

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

子計畫三：南海與其鄰近海域間海洋互動機制之數值模式研究

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2611-M-002-014-

執行期間：93年08月01日至95年01月31日

執行單位：國立臺灣大學海洋研究所

計畫主持人：莊文思

共同主持人：梁文德

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 1 月 3 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

南海與其鄰近海域間海洋互動機制之數值模式研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 93-2611-M-002-014-

執行期間： 93年 8月 1日至 95年 1月 31日

計畫主持人：莊文思

共同主持人：梁文德

計畫參與人員：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：國立台灣大學海洋研究所

中 華 民 國 95 年 1 月 3 日

摘要

本計畫研究之海洋數值模式，將利用美國邁阿密大學發展的海洋數值模式 MICOM (Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model)，模式範圍為 95°E-160°E 及 20°S-45°N，水平解析度約 0.25°。預期模擬解釋 1960-2003 年間南海海洋溫度場與流場之年變化、年際變化、各聖嬰事件對南海的影響程度，及南海與其鄰近海域間海洋互動機制之探討。因模式將以時間間格為六小時之高頻風場驅動積分，模式結果亦可用以探討颱風對南海海洋之影響，風場資料則以歐洲中尺度氣候預報中心 (European Centre for Medium range Weather Forecasts, ECMWF) 2.5°X2.5°風場資料為主，並輔以較高解析度 (0.5°X0.5°) 的美國國家航空暨太空總署衛星風場資料，如 NSCAT (NASA Scatterometer) 及 QSCAT(NASA Quick Scatterometer)。

關鍵詞：數值模式、年變化、年際變化、聖嬰事件、南海。

Abstract

The Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model (MICOM) developed by University of Miami is organized and applied in this study. The model domain includes the western Pacific and the South China Sea with boundaries at 20.8°S, 45.1°N and 95°E, 160°E. The horizontal grid is defined on a Mercator projection with resolution given by $1/4^\circ \times 1/4^\circ \cos\phi$ (meridional \times zonal), where ϕ is the latitude. The model results of year 1960-2003 will be used to explore the annual and inter-annual variations of thermal and current in the South China Sea (SCS), the influences of various El Niño events on the SCS, the interaction mechanism of the South China Sea with its adjacent seas. The model output forced by the 6hourly winds is also available in the discussion of the Typhoon effect on the SCS. The MICOM model is mainly forced by the ECMWF model wind of resolution 2.5°x2.5° and assisted by the high resolution 0.5°x0.5° of satellite wind data, e.g. NSCAT (NASA Scatterometer) and QSCAT(NASA Quick Scatterometer).

一、前言

主持人自 1999 年起，陸續配合國科會自然處之 1996-1999 年的『南海季風實驗』(South China Sea Monsoon EXperiment, SCSMEX)、1999-2002 年的『黑潮上游區海洋動力學實驗』(Kuroshio Upstream Dynamics EXperiment, KUDEX)與 1999-2004 年的『亞洲海域國際聲學實驗』(Asian Seas International Acoustic EXperiment, ASIAEX)等整合型研究計畫中，提出子計畫申請，從事南海與呂宋海峽之海流錨碇觀測與建立南海環流數值模式，探討黑潮入侵北南海之現象及南海環流與水文場之變化。

本計畫進度在風場資料的收集大致已完成，包含 1960-2002 年 ECMWF 及 1999-2004 年 QSCAT/NCEP 6 小時高頻風場，目前資料正進行整理轉換中，以便後續模式使用與風場資料分析研究用；高解析度($0.1^\circ \times 0.1^\circ$)MICOM 模式目前正測試中，【圖 1】為初步結果，左為原先 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 模式結果，右為 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 模式結果，以台灣海峽為例，海流經澎湖水道口北向時，因受地形影響成順時鐘彎曲之現象，在高解析度模式中已可模擬出。後續將建立與測試另一 HYCOM 模式，並繼續執行 MICOM 模式，模擬解釋南海海洋溫度場與流場於 1960-2005 年間之年變化、年際變化、各聖嬰(El Niño)事件對南海的影響程度及南海與其鄰近海域間海洋互動機制之探討。

