

# 基于 MIKE3 的丰枯水期防城湾水交换能力研究<sup>\*</sup>

周争桥<sup>1\*\*</sup>, 夏维<sup>1</sup>, 邱文博<sup>2</sup>, 李冠宇<sup>2</sup>

(1. 交通运输部南海航海保障中心广州海事测绘中心, 广东广州 510320; 2. 国家海洋技术中心, 天津 300111)

**摘要:** 为了对防城湾水交换能力有全面的认识, 本文基于无结构的三角网格建立高分辨率的 MIKE3 水动力数值模型, 采用 Lagrange 质点追踪方法, 选取水体半交换周期和交换率作为评价指标, 评价防城湾丰枯水期水交换能力。结果表明: 防城湾水交换主要受径流和潮流控制, 因防城河的存在, 西湾保守物质浓度的空间分布呈现由河口向湾外增加趋势, 东湾的保守物质浓度的空间分布呈现由湾口向湾内增加趋势, 随着时间的增加, 两湾保守物质浓度下降速率降低; 西湾水交换时间明显少于东湾, 半交换期在丰水期为 1.7 d, 在枯水期为 3.6 d; 东湾在丰水期半交换时间为 15.2 d, 在枯水期为 27.8 d。

**关键词:** MIKE3 水交换 水交换半周期 水交换率 防城湾

中图分类号: P731.2 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2020)03-0311-08

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20200617.001

## 0 引言

防城湾地处北回归线以南的低纬度地区, 属于亚热带海洋性季风气候, 冬季温和, 夏季多雨, 季风明显, 受灾害性天气影响较明显。防城湾分为东湾和西湾, 两湾被陆地隔开, 通过狭长水道连通, 湾区被主城环抱, 人口密集, 工业发达, 每年有大量的污水排入海湾。因防城河的存在, 目前污水口多放置在西湾。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, 海湾的水质情况与水交换能力的强弱直接相关<sup>[1]</sup>。在径流和潮动力等条件下, 开展防城港东、西湾海域水交换能力的研究, 形成海湾交换能力的科学认识, 以期制订合理的对策, 降低对海湾生态环境的影响, 对防城港东、西湾未来的合理

开发利用有着重要的科学意义。

箱式模型<sup>[2-3]</sup>是最早的水交换能力的研究方法, 随着数值计算模型的发展, 对流-扩散模型<sup>[4]</sup>和 Lagrange 质点追踪<sup>[5]</sup>逐渐成为研究海湾水交换的主要方法。高抒等<sup>[2]</sup>基于狭长海湾多箱物理模型研究了象山港的水交换机制, 该模型按垂向充分混合时间小于 1 d 和超过 1 d 两种情况分别运行, 结果均表明象山港是一个水体交换缓慢的海湾。赵亮等<sup>[6]</sup>基于 ECOM 水动力模型, 采用 Lagrange 质点追踪法研究了胶州湾的整体和分区域水交换能力, 指出深水区水交换时间为 7 d, 部分海区水交换时间最长可达 2 个月。李希彬等<sup>[7]</sup>应用三维水动力和水交换数值模型, 得出渤海湾水体半交换周期为 323 d, 海湾西北部海

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51909114)资助。

### 【作者简介】

周争桥(1981—), 男, 工程师, 主要从事海洋测绘学应用技术研究, E-mail: 28315@163.com。

### 【\*\*通信作者】

### 【引用本文】

周争桥, 夏维, 邱文博, 等. 基于 MIKE3 的丰枯水期防城湾水交换能力研究[J]. 广西科学, 2020, 27(3): 311-318.

ZHOU Z Q, XIA W, QIU W B, et al. Study on Water Exchange Capacity of Fangcheng Bay in Dry and Wet Season Based on MIKE3 Model [J]. Guangxi Sciences, 2020, 27(3): 311-318.

