

# 北太平洋 $1/4^\circ$ 、東亞海域 $1/8^\circ$ 網格解析度雙向耦合三維海洋環流模式之初步校驗

詹森<sup>1\*</sup> 曾于恆<sup>2</sup> 楊益<sup>3</sup> D. E. Dietrich<sup>1,3,4</sup>

國立中央大學水文科學研究所

國立台灣大學大氣科學系<sup>2</sup>

國家海洋科學研究中心<sup>3</sup>

AcuSea, Inc., USA<sup>4</sup>

## 摘要

為台灣週邊海域之海洋動力研究、提供區域海洋模式初始與邊界條件之需，及建立中大水文所之海洋預報能力，國立中央大學水文科學研究所暨國家海洋科學研究中心採用水面硬蓋近似之DieCAST模式(Dietrich and Ko, 1994)，建立一低摩擦耗散、高計算效率之北太平洋環流模式(Duo Grid Pacific Ocean Model，簡稱DUPOM)。其中北太平洋水平網格 $1/4^\circ$ 的模式涵蓋 $100^\circ\text{E} - 80^\circ\text{W}$ 、 $30^\circ\text{S} - 60^\circ\text{N}$ ，東亞海域 $1/8^\circ$ 的模式區域介於 $100 - 150^\circ\text{E}$ 和 $0 - 52^\circ\text{N}$ 之間，垂直方向計26層，模式地形係以全球2弧分ETOPO2和海科中心高準確度之1弧分台灣週邊海域水深資料所建立。模式以Levitus氣候統計水文場為初始條件，以Hellerman海面風應力驅動，程式在一台個人電腦上運算，每天約可模擬50天。初期模擬結果(第10年)與已知的東亞海域環流型態吻合，例如：黑潮經由呂宋海峽入侵南海與退縮的季節變化、南海北部冬季冷渦的形成、黑潮在東海陸棚的冬季入侵、台灣海峽與南海環流之季節變化，以及黑潮在日本南方伊豆海脊上產生的蜿蜒與蛇行現象。

關鍵字：北太平洋、東亞海域、雙向耦合、三維環流數值模式

## 一、前言

東亞海域海底地形起伏甚大，西北太平洋海區水深達5000 m以上，東海陸棚區水深約100 - 200 m，與太平洋之間隔著琉球島弧，南海海盆深約3000 m，以呂宋海峽內之南北向海脊與太平洋相隔，而平均水深僅60 m的台灣海峽連接了東海和南海。在此複雜海底地形下的洋流，沿著東亞大陸棚邊緣有大洋西方邊界強流—黑潮，自西菲律賓海往北，通過呂宋海峽，沿著台灣東岸、東海陸棚邊緣至日本東南海岸離開。黑潮的流量大小、流軸擺盪，黑潮與南海北部環流的互動、與陡峭地形之交互作用等，都是物理海洋學上非常值得研究的問題。此外，東海、南海、台灣海峽洋流之動力機制與季節變化等，亦也值得深入研究。

綿密而持續的海洋觀測，是探討前述問題的根本，但一個完整的觀測需耗費龐大的經費、人力與時間，相較之下，應用有限的觀測資料及氣候統計場配合海洋數值模式之模擬來研究洋流，則是比較經濟的方法，且可達預測海洋之最終目的。

基於此，為了進行台灣週邊及東亞海域之海洋動力研究，以及提升海洋預報能力，我們與Dr. Dietrich合作，採用DieCAST模式(Dietrich and Ko, 1994)建立北太平洋 $1/4^\circ$ 和東亞海域 $1/8^\circ$ 網格解析度、雙向耦合之三維海洋環流模式DUPOM(Duo Grid Pacific Ocean Model)。預期模擬成果除了供東亞海域整體環流之研究外，也將提供建立小區域、高解析度模式邊界條件之用。

## 二、數值模式

本研究以DieCAST(Dietrich/Center for Air-Sea Technology)模式為主(Dietrich, 1992; Dietrich and Ko, 1993)，DieCAST模式曾應用在北大西洋環流研究(Dietrich et al., 2004a)、墨西哥灣環流研究(Dietrich, 1997; Dietrich et al., 1997)、地中海環流研究(Dietrich et al., 2004b)及黑海環流研究(Staneva et al., 2001)。

