

胶州湾及其邻近海域潮流和污染物扩散的数值模拟^{*}

万修全¹ 鲍献文¹ 吴德星¹ 郭心顺² 姜 华¹

(¹ 中国海洋大学海洋系 青岛 266003)

(² 中国海洋大学东方红 2 号调查船 青岛 266003)

摘要 采用曲线网格技术, 将 ECOMSED 模式应用于胶州湾的潮流和污染物 COD 的稀释扩散研究, 建立了一个三维保守污染物 COD 输运的对流扩散数值模型, 对胶州湾 M₂ 分潮和 COD 污染状况进行了模拟。结果表明, 胶州湾及其附近海域存在许多大小、强弱和旋转方向不同的余流涡; 湾内 COD 浓度东部比西部高, 湾口外的 COD 浓度等值线成舌状分布, 向东伸展; 余流和 COD 浓度垂向分布差异并不显著。模拟结果与胶州湾的实测资料符合较好。

关键词 ECOMSED 模式, 余流, 污染物扩散, 数值模拟, 胶州湾

中图分类号 P731.21 **文献标识码** A **文章编号** 1000-3096(2003)05-0031-06

胶州湾位于黄海西岸, 是一个典型的半封闭海湾, 平均水深约 7 m。关于胶州湾的数值模拟工作开展的较为广泛^[1-7], 但绝大部分工作都是采用了直角坐标系统, 网格亦采用矩形网格; 孙英兰, 张越美^[5,6] 尽管采用了曲线网格, 但其网格并非完全正交。本文将利用在胶州湾建立的一个正交曲线坐标系下的曲线网格数值模式, 对胶州湾三维潮汐与潮流进行数值模拟; 并在此基础上, 考虑河口径流污染物输入的影响, 建立一个三维保守污染物 COD 输运的对流-扩散数值模型, 对胶州湾 COD 污染状况进行了模拟。

1 ECOMSED 模式简介

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, 其中的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。关于此模块的特点和有关方程及其差分格式在 Blumberg 和 Mellor 1987 年的有关文章中有详细叙述, 在此不再赘述。

2 网格设置及边界条件

为了较合理地给定胶州湾数值模拟的开边界条件, 计算海区包含了整个胶州湾及其邻近海域。因此在模式中仅选取 M₂ 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, 计算选取 M₂ 分潮的内模时间步长为 55.2 s。模拟采用零初始条件。为了保证计算的稳定性, 利用调和常数计算得到的潮位边界逐步增大, 经过两个潮周期后达到正常变化, 第三个潮周期后开始形成稳定的潮波。计算海区的水深取自海军航保部 2000 年版的青岛港及附近海图, 所用正交曲线计算网格见图 1。

3 M₂ 分潮潮汐和潮流计算

对胶州湾及其附近海域的 M₂ 分潮进行数值模拟, 计算稳定后所得的同潮时线和等振幅线 (图 2) 表明, 胶州湾外海的潮波由东北向西南传播, 属于反时针潮波系统。一部分潮波在进入胶州湾后, 向湾内发生偏转, 湾底部比湾口高潮发生时刻落后约 10 min。随着潮波向湾内传播, 振幅逐渐加大, 至湾底部接近 135 cm, 比湾口振幅高出约 10 cm 左右。上述结果与海洋普查资料所绘制的潮汐图是一致的, 与孙英兰等^[5]、鲍献文等^[1] 所给出的计算结果也基本一致。

