

东中国海环流及其季节变化的数值模拟^{*}

白学志 王 凡 胡敦欣
(中国科学院海洋研究所)

关于东中国海环流的研究,国内外学者已做了大量的工作。早期科学家们主要依赖于对温盐资料和少数测流资料的分析研究,对渤、黄、东海的环流结构有了较系统和深入的认识。东中国海环流是由一个气旋式的“流涡”组成,东侧主要是北上的黑潮—对马暖流—黄海暖流及其延伸部分;西侧为南下的沿岸流系。黑潮对东中国海环流的影响是如此之大,以致于除了某些局部区域外,上述海域主要流系的冬、夏季分布形式比较相似而无本质上的差异(胡敦欣等,1993)。但本文所研究海域正处于世界上最显著的季风区,冬、夏季盛行风向基本相反,过渡季节(春、秋季)风向多变,风力减弱;海洋热盐结构季节变化明显(如冬季混合强,而夏季层化明显等),这些因素都使得东中国海环流存在着较明显的季节变化。

自 20 世纪 80 年代以来,东中国海环流的数值模拟工作逐步展开,并已成为研究环流结构及其形成机制的强有力工具。但由于数值模式本身以及计算方案的缺陷(如有些学者用固定的风场、温盐场对东中国海环流进行诊断模拟等)和观测资料的不足,数值模拟的结果难以得到验证,渤、黄、东海的环流研究中仍有大量的问题存在争议,以待澄清。例如,台湾暖流的来源、流径;对马暖流的来源;夏季黄海暖流的流径以及黄海冷水团环流等均有不同的论述。对黄、东海环流季节变化的数值模拟工作也较少,多用冬、夏典型月份的风场强迫积分至稳定态,给出冬、夏季环流,这种做法值得商榷。三维环流模式很难在 1 个月内达到稳定态,尤其是夏季层化明显、风力减弱的情况下,非常定风场的影响更应引起人们的重视。

本文采用比较符合实际的计算方案,用年循环风场和海面热通量场为外强迫,对渤、黄、东海的环流及其季节变化进行了模拟,并对一些争议问题进行了探讨。

一、模式简介和计算方案

本文所用的海洋模式为 Princeton Ocean Model(POM),目前该模式已被广泛应用。它具有如下主要特征:①采用内外模时间分裂算法;②垂直方向采用 σ 坐标,水平方向采

* 中国科学院海洋研究所调查报告第 4548 号。

中国科学院知识创新工程项目, KZCX2-207; 国家重点基础研究发展规划项目, G1999043803 和中国科学院重大项目 KZ951-BI-403 资助。

收稿日期:2001 年 9 月 10 日。

用“Arakawa C”型差分方案;③自由表面;④垂直混合系数由二阶湍流闭合模式确定;⑤水平黏性系数采用 Smagorinsky (1963) 参数化方案。

计算区域为 $24^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$ 、 $118^{\circ} \sim 130^{\circ} \text{E}$ ，包括整个渤、黄、东海。模式的水平分辨率为 $15' \times 15'$ ，垂直方向分为 10 个等 σ 层。最大水深为 1000m。模式中外部模的时间步长取为 60s，内部模的时间步长取为 3600s。

UWM/COADS 分析场提供了模式所需的气候月平均的海面风应力、净海面热量通量和太阳辐射，资料的水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ；选用 Levitus (1982) 气候月平均温盐资料作为模式输入的初始场，水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ （上述资料经最优内插法插值到模式所需的网格点上）。

模式的开边界取在台湾海峡、台湾以东黑潮区、大隅—吐噶喇海峡、对马海峡。它们的流量在秋冬季分别取为 1.0Sv, 22.5Sv, 21Sv, 2.5Sv，夏、春季分别取为 3.0Sv, 30Sv, 29Sv, 4Sv。

模式共积分 10 年。第 1 年以 1 月份的 Levitus (1982) 温盐资料和 COADS 风应力场作为模式积分的初始值和强迫场，并固定温盐场，得到 1 月份的诊断流场，作为进一步积分的初值。从第 2 年开始采用月平均风应力和海面热通量，并插值到每一模式天上。在周期性外强迫下，从第 4 年开始，能量已呈稳定的周期性变化。本实验取后 5 年平均的结果作为黄、东海环流的月平均状态。

