

夏季波浪对钦州湾水交换能力的影响研究^{*}

曹雪峰^{1,2}, 陈波^{1**}, 邢传玺², 于洁雯³, 高劲松⁴, 徐智昕¹, 石洪源⁵, 刘永青², 朱冬琳¹

(1. 广西科学院, 广西北部湾海洋研究中心, 广西近海海洋环境科学重点实验室, 广西南宁 530007; 2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁大连 116023; 3. 大连指南针海洋工程咨询有限公司, 辽宁大连 116023; 4. 南宁师范大学, 广西南宁 530001; 5. 鲁东大学土木工程学院, 山东烟台 264025)

摘要:基于无结构三角网格的 FVCOM 海洋模式, 以 K1、O1、P1、Q1、M2、S2、N2 和 K2 这 8 个分潮调和常数为驱动, 考虑钦江和茅岭江两条径流, 建立了钦州湾海域的高分辨率三维水动力数值模型。通过与实测数据的对比, 该模型可以较好地模拟钦州湾海域的水动力特征。在此基础上叠加浪流耦合模块和 DYE-RELEASE 模块, 模拟了夏季波浪对钦州湾海域流场结构以及水交换能力的影响。结果表明:波浪对钦州湾海域流场的影响, 涨急和落急潮流场的变化不显著, 而涨憩尤其是落憩时, 钦州湾的流速明显增大。钦州湾在潮汐径流作用下的半交换时间为 14.3 d, 在潮汐径流波浪作用下的半交换时间为 4 d。内湾茅尾海的水体交换主要受制于潮汐和径流, 而外湾钦州湾的水体交换受制于潮汐和波浪。

关键词:水交换能力 半交换时间 波浪 数值模拟 钦州湾

中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2019)06-0647-08



微信扫一扫, 与作者在线交流(OSID)

0 引言

钦州湾位于广西壮族自治区南部钦州市以南, 海域范围 $21^{\circ}33'20'' \sim 21^{\circ}54'30''$ N、 $108^{\circ}28'20'' \sim 108^{\circ}45'30''$ E, 由内湾(茅尾海)和外湾(狭义上的钦州湾)组成, 湾内岛屿众多, 岸线曲折, 是一个南北窄长的海湾, 南面通过一个喇叭口状通道与外海相连, 是一个典型的半封闭型天然海湾^[1](图 1)。钦州湾作为广西北部湾重点开发海湾之一, 近年来由于钦州市的经

济建设和近海养殖业的迅速发展, 污染物的大量输入导致生态环境发生了较大变化^[2-4]。

观测数据在时间和空间上具有局限性, 数值模型是研究钦州湾水动力特征的重要手段。李树华等^[5]利用二维数值模型模拟了钦州湾的潮流和污染物扩散。宋德海等^[6]基于 FVCOM 模拟了钦州湾的三维潮流场, 指出钦州湾西槽和中槽的西侧区域是主要的出水通道, 东槽和中槽的东侧区域则是主要的进水通道。高劲松等^[7]基于 ECOMSED 模型构建了钦州湾

^{*} 广西近海海洋环境科学重点实验室开放基金项目(GXKLHY18-01, GXKLHY18-02)和国家海洋环境监测中心博士科研启动项目(2018-A-19)资助。

【作者简介】

曹雪峰(1991—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事物理海洋学研究, E-mail: xfc@nmemc.org.cn。

【**通信作者】

陈波(1954—), 男, 研究员, 主要从事物理海洋学研究, E-mail: cbgkxy@163.com。

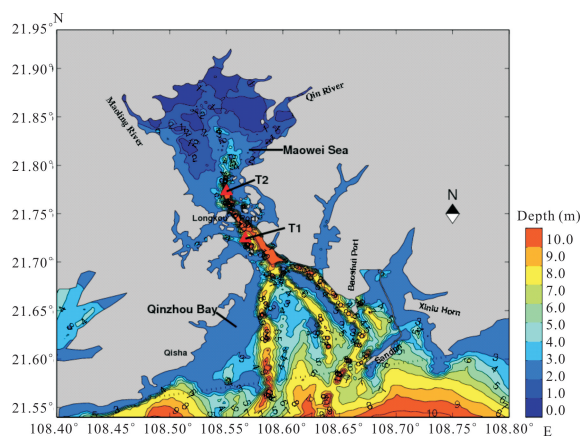
【引用本文】

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20191231.005

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.

CAO X F, CHEN B, XING C X, et al. Study on the influence of summer wave on water exchange capacity in Qinzhou Bay of China [J]. Guangxi Sciences, 2019, 26(6): 647-654.

