

呂宋海峽渦旋之脫離與運動

江紫綾¹ 吳朝榮² 李忠潘³

¹國立臺灣師範大學地球科學系博士生

²國立臺灣師範大學地球科學系副教授

³國立中山大學海洋環境及工程學系教授

摘要

本研究利用 POM (Princeton Ocean Model) 建構一個高解析度的區域海流數值模式來模擬並描述南海 (South China Sea) 的流況。南海模式的範圍東西向介於 99° ~ 124° E, 南北向介於 2° ~ 27° N, 水平解析度為 $1/16^{\circ}$ x $1/16^{\circ}$, 垂直方向有 26 個 σ 層。利用較大模式範圍輸出之結果, 提供南海模式所需之初始及邊界條件, 並指定 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 的海表面溫度。本模式可重現南海季節、季內變化。渦旋脫離後向西行進的速率與此區域之第一斜壓羅士培波之行進速率 (~ 0.1 m/s) 相近, 可推論此區之渦旋主要是搭乘第一斜壓羅士培波向西行進。由於黑潮入侵強度的冬夏差異, 使得呂宋海峽附近之渦旋脫離週期於夏季較長為 90~120 天, 冬季較短為 40~50 天, 冬天形成之渦旋個數較多。

Eddies Shedding and Propagating in the Luzon Strait

Tzu-Ling Chiang Chau-Ron Wu Chung-Pan Lee

ABSTRACT

The present study used a higher resolution numerical model to simulate and describe the circulation of the South China Sea (SCS). The domain of SCS model is from 2° N to 27° N, and 99° E to 124° E. The horizontal grid size is $1/16^{\circ}$, and there are 26 sigma levels in the vertical. The SCS model derives its initial and open boundary conditions from a larger scale model and prescribes sea surface temperature from the AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). The SCS model is capable of reproducing the seasonal and intra-seasonal variations. The propagation speed of eddies is similar to that of the baroclinic Rossby waves (~ 0.1 m/s), suggesting that long Rossby waves have effects on eddies over the study region. The periods of eddy shedding estimated from Strouhal number are around 40 ~50 days in December and are about 90~120 days in August, respectively. The seasonal variability of the Kuroshio intrusion results in more eddies in winter than in summer.

一、緒論

南海 (South China Sea, SCS) (見圖 1) 面積約三百六十萬平方公里, 位於 0° ~ 23° N, 99° ~ 121° E 之間, 是太平洋地區最大的邊緣海。南海為一個東北—西南走向半封閉性的海盆, 四周由多個國家與島嶼環繞。其北方與中國大陸 (China) 相鄰, 東北方、東方、東南方分別與臺灣 (Taiwan)、菲律

賓 (Philippine)、巴拉望島 (Palawan) 相接, 南方為婆羅洲 (Borneo), 而西南方及西方分別為馬來半島 (Malay Peninsula) 及越南 (Vietnam)。

南海海盆的東半部為深水海域, 中央水深可達 5000 公尺以上, 東南海域多島群; 西半部水深較淺, 西北海域為大陸棚, 西南海域則為較寬廣的巽他陸棚 (Sunda Shelf) 與泰國灣 (Gulf of Thailand)。

如圖 1 所示，南海海水透過以下數個通道與周圍之水體交換，北方以臺灣海峽 (Taiwan Strait) 與東海 (East China Sea) 相連、東北以呂宋海峽 (Luzon Strait) 與太平洋 (Pacific Ocean) 相通，東南以民多羅海峽 (Mindoro Strait) 和巴拉巴海峽 (Balabac Strait) 與蘇祿海 (Sulu Sea) 相接，南方則經由麻六甲海峽 (Malacca Strait)、卡里馬達海峽 (Karimata Strait) 及賈士帕海峽 (Gasper Strait) 與印度洋及爪哇海 (Java Sea) 相連接。前述這些對外通道大多是水深較淺或水道狹窄的海峽，唯有東北部的呂宋海峽 (南北寬約 400 公里，水深最深可達 2000 公尺以上) 具有較廣闊及縱深的水道。因此在南海與其周圍鄰近海洋的動力交換過程上，呂宋海峽扮演著相當重要的地位 (Nitani, 1972; Chen and Huang, 1996; Wu et al., 1999; Metzger and Hurlburt, 2001; 梁, 2002)。

