

中央氣象局海氣耦合模式簡介

胡志文

中央氣象局 科技中心

摘要

為因應中央氣象局(以下簡稱本局)「氣候變異與劇烈天氣監測預報系統發展」計畫對氣候預報之需求,本局正發展季節氣候預報系統。動力氣候模式預報的可行性主要基於大氣下墊面(陸地及海洋)對熱量的記憶較大氣為長,為了預報三到六個月的大氣平均狀態,吾人必須能掌握此期間內大氣下墊面的變化。經研究顯示,大氣下墊面中對大氣影響最顯著首推海表面溫度,為了增進對短期氣候趨勢的預報能力,完全海洋耦合模式是不可或缺的工具之一。本局海氣耦合模式所選用的大氣環流模式為德國 Max Planck Institute for Meteorology 所發展的 ECHAM5,海洋環流模式則為美國普林斯頓大學地物流體動力實驗室發展的海洋模式 MOM2 (Modular Ocean Model, version 2)。

經由研發測試,本局海氣耦合模式已有能力模擬出海表面溫度的季節變化與年際變化,文中對模式的結果有詳細的分析。

一、前言

動力氣候模式預報的可行性主要基於大氣下墊面(陸地與海洋)對熱含量的記憶較大氣為長,為了預報 3 到 6 個月的大氣平均狀態,吾人必須能掌握此期間內大氣下墊面的變化。經由研究顯示,大氣下墊面中對大氣影響最為顯著的首推海表面溫度,為了增進對短期氣候趨勢的預報能力,完全海氣耦合模式是不可或缺的工具之一。本文的目的即在介紹中央氣象局海氣耦合模式的引進及測試結果。

完全海氣耦合模式是兩種模式的組合,一為大氣環流模式,另一個是海洋環流模式,本研究所使用的大氣環流模式為德國 Max Planck Institute for Meteorology 所發展的 ECHAM5 (Roeckner 等, 2003),此模式包含完整的動力與物理過程,在 Roeckner 等(2003)中有詳細的描述。所採用的海洋環流模式為美國普林斯頓大學地球物理流體動力實驗室的海洋模式 MOM2 (Modular Ocean Model, version 2),MOM2 是 3 維原始方程模式,所用的原始方程為靜力(hydrostatic)、布式近似(Boussinesq approximation)的那維史托克方程(Navier-Stokes equation),模式中也加入了溫度與鹽度(salinity)的非線性狀態方程。MOM2 的設計概念是把模式模組化,此做法的優點是方便研發者與使用者修改程式或是使用不同的參數化方法。Pacanowski (1995)對模式的設計與不同的參數化方法有詳見的說明,在此不多贅言。

本文在第二節敘述模式架構與實驗設計,第三節描述強迫海洋實驗結果,第四節為海氣耦合實驗分析,第五節為小結。

二、模式架構與實驗設計

本研究使用的大氣環流模式的解析度為 T42L19,海洋模式東西向的水平解析度為 2°,共計有 180 個網格點。南北向有 120 個網格點,在南北緯 6°之內網格間距為 0.5°,南北緯 6°到 27°之間間距由 0.5°增加到 2°,南北緯 27°到兩極的間距也是 2°。模式在垂直方向有 20 層,最淺的一層為 5 米,最深的一層為 3835 米,水深 150 米內模式有 8 層。模式的海洋地形是由 Scipps 1° x 1°地形資料差分得到。

兩組環流模式的耦合是透過每日一次交換海氣交界面的變量來達成,大氣模式提供給海洋模式的變數包含風應力、熱通量(短波輻射、長波輻射、可感熱與潛熱、短波輻射與水通量[降水量、蒸發量與陸地進入海洋的水通量(runoff)]等,海洋模式則提供海表面溫度給大氣模式做為下邊界條件。

對海氣耦合模式的測試吾人採取先測試海洋環流模式再進行海氣耦合模式測試策略。單獨測試海洋模式的實驗吾人稱為強迫海洋測試,此種測試需要輸入大氣的各項通量。本研究中所使用的大氣資料分為兩組,一是 ERA40 的分析場,另一個是 ECHAM5 模式 AMIP 模擬的結果。

