

冬季东中国海环流中的中尺度涡旋数值模拟^{*}

陈 敏^{1,2} 侯一筠¹ 赵保仁¹

(¹ 中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

(² 中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要 采用高精度的 POM 模式,考虑了海底地形、外来流、长江径流、海面风应力、海面热通量等多方面因素的影响,模拟了冬季东中国海环流结构。模拟结果显示:在黄海东部很可能存在两个涡,中心分别在 $124^{\circ}37'E, 37^{\circ}N$, $124^{\circ}E, 35^{\circ}30'N$; 东海北部存在一个大型的气旋式涡旋,其中心位置在 $125.1^{\circ}E, 30.5^{\circ}N$ 附近,该涡旋是由东北向的台湾暖流、西北向的黄海暖流及南下的沿岸流组成的封闭结构;日本九州以西黑潮入侵分支形成一涡旋,黑潮分支是形成此涡旋的直接动力因素,另外地形和冬季盛行的偏北风也对该涡旋的形成有一定正面影响。

关键词 东中国海,环流,中尺度涡旋,数值模拟

中图分类号 P731.21 **文献标识码** A **文章编号** 1000-3096(2003)01-0053-08

60 年代以来,海洋学上的一项重要成果是发现了海洋中存在着“中尺度”涡。其空间尺度为数百公里,时间尺度为数月,平均流速约为 10 cm/s 。它具有巨大的能量,可与大气中的气旋、反气旋相比拟,是决定海洋水文变化的重要因子之一。对于东中国海的涡旋,

^{*} 中国科学院知识创新工程和国家 973 计划项目
第一作者:陈敏,出生于 1976 年,硕士,研究方向:物理海洋学。电话:0532-2898516

收稿日期:2001-12-26;修回日期:2002-03-20

近几十年来,中外科学家进行了一系列的工作。管秉贤^①1978年对台湾省东北部的气旋型涡旋进行了研究。但对于东中国海涡旋的认识,过去多依赖于温盐资料和少量的测流资料的分析研究。由于观测资料的不充分,众多因子互相影响,仅通过资料分析对某些机制很难做出全面的解释。近20年来数值模拟工作逐步展开,王卫和苏纪兰等^[1]1987年先后在该海区进行了这方面的工作。

本文在POM模式基础,考虑了海底地形、外来流、长江径流、海面风应力、海面热通量等多方面因素的影响,建立了水平分辨率为 $5' \times 5'$ 的三维斜压预报模式。模式模拟结果较好地模拟了东中国海环流结构,进一步对整个冬季东中国海的“中尺度”涡旋进行了数值模拟。

1 模式设计

1.1 POM简介

(1) 采用三维原始控制方程,垂向 σ 坐标,水平方向采用正交曲线坐标。

(2) 插格格式采用“Arakawa C”网格。水平方向差分格式显式,受CFL条件的限制;垂向隐格式,允许细分层。

(3) 模式采用内外模态分离技术,外模态受表面波速和CFL条件的限制,采用较短时间步长,内模态受内波波速和CFL条件的限制,采用较长时间步长。

(4) 采用底层湍封闭子模式提供垂向混合系数。

1.2 计算海区 and 开边界条件

本文计算海区包括整个渤、黄、东海,南边界设在 $24^{\circ}30'N$,大偶一吐噶喇海峡边界设在 $130^{\circ}30'E$,对马海峡边界设在 $129^{\circ}20'E$ 。本文计算的水平网格为 $5' \times 5'$,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 $\Delta t_E = 30s$, $\Delta t_I = 900s$ 。

本文开边界上,依照赵保仁、方国洪^[2]1991年的计算结果,依据多次数值实验,而取各开边界处流量:台湾以东黑潮流量取为 $22.5 \times 10^6 m^3/s$,台湾海峡中的流量取 $1.0 \times 10^6 m^3/s$,大偶一吐噶喇海峡的流量取 $21 \times 10^6 m^3/s$,对马海峡中的流量取 $2.53 \times 10^6 m^3/s$,长江径流量取 $0.03 \times 10^6 m^3/s$ 。固边界处取法向流速为0,琉球群岛岛弧地区取无流量通过条件。这样,计算海区流入和流出的流量平衡。

