

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, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2017.03.002

Chen Zhenhua, Xia Changshui, Qiao Fangli. Numerical simulation of water exchange in the Qinzhou Bay of China[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(3): 14—23, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2017.03.002

钦州湾水交换能力数值模拟研究

陈振华^{1,2,3,4}, 夏长水^{2,3,4}, 乔方利^{2,3,4*}

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 3. 国家海洋局 海洋环境科学和数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 4. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266071)

摘要: 基于普林斯顿海洋模式(Princeton Ocean Model, POM), 以 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 M_4 和 MS_4 6 个分潮为驱动, 建立了包含漫滩处理的高分辨率钦州湾水动力模式。与现场观测的数据对比表明, 该模式能较好地刻画钦州湾的水动力特征。在此基础上建立了水质模型, 模拟钦州湾的水交换过程。模拟结果表明: 钦州湾水交换能力整体上较强, 整个湾平均的水体半交换时间约为 18 d, 水体平均存留时间为 45 d。空间分布上, 钦州保税港区以南海域水交换能力最强, 半交换时间小于 1 d; 沿着水道向北, 水交换能力逐渐减弱; 茅尾海中部半交换时间为 26~28 d; 茅尾海的东、西、北 3 个部分存在水交换滞缓区, 半交换时间超过 50 d。数值实验表明, 采用漫滩技术对准确模拟钦州湾潮流速度和水交换能力非常重要, 不考虑漫滩过程会低估钦州湾的潮流速度和水体交换能力。水平扩散系数对流速及交换时间都有影响, 但影响有限。

关键词: 钦州湾; 数值模拟; 水质模型; 水交换能力; 半交换时间; 平均存留时间

中图分类号: P731.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2017)03-0014-10

1 引言

钦州湾位于北部湾顶部、广西沿岸中段, 海域覆盖 ($21^{\circ}33'20'' \sim 21^{\circ}54'30''N$, $108^{\circ}28'20'' \sim 108^{\circ}45'30''E$)。该湾由内湾(茅尾海)和外湾(钦州湾)所构成, 中间狭窄, 两端宽阔, 东、西、北 3 个方向被陆地所环绕, 南面与北部湾相通, 是一个半封闭型天然海湾^[1]。内湾大面积养殖大蚝、青蟹、对虾等当地特色海产品, 也是茅岭江和钦州江的入海口。随着钦州市经济建设和养殖业迅速发展, 钦州湾水体富营养化呈明显上升

趋势^[2]。水交换能力是评价海湾环境容量和环境质量的重要指标, 交换能力的强弱直接关系到海湾的水质状况。对钦州湾海域的流场结构、水交换能力的科学认识是对其科学合理开发的重要基础, 开展海域污染物输运及水交换能力研究具有重要的科学意义。

对水交换的研究目前还没有完全确定、成熟的研究方法^[3]。近年来, 国内外对海湾水交换能力的研究主要有箱式模型、拉格朗日(Lagrange)质点追踪法和物质输运扩散法等。箱式模型假定纯净海水进入箱内立即与受污染海水充分混合和稀释, 这容易高估海

收稿日期: 2016-11-04; 修订日期: 2016-12-12。

基金项目: 国家自然科学基金委员会——山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(U1606405); 公益项目——印度洋海域海洋环境数值预报系统研制与示范(201005033-2); 广西教育厅科研项目——钦州湾水动力机制及水交换能力数值研究(201010LX444)。

作者简介: 陈振华(1972—), 男, 广西壮族自治区北海市人, 博士研究生, 主要从事陆架和海洋环流数值研究。E-mail: chenzh@fio.org.cn

* 通信作者: 乔方利, 研究员, 博士生导师。E-mail: qiaofl@fio.org.cn

湾的水交换能力;而拉格朗日质点追踪法虽然考虑流场非均匀性和迁移与输运作用,但却无法反映真实的物质扩散过程。采用三维对流-扩散模式来研究物质输运扩散,进而量化分析海洋水交换能力是目前广为接受和采用的方法。

对中国近海港湾的水体交换能力研究已有了不少成果。赵亮等^[4]采用质点追踪方法对胶州湾的水交换能力做了数值研究。孙英兰和张越美^[5]基于三维物质输运方程,分析了丁字湾的水交换能力,并给出了丁字湾内水交换率和水交换半更换期的空间分布。吕新刚等^[6]基于高分辨率 POM 模式分别采用两种方法对胶州湾的水交换能力做了研究。

目前对钦州湾水交换能力的研究相对较少。夏华永等^[7]于 1996 年基于箱式模型对钦州湾污染物扩散、海水交换率等了初步探讨,得出钦州湾在大潮时水半更换时间是 7.2 个潮周期的结论。其后,蒋磊明等^[8]利用 2006—2008 年间对钦州湾海流的观测资料,基于三维潮流模拟,计算了该湾的纳潮量和大、小潮的水交换半更换周期,结果表明该湾在大、小潮水交换的半更换周期分别为 1.70 个周期和 4.53 个周期。以上研究只是研究了钦州湾的平均水交换能力,并且结论定量差别较大。钦州湾内地形复杂,流场分布很不均匀,湾内不同区域的水交换能力差别很大。同时,钦州湾开发以来,由于围填等原因,岸线、地形发生了较大变化,所以有必要采用高分辨率数值模式,重新定量评估该湾的水交换能力。本文采用最新的地形数据,构建了一个高分辨率的三维数值模型,并采用了漫滩处理技术,力求能较真实地反映钦州湾的水动力过程及水体交换能力。