強迫海洋實驗的步驟簡述如下:一、因為海洋模

式需要每日的強迫項，因此吾人首先將大氣資料處理成日平均場，之後計算出日平均氣候場。二、海洋模式的初始海溫及鹽度使用的是 Levitus 的氣候場且海洋為靜止狀態(沒有海洋環流，因此吾人首先使用大氣資料的日平均氣候場強迫海洋模式，此實驗的主要目的在強迫出海洋環流，並使大氣資料的強迫與海洋模式到達平衡，此類實驗需要較長的積分時間，通常都需要 200 年的模式積分(此類積分稱為年週期測試)。三、使用第二步驟中海洋模式所產生的重新啟動(restart)檔案重新積分海洋模式，此時所使用的大氣資料為日平均場(包含年變化與年際變化)，此實驗的目的在測試海洋模式模擬聖嬰事件的能力(此類積分稱為年際變化測試)。

海氣耦合模式的測試皆為年際變化的測試，大氣模式與海洋模式每日交換一次海氣交界面的資料，其中大氣模式的初始條件為 NCEP Reanalysis 2 1979 年 12 月 22 日 12 UTC 的觀測資料。為了簡化大氣資料對海洋模式的影響，在本研究沒有考慮水通量的變化。

為了比較模式結果，吾人使用了下列觀測資料，歐洲展期預報中心(ECMWF)的 ERA40 資料、美國 Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) 的海氣交界面通量資料、美國國家環境預報中心(NCEP)的 GODAS(Global Ocean Data Assimilation System) 等。

三、強迫海洋實驗

在強迫海洋的實驗中，吾人首先使用 ECHAM5 AMIP 模擬的氣候平均日平均場與 ERA40 資料的氣候平均日平均場強迫 MOM2 海洋模式進行年週期測試。兩組實驗的結果都顯示季平均海表面溫度氣候場偏低(圖略)。由於本研究中忽略了水通量的影響，只剩下風應力與熱通量的作用，而風應力與熱通量對海表面溫度的影響又以熱通量較大，因此吾人將比較吾人用來強迫海洋模式的大氣熱通量與觀測場的差異。雖然吾人所用的 ERA40 也是觀測資料，但是此項資料的熱通量受到所用數值模式一定程度的影響。另一方面，WHOI 的資料來源是測站的觀測資料與衛星觀測資料所組成，因此沒有受到數值模式的影響。因此吾人將以 WHOI 作為基準，分析 ERA40 與 ECHAM5 AMIP 模擬結果的差異。

圖 1 是 ECHAM5 AMIP 模擬與 WHOI 資料(上圖)及 ERA40 資料與 WHOI 資料(下圖)的年平均潛熱差異。由圖中可以看出不論是 ECHAM5 AMIP 模擬或是 ERA40 與 WHOI 的差異在分析區域內多為負值，負值表示熱量是由海洋傳向大氣，此結果顯示 ECHAM5 AMIP 模擬與 ERA40 資料有過強的潛熱釋放造成 MOM2 模式的海表面溫度場模擬出過低的溫度。

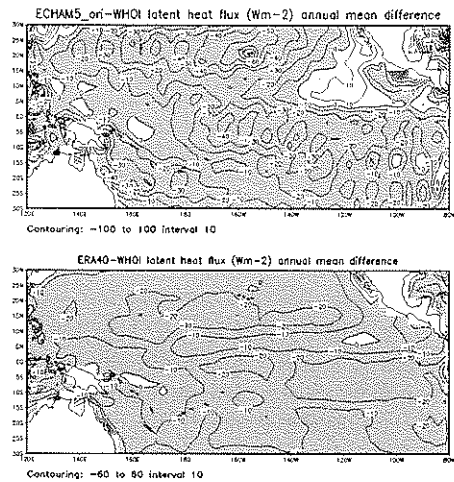


圖 1、年平均潛熱氣候場之差異，上圖為 ECHAM5 AMIP 模擬與 WHOI 的結果，下圖為 ERA40 與 WHOI 的結果，有顏色的區域為負值(表示熱量由海洋傳向大氣)，等值線間隔為 10W/m²。

由潛熱的分析吾人得知 ECHAM5 AMIP 模擬與 ERA40 都有較強的潛熱釋放，因此吾人人為的減低以上兩組資料潛熱釋放，用此修改後的資料強迫 MOM2 海洋模式。經由年週期與年際變化兩種實驗的測試，兩組資料的潛熱釋放都需要減低到原來的 95%。