1.3 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在“八五”国家科技攻关项目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》,海面风场采用Hellerman & Rosentein在1983年所得的月平均风应力资料。采用1月的温盐场,初始的流场为0,在1月风场的作用下,得到渤、黄、东海稳定的流场后,计算120d后输出结果。

2 计算结果分析

本文计算流场反映出计算区域的主要海流特征,在此不再赘述,下面着重分析计算出的涡旋结构。

2.1 黄海东部的两个涡旋

从本文计算结果冬季10m层流场(图1)可以看出:黄海东部朝鲜沿岸流南下过程中,有三支脱离其主体向黄海内部流动并形成三个涡旋,下面对南部的两个涡旋此作详细说明。

北分支大约在 $36^{\circ}N$ 以北脱离朝鲜沿岸流后便迅速转向西北,当到达 $124^{\circ}E$ 以西时,受黄海中部北向流的影响而转向东北,最终大部分重新汇入南下的朝鲜沿岸流。这一分支环形一圈明显形成一涡旋,此涡旋中心在 $124^{\circ}37'E, 37^{\circ}N$,东西最大范围为 $123.8^{\circ}E \sim 125^{\circ}E$,南北最大范围为 $36^{\circ}N \sim 37.6^{\circ}N$ 。此涡旋在20m层流场(图2)中体现也很明显,到30m层(图3)时已经明显减弱,西部最大范围仅达到 $124^{\circ}E$,南北范围也相应缩小。总体来说该涡旋的速度在10m到30m层都能达到 $10cm/s$ 。对应该区域的表层流场并未显示出该涡旋,此处仅存在一东向流。这也是合理的,因为表层受风的影响大。

南分支大约在 $34.6^{\circ}N$ 附近脱离主体后,向西流动到达 $123.5^{\circ}E$ 附近在北上的黄海暖流携带下转向北。该分支在北上的过程中大部分与黄海暖流混合,另外一部分转向东北到达 $36^{\circ}N$ 以南时转向东。从流场图中看出该分支没有再直接流回朝鲜沿岸流,除大部分随黄海暖流北上外有一小部分在涡旋中心附近流动。该分支流经范围较北分支要大,形成的涡旋也较明显。此涡旋中心在 $124^{\circ}E, 35^{\circ}30'N$,较北部涡旋偏西,可以认为该涡旋的西边界就是黄海暖流。在黄海暖流的带动下此涡旋的海流流速比较大,10m层流速达到 $10cm/s$ 以上,直到30m层该涡旋的结构、位置和流速基本和10m层没多大差异。50m层流场(图4)显示该涡旋的范围缩小,涡旋中心移动至 $124.5^{\circ}E$