2 数值模型

钦州湾是强潮区,潮汐潮流在钦州湾水动力中占主导地位。本文以潮为驱动力,构建三维水动力模型,并在此基础上构建水质模型来研究钦州湾的水交换能力。

2.1 水动力数值模型

水动力模型基于最新版普林斯顿海洋模式(Princeton Ocean Model, POM)建立。POM 是 20 世纪 70 年代发展起来的一个基于原始方程的三维海洋模式^[9],它包含了海洋运动的主要物理过程。经过几十年的应用和发展,该模式已被广泛应用于世界各海区,并被很多的实测资料所验证。此模式也在我国近海多个海区广泛使用,均取得良好模拟效果^[6,10-11]。

模式计算范围设置为(21.56°~21.933°N, 108.445°~108.745°E),包括了茅尾海、龙门、三墩等。水深主要取自国家海洋局第一海洋研究所 2009 年实测数据,同时利用海图资料加以补充。数值模式的水平分辨率为 100 m×100 m,垂向采用 σ 坐标,均匀分为 6 层。垂直混合系数由 Mellor-Yamada 2.5 阶湍流混合模型^[12]计算,水平黏性系数和扩散系数通过 Smagorinsky 公式^[13]获得:

$$(A_M, A_H) = (C_{vis}, C_{dif}) \Delta x \Delta y \times \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中, u 、 v 分别为速度在 x 和 y 方向上的分量; Δx 和 Δy 是网格水平间隔;本文中系数 C_{vis} 、 C_{dif} 分别取 0.2 和 0.01。

模式考虑了 4 个主要分潮 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 和 2 个浅水分潮 M_4 和 MS_4 。根据方国洪等^[14]提出的准调和分析方法,侧开边界条件由水位强迫:

$$A = \sum_i D_i H_i \cos(\omega'_i t - g_i - d_i), \quad (2)$$

式中, A 表示潮位; $i=1\sim6$ 代表某分潮; ω'_i 为经过订正的潮汐角频率; D 和 d 分别为振幅和迟角订正; H 和 g 分别为振幅和迟角,由北部湾潮汐潮流模式结果^[15]插值得出。闭边界采用固壁边界条件。

茅尾海和钦州湾有非常广阔的滩涂区域,特别在茅尾海内,相当一部分海域水深小于 2 m,而该海域的潮振幅较大,低潮时浅水区域会干出。为了准确刻画研究海域的潮汐和潮流动力过程,本文采取了漫滩处理技术^[16-18]。模式时间步长为 0.6 s,从静止启动,积分 1 d 后模式稳定,取 3 d 后的结果用于验证和分析。

2.2 水质模型

以被动溶解态保守物质作为湾内水体交换示踪物,水质模型控制方程为:

$$\frac{\partial CD}{\partial t} + \frac{\partial CUD}{\partial x} + \frac{\partial CVD}{\partial y} + \frac{\partial C\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right] + F, \quad (3)$$

其中,

$$F = \frac{\partial}{\partial x} \left(DA_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(DA_H \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (4)$$

式中, C 为示踪物浓度; U 和 V 代表流速东向分量和北向分量; ω 为 σ 坐标系下的垂直速度; K_H 和 A_H 分别是示踪物的垂直和水平湍流扩散系数; D 为瞬时水深。

水质模型同样采用漫滩处理,由水动力模型确定

干湿点,参照文献[5]处理。水质模型在使用前进行了示踪物浓度守恒性检验。初始场浓度和水流边界的浓度均设定为 1 单位,在计算海域无示踪物源、汇条件下,积分 50 d 后,绝大部分海域的浓度场仍保持在 1 单位,只有个别点浓度值低于 0.98 单位。这表明了模式具有良好的质量守恒性。

钦州湾是一个南北窄长的海湾,南面通过一个喇叭口与外海相连。基于外海海水比湾内海水干净的观测事实,以计算区域水体的初始浓度设置为 1 个单位,从南开边界进入计算区域的水体浓度设置为 0。水质模型在水动力模型运行 5 d 后的最高潮位时启动,研究经过一定时间后水体中示踪物浓度的变化。

2.3 水交换算法

目前,描述水交换能力还没有完全统一的标准,不同的研究往往采用不同的定义。本文采用应用较多的两个指标来评价钦州湾的水交换能力:一是 Luff 和 Pohlmann^[19]引入的半交换时间,即保守物质浓度降为初始浓度一半所需的时间,二是 Takeoka^[20]提出的“平均存留时间”(mean residence time):

$$\theta = \int_0^{\infty} \frac{C(t)}{C(t_0)} dt, \quad (5)$$

式中, t_0 和 t 分别表示初始时刻和某一指定时间。

3 模拟结果验证与分析

3.1 模拟结果验证

为了检验数值模式的模拟效果,使用了不同时间段的潮位和潮流观测资料。4 个潮位观测点分别位于 T1 (21°45'N, 108°33'E)、T2 (21°43'9"23"N, 108°34'7"55"E)、T3 (21°44'1'20"N, 108°34'6'47"E) 和 T4 (21°51'N, 108°35'27"E)。其中 T1 和 T2 的观测时间为 2010 年 1 月 15 日至 2 月 14 日,共 30 d。T3 观测时间为 2010 年 11 月 22 日至 12 月 25 日, T4 观测时间为 2010 年 1 月 29 日至 2 月 3 日。观测采用的仪器为潮位仪 RBR XR-420-TG, 数据采样间隔为 10 min。4 个潮流观测点,分别位于 U1 (21°43'457"N, 108°34'012"E), U2 (21°46'381"N, 108°33'016"E), U3 (21°50'058"N, 108°29'291"E), U4 (21°50'006"N, 108°32'377"E)。观测时间均为 2010 年 1 月 30 日 12 时至 1 月 31 日 14 时。观测仪器为 ADCP, TRDI Sentinel 600 kHz。站位分布见图 1。