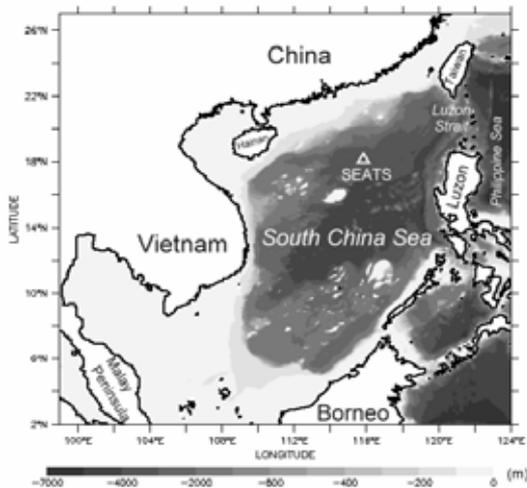


圖 1 南海模式之範圍與真實海底地形

二、研究方法及工具

本研究之數值模擬是採用美國普林斯頓大學所發展的三維動力海洋模式系統 (Princeton Ocean Model, POM)，建立了一個高解析度的南海數值模式 (SCS model)。POM 從 1970 年代開始發展以來，歷經多位學者專家共同合作研發改進後，現階段它已經成為全世界最多國家 (70 國) 且最多海洋數值模式學者 (超過 2100 人) 使用的三維動力海洋模式。POM 使用完整的三維原始方程式 (primitive

equation)，因為模式需要同時解三度空間的動量、溫度、鹽度、狀態以及連續方程式等，所以需要複雜的設計與計算，並使用大量的電腦 CPU 時間。不過相對來說，這樣的模式可以模擬更接近真實的海洋現象。在水平方向的格點配置上，採用的是 Arakawa C 格點。在垂直座標方面是採用 σ 座標，即在垂直方向上，每個分層的深度是由該點之水深來決定的，且每個等 σ 面會隨著地形而有所起伏，可用於處理地形起伏變化較大的地區。

圖 1 為本模式之範圍與真實海底地形，此範圍除了南海，亦包含了東海南部、臺灣海峽、部份的西菲律賓海與巽他陸棚等模式之積分區域，東西向介於 $99^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$ ，南北向介於 $2^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ ，其水平解析度為 $1/16^{\circ} \times 1/16^{\circ}$ ，垂直方向有 26 個 σ 層，在表面數層及底部數層採用較高之解析度。

本模式之初始及邊界條件是採用較大範圍之東亞邊緣海 (East Asian Marginal Seas, EAMS) (Wu and Hsin, 2005) 模式的輸出結果，利用線性內插而得。並使用每週一筆之 AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 衛星觀測的海表面溫度，其空間解析度為 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。模式積分時所受之表面外力為風應力 (wind stress)，是使用每六小時一筆之 QuickSCAT/NCEP 混合衛星風場資料，來提供模式計算時所需之表面外力。

三、比較與驗證

一個令人信服的數值模式需要能成功地重建 (reproduce) 觀測資料結果。因此模式的建立過程中與觀測資料進行比對與驗證的工作是相當重要的。模式結果顯示，南海表層流況有明顯的季節性變化。夏季 (8 月) (圖 2(a)) 時西南季風盛行，南海海盆呈現北為逆時鐘、南為順時鐘兩個不同的環流系統，且於越南東南側 ($11^{\circ}\text{N}\sim 14^{\circ}\text{N}$ 間) 有東向的噴流，噴流之北方有一冷渦，此時，海水面高度呈現東南高、西北低之趨勢。冬季 (12 月) (圖 2(b)) 時轉為東北季風，故整個海盆以一氣旋式環流系統為主體，呂宋海峽的西南方有一冷渦。海水面高度呈現西南高、東北低之趨勢；此外於南海北部，有一夏季較冬季微弱且終年存在的氣旋式環流。前述結果與 Wyrki (1961)、Shaw and Chao (1994)、Chao 等 (1995)、Wu 等 (1999)、Ho 等 (2000)、Chern

and Wang (2003) 及 Liu 等 (2004) 研究相符。另外，南海區域之年平均流況以東北季風為主，此與過去研究結果 (Wyrki, 1961) 亦相同。