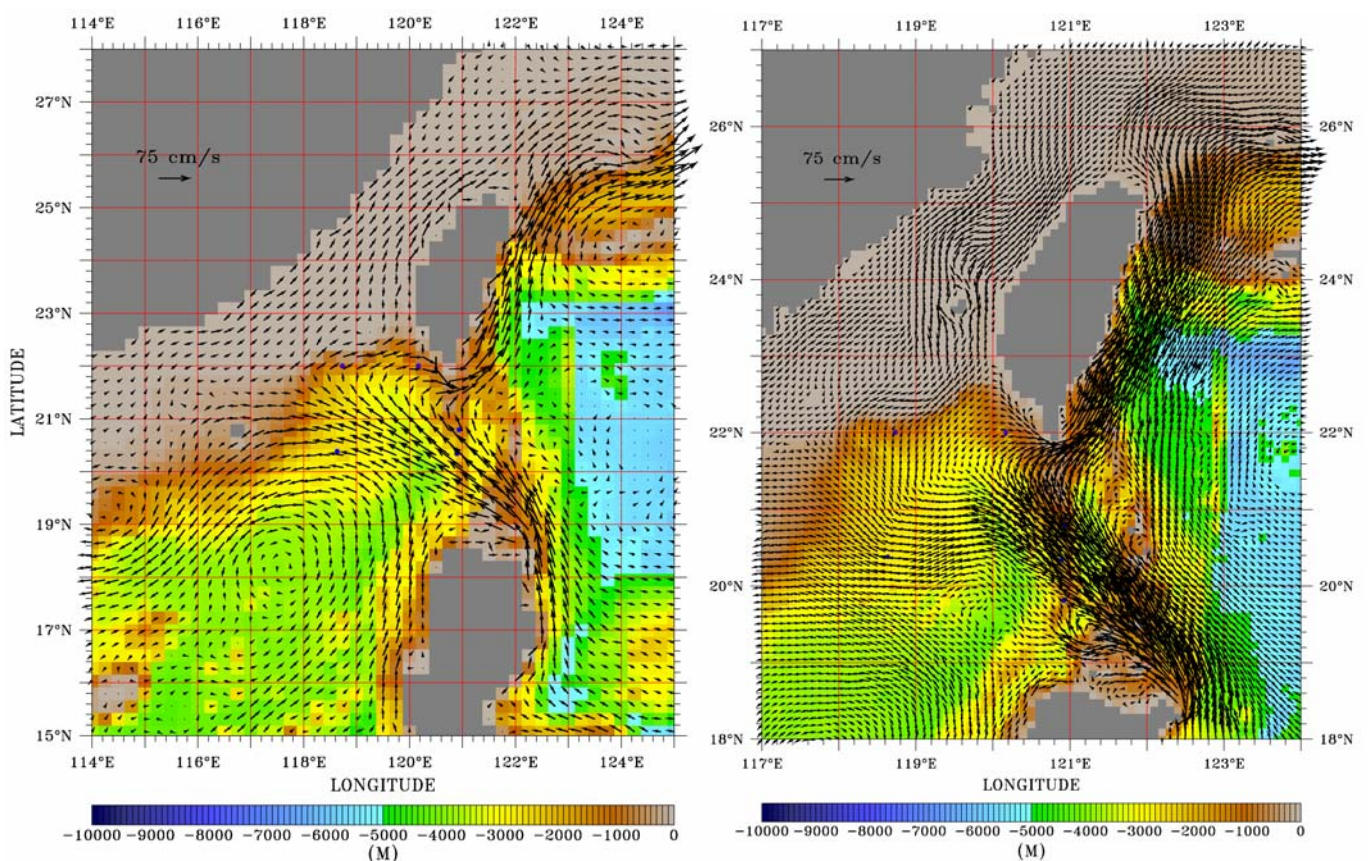


圖 1. 數值模式表面流場。左為 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 模式結果，右為 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 模式結果。