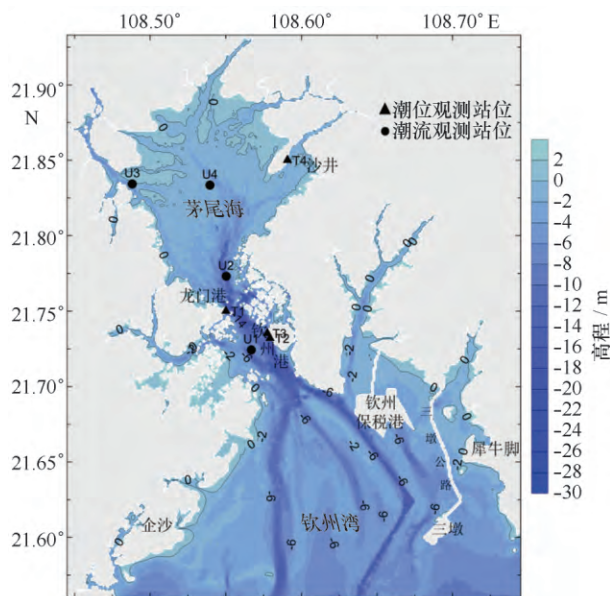


图 1 钦州湾水深及潮位、潮流观测站位分布

Fig. 1 Water depth and location of tide and tidal current observation in the Qinzhou Bay

圆点表示潮流观测站位置, 三角形表示潮位观测站位置

Black dot for tidal current observation, and black triangle for tide elevation observation

将模拟的 T1(龙门港)和 T2(钦州港) O_1 、 K_1 、 M_2 、 S_2 等 4 个主要分潮的调和常数与观测得到调和

常数进行了对比(表 1), 振幅的误差在 2 cm 以内, 迟角的最大误差小于 4.5°, 表明模式潮位计算结果

准确。

表 1 潮位站主要分潮调和常数观测与模拟的对比
Tab. 1 Comparison of the simulated and observed harmonic constant of tidal components

分潮	T1(龙门港)						T2(钦州港)					
	振幅/cm			迟角/(°)			振幅/cm			迟角/(°)		
	观测	模拟	误差	观测	模拟	误差	观测	模拟	误差	观测	模拟	误差
O ₁	92.38	93.37	0.99	44	42.21	-1.79	93.55	93.30	-0.25	39	40.11	1.11
K ₁	83.99	84.56	0.57	104	101.58	-2.42	85.6	84.82	-0.78	98	99.30	1.30
M ₂	37.54	38.30	0.76	195	190.99	-4.01	39.06	37.32	-1.74	183	186.11	3.11
S ₂	11.5	12.42	0.92	287	282.87	-4.13	10.65	11.87	1.22	274	276.84	2.84

图 2 是 4 个潮位观测站的水位观测时间序列与模拟结果比较。总体上看,模拟的潮位序列与观测资料吻合较好。2010 年 1 月 23 日左右的低潮期间,T1 和 T2 的实测水位比模拟水位偏低;2010 年 12 月 16 日左右的小潮低潮期,T3 的实测水位也比模拟水位低。经查询相应时间的气象资料,当时均存在强风,如 2010 年 12 月 16 日,T3 附近的最大风速为 11 m/s,平均风速 7 m/s,由此推断模拟误差可能是由于当时强劲的东北风造成的异常减水。

图 3 是 4 个潮流观测站实际观测潮流(垂向平均)与模拟结果(垂向平均)的对比。在大多数时刻,模拟的流速、流向与观测结果都吻合得较好。

以上对钦州湾潮汐和潮流模拟验证的结果表明,本文所建立的水动力模式能较好地刻画研究海域的水位和水流特征,模拟精度较高,能为水质模型提高可信的动力背景场。

3.2 钦州湾潮汐潮流特征

由以上对潮汐的观测和模拟(图 2)可以看出,钦州湾是典型的全日潮海域,1 个月中大部分时间每天只有 1 次涨落潮。钦州湾内有呈人字形深水水道,颈部位于龙门附近。受地形限制,钦州湾的潮流主要呈往复流动,流向基本与水道一致,落潮流速远大于涨潮流速,在某些海域,落潮流速可达涨潮流速的 1.8 倍,这对钦州湾的清淤和排污是非常有利的。潮流最大值区域位于龙门水道,最大值可达 1.8 m/s^[21]。关于钦州湾的潮汐潮流特征,已有一些研究成果^[22-23],结论基本一致。本文采用钦州湾围填后的最新地形,围填主要在钦州保税港区、三墩公路、三墩岛等区域,数值模拟结果表明,围填后以上区域附近的潮汐潮流发生了很大的变化,但对茅尾海及远离围填区处的海

域影响不大。

3.3 钦州湾水交换能力分析

由水质模型所得的不同时刻的浓度场分别计算了水体半交换时间和平均存留时间,其水平分布见图 4 和图 5。从图 4 看,水体半交换时间在钦州湾不同地点差别很大:保税港区以南海域以及龙门港以南的主水道区半交换时间最短,小于 1 d;沿着水道向北,进入茅尾海后半交换时间迅速增大,茅尾海中部半交换时间为 26~28 d;再往北,半交换时间继续增加,湾顶附近超过了 60 d。保税港区、三墩等新围填区的存在,使得其附近海域的水交换能力相对于口门同距离的其他区域较弱,但由于离口门较近,水交换能力仍比较强,半交换时间约 10 d。整个湾平均的水体半交换时间为 17.7 d,远大于夏华永等^[7]基于箱式模型计算的 7.2 个潮周期(约 7.2 d)和蒋磊明等^[8]同样基于箱式模型计算的 1.70 个周期(小潮,约 1.7 d)和 4.53 个周期(大潮,约 4.5 d)。这是由于箱式模型假定外部海水进入湾内后立即与湾内水体充分混合,因而高估了水体交换能力。水体平均存留时间的水平分布态势(图 5)与半交换时间分布大致吻合:保税港区以南海域水体存留时间最小,在 20 d 以内;沿水道往北迅速增大,湾顶最大,局部区域超过 150 d,表示该区域的海水基本与外海水没有交换。整个湾平均的水体存留时间为 45 d。半交换时间和平均存留时间的水平分布图均表明茅尾海的东、西、北 3 个部分均存在水交换滞缓区,应尽量减少在这些区域的排污。