域和南部海域的水交换率较低。陈振华等<sup>[1]</sup>基于 POM 水动力模式,考虑漫滩过程,得出钦州湾的整体平均水体半交换时间约为 18 d。朱金龙等<sup>[8]</sup>利用二维对流-扩散模型,研究了岸线变迁影响下的芝罘湾水交换能力变化过程。曹雪峰等<sup>[9]</sup>基于无结构三角网格的 FVCOM 海洋模式,在考虑径流影响环境下,建立了钦州湾海域水动力数值模型,指出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。陶磊等<sup>[10]</sup>建立了基于欧拉观点的渤海区域水龄模型,通过对比潮汐单独作用下与潮汐和季风共同作用下渤海湾内水龄的时空分布特征,研究了这两个因素在渤海湾水交换中的作用,指出季风是促进渤海湾水交换的重要因素。目前,对流-扩散模型和 Lagrange 质点追踪是研究水交换时被广泛接受和采用的方法,王聪等<sup>[11]</sup>利用 Lagrange 质点追踪和 ECOM 模式研究了大亚湾的水交换能力,分析了两种方法结果差异产生的原因。

针对防城湾水交换的研究并不多,陈宪云等<sup>[12]</sup>采用传统方法,利用形态因子面积及潮差因子计算防城港东湾 2008 年和 2012 年的纳潮量,对比 2008 年,2012 年防城港东湾纳潮减少量占总纳潮量的 5.5%,导致该海域海水交换能力减弱。蒋磊明等<sup>[13]</sup>从纳潮量、潮流场、余流和波浪 4 个因素分析防城港钢铁项目的围填海工程对附近海域水动力环境的影响,认为围填海工程所引起的海流、波浪、纳潮量等因素的变化均较小,纳潮量最大减少 8%。上述研究为本研究提供了良好的研究基础,为了对防城湾水交换能力有全面的认识,本文基于无结构的三角网格建立了高分

辨率的 MIKE3 三维水动力数值模型,采用 Lagrange 质点追踪方法,选取水体半交换周期和水体交换律作为评价指标,开展防城湾水交换能力研究,以期防城湾的科学管理决策提供支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 模式介绍

采用丹麦水力学研究所的三维水动力模型 MIKE3 开展本研究。该模型相比 MIKE21 更适合深水水体的模拟研究,被广泛用于河口、海岸、海洋的研究中<sup>[14-17]</sup>。MIKE3 Flow Model 采用标准 Galerkin 有限元法进行水平空间离散,在时间上,采用显式迎风差分格式离散动量方程与输运方程。MIKE3 模型是基于雷诺平均化的 Navier-Stokes 方程,满足 Boussinesq 假设和静水压力分布。

### 1.2 数值模式配置

#### (1) 计算区域设置

根据北部湾海域的潮波运动规律,在确保计算区域边界效应对防城湾无影响的前提下,进行计算范围的确定。开边界为越南云屯县-中国北海市大风江口,网格在防城湾、防城河口和东兴湾进行了加密,计算区域及网格见图 1。计算区东西宽约 150 km,南北长约 75 km,总面积约为 50 km<sup>2</sup>,外海的计算网格步长为 1—2 km,在防城河流域周围海域网格最小分辨率约为 10 m,整个计算区域内水平方向上共有节点数 31 879 个,网格数 59 364 个。垂向上采用 sigma 坐标,垂向共分为 4 个  $\sigma$  层。

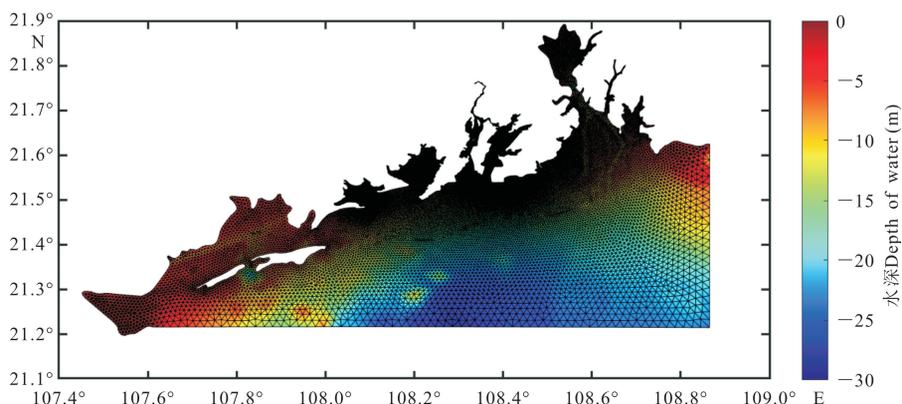


图 1 计算区域网格及水深示意图

Fig. 1 Diagram of grid and water depth in calculation area

## (2) 水深和岸界

外海水深数据采用美国国家地学测量中心提供的 Digital Bathymetric Database Version 5.2 (DBDB5) 原始数据集, 近岸水深采用电子海图以及测量资料, 在海图水深利用过程中, 通过沿海海洋站潮位与最低理论基准面关系对海图水深进行订正, 确保其准确性。