二、研究計畫之背景及目的

先前對於南中國海 (South China Sea) 的海洋數值模式研究瞭解，常是基於氣候平均值或衛星遙測結果，缺乏長期實測資料作佐證，加上受電腦硬體限制，模式解析度無法提升，且其開口邊界值仍大多利用早期 Wyrski (1961) 所觀測的資料。雖然南海為西太平洋最大之邊緣海，在國外之全球或太平洋海洋數值模式研究中，往往被省略或簡化了一些開口邊界，其在南海的模式結果仍不盡理想，因為南海並非其研究重點。近年來，在國家科學委員會的支助計畫下，相繼在 SCSMEX、KUDEX、ASIAEX 等之整合型研究計畫中，已陸續於台灣、呂宋海峽及南海附近海域測得較長期連續的溫度場及流場等之實測資料，然而一些所觀測到的現象，仍無法單由實測資料加以解釋。因此在 VANS/WISE 研究計畫共同合作下，除了持續進行現場錨碇觀測外，台灣方面也將於 VANS 計畫中建立與執行各種現今較成熟之海洋數值模式於南海與台灣附近海域，如 level model (MOM)、sigma coordinate model (POM)、isopycnic coordinate model (MICOM)、hybrid coordinate model (HYCOM) 等，利用實測資料做驗證，及藉由數值模式結果來模擬解釋所觀測到的海洋變化與動力機制，並且各個不同垂直座標系統的數值模式之間亦可做比較，對於南海環流能有更進一步的瞭解。

本計畫著重在利用海洋數值模式結果，模擬解釋南海海洋溫度場與流場於 1960-2003 年間之年變化、年際變化、各聖嬰(El Niño)事件對南海的影響程度及南海與其鄰近海域間海洋互動機制之探討。計畫中所採用之海洋數值模式利用美國邁阿密大學發展的海洋數值模式 MICOM (Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model)，模式範圍為 95°E - 160°E 及 20°S - 45°N ，水平解析度約 0.25° 。此模式已成功運用於南海，用以解釋 1997-2001 年間南海海洋溫度場與流場之年變化、年際變化及 1997/1998 聖嬰事件影響 (梁, 2002; Liang et al., 2003)，並用以解釋黑潮於呂宋海峽入侵南海之動力機制 (Tang et al., 2003)。計畫預期模擬解釋 1960-2003 年間南海海洋溫度場與流場之年變化、年際變化、各聖嬰事件對南海的影響程度，及南海與其鄰近海域間海洋互動機制之探討。因模式將以時間間格為六小時之高頻風場驅動積分，模式結果亦可用以探討颱風對南海海洋之影響。同時建立執行另一高解析度 ($0.1^{\circ}\text{X}0.1^{\circ}$) 的 MICOM 模式，因為此模式積分需要較長的時間，其積分結果並續以高解析度之衛星風場積分，配合實測資料作分析研究用。而未來更將逐步轉移 MICOM 模式至 Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM)，進行平行化運算，以降低積分時間，並可提高模式之水平與混合層解析度。

三、研究方法

本計畫著重在利用海洋數值模式結果，模擬解釋南海海洋溫度場與流場於 1960-2005 年間之年變化、年際變化、各聖嬰(El Niño)事件對南海的影響程度及南海與其鄰近海域間海洋互動機制之探討。計畫中所採用之海洋數值模式為 MICOM (Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model)，模式範圍為 95°E-160°E 及 20°S-45°N (如【圖 2】)，水平解析度約 0.25°。此模式已成功運用於南海，用以解釋 1997-2001 年間南海海洋溫度場與流場之年變化、年際變化及 1997/1998 聖嬰事件影響