从数值模拟的潮流图 (图 3) 上可以看出, 涨潮流

^{*} 山东省自然科学基金 Z99E01 号; 国家自然科学基金 40076001 号; 教育部科学技术重点项目 99075, 00080 号。

第一作者: 万修全, 出生于 1977 年, 在读硕士, 从事海洋动力过程研究, E-mail: xqwan@mail.ouc.edu.cn

收稿日期: 2003-01-22; 修回日期: 2003-03-17

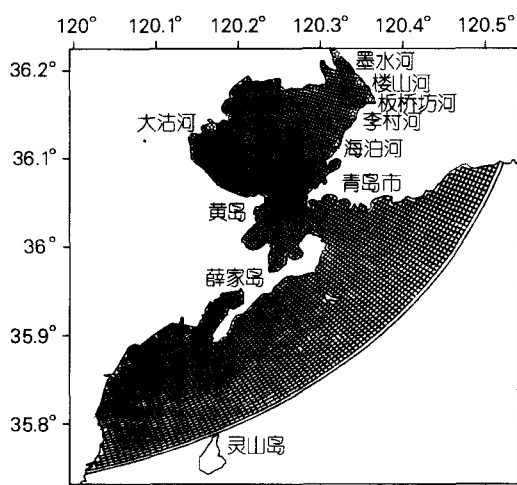


图1 正交曲线计算网格及地形图

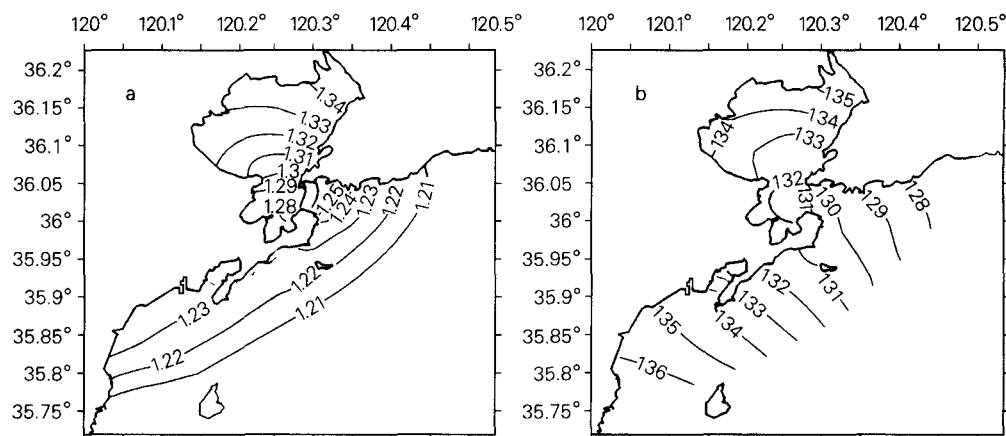
Fig.1 Orthogonal curvilinear computation grids and topographic map

从计算海区的东北流入,部分沿薛家岛南岸向西南流

去,另一部分则进入了胶州湾;落潮流则从海区西南流入,汇同从胶州湾落潮流出的海水从海区东北部流出计算区域。关于胶州湾 M_2 分潮流的计算结果与孙英兰等^[5]计算结果基本一致。将这种 M_2 分潮周期运动进行周期平均后,可以得到胶州湾的潮致余环流(图4)。由于胶州湾的岸界和底地形较为复杂,因此,图4中所示的欧拉余环流应是潮汐非线性以及地形效应所导致的余流图。

从图4中可以看出,在模式计算海域存在许多大小、强弱和旋转方向不同的余流涡。在1975~1978年间,中国海洋大学海洋系曾对胶州湾流场进行过调查和研究,共布设了15个断面,60个定点进行了多次连续观测,绘制出了胶州湾环流示意图^①(图5)。从总体上看,观测显示出的5个余流涡(a,b,d,e,f)都在模式结果中得到了较好的体现,而且模拟结果与鲍献文^[1]的模拟结果也基本上相符。

但在胶州湾的口门,即太平角与薛家岛连线以东海域,存在一个顺时针的半封闭流涡(f),流涡中心在薛家岛以东约2 km处,此余涡方向与实测结果相反。从理论上分析,此流涡中心所在处刚好位于青岛

图2 M_2 分潮的等振幅线(a)和同潮时线(b)Fig.2 Iso-amplitude lines (a) and cotidal lines (b) of M_2 tidal

前海水深较浅的高地处,依据位涡守恒原理,此处若形成环流系统,由于地形效应,最有可能形成顺时针环流。另外,由于此环流系统附近大部分为禁止抛锚区,当时的海流观测就受到了极大的限制,仅有3个观测站的资料。因此,此余流涡的方向如何还须更多资料的验证。从模式结果来看,由于这个余流涡的存在,从而胶州湾出来的物质大都会从计算区域的东北

