

第二章 資料及模式介紹

2.1 使用資料

本研究所使用之資料主要有美國國家環境預測中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)之再分析資料(NCEP Reanalysis 2), 美國國家海洋及大氣管理局 (The National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供之 Simple Ocean Data Assimilation (SODA)2.02 版本海洋同化資料, 美國國家海洋資料中心(National Oceanographic Data Center, NODC)提供之 World Ocean Atlas 2001 海溫資料, 以及政府間氣候變遷委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第四次評估報告中所提供之數值模式輸出資料, 有關上述資料之詳細介紹將在以下個別說明。

(一) 大氣資料

驅動海洋模式之大氣風場資料使用 NCEP 所提供之再分析資料(NCEP R-2), 該資料主要變更模式物理計算程序的參數設定, 以修正前一版本(NCEP R-1)資料的誤差。涵蓋時間由 1979 年 1 月至 2008 年 12 月, 時間解析度為月平均(monthly)資料。空間解析度為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 資料之水平範圍為 $90^{\circ} \text{N} \sim 90^{\circ} \text{S}$; $0 \sim 357.5^{\circ} \text{E}$ 之全球網格資料, 垂直方向共分 17 層, 由 1000 百帕(hPa)至 10 百帕。研究中所使用的變數為 1000hPa 之緯向風場(u)及經向風場(v), 選取時間範圍為 1980 年 1 月至 1999 年 12 月。關於 NCEP R2 資料的取得可至以下網址取得。

(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html>)

(二) 海洋資料

本研究所使用的海洋資料，包括美國國家海洋及大氣管理局 (The National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 提供之 Simple Ocean Data Assimilation (SODA) 2.0.2-3 版本海洋同化資料，SODA 是經由 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory MOM2 physics 發展的海洋模式將 World Ocean Atlas 之海溫與鹽度資料及測站觀測的水文資料、洋面溫度和測高儀資料進行同化處理所得的資料。該資料涵蓋時間由 1958 年 1 月至 2005 年 12 月，為月平均(monthly)資料，空間解析度為 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ，資料之水平範圍包含 $75.25^\circ \text{S} \sim 89.25^\circ \text{N}$; $0.25^\circ \text{E} \sim 0.25^\circ \text{W}$ ，垂直方向共分為 40 層，由海面下 5~5375 公尺(非等間距)。研究中所使用的變數包括海水溫度(temp, 單位 $^\circ\text{C}$)，鹽度(salt, 單位 g/Kg)，海洋經向流速(u, 單位 m/s)，緯向流速(v, 單位 m/s)，選取時間為 1980 年 1 月至 1999 年 12 月。關於 SODA 資料的取得可參考以下網址 (<http://www.atmos.umd.edu/~ocean/>)。

為了建構數值模式之陸地邊界以及海底地形，本研究採用 NOAA 所提供的 World Ocean Atlas 2001(WOA01) 高解析度版本海溫資料，該資料提供溫度以及鹽度 2 種變數之長期氣候平均值，時間解析度共有月平均(monthly)、季平均(seasonal)及年平均(annual)3 種，空間解析度為 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 共 1440×720 個水平網格點，垂直方向共分為 33 層，自海平面(0m)至海面下 5500 公尺(非等間距)，在本研究中僅選取年平均之海溫資料。WOA 海洋資料取得及其他介紹可參考下列網址。(http://www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA01/qd_ts01.html)

(三) IPCC 模式輸出資料

本研究使用 IPCC 第四次評估報告(IPCC AR4)中所提供的模式模擬資料做為

POP 模式之初始環境場，共選取 6 個數值模式，模式之基本設定列於表 1。

在大氣模式的部分，我們僅選取 6 個模式的水平風場 (u, v)，並計算此 6 個模式的合成風場，做為本實驗中的平均風場。海洋模式的部分，選取的變數有海水整層的溫度以及鹽度，由於各模式所提供的變數並不完全相同或是無法取得該資料，溫度的部分缺少 MIROC3.2 模式輸出資料，因此僅計算其餘 5 個模式的合成溫度場；鹽度場的部分則是缺少 MIROC3.2 與 CCSM3.0 的模式輸出資料，因此改為計算其餘 4 個模式之合成鹽度場。IPCC 模式資料可參考以下網址。
(<http://www.ipcc-data.org/index.html>)