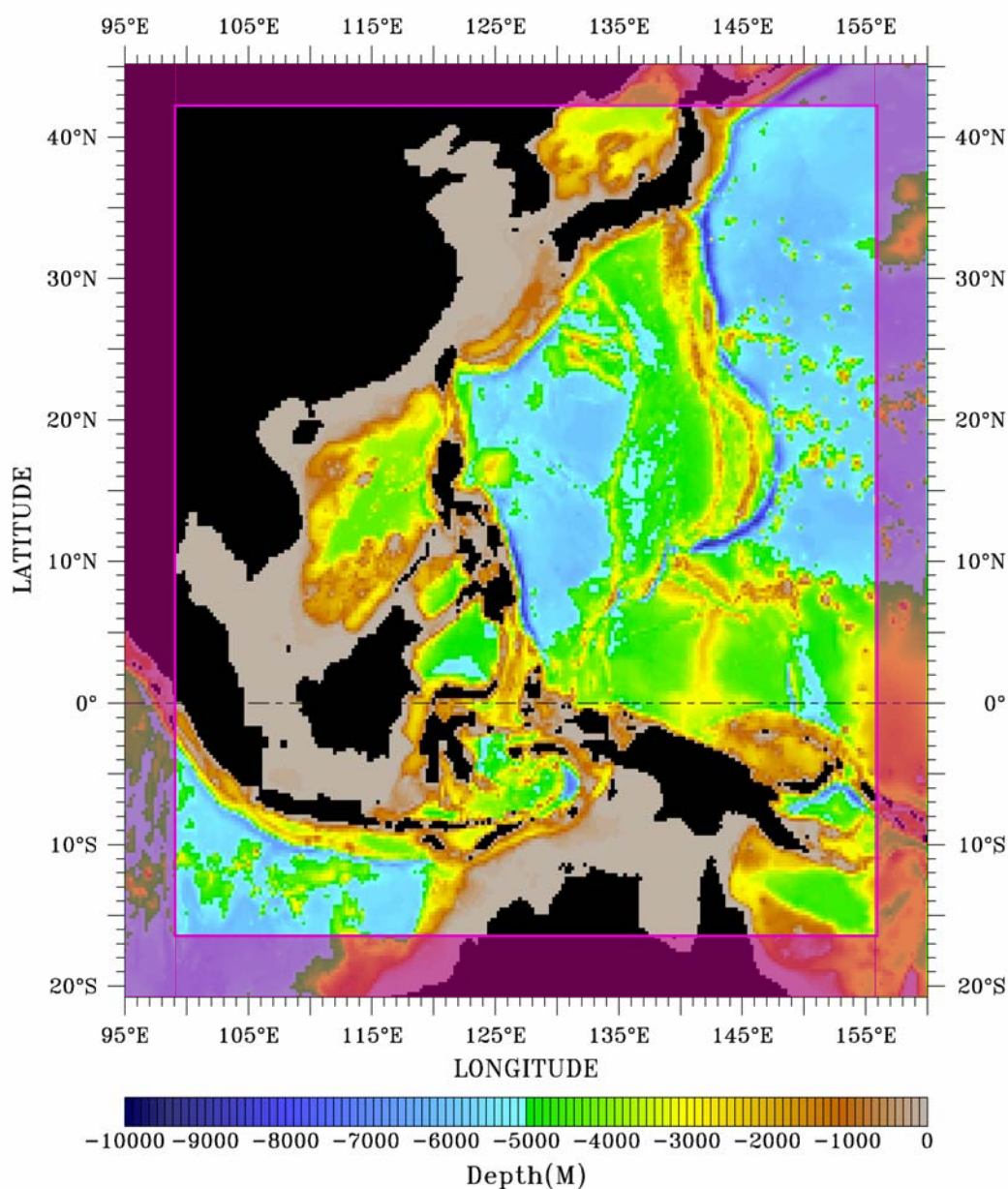


圖 2 為模式執行之範圍，紫色陰影區域為邊界緩衝區(buffer zone)。

(梁, 2002; Liang et al., 2003), 並用以解釋黑潮於呂宋海峽入侵南海之動力機制 (Tang et al., 2003)。計畫預期模擬解釋 1960-2005 年間南海海洋溫度場與流場之年變化、年際變化、各聖嬰事件對南海的影響程度, 及南海與其鄰近海域間海洋互動機制之探討。因模式將以時間間格為六小時之高頻風場驅動積分, 模式結果亦可用以探討颱風對南海海洋之影響, 風場資料則以歐洲中尺度氣候預報中心 (European Centre for Medium range Weather Forecasts, ECMWF) $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 風場資料為主, 並輔以較高解析度 ($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$) 的美國國家航空暨太空總署衛星風場資料, 如 NSCAT (NASA Scatterometer) 及 QSCAT (NASA Quick Scatterometer)。同時建立執行另一高解析度 ($0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$) 的 MICOM 模式, 因為此模式積分需要較長的時間, 其積分結果將於後續申請計畫第一年, 續以高解析度之衛星風場積分, 配合實測資料作分析研究用。大致上, 前述兩個數值模式已建立完成, 待高記憶體容量及運算速度之叢集式電腦 (Cluster Computer) 採購完成, 便可執行計畫。計畫將逐步轉移 MICOM 模式至 Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM), 進行平行化運算, 已降低積分時間, 並可提高模式之水平與混合層解析度。