图 6 给出了示踪物浓度水平分布的演变趋势。水质模型启动后,在随后的涨潮期内,外部海水进入计算区域,钦州保税港区以南海域示踪物浓度由于混

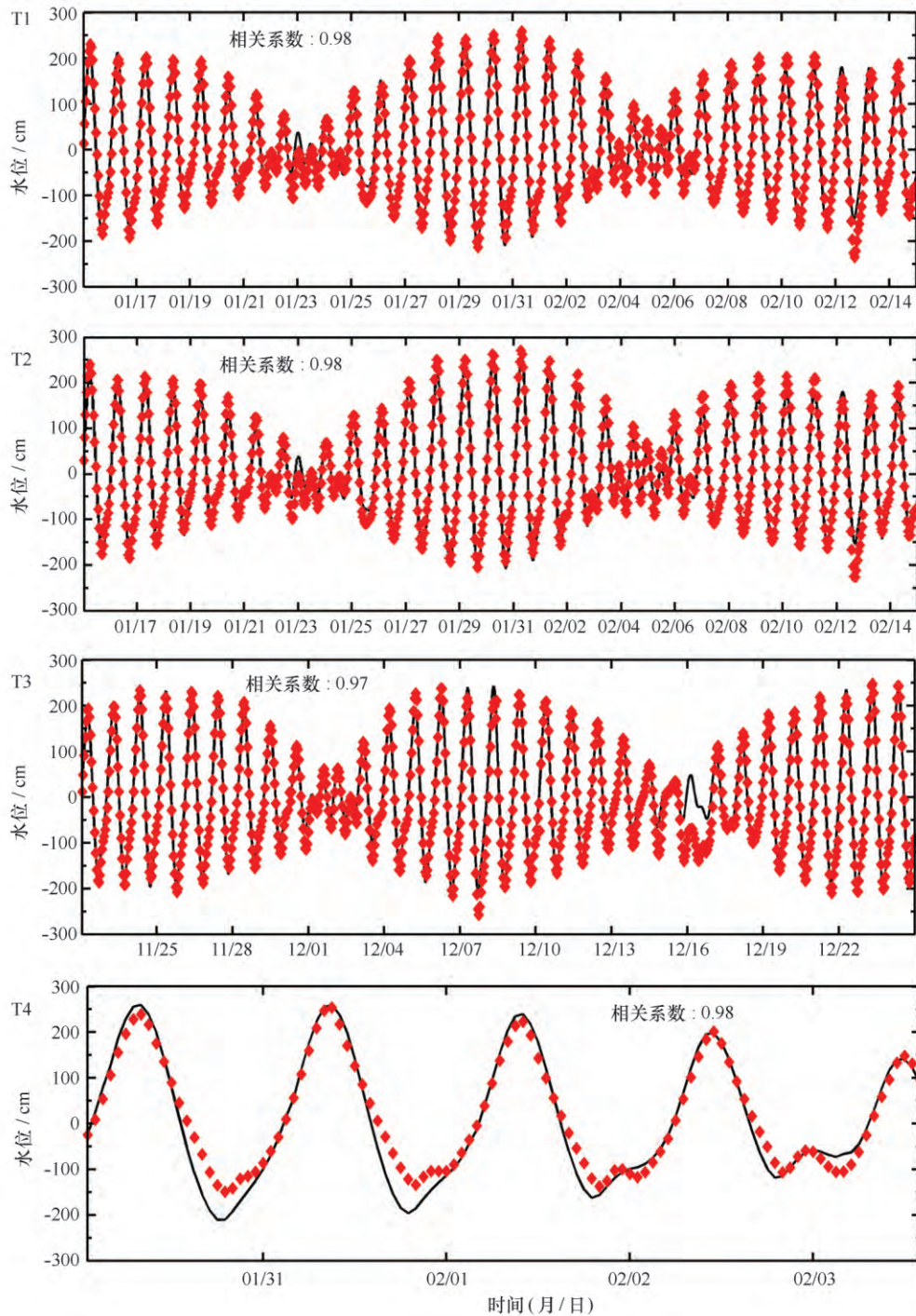


图 2 4 个水位观测站的模拟与观测水位对比

Fig. 2 Comparison of the simulated and observed tidal elevation at observation stations

黑线表示模拟值,红点表示观测值

Black line for simulation and red rhombus for the observed

合迅速降低,并随潮涨潮落而振荡,总体上呈降低趋势。不同海域由于离口门距离远近不同,浓度降低速度有明显差异:保税港区以南海域示踪物浓度在水质模型启动 5 d 后基本降到 0.2 单位以下,渐趋于稳定;

龙门附近海域在 60 d 后,茅尾海中部海域在 100 d 后浓度降到 0.2 单位左右;150 d 后除了茅尾海顶部部分海域,整个水质计算区域的浓度趋于稳定。图 7 是湾内示踪物平均浓度随时间变化曲线。