2.2 模式介紹

本研究所使用之數值模式為 Parallel Ocean Program(POP)1.4.3 版本，為美國 Los Alamos 國家實驗室於 2002 年所發展的全球海洋環流模式(Oceanic General Circulation Model，OGCM)，為一個物理參數化較完備且複雜的海洋模式。另外，在此版本的 POP 模式中進行平行化運算，其優點為減少運算時間及提高空間解析度，對於高解析度之模擬實驗有很大的幫助，目前作為美國國家大氣研究中心(The National Center for Atmospheric Research，NCAR)所發展的海氣耦合模式 The Community Climate System Model(CCSM)中的海洋模式分量，在現行的海洋模式中其模擬結果具有較高的正確度，因此在探討海洋內部的動力及熱力過程的研究中經常使用 POP 模式。

模式的水平空間範圍為全球網格，垂直方向分為 33 層，為不等間距分層，深度愈深，每層之間間距也隨之變大，因此在淺層海洋具有較高之垂直解析度，深層海洋之垂直解析度較低。模式的水平空間網格配置方式為 B-Grid，如圖

2.1 所示，實線部分為 T-cell，斜線部分為 U-Cell, 模式中的物理量 (T, S, p, ρ) 位於” T-point”上且在 T-cell 的中心位置；水平方向的速度 (u_x, v_x) 位於” U-point”上且在 U-cell 的中心位置，因此我們在計算能量收支方程時需要將 u, v 轉換到與 T 相同的水平網格點上。

模式在垂直網格的配置如圖 2.2 所示， k 表示模式垂直方向第 k 層深，由左圖可以得知垂直速度 w 位於模式分層的深處，但 T-cell 與 U-cell 的變數則不處於模式垂直分層的界面上，而是位於二層的正中間處，因此實際進行運算時，需特別注意， $zt(k)$ 才是 T-cell 上的變數在模式中的實際深度。

POP 模式中的原始方程式包括動量方程(momentum equations)、連續方程(continuity equation)、靜力方程(hydrostatic equation)、狀態方程(equation of static)、傳輸方程(tracer transport)，以一般座標計算。方程式各項如下：

動量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} u + L(u) - uv \tan(\phi) / a - fv = \frac{-1}{\rho_0 a \cos \phi} \frac{\partial p}{\partial \lambda} + F_{Hx}(u, v) + F_v(u) \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} v + L(v) - u^2 \tan(\phi) / a + fu = \frac{-1}{\rho_0 a} \frac{\partial p}{\partial \phi} + F_{Hy}(u, v) + F_v(v) \quad (2.2)$$

$$L(\alpha) = \frac{1}{a \cos(\phi)} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} (u \alpha) + \frac{\partial}{\partial \phi} (\cos \phi v \alpha) \right] + \frac{\partial}{\partial z} (\omega \alpha) \quad (2.3)$$

$$F_{Hx}(u, v) = A_M \left\{ \nabla^2 u + u(1 - \tan^2 \phi) / a^2 - \frac{2 \sin \phi}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} \right\} \quad (2.4)$$

$$F_{Hy}(u, v) = A_M \left\{ \nabla^2 v + v(1 - \tan^2 \phi) / a^2 - \frac{2 \sin \phi}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} \right\} \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 \alpha = \frac{1}{a^2 \cos^2 \phi} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \lambda^2} + \frac{1}{a^2 \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} (\cos \phi \frac{\partial \alpha}{\partial \phi}) \quad (2.6)$$

$$F_v(\alpha) = \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial}{\partial z} \alpha \quad (2.7)$$

連續方程:

$$L(1)=0 \quad (2.8)$$

靜力方程:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (2.9)$$

狀態方程:

$$\rho = \rho(\theta, S, p) \rightarrow \rho(\theta, S, z) \quad (2.10)$$

傳輸方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \psi + L(\psi) = D_H(\psi) + D_V(\psi) \quad (2.11)$$

$$D_H(\psi) = A_H \nabla^2 \psi \quad (2.12)$$

$$D_V(\psi) = \frac{\partial}{\partial z} \kappa \frac{\partial}{\partial z} \psi \quad (2.13)$$