3.1 模式理論

計畫中有關海洋之數值模式研究, 於計畫初期先採用 Miami Isopycnic Coordinate Ocean Model (MICOM), 此為美國邁阿密大學發展的海洋 layer 數值模式 (Bleck and Smith, 1990; Bleck et al., 1992; Bleck and Chassignet, 1994; Black, 1998), 其主要特性是 layer model 的等密性平流 (isopycnic advection) 及可控制躍密運動 (diapycnal motion), 使水團在水平方向上可維持其特性及防止類似在 level model 容易產生的深層水團溫度增高之現象 (Megann and New, 2001; Paiva et al., 1999); 另外各密度層間的垂直流切 (vertical shear) 及傾斜 (tilting), 使得 layer model 適用於強斜壓流區域, 如黑潮、墨西哥灣流 (Paiva et al., 1999)。此模式已被廣泛應用於北大西洋 (New et al., 1995; Paiva et al., 1999; Willebrand et al., 2001) 及北太平洋 (Victoria et al., 2001; Megann and New, 2001) 的研究。梁(2002)已利用此模式模擬解釋南海上層海洋溫度場與流場變化的動力機制。由於 MICOM 除了混合層外, 其下各層為等密度層, 在淺水地區往往等密度層厚度為零, 而浪費垂直座標上的解析度。因此在後續的模式研究上將逐步轉移至 Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM, Halliwell et al., 1998; Bleck,

2002), HYCOM 是由 MICOM 原始程式所改寫, 並可作平行運算, 增快計算速率, 其主要是改善 MICOM 的混合層在垂直座標上的解析度, 借用等密度層為零的座標至混合層, 以改善在淺水區的模擬。另外 HYCOM 也增加其混合層計算方法的選擇, MICOM 採用的是 Kraus-Turner 型式的表面混合層(Kraus and Turner, 1967), HYCOM 則增加了 K-Profile Parameterization (KPP, Large et al., 1994;1997)、Dynamical instability model (Price et al., 1986)及 Mellor-Yamada level 2.5 turbulence closure(Mellor and Yamada, 1982; Mellor, 1998)等方法。因為至今並無完美的單一方法可以解釋表面混合層的垂直混合 (vertical mixing)過程及其對海洋環流及氣候的影響, 而藉由上述各種方法尋求較合適的混合層計算方法, 以達到較真實的模擬結果。

MICOM 及 HYCOM 兩者之模式理論與架構大致相同, 此節是以 Bleck and Smith (1990) 與 Bleck 等 (1992) 的文章論述及模式程式使用手冊(Langlois, 1997)為參考, 節錄說明 MICOM 模式之理論。其為一基本方程數值模式, 包含四個預報方程式, 用以描繪解釋海洋在其動量、質量、熱量, 鹽度之變化過程。此多層等密度海洋模式是以位密度 (potential density) 為垂直座標軸, 即將海洋分成一組互相堆疊的等密度層, 而各層之動力控制方程則類似於淺水方程(shallow-water equation)。最上層為一 Kraus-Turner 型式的表面混合層 (surface mixed layer) (Kraus and Turner, 1967), 其下為各等密度層 (isopycnic layer); 於表面混合層, 溫度及鹽度均為預報變數 (prognostic variable), 而在等密度層, 鹽度為預報變數, 溫度則由鹽度及密度作診斷。表面混合層用以連結外部作用力 (風、溫鹽) 與其下之等密度層。變數在水平方向採用 Arakawa C 格點配置。模式利用 split-explicit numerical scheme 將預報變數 (prognostic variable) 分解成為正壓及斜壓兩分量作時間積分, 此方法比 rigid-lid scheme 數值運算快, 且可產生海表面高度 (sea surface height)。正壓解利用 forward-backward scheme, 解決其會隨著時間偏移的問題, 即在連續方程中用前一時間的質量 (forward scheme), 而在動量方程中用後一時間的壓力 (backward scheme)。而斜壓解則可以較長之時間間隔, 用 leapfrog scheme 積分。

以 s 代表廣義垂直座標 (Bleck, 1978), 表面混合層及各等密度層之共用預報控制方程如下:

水平動量方程

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t_s} + \nabla_s \cdot \frac{\bar{v}^2}{2} + (\zeta + f)\bar{k} \times \bar{v} + \left(\bar{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) \frac{\partial \bar{v}}{\partial p} + \nabla_\alpha M = -g \frac{\partial \tau}{\partial p} + \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right)^{-1} \nabla_s \cdot \left(\bar{v} \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s \bar{v} \right) \quad \dots(1)$$

連續方程

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left(\frac{\partial p}{\partial s} \right) + \nabla_s \cdot \left(\bar{v} \frac{\partial p}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} \right) = 0 \quad \dots(2)$$

溫鹽守恆方程

$$\frac{\partial}{\partial t_s} \left(\frac{\partial p}{\partial s} T \right) + \nabla_s \cdot \left(\bar{v} \frac{\partial p}{\partial s} T \right) + \frac{\partial}{\partial s} \left(\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s} T \right) = \nabla_s \cdot \left(\nu \frac{\partial p}{\partial s} \nabla_s T \right) + H_T \quad \dots(3)$$

其中

$\bar{v} = (u, v)$: 水平速度向量

p : 壓力

T : 溫度或鹽度

$\alpha = \rho^{-1}$: 比容

$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x_s} - \frac{\partial u}{\partial y_s}$: 相對渦度

$M \equiv gz + p\alpha$: Montgomery potential

g : 重力加速度

f : 科氏參數

\bar{k} : 垂直單位向量

ν : 渦動黏滯係數

τ : 風應力或底部摩擦剪應力

H_T : 作用於 T 之外部來源

$\dot{s} \frac{\partial p}{\partial s}$: 垂直質量通量

另外附加運用的三個診斷方程分別為：1.)流體靜力方程 $\frac{\partial M}{\partial \alpha} = p$ ，2.)狀態方程，為 T 、 S 及 α 的關係式，及 3.)紊流動能平衡方程 (turbulence kinetic energy balance equation)，用以計算混合層深度 (Bleck et al., 1989)。

式中的 H_T 在混合層時，即是海洋與大氣界面的淨熱通量 (B)，而海洋與大氣之間的热交換可分為三種型式：a.)輻射交換 (radiative exchanges)，即入射太陽熱輻射量與海表面散失的熱輻射量間的平衡。b.)紊流熱傳輸 (turbulent heat transfer)，一為海水蒸發所引起的潛熱 (latent heat) 傳輸，另一為因海水與大氣間的顯著溫度差異所引起的對流產生的顯熱 (sensible heat) 傳輸。c.)動能傳輸 (mechanical energy transfer)，基本上

為風場變化所引起。所以淨熱通量

$$B=R+H+\zeta,$$

R 為淨輻射量， H 為顯熱 (sensible heat)， ζ 為潛熱 (latent heat)。而

$$H=C_{pair}E_x(T_s-T_a),$$

$$\zeta=E_xL(H_u-E_v),$$

其中 $E_x=\rho_aC_TW$ ， ρ_a 為大氣密度， C_T 為熱傳輸係數， C_{pair} 為空氣比熱， T_s 為海表面溫度， T_a 為大氣邊界層溫度， W 為風速， L 為蒸發潛熱， H_u 為比濕， E_v 為蒸發量。(Langlois, 1997)

3.2 模式設定

3.2a 模式範圍：

初步將先設定執行一較大範圍的模式區域，整個數值模式計算範圍將包含南中國海及西太平洋，東西向從 95°E 至 160°E ，而南北向從 20.8°S 至 45.1°N ，其中四周圍各包含約 4° (16 個格點) 的緩衝區 (buffer zone)，最小水深為 20 m。經緯向的格點間距分別為 $1/4^\circ \cdot \cos\phi$ 及 $1/4^\circ$ ， ϕ 為緯度。水深是由 ETOPO5 的 5 分 \times 5 分資料線性內插而得。垂直方向則分成混合層及 15 個密度層，混合層最小厚度為 10 m，等密度層厚度允許為零，等密度層則主要配置在垂直密度梯度大的上層海洋區域。位密度以表面壓力為參考壓力 (reference pressure)，即為 σ_0 ，未包含溫壓效應 (thermobaricity effect)，如 Sun 等 (1999) 所討論的影響。