二、模拟结果分析

渤、黄、东海环流及其季节变化特征被较为准确地模拟出来(图 1、图 2)。与观测事实和传统认识比较一致(Guan B., 1994)，模拟的渤、黄、东海环流由两个流系组成：以北向为主的黑潮及其分支与延续体和以南向为主的沿岸流系。

1. 黑潮主干流及其两侧的逆流和涡旋

模拟的黑潮主干自台湾东侧的水道进入东海，其主轴基本沿着陡峭的大陆坡向东北方向流动，在 30°N 附近离开陆坡，做顺时针转向东南，经吐噶喇海峡流出东海。这是一条公认的黑潮路径，几乎没有季节变化。图 3 给出了 29°N 断面上的经向流速分布，在 29°N 断面上，黑潮的上层最大流速出现在坡折处，随深度增加，黑潮最大流速出现的位置东移，这与观测到的东海黑潮流速结构是一致的(国家海洋局科技司，1995)。

在黑潮主轴的右侧，一年四季都有南向逆流存在。关于该逆流的形成机制，Qiu 等 (1990) 利用一个 β -平面的正压模式作了理论上的探讨，认为 β 效应在其中起着关键作用。在黑潮的右侧大约以 29°N 、 128.5°E 为中心有一个中尺度反气旋性涡旋，这个涡旋非常稳定，终年存在。

模式的结果还显示，在黑潮左侧，常年存在着一支弱的西南向逆流，它大约在 30°N 、 127°E 附近离开黑潮主体，基本沿 100m 等深线向西南方向流动，这支逆流约在 28°N 、 124°E 附近与台湾暖流的外侧分支汇合，构成一个闭合的气旋性涡旋。这支逆流的强度及伴生的气旋性涡旋的位置有明显的季节变化，冬、春、夏季相对较弱，秋季最强，逆流大约可南至 27°N 。Guo 等 (1998) 在利用卫星漂流浮标资料分析夏季对马暖流来源一文中，

