

曹妃甸海域磷酸盐容量控制

匡翠萍¹, 霍蕊¹, 孙晓明², 杜东²

(1. 同济大学 土木工程学院水利工程系, 上海 200092; 2. 天津地质调查中心, 天津 300170)

摘要: 首先, 建立曹妃甸海域潮流和污染物运输数学模型, 并用实测资料对模型进行验证; 然后, 应用验证好的数学模型, 计算六种典型水文条件(洪季大、中、小潮, 枯季大、中、小潮)下该海域 8 个河流排污口和曹妃甸围填区混合区半径上的磷酸盐浓度, 并与功能区要求的水质标准进行比较分析; 最后, 计算出磷酸盐的允许排放量和削减率. 结果表明: 磷酸盐超标的枯季为陡河和沙河, 洪季为双龙河和围填区, 应加强对这些河流相应季节磷酸盐排放量的控制.

关键词: 曹妃甸; 数学模型; 磷酸盐; 潮流; 混合区

中图分类号: X 171.1

文献标识码: A

Phosphate Capacity Control in Caofeidian Coastal Area

KUANG Cui ping¹, HUO Rui¹, SUN Xiaoming², DU Dong²

(1. Department of Hydraulic Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China)

Abstract: A tidal flow and pollutant transport mathematical model was first established and verified by the measured data. Then, phosphate concentrations under six hydrological conditions (spring, middle and neap tides in the flood season; and spring, middle and neap tides in the dry season) were computed by this verified mathematical model, and the comparisons were made between the computed phosphate concentration at the boundary of the mixing zones and corresponding water quality standards. At last, the allowed discharge amount and cut rate of phosphate at outfalls were calculated. The research results show that the phosphate concentrations at the mixing zone boundaries of Douhe and Shahe rivers exceed their allowed standard values in the dry season, and the exceeding concentration occur in Shuanglonghe mixing zone and reclamation area in the flood season. The phosphate discharge amount from Douhe and Shahe rivers in the dry season and Shuanglonghe in the flood

season must be cut down.

Key words: Caofeidian; mathematical model; phosphate; tidal current; mixing zone

近年来, 人类与自然活动的废弃物, 工农业和生活污水的不断排入海, 导致了海洋的生态脆弱和近岸海域的环境质量下降^[1-2]. 曹妃甸地处唐山南部的渤海湾西北岸, 是渤海湾唯一不需开挖航道和港池就可建设 30 万 t 级大型泊位的“钻石级”港址^[3]. 然而, 其周围污水经常不经处理就排入附近海域^[4], 因此, 控制曹妃甸地区环境污染是一项具有重要和现实意义的工作.

目前, 国内外通过建立数学模型对潮流水动力情况及海洋污染做了很多研究. 一维水流水质模型主要应用于河流和河网的数值模拟中^[5]. 平面二维水流水质模型在工程中应用最为广泛, 例如, 模拟河口海岸潮流^[6-7]、海岸泥沙输运^[8], 以及湖泊河口潮流水质^[9-10]. 近年来, 三维水流水质模型在河口海洋水环境研究中, 特别是赤潮的运动轨迹方面, 得到了一定的应用^[11-13].

笔者通过建立曹妃甸海域潮流和污染物运输数学模型, 用现场实测资料验证模型, 然后应用验证的数学模型预测曹妃甸海域的磷酸盐容量, 计算海域各排污口允许排放的磷酸盐浓度, 并提出超标排污口的削减量, 为曹妃甸海域水质控制提供了科学依据.

1 数学模型建立

1.1 基本方程

采用荷兰 WL|Delft Hydraulics 开发的 Delft3D 模型中 Delft3D-Flow 水动力模块进行模拟.

收稿日期: 2009-12-07

基金项目: 河北省 908 项目(908SJHB0204, 908SJHB0210), 同济大学“985 工程”二期建设项目(0200144005)

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

通讯作者: 孙晓明(1960—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为环境地质和水文地质. E-mail: tjxiaoming@126.com

(1)潮流方程. 根据浅水假定以及布西奈斯克(Boussinesq)假定, 正交曲线坐标系 (ξ, η) 下平面二维连续性方程和动量方程^[14]如下:

连续方程

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \cdot \frac{\partial[(d + \zeta)u \sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \cdot \frac{\partial[(d + \zeta)v \sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \cdot \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \cdot \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \cdot \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \cdot \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - fv = -P_{\xi}/\rho \sqrt{G_{\xi\xi}} - gvn^2 \sqrt{u^2 + v^2}/H^{1/3}(d + \zeta) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \cdot \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \cdot \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \cdot \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \cdot \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + fu = -P_{\eta}/\rho \sqrt{G_{\eta\eta}} - gvn^2 \sqrt{u^2 + v^2}/H^{1/3}(d + \zeta) \quad (3)$$

式中: ζ 为参考水平面上的水位; d 为参考水平面下的水深; H 为总水深; u, v 分别代表 ξ 和 η 方向的平均流速; ρ 为水的密度; P_{ξ}, P_{η} 分别为 ξ 和 η 方向压力梯度; f 为柯氏力系数; n 为曼宁系数.

(2)物质输运方程

$$\frac{\partial Hc}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[\frac{\partial(\sqrt{G_{\eta\eta}}Huc)}{\partial \xi} + \frac{\partial(\sqrt{G_{\xi\xi}}Hvc)}{\partial \eta} \right] = \frac{H}{\sqrt{G_{\xi\xi}} \sqrt{G_{\eta\eta}}} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\eta\eta}}}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \cdot \frac{\partial c}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(D_H \frac{\sqrt{G_{\xi\xi}}}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \cdot \frac{\partial c}{\partial \eta} \right) - \lambda_d Hc + S \right] \quad (4)$$

式中: λ_d 是污染物1阶降解系数; D_H 为水平紊动扩散系数; S 是源汇项,对一般污染物, $S = H(q_{in}c_{in} - q_{out}c_{out})$; q_{in} 和 q_{out} 表示单位体积水体中的本地源入量和汇出量; c_{in} 和 c_{out} 为流入和流出的污染物浓度.

1.2 数值解法

研究采用的数值解法是有限差分方法(FDM). 该方法将求解域划分为差分网格,用有限个网格节点代替连续的求解域.FDM以Taylor级数展开等方法,把控制方程中的微商用差商代替进行离散,从而建立代数方程组来求解.计算采用交替方向隐格式法(ADI).ADI法有较好的计算稳定性和计算精度,

已广泛应用在河道及潮汐河口计算中.

1.3 数学模型范围及计算网格

数学模型计算范围为东经 $117^{\circ}50' \sim 119^{\circ}10'$,北纬 $38^{\circ}35' \sim 39^{\circ}25'$ 的海域.模型的网格为非均匀,近海岸、港区、深潮沟处网格较细,外海水域网格较粗,中间过渡水域网格由细网格向粗网格渐渐过渡.这样安排既能减少计算网格的数目,节省计算时间,又能保证计算精度.最细网格小于60 m,最粗网格约为500 m.模型建立时所需的8条河流的流量和浓度等资料是由整个渤海大模型计算得到的^[15].

1.4 初始条件和边界条件

模型计算的开始时刻取憩流时刻附近,这样初始条件可取流速为零和自由水面水位为常数.根据Delft3D-Flow模型中取Crouant数($= \sqrt{gH} \Delta t / \min(\Delta x, \Delta y)$)小于10的要求和不同计算时间步长 Δt ,对比分析计算稳定性和精确度,最终 Δt 取2 min.

模型有西边界、东边界和南边界3条开边界以及1条岸线闭边界.海域开边界潮位由潮位过程控制,浓度纯对流条件下的内部污染物浓度计算而得.测向固边界条件采用流速为零、浓度法向为零.

2 数学模型验证

本数学模型根据对实测资料的率定,取水平紊动粘滞系数为 $10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;曼宁系数根据底质沙粒径分布区域给出,取值范围为0.013~0.016.

2.1 潮流模型验证

采用实测资料对数学模型进行三次潮位潮流验证,潮型分别为2008年的春季小潮、夏季小潮和夏季大潮,潮位验证站为曹妃甸和京唐港,潮流验证点为#1, #2, #3, #4, #5, #6,时间分别为5月13日至5月15日,7月11日至7月13日,以及7月16日至7月18日.图1、图2分别为夏季大潮曹妃甸的潮位验证结果和测站#2的潮流流速和流向的验证结果.

图1显示,计算潮位过程与实测潮位过程相当吻合,绝对误差小于0.05 m;图2则显示出涨、落潮流速与流向的计算值在数值和相位上都与实测值拟合较好.其他测点的验证结果与此相似,计算潮位和潮流与实测值有较好的一致性.

