

## 钦州湾潮流场及污染物输运特征的数值研究\*

# Numerical Study on the Characteristics of Tidal Current Field and Pollutant Transport in Qinzhou Bay

高劲松,陈波,陆海生,庄军莲,董德信

GAO Jing-song, CHEN Bo, LU Hai-sheng, ZHUANG Jun-lian, DONG De-xing

(广西科学院 广西近海海洋环境科学重点实验室,广西南宁 530007)

(Guangxi Key Laboratory of Marine Environment Science, Guangxi Academy of sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

**摘要:**【目的】钦州港作为广西重要的港口,港口快速发展的同时带来污染物排放量的不断增加。为保证钦州湾海洋生态的可持续发展,必须深入分析钦州湾的水交换与污染物输运特征。【方法】基于2010年秋季钦州湾的调查结果,应用ECOMSED模型构建了钦州湾三维潮流与污染物(以COD为例)输运模型。潮流模型的调和常数来自俄勒冈大学的中国海潮汐模型,污染物输运模型的开边界与初始值来自于调查结果。【结果】模型结果与海流调查结果吻合较好。钦州湾平均涨潮时与平均落潮时分别为11.4h与8.7h,对应落潮流大于涨潮流;平均潮差为2.8m,最大潮差4.25m,平均纳潮量约为 $10.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;钦州湾的水体交换半周期为7d,而水体交换80%的时间约为28d;钦州湾COD浓度越往北越大,越靠近湾外越小,COD逐时浓度最大值约为 $1.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ;钦州湾保税港区围填海后金鼓江北端和西侧的COD浓度分别上升约20%和10%。【结论】广西钦州湾保税港区的围填海工程对金鼓江的污染物浓度分布影响较大。

**关键词:**钦州湾 COD 围填海工程 数值模型

**中图分类号:**P731.23 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2014)04-0345-06

**Abstract:**【Objective】As an important port in Guangxi, the pollutants in the Qinzhou Bay are increased gradually as the rapid development of the port. In order to keep the sustainable development of the marine ecology in Qinzhou Bay, it is necessary to research on the characteristics of water exchange and pollutant transport. 【Methods】A three-dimensional numerical model for tidal current and pollutant transport (in the case of COD) is constructed in this study based on the in situ observation in the fall of 2010. The tidal harmonic constants in the model are distracted from the China Sea tidal model of Oregon State University, and the initial and open boundary value in the pollutant transport model is derived from the observed results in the fall of 2010. 【Results】The model results are consistent with the observations. And it can be concluded that the average periods of flood and ebb tides were 11.4h and 8h, respectively, corresponding to that the tidal speed averaged in the ebb tide was larger than that in the flood tide. Additionally, the average tidal range in Qinzhou Bay was about 2.8m whereas the maximum tidal range could be up to 4.25m. And the average tidal volume was about  $10.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ . The half cycle of the water exchange between Qinzhou Bay and outside ocean was about 7d, whereas it needed about 28d to refresh 80% water in the

ing to that the tidal speed averaged in the ebb tide was larger than that in the flood tide. Additionally, the average tidal range in Qinzhou Bay was about 2.8m whereas the maximum tidal range could be up to 4.25m. And the average tidal volume was about  $10.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ . The half cycle of the water exchange between Qinzhou Bay and outside ocean was about 7d, whereas it needed about 28d to refresh 80% water in the

收稿日期:2014-06-17

修回日期:2014-07-20

作者简介:高劲松(1984-),男,博士,助理研究员,主要从事近海环流与物质输运研究。

\*广西围填海工程建设对水动力的影响与评估体系研究项目(桂科攻1355007-13),广西自然科学基金重大项目(2012GXNSFEA053001),广西科学院基本科研业务费项目(13YJ22HY06)资助。

bay. On the other hand, the COD concentration became larger as it draw closer to the northern shore, and the maximum hourly COD concentration was about  $1.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . After the reclamation engineering of the bonded port in Qinzhou Bay, the COD concentration in the northern and western parts of Jingujiang Bay increased about 20% and 10%, respectively. **【Conclusion】** The reclamation engineering of the bonded port in Qinzhou Bay of Guangxi has large effect on the distribution of pollutant concentration in Jingujiang Bay.