三维潮流与污染物输运模型,计算得出钦州湾的平均纳潮量约为 $1.08 \times 10^9 \text{ m}^3$, 水体半交换时间为 7 d, 水体交换 80% 的时间为 28 d。陈振华等^[8] 基于 POM 模型建立了钦州湾水动力模式, 研究发现钦州湾的水体半交换时间约为 18 d。牙韩争等^[9] 利用 MIKE21 数学模型对钦州湾 COD 扩散进行了模拟, 研究了岸线变化对钦州湾污染物扩散输移影响。张坤等^[10] 利用 MIKE21 模型研究了钦州湾海域的纳潮量和径流对水体交换能力的影响, 研究发现钦州湾有径流时的半交换时间为 17.5 d, 而无径流时的半交换时间为 60.8 d。



T1 和 T2 为海流观测站, 黑色虚线为钦州湾与外海的界

T1 and T2 stations are ocean current observation stations, the black dotted line is the boundary between Qinzhou Bay and the open sea

图 1 钦州湾水深地形图

Fig. 1 Topography of Qinzhou Bay

水交换能力是评价海湾环境容量的重要指标, 表征了海湾自身的物理自净能力, 与海湾的水质情况直接相关。钦州湾潮汐属正规全日潮型, 海流以潮流为主, 海湾内部有钦江和茅岭江两条较大的径流输入, 夏季西南季风盛行时, 波浪必然会对海湾的水体交换能力产生影响。现有的研究文献往往考虑潮汐或潮汐径流作用, 未考虑波浪的影响。因此, 研究波浪对钦州湾海域的流场结构、水交换能力的影响, 对于充分了解钦州湾海域的自净能力和制定科学的生态环境保护政策, 具有十分重要的科学和现实意义。

1 材料与方法

1.1 FVCOM 数值模式

FVCOM 水动力数值模型是由马萨诸塞大学和伍兹霍尔海洋研究所联合开发的海洋数值模型, 其特点是无结构网格、体积有限、具有三维原始方程^[11]。

该模型采用三角网格拟合岸线, 可以更好地处理具有曲折岸线或者多岛屿情况的海洋过程, 垂向采用坐标或 $\sigma - z$ 混合坐标系, 可以更好地拟合复杂的海底地形, 因此被广泛应用于近岸和区域海洋动力过程的模拟中。同时, 模型具有考虑浪潮流耦合的能力。经过十几年的应用和发展, 通过世界各海区大量的实测资料验证, 该模式取得了良好的模拟效果^[12-13]。

为了研究保守物质的运移规律, 本文采用 DYE-RELEASE 模块, 以溶解态保守物质作为湾内水体的示踪物, 水质模型的控制方程为

$$\frac{\partial DC}{\partial t} + \frac{\partial DuC}{\partial x} + \frac{\partial DvC}{\partial y} + \frac{\partial \omega C}{\partial \sigma} - \frac{1}{D} \cdot$$

$$\frac{\partial}{\partial \sigma} (K_h \frac{\partial C}{\partial \sigma}) - DF_c = DC_0(x, y, \sigma, t),$$

其中: C 表示保守物质的浓度, D 表示水深, u, v, ω 表示 x, y, σ 方向的速度, K_h 表示垂向热扩散系数, F_c 是水平扩散项, C_0 表示保守物质的初始浓度。

1.2 模式配置与验证

1.2.1 模式配置

模型区域计算范围 $21.29^\circ \sim 21.93^\circ \text{N}$, $108.21^\circ \sim 109.17^\circ \text{E}$, 计算面积为 $3\,336 \text{ km}^2$, 模型共有 9 151 个节点, 16 726 个三角元, 计算区域和网格分布见图 2。开边界处分辨率为 1 km, 钦州湾近岸区域加密至 200 m, 由外海向近岸逐渐加密。模型采用中国近海海图 16770 的水深数据和茅尾海近岸的实测水深数据, 统一到平均海面, 将水深数据插值到网格上, 垂向采用 σ 坐标, 共分为 6 层。开边界采用水位强迫驱动, 利用全球海洋潮汐模型 TPXO7.2 提供的 8 个分潮 (K1、O1、P1、Q1、M2、S2、N2、K2) 预报水位, 固边界采用无滑动边界条件。另外, 为了减少能量在开边界处的堆积, 采用海绵条件使模型更加稳定。模型采

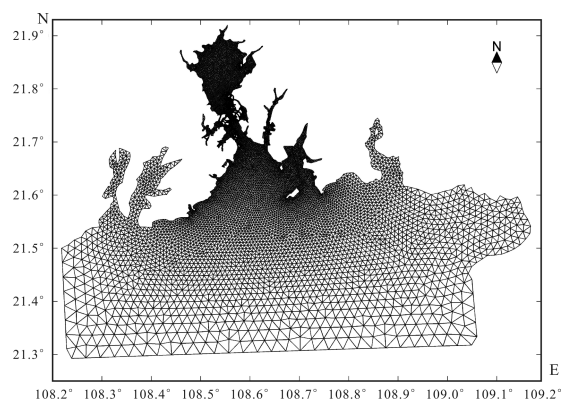


图 2 模型区域与网格分布

Fig. 2 Model area and grid distribution

用模态分离的算法提高计算效率, 根据 CFL 数值稳定性条件, 确定模型外模时间步长 2 s, 内模时间步长 10 s。模型从静止开始启动, 考虑钦州、茅岭江的径流输入影响, 采用气候态月平均的径流流量, 不考虑温盐的影响所造成的斜压效应。

