

北仑河口水交换能力及物质运输的数值模拟研究^{*}

Numerical Model Study of Water Exchange Ability and Substance Transport in Beilun Estuary

高劲松¹, 陈波¹, 邱仁康², 庄军莲¹, 董德信¹, 牙韩争¹, 李谊纯¹

GAO Jing-song¹, CHEN Bo¹, QIU Ren-kang², ZHUANG Jun-lian¹, DONG De-xin¹, YA Han-zheng¹, LI Yi-chun¹

(1. 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; 2. 天津科技大学 海洋科学与工程学院, 天津 300457)

(1. Guangxi Key Laboratory of Marine Environment Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin, 300457, China)

摘要:【目的】随着入海污染物的不断增加, 北仑河口海域的生态环境保护面临严峻挑战, 因此对其水交换能力和物质运输特征进行研究尤为重要。【方法】基于 COD 调查结果, 应用 ECOMSED 模型模拟北仑河口海域的水交换能力以及夏季与冬季的 COD 运输特征。【结果】北仑河口海域的水交换半周期为 4.5 d, 水体交换 80% 的时间约为 29 d。北仑河口海域夏季两侧的 COD 浓度比冬季高 0.4 mg/L, 冬季中央区域 COD 浓度则比夏季高, 这一方面与夏季较强的羽状流引起的较强水交换有关, 另一方面与该区域冬季存在气旋式涡旋有关。【结论】北仑河口海域的羽状流及环流结构对污染物浓度分布有重要影响。

关键词: 北仑河口 COD 浓度 水交换 ECOMSED 模型

中图分类号: P731.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)03-0250-05

Abstract: 【Objective】As the pollutants into the sea are increased gradually, Beilun Estuary is facing tough challenge. In order to protect the marine ecological environment in the estuary, it is necessary to research the characteristics of water exchange and pollutant transport. 【Methods】Based on the observation results, the ECOMSED model is applied to simulate the water exchange ability and COD transport characteristics of summer and winter in Beilun Estuary. 【Results】The half cycle of the water exchange between the estuary and outside ocean was about 4.5 d, whereas it needed about 29 d to refresh 80% water in the estuary. On the other hand, the COD concentration in the two sides of the estuary was 0.4 mg/L larger in summer than those in winter. But the COD concentration in the central area in winter was larger than that in summer, which was due to the strong water exchange ability induced by the strong river plume in

summer and the cyclonic eddy existing there in winter. 【Conclusions】The river plume and the circulation structure in the estuary have significant effect on the distribution of the pollutant concentration in Beilun Estuary.

Key words: Beilun Estuary, COD concentration, water exchange, ECOMSED model

收稿日期: 2015-05-06

修回日期: 2015-05-26

作者简介: 高劲松(1984-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事浅海环流及物质运输研究。

^{*} 国家自然科学基金青年基金项目(41406044), 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科攻 1598016-8)和广西自然科学基金重大项目(2012GXNSFEA053001)资助。

0 引言

【研究意义】北仑河口位于广西壮族自治区东兴市与越南海宁省的接壤处,是中越两国的界河河口。北仑河口宽约 6 km,纵长约 11.1 km,为典型喇叭状河口,自西北向东南方向敞开,水域面积约为 66.5 km²。随着东兴重点试验区的构建,该区域的城市化进程不断加快,入海工农业废水、海水养殖污水等也相应增加,导致近海水体富营养化态势日趋显现,因此研究北仑河口的水交换能力及物质运输特征对该海域的生态环境保护有重要作用。**【前人研究进展】**近年来,北仑河口的研究主要集中在水动力和红树林的研究^[1~6],陈波等^[1,2]和邱绍芳等^[3]指出北仑河口的地形地貌近几十年来发生了较大变化,主航道中心线明显往北偏移,这既有自然要素的作用,如径流、风浪、潮流,也有人为因素,如周围植被的减少。陈敏等^[7]根据 2008 年广西 908 专项“北仑河口综合调查及评价”的 4 个季节调查结果,分析了环境因子与小型硅藻群落结构的关系,指出北仑河陆源的物质运输和入海扩散对硅藻群落有较大影响。**【本研究切入点】**目前,北仑河口海域的水交换能力及物质运输特征还未见报道。**【拟解决的关键问题】**基于 2010~2011 年 4 个季节的 COD 调查结果,应用 ECOMSED 模型研究北仑河口海域的水交换能力及物质运输特征,为今后的海洋环境保护工作提供科学依据。