**Key words:** Qinzhou Bay, COD, reclamation engineering, numerical model (ECOMSED)

**【研究意义】**钦州湾位于广西壮族自治区南部钦州市以南,由内湾(茅尾海)和外湾(狭义的钦州湾)组成,湾内岛屿众多,岸线曲折,具备建设大型港口的自然资源条件(如图1)。根据钦州港总体规划及临港工业区发展规划,钦州港的港口定位是地区性重要港口,远期将发展为服务工业为主的多功能现代化国际贸易深水港,到2020年,钦州港港口功能区需填海造地  $58.3 \text{ km}^2$ 。因此,深入分析钦州湾的潮流场与污染物分布特征对减少钦州湾的环境灾害有重要意义。

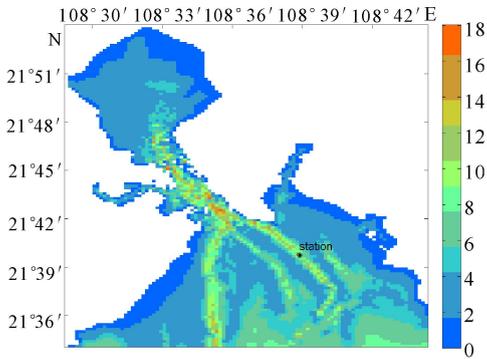


图1 钦州湾地形特征分布

Fig. 1 Topography of Qinzhou Bay

\* :海流验证点。\* :station.

**【前人研究进展】**由于钦州湾的观测数据有限,应用数值模型研究钦州湾的水动力空间分布和时间变化特征是比较有效的手段。李树华等<sup>[1,2]</sup>和陈波等<sup>[3,4]</sup>应用观测数据和二维数值模型初步分析了钦州湾的潮流和潮汐特征。随后,鲍献文等<sup>[5]</sup>和宋德海等<sup>[6]</sup>分别应用 ECOM 和 FVCOM 模型构建了钦州湾的三维潮流模型,对钦州湾潮流特征有了更深入的研究。此外,部分学者针对钦州湾的围填海工程进行了模拟研究。游慕贤等<sup>[7]</sup>应用二维数值模型分析了钦州湾保税港区填海对周围海域潮流场的影响,认为该填海对周围海域的整体影响较小。孙永根等<sup>[8]</sup>通过数值模型研究了钦州湾保税港区填海对周围海域潮流场和冲淤环境的影响情况。**【本研究切入点】**虽然钦州湾的水动力数值模型较多,但钦州湾的污染物数值模型还停留在二维模型上<sup>[1]</sup>,缺乏三维污染物输运模型。另外,根据刘洋等<sup>[9]</sup>的分析结果,金鼓江两侧的填海对金鼓江的水交换能力有一定影响,因此有

必要分析保税港区围填海工程后金鼓江的污染物浓度分布变化。**【拟解决的关键问题】**基于钦州湾2010年秋季海流和COD调查结果,应用 ECOMSED 模型研究钦州湾的潮流场、水交换及污染物输运特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 模型

采用的 ECOMSED 模型,共包含6个模块:水动力模块、黏性和非黏性泥沙输运模块、沉积物示踪模块、可溶性粒子输运模块、热通量模块和风浪模块,该模型在模拟浅海污染物和泥沙输运方面有独特的优势。该模型采用了基于静力学假设和 Boussinesq 近似下的海洋封闭方程组;在水平方向上采用曲线正交网格,即 Arakawa C 网格;在垂直方向上采用 sigma 坐标,在拟合底地形方面比  $z$  坐标更准确,同时垂向上嵌套了2.5阶湍流模型。模型的计算通过内外模的分离,提高了计算速度,在计算时其水平项和时间变化上采用显式差分,垂向上采用隐式差分。