方向流出。

另外,在黄岛以北海域存在一反时针流涡(c),强度比湾内部的两个流涡(a,b)强,流涡中心位于黄岛

① 侍茂崇, 胶州湾环流特征与污染物输送及排污的关系, 胶州湾综合开发利用学术讨论会论文汇编, 1985, 134-151

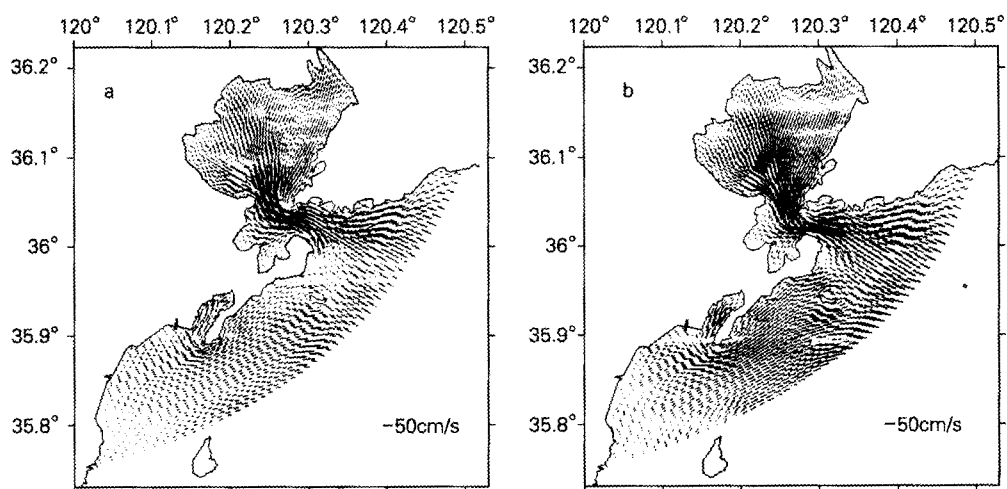


图3 计算的不同潮时的表层流场

a. 涨潮流; b. 落潮流

Fig. 3 Computed tidal current field in the surface layer at different time

a. flood-tide current; b. ebb-tide current

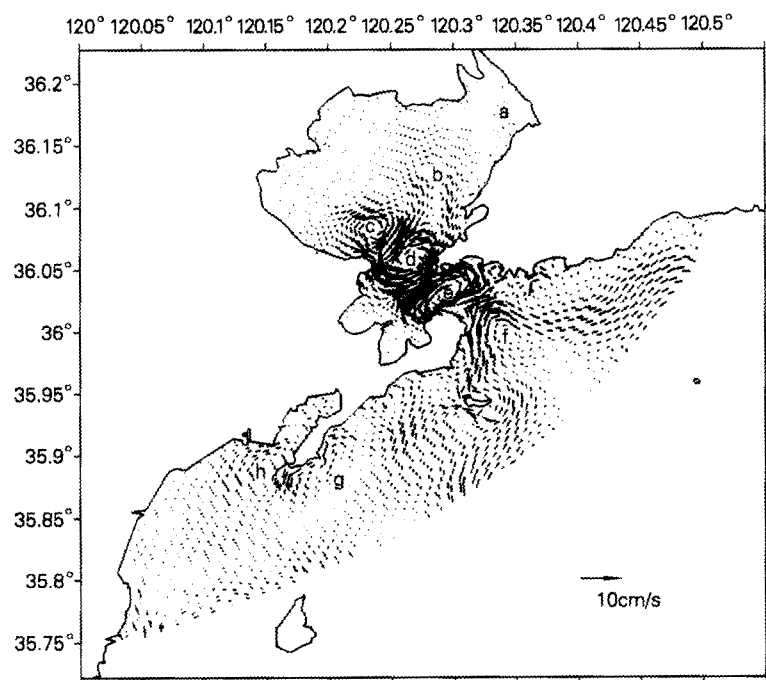


图4 计算的表层余流场

Fig. 4 Computed surface residual current field

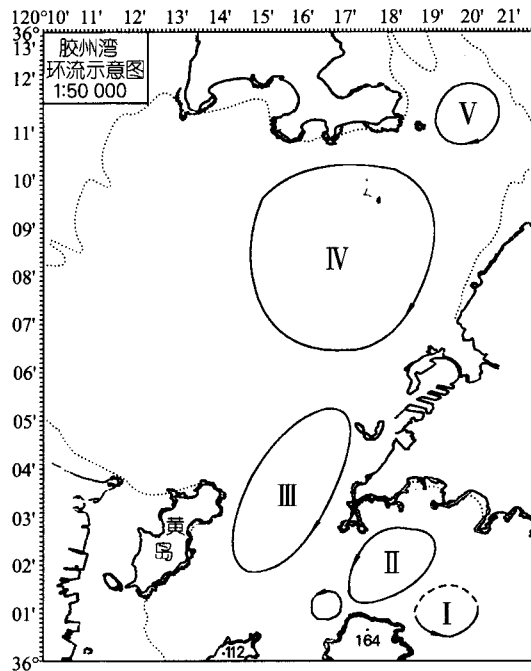


图5 胶州湾环流示意图

Fig. 5 Circulation sketchmap in the Jiaozhou Bay

嘴正北约 2 km 处。这一涡旋在实测资料的结果图中并未出现,但在鲍献文^[1]的结果中也模拟出这一涡旋的存在。考虑到一般岬角涡旋都成对出现,故这一涡旋的存在还是有可能的,需要进一步的实测资料的验证。

除了上述 6 个环流系统外,在计算区域内还有一些小的环流系统,如在刘家岛鱼嘴外还存在一岬角涡旋对(g, h)(图 4)。胶州湾其他层次的余环流的分布态势基本上与表层分布类似,只是在量值上比表层小。

4 胶州湾 COD 浓度扩散数值模拟