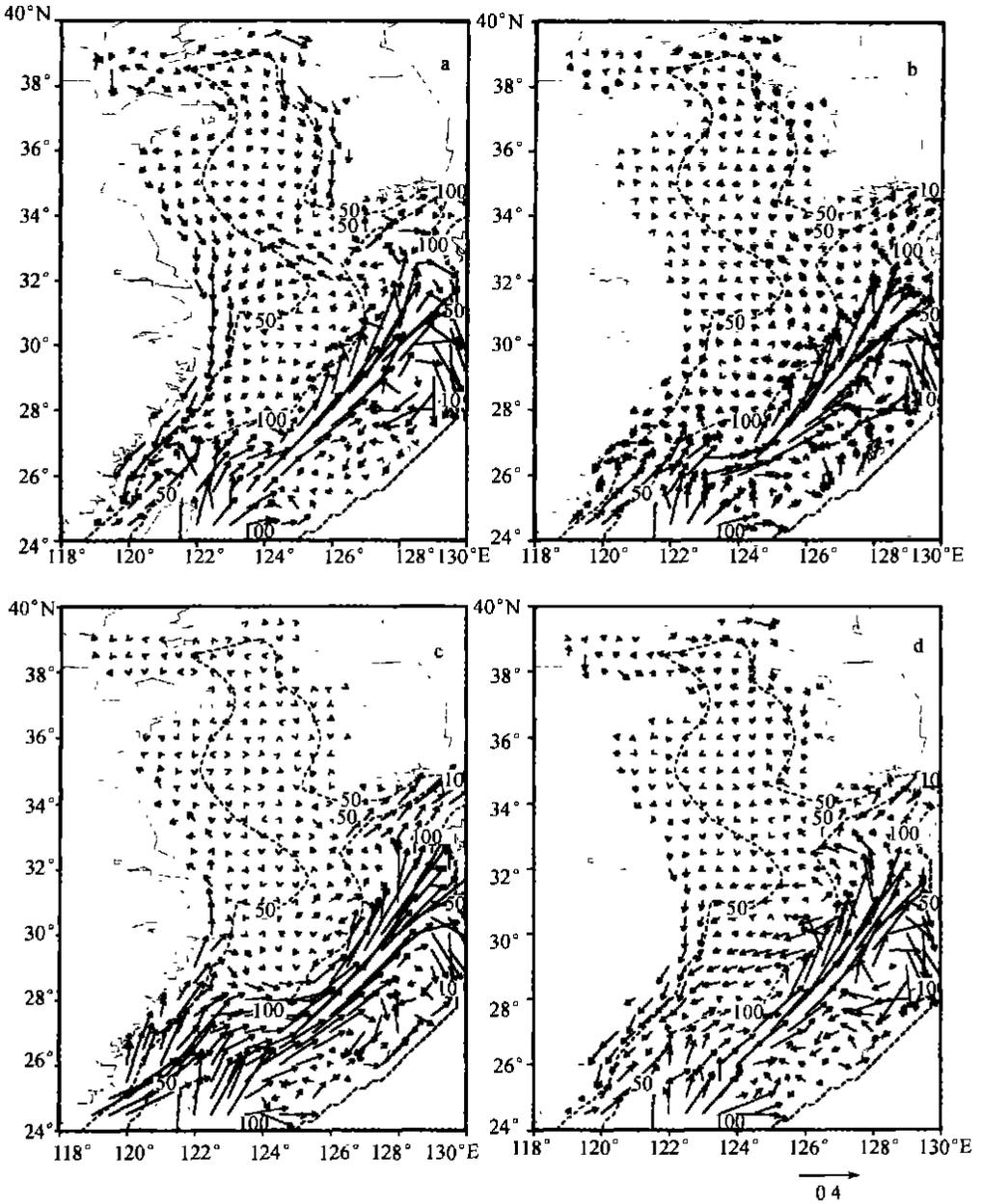


图 1 1、4、7、10 月份 10m 层模拟流场(单位: m/s)

a 1 月; b 4 月; c 7 月; d 10 月

曾提及 1994 年 9 月 3 日在陆架上大约 29.5°N 、 125°E 点上投放的一个浮标, 在开始的 10d 内首先向东移动了 80km, 11~12 月间, 该浮标大约沿 100m 等深线向西南移动, 在台湾东北大约 27.5°N 、 124°E 附近进入黑潮(见图 4 第 22 号浮标)。该浮标的路径与模拟的逆流的路径非常相似。关于黑潮左侧这支逆流和气旋性涡旋存在的可能性及其可能的形成机制, 本文作者已做过较详细的讨论(Bai 等, 2001), 用 Rossby (1936) 的“层化介质

射流理论”分析了它的可能成因,初步认为水平摩擦和 β 效应是这支逆流和气旋性涡旋存在的主要机制。黑潮在东海域内流动过程中,这种机制总是存在的,风的季节性变化只能使这支逆流加强或减弱。