DUPOM太平洋模式範圍為 $100^\circ\text{E} - 80^\circ\text{W}$ 和 $30^\circ\text{S} - 60^\circ\text{N}$ (圖1)，水平解析度為 $1/4^\circ$ ，內嵌巢化網格東亞海域模式範圍為 $100^\circ\text{E} - 150^\circ\text{E}$ 和 $0 - 52^\circ\text{N}$ (圖1)，水平解析度為 $1/8^\circ$ 。垂直方向採z座標，水深自表面0至

海底4975.5 m共計分為26層，每層中心深度分別位於6.5, 20.5, 36.3, 54.4, 75, 99, 126.8, 159.6, 198.2, 244.1, 298.8, 364.3, 442.9, 537.6, 652, 790.4, 958.1, 1161.6, 1408.8, 1709.5, 2075.3, 2520.9, 3063.7, 3725.4, 4532.3 m。模式地形採用水平解析度2弧分的ETOPO2全球水深資料和海科中心1弧分東亞海域水深資料共同建立，東亞海域主要的海底地形，如日本東南方伊豆海脊(Izu Ridge)、琉球島弧、沖繩海槽、東海陸棚、南海海盆、呂宋海峽海檻地形等，均可包括在內。

模式控制方程式在Rigid-lid近似、Bousinesq近似和Hydrostatic近似之下，包括動量平衡方程式、連續方程式、溫鹽度平衡式和狀態方程式：

$$\frac{Du}{Dt} - fv = -\frac{1}{\rho}P_x + \nabla(A_M \nabla u) + w_{zz} \quad (1)$$

$$\frac{Dv}{Dt} + fu = -\frac{1}{\rho}P_y + \nabla(A_M \nabla v) + w_{zz} \quad (2)$$

$$P_z = -\rho g \quad (3)$$

$$u_x + v_y + w_z = 0 \quad (4)$$

$$\frac{DT}{Dt} = \nabla(A_H \nabla T) + \kappa T_{zz} \quad (5)$$

$$\frac{DS}{Dt} = \nabla(A_H \nabla S) + \kappa S_{zz} \quad (6)$$

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (7)$$

式中( $u, v, w$ )代表( $x, y, z$ )三個方向的速度分量， $P$ 是壓力，( $T, S$ )是溫度和鹽度， $f$ 是柯氏參數， $\rho$ 是密度， $g$ 是重力加速度，( $A_M, \nu$ )分別是(1)、(2)式中水平和垂直黏滯係數，( $A_H, \kappa$ )則是(5)和(6)溫、鹽平衡方程式之水平和垂直擴散係數，運算符號

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}$$

DieCAST模式的變數空間配置採非交錯A網格，優點是柯氏力項的計算結果較準確；擴散項採用4階準確度的有限差分式，水平黏滯及擴散係數僅 $10 \text{ m}^2/\text{s}$ ，約比同解析度的模式小1個數量級，其優點是能量耗散較低，相對地許多較小尺度的洋流結構可存活於模式中，海洋鋒面、海岸射流等也較易模擬及維持。垂直黏滯與擴散係數採Richardson數決定(Pacanowski and Philander, 1981)。溫、鹽場採用Levitus氣候統計值(Levitus and Gelfeld, 1992)，表面風場採用Hellerman的全球海面風應力氣候統計值(Hellerman and Rosenstein, 1983)。本模式除了在巢狀網格交界區用了資料同化(Data assimilation)外，其餘區域均依循流體力學未採用同化技術運算，其它細節見Tseng and Dietrich (2004)。本模式可以在低成本的PC上運算，例如在AMD Opteron 64位元雙CPU個人電腦中運算，每CPU天可算50個模式天。本計畫預定採用20年的模擬平均場(由第11年至第30年結果