1.2.2 模式验证

2010年1月30—31日, 国家海洋局第三海洋研究所在钦州湾 T1 和 T2 布设了 2 个海流观测站位(图 1 红色三角处), 进行连续 26 h 的观测, 采用中国海洋大学研制的直读式海流计观测海流。2010年1月21日—2月20日, 在龙口港放置验潮仪, 进行连续 1 个月的潮位观测。观测仪器和时间见表 1。

利用这些实测资料对本模型结果进行验证, 以检

表 1 钦州湾观测站的观测要素

Table 1 Observation elements of Qinzhou Bay observatory

观测要素 Observation elements	观测起止时间 Time range	观测仪器 Observation equipment	准确度 Accuracy
水位 Water level	2010/01/21—2010/02/20	XR-420 CTD	0.05%
流速、流向 Current velocity, direction	2010/01/30—2010/01/31	SLC92 Current Meter	$\pm 1.5 \text{ cm/s}, \pm 4^\circ$

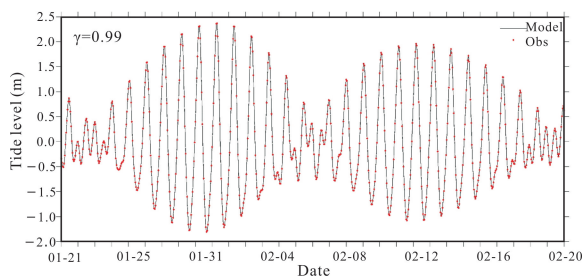


图 3 钦州湾龙口港的水位验证

Fig. 3 Water level verification in Longkou Port of Qinzhou Bay

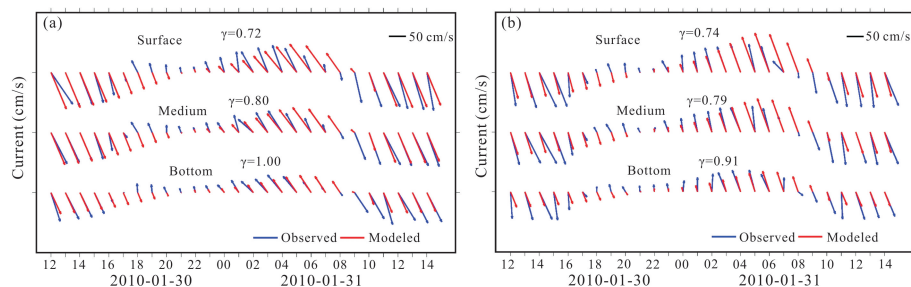


图 4 钦州湾 T1 和 T2 站的海流验证

Fig. 4 Current verification in T1 and T2 stations of Qinzhou Bay

验所建立的水动力模型的可靠性, 水位、海流观测站的验证结果分别见图 3 和图 4。其中, 龙口站的水位观测与模拟的相关系数为 0.99, 显著相关。T1 站表层、中层和底层的海流观测与模拟的矢量相关系数为 0.72, 0.80 和 1.00, T2 站表层、中层和底层的海流观测与模拟的矢量相关系数为 0.74, 0.79 和 0.91, 均为显著相关。由图可见, 中层和底层的海流模拟结果比表层要更好一些, 可能是模型未考虑表面风的影响, 表层更容易受到短期天气过程和船舶扰动等的影响。

总体而言, 通过曲线拟合程度和相关系数的显著性均可以看出, 模型可以较好地模拟天文潮动力过程, 可以用于水交换能力的研究。

2 结果与分析

2.1 钦州湾潮流特征空间变化

本文在模型中加入定常西南风 20 m/s, 并开启浪流耦合模块, 提前计算 3 d 使波浪充分成长, 然后每小时输出一次流场。图 5 为在西南风 20 m/s 的作用下, 钦州湾充分成长状态的波浪场分布, 外湾钦州的波浪有效波高 1~2 m, 湾口处超过 2 m, 波浪由湾口向内湾茅尾海衰减, 茅尾海波浪的有效波高为 0~0.5 m。本文还绘制了波浪影响前后的钦州湾大