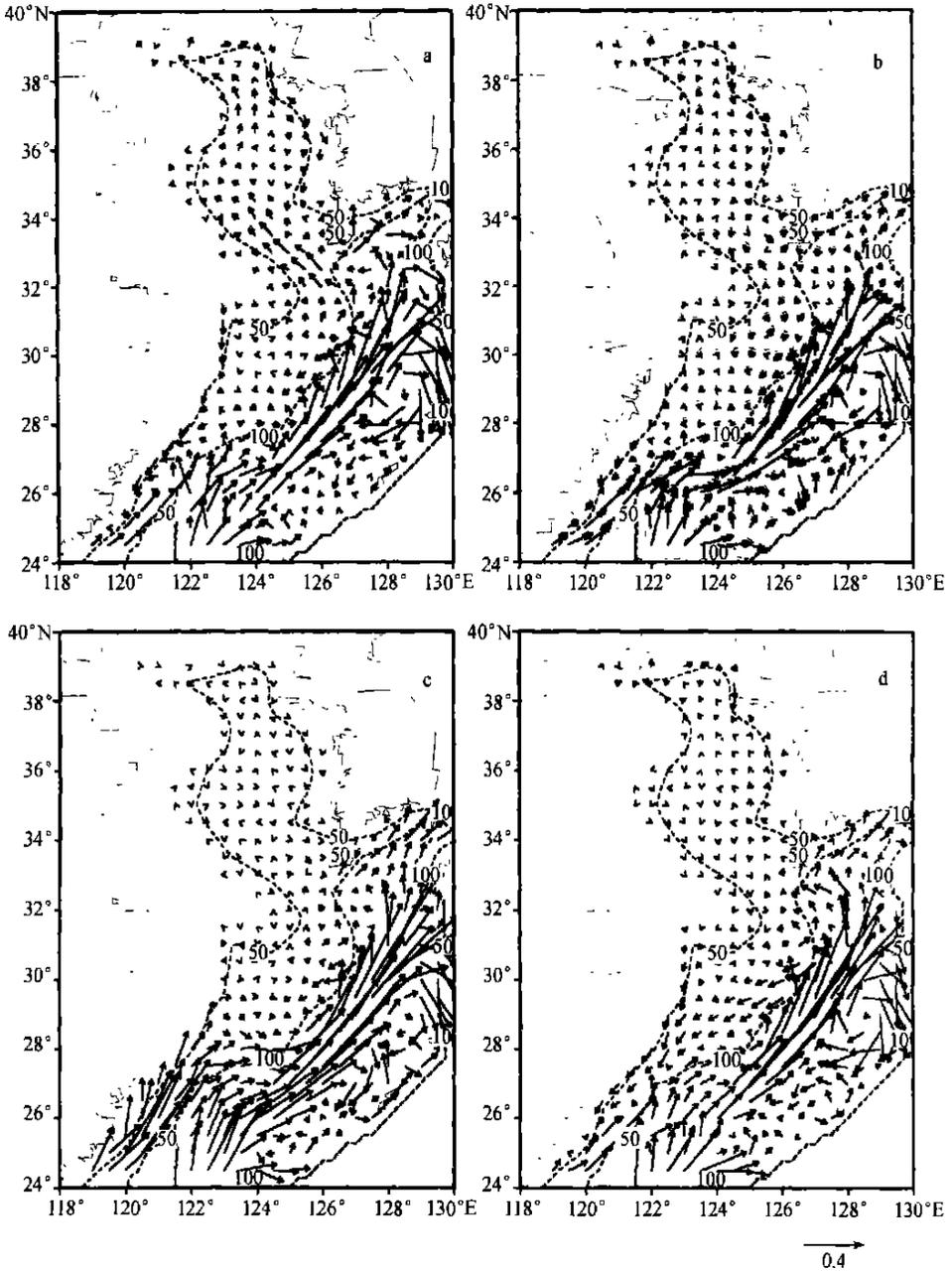


图2 1、4、7、10月份30m层模拟流场(单位:m/s)