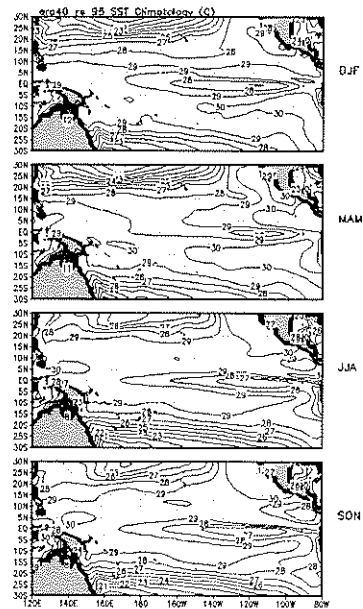


圖 2、car40_rs_95 實驗季平均海表面溫度氣候場，由上而下分別是冬、春、夏、秋四季，等值線間隔為 1°C。

圖 2 是 era40_rs_95 實驗的結果，此實驗使用潛熱降低為原來 95%年週期實驗的重新啟動檔案進行年際變化測試，所使用的 ERA40 年際變化日平均場中的潛熱也降低為原來的 95%。圖中顯示 era40_rs_95 的季平均海表面溫度氣候場在赤道區東太平洋偏高。圖 3 是 era40_rs_95 實驗 1958-2002 年間 8 個聖嬰事件的合成圖，由圖中可知此實驗的聖嬰現象強度過弱且正距平區偏向西太平洋。

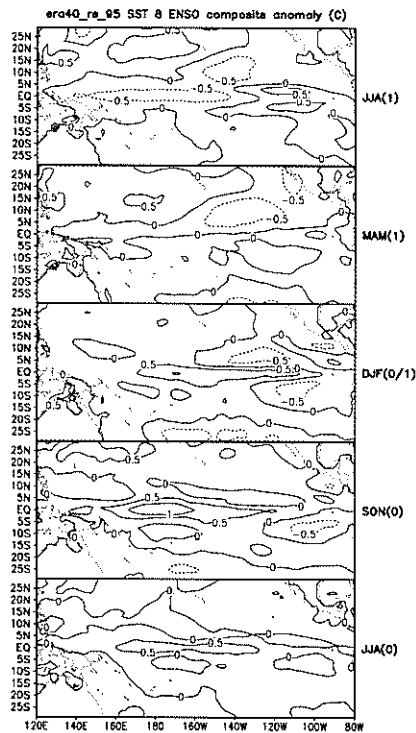


圖 3、era40_rs_95 實驗 1958-2002 年間 8 個聖嬰事件的合成圖，等值線間隔 0.5°C，由下而上分別是 0 年夏季、0 年秋季、0/1 年冬季、1 年春季及 1 年夏季。

圖 2 及圖 3 的結果顯示使用 ERA40 資料(潛熱降為原來的 95%)強迫 MOM2 模式所模擬出的海表面溫度的年週期與年際變化都與觀測場(圖略)有較大的差異。此外使用 ECHAM5 AMIP 模擬資料(潛熱降為原來的 95%)強迫 MOM2 模式所得之結果也與觀測場有差異(圖未列)。由於兩組資料強迫 MOM2 模式所得的海表面溫度不論是年週期或是年際變化都不盡理想，因此吾人接下來測試混合兩組資料的測試，主要的方法是將風應力量與熱通量場分開，例如使用 ECHAM5 AMIP 模擬的風應力及 ERA40 的熱通量場去強迫 MOM2 模式，在測試時也測試了將資料分為年週期與年際變化兩部分。

測試結果顯示使用 ERA40 的熱通量(不論年週期

或是年際變化)所得的結果皆與觀測場有較大差異，使用 ERA40 年週期風應力的結果優於使用 ECHAM5 AMIP 模擬年週期風應力。實驗 ec5wsiv_era40wsac_ec5hf 是使用 ECHAM5 AMIP 模擬的熱通量(潛熱降為原來的 95%)、ERA40 年週期風應力及 ECHAM5 AMIP 模擬風應力的年際變化所得的年際變化測試實驗。圖 4 是此實驗的季平均海表面溫度氣候場，此結果是吾人所有測試結果中跟觀測場最近的海表面溫度分布，但模式結果跟觀測場仍存在著某些差異，如冬、春兩季所模式的冷舌溫度略低於觀測值，西太平洋赤道區及沿北緯 10° 的北太平洋區域海表面溫度過高等。ec5wsiv_era40wsac_ec5hf 實驗的南北緯 5° 平均海表面溫度距平氣候場列於圖 5，本實驗有能力模擬出海表面溫度在赤道區中到東太平洋的年週期變化及西太平洋的半年週期變化，與觀測場較大的差異在於由東太平洋隨時間向西傳播的正距平沒有直接傳到西太平洋。

