

渤、黄、东海夏季环流的数值模拟*

李徽翡 赵保仁

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

提要 在 POM 的基础上, 建立一个 σ 坐标系下的三维斜压预报模式, 考虑了海底地形、外来流、长江径流、海面风应力、海面热交换等多方面因素的影响, 较好地模拟了夏季东中国海环流的情况。其结果表明, 黑潮在流经东海时沿东海陆坡流动, 其途径随陆坡等深线走向而变, 在其两侧出现一些涡旋。夏季台湾暖流上层水主要来自台湾海峡, 底层水主要由台湾东面黑潮的次表层水入侵陆架生成。夏季进入朝鲜海峡的对马暖流的来源是多方面的, 其中有: 台湾暖流、黑潮分支、长江冲淡水与西朝鲜沿岸流的混合水。长江冲淡水在出长江口后, 很快转向北流动, 到 34°N 附近转向东南方向。在长江口东北面存在两个中尺度的涡旋。夏季黄海冷水环流由南北两部分组成, 表层流速大, 底层流速小。在青岛-石岛附近还存在一个中尺度的反气旋型涡旋。

关键词 东中国海, 环流结构, POM 模式

渤、黄、东海是西北太平洋的边缘海, 环流结构深受海底地形、外海及近岸流系的影响, 因此只有采用三维斜压的预报模式对东中国海环流进行数值模拟才更具说服力。本文试图采用 POM (Princeton Ocean Model 普林斯顿大学海洋模式), 建立一个 σ 坐标系下三维斜压预报模式, 考虑外海出入流、长江径流、海面风应力、海面热交换等诸多因素的影响, 对渤、黄、东海夏季的环流进行数值模拟。

1 数值模拟方法

1.1 计算海区、开边界条件选取

计算海区包括整个渤、黄、东海, 南边界设在 $24^{\circ}30'\text{N}$, 大偶-吐噶喇海峡边界设在 $130^{\circ}30'\text{E}$, 对马海峡边界设在 $129^{\circ}20'\text{E}$ 。水平计算网格为 $5' \times 5'$, 垂向分为 11 层, 表层和底层分辨率为 0.05, 其他层为 0.1。外、内模态的时间步长分别取 $\Delta t_E = 30\text{ s}$, $\Delta t_I = 900\text{ s}$ 。

依照赵保仁、方国洪 1991 年的计算结果, 经台湾以东、台湾海峡、大偶-吐噶喇海峡、对马海峡等边界的进出流量分别取 29.9×10^6 , 3.0×10^6 , 29.4×10^6 和 $3.54 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$, 长江径流取 $0.04 \times 10^6\text{ m}^3/\text{s}$ 。固边界处法向流速为 0, 琉球群岛岛弧地区取无流量通过条件。

1.2 初始场和计算过程

计算中所用的温盐初始场以及计算过程中边界上的温盐条件都取自方国洪等 1990 年在“八五”国家

科技攻关项目——渤、黄、东海斜压海流数值预报模式研究中客观分析所得的月平均值, 海面热交换资料取自文献《渤、黄、东海热平衡图集》^[1], 海面风场采用 Helleman 和 Rosentein 在 1983 年所得的月平均风应力资料。以 6 月的温盐场为初值, 初始的流场为 0, 首先固定温盐场, 在 6 月风场的作用下, 计算 5 d, 得到渤、黄、东海稳定的流场后, 再考虑海面热交换和盐度场的时空变化, 计算 30 d 后输出结果。计算过程中, 边界上的温盐值、海面风应力以及海面热交换数据根据当前计算时间, 从 6 月和 7 月的月平均资料线性插值所得。

2 计算结果分析

在上述初始条件和边界条件下, 计算得到各层的流场图, 较好地再现了渤、黄、东海夏季的环流系统, 现分述如下。

2.1 东海黑潮

从图 1a 至图 1d 可以看到, 计算得到的黑潮流向大致沿着东海陆坡向东北流动, 其途径不是径直指向东北, 而是随地形有所变化。黑潮从台湾东面向北进入东海, 在触及东海陆坡后, 主流很快转成偏东方向,