由于化学耗氧量(COD)是表征海水污染程度的一个重要指标,我们在三维潮流模拟的基础上,加入计算保守物质运输的子模块,建立了一个三维 COD 对流-扩散模型。在计算过程中考虑到胶州湾大部分区域水深较浅,斜压效应不显著,因此仅考虑了正压过程。计算中只考虑环胶州湾的 6 个点源,根据统计调查资料,6 个点源的年径流量和入海 COD 总量见表

1。在计算海域的开边界处,污染物 COD 的浓度按入流和出流的情况分别处理。例如在计算海域的开边界上某点 (i, j, k) , 其相邻的计算海域内的网格点设为 $(i, j+1, k)$, 浓度边界条件可表示为:

入流, 即 $V_{i,j,k} \geq 0$ 时: $C_{i,j,k} = 0$

出流, 即 $V_{i,j,k} < 0$ 时: $C_{i,j,k} = C_{i,j+1,k}$

初始条件选为零初始条件, 即: $C|_{t=0} = 0$ 。

表 1 环胶州湾主要河流年径流量和入海 COD 总量

Tab.1 Annual runoff and COD data of main rivers around the Jiaozhou Bay

河口	年径流量(万 t/a)	入海 COD 总量(t/a)
大沽河	27 331.8	11 862.3
墨水河	585.0	3 732.3
楼山河	851.0	5 101.0
板桥坊河	410.0	1 453.9
李村河	5 550.0	17 540.2
海泊河	7 537.0	39 152.5

注:本表数据主要取自 1998 年《山东省近岸海域环境综合调查报告》

对于胶州湾污染物 COD 的扩散而言,计算潮汐和潮流进入稳定状态后,仍需要进行较长时间的模式计算才能达到 COD 的平衡状态。计算表明,大约运行计算模式时间 180 天后,胶州湾内的 COD 浓度基本达到动态平衡。我们取最后一个潮周期的 COD 浓度时间序列进行潮周期平均,从而得到胶州湾 COD 平均浓度的分布(图 6)。通过比较,模拟结果与调查