其中傳輸方程之 ψ 為 S 或 θ ，若 $\psi = S$ ，則(2.11)式為鹽度方程；若 $\psi = \theta$ ，則為位溫方程。 $\lambda, \psi, z = r - a$ 分別為經度、緯度以及相對於平均海平面 $r = a$ 之深度； g 為重力加速度； $f = 2\Omega \sin \phi$ 為科氏參數； ρ_0 為海水密度； u, v 分別為東西向以及南北向的速度； w 為垂直速度； p 為壓力； ρ 為密度； θ 為位溫； S 為鹽度，下標 H 表水平方向， V 表垂直方向之運動。 A_H, A_M 分別位溫及動量之水平擴散係數，在模式中之設定值為： $A_H = 2 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ ， $A_M = 2 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ ， κ, μ 為垂直擴散係數與垂直黏滯係數，模式中之設定值為： $\kappa = 0.25 \text{ cm}^2/\text{s}$ ， $\mu = 0.25 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

2.3 實驗設計

表 2 為本文所進行的實驗之整理，主要內容共可以分為暖化前(control)以及暖化後(warming)實驗 2 個部分，水平空間解析度為 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，為了比對提升解析度對於實驗結果的影響，因此本研究也設計了較高解析度之數值模擬，水平

空間解析度為 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。為了與實際海洋氣候態進行校驗，我們另外使用實際大氣風場資料進行了 10 年的模擬，因此本研究共進行了 5 個模擬實驗，垂直方向解析度則都為 0m~海面下 5500m 共分 33 層。為了讓模式到達穩定狀態，在開始實驗之前，必需先經過一段的模式調整時間，本實驗使用月資料的氣候平均月資料驅動 POP 模式，調整時間 (spin up) 為 10 年，模式的時間積分計算方式為跳蛙法 (leapfrog scheme)，其時間間隔 (time step) 的設定在低解析度實驗中為 3600 秒，在高解析度實驗中為 500 秒。

為了使海面持續接收太陽短波輻射與熱量維持，本研究利用平均氣候狀態的海表面溫度，作為表面熱通量的驅動場，維持模式的熱量，調整時間為 20 天進行一次。以下將介紹實驗的細部設定、資料的處理與選取，有關模式的參數設定，則另整理於表 3。

(一) 模式海底地形

關於 POP 模式的各層深度的地形建構，我們使用 WOA01 之高解析度海溫資料做為依據，在第一層上將有值的網格點判斷為海洋，該點如果為錯誤值則判斷為陸地，依此類推，就能得到每一深度之陸地地形。圖 2.2 為 POP 模式利用 WOA01 海洋資料所建構之全球海底地形分布，圖中的值由 0~5500m，代表每一個空間網格點上的海底陸地所在的深度。

(二) 初始環境場 (initial field)

本研究並無實際進行二氧化碳 (CO₂) 增量之長期模擬實驗，而是藉由 IPCC 第四次評估報告中所提供的數值模式中，選取 6 個模式之模擬結果中的海水溫度以及鹽度資料，並作系集平均 (ensemble mean) 所得到的結果，作為 POP 模

式的初始環境場。因此，我們選用 IPCC AR4 模擬二十世紀氣候實驗(20C3M)之月平均資料，計算其 1981 年到 1999 年的年平均，做為暖化前之平均環境場。由於本實驗目的在於探討暖化對於聖嬰之影響，因此暖化後之初始場使用 IPCC AR4 中溫度上升最多的 A2 情境(SRESA2)中 2080 年至 2099 年的月平均模擬資料，同樣計算其年平均，做為暖化後之環境場，最後再經由線性內插的方式，將 IPCC AR4 之資料轉換成實驗所需之 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 及 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的水平空間解析度。

(三) 風應力 (wind stress)