模型计算区域如图1所示,位于  $108.48^\circ \sim 108.84^\circ \text{E}$ ,  $21.5675^\circ \sim 21.9^\circ \text{N}$ 。水平方向网格数为  $134 \times 105$ ,水平分辨率为0.15分,约为258m。由于钦州湾的水深较浅,因此垂向上仅分成7个 sigma 层。开边界采用辐射边界条件,以潮汐调和常数驱动。本文采用  $K_1, O_1, P_1, M_2, S_2$  和  $N_2$  等6个分潮,调和常数来自俄勒冈大学的中国海潮汐模型 (<http://volkov.oce.orst.edu/tides/YS.html>),该模型在中国海的水平分辨率为  $1/30^\circ$ ,其中  $K_1$  和  $M_2$  的均方根误差(RMS)分别为1.63cm和4.16cm<sup>[10]</sup>。水深场采用海图水深,由于海图水深基准面为最低低潮面,因此需要将数据转化成平均海平面下的水深。

### 1.2 水动力模型设置

由于钦州湾的浅滩较多,所以在 ECOMSED 模型中加入干/湿网格判据,其中水动力模型的具体设置如下:

设置最小水深  $\epsilon = 0.1 \text{ m}$ ,当  $(D_{i-1,j} + D_{i,j}) * 0.5 \leq \epsilon$  时水点干出,若  $(D_{i-1,j} + D_{i,j}) * 0.5 > \epsilon$  时参与计算,其中  $D = H + \eta$ ,  $H$  为相对于平均海平面的水

深,  $\eta$  代表水位。

若  $(D_{i-1,j} + D_{i,j}) * 0.5 > \epsilon$ , 当  $D_{i-1,j} > 0$  且  $D_{i,j} > 0$  时,  $u_{i,j}$  用动量方程计算, 其它情况设为 0; 当  $D_{i,j-1} > 0$  且  $D_{i,j} > 0$  时,  $v_{i,j}$  用动量方程计算, 其它情况设为 0。

### 1.3 污染物输运模型设置

污染物输运方程如式(1)所示:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial Cu}{\partial x} + \frac{\partial Cv}{\partial y} + \frac{\partial Cw}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_H \frac{\partial C}{\partial z}) + F_c + kC, \quad (1)$$

其中  $F_c$  为水平扩散项。  $k$  为衰减系数, 对应非保守性污染物的生物化学迁移过程, 若为保守性污染物,  $k$  为 0。 本文只考虑保守性污染物的时空变化规律, 故  $k$  设为 0。 污染物以 COD 为例, 同时根据 4 个季节的调查结果, 2010 年秋季的钦州湾 COD 浓度最高, 因此本文模拟 2010 年秋季钦州的 COD 变化特征。

与水动力模型的干/湿网格相对应, COD 输运模型的干/湿网格<sup>[1]</sup>设置如下:

若某格点在  $(n-1)\Delta t$  时刻为湿点, 而在  $n\Delta t$  时刻为干点, 则设该格点在  $n\Delta t$  时刻的浓度值等于  $(n-1)\Delta t$  的浓度值, 同时该格点不参与计算。

模型中考虑了钦江和茅岭江的河流径流量和 COD 排放, 根据调查资料显示, 两条河流在秋季(本文以 10 月份代表秋季)的气候态径流量分别为  $35.84\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  和  $83.26\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , 而钦江和茅岭江的 COD 秋季气候态排放量分别为  $6.9\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $1.5\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。 2010 年秋季的钦州湾 COD 调查结果(图 2)表明: 钦州湾的 COD 浓度最大值为  $1.92\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 最小值为  $0.59\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。 而且 COD 浓度的变化基本与站点的纬度值成正比, 二者相关系数达到 0.78, 纬度越高 COD 浓度越大, 反之, COD 浓度越小, 该分布特征与上游河流的 COD 排放及南部干净海水的交换紧密相关。 另外, 秋季 15 个站点的 COD 平均浓度约为  $1.07\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 因此, 本文以此值作为 COD 输运模型的初始值。 而钦州湾南部(6 个站点)的 COD 浓度平均值约为  $0.6\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 故 COD 输运模型的开边界值设为  $0.6\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