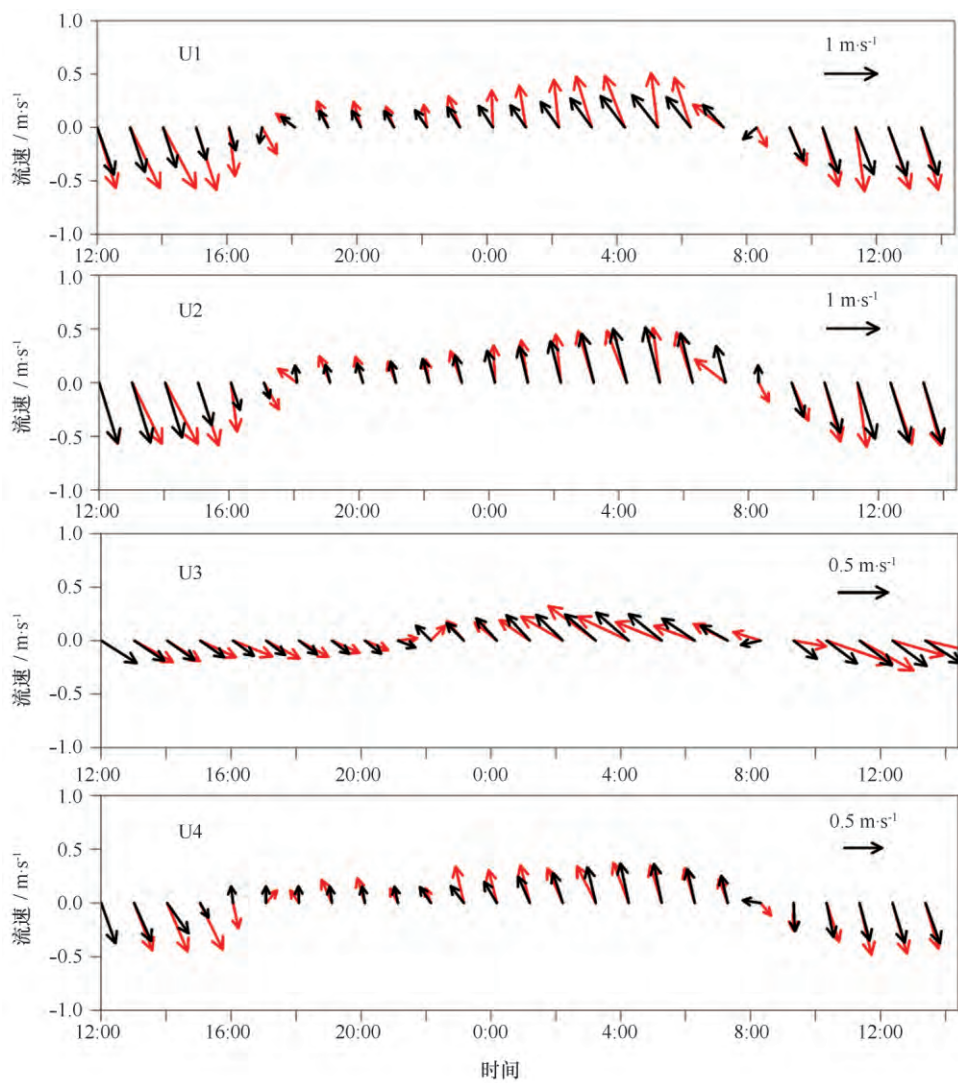


图 3 4 个潮流观测点的模拟与观测流速矢量比较

Fig. 3 Comparison of the simulated and observed velocity vectors at observation stations

黑色和红色箭头分别表示模拟和观测流速矢量

Black and red arrows indicate the simulated and observed vectors, respectively

4 讨论

4.1 漫滩影响分析

钦州湾滩涂广阔,特别是茅尾海内,滩涂面积占海域面积的一半以上^[1]。为了研究漫滩对钦州湾水交换能力计算的影响,本文设计了一个不考虑漫滩的数值试验:在数值模式中关闭漫滩处理过程,将潮周期内平均水深大于 0 的点视为水点,最小水深设为 2.5 m,其余点视为陆地点不参与计算,其他配置不变。

以 U1、U2、U3、U4 4 个点为例,分析采用漫滩技术与否对潮流模拟的影响。结果显示,不采用漫滩技

术,这 4 个潮流对比点的流速均比采用了漫滩技术模拟的流速要小,减少幅度为 10%~20%。吕新刚等^[10]研究漫滩过程对胶州湾潮流模拟的影响时,也有类似的结论。

图 8 给出了非漫滩处理情况下钦州湾水体半交换时间的水平分布。与采用漫滩技术的结果(图 4)对比,不考虑漫滩时滩涂区域的水体半交换时间明显增加,茅尾海东、西、北部滩涂区域的水体半交换时间从 36 d 左右增加到 46 d 以上,增加幅度约 30%。采用漫滩处理,符合浅水区域水体运动真实的物理过程,能更准确地刻画水体交换能力。