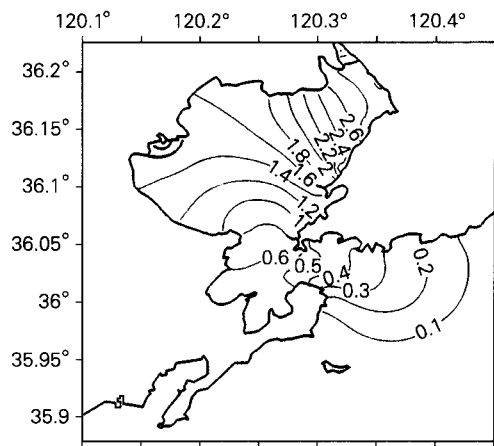


图6 计算的潮周期平均 COD 浓度表层分布

Fig. 6 Computed surface distribution of average COD concentration in a tidal period

结果^[3]基本相符,从而验证了模式计算的合理性。同时,由于曲线网格设置较合理,对河口附近区域描述较好,模式的计算结果在河口区域比闫菊^[3]的结果较为准确。

由图 6 可以看出,胶州湾表层 COD 潮周期平均浓度分布具有以下特点:(1) COD 的浓度在胶州湾内河口附近出现极值,向湾口方向依次递减;(2)以团岛和黄岛连线为界,以北海域的 COD 浓度几乎都大于 1 mg/L,以南海域均不到 1 mg/L;整个湾内东部 COD 浓度比西部高,这除了与东部入海 COD 较多外,还与湾内顺时针余流涡(b)有关,由于这个余流系统的存在,东部河流入海的 COD 都可以慢慢南移流出胶州湾,而往西运移的能力就弱得多;(3)整个计算海域的 COD 浓度最大值出现在墨水河口附近,超过 3 mg/L,主要是由于这里水深较浅,海域狭窄,海水的交换能力最差造成的;(4)胶州湾湾口外的 COD 浓度等值线成舌状分布,向东伸展,这主要是由于此处余流分布所决定的,同时也说明从胶州湾出来的 COD 主要沿

湾口向东从青岛前海一带流出;而在灵山岛以北的计算区域内,由于没有考虑附近陆源污染物的入海情况,从胶州湾出来的 COD 对其影响又极弱,因此其 COD 浓度几乎为零。

图 7 分别给出了 COD 浓度在一个潮周期内的代表性时刻高潮和低潮时的分布状况,其大体趋势与图 6 类似。低潮时(图 7a),随着胶州湾的海水大量流出, COD 浓度的等值线也都不同程度地向外推移,1 mg/L 的等值线已接近了黄岛和团岛的断面处,胶州湾口的舌状等值线非常明显地占据着青岛前海区域。大沽河口有一弧形 COD 高值分布区域,河口的中心浓度已经大于 2.2 mg/L。随着胶州湾水位的升高,外海海水涌入胶州湾,使得等值线开始向湾内退缩。至高潮时刻(图 7b),0.2 mg/L 等值线已退至胶州湾口,1.0 mg/L 等值线已退至低潮时 1.2 mg/L 等值线的位置,形成一舌状的等值线分布伸至胶州湾的中部海域;大沽河口的弧形等值线分布也已经快消失了。随后落潮时,等值线又开始外移,最后达到低潮时的水平。

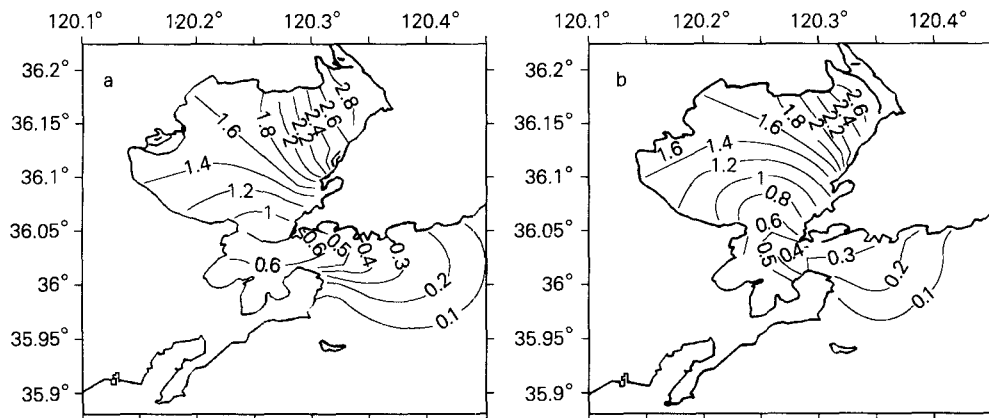


图 7 高低潮时 COD 浓度表层分布

a. 低潮时; b. 高潮时

Fig. 7 Surface distribution of COD concentration in the (a) low-tide and (b) high-tide time

