

◆海洋动力学◆

钦州湾三墩作业区排污阈值的数值模拟研究^{*}裴木凤^{1,2},高劲松^{2**}

(1.国家海洋局北海海洋环境监测中心站,广西北海 536000;2.南宁师范大学北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室,广西南宁 530001)

摘要:排污容量的研究对海洋生态环境保护有重要意义。随着钦州湾茅尾海污染呈逐渐严重趋势,为改善水质状况,钦州市将排污口外迁至三墩作业区,因此,研究该区域的排污阈值可为决策提供科学依据。本研究通过一阶降解系数的物质对流-扩散模型模拟钦州湾三墩区不同排污口的扩散情景,选出最优排污口并计算排污阈值。研究表明:不同排污口排放的物质扩散方向基本为SW-NE向,同时西南端排污口的污染物扩散范围小于东北端排污口的污染物扩散范围,因此三墩作业区的最优排污口位置位于西南端(21.601 101°N,108.670 364°E);COD_{Cr}、TN和TP分别执行 ≤ 60 mg/L、 ≤ 40 mg/L和 ≤ 0.5 mg/L标准时,相应的排污阈值依次为76 845.25,1 581.7和150.2 t/a。

关键词:钦州湾 三墩作业区 数值模型(EFDC) 排污阈值 污染物

中图分类号:X26 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2021)02-0167-07

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20210309.012

0 引言

钦州湾位于广西壮族自治区南部钦州市以南,是广西北部湾重点开发的海湾之一,随着向海经济的发展,钦州湾大面积海域被围填成陆,如2005-2015年间,钦州湾围垦规模近3 000 hm²^[1],钦州湾岸线发生较大改变。与之对应的是近年来钦州湾近岸海域局部水质下降和海洋生态环境发生剧烈变化^[2-4],尤其是钦州市茅尾海水水质长期达不到功能区目标。导致

钦州湾近岸海域水质下降的原因,主要是入海河流携带大量污染物入海、非法及不合理设置入海排污口或不达标废水排入海,使得污染物的入海量超出河口海湾的环境承载能力。为逐步改善钦州市近岸海域环境质量,钦州市政府部门提出钦州市入海排污口环境综合整治和污水外迁至三墩排放口的方案,并确立钦州湾海域水质“近期有所改善,远期全部达标”的目标。

排污容量是水污染防治和污染减排工作的重要

^{*}国家自然科学基金项目(41966001),广西自然科学基金项目(2018GXNSFDA281031),广西创新驱动专项(桂科AA18118025)和北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室暨广西地表过程与智能模拟重点实验室开放课题(NNU-KLOP-X1902)资助。

【作者简介】

裴木凤(1985-),女,工程师,主要从事数值模拟及海洋环境影响分析研究。

【**通信作者】

高劲松(1984-),男,研究员,主要从事近海环流与物质输运研究,E-mail:keytothesuccess@163.com。

【引用本文】

裴木凤,高劲松.钦州湾三墩作业区排污阈值的数值模拟研究[J].广西科学,2021,28(2):167-173.

PEI M F,GAO J S.Numerical Simulation on Emission Threshold of Sandun Operation Area in Qinzhou Bay of China [J]. Guangxi Sciences,2021,28(2):167-173.

依据,其研究对保护海洋生态环境有重要意义。早期排污量主要基于实测数据进行计算^[5],随着计算机技术的发展,使用数值模型计算区域环境容量和排污量取得了长足发展^[6,7]。目前,关于钦州湾的数值模拟有较多的研究成果^[6,8-11],但关于钦州湾排污量的研究仍然少见于研究文献中,其中夏华永等^[6]采用二维潮流数值模型和水质模型探讨了钦州湾污染物的扩散规律,利用1993年海域现场观测数据计算了钦州湾大规模填海之前的海水交换率、平均半更换期及环境容量;郭森等^[8]采用多源线性迭加的方法计算了钦州湾金鼓江东、西两侧两个排污口的排污量。

