

提要 利用二维全流水动力方程组,在考虑了海面风应力、潮余流和开边界入流等条件下,首次模拟出了石岛附近的中尺度反气旋式涡旋海水运动,并对南黄海西部冬季环流的特征作了初步探讨。数值模拟结果和实测吻合良好,数值模拟表明:冬季南黄海西部环流形式主要决定因子是海面风应力、潮余流及从开边界的流入(出)该海域的黄海暖流及黄海沿岸流。黄海暖流在偏北风作用下沿西北方向可直达山东半岛近岸,后分为两支:一支向南汇入黄海沿岸流流出,另一支北上并与黄海沿岸流相配合,在石岛附近形成一个中尺度反气旋式涡旋。

关键词 中尺度涡旋,数值模拟,黄海暖流,黄海沿岸流

80年代后期张法高等人(参见 Zhang, F., 1987. *C. J. Oceanol and Limnol.* 5(1): 149~160)整理分析了1975~1980年期间投放的漂流瓶和漂流卡资料,发现在青岛-石岛附近海面全年都存在着一个反气旋式的涡旋运动。赵保仁等1995年根据潮汐潮流的数值计算结果得出的潮余流分布发现,潮余流对该涡旋的形成有一定的贡献。

迄今为止,尽管已经有许多作者如乐肯堂(1993)、刘兴泉^[3]、戚建华等^[5]对黄海环流进行了大量的数值计算工作,但还没有模拟出青岛-石岛的这一反气旋涡旋。只有乐肯堂等模拟黄、渤海冬季风生流试验时,当海面风应力取均匀的西北风时,在石岛附近有形成涡旋的趋势,但由于其计算网格大,看不出其中的细微结构来。同时,他在讨论中也将这一现象忽视了。

本文通过求解二维全流方程组,首次模拟出了青岛-石岛的中尺度反气旋涡旋,同时,整理了一部分海区1959~1974年间,1,2月份的船测不同层次的余流资料,对资料进行了深度平均(图1),并将实测余流资料与计算结果进行了比较,发现本二维数值计算结果与实测吻合较好。

1 控制方程

由于黄海水深较浅,冬季在强劲偏北季风的作用下,海水温度和盐度垂直分布均匀。因此,采用垂直平均的二维正压环流模式就能够模拟出该海域环流的基本特征。

使用笛卡尔右手坐标下二维全流水动力方程组:

$$\frac{\alpha u}{\alpha t} + u \frac{\alpha u}{\alpha x} + v \frac{\alpha u}{\alpha y} - f v + \frac{r u}{H} \frac{u^2 + v^2}{2} + g \frac{\alpha \zeta}{\alpha x} - A_H \left(\frac{\alpha^2 u}{\alpha x^2} + \frac{\alpha^2 u}{\alpha y^2} \right) - \frac{\tau_x}{\rho H} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\alpha v}{\alpha t} + u \frac{\alpha v}{\alpha x} + v \frac{\alpha v}{\alpha y} + f u + \frac{r v}{H} \frac{u^2 + v^2}{2} + g \frac{\alpha \zeta}{\alpha y} - A_H \left(\frac{\alpha^2 v}{\alpha x^2} + \frac{\alpha^2 v}{\alpha y^2} \right) - \frac{\tau_y}{\rho H} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\alpha \zeta}{\alpha t} + \frac{\alpha(Hu)}{\alpha x} + \frac{\alpha(Hv)}{\alpha y} = 0 \tag{3}$$

。式中 u 、 v 分别为垂直平均的流速东、北分量; $H = \bar{H}$

。 收稿日期: 1997-03-26

+ ξ 为总水深, h 和 ξ 为未扰动海面起算的水深和海面升高; A_H 为水平涡动粘性系数, 取 $10^4 \text{ m}^2/\text{s}$; g 为重力加速度; f 科氏参数; τ_x, τ_y 为海面风应力, 在开边界处给定流速边界条件:

$$u = u_0 + u_t = u_0 + u_{m_1} \cos(\sigma_{m_1} t - g_{m_1}) + u_{m_2} \cos(\sigma_{m_2} t - g_{m_2}) \quad (4)$$

式中 u_0 为给定的余流场(具体给法见后), u_{m_1}, u_{m_2} 及 g_{m_1}, g_{m_2} 分别是 m_1 ($m_1 = \frac{k_1 + O_1}{2}$) 和 M_2 分潮流调谐常数, $\sigma_{m_1}, \sigma_{m_2}$ 为角速度。

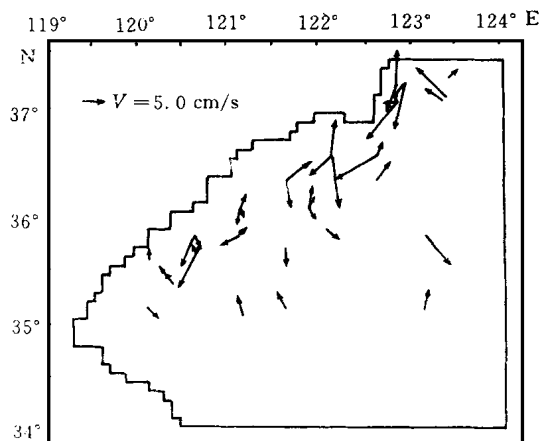


图1 冬季海区实测余流(12月~翌年1月)

Fig. 1 Observation data of the residual current in winter

2 边界条件

计算海区取为 $119^\circ \sim 124^\circ \text{E}$, $34^\circ \sim 37^\circ 30' \text{N}$ 。具有漫长的开边界, 因而正确地给出开边界条件成为数值计算成败的关键。经过参考管秉贤 1964 年、乐肯堂等 1991 年、1993 年及刘兴泉 1996 年等的工作, 给出如下边界入(出)流余流场。

本海区内冬季最显著的两大流系为黄海沿岸流和黄海暖流, 黄海沿岸流在成山头附近, 此处地形陡峻, 流幅窄而流速大, 流速有时可达 35 cm/s , 但这一带底层也常出现逆流现象。因此, 此处 $122861 \text{ m}^3/\text{s}$ 的入流流入山东半岛南岸是合理的。黄海沿岸流沿 $40 \sim 50 \text{ m}$ 等深线的弧形南下, 流速由北而南逐渐增大, 同时有一部分黄海暖流汇入, 于北纬 34°N 流出计算海域, 这里给定 $334498 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量。黄海暖流上、下层流向、流速皆相当稳定, 平均 $5 \sim 6 \text{ cm/s}$ 。根据此地的水深及黄海暖流的流幅计算出黄海暖流的流量不到 1 sevd/s , 而本计算区域到 124°E , 大约有一大部分

暖流流入, 因此 $448893 \text{ m}^3/\text{s}$ 的流量是可取的, 黄海暖流流出本海区的流量为 $237256 \text{ m}^3/\text{s}$, 这样, 上述流系在计算海区达到进出平衡, 满足质量守恒定律。

(4) 式中的潮流调谐常数和常数是根据赵保仁 1994 年完成的潮汐、潮流计算获得的, 为了获取比较满意的潮流边界条件, 先将开边界扩大 3 个网格, 用潮汐调和常数计算潮汐、潮流, 取得满意结果后再提取设定开边界处的潮流边界条件。这样处理后计算域内用流速边界条件算得的潮汐、潮流, 几乎与用潮位边界条件算得的结果完全一致。

3 差分方案

本数值计算采用 Leendertse 的 ADI 方法, 具体差分方程见文献[1]。

模式的空间差分采用交错网格, 采用规则的长方形 C 网格, 空间步长为 $5' \times 5'$, 时间步长, $\Delta t = 894 \text{ s}$ 。

4 南黄海西部冬季环流数值模拟结果

冬季由于受制于大陆高压, 高空槽后的冷空气频繁南下造成我国大陆盛行西北风。每年自 10 月持续到次年 3 月。井传才等[2]将千里岩、朝连岛、海阳和青岛 4 个站, 1951 年~1980 年各季(月)最多风向频率进行了统计。冬季, 平均出现的大风日中, 风向基本都为 NW。刘光章 1984 年根据 1958 年~1967 年南黄海平均风场统计资料得出秋冬季南黄海多年平均盛行风向为 NW 风。以小麦岛冬季多年(1960 年~1969 年)平均风频率为青岛近海冬季风场代表, NW 风约占 90% 以上, 平均风速为 $6 \sim 7 \text{ m/s}$ 。因此, 作者计算中给出一个均匀的风应力(取 $\tau_x = \tau_y = 5 \times 10^{-6} \text{ N/cm}^2$), 考虑潮流、海底实际地形及在开边界处的余流场(以下简称入流影响)计算结果如图 2 所示。

由图 2 可知, 本数值结果已能模拟出该海区的环流主要特征: (1) 由于北上的一支暖流和绕过成山头南下的黄海沿岸流在石岛附近海域由于流向切变而形成了一个中尺度反气旋涡旋。(2) 黄海沿岸流以很窄的流幅绕过成山头, 进入南黄海沿岸, 但也有少部分转向东汇入北上的黄海暖流流出, 流速最大处是在成山角, 可达 15 cm/s 。(3) 在计算海区南部, 黄海沿岸流都呈向南、东南向流出, 流速较稳定, 基本为 $8 \sim 9 \text{ cm/s}$ 。(4) 黄海暖流从 122°E 东开始北上进入该海域,

随后分成3支较明显的流向:一支几乎沿与经向平行的路线;继续北上进入北黄海,其流速较稳定,约为3

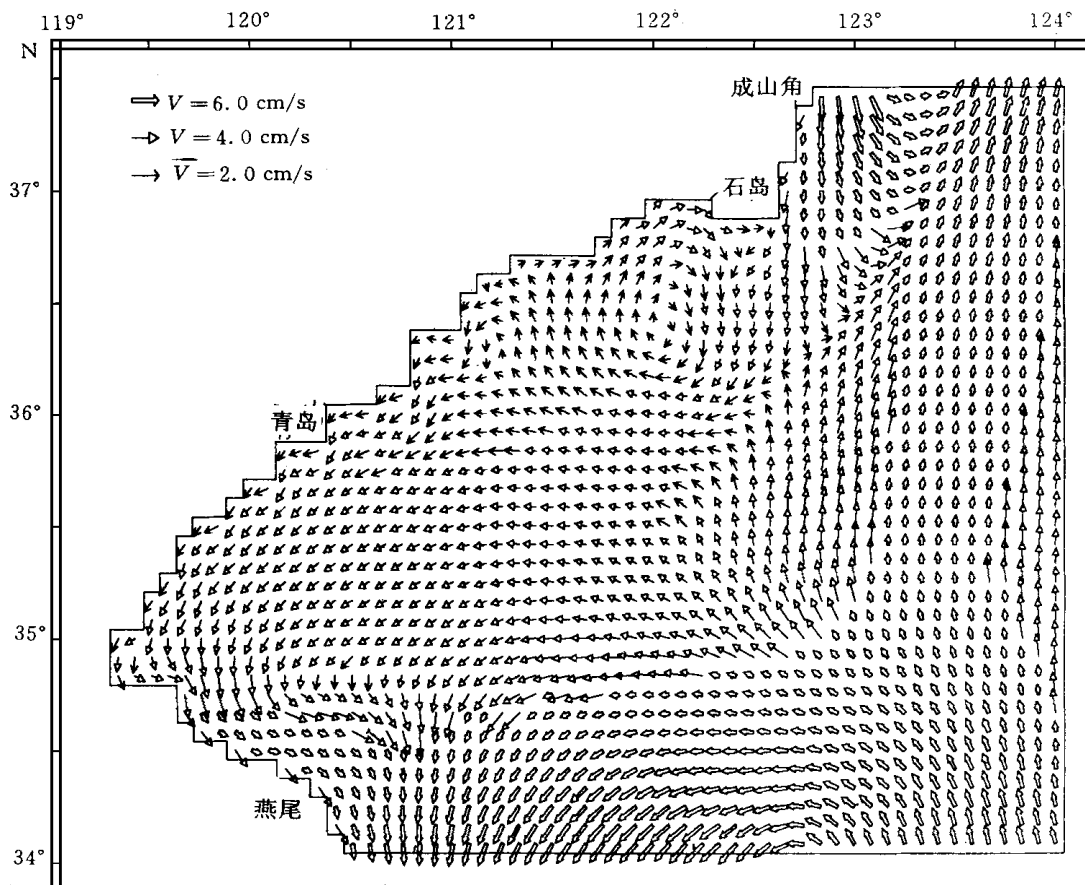


图2 计算海区冬季环流数值模拟结果

Fig. 2 The wintertime circulation modelling of the computational sea area

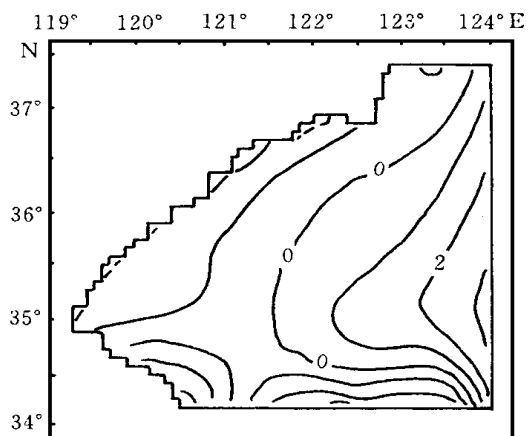


图3 数值模拟的海区水位场(cm)

Fig. 3 Water level field (in cm) of the computational sea area

~ 5 cm/s, 一支逐渐转向西后汇入黄海沿岸流流出, 还有一支沿西北向直达山东半岛近海-青岛附近后分为北上和南下两支, 流速虽然弱(小于 2 cm/s)但很稳定。

通过数值计算模拟出的中尺度反气旋, 其范围约在 36°~ 36°50' N, 120°10'~ 122°40' E, 中心位置位于 36°28' N, 121°53' E, 涡旋流速较弱, 一般小于 2 cm/s, 这与张法高 1987 年通过漂流瓶、卡资料绘出的涡旋位置基本一致, 尺度略小。这是因为漂流瓶、卡资料反映的基本为表层流动, 且易受气象因素的影响, 同时根据漂流瓶、卡资料画的环流图也主要是由施放和回收地点对海流路径的一种假设, 而数值计算在很大程度上证实了这种假设, 即至少冬季在青岛-石岛近海存在着一个中尺度反气旋式涡旋。在以前诸如乐肯堂等(1993)、刘兴泉^[3]、戚建华等^[5]的数值计算结果中, 上述(2), (3)特征是明显的, 而(1), (4)特征则不明显或没有。尤其是计算的黄海暖流都不会抵达山东半岛

南岸,进而再北上或南下。

将数值计算结果和实测余流资料(图2)进行比较可以看出,尽管余流资料显得比较乱,但依然可以从中看到数值计算结果的4个特征在实测图中得到了体现。尤其在石岛附近的余流矢,恰形成一个反气旋式涡旋,其尺度、位置与数值结果相去不远,只是在流速上差别。原因一是由于周日船舶测流资料本身随机性较大,并有一定的误差,再者,作者仅仅是采用了一个均匀的风场来模拟海流,以期证实涡旋的存在并揭示其形成机制,因而必然会与实测资料之间有一定的误差。但总体来讲,模拟还是成功的,基本上反映了该海区的流场基本情况。

为了进一步分析该海区冬季环流,还计算了海面等高线分布。图3给出流场对应的海面等高线分布,将计算流场与海面等高线相比较,可以看出冬季环流基本上是沿海面等高线行进的。由于冬季风的作用,在山东半岛南岸近海出现明显的减水。因此,形成逆风北上的补偿流和沿岸向东北的梯度流。而青岛-石岛近海的中尺度反气旋涡旋形成机制正是南下的黄海沿岸流和北上的补偿性质的黄海暖流,在岸线和海底地形的诱导下产生的。

5 结论

从以上的数值计算可得出如下结论:

(1)利用实际地形及潮流影响,考虑合理的人流条件和风场的二维数值模型便能模拟出南黄海西部冬季平均环流的主要特征。(2)冬季,在石岛附近存在着一个中尺度反气旋涡旋,该涡旋主要是由冬季风造成的,潮余流对其形成也有一定的贡献。(3)在冬季风的作用下,造成山东半岛南岸海区减水,黄海暖流在地形的诱导下转向西、西北进行补偿。(4)冬季南黄海西部的二维流场大体沿海面等高线运动。

主要参考文献

- 1 方国洪等.潮汐和潮流的分析和预报.北京:海洋出版社,1986.402~405
- 2 井传才等.黄渤海海洋,1995,13(4):17~21
- 3 刘兴泉.海洋与湖沼,1996,27(5):546~554
- 4 赵保仁等.海洋科学集刊,1995,36:1~11
- 5 戚建华等.青岛海洋大学学报,1996,26(4):421~430
- 6 Le Ken-tang *et al.*. *Chin. J. Oceanol Limnol.*, 1993, 11(2):149~160

A NUMERICAL STUDY ON THE MESOSCALE ANTICYCLONIC EDDY IN QINGDAO-SHIDAO OFFSHORE IN WINTER

XU Dan-ya, ZHAO Bao-ren

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

Received: Mar. 26, 1997

Key Words: Meso-scale anticyclonic, Numerical simulation, Yellow Sea Warm Current, Yellow Sea Coastal Current

Abstract

Current measurement and traces of drift bottles and drift cards show existence of a mesoscale anticyclonic eddy in the Qingdao-Shidao Offshore round the year. A two dimensional barotropic numerical model is first employed to modelling this eddy phenomenon. It is shown that in winter, the northwestward Yellow Sea Warm Current (YSWC) forced by winter monsoon can reach to Qingdao Offshore and then diverged into two branches. The left one joins with the Yellow Sea Coastal Current (YSCC) along main land coast. The right one flows northeastward and forms the anticyclonic eddy with YSCC from northern Yellow Sea. The computational results agree well with observations.