作為驅動 POP 模式的主要外力強迫項(forcing term)，本研究將風場分解為平均風場(\bar{V})及擾動風場(V')，平均風場的部分使用 IPCC AR4 的 20C3M 情境之水平風場，選取 1980 年 1 月到 1999 年 12 月的月平均資料，計算每個月之長期氣候平均值，再將其由風速轉換成模式所需之風應力，作為暖化前實驗之平均風場(\bar{V}_{CTRL})，風應力公式如下：

$$\tau = \rho_{air} C_D |V| * V \quad (2.2)$$

其中 τ 為風應力， ρ_{air} 為空氣之密度($1.3 \text{Kg}/\text{m}^3$)， C_D 為拖曳係數(1.5×10^{-3})，

V 為 1000hPa 之表面風速。暖化後同樣使用 IPCC A2 情境之 2080 年 1 月到 2099 年的模式模擬月平均資料，計算每月份之氣候平均值，再由 (2.2) 式轉換成風應力，作為暖化實驗之平均風場(\bar{V}_{WARM})。至於擾動風場(V')的部分，則是使用 NCEP R2 版本的風場資料，選取 1997 年 1 月至 1998 年 12 月的每個月的月平均資料，減去 1980 年至 1999 年的 1~12 月氣候平均值所得到的距平值(anomaly) 而得。因此本研究模擬聖嬰所使用之風場表示如下：

