

秦皇岛海域洪季水动力及污染物扩散数值模拟

匡翠萍¹, 胡成飞¹, 冒小丹¹, 顾杰²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 基于实测资料验证的秦皇岛近岸海域二维水动力和污染物扩散模型, 研究了秦皇岛近岸海域洪季大潮水文条件下的水动力和污染物扩散分布特征, 并在此基础上分析了风对秦皇岛近岸海域水动力和污染物扩散的影响。研究发现, 秦皇岛近岸海域落潮流为东北(NE)向, 涨潮流为西南(SW)向。在渤海夏季风作用下, 秦皇岛近岸海域整体水位略有降低; 落憩时刻, 石河口以北海域流速降低, 石河口以南海域流速增加; 涨憩时刻, 石河口以北海域流速略有增加, 戴河口至滦河口间海域流速降低。化学需氧量(COD)扩散方向与涨落潮方向一致, 涨落憩时刻, COD 浓度均在滦河口以南海域降低, 洋河口以北海域增加。

关键词: 秦皇岛; 水动力; 污染物扩散; 夏季风; 数值模拟
中图分类号: X55 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Hydrodynamics and Pollutant Transport in Qinhuangdao Coastal Water in the Flood Season

KUANG Cuiping¹, HU Chengfei¹, MAO Xiaodan¹, GU Jie²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A 2D hydrodynamics and pollutant transport model was firstly established, and the model was verified well by the field measured hydrodynamics and water quality data in 2011. Based on this model, the features of hydrodynamics and pollutant transport during a spring tide in the flood season in Qinhuangdao coastal water were studied. Furthermore, the influence of wind on hydrodynamics and pollutant transport in Qinhuangdao coastal water was analyzed. Numerical results show that the main direction of the ebb current is northeast, while the direction of the flood current is southwest. The water level of Qinhuangdao coastal water will slightly decrease under the influence of summer wind in Bohai sea. Meanwhile, the current velocity will decrease in the northern coastal

water of Shihe River estuary and increase in the southern coastal water of Shihe River estuary at the slack of ebb, while the current velocity will slightly increase in the northern coastal water of Shihe River estuary and decrease in the coastal water between Daihe River estuary and Luanhe River estuary at the slack of flood. The direction of COD transport is in accord with the direction of tidal current. The COD concentration will decrease in the southern coastal water of Luanhe River estuary and increase in the northern coastal water of Yanghe River estuary at the slacks of ebb and flood.

Key words: Qinhuangdao; hydrodynamics; pollutant transport; summer wind; numerical simulation

秦皇岛位于河北省东北部, 地理坐标为北纬 39°24′~40°37′, 东经 118°33′~119°51′。秦皇岛海岸线北起山海关金丝河口, 南止昌黎县滦河口, 总长 162.7 km。秦皇岛市现有捕捞作业渔场 1 万 km², 有适宜发展养殖的浅海 533 km², 滩涂 13 km²。海产养殖尤其是海湾扇贝养殖在全国占有重要地位, 2008 年, 秦皇岛市渔业总产量 34.96 万 t, 其中海水养殖产量 29.98 万 t, 占总产量的 85.76%^[1]。然而近年来秦皇岛海域几乎连年发生赤潮, 对当地扇贝等海产养殖造成了巨大损失。2009 年秦皇岛沿岸海域爆发大面积赤潮, 赤潮区内养殖的扇贝、牡蛎等水产出现了滞长和死亡现象, 约三分之二的养殖区受到影响。2010 年秦皇岛昌黎沿海海域发生大面积赤潮, 造成直接经济损失约 2 亿元。2011 年秦皇岛海域赤潮发生次数最多, 全年共爆发 7 次赤潮, 对当地扇贝养殖造成了数亿元的损失。

近年来, 国内外大量学者对赤潮爆发的机理及赤潮爆发时水体中各测站点的水文化学要素的浓度变化进行了研究^[2-4], 研究表明赤潮爆发与海域水动力条件、水体交换速率及营养盐等污染物存在着一

收稿日期: 2014-07-22

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项(201305003-5)

第一作者: 匡翠萍(1966—), 女, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为河口海岸工程和环境。E-mail: cpkuang@tongji.edu.cn