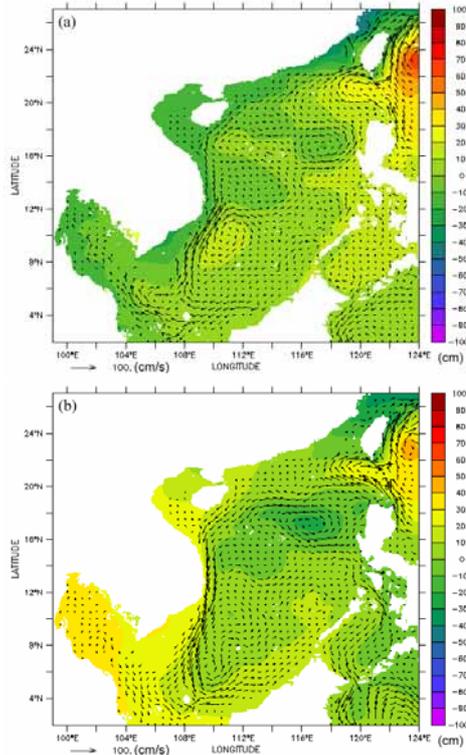


圖 2 南海模式五年 (1999-2003) 之 8 月(a)及 12 月 (b)0~50 公尺平均流場(箭頭)及平均海平面高度(底色)

SEATS 站 (18.25°N、115.67°E) 位於南海海盆北部 (見圖 1)，為一重要的長時間序列測站，提供較長期之觀測資料於北南海海洋學研究之用。圖 3 為 SEATS 站 2001 年觀測資料(a)與模式結果(b)之溫度垂直剖面圖。在上層海洋的溫度方面，模式結果與觀測資料，皆呈現明顯地季節變化，夏季溫度較暖 (可達 30 度左右)、冬季溫度較冷 (約 25 度)；50 公尺以下較無明顯之季節變化，而是呈現較高頻率的季內變化。

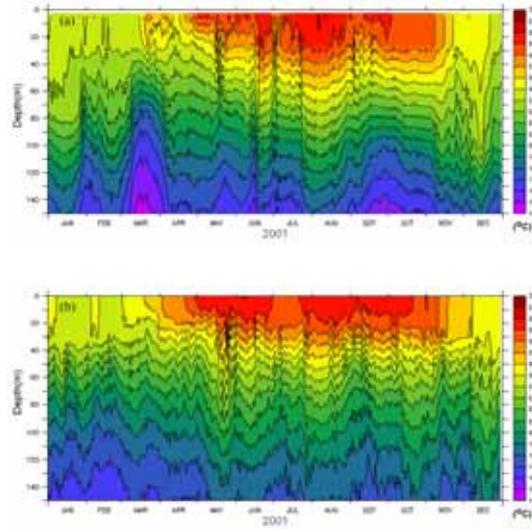


圖 3 SEATS 站 2001 年觀測(a)與模式(b)之溫度垂直剖面圖 (觀測資料由楊益博士提供)

四、結果與討論

圖 4 為渦旋脫離示意圖。由於岸邊摩擦力的關係，使得離岸流與靠岸流的速度場不一樣，引致正壓不穩定，而造成了一個逆時鐘的渦旋。在南海北部區域內也有這樣的現象，且逆時鐘的渦旋會脫離原本的流軸向西傳播，進而影響南海內部。

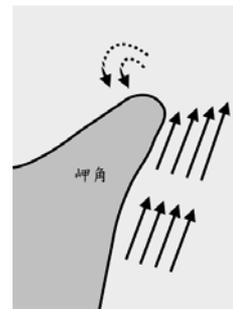


圖 4 渦旋脫離示意圖 (實線：海流、虛線：渦旋)