a 1月; b 4月; c 7月; d 10月

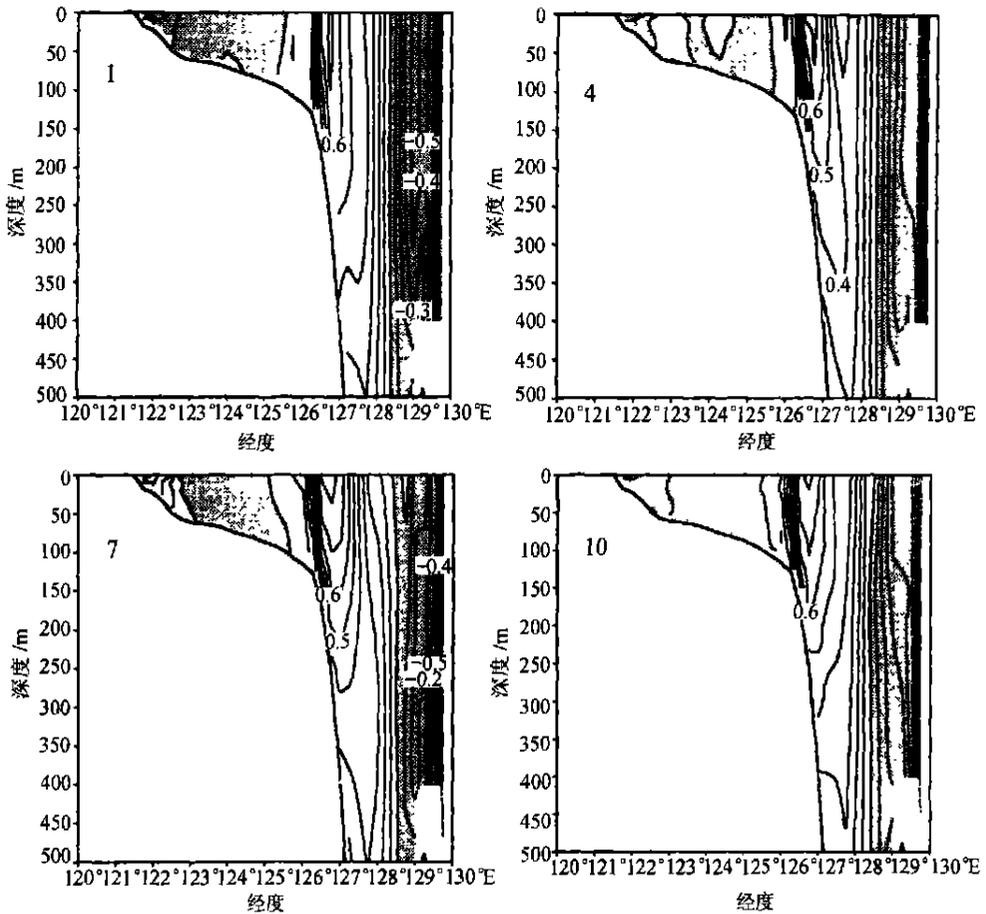


图3 模拟的1、4、7、10月份沿 29°N 断面的经向流速分布(单位: m/s)

2 对马暖流

对马暖流是从东海流到日本海的一支强流。关于它的起源是一个焦点问题。早期认为它是黑潮的一个分支。目前,已普遍认为它有多种来源:东海北部混合水、黑潮分支水和东海外陆架混合水。随着上述各水系的消长,对马暖流的组成也必将产生明显的季节差异和区域差异(国家海洋局科技司,1995)。从本文的模拟结果来看,对马暖流的来源确实存在季节差异,如冬季和秋季,对马暖流基本来自黑潮分支水;而在春、夏季节,除了黑潮分支水外,东海陆架混合水对对马暖流也有不同程度的贡献。

冬季,对马暖流基本上来源于黑潮水。黑潮在 30°N 、 128°E 附近转向时,有一分支脱离黑潮主体,先向西折向陆坡,后沿陆坡北上,到达 32°N 附近,做顺时针旋转,沿九州西岸南下,汇入黑潮主体,流出模拟区域。在 32°N 附近,又有一分支从前一分支分出,先向西后向东,做顺时针旋转,通过对马海峡流入日本海,这就是对马暖流。模拟的对马暖流源区的环流与郭炳火等(1991)根据卫星影像确定的九州西侧海区的表层环流非常类似。郭炳火等(1991)在文章中将黑潮在 30°N 附近的分支称为黑潮暖丝。