3.2b 初始條件：

模式是從一靜止海洋狀態開始積分，正壓場時間間隔為 30 秒，斜壓場時間間隔為 18 分鐘，初始的水文場為 World Ocean Atlas 1994 (WOA1994)(Levitus and Boyer, 1994; Levitus 等, 1994) 一月的溫、鹽氣候平均資料，混合層需輸入溫鹽資料，而其下之等密度層則只需要鹽度資料，溫度由狀態方程反算求得。

3.2c 邊界條件：

陸地側邊邊界條件為 no-slip，即切線速度為零。開口邊界條件則採用 relaxation 方法，即將在緩衝區的模式值逐漸恢復至 WOA1994 各月的氣候平均值，在最內側格點上，混合層的溫度、鹽度與壓力及等密度層的鹽度與壓力於 5 日內恢復至各月的氣候平

均值，最外側格點上則是在 30 日內，而經由斜壓調整 (baroclinic adjustment) 以恢復其在緩衝區的垂直流切。

3.2d. 外力：

模式所受之外力有風場及溫鹽變化。風場資料為 ECMWF 的氣候月平均風應力，淨熱通量 B (net heat flux) 資料由 COADS (da Silva 等, 1994) 的氣候月平均氣溫、比濕、淨輻射量及 EC 氣候月平均風速求得，鹽度變化由 COADS 氣候月平均降雨量計算而得。

大模式將先以氣候平均風場積分 50 年，後以此第 50 年的結果，繼續以 1960-2005 年六小時間格的 ECMWF 或衛星風場積分。 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 模式設定大致同上述模式設定。

四、結果與討論

本子計畫利用海洋數值模式結果，模擬解釋南海海洋溫度場與流場於 1960-2003 年間之年變化、年際變化、各聖嬰(El Niño)事件對南海的影響程度及南海與其鄰近海域間海洋互動機制之探討。而建立中之 HYCOM 模式除了可用於水文場與流場之模擬，因其能更精細解析混合層及淺水區域，因此可供水中聲學之研究。

參考文獻：

- Bleck, R. (1978), Finite difference equations in generalized vertical coordinates. Part I: Total energy conservation. *Contrib. Atmos. Phys.*, **51**, 360-372.
- Bleck, R., and L. T. Smith (1990), A wind-driven isopycnic coordinate model of the North and Equatorial Atlantic Ocean. 1: Model development and supporting experiments., *J. Geophys. Res.*, **95**, 3273-3285.
- Bleck, R., H. P. Hanson, D. Hu, and E. B. Kraus (1989), Mixed layer-thermocline interaction in a three-dimensional isopycnic coordinate model. *J. Phys. Oceanogr.*, **19**, 1417-1439.
- Bleck, R., C. Rooth, D. Hu, and L. T. Smith (1992), Salinity-driven thermocline transients in a wind- and thermohaline-forced isopycnic coordinate model of the North Atlantic, *J. Phys. Oceanogr.*, **22**, 1486-1505.

- Bleck, R., C. and E. Chassignet (1994), Simulating the oceanic circulation with isopycnic-coordinate models. In: Majumdar, S.K. (Ed.), *The Oceans: Physical-Chemical Dynamics and Human Impact*. 17-39.
- Bleck, R. (1998), Ocean modeling in isopycnic coordinates. *Ocean Modeling and Parameterization*, E.P. Chassignet and J. Verron Eds., NATO Sciences Series C, Vol. 516, Kluwer, 423-448.
- Bleck, R.(2002), An Oceanic General Circulation Model Framed in Hybrid Isopycnic-Cartesian Coordinates, *Ocean Modelling*, Vol. 4, 55-88, 2002.
- da Silva, A. M., C. C. Yang, and S. Levitus (1994), Atlas of surface marine data 1994. Technical Report. National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Farris, A and M. Wimbush (1996), Wind-induced Kuroshio intrusion into the South China Sea. *J. Oceanogr.*, **52**, 771 - 784.
- Kraus, E. B. and J. S. Turner (1967), A one-dimensional model of the seasonal thermocline: II. The general theory and its consequence. *Tellus*, **19**, 98 - 106.
- Halliwel Jr., G.B., R. Bleck and E. Chassignet (1998), Atlantic ocean simulations performed using a new Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM). *EOS, Fall AGU Meeting*.
- He, Y., C. Guan, and Z. Gan (1997), Interannual and interdecadal variations in heat content of the upper ocean of the South China Sea, *Advances in Atmospheric Sciences*, **14**, 271-276.
- Hellerman, S. and M. Rosenstien (1983), Normal Monthly Wind Stress over the World Ocean with Error Estimates, *J. Phys. Oceanogr.*, **13**, 1093 - 1104.
- Kraus, E. B. and J. S. Turner (1967), A one-dimensional model of the seasonal thermocline: II. The general theory and its consequence. *Tellus*, **19**, 98 - 106.
- Langlois, G. (1997), MICOM User's Manual:Details of Numerical code., France (in French). Translated and revised in English by D. Brydon, R. Bleck and S. Dean, USA.
- Large, W. G., J. C. McWilliams and S. C. Doney (1994), Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Rev. Geophys.*, **32**, 363 - 403.
- Large, W. G., G. Danabasoglu, S. C. Doney and J. C. McWilliams (1997), Sensitivity to