在夏华永等^[6]的研究中,排污总量是基于整个海湾整体纳污能力的计算,无法为实际排污口的污染减排提供依据,而郭森等^[8]的研究则主要考虑金鼓江东、西两侧两个排污口的排污情况,对钦州湾的水污染防治参考有限,此外,两者的研究均没有考虑近年来钦州湾大规模填海造成的岸线及地形的变化。三墩作业区位于钦州湾外湾中部,已规划为广西钦州石化产业园和中国(广西)自由贸易试验区的重要组成部分,将与金鼓片区形成国家级石化产业基地,区域的环保设施服务水平亟需提升,而该区域的排污管理也是改善钦州湾水质的重要部分。本研究基于钦州湾的现状海岸线及地形情况(图1),建立钦州湾二维数值模型,结合实测资料,对三墩作业区的排污口进行选划及最大排污量计算,可为管理部门提供决策依据,保护钦州湾的海洋生态环境。

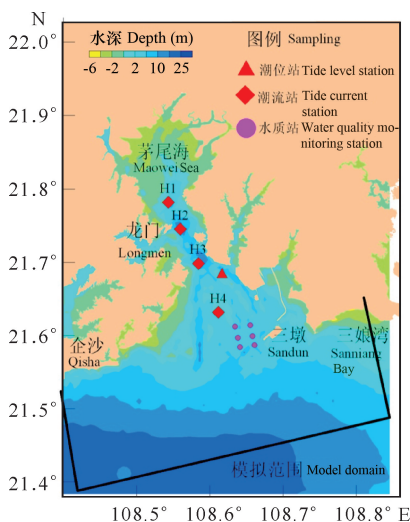


图1 钦州湾水深地形

Fig. 1 Topography of Qinzhou Bay

1 材料与方法

1.1 EFDC数值模型

数值模型采用 Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC)模型。该模型是由美国弗吉尼亚海洋科学研究所开发,并由数家科研单位后期维护下发展起来的,可用于近岸海洋及陆地地表水水动力-水质模拟的水环境数学模型^[12,13],该模型也是美国最大日负荷总量(TMDL)等环境保护计划主要使用的模型。

1.1.1 水动力数学模块

水动力数学模型基于静水压假定和 Boussinesq 近似,对不可压缩的自由表面水体进行描述,其控制方程如下:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(vH)}{\partial t} = Q_H, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(u^2H)}{\partial x} + \frac{\partial(uvH)}{\partial y} - fHv = \\ & -gH \frac{\partial\eta}{\partial x} - C_B |u|u + \frac{\partial}{\partial x}(HA_H \frac{\partial u}{\partial x}) + \\ & \frac{\partial}{\partial y}(HA_H \frac{\partial u}{\partial y}) + \tau_x, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(vH)}{\partial t} + \frac{\partial(uvH)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2H)}{\partial y} + fHu = \\ & -gH \frac{\partial\eta}{\partial y} - C_B |v|v + \frac{\partial}{\partial x}(HA_H \frac{\partial v}{\partial x}) + \\ & \frac{\partial}{\partial y}(HA_H \frac{\partial v}{\partial y}) + \tau_y, \end{aligned} \quad (3)$$

式中, u, v 是曲线正交坐标 x, y 方向的流速(m/s); Q_H 为海流外部源汇项(m^3/s),无出入流时为0; $|u| = \sqrt{u^2 + v^2}$,为水流流速(m/s); $H = h + \eta$ 为海面至海底总水深(m), η 是水位(m), h 为海底高程(m); C_B 为底部摩擦系数; A_H 为水平粘滞系数(m^2/s),采用 Mellor 和 Yamada 2.5 阶湍流闭合模式计算得到; τ_x, τ_y 分别为海面风应力 τ_a 在 x, y 轴方向的分量(m/s), $\tau_a = C_D \rho_A W^2$,其中 W 为海面 10 m 处的风速(m/s), ρ_A 为海表空气密度(kg/m^3), C_D 为常数。具体的离散求解方法见文献[12]。

1.1.2 水质模块

水质变量的质量控制方程由物理运输、平流扩散和动力学过程组成,公式如下:

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(uHC)}{\partial x} + \frac{\partial(vHC)}{\partial y} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(HK_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(HK_y \frac{\partial C}{\partial y}) + KC + R, \quad (4)$$

其中 C 为物质浓度, u 、 v 为 x 、 y 方向的速度, K_x 、 K_y 分别为 x 、 y 方向上的扩散系数, K 为一阶降解速率, R 为源汇项。