圖 5(a)~(d)分別為模式 2001 年 2 月 9 日、2001 年 2 月 25 日、2001 年 3 月 8 日及 2001 年 3 月 24 日之海平面高度異常值。於 2001 年 2 月 9 日時，可看見 A 渦旋位於 17.5°N、115.5°E 開始向西遠離 SEATS 站，此時在 SEATS 站東北方存在另一渦旋 B (20°N、119°E)，至 2001 年 3 月 8 日時 SEATS 站

剛好夾在 A、B 兩個渦旋之間，2001 年 3 月 24 日時 B 渦旋已經很接近 SEATS 站了(圖 5(a)-(d))。前述結果與 SEATS 站觀測資料之溫度場(圖 5(e))變化非常符合，當渦旋接近時溫度降低，渦旋遠離後則溫度上升。換句話說，當冷渦旋接近 SEATS 站時，會使得 SEATS 站的等溫線向表面上升，即固定深度之溫度值因冷渦旋的接近而下降；反之，當其遠離後則溫度上升。由此可知，冷渦旋的西傳會直接或間接地影響南海內部之水文場。

利用圖 5(a)-(d)渦旋 A 與 B 之行進，可估算出其行進速度。渦旋 A 從 17.5°N、115.5°E (2001 年 2 月 9 日)向西移動至 112°E (2001 年 3 月 24 日)，以及渦旋 B 從 20°N、119°E (2001 年 2 月 9 日)向西移動至 19°N、116.1°E (2001 年 3 月 24 日)，估算出渦旋向西行進的速度大約是 0.09~0.1 公尺/秒。

為了更進一步了解渦旋脫離之週期變化，除使用模式結果外，亦利用 AVISO (Archivage Validation Interprétation des données des Satellites Océanographiques, <http://www.aviso.oceanobs.com>) 多衛星海面高度異常資料 (Sea Level Anomalies) 進行比較。AVISO 為一整合了 Topex/Poseidon、Jason-1、ERS-1、ERS-2、EnviSat 及 Doris 等多顆衛星測高資料之資料庫。AVISO 之多衛星海面高度異常資料之時間解析度為 7 天一筆，空間解析度為 1/3°x 1/3°。

模式及 AVISO 之海面高度異常(表 1)皆顯示出 1999 至 2003 年間，冬季 (October、November、December; OND) 產生渦旋之頻率較夏天 (June、July、August; JJA) 大，約為 4.5~5 倍，平均一年 5~5.6 次 (約 65~73 天)。

我們可利用渦旋脫離理論，來推估渦旋形成之週期： $St = T \times w$ ， $U = 0.163 \pm 0.01$ (Sarpkaya and Isaacson, 1981)。其中 St 代表 Strouhal number，T 是渦旋脫離之週期，w 是呂宋海峽的寬度 (~350 公里)，U 是平均流速。Lee (2001) 曾利用此理論研究南極繞極流經南美洲大陸南端後，於其下游處之渦旋形成週期與聖嬰現象間之關係。

根據圖 6 得到，夏季的平均流速為 20~30 公分/秒、冬季的平均流速為 50~60 公分/秒，經由渦旋脫離理論可得到夏季的週期約為 90~120 天、冬季的週期約為 40~50 天。此結果與 SEATS 站觀測資料之溫