1 模型设置与分析方法

1.1 ECOMSED 模型

ECOMSED 模型共包含 6 个模块:水动力模块、黏性和非黏性泥沙运输模块、沉积物示踪模块、可溶性粒子运输模块、热通量模块和风浪模块,该模型在模拟浅海污染物和泥沙运输方面有独特的优势。该模型采用了基于静力学假设和 Boussinesq 近似下的海洋原始方程组;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;垂向上嵌套了 2.5 阶湍封闭模型。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。本文根据研究内容只利用了该模型的水动力模块和可溶性粒子(污染物)运输模块。

模型计算区域如图 1 所示,位于 108°~108.46° E, 21.4642°~21.7042°N 之间。水平方向网格数为 275×145,水平分辨率为 0.1', 约为 172 m,垂向上分成 7 个 sigma 层。开边界采用辐射边界条件,以潮汐

调和常数驱动。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°, 其中 K_1 和 M_2 的均方根误差(RMS)分别为 1.63 cm 和 4.16 cm^[8]。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。

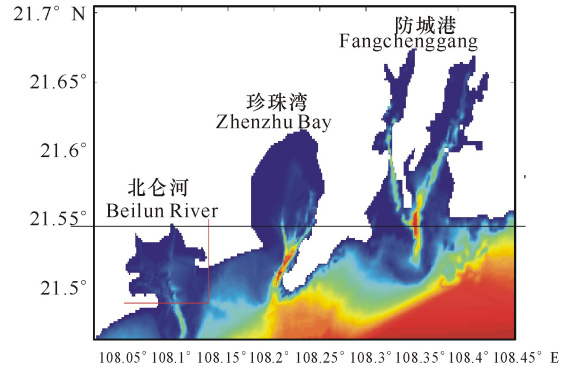


图 1 模型计算区域(红框代表北仑河海域)

Fig. 1 Model domain (with the red frame representing Beilun Estuary)

1.2 水动力模块设置

由于沿海浅滩较多,所以在 ECOMSED 模型中加入干/湿网格判据,其中水动力模块的具体设置如下:

设置最小水深 $\epsilon = 0.1$ 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, η 代表水位。

若 $(D_{i-1,j}) * 0.5 > \epsilon$, 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 污染物运输模块设置

污染物运输方程如式(1)所示:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial Cu}{\partial x} + \frac{\partial Cw}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_H \frac{\partial C}{\partial z}) + F_C + k. \quad (1)$$

其中 F_C 为水平扩散项。 k 为衰减系数,用来刻画非保守性污染物的生物化学迁移过程。如果示踪物为保守性污染物,那么 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。

与水动力模块的干/湿网格相对应,污染物运输模块的干/湿网格^[9]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。

1.4 水交换能力分析

采用溶解态保守物质的浓度做为示踪剂来分析水交换能力。初始污染物浓度设置为 1 mg/L, 侧边界的污染物浓度设为 0。模型稳定之后, 运行污染物扩散模型共 30 d, 每小时输出一场全场污染物浓度值, 再积分所模拟区域的污染物剩余总量, 通过剩余污染物占总量的百分比来计算累计水交换率, 从而得到日均水交换率。

1.5 COD 输运季节特征分析

根据广西近海 2010~2011 年的 4 个季节调查结果, 北仑河口夏季和冬季的 COD 浓度较高, 同时夏季和冬季的北仑河径流量具有代表性, 因此本文模拟北仑河口 2010 年夏季和冬季的 COD 输运特征。

根据调查结果, 北仑河在夏季(6 月份)和冬季(12 月份)的气候态径流量分别为 172.83 m³/s 和 20.83 m³/s。由于只有 COD 的年排放量数据, 因此本文把夏季和冬季的 COD 排放量设成一致, 为 0.85 mg/L。由图 2 显示, 夏季 COD 变化范围为 1.01~1.64 mg/L, 平均值为 1.35 mg/L; 冬季 COD 变化范围为 0.81~1.52 mg/L, 平均值为 0.96 mg/L。虽然该次调查重点为防城港湾, 在北仑河口布设的站点不多, 但是由于北仑河口至防城港海域近海存在一支西向流^[10,11], 因此整个模拟区域(如图 1)可采用 COD 平均值。另外, 根据 COD 浓度的分布特征, 夏季和冬季的侧边界浓度均均设为 0.9 mg/L。