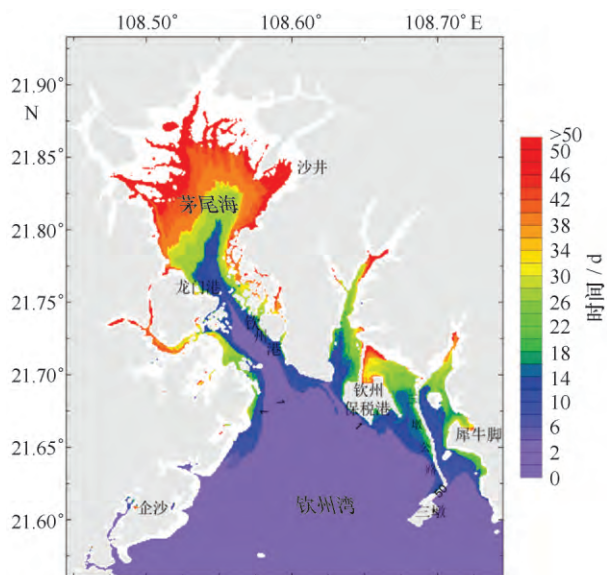


图 4 钦州湾水体半交换时间水平分布

Fig. 4 Horizontal distribution of half-life time in the Qinzhou Bay

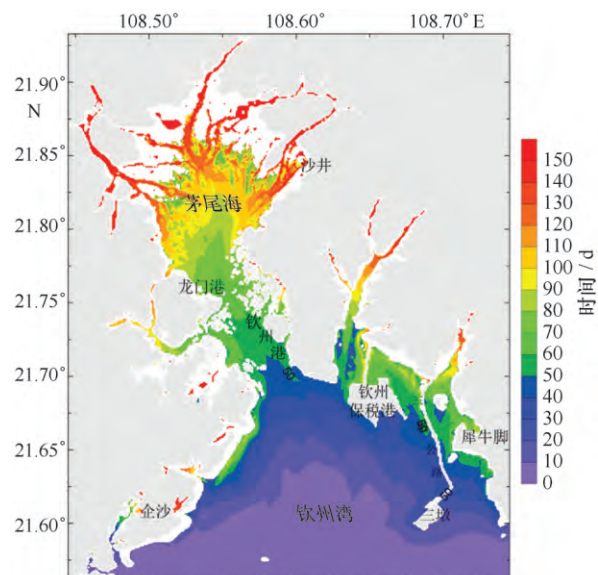


图 5 钦州湾水体平均存留时间水平分布

Fig. 5 Horizontal distribution of mean residence time in the Qinzhou Bay

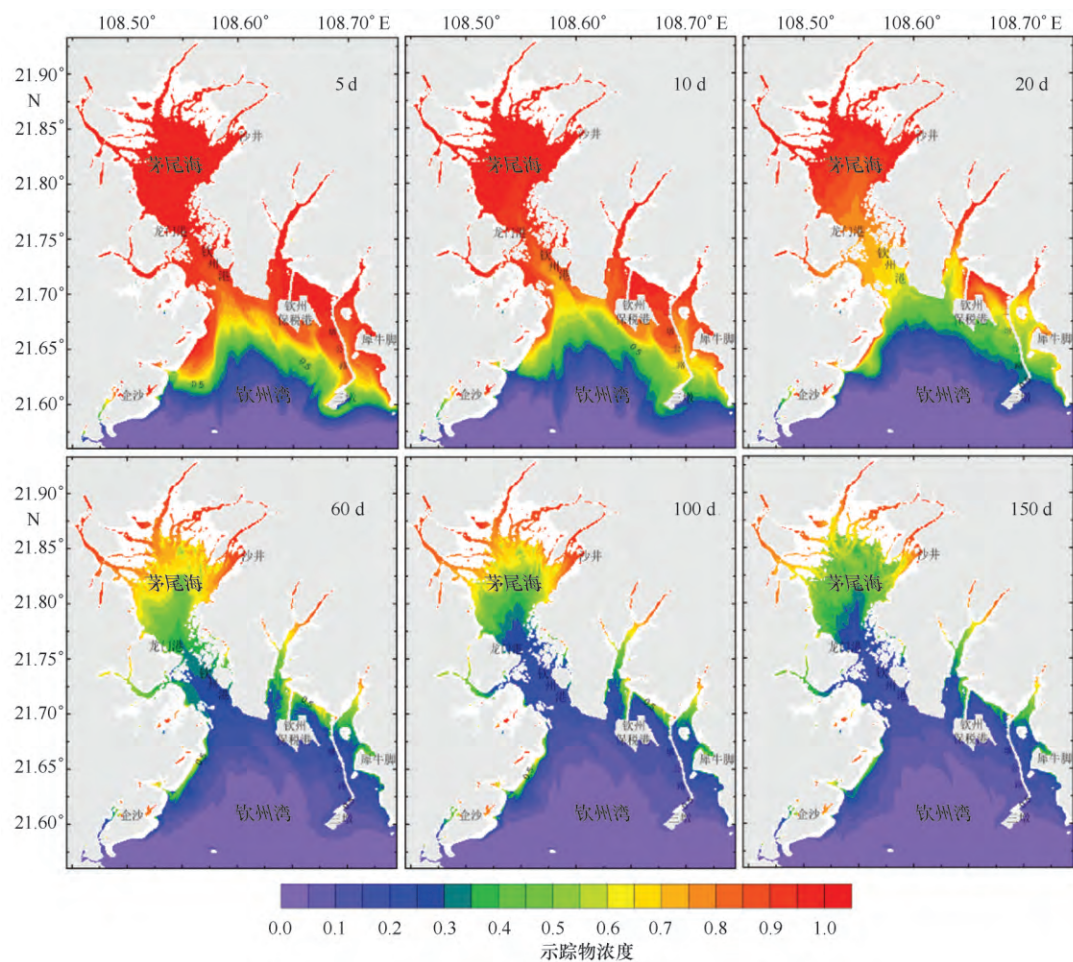


图 6 示踪物浓度水平分布的时间演变

Fig. 6 Evolution of horizontal distribution of tracer concentration

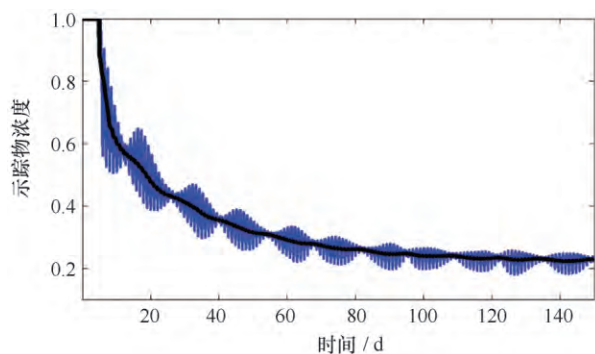


图7 钦州湾内示踪物平均浓度时间演变曲线
(黑线为5 d平滑曲线)

Fig. 7 Trends in average concentration of tracer in the Qinzhou Bay (black line indicates 5 d-smoothed)