1.2 模型配置与验证

1.2.1 模型配置

模型计算区域北至茅尾海顶部 21.95°N , 南至钦州湾湾口 21.37°N , 西至 108.389°E , 东至 108.856°E (图 1), 水平网格为 520 行 \times 411 列, 有效网格数共 104 875 个, 网格依据地形及工程区域而大小不一, 三墩作业区附近海域的网格分辨率约为 $60\text{ m} \times 100\text{ m}$, 动边界的处理采用干湿节点法。

海底地形数据由海图水深插值处理得到; 潮汐开边界采用调和常数 (M_2 、 S_2 、 N_2 、 K_2 、 K_1 、 O_1 、 P_1 、 Q_1 、 S_n) 确定; 模型的初始条件, 包括流速初始场和水位场 (开边界除外) 均为 0, 预热运行 30 d 后达到稳定状态的结果作为正式计算的初始条件; 时间步长为 5 s。

本研究对排放口的主要污染物进行排污阈值计算。根据《广西壮族自治区海洋环境保护规划 (2016-2025)》^[14], 污染总量控制指标为化学需氧量 (COD_{Cr})、氨氮、总氮 (TN) 和总磷 (TP), 而海水水质指标则为化学需氧量 (COD_{Mn})、无机氮 (DIN) 和活性磷酸盐 (PO_4^{3-}), 因此需在污染控制总量指标和海水水质指标之间进行转换, 参考相关的研究报告^[15] 以及出于保守考虑, 本研究设置 $\text{COD}_{Cr} \cong 2.5\text{COD}_{Mn}$ 、 $\text{DIN} \cong \text{TN}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} \cong \text{TP}$ 。考虑综合降解系数的水质模型对水质过程进行了高度概化, 其计算结果也能较好地再现现实中的水质变化^[15,16], 污染物降解系数

参考相关的研究报告^[16], 因此 COD_{Mn}、DIN 和 PO_4^{3-} 的降解系数取值依次为 0.15、0.05 和 0.05 d^{-1} 。

1.2.2 模式验证

国家海洋局北海海洋环境监测中心站于 2012 年 3 月 3 日、4 日、6 日、7 日于钦州湾布设了 4 个站位进行海流观测 (观测仪器: 亚力克 AEM-USB)。本研究使用该实测数据对钦州湾的潮流进行验证, 此外还使用国家海洋局北海海洋环境监测中心站在钦州站 2012 年 3 月的实测潮汐资料进行潮位验证。各站位分布见图 1。

对比模型计算结果与实测数据, 模拟潮位与实测潮位基本吻合 (图 2), 小高潮时的潮位误差略大, 验证时段潮位的平均误差约 0.2 m, 相关系数为 0.97; 流速、流向验证见图 3, 模拟的流速、流向与实测值的变化趋势大体一致, 基本反映了区域涨落潮的往复流特性。总体上, 模拟结果可代表模拟区域的流场状况, 可以为区域污染物的扩散模拟提供实际的潮流场。