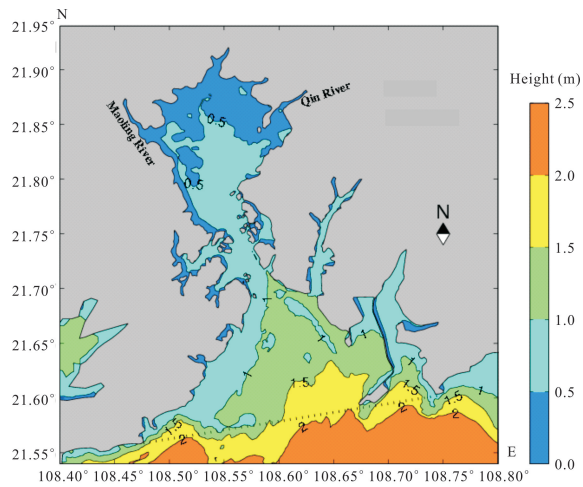


图5 定常 20 m/s 西南风作用下的钦州湾波浪场分布

Fig. 5 Distribution of wave field in the Qinzhou Bay under the steady 20 m/s southwest wind

潮期间 4 个典型时刻(涨急、涨憩、落急和落憩)的垂向平均的流场分布。由图 6 和图 7 可见,在考虑波浪的影响后,涨急和落急潮流场的变化不显著;而涨憩尤其是落憩时,流场的变化显著,钦州湾和茅尾海的流场有明显的增大。因此,考虑波浪对流场的影响和搅拌作用对扩散的影响,波浪必然会对钦州湾的水交换能力产生积极性的影响。

2.2 钦州湾保守物质浓度时间变化

为研究波浪对钦州湾水体交换能力的影响。本文利用 FVCOM 中的 DYE-RELEASE 模块在大潮落潮中间时刻释放保守物质,钦州湾湾内的保守物质浓度为 1,湾外为 0,新输入的径流保守物质浓度为 0,钦州湾与外海的分界线见图 1 中的黑色虚线。

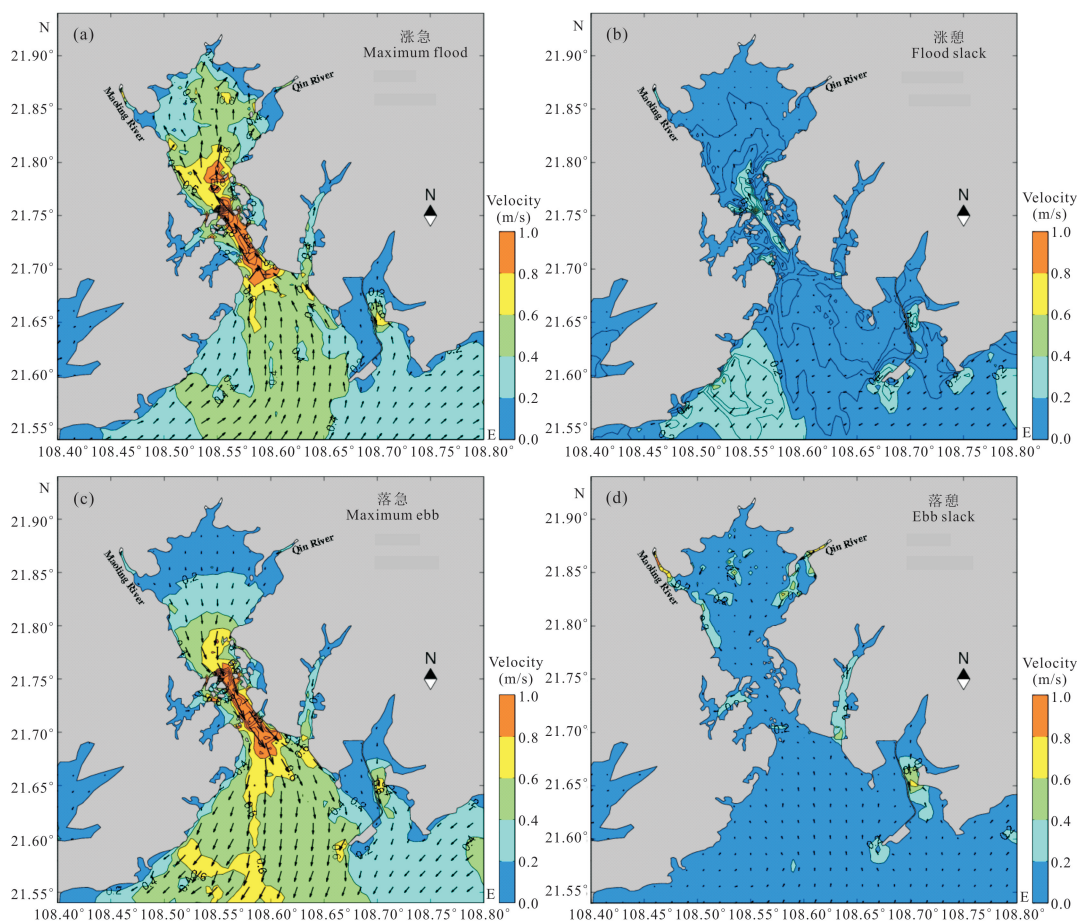


图6 潮汐径流作用下钦州湾垂向平均流场分布

Fig. 6 Distribution of vertical mean current field in Qinzhou Bay under the action of tidal runoff