統計而來)做為初始場，再改用每日觀測和模式再分析之風場代入海面邊界條件。

### 三、模擬結果與討論

本文僅討論模式第10年黑潮、黑潮在呂宋海峽的季節變化、南海與台灣海峽環流和黑潮延伸區模擬結果。首先說明黑潮，根據模擬結果，北赤道洋流流至菲律賓東邊大約 $10^\circ\text{N}$ 附近一分為二，往北的就是黑潮的起源。沿著呂宋島東側往北，橫越呂宋海峽，再沿台灣東岸北上，黑潮流量在台灣東邊通過 $25^\circ\text{N}$ 、由台灣東岸積分至 $123^\circ\text{E}$ 、水深0-1000 m的流量變化約15-25 Sv，與1994-1996年PCM-1(約 $122^\circ\text{E}$ - $123^\circ\text{E}$ )測線觀測結果(Johns et al., 2001)大致相當。至台灣東北部海域轉向東北沿著東海陸棚邊緣，流向日本，到了Tokara海峽再度轉向東沿日本南岸東行，直至本州東南角離開側邊陸地。模擬結果和觀測資料統計結果相似。

根據1989-2002年衛星追蹤Argo浮標軌跡統計結果(Centurioni et al., 2004)，十月至一月間，黑潮由呂宋海峽入侵南海北部最顯著，向西的平均速度為 $70 \pm 40 \text{ cm/s}$ ，日平均速度則可能超過 $165 \text{ cm/s}$ ，其他季節黑潮幾乎直接於呂宋海峽由南往北，沿著台灣南端離開。圖2是菲律賓海、呂宋海峽、南海北部二月、五月、八月和十一月之表層水深6.5 m之月平均流場，圖中顯示冬季月份(十一月)是黑潮向西入侵南海最強的時期，其位置約在 $20^\circ\text{N}$ ，流速約50-100 cm/s，最達可達廣東陸棚上。黑潮入侵南海隨著東北季風減弱而減小，在夏、秋季間無明顯入侵現象，黑潮主軸沿著呂宋海峽、台灣東岸一路往北。與前述浮標觀測結果比較，模擬結果相當程度地反應了黑潮表層流在呂宋海峽的季節變化。

圖3是模擬之南海月平均表層流場與溫度分佈，根據以往的研究，南海環流的季節變化和風應力的旋度相關，南海北部呈氣旋式環流，冬天約在呂宋島的西北方，春天東北季風減弱後，氣旋式環流往北移，至夏天減至最弱而滯留在南海北部陸坡附近；而南海南部僅在夏天出現反氣旋環流(Hu et al., 2000; Chern and Wang, 2003)。模擬結果，如前段所述黑潮入侵南海北部的季節變化，夏天出現在越南東岸的西南風驅冷水湧升現象，和約沿著 $15^\circ\text{N}$ 由越南海岸向東的射流等均非常顯著。模擬結果也顯示，南海南部的反氣旋環流約在五月形成至八月減弱，至於南海北部的氣旋式環流在圖3之中並不十分明顯，因此仍需仔細從觀測資料和模式之風場與水文場去探討其原因，此外，南海Levitus氣候統計場與近年水文實測結果之差異，也可能造成局部模擬結果不理想。

相較於東海和南海，台灣海峽是目前水文暨流速資料蒐集較完整的海域。綜合觀測資料分析結果 (Jan et al., 2006)，夏天是一股由南海表層水而來的高溫北向洋流，主宰了台灣海峽裡的流場，流速在東半側較強，約50 cm/s；冬天時，強勁的東北季風在大陸東南海岸造成一股向南的大陸沿岸流，將沿岸低溫淡水帶到台灣海峽北部，並形成氣旋式環流；另一方面，季風也將南來的高溫黑潮支流水壓制在東南部，北方的冷水和南方的暖水在中部形成海洋鋒面。圖4模式模擬台灣海峽月平均流場與溫度場明確地反應了上述季節變化，從模擬結果可看出冬季大陸沿岸流的形成大約在十月，同時較冷的水隨之進入海峽北部，在海峽北部逐漸形成氣旋式環流，冷水入侵在一、二月間最強，此後迅速退縮，冬季鋒面的位置則較觀測結果略為北邊。夏天約六至八月，由南海北部沿海底地形向東北從澎湖水道進入台灣海峽的洋流是最主要的洋流系統，另有一小部份洋流則是由西側進入，至海峽北部與東側主流匯集。