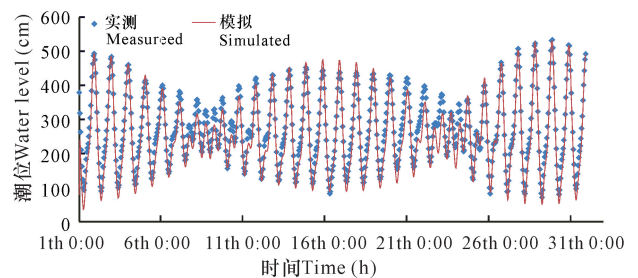
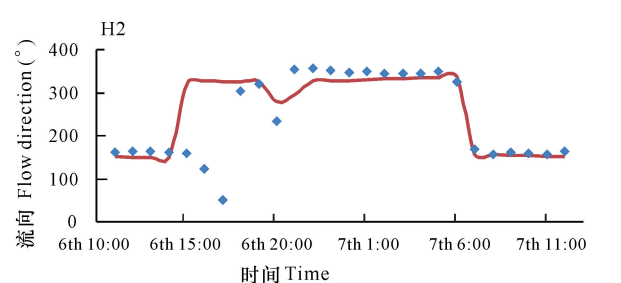
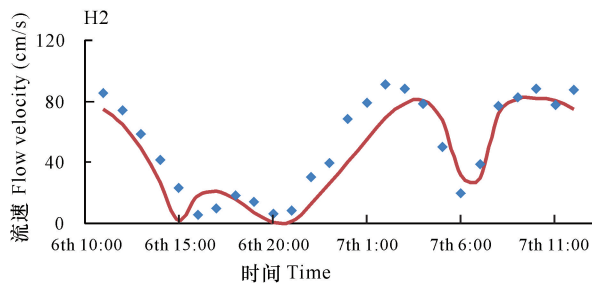
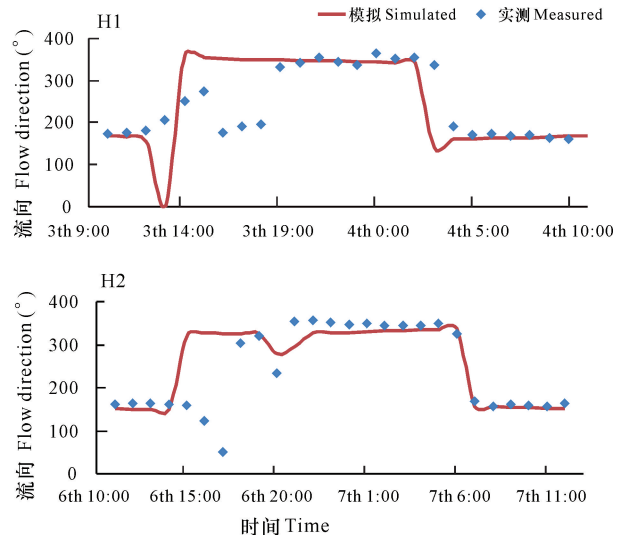
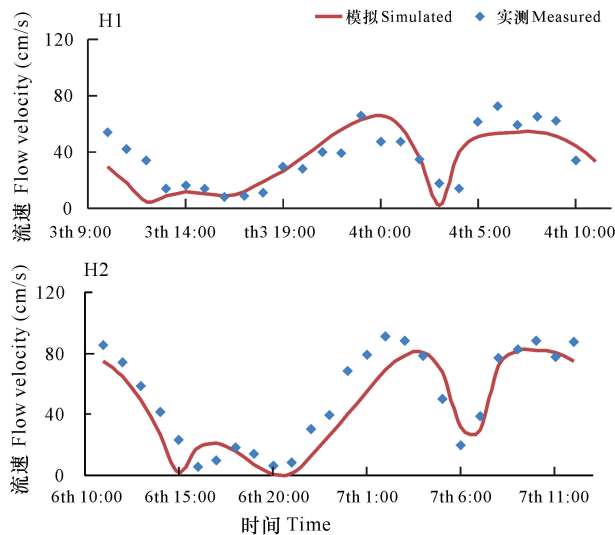


图 2 钦州站潮位验证结果 (2012 年 3 月 1 日 0:00 - 31 日 23:00)

Fig. 2 Results of tidal level verification at Qinzhou station (0:00 1th - 23:00 31th March, 2012)