春季,黑潮分支直接向北成为对马暖流的一个来源;东海陆架混合水开始对对马暖

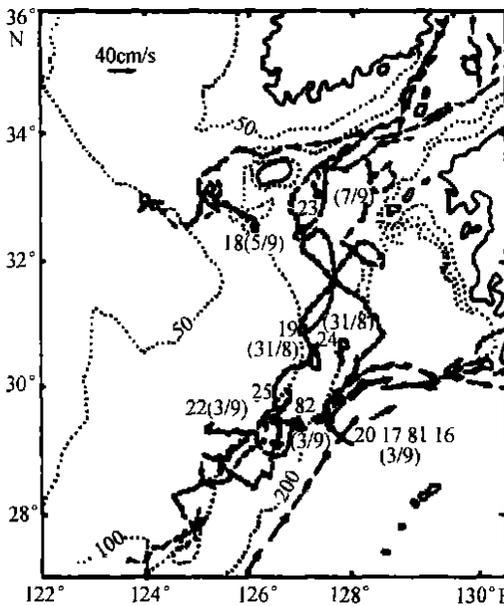


图4 1994年8~9月份在东海投放的卫星浮标轨迹

箭头表示日平均浮标速度 数字表示浮标号和投放日期(Guo Binghua et al., 1998)

流有所贡献。夏季,黑潮在 31°N 附近的直接分支沿陆坡北上,直接流入对马海峡,构成对马暖流的一部分;另一部分则来源于东海中陆架流动。秋季则与冬季比较类似。

3. 黄海暖流

沿南黄海海槽西侧向西北方向进入黄海的黄海暖流,冬、春较强,夏、秋较弱,且四季底层强于表层。冬季,20m以下,黄海暖流一直向北,在 34°N 、 124°E 附近进入黄海,其延伸部分在渤海海峡北部进入渤海。除秋季直接从黑潮和对马暖流分出外,在其他季节黄海暖流主要起源于中陆架流动,夏季黄海暖流的起源甚至以上溯到台湾暖流的近岸分支。它仅到达 34°N 附近,不进入南黄海。一年四季都有部分黄海暖流在进入黄海不久就折向东,经济州岛南北两侧加入对马暖流;也有部分黄海暖流折向西南加入一个气旋型环流。上述现象与以往的观测比较符合(赵保仁等,1991)。

4. 台湾暖流

台湾暖流系指沿闽、浙近海至长江口以南海域自西南流向东北的一支海流。关于它的起源、流径、北进程度及其季节变化,一直为人们所关心。

关于台湾暖流的起源,不少学者基于观测和数值模拟做了大量的工作。目前,比较流行的观点是:台湾暖流起源于台湾海峡和台湾岛东侧黑潮水的向北入侵。本文的模拟结果也支持这一观点,但需说明的是本文的模拟区域较小,台湾海峡的开边界处给了一定的流量,讨论台湾暖流与台湾海峡流动的关系时是不太合适的。在台湾岛东侧,一年四季都有黑潮的一部分水体在台湾东北部向北进入陆架区,其主体大约在 28.5°N 以南做反气旋弯曲,向东汇入黑潮主轴,形成一类似舌状的流动过程,即所谓的台湾暖流的离岸分支。该分支在夏季伸展最北,而在其他季节基本上被限制在 28°N 以南。另有一分支(即台湾暖流“岸侧分支”),却不是四季都存在,仅在夏季向北流到 30°N 附近时又分为两支,分别向东、向北(到达长江口),春季在30m以深向北到达 31°N 。

5. 东海北部冷涡

已知在东海北部,济州岛南方,常年存在一气旋性涡旋(东海冷涡),其中心位于 31.5°N 、 125.5°E 附近,水平尺度为100~200km(毛汉礼等,1986)。但由于缺乏足够观测,对东海冷涡的环流结构及其季节变化,尚缺少真正了解。

从本文的模拟结果来看,在冬季和夏季,以 $31^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$ 、 125°E 为中心形成一闭合之气旋涡。模拟的冷涡中心比观测发现的“东海冷涡”稍微偏西。在其他季节,尽管在相应区域流速也有明显反时针旋转,但似乎并不闭合。究其原因,冬季黄海沿岸流借助北风以