通讯作者: 顾杰(1961—), 男, 工学博士, 教授, 主要研究方向为海洋环境。E-mail: jgu@shou.edu.cn

定的相关关系. 海域的水动力条件和污染物扩散受潮汐、地形、风及科氏力等因素影响^[5-7], 其中在湖泊、河口和海湾等封闭或半封闭水域, 风是驱动水体环流及污染物扩散的主要因子之一^[8-11], 而在宽广海域风驱动力的作用并不是影响水动力条件和污染物扩散的主要因素, 然而部分学者通过研究发现, 风对开放海域的水动力、水体交换、盐度混合及污染物扩散等仍有一定程度的影响^[12-14], 尤其在赤潮频发海域更应引起重视. 由于洪季为秦皇岛海域赤潮频发期, 本文建立了秦皇岛近岸海域二维水动力和污染物扩散模型, 并通过洪季水文和水质实测资料对模型进行了率定验证, 得到了秦皇岛近岸海域在潮汐以及潮汐和风共同作用下的水动力和化学需氧量(COD)扩散分布特征, 并在此基础上, 分析了风对秦皇岛近岸海域洪季水动力和 COD 扩散分布的影响, 以期较为全面地认识秦皇岛近岸海域洪季水动力及 COD 扩散特征.

1 研究区域

研究区域选择秦皇岛近岸海域, 北起山海关, 南至滦河口, 岸线绵延 173 km, 从北向南沿岸线共有 11 条入海河流: 石河、新开河、汤河、新河、戴河、洋河、人造河、东沙河、大蒲河、七里海和滦河.

秦皇岛属于暖温带半湿润大陆性季风气候区, 春季少雨干燥, 夏季湿润多雨, 秋季晴朗干爽, 冬季寒冷少雪^[15], 其海岸带年平均风速为 $3.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大风速 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 冬季多为东北(NE)风, 春季多为西南偏西(WSW)风, 夏季为西南(SW)风^[16]. 秦皇岛附近海域是规则全日潮区, 向南至滦河口区属于不规则全日潮区^[17]. 秦皇岛近岸海域历年平均潮位 73~91 cm, 呈现冬低夏高的趋势^[18]. 秦皇岛年平均温度 $9^\circ\text{C} \sim 11^\circ\text{C}$, 最高月平均温度 $23^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$, 最低月平均温度 $-7^\circ\text{C} \sim -5^\circ\text{C}$, 最适宜气候环境为 6~9 月, 是海滨泳浴的最佳时节^[19].

2 数学模型

基于 Navier-Stokes 方程和对流扩散方程建立水动力和污染物扩散模型, 并在污染物扩散模型中采用线性衰减系数来反映 COD 的衰减过程.

(1) 计算网格与地形

数学模型的计算范围, 北至山海关以北约 20 km 处, 南至滦河口以南近 14 km 处, 向外海延伸大

约 55 km, 包含入海河流河口. 计算区域采用三角形划分网格, 节点数为 9 066, 网格单元数为 16 866. 通过对国家测绘局 1998 年版 1:50 000 地形图, 以及 2000 年、2005 年航片资料进行数字化处理, 并配合 2007 年、2009 年、2011 年实测近岸详细地形水深数据和 2013 年河道地形实测数据得到一整套完整的计算区域地形数据.

(2) 初始条件与边界条件

水动力模型外海开边界由潮位过程控制, 其潮位过程由渤海潮流模型(边界为大连到烟台)^[20]提供; 河流开边界由实测多年月平均流量控制. 模型初始水位选取计算开始时刻开边界潮位的平均值, 流速为零. 污染物扩散模型外海开边界条件为本底 COD 浓度, 近似取常值 $0.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 河流开边界 COD 浓度由 2011 年各月 COD 浓度实测值控制. 模型初始 COD 浓度设定为本底 COD 浓度 $0.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

(3) 参数设置

曼宁系数由该海域海床泥沙中值粒径和水深综合确定, 取平均值 0.014, 时间步长取 1 s. 边界滩地采用动边界处理滩地的干湿交换过程. 水平扩散系数通过污染物扩散模型率定, 取常值 $60 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. COD 衰减系数根据实测平均水温按一阶衰减过程计算, 为 0.033 d^{-1} . 风场数据来源于美国国家海洋和大气管理局 NOAA 中渤海站点(120°E , 39.047°N)2011 年 5 月 1 日~9 月 1 日的风速风向. 2011 年 5~9 月渤海最大风速为 $12.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均风速 $4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 南(S)、东南偏南(SSE)和西南偏南(SSW)风向占总数的 49.1%, 常风向为 S, S 风向平均风速为 $5.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 8 月 10~16 日期间(图 1), 渤海最大风速 $4.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均风速 $2.87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; SSE、S、SSW 风向占总数的 56%, 常风向为 SSE.