度場經過波譜分析的結果(圖 7)相當接近。由於冬季時渦旋脫離產生的渦旋個數，遠比夏季來的多，因此可得知此與冬季時黑潮入侵的機會比夏季多之現象有關。

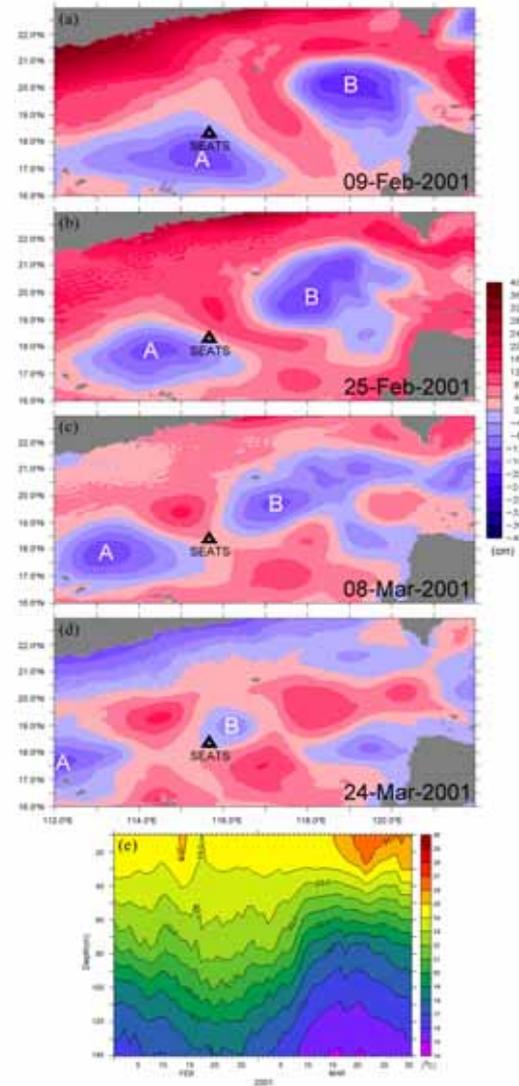


圖 5 (a)2001 年 2 月 9 日、(b)2001 年 2 月 25 日、(c)2001 年 3 月 8 日、(d)2001 年 3 月 24 日模式之海面高度異常及(e)SEATS 站 2001 年 2~3 月觀測資料之溫度垂直剖面圖

五、結論

運用巢狀箱合模式系統及提高水平解析度此兩種方式最主要目的，就是要提升模式模擬之結果，

表 1 AVISO 及模式之渦旋個數統計表
(夏天：6~8月、冬天：10~12月)

| AVISO | 1999 | 2000 | 2000 | 2001 | 2003 | 合計 |
|-------|------|------|------|------|------|----|
| 夏天 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 冬天 | 2 | 2 | 2 | 1 | 3 | 10 |
| 模式 | 1999 | 2000 | 2000 | 2001 | 2003 | 合計 |
| 夏天 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| 冬天 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 9 |

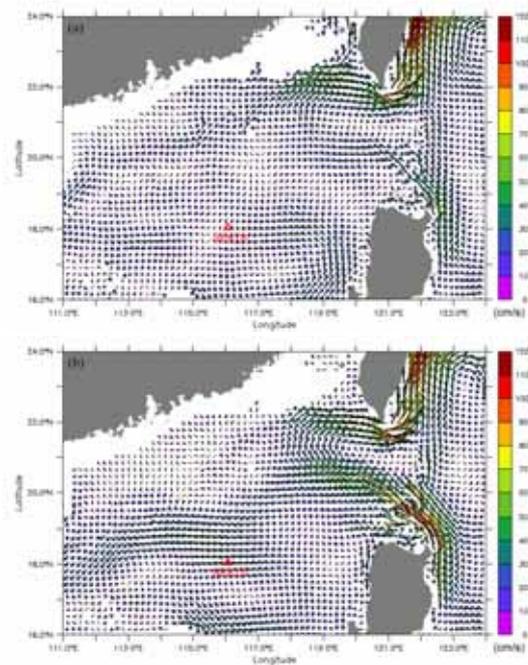


圖 6 南海東北區域 8 月(a)與 12 月(b)50 公尺之平均流況

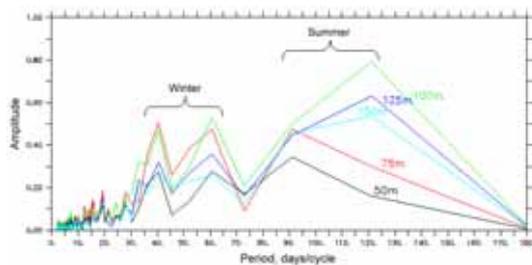


圖 7 SEATS 站觀測資料溫度場之頻譜分析圖

使模式能呈現出與觀測資料更為接近之模擬結果，甚至是能重現觀測結果。本研究中，較大區域之模式 (EAMS) 完整提供了良好的初始及邊界條件，使得南海模式無論在流況上或是水文上的模擬都與觀測相近。