较强的惯性向东南方向流入东海, 夏季受南风驱动黄海沿岸流在偏东的位置进入东海, 同时台湾暖流近岸分支向东北方向延伸并与中陆架流动相连, 都有利于在相应区域形成闭合气旋涡; 相反, 春、秋季黄海沿岸流较弱, 且偏西, 同时台湾暖流近岸分支被压制在 31.5°N 以南, 均不利于闭合气旋涡的形成。此外, 黄海沿岸流冬季较强, “东海冷涡” 强且偏南(中心在 31°N 附近); 沿岸流夏季较弱, 冷涡弱且偏北(中心在 32°N 附近)。过去利用观测资料分析得到的“东海冷涡的位置和强弱与黄海沿岸流强弱有关”的推测(丁宗信, 1985a, 1985b)是有一定道理的。但是, 从数值模拟的结果来看, 黄海沿岸流强弱和位置不仅决定了气旋涡的强弱和位置, 更决定了它是否闭合。

由模拟结果还可看出, 在气旋涡闭合的冬、夏两季, 涡心位置随深度增加有不同程度的西移。例如, 冬季 10m 深度涡中心在 125°E , 而 30m 层深度涡中心在 $124^{\circ}30'\text{E}$; 夏季涡中心在 10m 深度上也位于 125°E , 而在 30m 深度上略微西移, 但不如冬季那么明显。涡中心西移似乎是黄海暖流深层强于表层, 黄海沿岸流表层强于深层的结果。

6. 沿岸流系

在苏北沿岸, 黄海沿岸流夏、秋、冬季向东南方向流动, 其中夏季沿 40m 等深线向东南方向运动, 与向北流的东海沿岸流在长江口以东相遇; 冬季黄海沿岸流较强, 与东海沿岸流一脉向南。长江口及其以南, 秋、冬、春季有向南之东海沿岸流, 夏季有向北之东海沿岸流。

在朝鲜半岛西岸, 125°E 以东的海域, 西朝鲜沿岸流终年向南流动, 冬、秋季较强, 春、夏季较弱。冬季在朝鲜半岛西南端的底层(30m 以深), 有一气旋性涡旋存在, 其他季节则无此现象。

三、结 语

利用 Princeton Ocean Model(POM)模式模拟了东中国海环流及其季节变化。计算结果较好地体现了主要流系的基本特征和季节变化, 模式的结果得出下列结论。

(1) 在黑潮左侧, 常年存在着一支弱的西南向逆流, 它大约在 30°N 、 127°E 附近离开黑潮主体, 基本沿 100m 等深线向西南方向流动, 在 28°N 、 124°E 附近与台湾暖流的外侧分支汇合, 构成一个闭合的气旋性涡旋, 并己为浮标资料所证实。初步认为水平摩擦和 β 效应是这支逆流和气旋性涡旋存在的主要机制。

(2) 冬季和秋季, 对马暖流基本来自黑潮分支; 而在春、夏季节, 除了黑潮分支水外, 东海陆架混合水对对马暖流有不同程度的贡献。

(3) 冬季黄海暖流及其延续体可以在渤海海峡北部进入渤海; 夏季它仅到达 34°N 附近, 不进入南黄海, 并有部分水体经济州岛南北两侧加入对马暖流。除秋季直接从黑潮和对马暖流分出外, 在其他季节黄海暖流似主要起源于中陆架流动, 夏季黄海暖流的起源甚至可以上溯到台湾暖流的近岸分支。

(4) 台湾暖流外侧分支一年四季都存在, 它是黑潮的一部分水体在台湾东北部向北进入陆架区形成的; 来源于台湾海峡的“岸侧分支”, 不是四季都存在, 仅在夏季向北流到 30°N 附近又分为两支, 分别向东和向北。

(5) 只有在冬季和夏季, 以 $31^{\circ} \sim 32^{\circ} \text{N}$ 、 125°E 为中心存在一个闭合的气旋涡, 即“东海冷涡”。气旋涡的闭合性、强弱、位置和随深度的变化都有季节变化, 并与黄海沿岸流和中陆架流动的季节变化有关。

本文仅对东中国海环流的几个主要分量的基本特征及其季节变化作了模拟分析, 而未予以数值实验进行机制的探讨。由于在本模式中未引入潮混合机制, 对夏季黄海冷涡环流的模拟不理想。