采用海图中岸界, 并利用海岸线勘测资料和 Google Earth 最新岸线信息进行订正。

## (3) 计算时间步长和底床糙率

模型计算时间步长根据 CFL 条件进行动态调整, 确保模型计算稳定进行, 保证计算的 CFL 数小于 0.8, 最小时间步长 0.1 s, 最大时间步长 120 s。

## (4) 模型初始条件

网格节点的水位与网格单元的流速都取 0。潮汐在开边界的振幅、迟角和潮流流速等要素使用 TPXO9 数据。TPXO9 是 2018 年最新发布的版本, 在中国近海有较高的准确度, 共包括 8 个基本分潮 (M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1), 2 个长周期分潮 (Mf 和 Mm), 以及 M4、Ms4、Mn4、2N2、S1 等分潮。本文在开边界通过潮位输入了 M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1 共 8 个分潮。

## (5) 外部强迫条件设置

风速和防城河流量设置根据多年统计资料进行确定。根据防城河中游的长歧水文站 1956—2004 年 49 a 资料分析, 全流域多年平均径流量为  $2.105 \times 10^{10} \text{ m}^3$ , 多年平均径流深 2 353.0 mm。丰水期 (4—10 月) 流量可达  $99.85 \text{ m}^3/\text{s}$ , 枯水期 (11 月—次年 3 月) 流量约为丰水期的 33%, 流量可达  $33.28 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据防城港市气象局提供的 1994—2014 年风速资料, 丰水期多年平均风速为 2.7 m/s, 枯水期多年平均风速为 3.7 m/s。

## (6) 工况设置

主要研究了两种条件下防城港东湾和西湾水体交换情况: 1) 丰水期 + SSW 向多年平均风 (2.7 m/s); 2) 枯水期 + NNE 向多年平均风 (3.7 m/s)。

## 1.3 评价指标

水交换是指水体通过对流和扩散等物理过程与周围水体相互混合, 在海湾、近岸海域的水交换研究中, 一般是通过定义各种时间尺度来描述水体交换能力的强弱或交换速度快慢, 并使用半交换时间、交换

率和存留时间等描述其时间尺度。水体交换率是指湾外水体通过潮汐作用进出河口或海湾, 每次进入或流出湾内的外海水占整个进潮量或退潮量的比率。而水交换半周期是指在潮汐和径流的共同作用下, 湾内水体交换出 50% 到湾外时的周期数, 在一定程度上表征了海湾的水交换能力, 在钦州湾<sup>[1]</sup>、胶州湾<sup>[6]</sup>、丁字湾<sup>[18]</sup>等海湾均有所应用。

水体交换半周期在不同的潮周期下出现不同的变化与当时的潮汐现象、径流作用、风的作用、温度盐度变化等因素有关, 因此要确定防城港海域水体交换的周期不能仅根据某一两次潮周期下的计算来确定, 而应该是建立在多个潮周期的计算上, 统计出各海域的平均水体交换率和平均水体交换半周期。

本文以海湾口门处作为分界线, 选取大潮落潮中间时刻释放保守物质, 保守物质浓度海湾内设置为 1, 湾外和径流设置为 0。由于潮流的动力作用, 防城湾内保守物质的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, 本文利用 PL64TAP 低通滤波器<sup>[19]</sup>滤掉潮流部分, 分别计算丰枯水期防城湾东、西湾保守物质浓度变化。本文对多个潮周期的水体交换率和水体交换半周期计算取平均值。