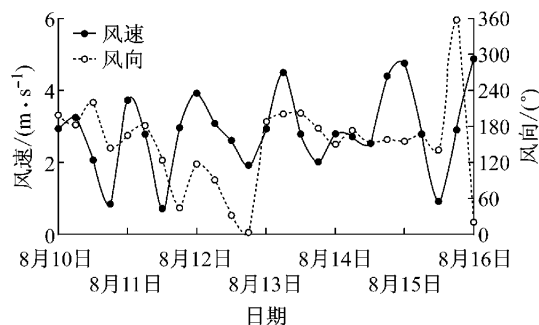


图 1 2011 年 8 月 10~16 日风速风向

Fig. 1 Time-series of wind speed and wind direction from 10th to 16th August 2011

3 模型验证

2011年7月21日~26日暨南大学对赤潮发生时秦皇岛近岸海域 C01~C23 站点的水质情况进行了取样分析。秦皇岛海洋环境监测中心于2011年5月26日8:00至27日8:00对秦皇岛近岸海域 V01~V10 十个站点进行了流向流速监测,水动力及污染物测站如图2所示。

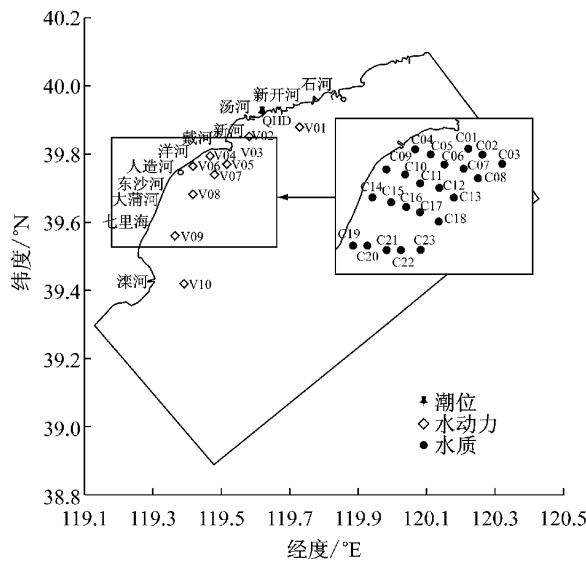


图2 水动力和水质监测站点

Fig.2 Monitoring stations for hydrodynamics and water quality

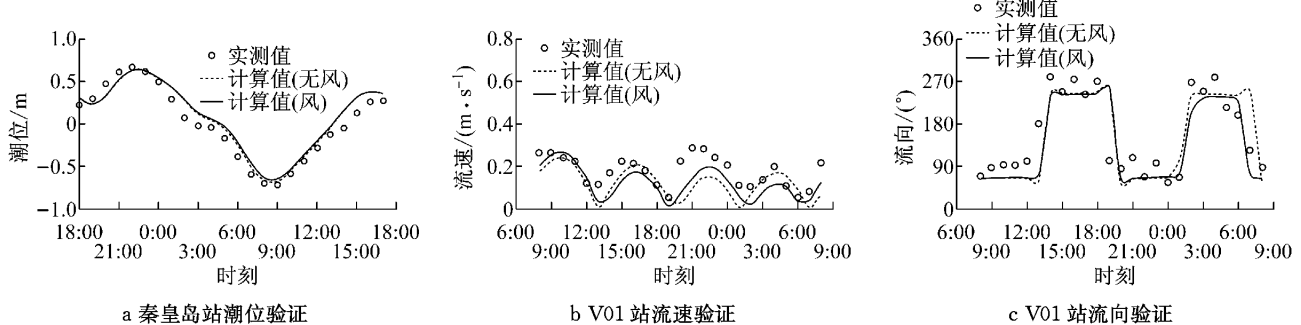


图3 秦皇岛站潮位验证和 V01 站流速流向验证

Fig.3 Verification of tidal level at Qinhuangdao gauge station and tidal current velocity magnitude and direction at stations V01

虑风的情况下,污染物扩散模型中 COD 计算结果相对误差小于 25% 以内的站点占总数的 78.26%,加入风场后,COD 计算结果相对误差小于 25% 以内的站点占总数的 95.65%,污染物扩散模型总体验证良好。部分站点计算值与实测值误差较大的原因可能是站点监测时间不同步,计算值和实测值不能保证为同一时刻水质的反映以及数学模型中仅考虑了河

3.1 水动力模型验证

(1) 潮位验证

水动力模型中的潮位验证如图 3a 所示,实测潮位资料为 2011 年 5 月 21 日 18:00 至 22 日 18:00 秦皇岛站的潮位过程,验证站位置如图 2 所示。潮位的相位和趋势基本吻合,潮位大小有小幅偏差,这是由于水动力模型中部分物理参数采用了平均值,即常数;风场为 6 h 的演变场。此外秦皇岛站位置靠近海岸线,近岸海域地形复杂,且秦皇岛站处于无潮点影响范围内,潮波变形较大,从而导致计算潮位大小有一定偏差。

(2) 潮流验证

水动力模型中潮流验证如图 3b 和 3c 所示(限于篇幅有限,现仅列出 V01 潮流验证),实测潮流资料来源于秦皇岛海洋环境监测中心实测数据,测站位置如图 2 所示。V01 测站的模拟流速和流向与实测值在相位上基本吻合,部分时刻 V01 测站流速和流向验证在数值上有一定误差,这主要是由于风场数据参考的站点为渤海监测站点,与秦皇岛实际风速风向有一定偏差,而且近岸风场还受陆域影响,较为复杂,且秦皇岛近岸海域位于渤海无潮点附近,潮波变化复杂。

3.2 污染物扩散模型验证

采用暨南大学 2011 年 7 月 21 日~26 日秦皇岛近岸海域水质监测数据(监测站点如图 2 所示)对污染物扩散模型进行验证,验证结果如图 4 所示,未考

流进入海域的污染,未考虑其他直排口以及浴场开放等当地因素的影响。

4 结果与分析

通过建立和验证的数学模型计算得到秦皇岛近岸海域 2011 年 6 月 1 日~9 月 1 日水动力和污染物

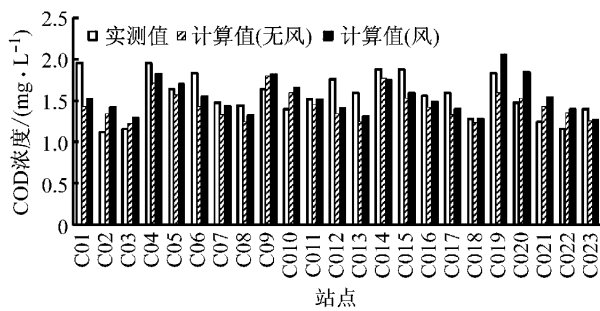


图 4 COD 浓度验证

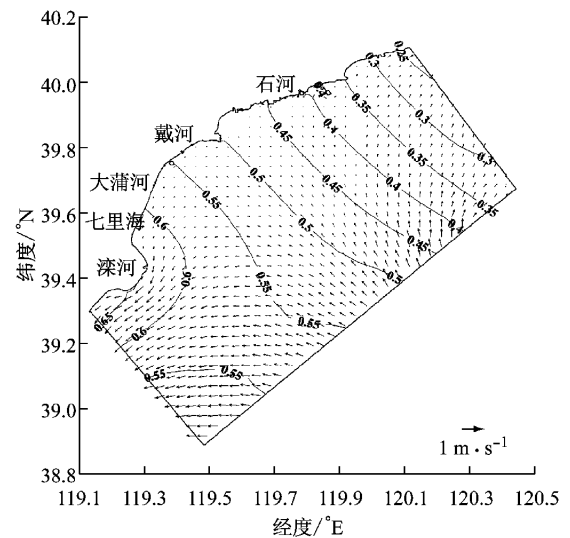
Fig. 4 Verification of COD concentration

扩散变化过程,选取 8 月 15 日来分析秦皇岛近岸海域在洪季大潮水文条件下的水动力和污染物扩散分布特征,比较风对秦皇岛近岸海域水动力和污染物扩散的影响。

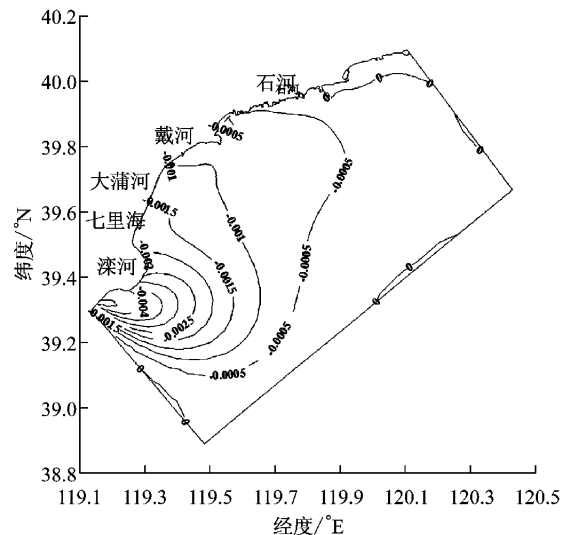
4.1 水动力特征

秦皇岛近岸海域 2011 年 8 月 15 日涨憩时刻水位流场如图 5a 所示,图中,矢量箭头代表流速,等值线表示水位。秦皇岛近岸海域涨潮流为 SW 向,落潮流为 NE 向。在涨憩时刻,风作用下,整个海域水位变化为 $-0.0048 \sim 0.0008$ m,变化幅度仅为 $-0.7\% \sim 0.2\%$,仅石河口东北部靠岸和外海边界处狭小海域水位略有升高,大部分海域水位均降低,滦河口附近海域水位降低较明显,可能是因为滦河口三角洲特殊的地形受风作用力影响较为复杂。风作用下,整个海域的流速变化为 $-0.112 \sim 0.021$ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,风作用(风速 < 5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)对外海流速基本无影响,对近岸海域流速影响复杂,可能是由于近岸海域地形复杂,潮流较紊乱,受风作用力的影响较大。近岸海域,石河口以北海域流速略有增加,戴河口至滦河口间海域流速降低,滦河口以南海域流速减小相对较大,这是由于海域潮流过程不同步造成的,2011 年 8 月 13 日~15 日,渤海主要风向为 SSW、S 和 SSE,戴河口附近海域涨憩时,石河口以北海域已经转流,流向为 NE,风应力起动力作用,使流速增加,而戴河口至滦河口海域潮流仍处于涨憩向涨憩过渡阶段,流向为 SW,风应力起阻力作用,使流速减小。

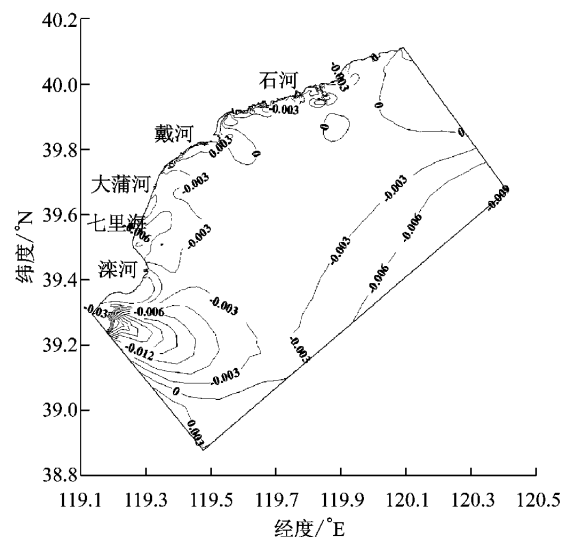
落憩时刻,风作用下,整个海域水位变化规律与涨憩时刻相似,变化幅度较涨憩时刻大,为 $-2.5\% \sim 4.6\%$ 。风对外海流速基本无影响。在近岸海域,由于海域潮流过程不同步,石河口以北海域流速降低,石河口以南海域流速增加,滦河口以南海域流速增加相对较大。



a 潮汐和风共同作用下水位流场(单位:m)



b 风对水位的影响(风-无风,单位:m)



c 风对流速的影响(风-无风,单位:m·s⁻¹)

图 5 涨憩时刻秦皇岛近岸海域水位流场

Fig. 5 Isolines of water levels and current fields at the slack of the flood in Qinhuangdao coastal water

4.2 污染物扩散分布特征

秦皇岛近岸海域 2011 年 8 月 15 日涨憩时刻 COD 浓度分布如图 6 所示. COD 扩散方向与涨落潮潮流方向一致. 涨憩时刻, 潮汐作用及潮汐和风共同作用下的 COD 浓度分布趋势基本一致, 洋河口以北海域, 风和潮汐共同作用下的 COD 浓度等值线分布在近岸海域较无风条件下向 NE 偏移, 这是由于 2011 年 8 月 13 日~15 日, 渤海主要风向为 SSW、S 和 SSE, 减慢了洋河口以北海域 COD 向 SW 方向的扩散. 风作用下, 该海域内 COD 浓度变化为 $-0.17 \sim 0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 浓度变化梯度近岸海域高于外海, 与近岸海域浓度梯度大于外海浓度梯度一致. COD 在七里海以南海域浓度降低, 洋河口以北海域浓度增加, 这是由于该时段, 涨潮流在风作用下流速降低, 减慢了洋河口以北海域 COD 向 SW 方向扩散, 同时也降低了戴河、洋河、人造河、东沙河和大蒲河排出的 COD 向七里海以南海域扩散速度, 从而造成 COD 在七里海以南海域浓度降低, 洋河口以北海域浓度增加.

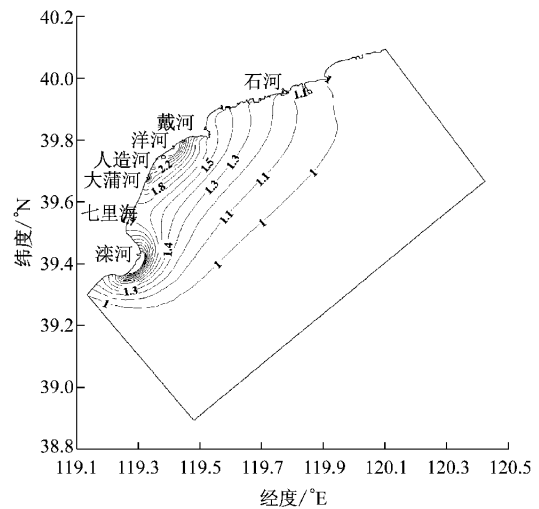
落憩时刻, 风作用下, COD 浓度等值线分布向 NE 偏移, 这是由于该时段渤海主要风向为 SSW、S 和 SSE, 加快了 COD 向 NE 方向的扩散. 海域内 COD 浓度变化为 $-0.27 \sim 0.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. COD 在大蒲河口、人造河口以及滦河口以南海域浓度降低, 洋河口以北海域浓度增加, 这是由于该时间段, 潮流在风作用下流速增大, 加大了从河口排出的 COD 向 NE 方向扩散的速度, 从而造成洋河口以北海域 COD 浓度增加; 而 SW 向外海开边界浓度小于海域浓度, NE 方向流速增大, 加大了 SW 向外海开边界对滦河口以南海域的影响, 从而造成滦河口以南海域 COD 浓度降低.

5 结论

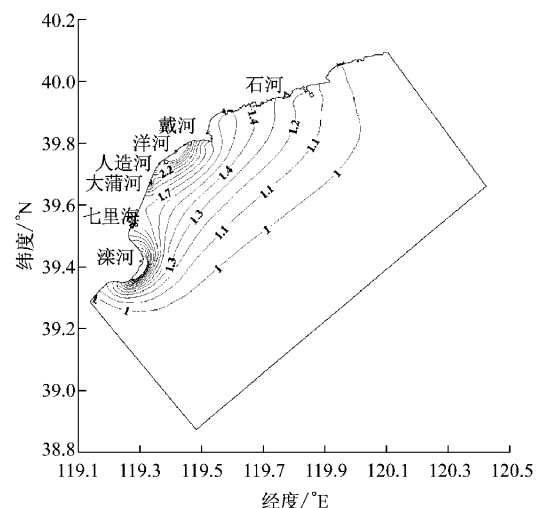
本文建立了秦皇岛近岸海域二维水动力和污染物扩散数学模型, 并用实测资料对数学模型进行率定验证, 研究了秦皇岛近岸海域在洪季大潮水文条件下的水动力和污染物扩散分布特征, 并在此基础上分析了风对秦皇岛近岸海域水动力和污染物扩散的影响, 得到如下结论:

(1) 秦皇岛近岸海域落潮流为 NE 向, 涨潮流为 SW 向; 秦皇岛与滦河口海域转流时间不同步; 秦皇岛近岸海域潮流总体特征为顺岸往复流.

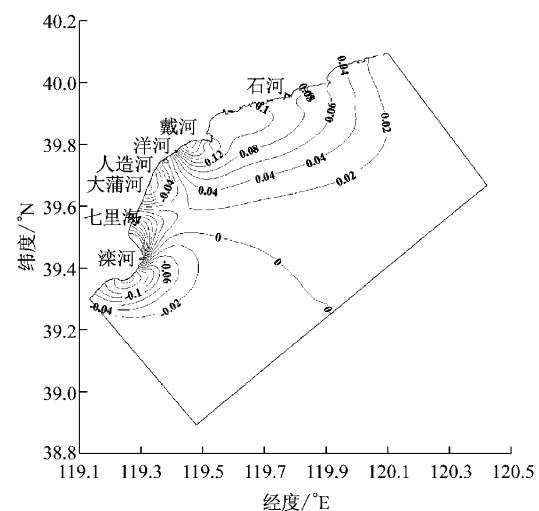
(2) 涨落憩时刻, 风作用下, 秦皇岛近岸海域整



a 潮汐作用下 COD 浓度分布



b 潮汐和风共同作用下 COD 浓度分布



c 风对 COD 浓度分布的影响(风-无风)

图 6 涨憩时刻秦皇岛近岸海域 COD 浓度分布
(单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Fig.6 Isolines of COD concentration at the slack of the flood in Qinhuangdao costal water (unit: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

体水位均略有降低。风作用对近岸海域流速影响复杂,落憩时刻,石河口以北海域流速降低,石河口以南海域流速增加;涨憩时刻,石河口以北海域流速略有增加,戴河口至滦河口间海域流速降低。

(3) COD 扩散方向与涨落潮潮流方向一致。COD 浓度分布由近岸向外海递减,近岸海域浓度梯度较外海大。

(4) 风作用下,落憩时刻,COD 浓度在大蒲河口、人造河口以及滦河口以南海域降低,洋河口以北海域增加;涨憩时刻,COD 浓度在七里海以南海域降低,洋河口以北海域增加。

致谢:本文水动力和污染物扩散数学模型验证采用的潮流及水质实测数据分别由秦皇岛海洋环境监测中心和暨南大学吕颂辉教授提供,在此表示真诚的感谢!

参考文献:

- [1] 王凤昀. 秦皇岛海域赤潮初步调查[J]. 河北渔业, 2009(10): 50.
WANG Fengyun. The primary study on Red-Tide of Qinhuangdao sea[J]. Hebei Fisheries, 2009(10): 50.
- [2] 张勇, 张永丰, 张万磊, 等. 秦皇岛海域微型藻华期间叶绿素 a 分级研究[J]. 生态科学, 2012, 31(4): 357.
ZHANG Yong, ZHANG Yongfeng, ZHANG Wanlei, et al. Size fraction of chlorophyll a during and after brown tide in Qinhuangdao coastal waters[J]. Ecological Science, 2012, 31(4): 357.
- [3] 吴婷, 韩秀荣, 赵倩, 等. 赤潮爆发对东海赤潮高发区典型断面氮的影响[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(2): 196.
WU Ting, HAN Xiurong, ZHAO Qian, et al. Effect of red tide on nitrogen in typical section of frequent HAB area, East China Sea[J]. Marine Environment Science, 2013, 32(2): 196.
- [4] Moradi M, Kabiri K. Red tide detection in the Strait of Hormuz (east of the Persian Gulf) using MODIS fluorescence data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(4): 1015.
- [5] 梁书秀, 孙昭晨, Nakatsuji Keiji, 等. 渤海典型余环流及其影响因素研究[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(1): 103.
LIANG Shuxiu, SUN Zhaochen, Nakatsuji Keiji, et al. Research on typical residual circulation and its driving factors in the Bohai Sea [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(1): 103.
- [6] 蔡惠文, 孙英兰, 张越美, 等. 宁波-舟山海域污染物扩散的数值模拟[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2006, 36(6): 975.
CAI Huiwen, SUN Yinglan, ZHANG Yuemei, et al. Numerical simulation of pollutant diffusion in the Ningbo-Zhoushan sea area[J]. Periodical of Ocean University of China: Natural Science, 2006, 36(6): 975.
- [7] Zhou N Q, Westrich B, Jiang S M, et al. A coupling simulation based on a hydrodynamics and water quality model of the Pearl River Delta, China[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(3-4): 267.
- [8] 匡翠萍, 高健博, 刘曙光, 等. 贝加尔湖典型风况下三维流场数值模拟[J]. 人民长江, 2010, 41(3): 99.
KUANG Cuiping, GAO Jianbo, LIU Shuguang, et al. Numerical simulation of 3D wind-driven current in Lake Baikal under typical wind condition[J]. Yangtze River, 2010, 41(3): 99.
- [9] 杨莉玲, 徐锋俊, 张术勇. 波浪和风对伶仃洋盐度输移影响的三维数值模拟研究[J]. 人民珠江, 2012(S1): 61.
YANG Liling, XU Fengjun, ZHANG Shuyong. Three-dimensional mathematic model for transport of salinity in Lingdingyang under wind and wave[J]. Pearl River, 2012(S1): 61.
- [10] Li L, Zhu J R, Wu H. Impacts of wind stress on saltwater intrusion in the Yangtze Estuary [J]. Science China-earth Sciences, 2012, 55(7): 1178.
- [11] Wu T F, Qin B Q, Zhu G W, et al. Modeling of turbidity dynamics caused by wind-induced waves and current in the Taihu Lake[J]. International Journal of Sediment Research, 2013, 28(2): 139.
- [12] 周华民, 谢亚力, 倪勇强, 等. 风浪作用下海岸区域的酸性污染物扩散[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(1): 16.
ZHOU Huamin, XIE Yali, NI Yongqiang, et al. Diffusion acid pollutant driven by wind wave in coastal area [J]. Marine Environment Science, 2012, 31(1): 16.
- [13] Baeye M, Fettweis M, Voulgaris G, et al. Sediment mobility in response to tidal and wind-driven flows along the Belgian inner shelf, southern North Sea[J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(5): 611.
- [14] Kuang C P, Lee J, Harrison P J, et al. Effect of wind speed and direction on summer tidal circulation and vertical mixing in Hong Kong waters[J]. Journal of Coastal Research, 2011, 27S(6A): 74.
- [15] 章斌, 宋献方, 韩冬梅, 等. 运用数理统计和模糊数学评价秦皇岛洋戴河平原的海水入侵程度[J]. 地理科学, 2013, 33(3): 342.
ZHANG Bin, SONG Xianfang, HAN Dongmei, et al. Seawater intrusion degree evaluation based on mathematical statistics and fuzzy mathematics in Qinhuangdao Yangdai River Plain [J]. Scientia Geographica Sinica, 2013, 33(3): 342.
- [16] 苗佳静. 秦皇岛海域船舶溢油风险研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
MIAO Jiajing. Risk study of ship's oil spill in the sea area of QinHuangDao [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008.
- [17] 孙雪景. 渤海海域船舶溢油风险管理框架的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
SUN Xuejing. The study on oil spill risk management framework of Bohai sea [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2007.
- [18] 董坤. 秦皇岛海岸带变迁及其环境效应研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2008.
DONG Kun. The research on coastal zone vicissitude and environment effect of Qinhuangdao [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2008.
- [19] 王素兰, 王丽英. 秦皇岛北戴河风景区开发设想[J]. 同济大学学报: 社会科学版, 1994(S1): 40.