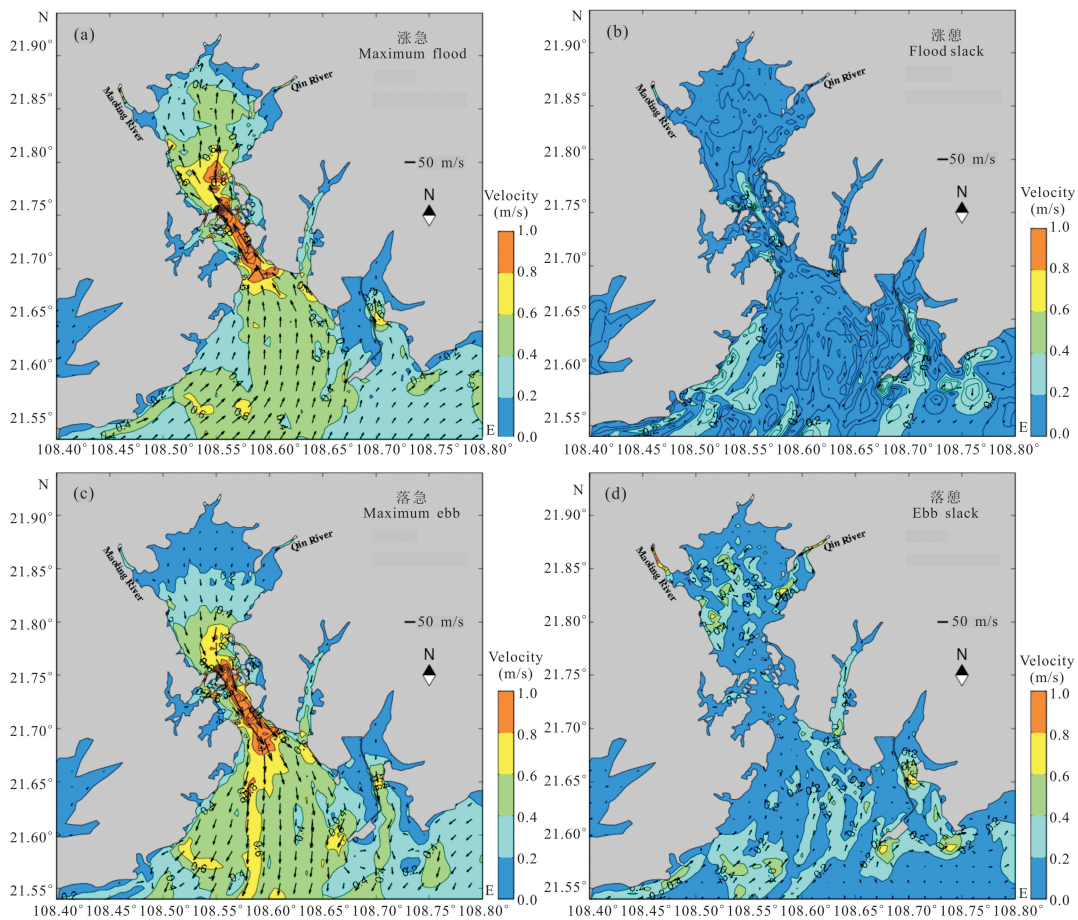


图 7 潮汐径流波浪作用下钦州湾涨急、涨憩、落急和落憩垂向平均流场分布

Fig. 7 Vertical mean current field distribution of Qinzhou Bay during the time of maximum flood, flood slack, maximum ebb and ebb slack under the action of tidal runoff

图 8 展示了钦州湾保守物质时空变化分布。由图可知, 不论是潮汐径流作用, 还是潮汐径流波浪作用, 内湾茅尾海区域的保守物质浓度均以较快的速度减小, 钦江和茅岭江河口区域的保守物质浓度迅速减小, 随后茅尾海湾顶区域的保守物质浓度减小, 比较波浪影响前后的结果, 潮汐和径流对茅尾海海域的水体交换占据主导作用。

外湾钦州湾保守物质浓度的空间分布呈现由湾口向湾内增加, 西侧向东侧增加的趋势, 西侧的水体交换能力较强, 这与钦州湾西水道为出水道、东水道为进水道是一致的。随着时间的增加, 波浪影响下的保守物质浓度减小速度更快, 5 d 时, 潮汐径流作用