### 1.4 模型验证

选取钦州湾东南部离岸较远的海流观测点来验证模型的准确性, 站点位置如图 1 中的黑色星号所示, 经纬度为  $108^{\circ}38'53''\text{E}$ ,  $21^{\circ}39'45''\text{N}$ , 海流观测时间为 2009 年 11 月 10 日的 10:00 至 11 月 11 日的 10:00。

### 1.5 纳潮量

根据钦州湾南北纵向特点, 以一个涨潮或落潮周期内通过横向断面(图 4a 中的红线)的水量作为钦州湾的纳潮量, 计算公式如式(2)所示。

期通过横向断面(图 4a 中的红线)的水量作为钦州湾的纳潮量, 计算公式如式(2)所示。

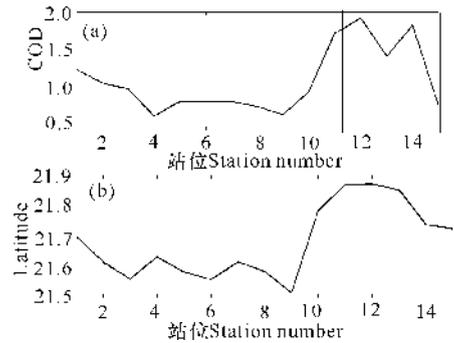


图 2 钦州湾 2010 年秋季 COD 浓度调查结果(a)及对应的站点纬度分布(b)

Fig. 2 The observation results of COD concentration in the fall of 2010 (a) and the corresponding stations' latitudes in Qinzhou Bay

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} (Q_u + Q_v) dt \quad (2)$$

其中  $Q$  代表一个涨潮或落潮周期内的纳潮量,  $Q_u$  代表  $x$  方向的水量通量,  $Q_v$  代表  $y$  方向的水量通量, 潮流流速采用垂向平均结果。

### 1.6 水交换能力

利用溶解态保守物质的浓度为示踪剂, 构建钦州湾水交换数值模式。 湾内的初始污染物浓度设为  $1\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 湾外的污染物浓度设为 0。 模型稳定之后, 运行污染物输运模型共 30d, 每小时输出一次全场的污染物浓度值, 再积分所关心区域的污染物浓度剩余总量, 并计算污染物浓度剩余总量占初始污染物浓度总量的百分比, 以此作为该海湾的累积水交换率从而得到每天的水交换率。

## 2 结果与分析

### 2.1 模型验证结果

观测表明(图 3), 钦州湾的表层平均落潮流速为  $0.6\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 平均涨潮流速为  $0.36\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 落潮时间为 11h, 涨潮时间为 14h。 底层的转向流时刻、涨潮时间、落潮时间与表层基本一致。 受底摩擦力影响, 底层的流速值小于表层流速, 底层的平均落潮流和涨潮流的流速分别为  $0.46\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $0.29\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 图 3 中的黑色线代表实测值, 蓝色线代表模型值, 从图中可以看出二者基本吻合, 但模型值比观测值略小, 这与本文只采用潮汐驱动未考虑季风等强迫因子有关。 同时观测值和模型结果都显示钦州湾呈典型的全日潮流特征, 落潮流流速略大于涨潮流流速。