圖 6 及圖 7 分別是 ec5wsiv_era40wsac_ec5hf 實驗的聖嬰指標與聖嬰事件合成圖，此兩圖的結果顯示此實驗有能力模擬出海表面溫度的年際變化，且模式有能力分辨出強度不同的聖嬰事件。另一方面模擬的結果也顯示模式聖嬰事件中較大正距平區偏向中太平洋而觀測場的較大正距平則位於東太平洋。

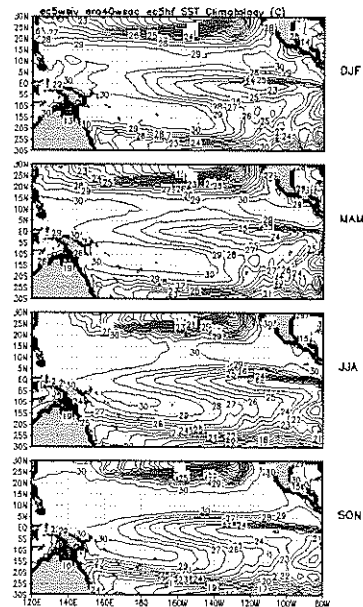


圖 4、ec5wsiv_era40wsac_ec5hf 實驗海表面溫度季平均氣候場，由上而下分別是冬、春、夏、秋四季，等值線間隔為 1°C。

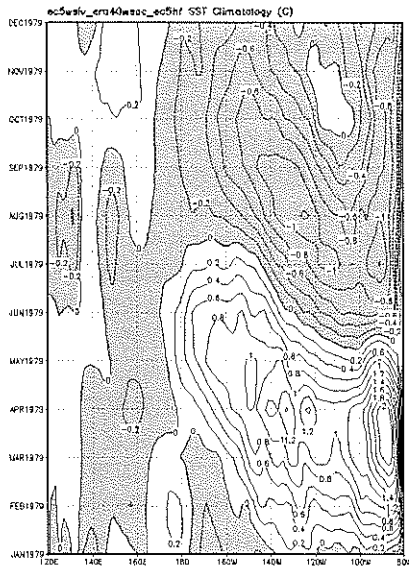


圖 5、ec5wsiv_era40wsac_ec5hf 實驗南北緯 5° 平均海表面溫度距平氣候場，等值線間隔為 0.2°C，有顏色的區域是負值。

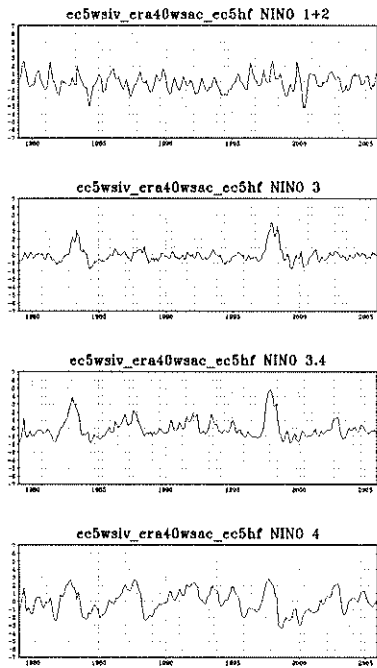


圖 6、ec5wsiv_era40wsac_ec5hf 實驗的各項聖嬰指標，分析時間為 1979-2006 年。

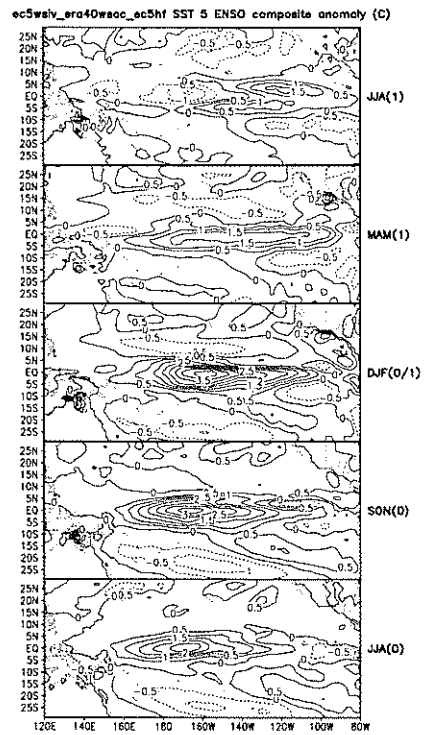


圖 7、ec5wsiv_era40wsac_ec5hf 實驗的 1982-2002 5 個聖嬰事件合成圖，等值線間隔 0.5°C，由下而上分別是 0 年夏季、0 年秋季、0/1 年冬季、1 年春季及 1 年夏季。