由于模式是三维的, COD 浓度具有三维结构。根据数值模拟结果,其垂向分布差异并不明显,与表层结果相比, COD 浓度分布基本一致。

5 结论

利用 ECOMSED 模式,采用较为细致的水平正交曲线网格,对胶州湾的 M₂ 潮流和污染物 COD 的稀释

扩散进行数值模拟,得到了如下的主要结论:

(1) 胶州湾及其附近海域存在许多大小、强弱和旋转方向不同的余流涡,其中湾内 5 个余流涡分布基本与调查资料相吻合。

(2) 考虑环胶州湾主要河流入海 COD 的量,得出胶州湾内 COD 浓度东部比西部高,最大值出现在墨水河口附近;胶州湾湾口外的 COD 浓度等值线成舌

状分布, 向东伸展。

(3) 胶州湾内大部分区域 COD 浓度都在 1 mg/L 以上, 从胶州湾流出的 COD 主要沿湾口向东从青岛前海一带进入黄海, 对灵山岛以北海域影响甚微。

(4) 根据数值模拟结果, 胶州湾余流和 COD 浓度垂向分布差异并不显著, 与表层分布趋势基本一致。

致谢: 本文得到了中国海洋大学侍茂崇教授的热诚指导和帮助。所用模式由美国 HydroQual, Inc. 提供, 在此表示感谢!

参考文献

1 鲍献文, 闫菊, 赵亮, 等. ECOM 模式在胶州湾潮流

计算中的应用. 海洋科学, 1999, 5: 57-60

2 闫菊, 王海, 鲍献文. 胶州湾三维潮流及潮致余环流的数值模拟. 地球科学进展, 2001, 16(2): 172-177

3 闫菊, 鲍献文, 王海, 等. 胶州湾污染物 COD 的三维扩散与输运研究. 环境科学研究, 2001, 14(2): 14-17

4 赵亮, 魏皓, 赵建中. 胶州湾水交换的数值研究. 海洋与湖沼, 2002, 33(1): 23-29

5 孙英兰, 张越美. 胶州湾三维变动边界的潮流数值模拟. 海洋与湖沼, 2001, 32(4): 355-361

6 张越美, 孙英兰. 河口、陆架和海洋模式在胶州湾的应用. 海洋环境科学, 2000, 19(4): 13-17

7 娄安刚, 王学昌, 吴德星, 等. 胶州湾大沽河口邻近海域海水水质预测. 海洋环境科学, 2002, 21(1): 52-56

NUMERICAL SIMULATION OF THE TIDAL CURRENTS AND THE POLLUTANT DIFFUSION IN JIAOZHOU BAY

WAN Xiu-Quan¹ BAO Xian-Wen¹ WU De-Xing¹ GUO Xin-Shun² JIANG Hua¹

(¹The Department of Oceanography, Ocean University of China, Qingdao, 266003)

(²The Dongfanghong-2 surveying Ship, Ocean University of China, Qingdao, 266003)

Received: Jan., 22, 2003

Key Words: Residual current, Pollutant diffusion, Numerical simulation, Jiaozhou Bay

Abstract

Including the orthogonal curvilinear grid system, the model of ECOMSED was applied to simulate M₂ tide, tidal currents and the pollutant COD diffusion. Then, a 3-D model for conservative pollutant advection transport was made. The model results show that around the Jiaozhou Bay there are many residual current eddies differing in size, magnitude and rotation direction. The COD concentration in the east Jiaozhou Bay is higher than that in the west. The COD concentration isolines in the mouth of the Jiaozhou Bay are tongue-like distribution and stretch eastwards. The vertical distribution diversities of the residual current and the COD concentration are non-significant. The computed results match well with the observed ones in the Jiaozhou Bay.

(本文编辑: 张培新)