2.2 污染物模型验证

污染物模型验证资料采用2007年4月和10月份的曹妃甸海域11个测点的磷酸盐浓度实测资料.测点位置如图3所示.图4a, b表示的分别是2007年4月和10月磷酸盐浓度实测值与计算值之间的

比较,总体来看,二者比较一致.

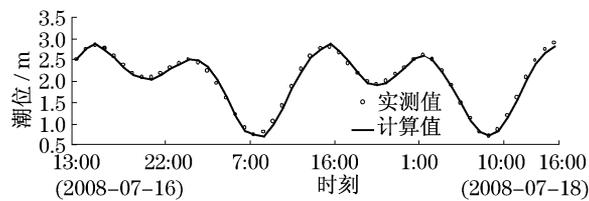


图 1 曹妃甸夏季大潮潮位验证

Fig.1 Tidal level verification of spring tide in summer

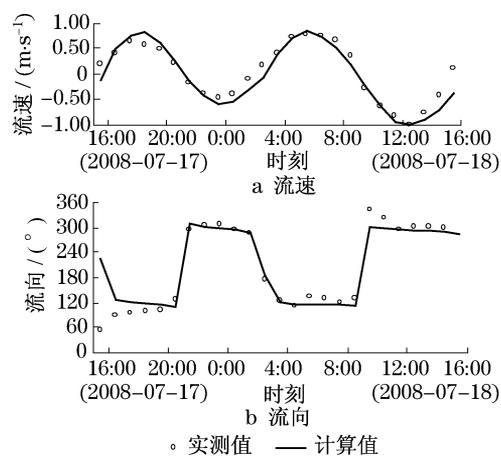


图 2 夏季大潮潮流验证

Fig.2 Tidal current verification of spring tide in summer

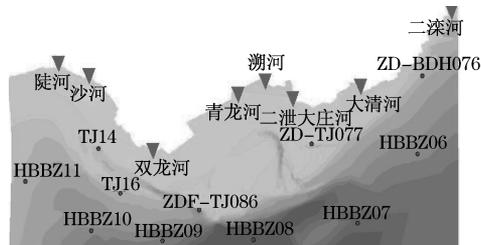


图 3 污染物模型各验证点位置

Fig.3 Position of verification points in pollutant transport mathematical model

通过污染物的验证可知,在连续计算两个月的最后几天,磷酸盐质量浓度场已趋于稳定,因此,选择模拟过程中最后一个潮周期的磷酸盐质量浓度作为计算稳定质量浓度,与水质控制目标中的排放标准值相比较.

3 磷酸盐容量控制

3.1 水质环境影响预测与分析

为控制曹妃甸海域磷酸盐污染总量,选择计算六种典型水文条件(洪季大、中、小潮,枯季大、中、小

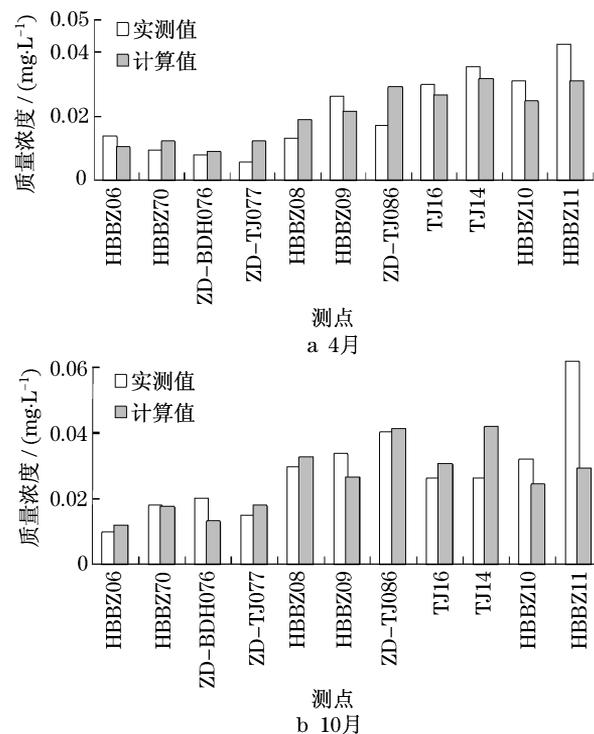


图 4 2007 年磷酸盐质量浓度验证

Fig.4 Verification of phosphate concentration in 2007

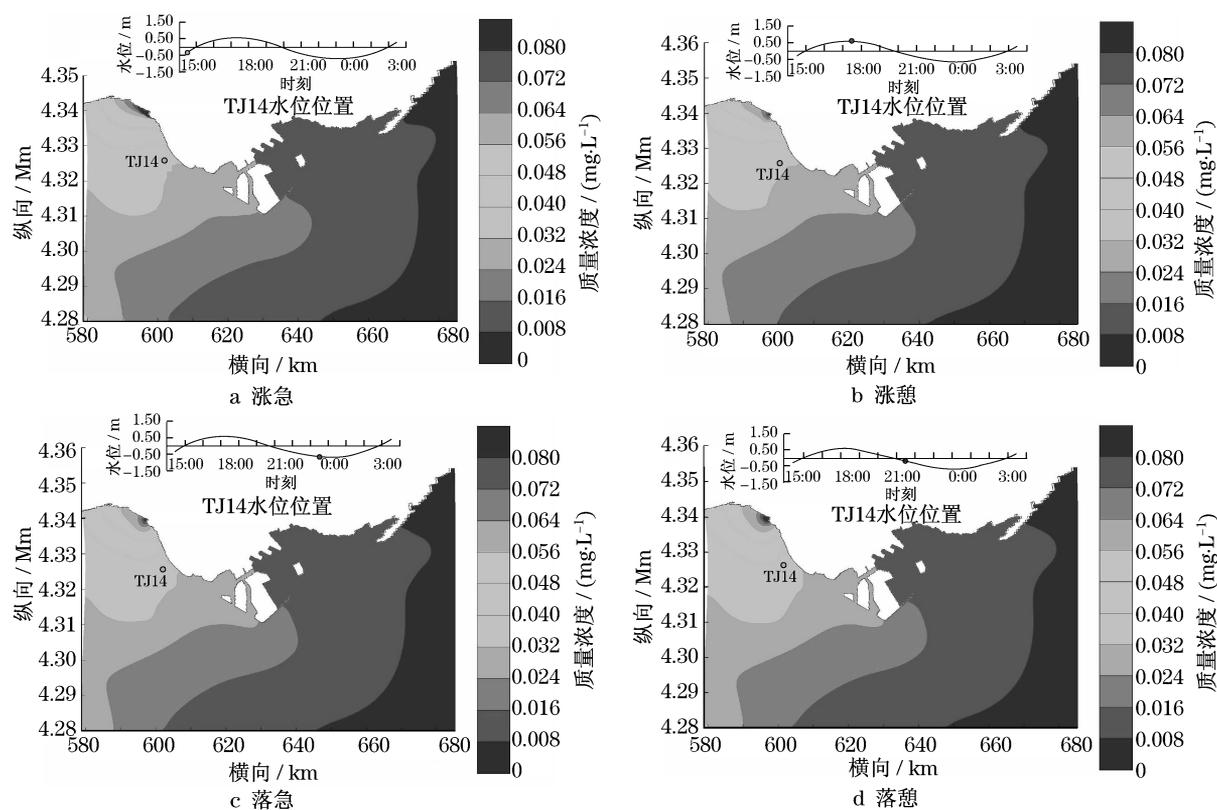
潮)下,该海域 8 条河流(陡河、沙河、双龙河、青龙河、溯河、二泄大庄河、大清河、二滦河)排污口和曹妃甸围填区混合区半径上的磷酸盐质量浓度,并与功能区要求的水质标准比较分析.河流入口的开边界条件为洪、枯季的平均流量和磷酸盐浓度;海域开边界为大、中、小潮潮位过程和污染浓度变化过程^[15].

图 5 为枯季小潮条件下四个典型时刻(涨急、涨憩、落急和落憩)磷酸盐质量浓度等值线.从图中可以看出,磷酸盐质量浓度随涨潮流向西、向岸线推进,随落潮流向东流向外海.其他水文条件下磷酸盐质量浓度变化趋势与此相似.

表 1 为六种典型水文条件下,河流排污口和曹妃甸围填混合区半径内的磷酸盐质量浓度与允许排放量.由表可见,在六种典型水文条件下,磷酸盐质量浓度均在陡河、沙河出口至围填区附近海域最大;洪季条件下,双龙河和围填区混合区边缘计算值超标,其余混合区不超标;枯季条件下,陡河和沙河混合区边缘超标,其余混合区不超标.因此,应加强控制陡河、沙河、双龙河磷酸盐排放量,洪季双龙河需减少 10%左右,枯季陡河和沙河需减少 50%左右.

3.2 允许排放量计算

所谓允许排放量,即在满足一定的水质目标要求的条件下,各个排污口允许排海的磷酸盐的最大

图5 枯季小潮下磷酸盐质量浓度等值线图(单位:mg·L⁻¹)Fig.5 Phosphate concentration contours during a neap tide in the dry season(unit:mg·L⁻¹)

限值.第*i*个点源对于某种污染物的允许排放量 S_{oi} 计算公式为

$$\left. \begin{aligned} S_{oi} &= C_{oi}/P_{oi} \\ P_{oi} &= C_i/S_i \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: C_{oi} 为*i*排污口混合区边缘满足水质控制目标条件下的该污染物允许浓度增量; P_{oi} 表示平均浓度场与源强响应关系的响应系数; C_i 为*i*点源单独作用下形成的平衡浓度; S_i 为*i*点源的排放强度.

表1 六种典型水文条件下混合区外径上磷酸盐质量浓度

Tab.1 Phosphate concentration at the boundary of the mixing zones under six typical hydrological conditions

排污口名称	标准值	洪季大潮		洪季中潮		洪季小潮		枯季大潮		枯季中潮		枯季小潮	
		计算值	增减量										
陡河	0.03	0.023	0.007	0.025	0.005	0.027	0.003	0.054	-0.024	0.066	-0.036	0.071	-0.041
沙河	0.03	0.019	0.011	0.023	0.007	0.025	0.005	0.068	-0.038	0.086	-0.056	0.097	-0.067
双龙河	0.03	0.032	-0.002	0.034	-0.004	0.034	-0.004	0.029	0.001	0.028	0.002	0.029	0.001
青龙河	0.03	0.018	0.012	0.018	0.012	0.017	0.013	0.012	0.018	0.012	0.018	0.011	0.019
溯河	0.03	0.017	0.013	0.017	0.013	0.017	0.013	0.011	0.019	0.011	0.019	0.011	0.019
二泄大庄河	0.03	0.016	0.014	0.017	0.013	0.016	0.014	0.011	0.019	0.011	0.019	0.010	0.020
大清河	0.03	0.011	0.019	0.011	0.019	0.010	0.020	0.009	0.021	0.009	0.021	0.009	0.021
二滦河	0.03	0.009	0.021	0.010	0.020	0.009	0.021	0.005	0.025	0.006	0.024	0.006	0.024
围填区	0.03	0.033	-0.003	0.033	-0.003	0.034	-0.004	0.022	0.008	0.021	0.009	0.021	0.009

允许排放量的计算,除了要使排污口混合区边缘的污染物浓度满足《海水水质标准》^[16]外,还应结合《污水综合排放标准》^[17]中关于排污口达标排放的相关规定.表2为综合洪、枯季特征大、中、小潮六

种典型水文条件,同时满足这两种标准的各排污口点源允许排放量、现状排放量、削减量及削减率计算结果.可以看出,陡河、三友化工、双龙河需要不同程度地削减排放量,主要控制枯季污染物入海量.

表2 各排污口允许磷酸盐排放量及削减率
Tab.2 Accepted discharge amount and cut rate of phosphate at outfalls

排污口名称	允许排放量/ ($t \cdot a^{-1}$)	现状排放量/ ($t \cdot a^{-1}$)	应削减量/ ($t \cdot a^{-1}$)	削减率/ %
陡河	5.08	5.19	0.11	2.16
三友化工	3478.82	3514.18	35.36	1.01
沙河	0.23	0.23	—	—
双龙河	2.48	2.61	0.14	5.26
青龙河	3.24	2.17	—	—
溯河	2.48	1.66	—	—
二泄大庄河	1.64	1.47	—	—
大清河	2.67	2.46	—	—
二滦河	0.23	0.11	—	—

注:沙河口混合区包括三友化工排污口的污水。

4 结论

(1)磷酸盐高浓度区主要集中在陡河、沙河出口至围填区附近海域. 污染物浓度随涨潮向西、向岸线推进,随落潮向东流向外海.

(2)洪、枯季磷酸盐质量浓度分布对比显示:陡河、沙河排污口附近,枯季浓度大于洪季;而双龙河排污口附近,洪季浓度大于枯季.

(3)混合区磷酸盐超标的,在洪季为双龙河、围填区,在枯季为陡河、沙河. 因此,应加强对陡河、沙河、双龙河磷酸盐排放量的控制. 磷酸盐排放量在洪季需削减10%左右,在枯季需削减50%左右.

(4)现场实际监测资料显示,一些排污口在部分月份会排放极高浓度污染物,应加强监督管理.

参考文献:

- [1] 刘海洋,戴志军. 中国近海污染现状分析及对策[J]. 环境保护科学, 2001, 106(27): 6.
LIU Haiyang, DAI Zhijun. The analysis and countermeasures on the present pollution in Chinese offing[J]. Environmental Protection Science, 2001, 106(27): 6.
- [2] 胡小颖,高孟春,孙永福. 浅析海洋污染对公众健康的影响及防治措施[J]. 海洋开发与管理, 2008, 25(7): 68.
HU Xiaoying, GAO Mengchun, SUN Yongfu. Brief analysis on affection to public health and measures of control due to maritime pollution[J]. Ocean Development and Management, 2008, 25(7): 68.
- [3] 曹妃甸工业区管理委员会. 加快曹妃甸开发建设努力成为拉动环渤海地区经济发展新引擎[J]. 港口经济, 2008(3): 42.
The Administration Committee of Caofeidian Industrial District. Expedite the development and construction of Caofeidian area and strive to be the new engine that pull the economic development of Bohai circle areas[J]. Port Economy, 2008(3): 42.
- [4] Wang Li, Frank S C L, Wang Xiaoru, et al. Chemical characteristics and source implications of petroleum hydrocarbon contaminants in the sediments near major drainage outfalls along the coastal of Laizhou Bay, Bohai Sea, China[J]. Environ Monit Assess. 2007, 125: 229.
- [5] 张海平,姜卫星,顾国维. 黄浦江河口建闸对内河水环境的影响[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2007, 35(12): 1661.
ZHANG Haiping, JIANG Weixing, GU Guowei. Influence of tidal gate construction at Huangpu River mouth on inner river quality[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(12): 1661.
- [6] HU Kelin, DING Pingxing, ZHU Shouxian, et al. 2-D current field numerical simulation integrating Yangtze Estuary with Hangzhou Bay[J]. China Ocean Engineering, 2000, 14(1): 89.
- [7] YANG Zhonghua, HUAI Wenxin, ZENG Xiaohui. An application of finite volume WENO scheme to numerical modeling of tidal current [J]. China Ocean Engineering, 2006, 20(4): 545.
- [8] LU Yongjun, JI Rongyao, ZUO Liqin. Morphodynamic responses to the deep water harbor development in the Caofeidian sea area, China's Bohai Bay [J]. Coastal Engineering, 2009, 56: 831.
- [9] KUANG Cuiping, HE Lulu, XING Fei, et al. Numerical study on the evolution process of polluted water cluster in Gonghu, Taihu Lake [C] // The 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Piscataway: IEEE Computer Society, 2009: 1-4.
- [10] 徐祖信,尹海龙. 黄浦江水环境模拟计算边界条件影响分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2006, 34(1): 74.
XU Zuxin, YIN Hailong. Analysis of boundary conditions on hydrodynamic and water quality simulation for the Huangpu River[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2006, 34(1): 74.
- [11] KUANG Cuiping, LEE J H W. Physical hydrography and algal bloom transport in Hong Kong waters [J]. China Ocean Engineering, 2005, 19(4): 539.
- [12] CHEN Xiuhua, ZHU Liangsheng, ZHANG Hongsheng. Numerical simulation of summer circulation in the East China Sea and its application in estimating the sources of red tides in the Yangtze River estuary and adjacent sea areas[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(3): 272.
- [13] WU Yongsheng, WANG Zhaoyin. Numerical simulation of 1998 red tide of the Bohai Sea[J]. International Journal of Sediment Research, 2002, 17(3): 175.
- [14] WL | Delft Hydraulics. User Manual Delft3D-FLOW [M]. [S.l]: WL | Delft Hydraulics. 2006.
- [15] 匡翠萍,刘曙光,娄厦,等. 河北省近岸海域环境容量评价[R],上海:同济大学土木工程学院,2009.
KUANG Cuiping, LIU Shuguang, LOU Xia, et al. Evaluation on environmental capacity in nearshore waters of Hebei Province [R]. Tongji University. College of Civil Engineering, 2009.
- [16] 国家环境保护局. GB 3907—1997 海水水质标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
National Environmental Protection Agency. GB 3907—1997 Sea Water Quality Standard[S]. Beijing: China Environment Science Press, 1998.
- [17] 国家技术监督局. GB 8978—1996 污水综合排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
State Bureau of Technical Supervision. GB 8978—1996 Integrated Wastewater discharge Standard[S]. Beijing: China Environment Science Press, 1998.