經由強迫海洋的測試吾人得知經由人為修正 ECHAM5 AMIP 模擬的潛熱釋放為原始值的 95% 及使用 ERA40 的風應力年週期及 ECHAM5 AMIP 模擬風應力的年際變化，MOM2 模式有能力模擬出與觀測場相近的海表面溫度場之年平均、年週期與年際變化。在確定 MOM2 海洋模式的模擬能力後吾人將進行海氣耦合模式的測試。

四、海氣耦合實驗

由強迫海洋實驗結果吾人得知 ECHAM5 模式模擬出的潛熱過強，在輸入 MOM2 海洋模式前必須降低為原始值的 95%。此外 ECHAM5 模式所模擬出的風應力年週期也比較不適用於 MOM2 模式而需要以 ERA40 資料的風應力年週期取代。使用以上的設計吾人進行 ECHAM5 與 MOM2 的耦合測試，但此測試的結果仍無法在耦合模式中模擬出聖嬰現象，顯示兩模式耦合後相互作用產生了不同於強迫海洋實驗的結果。為了使耦合模式可以模擬出海表面溫度的年際變化，吾人測試了前人常用的通量校正方法 (flux correction)，藉以修正海洋模式中海表面溫度及鹽度年週期。通量校正的設計可簡述如下：先在海洋模式積分過程中計算

模式預報的海表面溫度/鹽度與觀測場海表面溫度/鹽度的年週期氣候場的差異，並假設模式海表面溫度/鹽度在 10 天內逼近觀測場年週期，此值稱為模式的通量修正量，之後耦合模式進行 50 年的積分，積分時存下每日的修正量，平均模式最後 30 年的修正量求取海表面溫度/鹽度年週期通量修正量的氣候值。

取得模式海表面溫度/鹽度之年週期通量修正量後重新積分耦合模式，此次積分時在海洋模式的海表面溫度/鹽度預報場中直接減去之前求得之通量修正量（依年週期），所得之測試稱為 ec5ori_era40wsac_free，此實驗將 ECHAM5 模式所模擬出的潛熱降為原始值的 95%、用 ERA40 資料風應力年週期的資料取代 ECHAM5 模式的風應力年週期並加入了海表面溫度/鹽度場的通量修正量，模式積分時間為 200 年。圖 8 是此實驗的季平海表面溫度氣候場，圖 9 是此實驗南北緯 5° 平均海表面溫度距平氣候場，與觀測場相比，模式結果的海表面溫度不論季平均場或是赤道區距平的年變化都十分類似。對此吾人並不意外，因為通量校正項的作用就是在確保模擬的海表面溫度年週期不會偏離觀測場太多。