- surface forcing and boundary layer mixing in a global ocean model: Annual-mean climatology. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 2418 - 2447.
- Levitus, S. (1982), *Climatological atlas of the World Ocean*. NOAA Professional Paper No. 13, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 173pp.
- Levitus, S. and T. P. Boyer (1994), *World Ocean Atlas 1994*. Vol. 4: Temperature, NOAA, 117pp.
- Levitus, S., R. Burgett, and T. P. Boyer (1994), *World Ocean Atlas 1994*. Vol. 3: Salinity, NOAA, 99pp.
- Liang, W.-D., C.R. Wu, Y.J. Yang, Tang, T.Y. and W.-S. Chuang (2003): Thermal and Current Variations in the South China Sea II: Numerical Modeling. *J. Geophys. Res.*, will submit.
- Metzger, E. J., H. E. Hurlbert (1996), Coupled dynamics of the South China Sea, the Sulu Sea, and the Pacific Ocean, *J. Geophys. Res.*, **101**, 12331-12352.
- Metzger, E. J., H. E. Hurlbert (2001), The importance of high horizontal resolution and accurate coastline geometry in modeling South China Sea inflow, *Geophys. Res. Lett.*, **101**, 12331-12352.
- Megann, A. and A. New (2001), The effect of resolution and viscosity in an isopycnic-coordinate model of the Equatorial Pacific, *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 1993-2018.
- Mellor, G. L. and T. Yamamda (1982), Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851-875.
- Mellor, G. L. (1998), Users Guide for a Three-Dimensional, Primitive Equation Numerical Ocean Model. Available on the Princeton Ocean Model web site.
- New, A. L., R. Bleck, Y. Jia, R. Marsh, M. Huddleston, and S. Barnard (1995), A isopycnic model study of the North Atlantic. Part I: Model experiment, *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 2667-2699.
- Paiva, A. M., J. T. Hargrove, E. P. Chassignet, and R. Bleck (1999), Turbulent behaviour of a fine mesh (1/12°) numerical simulation of the North Atlantic. *J. Mar. Syst.*, **21**, 1978-1985.

- Sun, S., R. Bleck, C. G. H. Rooth, J. Dukowiz, E. P. Chassignet, and P. Killworth (1999), Inclusion of thermobaricity in isopycnic-coordinate ocean models. *J. Phys. Oceanogr.*, **22**, 1486-1505.
- Tang, T.Y., W.-D. Liang, Y.J. Yang, and W.-S. Chuang (2003): Kuroshio intrusion in the Luzon Strait. *J. Phys. Oceanogr.*, in revised.
- Victoria, J. C. and M. R. Michele (2001), North Pacific subtropical-tropical gyre exchanges in the thermocline: simulations with two isopycnic OGCMs, *J. Phys. Oceanogr.*, **31**, 2590-2611.
- Willebrand, J., B. Barnier, C. W. Boening, C. Dieterich, P. Herrmann, P.D. Killworth, C. LeProvost, and A. New (2001), Circulation characteristics in three eddy-permitting models of the North Atlantic. *Prog. Oceanogr.*, **48**, 123-161.
- 梁文德 (2002) 南海上層海溫及海流變化之研究，博士論文，國立台灣大學海洋研究所。