

第六章、太平洋年代震盪：耦合模式模擬

由第五章的 POP 模式模擬實驗可知，年代變化特徵僅發生在淺海表層 300 公尺處，且熱帶地區變異機制與年際變化相似，故可初步判斷，年代震盪可能是長週期聖嬰/反聖嬰現象。但，上一章之討論是架構在由觀測風場驅動之模擬結果下，並未包含海氣交互作用過程，本章將透過複雜耦合模式模擬，探討海氣交互作用對於年代震盪之影響。

6.1 太平洋年代震盪特徵

圖 6.1 為 CCSM 模擬 100 年之 NINO4 指數時間序列，黑線為 SST 距平，紅線為快速傅立葉轉換（FFT）取前四模態結果，綠線則為十年滑動平均之結果。由圖可見，在第 20 年、第 50 年與第 75 年附近皆有年代轉換之特徵。此表示模式之內部物理過程以能產生週期 10 年以上之年代震盪特徵。為方便以下針對年代震盪討論，本研究將第 15~30 年定為冷年代時期，第 40~55 年定為暖年代時期。

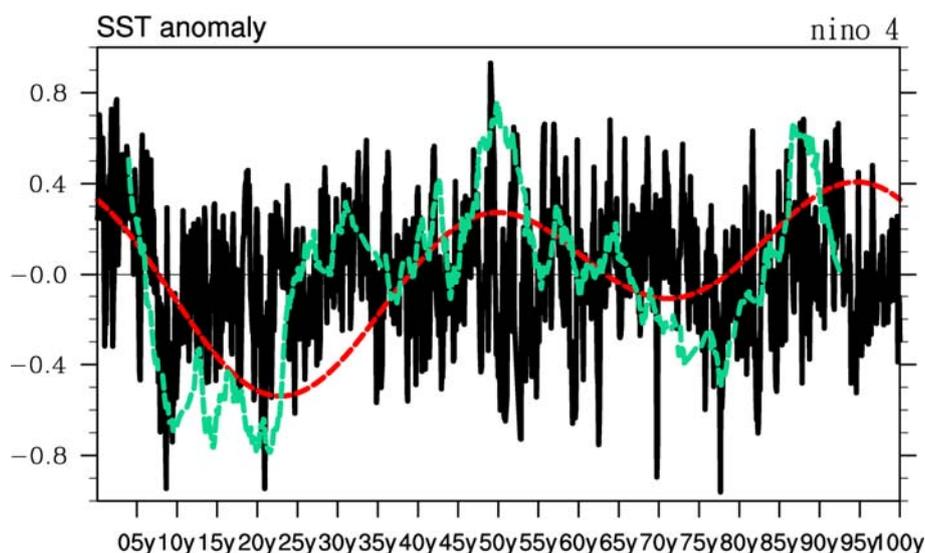


圖 6.1：為 CCSM 模式模擬 100 年之 NINO4 指數時間序列，黑線為 SST 距平，紅線為快速傅立葉轉換（FFT）取前四模態結果，綠線則為十年滑動平均之結果。

圖 6.2 為太平洋暖年代與冷年代之平均海溫差異，由圖可見，其主要差異特徵與觀測相近，在北太平洋換日線地區有明顯海溫冷卻特徵，最大差異幅度將近 1°C 。於北美西岸外海向赤道中太平洋延伸之海溫為增溫訊號。赤道地區為海溫增溫之特徵，其中以換日線附近 ($180^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{W}$) 增溫幅度最高，增溫約 0.6°C 。而南太平洋海溫為降溫之特徵分佈。相較於圖 5.1 可見，以上之年代變化特徵更較 POP 所模擬之圖 5.3 接近觀測，故本章節將透過 CCSM 模擬，探討導致太平洋年代震盪變化之原因。圖 6.3 為 $160^{\circ}\text{E}\sim 90^{\circ}\text{W}$ ，赤道地區年代海溫平均差異值之垂直剖面分佈，相較於圖 5.2，其年代差異分佈結果與觀測相似，在中、東太平洋約 150°W 之表層有海溫增溫之特徵，其增溫區約為海面下 75 公尺，增溫幅度約 0.8°C ，在海面下 100 公尺至 250 公尺則為海溫降溫之年代特徵，其降溫約為 0.8°C 。其主要距平分佈特徵皆與圖 5.3 之 POP 模擬結果相同，皆近似於觀測結果。由此可進一步證實，年代變化特徵與年際變化相似，主要變異特徵皆發生在海表層（表層～海面下 300 公尺）地區。因此有利於本研究探討海氣交互作用對年代變化之影響。