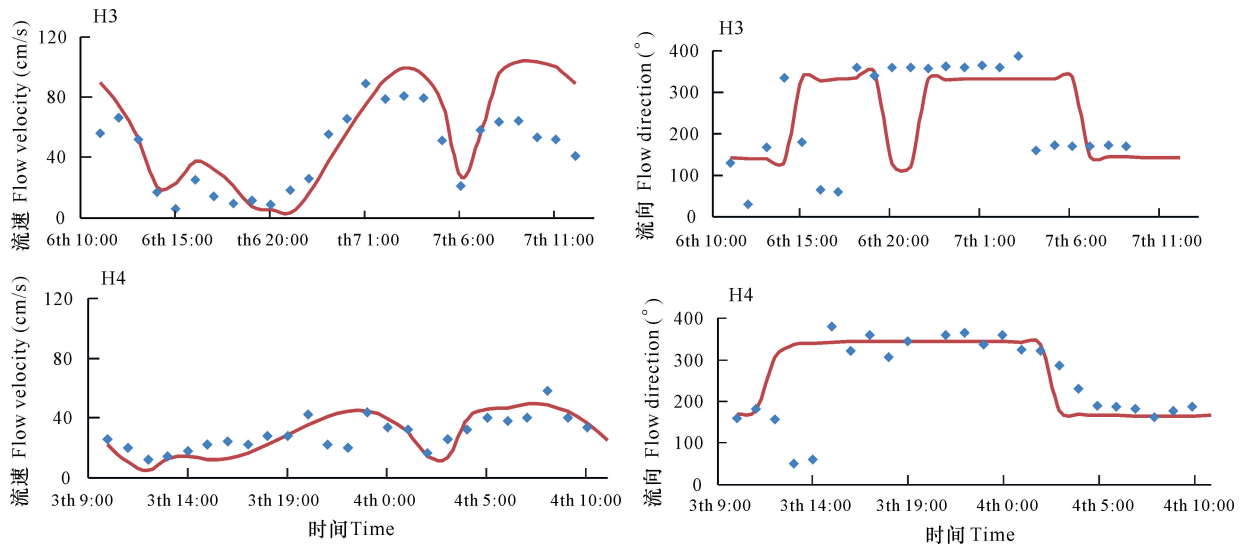


图3 站点 H1 - H4 流速、流向验证结果(2012年3月)

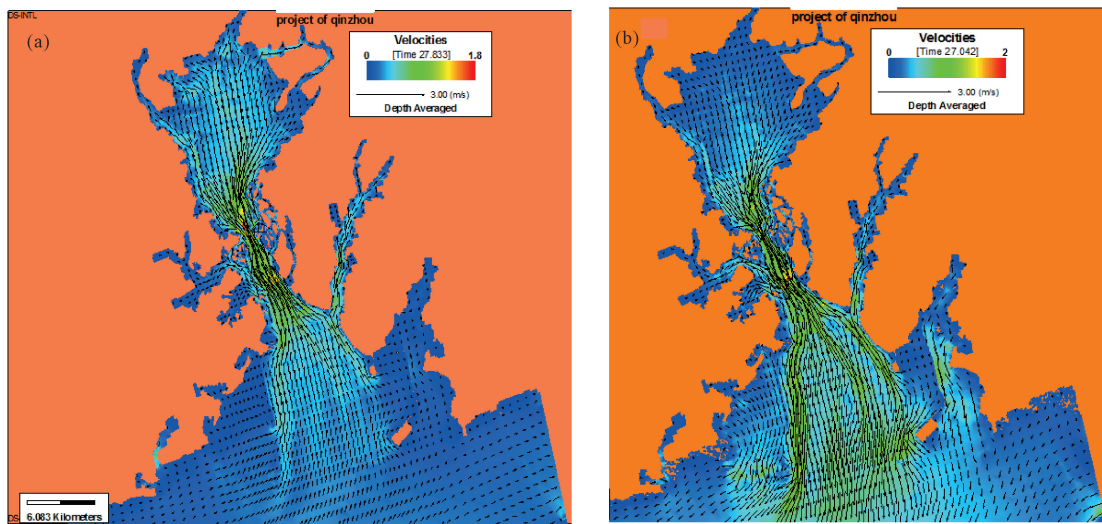
Fig. 3 Verification results of flow velocity and flow direction at H1 - H4 stations (March, 2012)

2 结果与分析

2.1 钦州湾流场分布

从图4可以发现钦州湾落潮流大于涨潮流,航道和深槽处流速最大,流向与航道、深槽走向基本一致,浅滩和岸边流速相对较小,流向多变,最大流速位于龙门湾颈处,涨潮流最大约1.8 m/s,落潮流最大约2.0 m/s。外海的西南向流在三墩作业区前沿转为

北偏西进入钦州湾,通过3条主要深槽在青菜头汇合后以西北向直达龙门,在龙门口以西北向茅尾海发散,落潮流流向则基本与之相反,钦州湾的潮流呈往复流性质。涨、落潮时,保税港区、三墩作业区和三墩公路所围区域为相对弱流区,三墩公路东侧进、出鹿耳环江的潮流基本与公路平行,三墩作业区西北侧涨潮流为东北向、落潮流为西南向。本研究的钦州湾潮流场特征与前人的模拟结果相似^[6,10,11]。