黑潮在日本南方的蜿蜒與蛇行現象，以及脫離本州東南海岸後的向西延伸也是分析模擬結果的重要依據。圖5模擬結果顯示，黑潮流徑在30°N附近轉彎後，變動就很大了，當黑潮在140°E附近伊豆海脊前，受位渦度守恒的約制而先產生反氣旋式的偏轉，流軸向南偏，在海脊之後則因水深增大，而再以氣旋方式向北貼近本州，形成所謂的「蛇行」，這種蛇行現象的產生和大小，也和黑潮上游受反氣旋海洋渦旋的影響有密切的關係(Waseda et al., 2003)，蛇行現象則可能持續數年至十數年(Qu et al., 2001；Qiu and Chen, 2005)。黑潮與日本海岸分離後，繼續東行形成所謂的黑潮延伸(Kuroshio extension)，同時也產生許多蜿蜒現象，此外南下的冷流「親潮」(Oyashio)也在此與黑潮交匯，模擬結果也展現了親潮的季節入侵現象。DUPOM模擬出的這些現象在圖5中顯而易見。

## 四、結論

DUPOM模擬結果(第10年)，至少在定性上與過去觀測所得流場的主要型態吻合，例如冬天時台灣海峽北部由北而南的中國大陸沿岸流在中部以氣旋方式轉向東北流出，澎湖水道中的北向流甚為微弱；黑潮在東海南部的入侵行為；夏天時沿著越南東岸往東北及往西的射流，穿越台灣海峽的北向流；黑潮經由呂宋海峽入侵南海與退縮的季節變化，以及黑潮在日本南方伊豆海脊上產生的蜿蜒與蛇行現象等。

本模式仍持續運算中，預計於2006年底可得到較穩定之海洋氣候統計場，以供建立更高解析度區

域模式邊界條件之需，在校驗方面，未來亦希望加入與其它東亞海域模式結果(如Wu and Hsin, 2005)之互相比對。

## 致謝

國家海洋科學研究中心協助本模式之發展。

## 參考文獻：

- Centurioni, L. R., P. P. Niiler, and D.-K. Lee, 2004. Observations of Inflow of Philippine Sea Surface Water into the South China Sea through the Luzon Strait. *J. Phys. Oceanogr.*, 34, 113-121.
- Chem, C.-S and J. Wang, 2003. Numerical study of the upper-layer circulation in the South China Sea. *J. Oceanogr.*, 59, 11-24.
- Dietrich, D.E., 1992. *The Sandia Ocean Modeling System Programmers Guide and Users Manual*. Sandia National Laboratories Technical Report SAND92-7386.
- Dietrich, D.E., D.S. Ko, and L.A. Yeske, 1993. On the Application and Evaluation of the Relocatable DieCAST Ocean Circulation Model in Coastal and Semi-Enclosed Seas. Mississippi State University Center for Air Sea Technology Technical Report 93-1, 1 Jul 1993, 79 pp.
- Dietrich, D.E., 1997. Application of a Modified "a" Grid Ocean Model Having Reduced Numerical Dispersion to the Gulf of Mexico Circulation. *Dyn. Atm. and Oceans*, 27, 201-217.
- Dietrich, D.E., C.A. Lin, A. Mestas-Nunez and D.-S. Ko, 1997. A high resolution numerical study of Gulf of Mexico fronts and eddies. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 64, 187-201.
- Dietrich, D.E., A. Mehra, R.L. Haney, M.J. Bowman and Y.-H. Tseng, 2004a. Dissipation Effects in North Atlantic Ocean Modeling. *Geophys. Res. Letters*, 31, L05302, doi:10.1029/2003GL019015.
- Dietrich, D.E., R.L. Haney, V. Fernandez, S. Josey and J. Tintore, 2004b. Air-sea fluxes based on observed annual cycle surface climatology and ocean model internal dynamics: A precise, non-damping zero-phase-lag approach applied to the Mediterranean Sea. *J. Mar. Syst.*, 52, 145-165.
- Hellerman, S., and M. Rosenstein, 1983. Normal monthly wind stress over the world ocean with error estimates. *J. Phys. Oceanogr.*, 13, 1093-1104.