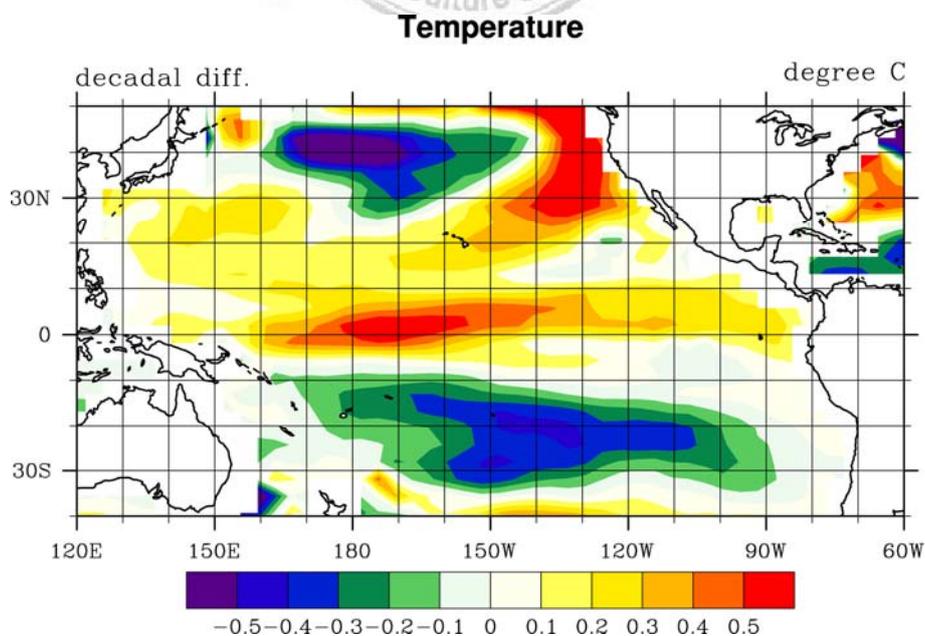


圖 6.2：為 CCSM 模式模擬太平洋暖年代（第 40~55 年）與冷年代（第 15~30 年）之平均海溫差異。

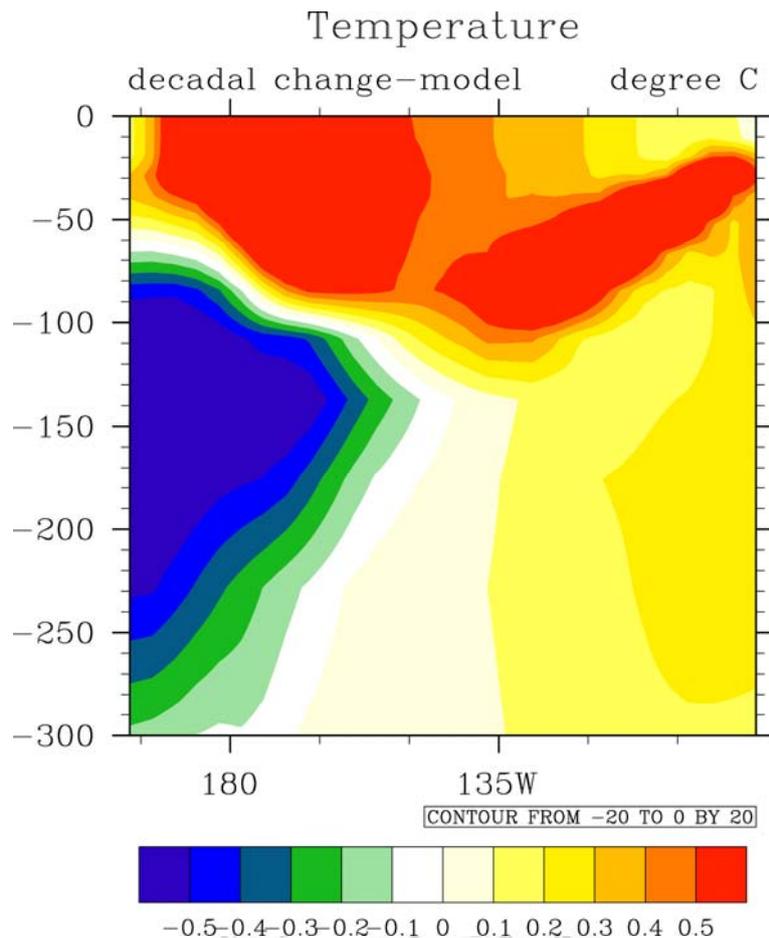


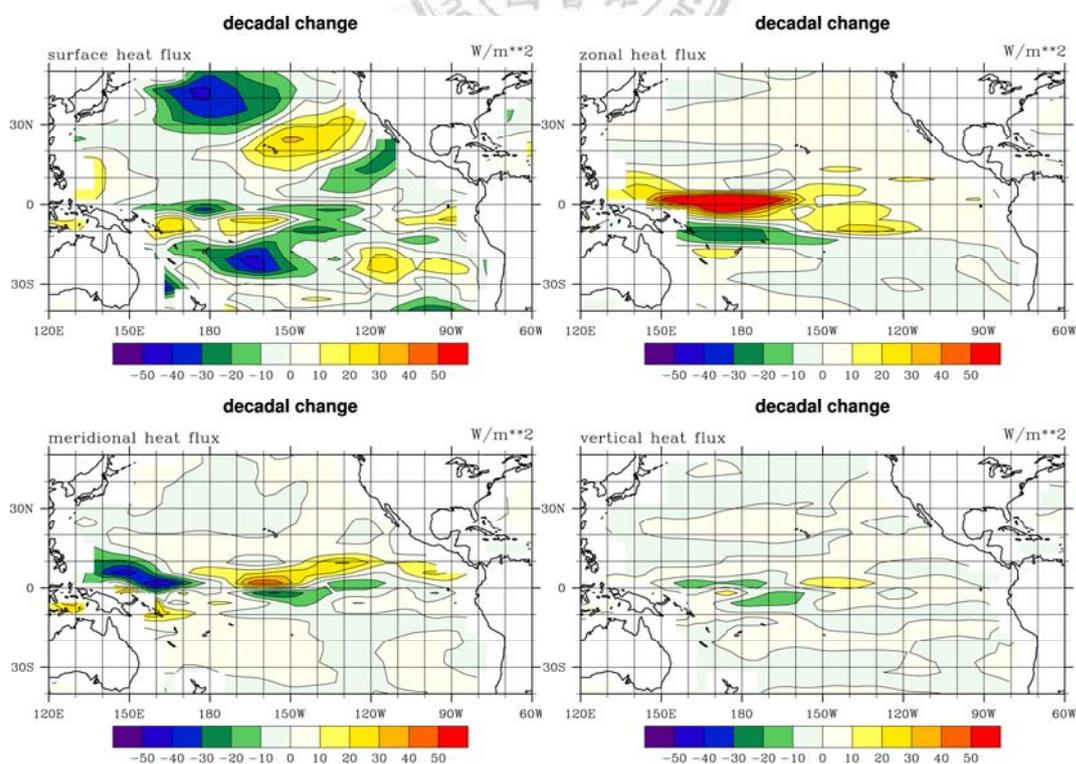
圖 6.3：同圖 5.2，CCSM 模式之海溫值，為年代之海溫平均差異之垂直剖面圖。

6.2 表面能量收支分析

與 5.2 類似，本節透過表面能量收支分析太平洋地區年代變化特徵之維持機制。圖 6.4 為表層熱通量（上左）、緯向熱通量（上右）、經向熱通量（中左）、垂直熱通量（中右）與溫度變化趨勢（下）之年代差異（暖年代減去冷年代）。由表層熱通量之年代差異分佈可見，北太平洋換日線附近對海溫變化主要為 $-10\text{W}/\text{m}^2 \sim -40\text{W}/\text{m}^2$ 負貢獻，使海溫在該區有降溫之趨勢。美國西岸外海至熱帶太平洋地區則為 $10\text{W}/\text{m}^2 \sim 30\text{W}/\text{m}^2$ 正貢獻，有助於海溫增溫。相較於 POP 實驗結果（圖 5.5），CCSM 所模擬之北太平洋年代差異更為明顯，主因為第五章之實驗為透過奇異值分解法濾出年代特徵之風場，進而驅動 POP 模式模擬之結果，由於奇異值分解法為計算海溫與風場間最明顯之耦合時空分佈特徵，故在高緯地