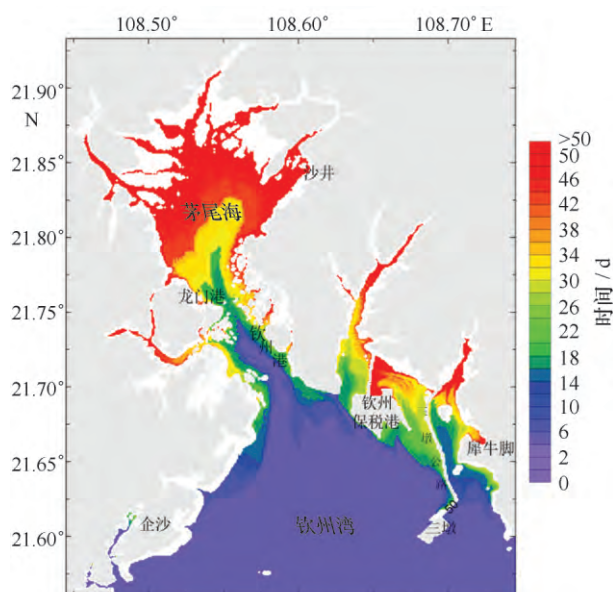


图8 非漫滩处理情况下钦州湾水体半交换时间水平分布

Fig. 8 Horizontal distribution of half-life time without wet/dry process in the Qinzhou Bay

4.2 扩散系数的影响分析

水体交换时间与湍流扩散的强度有关。为了研究水平扩散系数对流速及交换时间的影响,本文分别将扩散系数扩大10倍及缩小到原来的1/10。图9显示了图1中的U1点在不同扩散系数下的流速变化,图10是示踪物平均浓度的变化。显然,水平扩散系数相差100倍,但流速变化不大,最大变化幅度在10%左右,半交换时间也只是小幅度变化,整个钦州湾平均半交换时间只相差2天,变化幅度在10%左右。可见,水平扩散系数调整对流速及交换时间都有影响,但影响不大。同时,本文通过对流速的验证,也

说明了使用的水平扩散系数是恰当的。

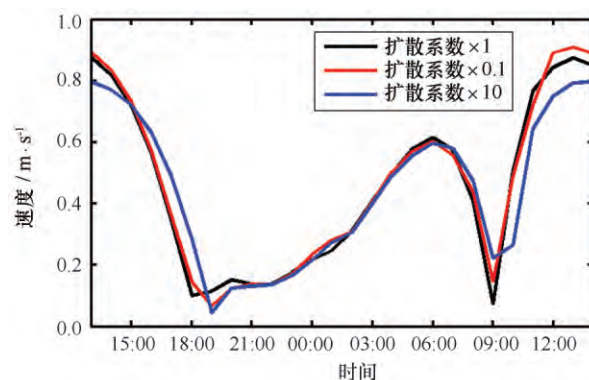


图9 不同扩散系数下流速的变化

Fig. 9 Change in current with different dispersion coefficients

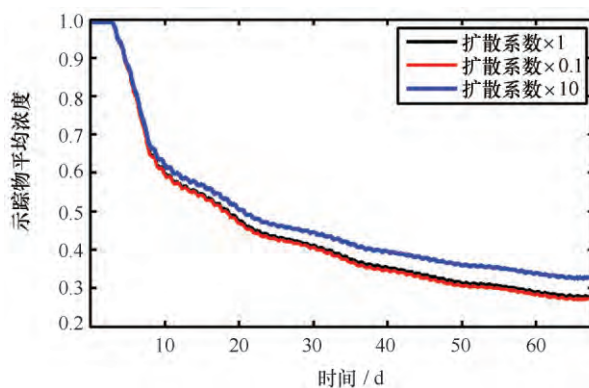


图10 不同扩散系数下示踪物平均浓度变化曲线
(5 d平滑)

Fig. 10 Trends in average concentration of tracer with different dispersion coefficients in the Qinzhou Bay
(5 d-smoothed)

5 结论

以4个主要分潮和2个浅水分潮为驱动,构建了一个高分辨率的漫滩三维水动力模型。与4个潮位观测点和4个潮流观测点的观测数据对比,模拟精度较高。在此基础上建立了水质模型,模拟钦州湾的水体交换过程。结果表明:钦州湾水交换能力整体上较强,整个湾平均的水体半交换时间约为18 d,水体平均存留时间为45 d。空间分布上,保税港区以南海域水交换能力最强,半交换时间小于1 d;沿着水道向北,水交换能力逐渐减弱,茅尾海中部半交换时间为26~28 d;茅尾海的东、西、北3个部分存在水交换滞缓区,半交换时间超过了50 d,应尽量避免在这些区