模式結果及觀測資料皆指出，冬季時渦旋脫離較夏天頻繁，此乃受到黑潮入侵強度的影響。由於黑潮入侵強度的冬夏差異，使得呂宋海峽附近之渦旋脫離週期於夏季較長為 90~120 天，冬季較短為 40~50 天。渦旋脫離後的行進速度與第一斜壓羅士培波 (1st baroclinic Rossby wave) 的速度相當接近 (約 0.1 公尺/秒, Wu et al., 2005)。因此我們可推論此區的渦旋，主要是搭乘第一斜壓羅士培波向西行進 (此與 Hwang 等 (2004) 研究結果一致)，進而影響南海內部之水文及流況。

謝誌

感謝國家海洋科學研究中心楊益博士提供寶貴的 SEATS 站海溫觀測資料，以供本研究比較及驗證。

參考文獻

1. 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。
2. Chao, S. Y., Shaw, P. T. and Wang, J. (1995) "Wind relaxation as a possible cause of the South China Sea Warm Current," *Journal of Oceanography*, Vol. 51 (1), pp. 111-132.
3. Chen, C. T. A., and Huang, M.H. (1996) "A mid-depth front separating the South China Sea water and the Philippine Sea water," *Journal of Oceanography*, Vol. 52, pp. 17-25.
4. Chern, C. S. and Wang, J. (2003) "Numerical study of the upper-layer circulation in the South China Sea," *Journal of Oceanography*, Vol. 59, pp. 11-24.
5. Ho, C. R., Zheng, Q., Soong, Y. S., Kuo, N.J. and Hu, J.H. (2000) "Seasonal variability of sea surface height in the South China Sea observed with TOPEX/Poseidon altimeter data," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105 (C6), pp. 13981-13990.

- 6.Hwang, C. W., Wu, C. R. and Kao, R. (2004) "TOPEX/Poseidon observations of mesoscale eddies over the Subtropical Countercurrent: Kinematic characteristics of an anticyclonic eddy and a cyclonic eddy," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, C08013.
- 7.Lee, C. P. (2001) "A hypothesis on the cause of El Niño - the vortex shedding behind the South America (east of Drake passage)," (personal communication).
- 8.Liu, K. K., Chao, S. Y., Marra, J. and Snidvongs, A. (2004) "Monsoonal Forcing and Biogeochemical Environments of Outer Southeast Asia Seas. In: Robinson, A., Brink, K.H. (Eds.)," *The Sea* 14A, The Global Coastal Ocean: Interdisciplinary Regional Studies and Synthesis, Harvard Univ. Press, Cambridge.
- 9.Metzger, E. J. and Hurlburt, H. E. (2001) "The Nondeterministic nature of Kuroshio penetration and eddy shedding in the South China Sea," *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 31, pp. 1712-1732.
- 10.Nitani H. (1972) "Beginning of the Kuroshio," *In Kuroshio, Its Physical Aspects*, H. Stommel and K. Yoshida, editors, University of Tokyo Press, Tokyo, pp. 129-163.
- 11.Sarpkaya, T. and Isaacson, M. (1981) *Mechanics of wave forced on offshore structures* (Van Nostrand Reinhold Company, New York).
- 12.Shaw, P. T. and Chao, S. Y. (1994) "Surface circulation in the South China Sea," *Deep-Sea Research I*, Vol. 41, pp. 1663-1683.
- 13.Wu, C. R. and Hsin, Y. C. (2005) "Volume transport through the Taiwan Strait : A Numerical Study," *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol. 16 (2), pp. 377-391.
- 14.Wu, C. R., Shaw, P.T. and Chao, S.Y. (1999) "Assimilating altimetric data into a South China Sea model," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 104, pp. 29987-30005.
- 15.Wu, C. R., Tang, T. Y. and Lin, S. F. (2005) "Intra-seasonal variation in the velocity field of the northeastern South China Sea," *Continental Shelf Research*, Vol. 25, pp. 2075-2083.
- 16.Wyrtki, K.(1961) : *Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters*, Scientific Results of Marine Investigation of the South China Sea and the Gulf of Thailand. *NAGA report* Vol. 2, Scripps Inst. Oceanography, La Jolla, California,195pp.