① 管秉贤。东海海流系统概述。东海大陆架论文集

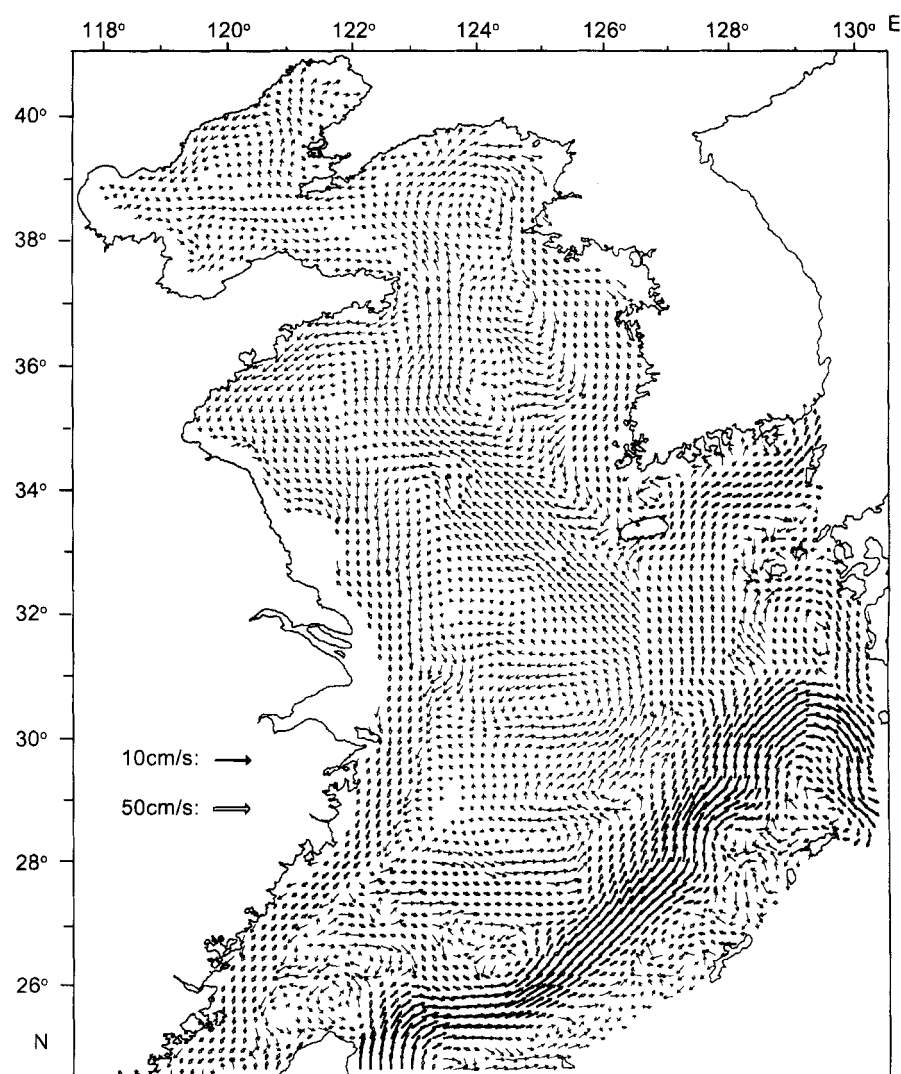


图1 冬季 10 m 层流场

Fig.1 Current on 10 m layer in winter time

以东,这是底层黄海暖流势力加强的结果。

在此来分析一下这两个涡旋存在的可能性。汤毓祥等^[3]2000年分析1997年2月18~28日南黄海表、底层的温盐分布时指出该季节温盐分布的突出特点是:从表至底,一高盐暖水舌自济州岛西侧海域大致向西北偏北方向伸展。这一高盐暖水舌的轴线明显偏于黄海槽的西侧。在高盐暖水的两侧是低温、低盐水。东侧低盐水似乎有两个冷水舌锋。其中一个指向黄海中部,舌的前锋到达 $35^{\circ}40'N$, $123^{\circ}40'E$ 附近海域;另一舌锋直指南,并与来自外海的高盐暖水相

遇,在 $33^{\circ}30'N$ 与 $34^{\circ}30'N$ 之间形成一较强的东-西向温锋区。管秉贤^[4]1962年曾提到黄海暖流不是密度流,此海流是沿水舌的轴线方向流动的,并将之命名为射形流。

对照本文10 m及20 m层流场图与文献[3]图2可发现:本文计算黄海暖流和汤毓祥等2000年显示的黄海高盐暖水舌十分相似,而本文计算出的朝鲜沿岸流的两个分支又明显对应汤毓祥等2000年高盐暖水舌东侧低盐水似乎有两个冷水舌锋。如果这两个冷水舌锋也是象黄海暖流那样具有射形流的特点,那么

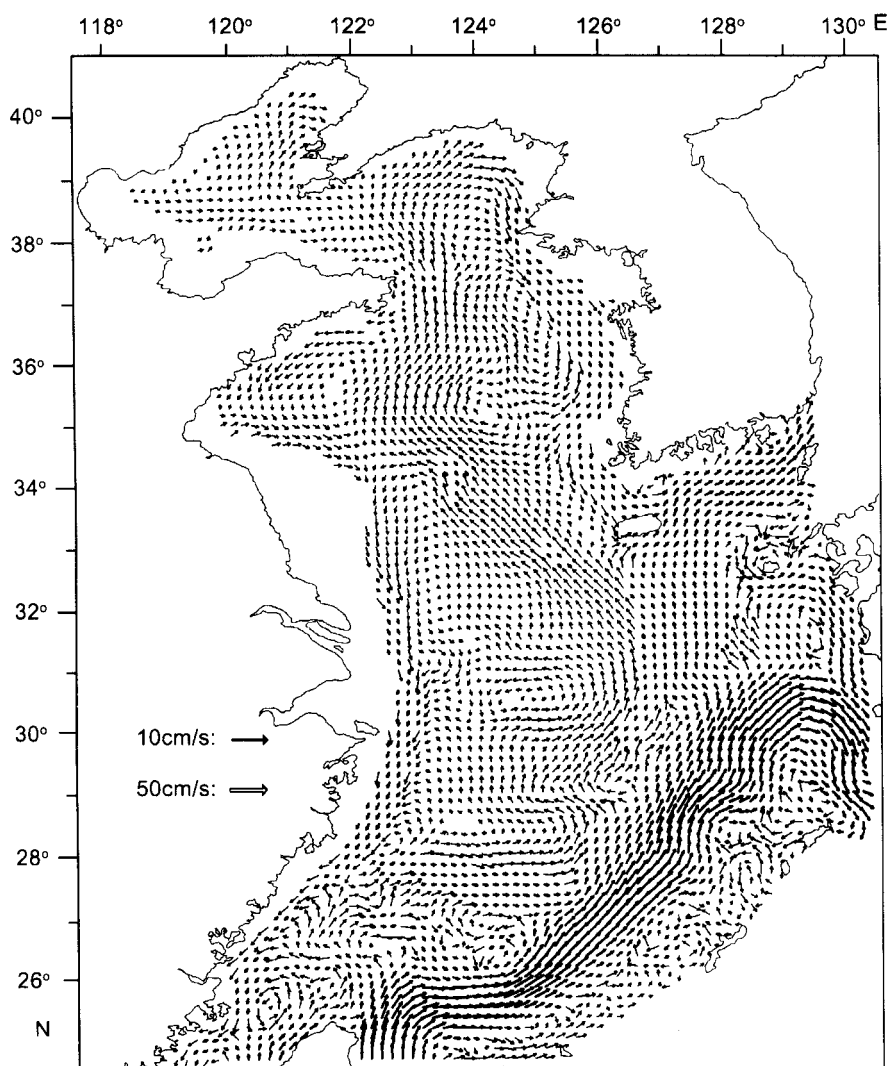


图 2 冬季 20 m 层流场

Fig.2 Current on 20 m layer in winter time

就可以定论：在汤毓祥等 2000 年文中资料观测时间所处相似环境下本文计算的黄海东部朝鲜沿岸流的两个分支是正确的。其实低盐水舌是可以形成射形流的，例如夏季河口附近的海流当沿低盐水舌轴线方向流动。即使此处的低盐水舌并未直接对应射形流，文献[3]中图 2 也显示冬季黄海东部确实应该有两个明显的海流结构，那么本文计算的朝鲜沿岸流的两个分支最坏也只是位置偏离而已。那么本文计算出的涡旋也随之被证明是可能存在的，要分析这两个涡旋存在的机理仍需进一步的研究和验证。

2.2 东海北部的一个涡旋

10 m 层流场图显示东海北部存在一个大型的气旋式涡旋，其中心位置在 125.1°E , 30.5°N 附近。该涡旋其实是由东北向的台湾暖流、西北向的黄海暖流及南下的沿岸流组成的封闭结构。其东西跨度明显大于南北跨度，呈椭圆型。涡旋的流速在不同方位也不尽相同，其中涡旋北侧流速最小，接近 10 cm/s ，其余方位的流速均在 10 cm/s 以上。至 30 m 层涡旋的形状还是椭圆型，只是由于西边的沿岸流势力减小，涡旋中