- Hu, J., H. Kawamura, H. Hong, and Y. Qi, 2000. A review on the currents in the South China Sea: seasonal circulation, South China Sea warm current and Kuroshio intrusion. *J. Oceanogr.*, 56, 607-624.
- Jan, S., D. D. Sheu, and H.-M. Kuo, 2006. Water mass and throughflow transport variability in the Taiwan Strait. *J. Geophys. Res. - Oceans.* (in press)
- Johns, W. E., T. N. Lee, D. Zhang, and R. Zantopp, 2001. The Kuroshio east of Taiwan: Moored transport observations from the WOCE PCM-1 Array. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 1031-1053.
- Levitus, S., and R. Gelfeld, 1992. NODC Inventory of *Physical Oceanographic Profiles*. Key to Oceanographic Records. Documentation No. 18, NODC, Washington, D. C..
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *J. Geophys. Res.* 20, 4, 851-875.
- Pacanowski, R. C. and S. G. H. Philander, 1981. Parametrization of vertical mixing in numerical models of tropical ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 11, 1443-1451.
- Qiu, B. and S. Chen, 2005. Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre and mesoscale eddies on decadal timescales. *J. Phys. Oceanogr.*, 35, 2090-2103.
- Qu, T., H. Mitsudera, and B. Qiu, 2001. A climatological view of the Kuroshio/Oyashio system east of Japan. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 2575-2589.
- Staneva, J., D. Dietrich, E. Stanev and M. Bowman, 2001. Rim current and coastal eddy mechanisms in an eddy-resolving Black Sea general circulation model. *J. Mar. Syst.*, Special Issue on the Black Sea, 31, 137-157.
- Tseng, Y.-H and D. E. Dietrich, 2004. Guide for the DieCAST Ocean Model. 43pp
- Waseda, T., H. Mitsudera, B. Taguchi, and Y. Yoshikawa, 2003. On the eddy-Kuroshio interaction: Meander formation process. *J. Geophys. Res.*, 108, C7, 3220, doi:10.1029/2002JC001583
- Wu, C.-R. and Y.-C. Hsin, 2005. Volume transport through the Taiwan Strait : a numerical study. *Terr., Atmos. and Oceanic Sci.*, 16, 2, 377-391.