* 国家自然科学基金资助项目 49676279 号。

收稿日期: 2000-01-14; 修回日期: 2000-04-20

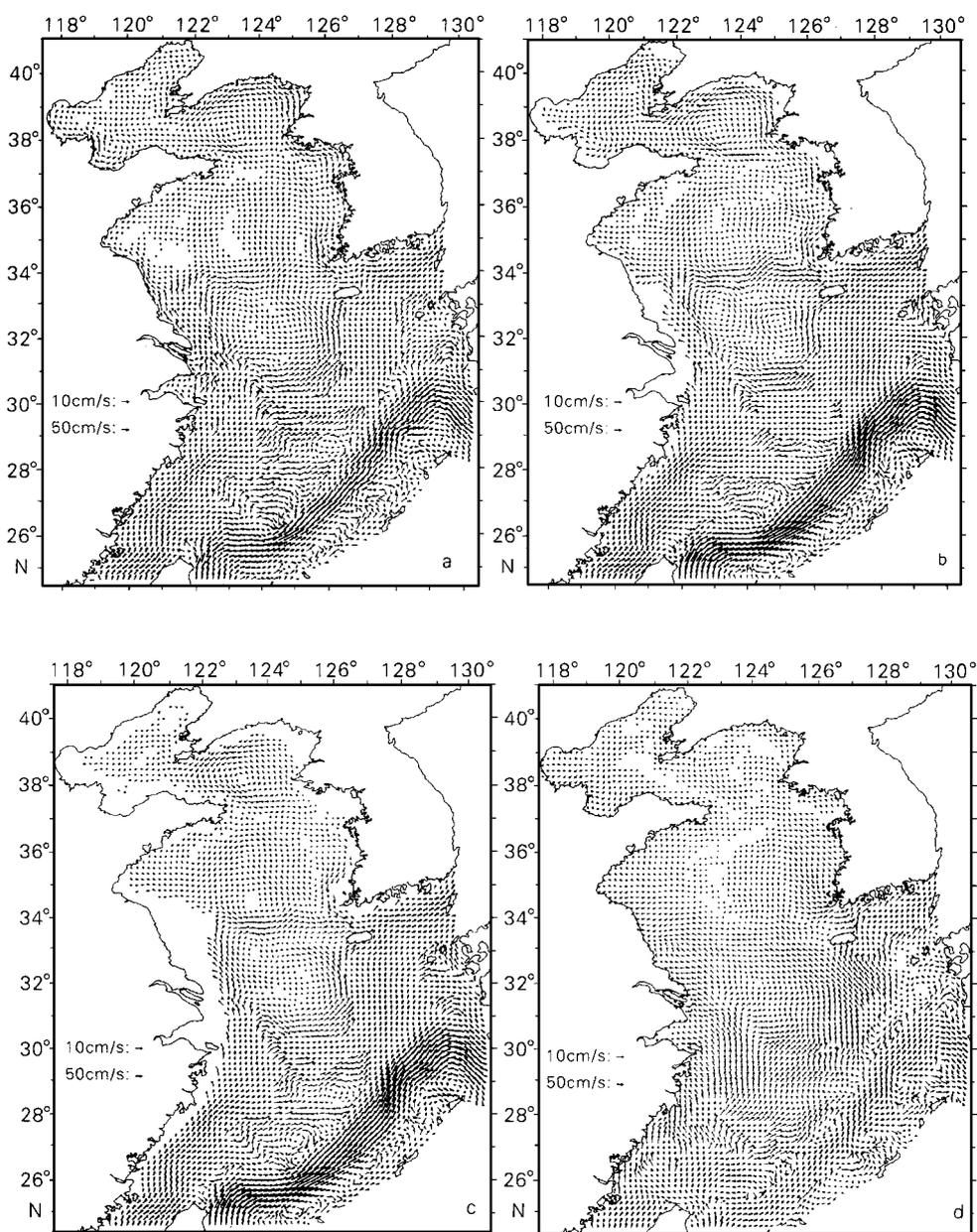


图1 数值模拟结果(流速小于1 cm/s 未画流矢)

a) 深度平均流场; b) 10 m 层流场; c) 20 m 层流场; d) 底层流场

Fig.1 The results of the numeric simulating —— Vertically averaged current vector (a) , current vector at 10 m layer (b) , at 20 m layer (c) , at bottom layer (d)

当其到达 124°E ~ 124°40'E 度之间, 渐渐转成东北方向, 其主干一直延伸到 129°10'E, 30°N 附近位置时开始偏离东海陆坡, 转向东南方向, 从吐噶喇海峡流出。其途径、流速、流幅都较稳定, 流幅宽度约为 100

km, 流速一般在 50 cm/s 以上, 最大可达 90 cm/s, 表层流速较大, 底层流速较小。在黑潮的两侧, 还出现一些涡旋。特别是在其右侧, 在冲绳岛以西海域, 出现一个逆流区和一些小涡旋, 模拟得到黑潮的这些特征与