下外湾钦州湾保守物质浓度大部分区域处于高值 0.9 以上, 而潮汐径流波浪作用下外湾钦州湾保守物质浓度大部分区域处于 0.8 以下; 10 d 时, 潮汐径流作用下外湾钦州湾保守物质浓度大部分区域处于 0~0.9, 而潮汐径流波浪作用下外湾钦州湾保守物质浓度大部分区域处于 0~0.2; 20 d 时, 潮汐径流作用下外湾钦州湾保守物质浓度大部分区域处于 0~0.6, 而潮汐径流波浪作用下外湾钦州湾保守物质浓度大部分区域处于 0.2 以下。因此, 波浪对外湾钦州湾的水体交换具有十分重要的影响, 加快了保守物质在外海和海湾之间的对流输运和扩散, 减小了外湾钦州湾的水体更新时间。

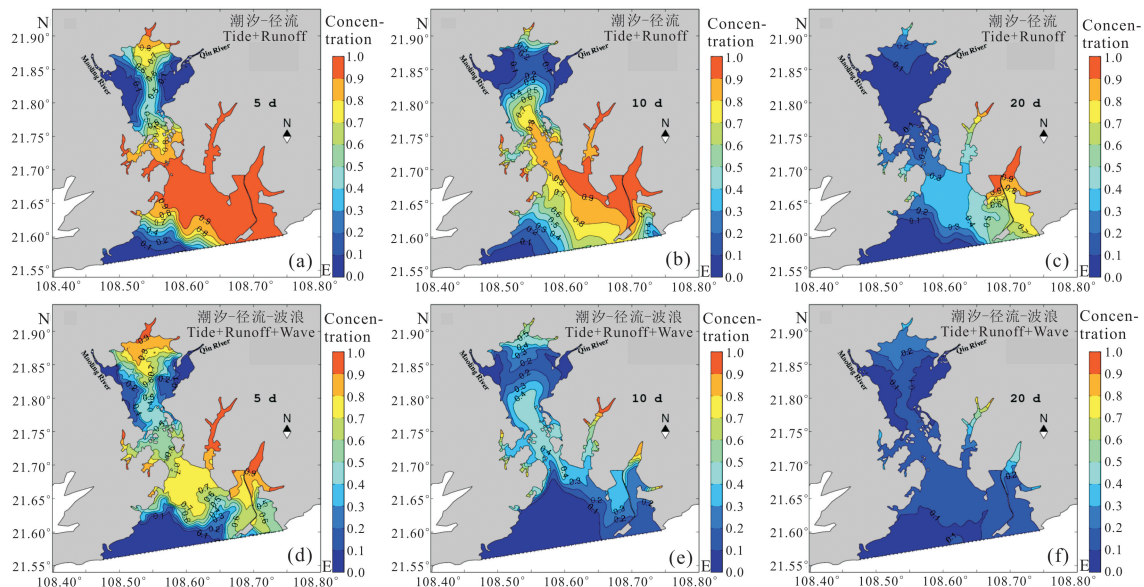


图8 钦州湾保守物质浓度时空变化

Fig. 8 Temporal and spatial changes of conservative substance concentrations in Qinzhou Bay

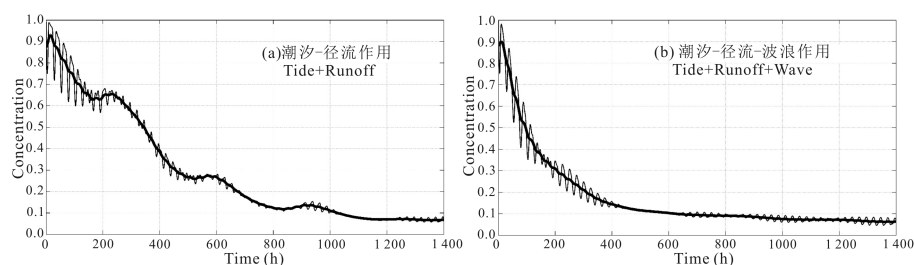
2.3 钦州湾水交换能力变化

由于天文潮的动力作用,钦州湾湾内平均浓度必然会随涨、落潮过程出现潮周期性的变化,也会出现大小潮的半月周期性变化,因此利用 PL64TAP 滤波器^[14]滤掉潮周期成分。在潮汐径流作用下和潮汐径流波浪作用下钦州湾保守物质浓度滤波前后的时间变化曲线如图 9 所示。可以看出,该滤波器可以较好地滤掉天文潮周期成分,体现钦州湾的保守物质平均浓度时间变化,可以用于半交换时间的分析研究。

图 10 显示了考虑波浪影响前后的钦州湾平均浓度时间变化曲线。由图可知,考虑潮汐径流作用时,钦州湾的平均半交换时间为 14.3 d,这与陈振华等^[8]和张坤等^[10]的计算结果相差不大;考虑潮汐径流波浪作用时,钦州湾的平均半交换时间为 4 d。在考虑

波浪影响后,钦州湾的半交换时间迅速降低,波浪对钦州湾的水体交换能力的影响显著。

图 11 显示了潮汐径流作用和潮汐径流波浪作用下,钦州湾水体的半交换时间空间分布。图 12 显示了考虑波浪因素前后,钦州湾水体半交换时间的插值空间分布。由图可见,波浪对内湾茅尾海的半交换时间影响较小。在钦江和茅岭江的径流作用下,河口区域的水体更新时间较快,内湾茅尾海的半交换时间最大为 10 d 左右,且内湾茅尾海的波浪较小,在考虑波浪影响后,半交换时间的空间分布变化并不显著,仅在茅尾海南部的近岸区域半交换时间有所减小。在内湾茅尾海区域,潮汐与径流作用占据影响水体交换因素的主导地位。



粗黑色实线为滤掉周期性潮信号的结果

Thick black solid line represents the result of filtering out the periodic tide signal

图9 钦州湾保守物质平均浓度的时间变化

Fig. 9 Temporal changes in the average concentration of conservative substances in the Qinzhou Bay

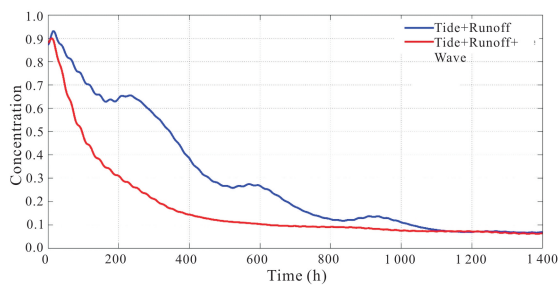


图 10 波浪影响前后钦州湾保守物质的平均浓度变化

Fig. 10 Changes in mean concentration conservative substances in Qinzhou Bay before and after wave influence

波浪对外湾钦州湾的半交换时间分布影响显著。考虑潮汐径流作用时, 犀牛角北部海域的半交换时间

可以达到 60 d 以上, 中部海域的半交换时间在 10~30 d, 西部海域和湾口的半交换时间较短, 约在 5 d 以内。考虑潮汐径流波浪共同作用时, 犀牛角北部海域的半交换时间大幅减小至 10~15 d, 最大减少幅度可以达到 50 d 左右; 中部海域的半交换时间减小至 2~10 d, 最大减少幅度可以达到 30 d 左右; 西部海域半交换时间 5 d 以内的区域面积扩大。因此, 波浪通过影响对流扩散效应, 对外湾钦州湾的水体交换能力影响显著, 可以大幅度减少水体的半交换时间, 尤其是容易堆积污染物的近岸枝杈海域, 作用更加显著。

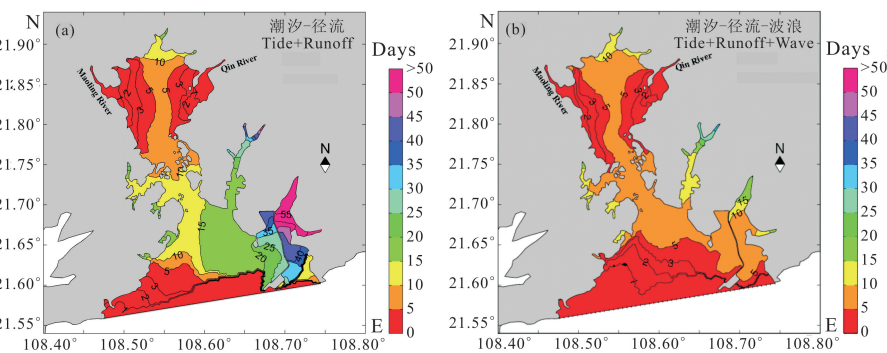


图 11 钦州湾半交换时间空间分布

Fig. 11 Temporal and spatial distribution of semi-exchange in Qinzhou Bay

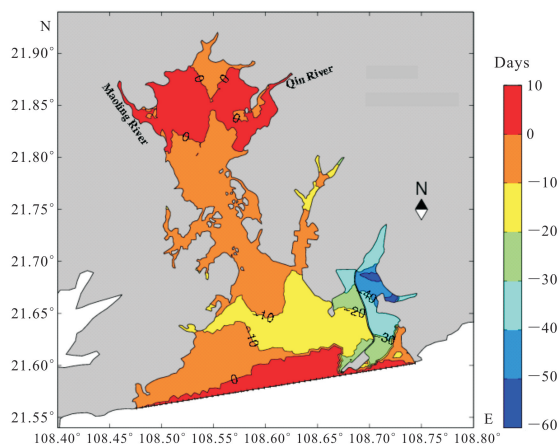


图 12 波浪影响前后钦州湾半交换时间差值分布

Fig. 12 Temporal and difference distribution of semi-exchange in Qinzhou Bay before and after wave influence