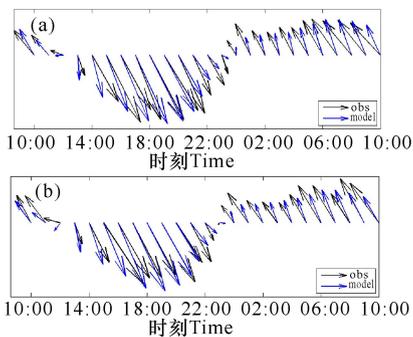


图3 钦州湾表层(a)和底层(b)的模型值(蓝色线)与海流观测数据(黑色线)的验证结果

Fig. 3 The verification of surface (a) and bottom currents (b) between model results (blue lines) and observations (black lines)

## 2.2 钦州湾水文特征

### 2.2.1 潮汐与潮流

水动力模型稳定运行后一个月的模拟结果可知,钦州湾的平均潮差约为 2.8m,最大潮差为 4.25m,平均涨潮时为 11.4h,而平均落潮时为 8.7h。如图 4 所示,涨潮中间时钦州湾的最大潮流流速为  $1.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,平均流速为  $0.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,除了航道处的流向为西北向,其它区域的流向基本为东北向;落潮中间时钦州湾的最大潮流流速为  $2.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,平均潮流流速为  $0.43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,潮流流向基本与地形平行,与涨潮中间时的流向相反。总的来讲,钦州湾的潮流呈

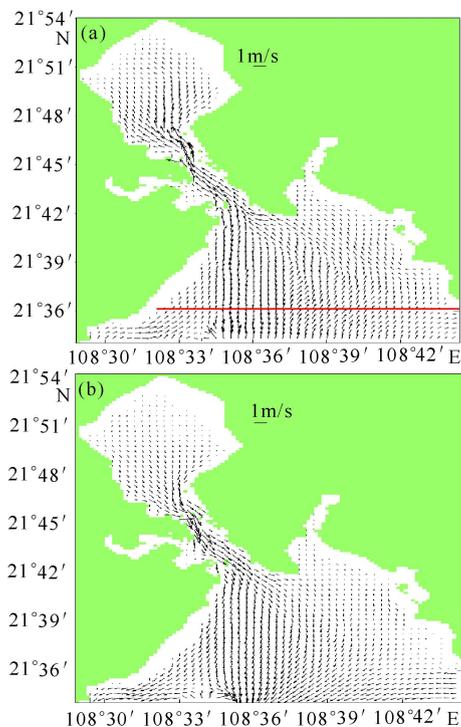


图4 钦州湾大潮期间表层涨潮中间时(a)和落潮中间时(b)的潮流分布

Fig. 4 The distribution of surface tidal currents on the ebb and flow intermediate moments of spring tide in Qinzhou Bay

往复流性质,茅尾海与外湾的连接处以及航道处的潮流流速较大。

### 2.2.2 纳潮量

图 4a 中的红线为计算纳潮量的断面,计算结果表明,钦州湾(图 4a 所示的红线以内)小潮期间的纳潮量为  $7.78 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,大潮期间的纳潮量为  $14.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,平均纳潮量为  $10.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

### 2.2.3 水交换能力

钦州湾的保守性污染物浓度逐时变化曲线如图 5 所示,由图 5 可知,随着湾外干净海水进入海湾,钦州湾的污染物浓度整体上呈下降趋势,但也存在潮周期变化引起的振荡特征。日平均浓度曲线(黑色线)表明钦州湾污染物浓度下降为  $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的时间约需 7d,由于模型的初始浓度设为  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,因此可得出钦州湾的水体交换半周期约为 7d,而钦州湾水体交换 80% 的时间约需 28d。

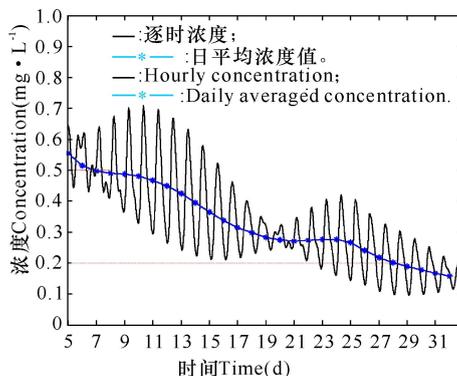


图5 整个钦州湾及垂向平均 COD 浓度的时间变化

Fig. 5 The time series of the gulf-wide and vertically averaged COD concentration