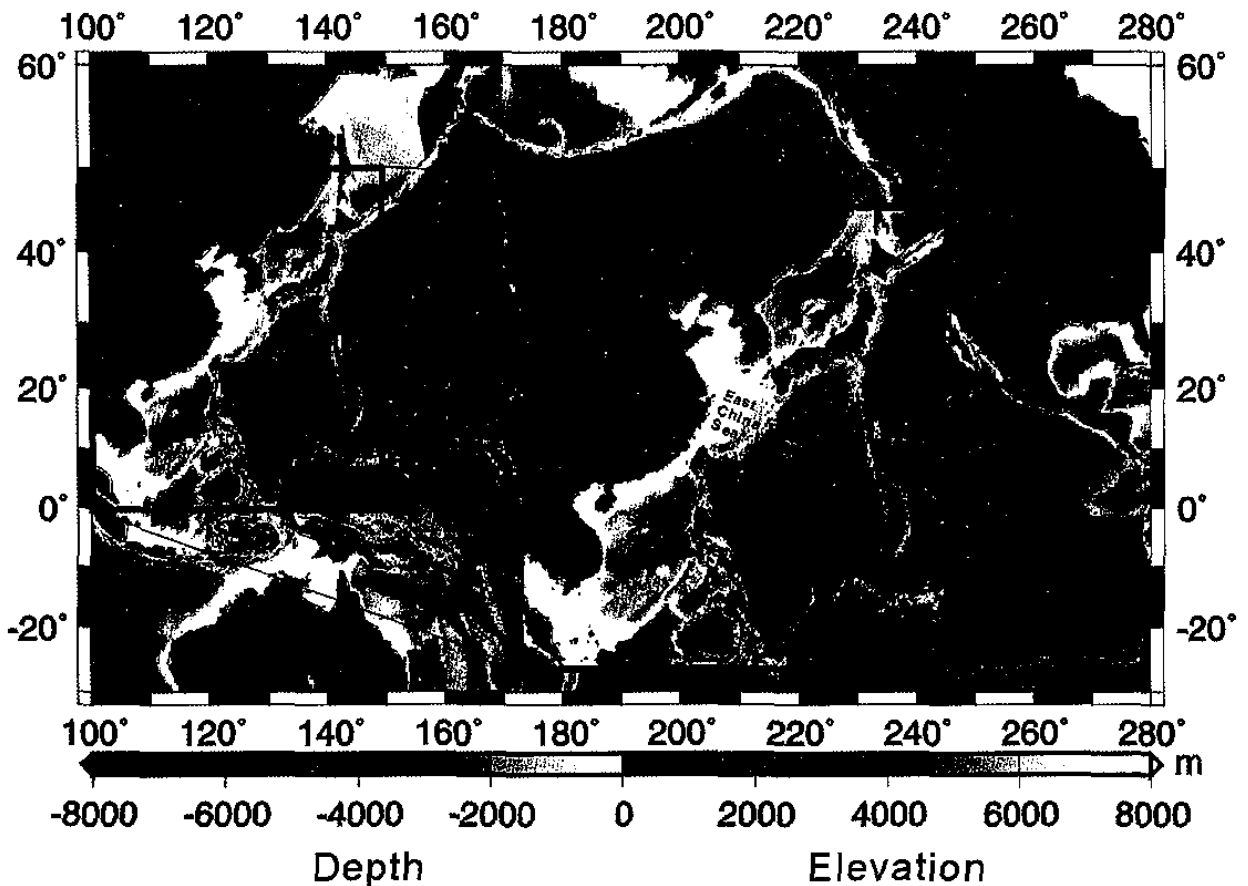


圖1 北太平洋模式及東亞海域模式範圍與海底地形

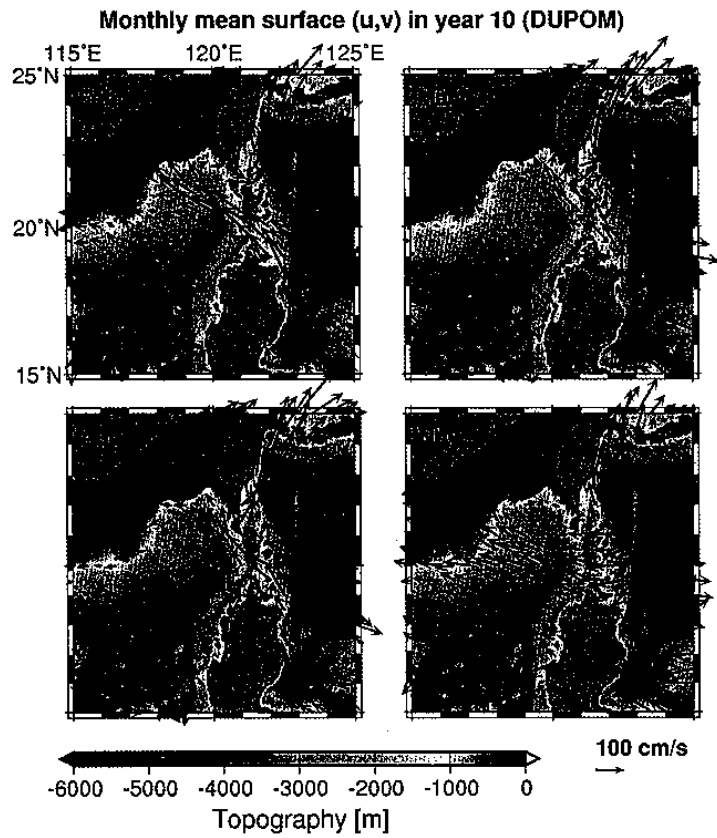