區驅動之風場有低估之缺點。緯向熱通量之年代差異分佈可見，熱帶太平洋地區對海溫變化為主要之正貢獻分佈，其中以 150°E 到 140°W 為主要正貢獻分佈區，其值約為 $50\text{W}/\text{m}^2 \sim 100\text{W}/\text{m}^2$ 。在經向熱通量差異方面，主要變異貢獻區皆位於北太平洋熱帶區，換日線以東為正值變異分佈，其值約為 $20\text{W}/\text{m}^2 \sim 50\text{W}/\text{m}^2$ ，換日線以西則為 $-10\text{W}/\text{m}^2 \sim -20\text{W}/\text{m}^2$ 負值變異分佈。而垂直熱通量差異分佈以熱帶地區較為明顯，但其差異值較上述三個通量差異小許多。將以上熱通量差異與垂直、水平頻散（因為差異分佈皆小於其他熱通量差異一個數量及以上，故圖略。）合成求得太平洋海溫之年代變異趨勢特徵（最下圖）。

由上述分析可知，導致太平洋地區海溫年代震盪之原因。熱帶太平洋海溫年代變化主要貢獻為水平（緯向、經向）熱通量，其中赤道換日線附近之海溫增溫為緯向熱通量貢獻，而導致熱帶海溫增溫北傾為經向熱通量之貢獻。此外不同於 POP 實驗結果，在 CCSM 耦合模式模擬中可明顯見到北太平洋之海溫年代變化主要為表層熱通量之貢獻。



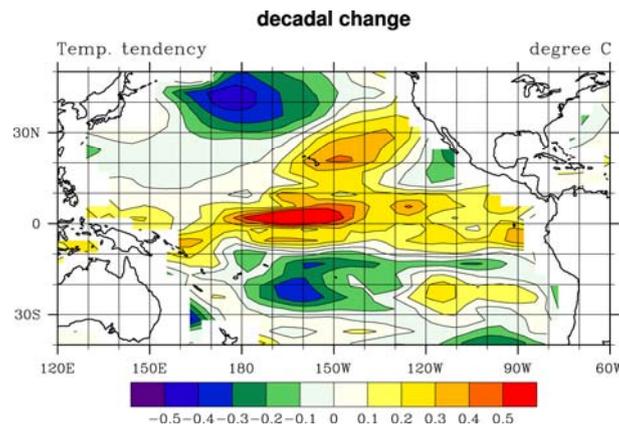


圖 6.4：同圖 5.6，為 CCSM 模擬能量收支方程各項之年代變化之能量收支平衡之結果，左圖上為海表面熱通量之年代差異，右圖上為海表層緯向通量之年代差異。中圖左為經向熱通量之年代差異。中圖右為垂直熱通量之年代差異。下圖為能量收支方程之海溫變化趨勢項之年代變化。

為詳細探討熱帶太平洋與北太平洋高緯地區海溫年代變化之過程，本研究透過奇異值分解法分析緯向熱通量、經向熱通量與表層熱通量對於海溫年代變化之影響。圖 6.5 為透過奇異值分解法計算海溫與近表層風應力之第一模態（年代變化特徵）結果，由圖可見熱帶地區受貿易風減弱之影響，導致熱帶地區海溫增溫，北太平洋地區西風增強導致該區海溫降溫，而北美西岸外海由於原本向南之北太平洋環流減弱，減少北方來之冷海水冷卻，導致該區向熱帶中太平洋地區延伸之海溫增溫，也因熱帶中太平洋海溫增溫影響，使得赤道地區西風距平持續發展，因此熱帶地區海溫異常增溫幅度在此交互作用下持續增高。反之，當年代相位於冷年代時期，赤道地區貿易風增強，海溫降低，而北太平洋環流增強，原 150°W 熱帶增溫區由於北來較冷海水南移，進而降低該區海溫，此結果更有助於赤道地區貿易風增強，降低赤道地區海溫。