## 2.3 污染物输运模型结果

### 2.3.1 钦州湾污染物变化特征

钦州湾污染物输运模型连续积分一个月,其中河流采取连续排放方式。由于外海清洁水的交换,湾口的 COD 浓度较低,且低于初始浓度。高潮时,  $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的浓度值基本占据  $21.7^\circ$  以南区域,而低潮时  $0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的浓度值只占据湾口区域。由于河流连续的 COD 排放,茅尾海的 COD 浓度远高于湾南部。高潮时,  $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的浓度值呈弧形分布占据整个茅尾海北部,茅尾海的其它区域平均浓度值约为  $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (图 6a);低潮时,高浓度的 COD 向南扩散直至龙门,整个茅尾海的平均 COD 浓度约为  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  (图 6b)。由于钦江排放的 COD 浓度大于茅岭江,因此钦江对钦州湾尤其茅尾海的 COD 浓度起主导作用。通过整个钦州湾平均的 COD 浓度时间序列(未展示)可以发现 COD 浓度变化既有大、小潮的周期变化,又带有日振荡,逐时浓度最大值约为 1.27

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 日平均浓度最大值约为  $1\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

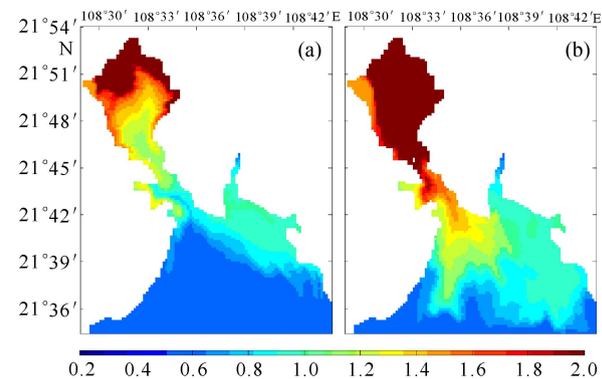


图6 钦州湾大潮期间高潮时(a)和低潮时(b)表层COD浓度分布

Fig. 6 The distribution of surface COD concentration on high tide (a) and low tide (b) of spring tide in Qinzhou Bay

### 2.3.2 围填海对钦州湾污染物分布的影响

随着钦州湾大量围填海工程的进行,钦州湾的水交换能力受到一定影响,因此污染物分布特征必然也会有所改变。本文以钦州湾保税港区的围填海工程为例来分析围填海对钦州湾污染物分布的影响。图7为大潮期间某一落潮中间时和涨潮中间时的表层COD浓度在围填海前后的分布情况,从图7可以看出,钦州湾保税港区的围填海工程对于钦州湾金鼓江西南部(航道以西区域)的COD浓度分布基本没有影响。涨潮中间时,填海前金鼓江东北区的COD浓度约为  $0.9\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,西侧的COD浓度约为  $1\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,填海后整个金鼓江的COD浓度都大于  $1\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。类似地,落潮中间时金鼓江的COD浓度在填海后约上升了  $0.1\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