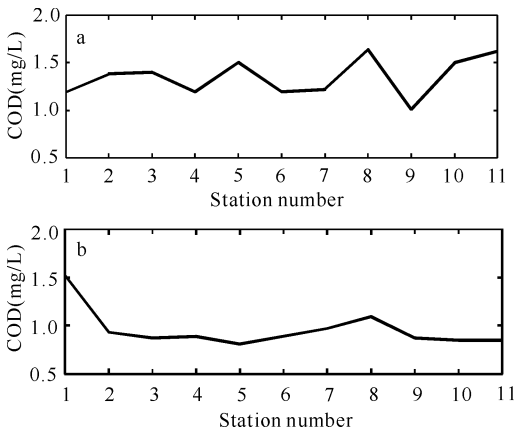


图 2 北仑河口至防城港海域夏季(a)和冬季(b)的 COD 调查结果

Fig. 2 The observation results of COD in the sea from Beilun to Fangchenggang Estuary in summer (a) and winter (b), respectively

2 水交换周期

北仑河口的污染物日平均浓度变化如图 3 所示。

随着湾外污染物浓度为 0 的海水进入, 北仑河口的污染物浓度不断降低, 整体上呈下降趋势, 但也存在潮周期变化引起的浓度振荡特征。日平均浓度曲线(蓝色线)表明北仑河口的污染物浓度平均值降为 0.5 mg/L 的时间约为 4.5 d, 由于初始浓度为 1 mg/L, 因此北仑河口海域的水体交换半周期为 4.5 d, 而水体交换 80% 的时间约为 29 d。

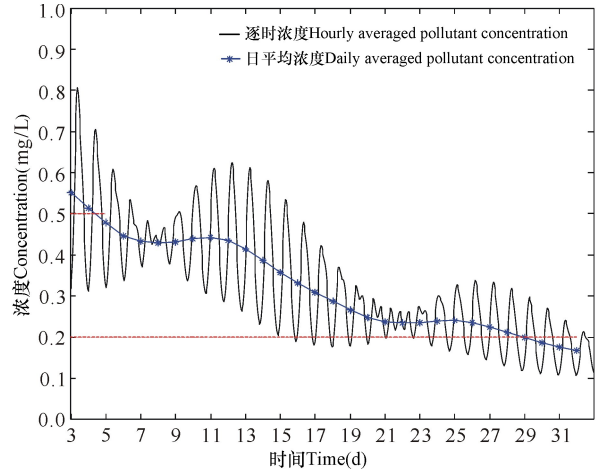


图 3 北仑河口海域垂向污染物浓度随模拟时间变化曲线

Fig. 3 The time series of vertically averaged pollutant concentration in Beilun Estuary

3 COD 输运季节变化特征

图 4 为北仑河区域的表层 COD 浓度平均值, 由于两个季节的开边界浓度一致, 但夏季初始浓度较高, 因此整个北仑河口海域夏季的平均浓度比冬季略高。虽然两个季节中北仑河的 COD 排放浓度一样, 但由于夏季(6 月)的北仑河径流量约为冬季(12 月)的 8 倍, 因此在较强的河流羽状流作用下(图 5b), 夏季北仑河出海口的 COD 浓度向外扩散范围更广, 但夏季较强的羽状流也加速了北仑河口海域中央区域与外海水的交换(图 5b), 因此夏季北仑河口海域的两侧浓度比中央高得多(图 4a)。另外, 夏季北仑河口海域东侧的高浓度值则是因为防城港海域夏季较高浓度的 COD 在西向流作用下进入北仑河口东侧(图 5b)。事实上, 夏季北仑河口海域两侧的 COD 浓度(图 4a)比冬季(图 4b)高 0.4 mg/L。而冬季北仑河口海域的中央区域 COD 浓度则比夏季高, 这一方面与夏季较强的羽状流引起的较强水交换有关, 另一方面与冬季该区域存在气旋式涡旋有关(图 5a)。

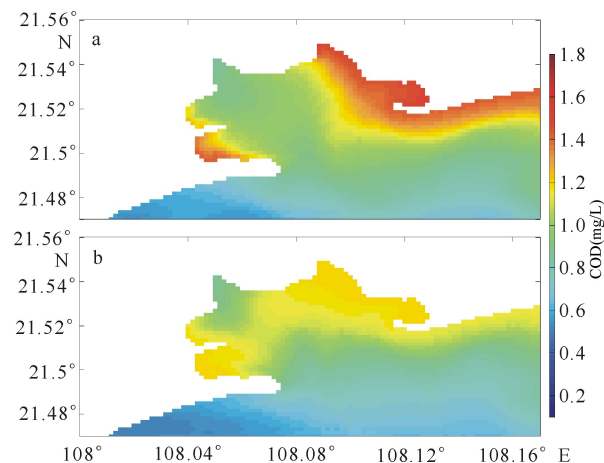


图4 北仑河区域夏季(a)与冬季(b)表层COD浓度月平均值

Fig. 4 Monthly-averaged surface COD concentration in Beilun Estuary in summer (a) and winter (b)