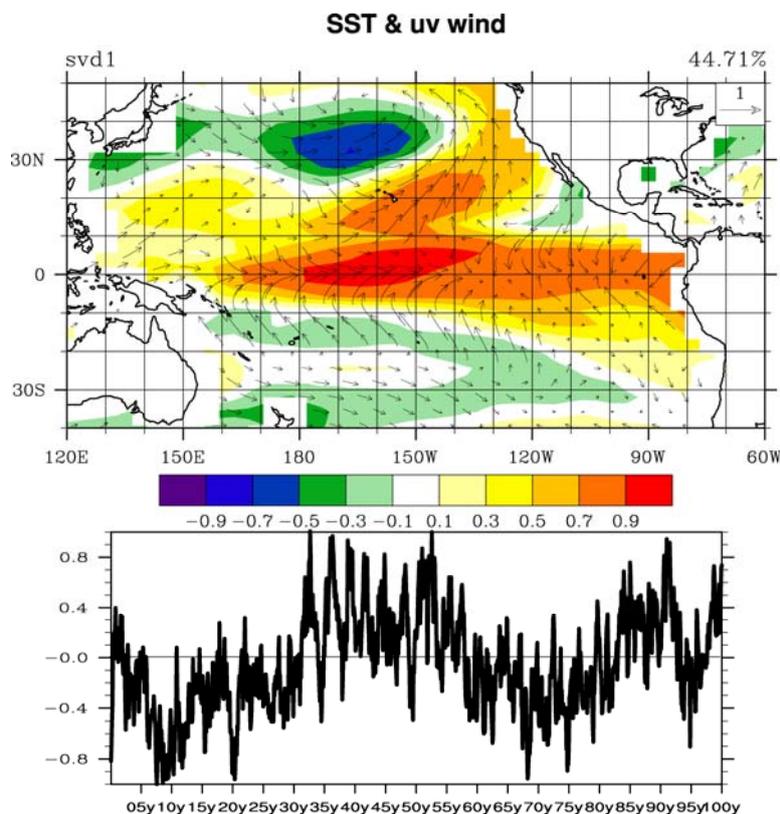


圖 6.5：濾除季節效應 CCSM 模擬 100 年之海面溫度與表層風應力之第一個奇異值分解分佈，可解釋變異量佔總變異量之 44.71%，圖中之特徵向量已標準化最大和最小值介於 1（深紅色區）和-1（淡紫色區）之間。

圖 6.6 為北太平洋熱帶地區（ $0\sim 5^{\circ}\text{N}$ ）緯向（左）、經向（中）熱通量與表層海溫（右）距平透過快速傅立葉轉換後取前四個模態之合成結果，由三圖中明顯可見約 50 年週期之震盪變化。由圖可見，熱帶地區除了西風距平影響海溫增溫（降溫）外，經向熱通量也因為北太平洋環流減弱（增強），導致熱帶中太平洋海溫增高（降低），更加強西風距平持續增強（減弱），以致於熱帶中太平洋地區海溫有年代增（降）溫之變化。由以上討論可知，太平洋地區海溫之年代變化為海氣間交互作用之產物。

至於高緯度地區海溫之年代變化，由表面能量收支可知，以表層熱通量貢獻為主。圖 6.7 為表層熱通量與表層風應力之第一模態(年代變異特徵)結果，發現兩物理場在高緯度地區有相當高之相關性，暖年代於 $30\text{-}40\text{N}$ 附近西風分量明顯增強，由於風速加大，讓蒸發冷卻效應更形明顯，使得海洋散失更多的熱量，

導致該區海溫有降溫趨勢。另一方面，在美國西岸外海，原本受自北方往南傳輸之北太平洋西側洋流影響，然受到洋流強度減弱作用，加上出現南來的西南風分量，傳輸較為溫暖潮濕的空氣進入該區域，導致該區海溫有增溫的趨勢。