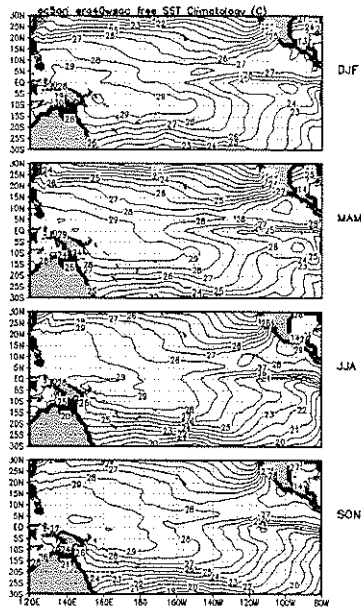


圖 8、ec5ori_era40wsac_free 實驗海表面溫度季平均氣候場，由上而下分別是冬、春、夏、秋四季，等值線間隔為 1°C。

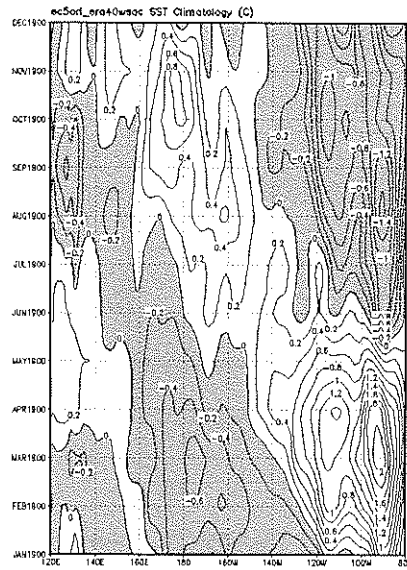


圖 9、ec5ori_era40wsac_free 實驗南北緯 5° 平均海表面溫度距平氣候場，等值線間隔為 0.2°C，有顏色的區域是負值。

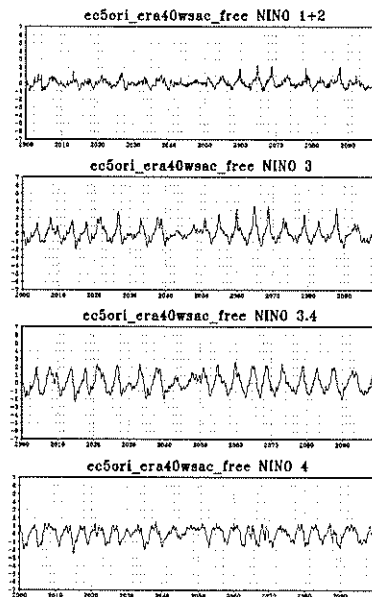


圖 10、ec5ori_era40wsac_free 實驗各項聖嬰指標，圖中所繪的時段為實驗最後 100 年的結果。

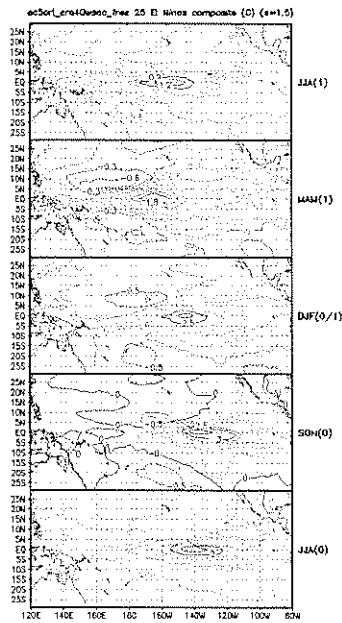


圖 11、ec5ori_era40wsac_free 實驗 25 個聖嬰事件合成圖，等值線間隔 0.5°C，由下而上分別是 0 年夏季、0 年秋季、0/1 年冬季、1 年春季及 1 年夏季。選取條件為 NINO 3.4 在 0 年 12 月的距平值大於 1.5°C。

圖 10 及圖 11 分別是 ec5ori_era402sac_free 實驗的聖嬰指標及合成圖，模式模擬所得的聖嬰事件週期並不固定，且有微弱的十年期(decadal)變化，以上現象與觀測場類似。聖嬰事件合成圖中(圖 11)模式有能力模擬出正距平由 0 年夏季到 1 年夏季隨時間增加後減小的現象。另一方面，模式所模擬出來的較大正距平位置偏西，且最大的正距平出現在 0 年秋季不像觀測場出現在 0/1 年冬季。

經由以上分析得知，ECHAM5 與 MOM2 模式在經由人為的校正潛熱、風應力年週期及使用海表面溫度與鹽度的通量修正項後有能力模擬出海表面溫度的年週期及年際變化。在以後的研究中吾人將嘗試使用此海氣耦合模式做短期氣候預報測試。

五、小結

本文主要目的在描述中央氣象局海氣耦合模式的引進及測試分析。分析結果顯示使用 ECHAM5 AMIP 模擬結果的熱通量(潛熱降低為原始值的 95%)、ERA40 觀測資料風應力年週期加上 ECHAM5 AMIP 模擬結果之風應力年際變化等大氣資料輸入 MOM2 模式後，MOM2 模式有能力模擬類似於觀測場的海表面溫度年平均、年週期與年際變化。

使用相同的設計測試 ECHAM5 大氣模式與 MOM2

海洋模式的耦合模擬並加入年週期海溫與鹽度的通量修正項，ECHAM5 與 MOM2 模式也有能力模擬出海表面溫度的年平均、年週期與年際變化。

確認 ECHAM5 與 MOM2 耦合有能力模擬出聖嬰現象後，於往後的研究中吾人將嘗試使用此海氣耦合模式進行短期氣候預報的測試。

參考文獻：

- Pacanowski, S., 1995: MOM2 documentation user's guide and reference manual Version 1.0, GFDL Tech. Rep. 3.
- Roeckner, E., G. Bauml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner, L. Kornbueh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida, A. Tompkins, 2003: The atmospheric general circulation model ECHAM5 Part I: Model description. MPI-Report NO. 349, 127pp.