管秉贤 1964 年、1978 年所作的统计分析结果比较一致。黑潮在到达奄美群岛西边,大约在 $128^{\circ}30' E \sim 129^{\circ}30' E$, $28^{\circ} N \sim 29^{\circ} N$ 之间,由黑潮逆流形成一个反气旋型涡旋,其直径约在 100 km,这个现象与日本的卫星追踪浮标资料¹⁸符合得很好。在黑潮的西面,大约在 $124^{\circ}40' E$, $26^{\circ}50' N$ 附近存在一个中尺度的反气旋型涡旋,其水平尺度约为 110 km,这个结果与邢成军 1983 年根据温盐资料研究的结果,以及管秉贤¹⁸根据日本的卫星追踪浮标资料所得结果相一致。此外在这个涡旋的东北面,大约在 $126^{\circ}30' E$, $28^{\circ}30' N$ 附近,约 20 ~ 50 m 层还存在一个小一些的中尺度反气旋型涡旋,这一现象在前人的工作中尚未发现,其存在与否尚待证实。

2.2 台湾暖流

长期以来,台湾暖流的来源问题是研究东海的海洋物理学家感兴趣的焦点。本文的数值模拟结果表明,从表层到 50 m 深左右,台湾海峡都是台湾暖流的主要来源,在这个深度,来自台湾海峡的水不仅形成台湾暖流,而且有一部分在台湾东北面,约 $25^{\circ}30' N \sim 26^{\circ}30' N$ 之间转向偏东方向,加入到黑潮中。在 50 m 以下,台湾东面黑潮的次表层水侵入到闽浙沿岸,与台湾海峡中的水混和,沿着闽浙近海向北流动。这个结果与苏纪兰、潘玉球¹³根据温、盐、溶解氧资料的分析结果以及袁耀初、苏纪兰等¹⁶计算的结果相一致。

从图 1a 至图 1d 还可以看到,台湾暖流沿着闽浙近海北上,其表层流速最大可达到 40 cm/s,最远可以

延伸到长江口以北, $34^{\circ} N$ 以南的海区,其流速也不断减小,在到达长江口外处减弱到 10 ~ 20 cm/s。在北上的过程中,大约在 $29^{\circ} N \sim 31^{\circ} N$ 间,台湾暖流大部分水转向东,与黑潮平行流向东北,成为对马暖流的主要来源之一。

2.3 对马暖流

计算结果表明,对马暖流的来源具有多“源”性。它主要是来自黑潮分支和台湾暖流,也有一部分是来自济州岛西北面的黄海混和水。黑潮在沿着东海大陆坡向东北方向流动,在 $126^{\circ}30' E$ 至 $128^{\circ}30' E$ 之间,有一分支向北冲上东海陆架,该分支向北流到五国列岛西南部,大约在 $128^{\circ} E$, $32^{\circ} N$ 附近又分离成两支流:一支沿着九州西岸南下形成一个反气旋型的弯曲,在九州南部折回黑潮;另一支继续向北,从济州岛和五国列岛之间进入对马海峡,构成对马暖流的主要来源之一。台湾暖流在沿闽浙近海向北流动中,约在 $29^{\circ} N \sim 31^{\circ} N$ 之间转向东,至 $125^{\circ}30' E$ 附近又折向北,流向济州岛方向,在济州岛西南部时分为两支:一支从济州岛东南面直接流向对马海峡,成为对马暖流的另一主要来源;另一分支流向济州岛西面,在济州岛的西北部与转向的长江冲淡水、朝鲜半岛西岸南下的沿岸水流混和,从济州海峡向东流入对马海峡,构成对马暖流的另一部分。计算得到通过济州海峡的流量大约为 $0.63 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$,约占对马暖流的 18%。这些结果同汤毓祥、Heung Jae Lie¹⁴、郭炳火等¹⁵就对马暖流起源问题所作的分析结果一致。