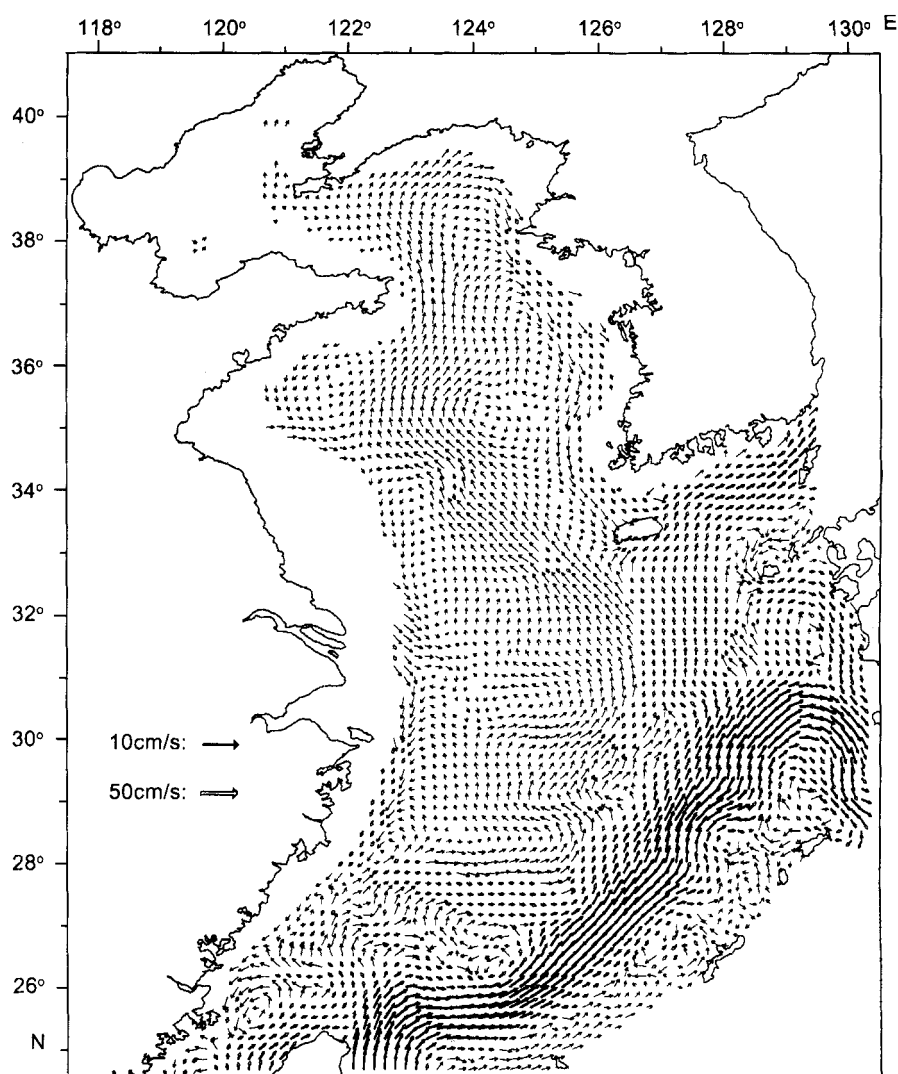


图3 冬季 30 m 层流场

Fig.3 Current on 30 m layer in winter time

心似乎偏西一些到达 124.6°E 附近,但其东侧的流速并未减小。此涡旋能很好地反映出该区域几个强流的相互作用。例如北上的台湾暖流达到 30°N 附近时,而其东侧黑潮水向北分出一分支。因此台湾暖流的西侧部分受这一黑潮分支的排斥而被迫偏西。而在西侧沿岸流和长江入海水势力并不小,因此上述台湾暖流西侧水最终只能是向东偏转,沿该涡旋的东侧汇入北上的黄海暖流。如果仅从流场图来分析,可以直观地看出:黑潮在 30°N 附近向北的分支是形成该涡旋的关键。没有黑潮的此处分支,那么台湾暖流就会通畅地

直接向东北流动;黄海暖流之所以有如此强的势力,黑潮此处入侵的作用是非常重要的(从我们的无风模拟实验来看,在风应力为 0 的情况下,黄海暖流势力并未明显减弱,因此冬季北风促成在黄海两侧的沿岸流对黄海暖流加强的贡献是次要的)。

井上尚文^[5]1975 年根据秋冬季投放的海底漂浮器资料指出济州岛西南海域底层秋冬季期间存在一范围相当大的气旋型水平环流。胡敦欣等^[6]1980 年根据若干年的水文、海流图资料,分析了这个涡 ($30 \sim 32^{\circ}\text{N}$, $125 \sim 127^{\circ}\text{E}$) 的特征及其成因,并认为它似乎是