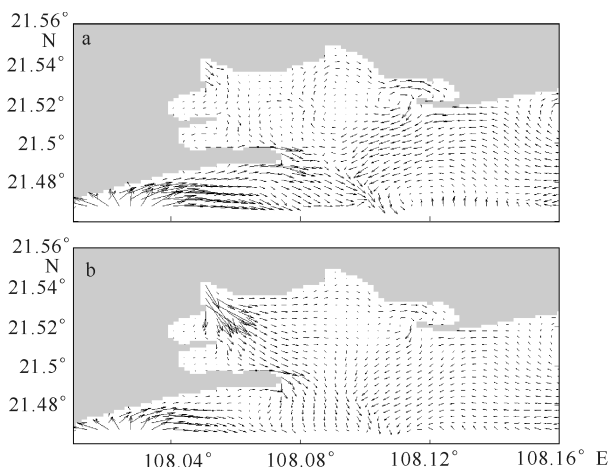


图5 北仑河口海域冬季(a)和夏季(b)月平均的表层潮汐余流

Fig. 5 Monthly-averaged surface tidal residual current in Beilun Estuary in winter (a) and summer (b)

4 结论

(1)冬季北仑河口的COD浓度约为0.81~1.52 mg/L,平均含量为0.96 mg/L;夏季浓度约为1.01~1.64 mg/L,平均值为1.35 mg/L,从湾内到湾口浓度逐渐降低。

(2)北仑河口附近海域的水交换半周期为4.5 d,水交换80%的时间约为29 d。

(3)北仑河口海域,夏季两侧的COD浓度比冬季高0.4 mg/L,冬季中央区域COD浓度则比夏季高。这一方面与夏季较强的羽状流引起的较强水交换有关,另一方面与冬季该区域存在气旋式涡旋有关。

本文仅考虑了潮汐和河流径流量驱动下的北仑河口COD输运特征,事实上季风、外海环流、斜压效

应等因子对COD输运也有重要影响。因此今后将在本文基础上继续深入研究北仑河口的COD输运特征,并探讨不同强迫因子对污染物浓度分布所起的作用。

参考文献:

- [1] 陈波,邱绍芳. 河流动力及海洋动力对北仑河口河槽演变的影响[J]. 广西科学,1999,6(3):227-230.
Chen B, Qiu S F. Effects of river and marine dynamics on the succession of the river bed in the estuary of Beilunhe[J]. Guangxi Sciences, 1999, 6(3): 227-230.
- [2] 陈波,董德信,邱绍芳,等. 北仑河口海岸地貌特征与环境演变影响因素分析[J]. 广西科学,2011,18(1):88-91.
Chen B, Dong D X, Qiu S F, et al. Analysis of coastal geomorphic features and influence factors of environmental evolution in Beilun estuary [J]. Guangxi Sciences, 2011, 18(1): 88-91.
- [3] 邱绍芳,陈波,何碧娟. 广西沿岸两大入海口区域的环境变化与水流动力影响分析[J]. 海洋湖沼通报,2003(3):24-29.
Qiu S F, Chen B, He B J. Analysis of the environmental change and effect of flow dynamics in two large estuary districts along Guangxi Province[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2003(3): 24-29.
- [4] 范航清,何斌源. 北仑河口的红树林及其生态恢复原则[J]. 广西科学,2001,8(3):210-214.
Fang H Q, He B Y. The mangroves and their ecological restoration principles of Beilun Estuary[J]. Guangxi Sciences, 2011, 8(3): 210-214.
- [5] 韩妹怡,陈波,邱绍芳,等. 北仑河口北侧海岸环境演变与水动力学之间的关系[J]. 广西科学,2009,16(4):196-199.
Han S Y, Chen B, Qiu S F, et al. Relationship between coastal environment evolution and hydrodynamic in the north of Beilun Estuary[J]. Guangxi Sciences, 2009, 16(4): 196-199.
- [6] 罗万次,苏搏,刘熊,等. 广西北仑河口红树林保护区表层海水溶解态重金属时空分布及其影响因素[J]. 海洋通报,2014,33(6):668-675.
Luo W C, Su B, Liu X, et al. Spatial and temporal distributions and influence factors of the dissolved heavy metals in surface water in the mangrove reserve at the Beilun River Estuary in Guangxi[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(6): 668-675.
- [7] 陈敏,蓝东兆,任建业,等. 北仑河口海域小型硅藻群落结构及其与环境因子的关系[J]. 生态环境学报,2011,20(7):1053-1062.
Chen M, Lan D Z, Ren J Y, et al. Relationship between diatom community structure and environmental factors