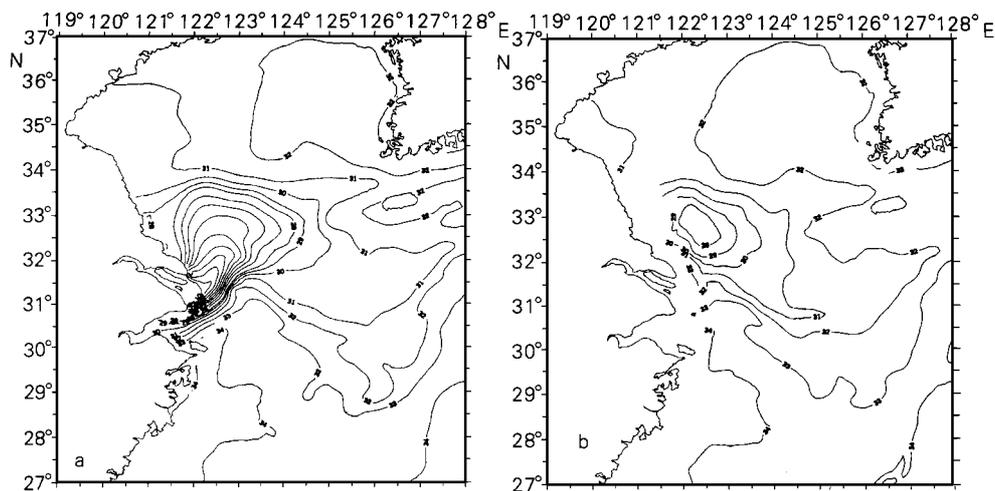


图 2 长江冲淡水扩展

a) 0 m 盐度场; b) 10 m 盐度场

Fig. 2 Diffusion of the Yangtze Diluted Water — the salinity distribution at the surface layer (a), at 10 m layer (b)

2.4 长江冲淡水及东海北部的有关涡旋

夏季长江冲淡水的转向现象,是黄、东海陆架的一个突出的水文特征。本文的模拟计算结果再现了这一现象,从图 1a 至图 1d 可以看到,长江径流出长江口后朝东南方向扩展有限,很快转向北流动,一直到 34°N 附近作反气旋旋转,朝东南运动,一部分与朝鲜西岸南下的沿岸流,及台湾暖流在济州岛西南部的分支混和,穿过济州海峡,成为对马暖流的一部分。从盐度分布图 2a、图 2b 看,夏季长江冲淡水向东北扩展,并且飘浮在距海面较薄的水层中,冲淡水扩展的范围随着深度的增加而缩小。盐度场的分布与朱建荣等^[2]针对长江冲淡水扩展机制所作的数值模拟结果比较吻合。

从整个流场来看,北上的台湾暖流阻碍了长江冲淡水向南扩展,沿岸海区的北向的风生流和台湾暖流携带长江冲淡水向北扩展,而黄海冷水团产生的气旋式环流在 34°N 附近诱导北上的长江冲淡水向东南济州岛方向流动。这一结果,与朱建荣等^[2]针对长江冲淡水扩展机制所作的数值模拟结果相吻合。

此外,在东海北部济州岛的西南面,存在一个中尺度的气旋型涡旋,其中心约在 $124^{\circ}50'\text{E}$, $32^{\circ}20'\text{N}$ 附近,深度在表层至 30 m,直径约 120 km。这个涡旋,与赵保仁在 1985 年根据历史资料分析的结果相比,虽偏西一点,但其大小、深度等都较吻合。在这个涡旋的西北面一点,还有一个大小相近的反气旋型涡旋,其中心大约在 $123^{\circ}30'\text{E}$, $32^{\circ}40'\text{N}$ 附近。这个涡旋在前人的工作中尚未发现,其存在与否尚待证实。

2.5 黄海环流

夏季黄海冷水团环流是中国陆架重要的环流分量之一,是一个典型的陆架浅海非线性热生环流。从本文数值模拟的结果看,黄海冷水团环流主要由两部分组成:一个在北黄海西南部,大约以 $38^{\circ}30'\text{N}$, 123°E 为中心,这一气旋型涡旋,上层流速较大,底层流速较小,几乎覆盖整个黄海的北部;另一个在南黄海的中部,大约在 $122^{\circ}30'\text{E} \sim 125^{\circ}\text{E}$, $34^{\circ}\text{N} \sim 36^{\circ}30'\text{N}$ 之间,形成一个椭圆形气旋型涡旋,南北长度约 350 km,东西宽度约 250 km,接近表层,大约在 10~20 m 深度最为明显。此外在图上还可以看到,在青岛-石岛近海还存在一个反气旋型中尺度涡旋,位置大约在 $120^{\circ}10'\text{E} \sim 122^{\circ}30'\text{E}$, $35^{\circ}\text{N} \sim 37^{\circ}\text{N}$ 之间,流速不大,一般在 3 cm/s 以下。这一结果与徐丹亚、赵保仁^[2]对这一海域进行资料分析和数值模拟的结果非常接近。另外在南黄海东部,朝鲜半岛西岸存在向南的流动。