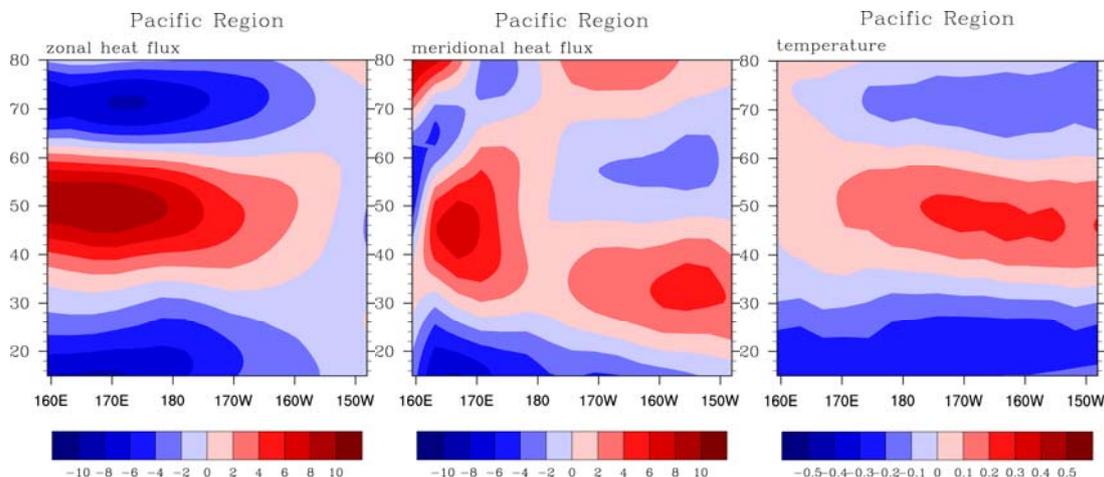


圖 6.6：為 CCSM 模擬 100 年之緯向與經向與表層海溫距平，透過快速傅立葉轉換後取前四個模態之合成之北太平洋熱帶地區（0~5°N）時空分佈圖，縱軸為時間（年為單位），橫軸為經度。左圖為緯向平流熱通量，中圖為經向平流熱通量，右圖為表層海溫距平。

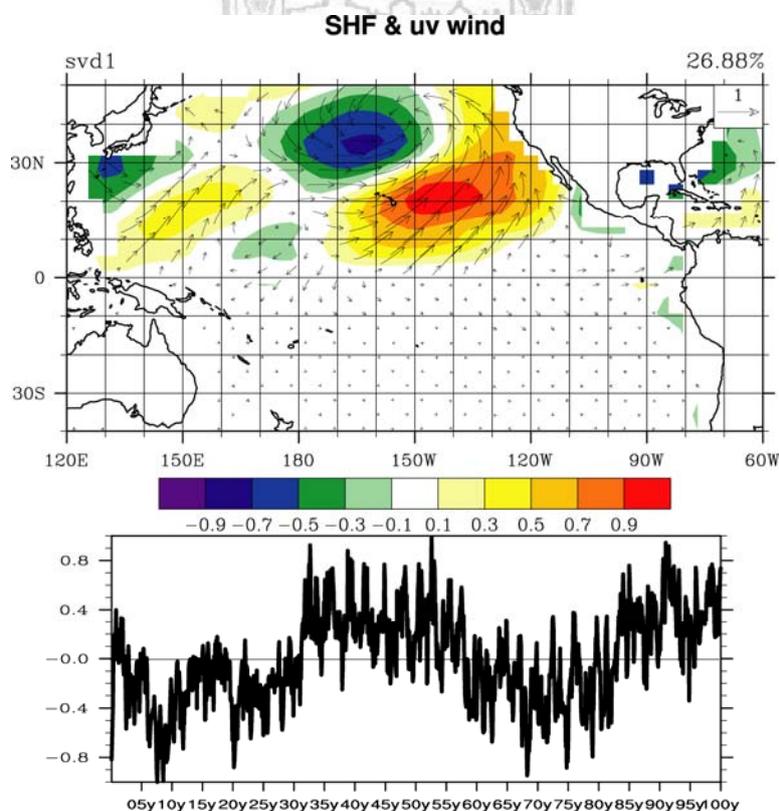


圖 6.7：同圖 6.5，濾除季節效應 CCSM 模擬 100 年之表層熱通量與表層風應之力之第一個奇異值分解分佈，可解釋變異量佔總變異量之 26.88%。

6.3 小結

本章透過 NCAR CCSM 模式模擬太平洋地區海洋年代變化特徵。透過模式模擬與能量收支發現，熱帶太平洋地區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，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 海洋環流模式實驗結果，除了熱帶地區海溫年代變異為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為水平風場與表層熱通量變異所影響。綜合圖 6.5 和圖 6.7，此處進一步發現，熱帶和中緯度地區年代震盪維持機制有些差異，在熱帶地區海溫之年代震盪機制與年際震盪似乎頗為相似，熱帶地區海溫年代變異可能為年際震盪之長週期變化。而在中緯度地區海溫年代變化貢獻，除了海氣交互作用外，因熱帶地區海溫變異而導致北太平洋地區大氣環流改變，使北太平洋地區西風距平增強，加強表面熱通量散失，亦扮演相當重要之角色，呼應 Lau(1996)所提出之大氣橋 (Atmospheric Bridge) 機制。簡言之，我們研究發現，除了北太平洋海氣交互作用為年代震盪主因外，熱帶地區海氣交互作用與其透過大氣橋影響北太平洋海氣交互作用之機制，在年代震盪中亦不容忽視。