圖2 模式模擬菲律賓海、呂宋海峽、南海北部二月、五月、八月和十一月之表層月平均流場

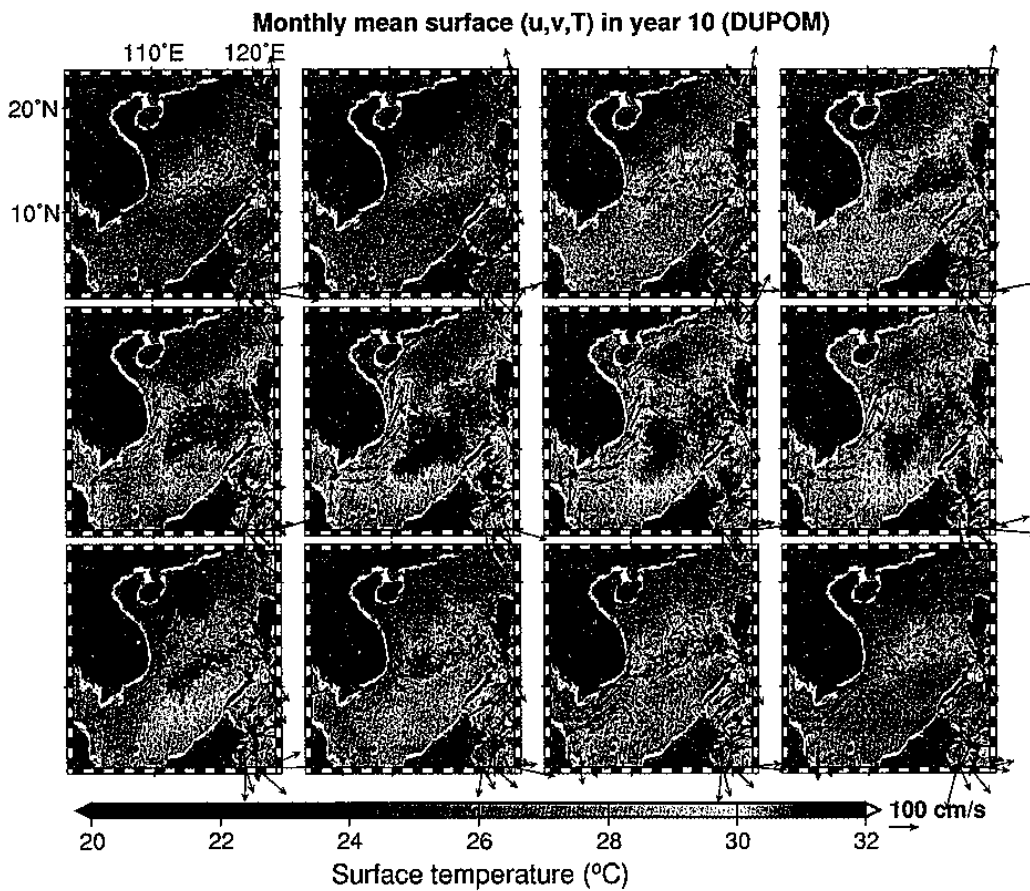


圖3 模式模擬南海表層月平均流場與溫度分佈