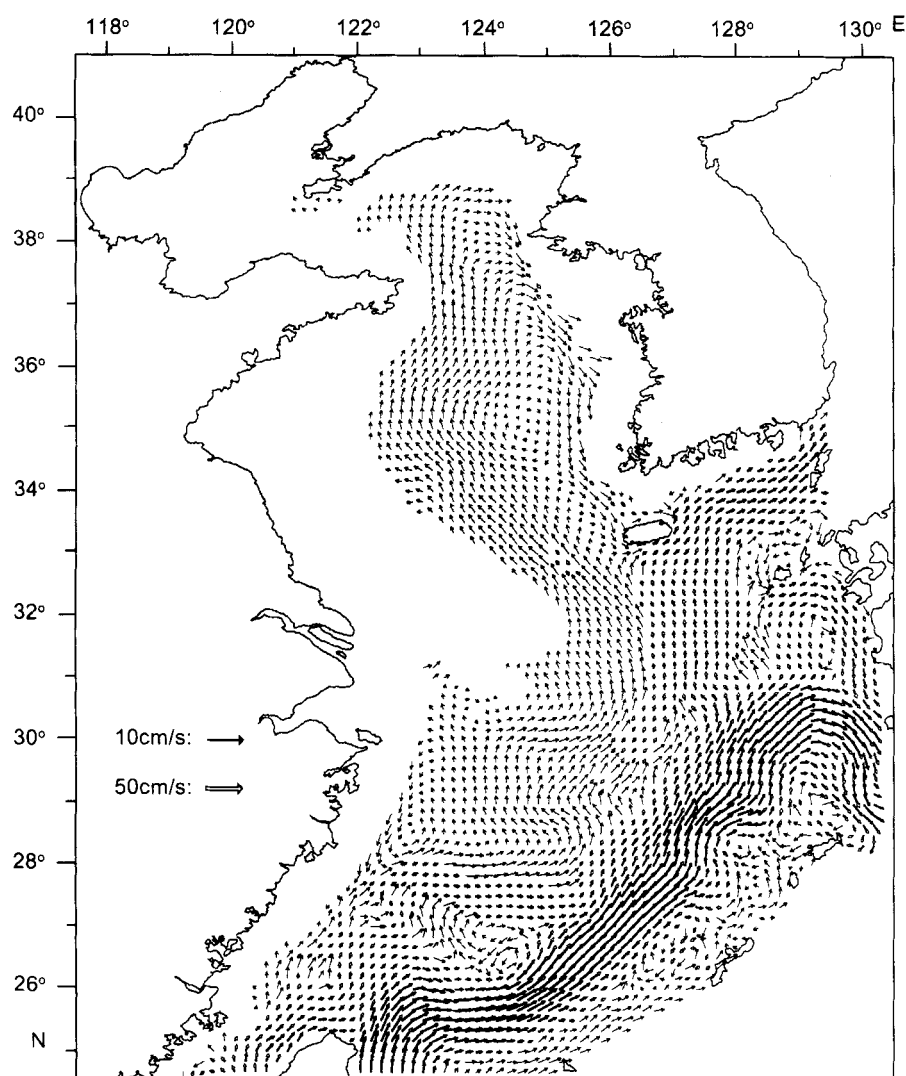


图4 冬季 50 m 层流场

Fig.4 Current on 50 m layer in winter time

终年存在着的。胡敦欣等 1980 年同时指出黄海暖流、黄海沿岸流和黑潮北上余脉三股流的相互作用是产生该涡旋的主要动力因子。

本文的模拟结果与井上尚文 1975 年和胡敦欣等 1980 年的结果一致。需要补充说明的是：就形成该涡旋的动力因子来说，本文的结果显示台湾暖流（至少是其西侧部分）对该涡旋形成的贡献是比较大的。