in Beilun River Estuary[J]. Ecological and Environmental Sciences, 2011, 20(7): 1053-1062.

- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 郑斌鑫, 李九发, 曾志, 等. 北仑河口潮流和余流特征分

析[J]. 台湾海峡, 2012, 31(1): 121-129

Zheng B X, Li J F, Zeng Z, et al. Characteristical analysis of tidal and residual currents in Beilun Estuary[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2012, 31(1): 121-129.

- [11] Gao J S, Xue H J, Chai F, et al. Modeling the circulation in the Gulf of Tonkin, South China Sea[J]. Ocean Dynamics, 2013, 63(8): 979-993.

(责任编辑: 竺利波)

(上接第 249 页 Continue from page 249)

- [3] 陈宪云, 刘晖, 董德信, 等. 广西主要海洋灾害风险分析[J]. 广西科学, 2013, 20(3): 248-253.
Chen X Y, Liu H, Dong D X, et al. Analysis of Guangxi marine disaster risk[J]. Guangxi Sciences, 2013, 20(3): 248-253.
- [4] 陈宪云, 陈波, 刘晖, 等. 广西沿海风暴潮灾害及防治对策[J]. 海洋湖沼通报, 2013(4): 17-23.
Chen X Y, Chen B, Liu H, et al. Guangxi coastal storm surge disasters and countermeasures[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2013(4): 17-23.
- [5] 邱绍芳, 陈波. 广西沿海海湾风暴潮增减水与台风路径和地形效应的关系[J]. 广西科学, 2000, 7(4): 282-285.
Qiu S F, Chen B. Impacts of typhoon course and landform on water level fluctuation in the coastal bays in Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 2000, 7(4): 282-285.
- [6] 陈波, 董德信, 陈宪云, 等. 历年影响广西沿海的热带气旋及其灾害成因分析[J]. 海洋通报, 2014, 33(5): 527-532.
Chen B, Dong D X, Chen X Y, et al. Analysis on causes of tropical cyclones and their disasters affecting on Guangxi coast based on historical data[J]. Marine Science Bulletin, 2014, 33(5): 527-532.
- [7] 陈波. 北海港多年一遇风暴潮增减水极值推算[J]. 广西科学院学报, 2000, 6(3): 12-15.
Chen B. Reckoning of extremal water level fluctuation caused by storm surge in every year in Beihai Port[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2000, 6(3): 12-15.

- [8] 陈波, 侍茂崇. 廉州湾风暴潮的数值模拟[J]. 海洋通报, 2001, 20(3): 88-92.
Chen B, Shi M C. Numerical simulation of storm surge in Lianzhou Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2001, 20(3): 88-92.
- [9] 陈波, 魏更生. 广西沿海风暴潮的数值计算研究[J]. 海洋湖沼通报, 2002, 2: 1-8.
Chen B, Wei G S. Numerical calculation of storm surges near Guangxi coast[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2002, 2: 1-8.
- [10] Ding Y, Bao X W, Shi M C. Characteristics of coastal trapped waves along the northern coast of the South China Sea during year 1990[J]. Ocean Dynamics, 2012, 62: 1259-1285.
- [11] 李立. 南海北部沿岸冬季水位亚潮波动特征研究[J]. 热带海洋, 1993, 12(3): 52-60.
Li L. A study of winter subtidal sea level fluctuation along the northern coast of the south China sea[J]. Tropic Oceanology, 1993, 12(3): 52-60.
- [12] 李立. 台湾海峡冬季亚潮频水位波动的初步研究[J]. 海洋学报, 1989, 11(3): 275-283.
Li L. A preliminary study of winter subtidal sea level fluctuation in Taiwan Strait[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1989, 11(3): 275-283.

(责任编辑: 尹 闯)