3 结论

本文基于无结构的三角网格构建了钦州湾海域的高分辨率 FVCOM 三维水动力数值模型, 通过对潮汐径流作用和潮汐径流波浪作用下钦州湾流场变化和保守物质浓度变化, 研究了夏季波浪对钦州湾

水交换能力的影响。研究结论如下:

(1) 夏季波浪对钦州湾海域流场的影响, 涨急和落急潮流场的变化不显著, 而涨憩尤其是落憩时, 钦州湾和茅尾海的流速有明显的增大。

(2) 钦州湾的平均水交换能力在考虑不同影响因子时, 表现差异较大。在潮汐径流作用下的半交换时间为 14.3 d, 在潮汐径流波浪作用下的半交换时间为 4 d。

(3) 钦州湾内湾茅尾海的水体交换主要受制于潮汐和径流, 而外湾钦州湾的水体交换受制于潮汐和波浪。夏季波浪通过影响对流扩散效应, 大幅度减少了水体的半交换时间, 尤其是容易堆积污染物的近岸枝杈海域, 作用更加显著。

参考文献

[1] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志: 第十二分册 广西海湾[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
 [2] 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.
 [3] 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.
- [4] 杨斌,钟秋平,鲁栋梁,等. 钦州湾海域 COD 时空分布及对富营养化贡献分析[J]. 海洋科学,2014,38(3):20-25.
- [5] 李树华,童万平. 钦州湾潮流和污染物扩散的数值模型[J]钦州湾潮流的数值模拟,1987,6(2):30-37.
- [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.
- [7] 高劲松,陈波,陆海生,等. 钦州湾潮流及污染物输运特征的数值研究[J]. 广西科学,2014,21(4):345-350.
- [8] 陈振华,夏长水,乔方利. 钦州湾水交换能力数值模拟研究[J]. 海洋学报,2017,39(3):14-23.
- [9] 牙韩争,董德信,朱冬琳,等. 岸线变化对钦州湾污染物输移扩散的影响[J]. 广西科学,2018,25(1):51-56.
- [10] 张坤,娄安刚,孟云,等. 钦州湾海域纳潮量和水交换能力的数值模拟研究[J]. 海洋环境科学,2014,33(4):585-591.
- [11] CHEN C S, HUANG H S, BEARDSLEY R C, et al. A finite volume numerical approach for coastal ocean circulation studies; Comparisons with finite difference models [J/OL]. *Journal of Geophysical Research*, 2007,112(C3):C03018. DOI:10.1029/2006JC003485.
- [12] WANG J H, SHEN Y M, GUO Y K. Seasonal circulation and influence factors of the Bohai Sea; A numerical study based on Lagrangian particle tracking method [J]. *Ocean Dynamics*, 2010,60(6):1581-1596.
- [13] WANG J H, SHEN Y M. Development of an integrated model system to simulate transport and fate of oil spills in seas [J]. *Science China Technological Sciences*, 2010,53(9):2423-2434.
- [14] CHATFIELD C. The analysis of time series: An introduction [M]. 5th ed. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 1996.

Study on the Influence of Summer Wave on Water Exchange Capacity in Qinzhou Bay of China

CAO Xuefeng^{1,2}, CHEN Bo¹, XING Chuanxi², YU Jiewen³, GAO Jingsong⁴, XU Zhixin¹, SHI Hongyuan⁵, LIU Yongqing², ZHU Donglin¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Beibu Gulf Marine Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China; 2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian, Liaoning, 116023, China; 3. Dalian Compass Ocean Engineering Consultancy, Dalian, Liaoning, 116023, China; 4. Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530001, China; 5. School of Civil Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong, 264025, China)

Abstract: Based on finite-volume coastal ocean model with unstructured triangular grid, driven by eight harmonic constants of tidal components K1, O1, P1, Q1, M2, S2, N2, and K2, considering the two runoffs of the Qinjiang River and the Maoling River, a high-resolution three-dimensional hydrodynamic numerical model for Qinzhou Bay waters was established. By comparison with the observed data, the model can better simulate the hydrodynamic characteristics of the Qinzhou Bay waters. On this basis, wave-current coupling module and DYE-RELEASE module were merged to simulate the influence of summer wave on the current field structure and water exchange capacity of Qinzhou Bay waters. The results show that the impact of waves on current field in Qinzhou Bay waters is not significant at the time of maximum flood and maximum ebb, but the current velocity of Qinzhou Bay increases significantly at the time of flood and ebb slack, especially at the time of ebb slack. On the average, the half exchange time of Qinzhou Bay under the effect of tidal runoff is 14.3 d, and the half exchange time under the effect of tidal runoff and wave is 4 d. Water exchange in the inner bay of Maowei Sea is mainly subject to tides and runoff, while water exchange in the outer bay of Qinzhou Bay is subject to tides and waves.

Key words: water exchange capacity, half exchange time, wave, numerical simulation, Qinzhou Bay