从图 1 还可以看到,渤海海峡的海流为北进南出,这同 1975 年全国海洋普查的结果十分一致。但由

于本文没有考虑潮余流的影响,所以在渤海内部的环流除莱州湾的顺时针环流得到较好的模拟外,其他区域的环流与实际相差较大。

3 总结

本文采用较完善的三维斜压预报模式,充分考虑了影响东海环流的多方面因素,对夏季渤、黄、东海的环流进行数值模拟。前人也曾经利用数值模拟的方法研究东中国海的环流情况,但他们的工作由于当时计算机速度和容量的限制,其数值模式还不完善,网格一般也较粗,模拟结果虽然与黑潮、台湾暖流、对马暖流等东中国海的主要流系符合得较好,但东中国海环流的一些精细结构,如黑潮两侧的涡旋、黄海冷水团的细致结构等都没有体现。本文在这些方面模拟得较为成功,其计算的结果表明:(1)黑潮在流经东海时沿东海陆坡流动,其途径随地形有所变化,在其两侧出现一些涡旋。(2)夏季台湾暖流表层水主要来自台湾海峡,50 m 以下的深底层水主要由台湾东面黑潮的次表层水入侵陆架生成。台湾暖流沿着闽浙近海向北流动,最远可达长江口以北。(3)夏季进入朝鲜海峡的对马暖流的来源是多方面的,其中有台湾暖流、黑潮分支、长江冲淡水与西朝鲜沿岸流的混和水。(4)长江冲淡水在流出长江口后,受闽浙沿岸流和夏季偏南风的影响,很快转向北流动,一直到 34°N 附近,受黄海冷水团环流的诱导,转向东南流动,指向济州岛方向。(5)在长江口东北,济州岛西南存在两个中尺度的涡旋,一个为反气旋型,一个为气旋型。(6)夏季黄海冷水环流由南北两部分组成,表层流速大,底层流速小。在青岛-石岛附近还存在一个中尺度的反气旋型涡旋。

参考文献

- 1 中国科学院海洋研究所、中国科学院地理研究所。渤、黄、东海海面热平衡图集。北京:科学出版社,1977。159
- 2 朱建荣、肖成猷、沈焕庭。海洋学报,1998,20(5):13~22
- 3 苏纪兰、潘玉球。台湾以北黑潮入侵陆架途径的探讨。黑潮调查研究论文选(二)。北京:海洋出版社,1990。187~197
- 4 汤毓祥、Heung-Jae Lie。海洋学报,1997,19(5):1~11
- 5 郭炳火、李兴宰、李载学。海洋学报,1998,20(5):1~12
- 6 袁耀初、苏纪兰、郝松筠。东海 1984 年夏季三维海流诊断计算。黑潮调查研究论文集。北京:海洋出版社,1987:45~53
- 7 徐丹亚、赵保仁。海洋学报,1999,21(2):18~26
- 8 管秉贤。东海海流结构及涡旋特征概述。海洋科学集刊,北京:科学出版社,1986,27:1~21

NUMERICAL MODEL OF THE CIRCULATION OF THE BOHAI SEA AND YELLOW SEA AND EAST CHINA SEA

LI Hui-fei ZHAO Bao-ren

(*Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)

Received: Jan.14,2000

Key Words: The East China Sea, Circulation structure, POM model

Abstract

A three-dimension baroclinic prognostic model on the σ -coordinate is established based on POM to simulate the summertime circulation of East China Seas, considering the topography, inflow and outflow on the open boundary, Yangtse River runoff, heat flux and wind stress on the surface. The result shows that, the Kuroshio flows along the continental slope of the East China Seas, its trajectory varies with the slope topograph, and some eddies appear on the both sides of it. In the summer, the upper water of the Taiwan Warm Current is mainly from the Taiwan Strait, and its bottom water is mostly from the subsurface water of the Kuroshio which flows on the shelf while passing through the east of Taiwan Island. The water of the Tsushima Warm Current is of multi-source in summer: the Taiwan Warm Current, the branch of the Kuroshio, the mixed water of the Yangtse Diluted Water with the West Korea Coast Current. The Yangtse River Diluted Water quickly turns to north after it flows out the Yangtse River Mouth and then flows southeastward when it arrives at about 34° N. There are two mesoscale eddies northeast of the Yangtse River Mouth. In the summer, the Huanghai Cold Circulation is divided into the north and south ones, and surface current is strong and the bottom current is weak. There is a mesoscale anticyclone eddy near Qingdao and Shidao.

(本文编辑:张培新)