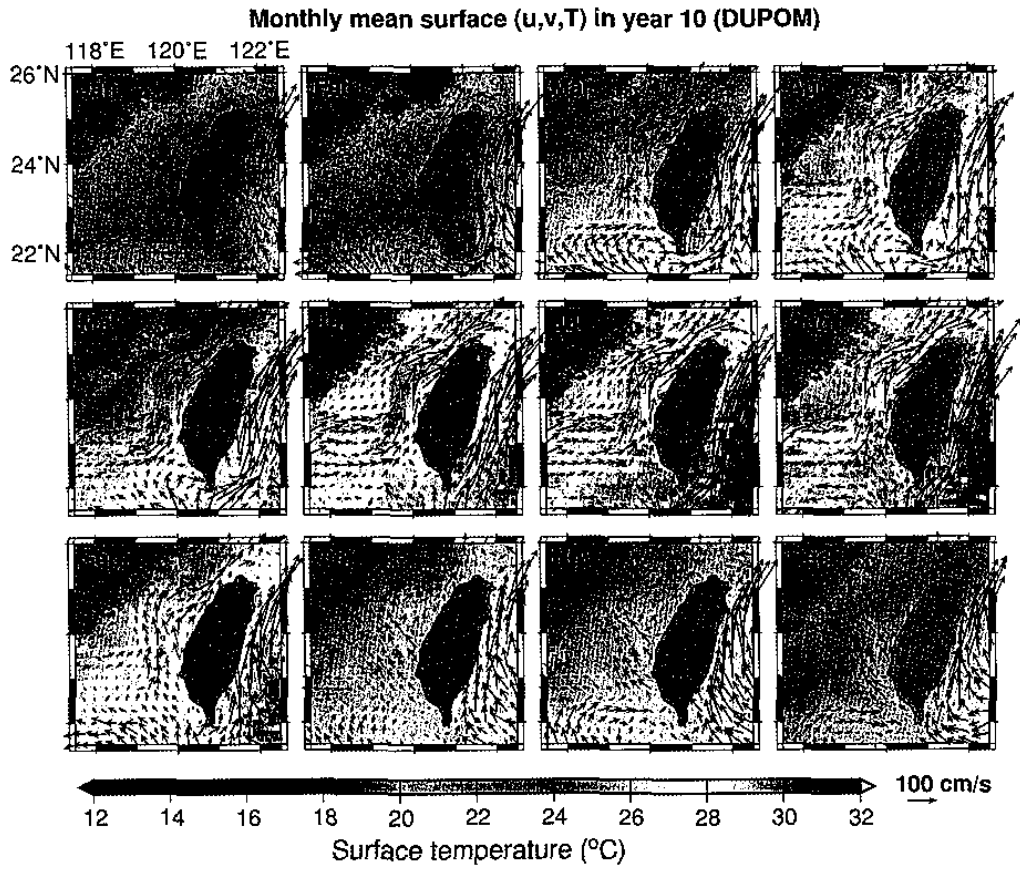


圖4 模式模擬台灣海峽表層月平均流場與溫度分佈

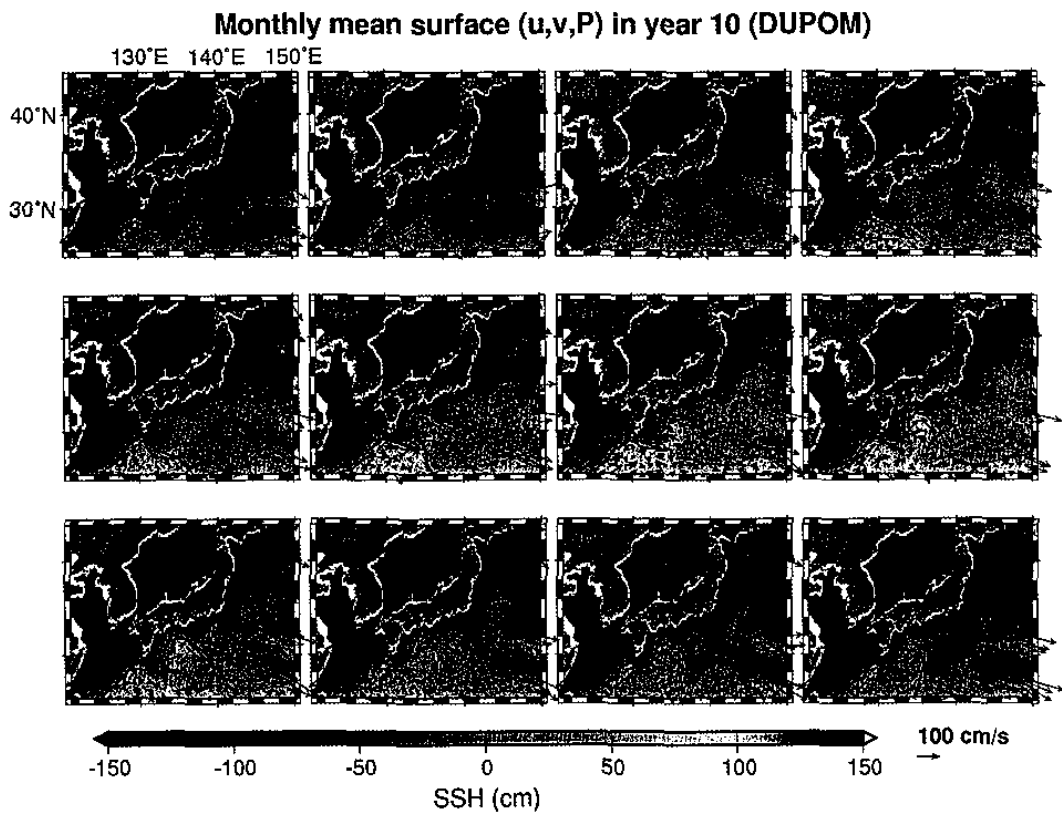


圖5 模式模擬東北亞海域表層月平均流場與相對海面高度分佈