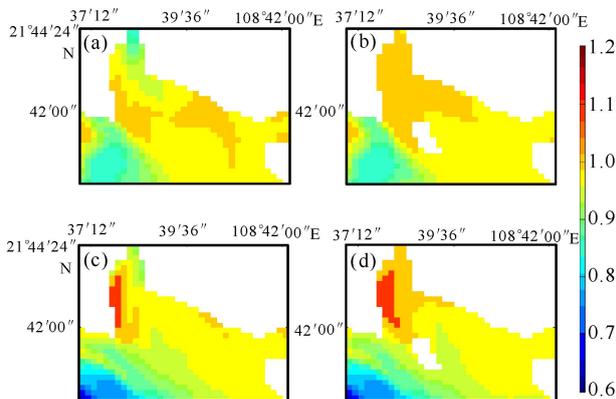


图7 保税港区围填海之前(a和c)及之后(b和d)的大潮期间落潮中间时(a和b)和涨潮中间时(c和d)的金鼓江附近区域表层COD浓度分布

Fig. 7 The distribution of surface COD concentration around Jingujiang Bay on ebb (a; b) and flow (c; d) intermediate moments of spring tide before (a; c) and after (b; d) the reclamation engineering of bonded port, respectively

为了分析保税港区围填海对金鼓江COD浓度  
广西科学 2014年8月 第21卷第4期

影响的一般性,本文积分围填海前后1个月内钦州湾表层逐时COD浓度值。结果如图8所示,金鼓江北端的COD浓度在保税港区填海后约上升了  $0.15\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,约占填海前COD浓度(约  $0.75\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )的20%;而金鼓江西侧的COD浓度在填海后上升了  $0.1\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,约占填海前浓度(约为  $0.9\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )的11%。因此,金鼓江的COD浓度在填海后明显增大,这与保税港区的围填海工程减弱了金鼓江与外界的水交换能力有关。

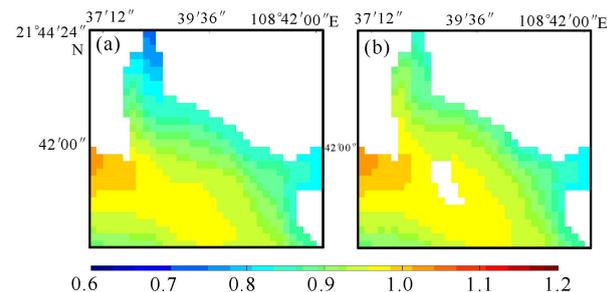


图8 保税港区围填海之前(a)及之后(b)积分一个月的金鼓江附近区域表层COD浓度分布

Fig. 8 The distribution of surface COD concentration integrated in one month around Jingujiang Bay before (a) and after (b) the reclamation engineering of bonded port, respectively

## 3 结论

本文基于2010年秋季的调查结果,应用ECOMSED模型构建了钦州湾潮流和COD输运模型,模型结果与海流调查数据较为吻合,同时应用模型结果分析了钦州湾的潮流、水交换能力以及污染物输运特征,所得主要结论如下:

钦州湾为不正规全日潮性质,涨潮历时大于落潮历时,对应落潮流大于涨潮流;流向基本与岸线平行,涨潮流与落潮流基本反向,呈往复流性质;平均潮差为2.8m,最大潮差为4.25m,小潮期间的纳潮量为  $7.78 \times 10^8 \text{m}^3$ ,大潮期间的纳潮量为  $14.0 \times 10^8 \text{m}^3$ ,平均纳潮量为  $10.8 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

钦州湾的水体半交换周期约为7d,而水体交换80%的时间约为28d。钦州湾的COD逐时浓度最大值为  $1.27\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,日平均浓度最大值约为  $1\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。钦州湾保税港区的填海对金鼓江的COD浓度分布影响较大,填海后金鼓江北端的COD浓度约上升20%,西侧的COD浓度约上升10%。

本文旨在分析钦州湾潮流场、水交换能力以及污染物输运的总体特征,因此只应用直角坐标系,若想进一步深入分析小尺度特征,可应用三角形网格模型。另外,污染物的输运包括迁移与转化两个过

程<sup>[12,13]</sup>,因此将来需要应用更先进的生态模型(如ROMS)来模拟钦州湾的污染物时空演变特征。

### 致谢:

感谢本单位同仁们的出海调查和实验室测试分析工作。

### 参考文献:

[1] 李树华,童万平. 钦州湾潮流和污染物扩散的数值模型[J]. 海洋环境科学,1987,6(2):30-37.  
Li S H, Tong W P. Numerical model of tidal current and pollutant diffusion in Qinzhou Bay[J]. Marine Environment Science, 1987, 6(2): 30-37.