(a) 涨急流场, (b) 落急流场

(a) At the time of maximum flood, (b) At the time of ebb

图4 钦州湾流场分布

Fig. 4 Distribution of flow field in Qinzhou Bay

2.2 排污口的设置

根据《广西壮族自治区近岸海域环境功能区划调整方案》(桂政办发〔2011〕74号)^[17],排污口拟选范围

为三墩污水深海排放区(GX071D IV),具体以108.679 167°E、21.603 056°N为中心,半径1 km的海域,海域主导功能为港口、工业、生活排污用海,水

质目标为《海水水质标准》^[18]第四类标准,此区域也是《钦州市海洋功能区划(2008-2020)》^[19]划定的三墩污水深海排放区。

根据规划排污区、三墩规划填海区等情况,初步选择4个排污口位置,分别为规划排污区西端(A0)、中部北端(B0)、东端(C0)和中部南端(D0),此后根据模拟结果再进行局部加密(A1、B1和C1),规划排污区和排污口位置设置情况见表1和图5。

表1 排污口位置

Table 1 Location of sewage outlets

排污口 Outlets	纬度 Latitude (°N)	经度 Longitude (°E)
A0	21.601 101	108.670 364
B0	21.609 299	108.672 050
C0	21.613 045	108.678 513
D0	21.606 974	108.674 164
A1	21.603 065	108.670 525
B1	21.605 789	108.669 914
C1	21.604 443	108.672 012

在拟选排污口设置相同的污水排放量及出水标准(污水排放量 $2\ 800\ \text{m}^3/\text{h}$,无机氮浓度 $40\ \text{mg/L}$),模拟计算一个大小潮周期(15 d),输出每个小时的计

表2 不同排污口的无机氮扩散情况统计

Table 2 Statistics of inorganic nitrogen diffusion in different outlets

排污口 Outlets	最大浓度增量 Maximum concentration increment (mg/L)	不同浓度增量的包围面积 The envelope area of different concentration increments (km ²)			
		>0.5 mg/L	>0.4 mg/L	>0.3 mg/L	>0.2 mg/L
A0	1.698 6	0.043 3	0.062 0	0.086 9	0.500 3
B0	2.470 1	0.051 1	0.128 8	0.299 3	1.665 3
C0	2.599 9	0.146 8	0.248 5	0.570 0	2.518 1
D0	2.352 4	0.053 6	0.091 4	0.297 9	1.2476
A1	1.996 3	0.043 8	0.075 0	0.116 3	0.067 8
B1	2.289 7	0.056 7	0.081 6	0.251 2	1.110 7
C1	2.020 8	0.053 8	0.053 8	0.161 5	0.896 0

2.3 三墩作业区的排污阈值

三墩作业区拟纳入广西钦州石化产业园,该产业园重点布置石化产业及石化物流仓储,因此污水排放标准以《污水综合排放标准》(GB 8978-1996)^[20]一级和《石油化学工业污染物排放标准》(GB 31571-2015)^[21]中的表2“水污染物特别排放限值”的低值为执行标准,即 COD_{Cr} 为 $60\ \text{mg/L}$,折算成 COD_{Mn} 为

算结果进行统计,结果见表2。根据模拟结果,不同排污口的物质扩散方向基本为SW-NE向,其中西端即A0处排污的最大浓度值和物质扩散范围最小,东端C0处排污的最大浓度值和扩散范围最大,其余位置的相应值在两者之间,总体呈现西南区排污口的污染物扩散范围小于东北区排污口的污染物扩散范围,而不同排污口物质浓度增量较大(大于 $0.5\ \text{mg/L}$)的范围均近乎圆形。因此三墩排污口的最优位置可设置在A0处。

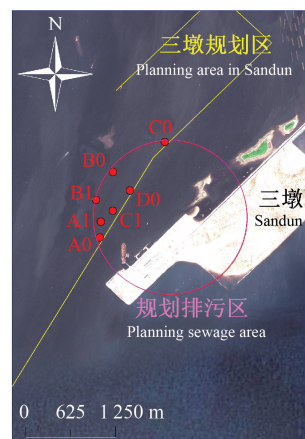


图5 三墩区拟选排污口位置示意

Fig. 5 Position indication of the proposed sewage outlet in Sandun area

$24\ \text{mg/L}$,总氮为 $40\ \text{mg/L}$,磷酸盐为 $0.5\ \text{mg/L}$ 。在拟定的排污点A0周围半径约 $1.0\ \text{km}$ 处设置水质控制点,水质控制点处的模拟计算值叠加现状值基本满足四类海水水质标准时,即为相应物质的最大允许排污量。

现状值引用钦州市海洋环境监测预报中心2019年11月23日在排污口附近的调查结果,站位布置见

图1。经过多次试算后得到各指标的最大允许排放量(表3),由于 COD_{Mn} 现状含量低、水质标准值较高并且降解系数较大,因此 COD_{Cr} 排污阈值较大,可达到76 845.25 t/a,而 PO_4^{3-} 由于水质标准值较低且降解系数小,TP的排污阈值最小,仅为150.2 t/a, TN居中,为1 581.7 t/a。

表3 三墩排污口的排污阈值

Table 3 Discharge threshold of Sandun sewage outlet

污染物 Pollutants	排污阈值 Emission threshold (t/a)	出水标准 Effluent standard (mg/L)
COD_{Cr}	76 845.25	≤ 60
TN	1 581.7	≤ 40
TP	150.2	≤ 0.5

3 结论

本研究构建了钦州湾水动力模型,模拟值与实测值吻合较好。同时构建一阶降解系数的物质对流-扩散模型,研究三墩作业区不同排污口的污染物扩散情况,选取钦州湾三墩作业区的最优排放口,并依据环境水质标准计算该海区化学需氧量(COD_{Cr})、总氮(TN)和总磷(TP)的排污阈值。研究结论如下:

钦州湾落潮流大于涨潮流,涨潮流最大约1.8 m/s,落潮流最大约2 m/s,外海的西南向潮流在三墩作业区前沿转为北偏西入湾,之后在青菜头以西北向通过龙门向茅尾海发散,落潮时流向则相反,三墩作业区西北侧涨潮流为东北向、落潮流为西南向。钦州湾流场呈往复流特征。

三墩排污区内不同位置排放的物质扩散方向为SW-NE向,总体呈现西南端排放的污染物扩散范围小于东北端排放的污染物扩散范围,最优排污口可设置在排污区的西南端(21.601 101° N, 108.670 364° E)。

在 COD_{Cr} 、TN和TP的出水标准分别执行 ≤ 60 mg/L、 ≤ 40 mg/L和 ≤ 0.5 mg/L情况下,满足四类海水水质标准时拟选三墩深海排放口的 COD_{Cr} 、TN和TP的排污阈值依次为76 845.25, 1 581.7和150.2 t/a。

参考文献

[1] 杨莉玲,王琳,杨芳,等.口外岸线变化对茅尾海潮流动力及水体交换的影响[J].海洋环境科学,2019,38(4):582-588.

[2] 徐敏,韩保新,龙颖贤.钦州湾海域氮磷营养盐近30年变化规律及其来源分析[J].环境工程技术学报,2012,2(3):253-258.

[3] 蓝文陆.近20年广西钦州湾有机污染状况变化特征及生态影响[J].生态学报,2011,31(20):5970-5976.

[4] 赖俊翔,许铭本,张荣灿,等.广西钦州湾海域生态健康评价与分析[J].海洋技术学报,2016,35(3):102-108.

[5] 饶开燕,古秋森,黎夏,等.伶仃洋N、P静态环境容量的研究[J].海洋科学,1991(3):49-52.

[6] 夏华永,殷忠斌,葛文标.钦州湾物理自净能力研究[J].广西科学,1996,3(2):65-70.

[7] 李适宇,李耀初,陈炳禄,等.分区达标控制法求解海域环境容量[J].环境科学,1999,20(4):96-99.

[8] 郭森,韩保新,杨静,等.纳污海域水环境容量计算与总量分配方法研究——以钦州湾为例[J].环境科学与技术,2006,29(S1):19-22.