参 考 文 献

- 丁宗信, 1985a, 东北北部气旋涡区冬半年水文特征的初步分析, 海洋科学, 9(5): 1~5.
- 丁宗信, 1985b, 东北北部气旋涡区夏半年水文结构, 海洋与湖沼, 16(2): 138~146.
- 毛汉礼、胡敦欣、赵保仁等, 1986, 东北北部的一个气旋型涡旋, 海洋科学集刊, 27: 23~31.
- 国家海洋局科技司, 1995, 黑潮调查综合研究报告, 海洋出版社, 15~52.
- 赵保仁、Limebumer、胡敦欣等, 1991, 1996年夏季南黄海和东北北部水文特征, 海洋与湖沼, 22(2): 132~140.
- 胡敦欣、李永祥, 1993, 海洋环流研究, 中国海洋科学研究及开发, 青岛出版社, 136~139.
- 郭炳火、修树孟、石井春雄等, 1991, 黑潮暖流与对马暖流暖性水的来源, 黑潮调查研究论文选(三), 海洋出版社, 12~25.
- 管秉贤, 1986, 东海海流结构及涡旋特征概述, 海洋科学集刊, 27: 1~21.
- Bai Xuezh, Bai Hong, Hu Dunxin, et al., 2001, Cyclonic recirculation on the left side of the Kuroshio in the East China Sea, *Journal of Hydrodynamics*, 13(4): 133~137.
- Guan B., 1994, Patterns and structures of the currents in Bohai, Huanghai and East China Seas. In: *Oceanology of China Seas* (Zhou ed.), Kluwer Academic Publishers 1: 17~26.
- Guo B., Zou E., Xiong X., 2000, Seasonal Variations in Water Exchange between the Huanghai and the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica* (Submitted).
- Guo Binghuo, Heung-Jae and Jae Hak Lee, 1998, Interaction of the Kuroshio water and shelf water in the Tsushima Current region in Summer. *Acta Oceanologica Sinica*, 17(3): 277~292.
- Levitus S., 1982, Climatological Atlas of the World Ocean. NOAA Prof. Paper 13, 17 microfiche. U. S. Govt Printing Office, Washington, D. C. 173.
- Qiu B. and Imasato, N., 1990, A numerical study on the formation of the Kuroshio counter current and the Kuroshio branch current in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 10(2): 165~184.
- Rossby, C. G., 1936, Dynamics of steady currents in the light of experimental fluid mechanics. Papers in physical oceanography and meteorology, *Mass. Inst. Tech. And Woods Hole Oceanogr. Inst.*, 5(1): 43.

NUMERICAL SIMULATION OF THE SEASONAL CIRCULATION IN THE HUANGHAI SEA AND EAST CHINA SEA *

BAI Xuezhi, WANG Fan, HU Dunxin

(*Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences*)

Abstract

The Princeton Ocean model was used to simulate the circulation in the Huanghai Sea and East China Sea and its annual cycle showing that: (1) A weak countercurrent exists on the left side of the Kuroshio. The countercurrent separates from the main stream of the Kuroshio around 30°N , 128°E , flows southwestward along isobaths, meets with the offshore branch of the Taiwan Warm Current around 28°N , 124°E , then returns back and joins the main stream, thus forming a cyclonic circulation. (2) The Taiwan Warm Current has an inshore branch and an offshore branch. Only in summer, the inshore branch can reach to about 30°N , where separates into two branches; one flows northward Changjiang River mouth, the other flows eastward, to be one of the sources of the Tsushima Warm Current. (3) The Tsushima Warm Current has multiple-sources. (4) In summer, Huanghai Sea Warm Current does not enter the southern Huanghai Sea. It mainly originates from the middle shelf flow in seasons other than autumn, in summer, it seemingly comes from the extension of the inshore branch of the Taiwan Warm Current. (5) The Eddy in the northern East China Sea exists all year round, with a closing cyclonic circulation in winter and summer. The seasonal variation of the eddy is influenced by the components of the cyclonic circulation, such as the Huanghai Sea Warm Current and middle shelf flow.

* Contribution No. 4548 from the Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences.