

# 渤海夏季潮致- 风生- 热盐环流的数值诊断计算\*

万修全 鲍献文 吴德星 姜 华

(中国海洋大学物理海洋研究所 物理海洋实验室 青岛 266003)

**提要** 基于正交曲线坐标的 ECOMSED 三维水动力模式, 并考虑了潮汐、风和实测温盐场, 诊断计算了渤海夏季三维潮致- 风生- 热盐环流, 分析了渤海夏季潮致余流、风生和热盐环流的分布结构。结果显示, 在夏季, 渤海中部海区明显存在一个顺时针向的涡旋, 同时渤海还存在着多个逆时针向的涡旋。通过分析和比较各个分量在总环流中的作用, 认为夏季潮致余流是相对弱的; 热盐环流在夏季总环流中占主要成分。

**关键词** 潮致余流, 风生- 热盐环流, ECOMSED 模式, 渤海

**中图分类号** P731

渤海是我国最大的内海, 也是我国进行海洋科学研究最为密集的海区之一(方国洪等, 2002; 蒋东辉等, 2002)。关于渤海的潮汐和潮流的一些基本特征迄今已有比较一致的看法(赵保仁等, 1995; 黄大吉等, 1996; Fang, 2000); 在冬季, 也普遍认为风应力对于渤海冬季总环流有重要贡献(赵保仁等, 1998)。相比而言, 对于渤海夏季总环流的认识就局限得多, 尤其是对于夏季热盐环流的研究则更少(Liu *et al.*, 2003)。作者利用 2000 年夏季的渤海实测温盐资料, 基于二阶湍流封闭模型的 ECOMSED 三维水动力模式, 将潮汐、风和热盐效应统一在上述动力模型中, 诊断计算了夏季渤海三维潮致余流、风生和热盐环流。在对模拟结果进行了对比分析, 并进行了合理性验证的基础上, 给出了渤海夏季潮致余流、风生和热盐环流场, 同时, 还对各个因子在总环流中的作用进行了分析和比较。

## 1 动力模式及其配置

本文中所用的 ECOMSED 模式是由 Blumberg 等人在美国普林斯顿大学的三维海洋模式(POM)及其后来发展的河口、陆架和海洋模式(ECOM)的基础上发展而来的, 是一个较为成熟的集海浪和沉积输运为一体的浅海三维水动力学模式, 其中三维水动力学模块从原始三维方程出发, 以自由水位、三方向的

速度分量、温度、盐度、密度以及代表湍流的两个特征量: 湍动能和湍宏观尺度作为预报变量(Blumberg, 2002)。本文中的工作即是以此模块为基础展开的。

整个计算海区包含了渤海及其邻近黄海北部部分海域, 模式水平方向采用正交曲线网格, 网格数为  $102 \times 133$ ,  $\Delta x_{\min} = 3.57\text{km}$ ,  $\Delta x_{\max} = 5.0\text{km}$ ,  $\Delta y_{\min} = 1.8\text{km}$ ,  $\Delta y_{\max} = 5.6\text{km}$ ; 垂向采用  $\sigma$  坐标, 不等距分为 11 层, 第一层稍薄一些, 从而各物理量可以更好的逼近海表的物理场。由于渤海海区是比较典型的半日潮区, 因此在模式中作者仅选取  $M_2$  分潮作为开边界的潮强迫条件, 其调和常数从海洋图集东、黄、渤海分册的同潮图内插得到; 海底底摩擦系数采用模式中的公式确定, 其值约为 0.003。计算选取  $M_2$  分潮的内模时间步长为  $414s$ 。模拟采用零初始条件。为了保证计算的稳定性, 强迫的边界潮位从零开始逐步增加, 经过两个潮周期后达到正常变化, 第三个潮周期后形成稳定的潮波。计算海区的水深分布及正交曲线计算网格分别见图 1 和图 2。

计算风生环流所用的风场, 采用中国海洋大学海洋气象系, 利用多年风场资料分析得到的 8 月份的月矢量平均风场来代表渤海夏季的风场(图 3), 其中海面风应力矢量的值由如下公式计算确定:

\* 国家重点基础研究发展规划项目, G1999043804 号; 山东省自然科学基金重点项目, Z99E01 号; 教育部科技重点项目, 00080 号和国家 863 计划项目, 2002AA648010 号。万修全, 硕士, E-mail: xqwan@mail.ouc.edu.cn

收稿日期: 2003-03-22, 收修改稿日期: 2003-07-25

$$\tau_o = \rho_a C_D |\vec{W}| \vec{W}$$

其中,  $\vec{W}$  为风速,  $\rho_a$  为空气密度,  $C_D$  为风拖曳系数,

$$C_D = \begin{cases} 1.2 \times 10^{-3}, & |\vec{W}| < 11\text{m/s} \\ \left( 0.49 + 0.065 |\vec{W}| \right) \times 10^{-3}, & 11\text{m/s} \leq |\vec{W}| < 25\text{m/s} \\ 2.115 \times 10^{-3}, & |\vec{W}| \geq 25\text{m/s} \end{cases}$$

采用 ECOMSED 程序中的公式确定, 即:

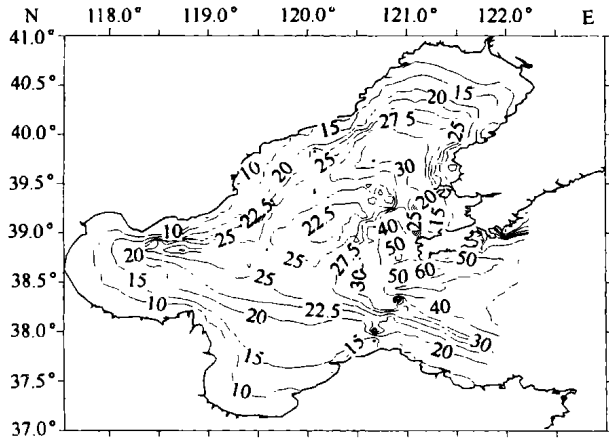


图1 计算海区的水深分布(单位: m)

Fig. 1 Bathymetry of the Bohai Sea, with depth in meters

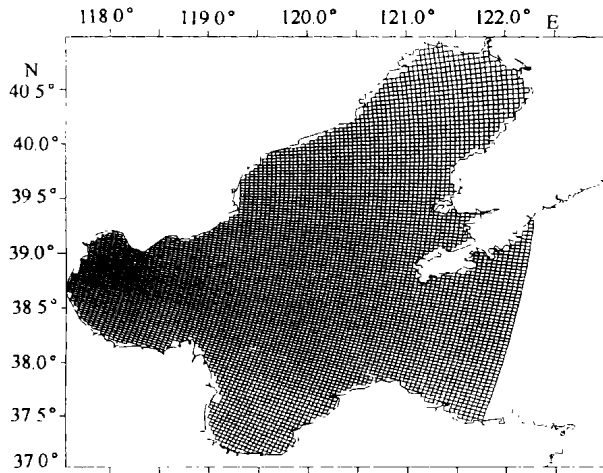


图2 正交曲线计算网格

Fig. 2 Orthogonal curvilinear computation grids

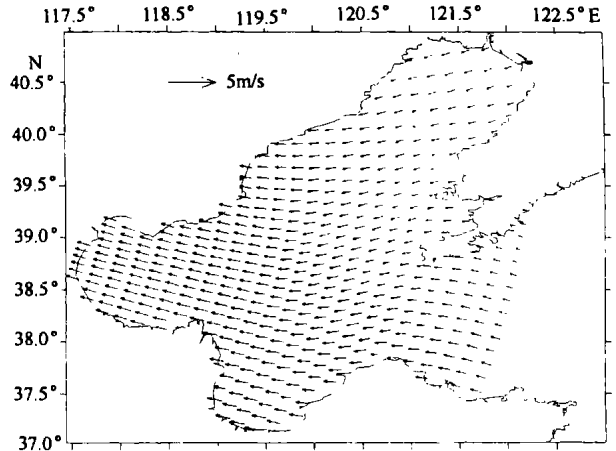


图3 渤海8月份的多年平均风场

Fig. 3 Normal annual wind field in August in the Bohai Sea

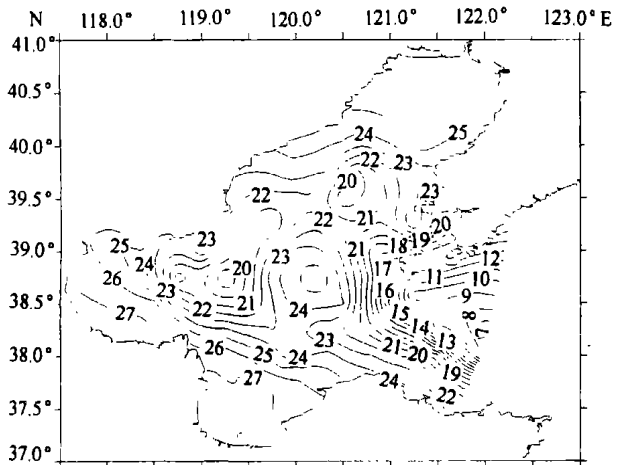


图4 2000年夏季渤海底层温度分布

Fig. 4 Bohai Sea bottom temperature distribution in summer of 2000

计算热盐环流的海水温度、盐度由2000年8月份渤海“973”项目的大面调查资料给出, 关于此部分已作另文分析<sup>1)</sup>, 限于篇幅, 在此只给出底层的温度水平分布图(图4)。

## 2 渤海夏季总环流模拟结果

首先将潮汐、风和热盐作用统一在一个模型中, 诊断计算三维潮致- 风生- 热盐环流。图5是模拟所得到的渤海夏季表层(2m)和深度平均的总环流

图。从图5中可见, 渤海此时存在着多个涡旋结构, 最明显的有4个较强的涡旋: 渤海湾口的逆时针涡环, 辽东湾中部的逆时针涡环、渤海海峡北部的逆时针涡环和渤海中部的顺时针涡环。其中, 前三个涡环分别对应于各自位置上的低温中心而存在; 第4个涡环则对应着渤海中部的高温中心<sup>1)</sup>。上述涡旋的存在曾经分别被不同的作者所指出(赵保仁等,

1) 鲍献文, 万修全, 吴德星等. 2003. 2000年夏末和次年初冬渤海水文特征(研究资料)

1995; Liu *et al*, 2003), 但本文中的结果更为完整。深度平均流与表层流的结构基本一致, 只是表层流量值略大, 在渤海海峡北部最大, 超过了 20cm/s。

从图 5 中可看出, 渤海海峡处的逆时针涡旋最强, 海水在渤海海峡北进南出, 但并不能深入渤海; 关于辽东湾内的逆时针环流, 1959 年的全国海洋普查报告认为:“辽东湾内的海流, 在夏季, 至少是 8 月份, 可能是沿逆时针方向流动”(赵保仁等, 1995), 这与本文中的模拟结果基本一致; 渤海中部存在一顺时针的涡旋, 作者认为这一顺时针涡旋的存在正是此处高温中心能够维持的重要原因。

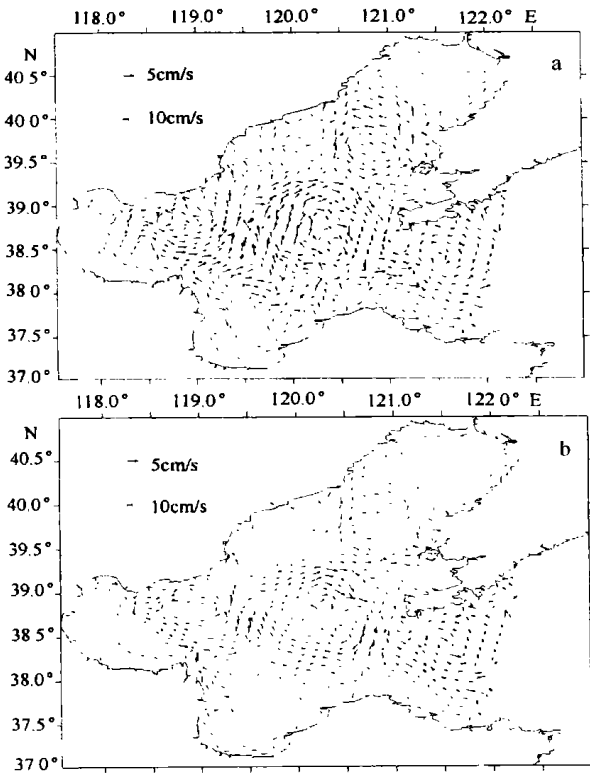


图 5 渤海夏季表层环流 (a) 及渤海夏季深度平均环流 (b)  
Fig. 5 Summer surface circulation (a) and the summer depth-average circulation (b) in the Bohai Sea

在渤海湾口存在着一个逆时针向的涡旋, 范围较大, 几乎占据了整个渤海湾口海区, 涡旋中心偏向湾口北部。在湾北岸有一支沿岸流流入渤海湾, 虽然流幅较窄, 但是流速较大, 达 10cm/s, 在渤海湾中部汇入了湾口的逆时针大涡旋。在渤海湾南岸也存在有一支沿岸流流入渤海湾, 流速相对较小, 占据着渤海湾东南部海域。平仲良(1983)对地球资源卫星(1—3号)发回的渤海湾 ERTS 图像进行了解译, 获得了渤海湾环流的流向解译图(图 6), 可以看到, 它和作者的计算结果符合较好, 这有力支持了本文的

模拟结果。赵保仁等(1995)指出, 既然渤海湾口左右两侧的海水都涌入渤海湾, 那么惟有从中路流出才能维持水量的平衡, 这样看来渤海湾的环流应该是双环结构。在模拟结果中, 渤海湾内也能看到这种流动的态势, 只是这种双环结构呈不对称分布, 北环较强, 中心呈东北-西南向配置。

另外, 根据渤海中部 8 号平台 (119° 42' E, 39° 09' N) 长达一年的海流观测资料分析(匡国瑞等, 1991), 得到此处海域的余流全年呈东北偏北向流动。这与作者模式所得到的结果完全一致, 从而进一步验证了本文中计算的潮致- 风生- 热盐环流的基本合理性。

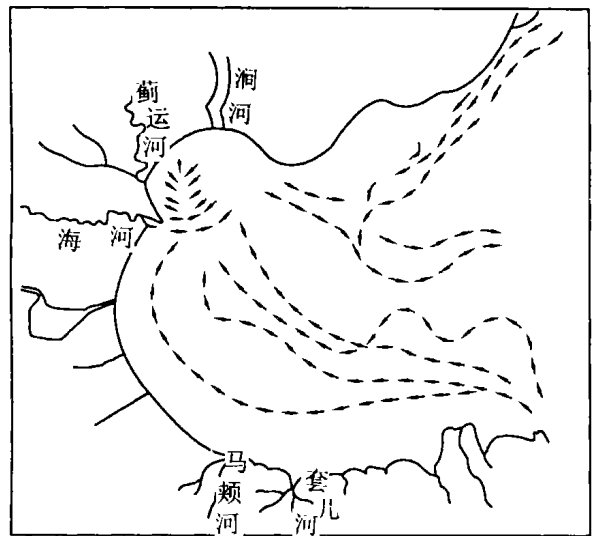


图 6 渤海湾环流的流向解译图  
Fig. 6 Current direction sketch map for the Bohai embayment

### 3 渤海夏季环流诸成分分析

为了分析潮汐、风力和热盐等各个因子在夏季渤海潮致- 风生- 热盐环流中所起的作用, 分别计算了潮致余流、风生环流和热盐环流。分析表明: 渤海夏季热盐环流较强, 占主要成分, 其次是风生环流和潮致余流。

#### 3.1 潮致余流

在渤海潮致余流的模拟中, 计算所得的 M<sub>2</sub> 分潮调和常数与渤海沿岸 19 个验潮站的实测潮汐调和常数的比较结果见表 1。图 7 是模拟计算的渤海 M<sub>2</sub> 分潮的等振幅线和同潮时线图。从图 7 中可见, 潮波由渤海海峡进入, 沿逆时针方向传播; M<sub>2</sub> 分潮在渤海有两个无潮点: 一个在秦皇岛外海, 另一个位于老黄河口附近。受科氏力的作用, 同潮时线绕其无潮点作逆时针旋转; 振幅在辽东湾顶达到最大值,

约为 130cm。上述结果与实测资料和前人的工作基本一致(黄大吉等, 1996; Bao, 2000), 可见本模式在渤海的应用是较成功的, 结果是合理可信的。

表 1 观测与计算的  $M_2$  分潮调和常数比较

Tab. 1 Model-data comparison of the  $M_2$  tidal amplitude and phase in the Bohai Sea

站 位	振幅 (cm)			位相 (deg)		
	观测值	计算值	误差	观测值	计算值	误差
登沙河	116	109	7	275	267	8
旅顺	82	72	10	299	299	0
羊头洼	61	60	1	321	313	8
北隍城	61	51	10	299	298	1
曹妃甸	61	63	- 2	60	60	0
前所外	13	20	- 7	176	176	0
荒地	40	40	0	150	160	- 10
长山寺	61	63	- 2	159	154	5
营口	130	137	- 7	129	134	- 5
鲅鱼圈	119	119	0	125	125	0
长兴岛	54	50	4	83	77	6
葫芦套	61	51	10	11	19	- 8
营城子湾	55	46	9	348	359	- 9
28 平台	20	28	- 8	334	334	0
烟台	61	63	- 2	288	282	6
龙口	40	41	- 1	329	336	- 7
塘沽	113	113	0	91	91	0
葫芦岛	94	98	- 4	151	151	0
大连	94	91	- 3	287	281	6
平均误差			4.5			

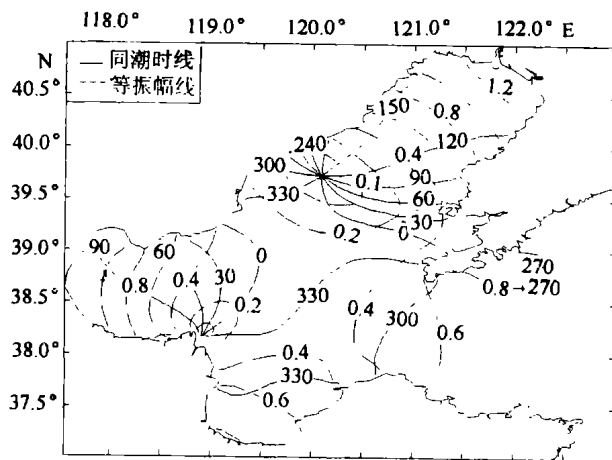


图 7 渤海  $M_2$  分潮的等振幅线和同潮时线图

Fig. 7 Iso-amplitude lines and cotidal lines of  $M_2$  tidal in the Bohai Sea

计算稳定后, 以  $M_2$  分潮的周期进行潮流周期平均, 得到渤海  $M_2$  分潮的潮致余流, 如图 8a 所示。从图 8 中可以看出, 渤海的表层潮致余流总体上很弱, 大部分区域潮余流只有 0.5cm/s 左右; 在岸边因受岸界影响, 潮余流普遍较大, 最大值为 18cm/s, 出现于渤海海峡北部老铁山水道处。

渤海海峡大部分海域的潮余流都是从渤海流向黄海的, 只是在海峡北部老铁山水道的北端极窄的海域内有黄海水以较强的流速注入渤海; 黄大吉等 (1996) 所提及的辽东半岛南端的岬角涡旋对中的海峡处的逆时针涡旋较明显, 而另一个涡旋流速强但范围小, 因此不是很明显。辽东湾内的潮余流比较明显的特征是在湾顶的逆时针涡旋, 还有其它多个局地小流环, 它们应该是由岬角地形等原因造成的。在渤海湾, 潮余流路径是从老黄河口, 先向西流

进渤海湾内后再折向北,从渤海湾中部流出,一直向东沿渤海中部经渤海海峡流出了渤海;同时在渤海湾西北角存在一顺时针的小涡旋,渤海湾北岸还有一支沿岸的潮余流流入渤海湾内。莱州湾潮余流最弱,从黄河口外海区潮余流一分为二,一支向东从莱州湾口东部流出,另一支在黄河口南部形成了一个顺时针流环。

尽管不同的计算模式所获得的计算结果是不完全相同的,即使是对于同一个模式,对于多个分潮的水位边界条件,不同的时间间隔和分析方法计算得到的潮余流也不尽相同。但是,通过数值计算,作者至少还是发现在渤海海区,潮致余流是相对弱的,与观测资料和上述渤海夏季总环流相比,显然潮余流对总环流的贡献是比较小的。

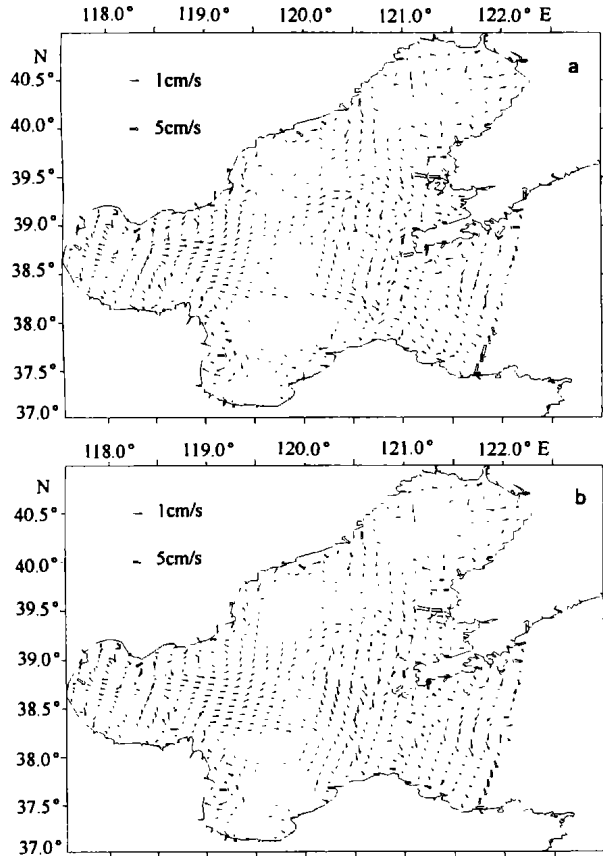


图 8 渤海  $M_2$  分潮的表层潮致余流 (a) 及渤海  $M_2+M_1$  分潮的表层潮致余流 (b)

Fig.8 Surface tide-induced residual current of  $M_2$  (a) and the surface tide-induced residual current of  $M_2$  and  $M_1$  (b) in the Bohai Sea

为了更好的了解渤海的潮余流情况,作者同时将由渤海区的半日分潮  $M_2$  和全日分潮  $M_1$   $\left[ \frac{O_1 + K_1}{2} \right]$  的调和常数计算得到的水位作为开边界的水位条件,计算出的渤海潮余流分布同上述潮余流的分布特征基本一致,不同之处主要是在渤海中部的潮余流量值上有些增大而已(图 8b)。

由于至今人们尚不能从实际观测到的海流资料中分离出真正的潮致余流,因此,通常所见到潮致余流图,都是用数值计算的方法得到的(顾玉荷等,1996)。

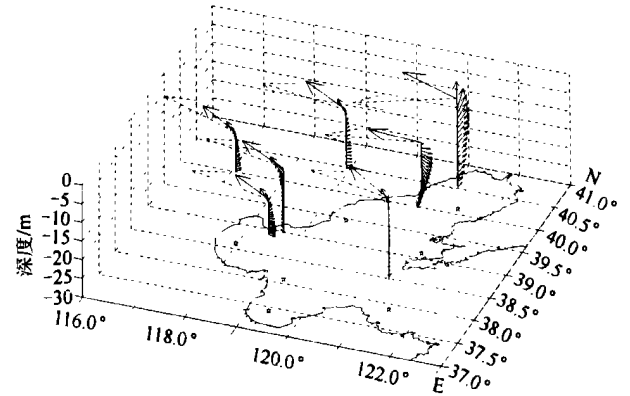


图 9 渤海风生流的垂向分布示意

(虚线为风向,实线为流向,星号为所对应点的位置)

Fig.9 Vertical distribution of the wind-driven current in the Bohai Sea (The dashed lines are wind direction, the solid lines are current direction, and the asterisks are the positions of the corresponding points)

### 3.2 风生环流

夏季(8月)渤海计算海区的多年平均风场如图 3 所示,风力相对较弱。风生环流的计算结果表明,渤海最表层的海流流速较强,且基本上能够满足 Ekman 风生流理论(图 9),但在中下层,风的影响已经减弱了许多,逐渐表现出风生补偿流的性质(图 10a),在中部海区形成了一个大的顺时针环流。图 10b 是深度平均的风生环流,从图 10b 中可见,在渤海中部以及莱州湾和渤海湾区域,海水作顺时针方向的旋转,而在辽东湾内则存在一个较弱的逆时针涡旋。这与赵保仁等(1998)的分析结果基本一致。由于去掉了潮致余流的影响,流动比较规则,但流速较小,大部分不到  $1\text{cm/s}$ ,这显然主要是深度平均弱化了风生流的强度。计算表明,10m 层的平均流速只有表层的十分之一左右,而且除了在渤海上层因为风应力的原因,渤海海峡处上层流向指向渤海内部外,在渤海海峡中下层处海水存在着南进北出的特征。这与前人所得到的风生环流结果基本吻合(王宗山等,1992)。根据上述模拟结果来看,夏季,至少在 8 月,渤海的风生环流除表层外也很弱,对渤海总环流的贡献并不是占绝对优势的。

### 3.3 热盐环流

夏季因太阳辐射强、气温高,8月份渤海表层海水温度达到全年最高(鲍献文等,2002),且此时海水的层化现象也较明显。从2000年夏季实测温度资料分析可知,在渤海海峡、辽东湾口和渤海湾口中部存在3个低温中心,在渤海中部则出现一个高温中心,其分布呈现出渤海近岸和中部高温,中间伴随三角形低温水带的分布势态,如图4所示。

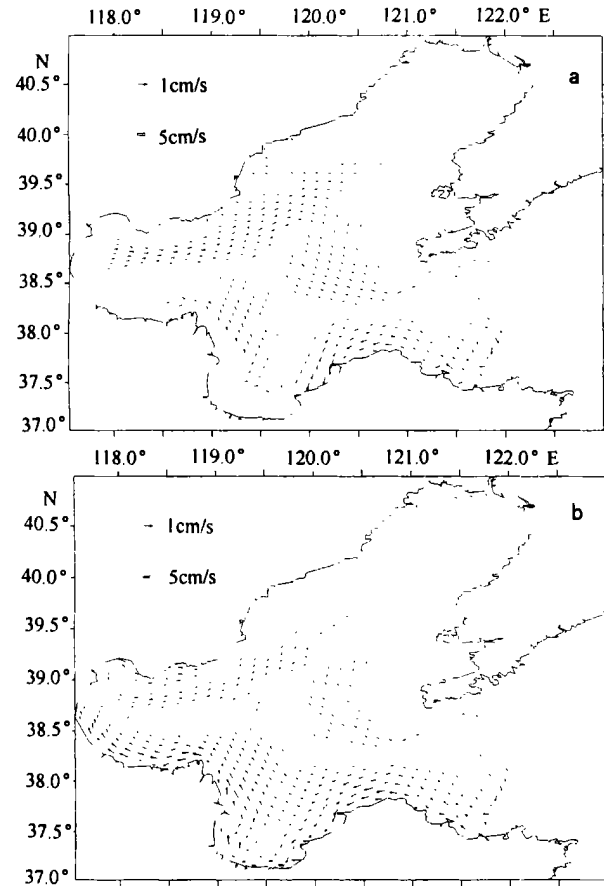


图10 渤海夏季10m层风生流(a)和渤海深度平均风生流(b) in the Bohai Sea

另外,2000年夏季渤海盐度的分布与以往调查报告和海洋图集有很大的差异。实测资料表明,除了辽东湾顶部水域,渤海盐度已有显著升高。与渤海相邻的北黄海相比,渤海已成为一个高盐海域<sup>1)</sup>。

对应于这种温盐场的环流模拟结果表明,夏季渤海存在着较强的密度环流,达10cm/s,以致于使前面所描述的潮余流和风海流形态在总体环流中都体现的不是很明显,如图11所示。这种密度流的分

布态势与渤海夏季总体环流的形态基本一致,也存在着4个主要的涡旋结构。这充分说明了夏季渤海密度流在总体环流中占有主要成分,对渤海夏季环流形态的结构分布起到了重要作用。

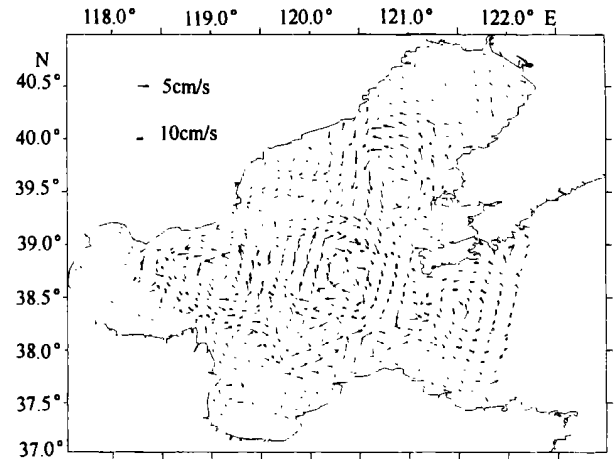


图11 渤海表层热盐流  
Fig. 11 Surface thermohaline current in the Bohai Sea

### 4 结语

利用基于二阶湍封闭模型的ECOMSED三维水动力模式,采用正交曲线坐标系统,考虑实际海底地形和岸界形状,把作为强迫力的潮汐、风和热盐统一在一个模型中,诊断计算了渤海夏季三维潮致-风生-热盐环流。结果显示,在夏季,渤海中部海区存在一个顺指针涡旋,在渤海湾口、辽东湾中部和渤海海峡北部各存在一个逆时针向的涡旋。另外,海水在渤海湾内存在着北部为逆时针、南部为顺时针的双环结构的流动态势,流环中心呈东北-西南向配置。

通过对渤海夏季潮致余流、风生环流和热盐环流作用的分析 and 比较,认为渤海潮致余流是相对弱的;风生环流除表层外也较弱,在渤海中部形成一个顺时针旋转的涡旋,对渤海总环流的贡献也并不是占绝对优势;热盐引起的密度环流在渤海夏季总环流中占主要成分。

致谢 在成文过程中得到了中国海洋大学海洋环境学院侍茂崇教授的大力帮助和支持,谨致谢忱。

### 参 考 文 献

万修全,鲍献文,吴德星等. 2003. 胶州湾及邻近海域潮流和污染物

1) 鲍万文,万修全,吴德星等,2003. 2000年夏末和次年初冬渤海水文特征(研究资料)

- 扩散的数值模拟. 海洋科学, 27(5): 31—36
- 王宗山, 龚 滨, 李繁华等, 1992. 黄渤海风海流的数值计算. 黄渤海海洋, 10(1): 12—18
- 方国洪, 王 凯, 郭丰义等, 2002. 近 30 年渤海水文和气象状况的长期变化及其相互关系. 海洋与湖沼, 33(5): 515—225
- 平仲良, 1983. 从 ERTS 图像上观测渤海湾表层流. 海洋与湖沼, 14(3): 197—304
- 匡国瑞, 张 琦, 戴煜芝, 1991. 渤海中部长期流的观测与余流分析. 海洋湖沼通报, 2: 1—11
- 赵保仁, 庄国文, 曹德明等, 1995. 渤海环流、潮余流及对沉积物分布的影响. 海洋与湖沼, 26(5): 466—473
- 赵保仁, 曹德明, 1998. 渤海冬季环流形成机制动力学分析及数值研究. 海洋与湖沼, 29(1): 86—96
- 顾玉荷, 修日晨, 1996. 渤海海流概况及其输沙作用初析. 黄渤海海洋, 14(1): 1—6
- 黄大吉, 陈宗镛, 苏纪兰, 1996. 三维陆架海模式在渤海中的应用 I . 潮流、风生环流及其相互作用. 海洋学报, 18(5): 1—13
- 蒋东辉, 高 抒, 程 鹏, 2002. 渤海海峡沉积物输运的数值模拟. 海洋与湖沼, 33(5): 553—561
- 鲍献文, 万修全, 高郭平等, 2002. 渤海、黄海、东海 AVHRR 海表温度场的季节变化特征. 海洋学报, 24(5): 125—133
- Bao X W, Yan J, 2000. A three dimensional tidal model in boundary-fitted curvilinear grids. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 50: 775—788
- Blumberg A F, 2002. A primer for Ecomsed. Technical Report of Hydroqual. Inc, Mahwah N J, 1—188
- Fang Yue, Fang Guohong, Zhang Qinghua, 2000. Numerical simulation and dynamic study of the wintertime circulation of the Bohai sea. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 18(1): 1—9
- Liu Guimei, Wang Hui, Sun Song *et al.*, 2003. Numerical study on density residual currents of the Bohai sea in summer. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 21(2): 106—113

## NUMERICAL DIAGNOSTIC SIMULATION OF SUMMERTIME TIDE-INDUCED, WIND-DRIVEN AND THERMOHALINE CURRENTS IN THE BOHAI SEA

WAN Xiu-Quan, BAO Xian-Wen, WU De-Xing, JIANG Hua

(*Institute of Physical Oceanography, Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao, 266003*)

**Abstract** The Bohai Sea is a shallow, semi-closed gulf with an average water depth of 18 m. A large number of numerical studies have previously been undertaken on tide and the circulation. However, the interrelationships between tide-induced, wind-driven and thermohaline currents in summertime are currently poorly understood. Using thermohaline data collected in August 2000 and annual wind field data in the Bohai Sea, a three-dimensional ECOMSED model incorporating Mellor & Yamada level 2.5 turbulent closure model was used to diagnostically compute tide-induced residual currents, wind-driven and thermohaline currents in the Bohai Sea with an orthogonal curvilinear grid system. Factual topography and shore shape were both considered. The results were verified using the measured data and previous model results. The results show that there was a clockwise circulation in the middle Bohai Sea during summertime with some counter-clockwise circulations in the mouth of Bohai Bay, the middle of Liaodong Bay and the north of Bohai Strait. The trend of the summer circulations in the Bohai Bay is anticlockwise in the north and clockwise in the south, with a ‘two loop’ structure. In addition the differences between tide-induced residual currents wind-driven and thermohaline currents were compared and analyzed. Tides and tidal currents were well reproduced, showing a high level of agreement with previous research. The model results indicate that in the Bohai Sea during summertime, the tide-induced residual currents are weak while the thermohaline currents are strong and dominant.

**Key words** Tide-induced residual currents, Wind-driven and thermohaline currents, ECOMSED model, Bohai Sea