之統計預報模式。

### 1.3、論文架構

由於大尺度大氣海洋交互作用物理過程極其複雜，不易由單方面切入獲致成果，必須結合觀測、理論、以及模式模擬三方面共同為之，方可獲得較完整之了解。本文將透過資料分析，比較冷、暖年代之季節循環 (Seasonal Cycle) 和 ENSO 時空分布特徵來釐清 ENSO 和 PDO 間關係，並透過模式模擬，以釐清年代震盪之成因與影響。

論文共分為七章。第一章為前言，介紹研究、動機與背景。第二章為資料來源、研究方法與模式簡介，主要目的在於介紹本研究所採用之資料來源與架構、所採用研究方法與目的以及公式推導，另外也簡介了所採用數值模式之基本特性及物理參數化過程等。第三章為介紹本研究所使用之四種數值模式，並與觀測校驗模式之氣候模擬程度。第四章為透過觀測資料分析年代變化與年際變化之特徵。並藉由簡單混合型海氣耦合模式實驗，探討大氣海洋系統中，影響年際震盪變化之機制。第五章為藉由大氣觀測風場驅動美國 Los Alamos National Laboratory 發展之 Parallel Ocean Program (POP) 海洋模式模擬海洋內部之物理變化，以彌補在觀測上缺乏海洋內部資料之缺點，藉由奇異值分解法濾出純的年代風場特徵並驅動海洋，以得到純的海洋年代震盪回應，並在此章節探討大氣海洋系統中年代震盪發生與維持之機制。第六章為透過 NCAR Community Climate System Model (CCSM) 模式實驗，探討海氣耦合系統中，年代震盪之發生與維持機制，並與上一章節僅透過觀測風場實驗之結果比較，以釐清大氣海洋系統中，影響年代震盪特徵之機制為何。第七章為總結與討論，將前面所探討之結果歸納整理，同時也對未來研究方向作一說明。