[2] 李树华,夏华永,梁少红,等. 广西重点港湾的潮流和余流[J]. 广西科学,2001,8(1):74-79.  
Li S H, Xia H Y, Liang S H, et al. Tidal currents and residual currents in the key harbors of Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 2001, 8(1): 74-79.

[3] 陈波,邱绍芳,葛文标,等. 广西沿岸主要海湾潮流的数值计算[J]. 广西科学,2001,8(4):295-300.  
Chen B, Qiu S F, Ge W B, et al. Numerical calculation about the tidal currents in the main bays of Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 2001, 8(4): 295-300.

[4] 陈波,侍茂崇,邱绍芳. 广西主要港湾余流特征及其对物质运输的影响[J]. 海洋湖沼通报,2003,1:13-21.  
Chen B, Shi M C, Qiu S F. Characteristics of residual currents and their influence on the material transformation in five main bays of Guangxi coast[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2003, 1: 13-21.

[5] 鲍献文,陈波,侍茂崇,等. 钦州湾三维潮流数值模拟[J]. 广西科学,2004,11(4):378-384.  
Bao X W, Chen B, Shi M C, et al. The numerical value simulation of the three dimensional tide of Qinzhou Bay[J]. Guangxi Sciences, 2004, 11(4): 378-384.

[6] 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.  
Song D H, Bao X W, Zhu X M. Three-dimensional numerical simulation of tidal current in Qinzhou Bay[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(2): 7-14.

[7] 游慕贤,游立新. 钦州湾围滩工程前后潮流场的数值模拟[J]. 水道港口,2009,30(6):394-401.  
You M X, You L X. Numerical simulation of tidal cur-

rent field before and after engineering project in Qinzhou Bay[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2009, 30(6): 394-401.

[8] 孙永根,高俊国,朱晓明. 钦州保税港区填海造地工程对海洋环境的影响[J]. 海洋科学,2012,36(12):84-89.  
Sun Y G, Gao J G, Zhu X M. Effect of reclamation engineering in Qinzhou Bond Harbor on marine environment of Qinzhou Bay[J]. Marine Sciences, 2012, 36(12): 84-89.

[9] 刘洋,孙永福,杨宗严,等. 钦州湾港口功能区布局对海洋动力环境的影响[J]. 海洋环境科学,2013,32(3):360-363.  
Liu Y, Sun Y F, Yang Z Y, et al. Impact of port functional division layout of Qinzhou Bay on marine dynamic environment[J]. Marine Environment Science, 2013, 32(3): 360-363.

[10] Zu T T, Gan J P, Erofeeva S Y. Numerical study of the tide and tidal dynamics in the South China Sea[J]. Deep-Sea Res I, 2008, 55: 137-154.

[11] 孙英兰,张越美. 丁字湾物质输运及水交换能力研究[J]. 青岛海洋大学学报,2003,33(1):1-6.  
Sun Y L, Zhang Y M. A numerical model of pollutant transport and seawater exchange in Dingzi Bay[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 33(1): 1-6.

[12] 崔江瑞,张珞平. 厦门湾环境容量研究中污染物迁移转化模式的确定及其应用[J]. 环境科学与管理,2009,34(11):10-14.  
Cui J R, Zhang L P. Determination and application of pollutant transfer and transformation model in the study of Xiamen Bay environmental capacity[J]. Environmental Science and Management, 2009, 34(11): 10-14.

[13] 崔江瑞. 污染物在海洋中的迁移转化及其在海湾环境容量研究中的应用[D]. 厦门:厦门大学,2009.  
Cui J R. Pollutant transfer and transformation in marine environment and application in the study of marine environmental capacity[D]. Xiamen: Xiamen University, 2009.

(责任编辑:陆 雁)