$$V_{CTRL} = \bar{V}_{CTRL} + V' \quad (2.3)$$

$$V_{WARM} = \bar{V}_{WARM} + V' \quad (2.4)$$

其中 V_{CTRL} 以及 V_{WARM} 分別代表暖化前與暖化後聖嬰事件期間的月平均風場。



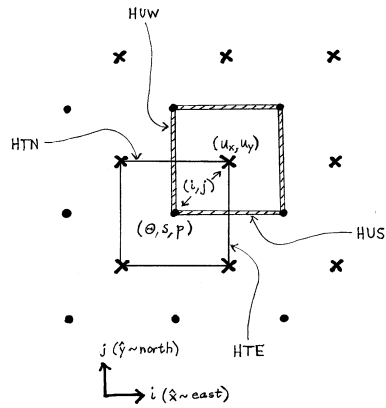


圖 2.1: 水平 B-Grid 網格，座標中 x 方向向右為正(通常為東方)， y 方向向上為正(通常為北方)。

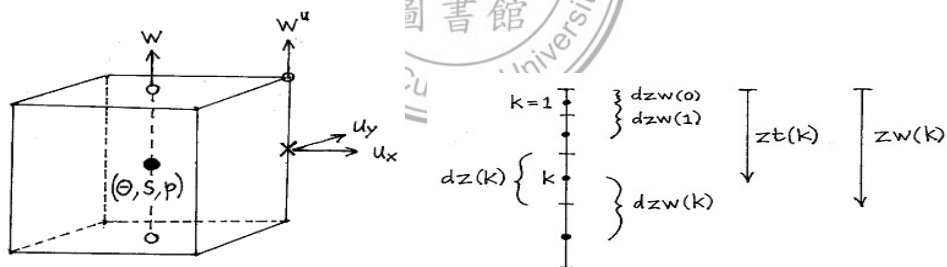


圖 2.2: POP 模式之垂直網格配置， k 表示模式第 k 層深度。

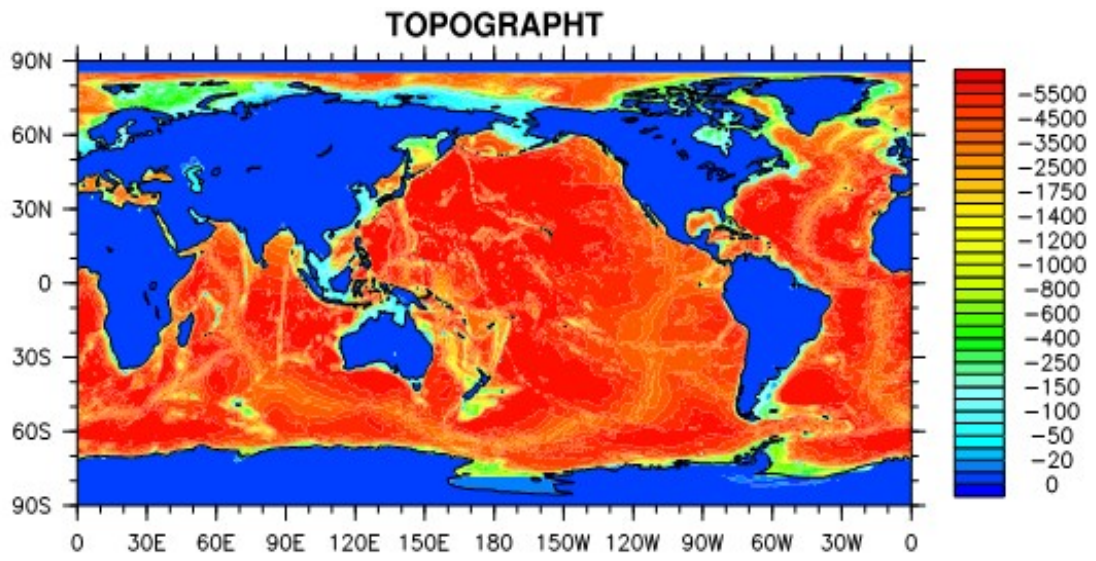


圖 2.3: POP 模式海底地形圖。



表 1: IPCC AR4 提供之 6 個數值模式的基本資料及設定

| 模式名稱 | 大氣模式 | 海洋模式 | Coupling Flux Adjustment References |
|-------------|--------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| CCSM3.0 | 水平網格: 1.4°x1.4° 垂直分層: 26 層 | 水平網格: 0.3°-1°x1° 垂直分層: 40 層 | No adjustments |
| ECHAM5 | 水平網格: 1.9°x1.9° 垂直分層: 31 層 | 水平網格: 1.5°-1.5° 垂直分層: 40 層 | No adjustments |
| GFDL-CM2.1 | 水平網格: 2.0°x2.5° 垂直分層: 24 層 | 水平網格: 0.3°-1°x1° 垂直分層: 50 層 | No adjustments |
| GISS-AOM | 水平網格: 3°x4° 垂直分層: 12 層 | 水平網格: 3°x4° 垂直分層: 33 層 | No adjustments |
| MIROC3.2 | 水平網格: 2.8°x2.8° 垂直分層: 20 層 | 水平網格: 0.5°-1.4°x1.4° 垂直分層: 43 層 | No adjustments |
| UKMO-HADCM3 | 水平網格: 2.5°x3.75° 垂直分層: 19 層 | 水平網格: 1.25°x1.25° 垂直分層: 40 層 | No adjustments |



表 2 : POP 模式個別實驗之各項基本設定

| 模式設定 | EXP01 控制實驗 | EXP02 現在氣候態 El Niño 實驗 | EXP03 未來氣候態 El Niño 實驗 | EXP04 高解析度 現在氣候態 El Niño 實驗 | EXP05 高解析度 未來氣候態 El Niño 實驗 |
|-----------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 水平空間解析度 | 2.5°x2.5° | 2.5°x2.5° | 2.5°x2.5° | 0.25°x0.25° | 0.25°x0.25° |
| 垂直空間解析度 | 33 層 | 33 層 | 33 層 | 33 層 | 33 層 |
| 時間積分間隔 (time step) | 3600 秒 | 3600 秒 | 3600 秒 | 500 秒 | 500 秒 |
| 調整時間 (spin up) | 10 年 | 10 年 | 10 年 | 10 年 | 10 年 |
| 風場 | NCEP reanalysis 2 | IPCC 模式 平均風場 | IPCC 模式 平均風場 | IPCC 模式 平均風場 | IPCC 模式 平均風場 |

表 3: POP 模式個別實驗之各項參數設定

| 參數名稱 | 設定值 |
|-----------------|---------------------------------------|
| 位溫水平擴散係數 A_H | $2 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ |
| 動量水平擴散係數 A_M | $2 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ |
| 垂直擴散係數 κ | $0.25 \text{ cm}^2/\text{s}$ |
| 垂直黏滯係數 μ | $0.25 \text{ cm}^2/\text{s}$ |
| shf restore tau | 20 天 |