[9] 宋德海,鲍献文,朱学明.基于FVCOM的钦州湾三维潮流数值模拟[J].热带海洋学报,2009,28(2):7-14.

[10] 高劲松,陈波,陆海生,等.钦州湾潮流场及污染物输运特征的数值研究[J].广西科学,2014,21(4):345-350.

[11] 曹雪峰,陈波,邢传玺,等.夏季波浪对钦州湾水交换能力的影响研究[J].广西科学,2019,26(6):647-654.

[12] HAMRICK J M. A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects [R]. Virginia Institute of Marine Science; Special Report in Applied Marine Science and Ocean Engineering, 1992.

[13] 张以飞,王玉琳,汪靓. EFDC模型概述与应用分析[J].环境影响评价,2015,37(3):70-72,92.

[14] 广西壮族自治区海洋和渔业厅,广西壮族自治区环境保护厅.《广西壮族自治区海洋环境保护规划(2016-2025)》[EB/OL]. (2017-08-30). http://hyj.gxzf.gov.cn/zwgk_66846/xxgk/fdzdgnr/fzgh/ghjh/t3444616.shtml.

[15] 曾凡棠,萧洁儿,李葵,等.珠江口三角洲与河口水质模型连接计算研究报告[R].广州:环境保护部华南环境科学研究所,2009:19-78.

[16] 钦州市钦州港国星入海排污口设置论证报告[R].广州:环境保护部华南环境科学研究所,2019:79.

[17] 广西壮族自治区人民政府办公厅.《广西壮族自治区近岸海域环境功能区划调整方案》桂政办发[2011]74号[EB/OL]. (2011-05-06). http://www.gxzf.gov.cn/zwgk/zfwj/zzqrmzfbgtwj_25543/2011ngzwbw/t952094.shtml.

[18] 国家海洋局第三研究所.海水水质标准:GB 3097-1997[S].北京:环境科学出版社,2004.

[19] 钦州市人民政府.钦州市人民政府关于公布钦州市海

- 洋功能区划(2008-2020)的通知[EB/OL].(2009-07-21). http://www.qinzhou.gov.cn/zcwj_246/bjzfwj/qzf/200907/t20090721_46555.html.
- [20] 北京市环境保护科学研究院. 污水综合排放标准:GB 8978-1996 [S]. 北京:中国标准出版社,1998.
- [21] 抚顺石油化工研究院,中国环境科学研究院. 石油化学工业污染物排放标准:GB 31571-2015 [S]. 北京:中国环境科学出版社,2015.

Numerical Simulation on Emission Threshold of Sandun Operation Area in Qinzhou Bay of China

PEI Mufeng^{1,2}, GAO Jingsong²

(1. Beihai Marine Environmental Monitoring Center, State Oceanic of China, Beihai, Guangxi, 536000, China; 2. Key Laboratory of Beibu Gulf Environment Change and Resources Utilization of Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530001, China)

Abstract: The study of pollution discharge capacity is of great significance to the protection of marine ecological environment. As the pollution of Maowei Sea in Qinzhou Bay is becoming more and more serious, in order to improve the water quality, the sewage outlet has been moved outside to Sandun operation area by Qinzhou government. Therefore, the study of the sewage threshold in this area can provide scientific basis for decision making. In this study, a first-order degradation coefficient material convection diffusion model is used to simulate the diffusion scenarios of different sewage outlets in Sandun District of Qinzhou Bay, and the optimal sewage outlet is selected and the sewage threshold is calculated. The research shows that the material diffusion direction of different sewage outlets is basically SW-NE, and the pollutant diffusion range of the southwest sewage outlet is smaller than that of the northeast sewage outlet. Therefore, the optimal sewage outlet position of Sandun operation area is located in the southwest end (21.601 101°N, 108.670 364°E). When the standards of COD_{Cr}, TN and TP are ≤ 60 mg/L, ≤ 40 mg/L and ≤ 0.5 mg/L, the corresponding pollution discharge thresholds are 76 845.25, 1 581.7 and 150.2 t/a, respectively.

Key words: Qinzhou Bay, Sandun operation area, numerical simulation (EFDC), pollution discharge threshold, pollutant

责任编辑:陆雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxk@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>