2.3 东海东部黑潮入侵形成的涡旋

黑潮在东海有两次入侵现象，一处是在台湾北

部，一处是在吐噶喇海峡西侧。关于台湾北部入侵及该处产生涡旋的研究比较多，在此不再重复。本节就吐噶喇西侧黑潮的入侵现象进行分析。

黑潮于 30°N 附近东转时向北分出一分支，这一分支是对马暖流的主要来源。这在本文流场图中也能明显看出。这里要说的是该黑潮的该分支在脱离黑潮主干后有一部分随对马暖流水北上的同时又脱离了对马暖流的主体而向东北偏转流向日本九州方向，在九州西侧海域形成半封闭的涡旋。孙湘平等^[7] 1996 年研究结果显示对马暖流北上的同时在其东侧有一分支

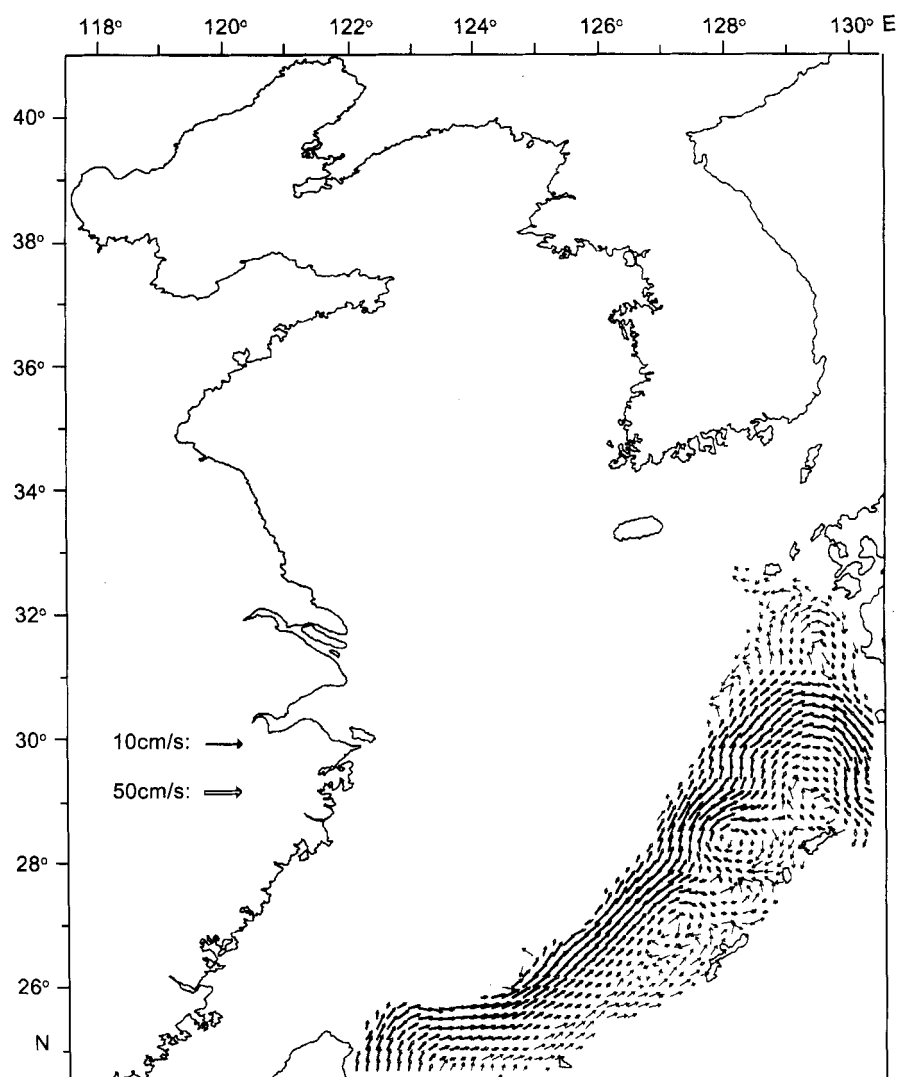


图5 冬季 200 m 层流场

Fig.5 Current on 200 m layer in winter time

向东转并可能在九州以西海域形成顺时针方向涡旋，与本文结果相一致。

本文结果从 10 m (图 1) 到 200 m 层 (图 5) 都能体现出黑潮分支是该涡旋的主要动力因子，似乎该涡旋与对马暖流是相互分离的 (当然在实际情况中这是不可能的)。黑潮在台湾东北部的入侵形成舌型弯曲成因有众多说法，如涡度守恒原理的限制，强流失去边界的控制等等。那么吐噶喇海峡西侧的黑潮入侵形成的这个半封闭涡旋又能如何解释呢？对该问题作者想

做一下形象的说明。

从作者的数值实验来看，加大台湾东侧黑潮流量后九州西侧的涡旋就有相应加强。我们知道，加大流量等于加大黑潮的流速，因此在动量方程中受影响最大的是平流项。这也就说明惯性作用力在该涡旋形成中起了重要的作用。黑潮流量加大后，黑潮在 30°N 附近向北分支将加强，而该分支是形成九州西侧海域涡旋的直接动力因素，所以该涡旋随黑潮流量的加强而增强是合理的。

另外作者发现该涡旋大体沿 300 ~ 400 m 等深线运动, 因此猜测此处地形对该涡旋的形成是必不可少的。强流受到地形的影响而发生弯曲的情形并不少, 但就黑潮来说它本身就是受西边界的影响而发生显示中的各种弯曲。特别是在小区域内, 地形的影响一般要超过温盐的影响。

从本文的数值实验(减小风速)来看, 冬季盛行的偏北风也对该涡旋的形成有一定正面影响。冬季正常风速下在九州西侧海岸有类似与朝鲜沿岸流的南向流动, 这必定对该处涡旋的东侧流动起到加强的作用。

3 结论

采用高分辨率模式模拟出黄东海多个公认的涡旋, 并对部分涡旋做了详细说明。因篇幅限制象黑潮两侧的涡串在此并未作分析, 作者准备另写文章对涡

串进行专门研究。但对于这里提出的观点正确与否我们寄希望于将来大量的现场调查验证。

参考文献

- 1 王卫, 苏纪兰, 黄, 东海黑潮流系和涡旋现象的一个正压模式, 海洋学报, 1987, 9(3): 271 - 284
- 2 赵保仁, 方国洪, 东海主要水道德流量估算, 海洋学报, 1991b, 13(2): 169 - 178
- 3 汤毓祥, 邹娥梅, 李兴宰, 等, 南黄海环流的若干特征, 海洋学报, 2000, 22(1): 1 - 16
- 4 管秉贤, 有关我国近海海流的若干问题, 海洋与湖沼, 1962, 4(3~4): 121 - 141
- 5 井上尚文, 东シナ海大陆棚上の海底付近の流动, 海と空, 1975, 51(1): 5 - 12
- 6 胡敦欣, 丁宗信, 熊庆成, 东海北部一个气旋型涡旋的初步分析, 科学通报, 1980, 25(1): 29 - 31
- 7 孙相平, 苏玉芬, 修树孟, “东、南海陆架暖流”的初步探讨, 海洋通报, 1996, 15(2): 1 - 10

NUMERICAL SIMULATION OF THE MESO-SCALE EDDY IN THE EAST CHINA SEA IN WINTER

CHEN Mn HOU Yi-Jun ZHAO Bao Ren

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

Received: Dec., 26, 2001

Key Words: The East China Sea, Circulation, Mesoscale eddy, Numerical simulation

Abstract

A three-dimension baroclinic prognostic model on the σ -coordinate is established based on POM to simulate the summertime circulation of the East China Sea, considering the topographic influence, inflow and outflow on the open boundary, Yangtse runoff, heat flux and wind-driven effects on the sea surface. The results show that, there most probably are two eddies, centering on $124^{\circ}37'E, 37^{\circ}N, 124^{\circ}E, 35^{\circ}30'N$ respectively, at the east of the Yellow Sea; A large cyclonic eddy exists at the north of the East Sea, which centers on $125.1^{\circ}E, 30.5^{\circ}N$. It's a closed structure conformed by the east-northward Taiwan warm current, west-northward Yellow Sea warm current and southward coastal current; A branch of Kuroshio intrusion engenders an eddy at the west of Jiuzhou island of Japan. It's the branch of Kuroshio that is the direct dynamic factor of the formation of this eddy, besides, the topographic influence and the northward wind prevailing in winter all effect the eddy's formation positively.

(本文编辑:张培新)