域排污。通过数值实验,讨论了漫滩过程和扩散系数对钦州湾潮流及水交换能力模拟的影响。实验结果表明,采用漫滩处理技术对准确模拟钦州湾潮流速度

和水交换能力很关键,不考虑漫滩过程,会低估潮流速度和水交换能力。水平扩散系数调整对流速及交换时间都有影响,但影响不大。

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)[M]. 北京:海洋出版社, 1993.
Compiling Committee of Records of China Gulf. Records of China Gulf 12th Fascicule[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993
- [2] 韦蔓新, 赖廷和, 何本茂. 钦州湾丰、枯水期营养状况变化趋势及其影响因素[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(3): 16—21.
Wei Manxin, Lai Tinghe, He Benmao. Change trend of nutrient conditions and influencing factors during high and low water period in Qinzhou Bay [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(3): 16—21.
- [3] 王聪, 林军, 陈丕茂, 等. 年平均风场作用下大亚湾水交换的数值模拟[J]. 上海海洋大学学报, 2009(3): 351—358.
Wang Cong, Lin Jun, Chen Pimao, et al. Numerical simulation of annual average wind's impact on water exchange in Daya Bay[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2009(3): 351—358.
- [4] 赵亮, 魏皓, 赵建中. 胶州湾水交换的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(1): 23—29.
Zhao Liang, Wei Hao, Zhao Jianzhong. Numerical study on water exchange in Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(1): 23—29.
- [5] 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(自然科学版), 2003, 33(1): 1—6.
Sun Yinglan, Zhang Yuemei. A numerical model of pollutant transport and seawater exchange in Dingzi Bay[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 33(1): 1—6.
- [6] 吕新刚, 赵昌, 夏长水, 等. 胶州湾水交换及湾口潮流特征的数值研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(2): 20—30.
Lü Xingang, Zhao Chang, Xia Changshui, et al. Numerical study of water exchange in the Jiaozhou Bay and the Tidal residual currents near the bay mouth[J]. Haiyang Xuebao, 2010, 32(2): 20—30.
- [7] 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(2): 65—70.
Xia Huayong, Yin Zhongbin, Ge Wenbiao. A study on physical selfpurification of the Qinzhou Bay[J]. Guangxi Sciences, 1996(2): 65—70.
- [8] 蒋磊明, 陈波, 邱绍芳, 等. 钦州湾潮流模拟及其纳潮量和水交换周期计算[J]. 广西科学, 2009(2): 193—195.
Jiang Leiming, Chen Bo, Qiu Shaofang, et al. Calculation of tidal prism and water exchange period and simulation of current about Qinzhou Bay [J]. Guangxi Sciences, 2009(2): 193—195.
- [9] Blumberg A F, Mellor G L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model[J]. Three-dimensional Coastal Ocean Models, 1987, 4: 1—16.
- [10] 吕新刚, 乔方利, 夏长水. 胶州湾潮汐潮流流动边界数值模拟[J]. 海洋学报, 2008, 30(4): 21—29.
Lü Xingang, Qiao Fangli, Xia Changshui. Numerical simulation of tides and three-dimensional tidal currents in Jiaozhou Bay by a movable land-sea boundary model[J]. Haiyang Xuebao, 2008, 30(4): 21—29.
- [11] Shan F, Qiao F L, Lü X G, et al. A numerical study of the wintertime double-warm-tongue structure in the Huanghai (Yellow) Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica. 2009, 28(4): 8—15.
- [12] Mellor G L, Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems[J]. Reviews of Geophysics, 1982, 20(4): 851—875.
- [13] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99—164.
- [14] 方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
Fang Guohong, Zheng Wenzhen, Chen Zongyong, et al. Analysis and Prediction of Tides and Tidal Currents[M]. Beijing: China Ocean Press, 1986.
- [15] 赵昌, 吕新刚, 乔方利. 北部湾潮波数值研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(4): 1—11.
Zhao Chang, Lü Xingang, Qiao Fangli. Numerical study of the tidal waves in the Gulf of Tonkin[J]. Haiyang Xuebao, 2010, 32(4): 1—11.
- [16] Oey L Y. A wetting and drying scheme for POM[J]. Ocean Modelling, 2005, 9(2): 133—150.
- [17] Oey L Y. An OGCM with movable land-sea boundaries[J]. Ocean Modelling, 2006, 13(2): 176—195.
- [18] Oey, L Y, Ezer T, Hu C, et al. Baroclinic tidal flows and inundation processes in Cook Inlet, Alaska: numerical modeling and satellite observations[J]. Ocean Dynamics, 2007, 57(3): 205—221.
- [19] Luff R, Pohlmann T. Calculation of water exchange times in the ICES-boxes with a eulerian dispersion model using a half-life time approach[J]. Ocean Dynamics, 1995, 47(4): 287—299.
- [20] Takeoka H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea[J]. Continental Shelf Research, 1984, 3(3): 311—326.
- [21] 邱绍芳, 侍茂崇, 陈波. 钦州湾潮流特征分析[J]. 海洋通报, 2003, 22(3): 9—14.
Qiu Shaofang, Shi Maochong, Chen Bo. Analysis of tidal current characteristics in Qinzhou Bay[J]. Marine Science Bulletin, 2003, 22(3): 9—14.

- [22] 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(2): 7—14.
Song Dehai, Bao Xianwen, Zhu Xueming. Three-dimensional simulation of tidal current in Qinzhou Bay[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009(2): 7—14.
- [23] 李树华, 方龙驹. 钦州湾潮汐和潮流的变化特征[J]. 海岸工程, 1989, 8(3): 39—45.
Li Shuhua, Fang Longju. Distribution characteristics of tide and tidal current in Qinzhou Bay[J]. Coastal Engineering, 1989, 8(3): 39—45.

Numerical simulation of water exchange in the Qinzhou Bay of China

Chen Zhenhua^{1,2,3,4}, Xia Changshui^{2,3,4}, Qiao Fangli^{2,3,4}

(1. College of Oceanic and Atmospheric Science, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 3. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modelling (MASNUM), State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 4. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao 266071, China)

Abstract: A hydrodynamic model that contains six main tidal components (i. e. M_2 , S_2 , K_1 , O_1 , M_4 , and MS_4) and wet/dry process is developed based on Princeton Ocean Model (POM), and applied for the Qinzhou Bay of China. The simulated water elevations and current agree well with field observations. And on this basis, a dispersion model for water quality is established to invest ability of water exchange in this bay. Our model gives a mean half-life time of 18 days and mean residence time of 45 days, suggesting a relatively strong ability of water exchange. The half-life time is shortest and less than one day in the south of Qinzhou Bonded Port, but prolongs from southwest to northeast, in range of 26—28 days in the central Maowei Sea, and exceeds 50 days in the east, west and north of the Maowei Sea. The numerical experiments suggest that simulation without wet-dry process may underestimate velocity of tidal current and ability of water exchange in the Qinzhou Bay.

Key words: Qinzhou Bay; numerical simulation; dispersion model; water exchange; half-life time; mean residence time