## 1.4 模型验证

为了验证模型的准确性, 利用水动力模型模拟了该海域的潮位和潮流状况, 潮位和海流的实测站位布设见图 2, 经纬度坐标和观测时间如表 1。

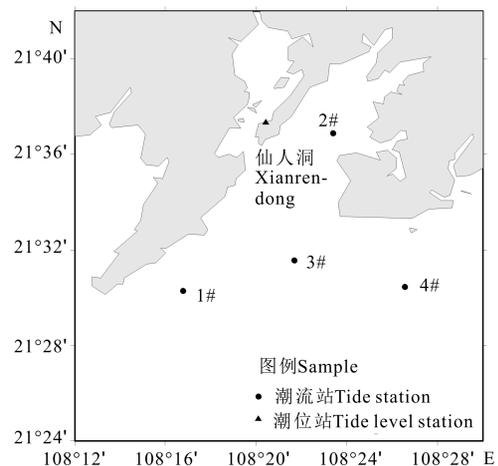


图 2 潮位和潮流验证点位置图

Fig. 2 Location map of verification points of tide level and tidal current

表 1 潮位和潮流验证点坐标

Table 1 Location of verification points of tide level and tidal current

验证点类型 The type of verification points	验证点 Verification points	经度 Longitude (°E)	纬度 Latitude (°N)
潮位 Tide level	仙人洞 Xianrendong	108.340 8	21.622 3
潮流 Tidal current	1#	108.279 8	21.505 2
	2#	108.390 0	21.615 0
	3#	108.361 3	21.526 3
	4#	108.442 9	21.507 6

注:观测时间为 2019-09-29—2019-09-30

Note: Observation time from 2019-09-29 to 2019-09-30

## 2 结果与分析

### 2.1 模型验证结果

#### (1) 潮位验证

模型输出了仙人洞临时潮位站位置 2019 年 9 月 29 日—2019 年 9 月 30 日潮位,将潮位数据和模型输出的潮位数据订正至同一基面,绘制潮位过程曲线(图 3)。结果显示,模型可以较好地模拟潮位过程。

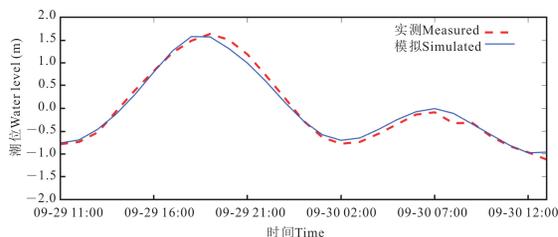


图 3 仙人洞验潮站潮位实测模拟过程曲线

Fig. 3 Simulation process curve of tidal level measurement at Xianrendong tidal station

#### (2) 潮流验证

采用 4 个潮流实测站位表层流速资料对模拟结果进行验证,观测时间为 2019 年 9 月 29 日—2019 年 9 月 30 日。潮流验证曲线见图 4。验证结果表明,对应观测点潮流模拟结果与实测资料基本吻合,能够较好地反映项目周边海域潮流状况。

潮位和潮流模拟结果显示,本文建立的水动力模

型可以真实反映防城湾实际的水体流动特点,可作为该海域水交换研究的模型。

### 2.2 流场特征分析

模拟结果(图 5)表明海域潮流性质为不正规日潮,涨潮时,海水从外海进入近海各个海湾,落潮时,海水向南退入外海,落潮流流速大于涨潮流流速,涨潮流流向为偏北向,落潮流流向则为偏南向,在岸边的速度方向与岸线较为一致。在涨潮过程中,外海潮波传入防城港湾,流向都指向口门,在潮波传播过程中,受地形约束强度较大,到达渔万岛南端分为两支,一支沿牛头岭向西北方向流去,另一支沿暗埠口江向东北方向流去。流速在牛头岭深槽附近流到最大,过了牛头岭和企沙半岛后,潮流进入东、西湾内湾,由于水深变浅,水流阻力增大,流速逐渐减小。无论在外湾还是内湾,潮流都受岸线和深槽的影响,流向有顺着深槽的趋势。落潮是涨潮的逆过程,流场情况类似。在低潮时,渔万岛东北和西北面海域流速较小,较大面积的滩涂露出。西湾狭窄水道处涨落潮流速可达 1 m/s 以上,东湾张罗潮最大流速为 0.8—0.9 m/s。

### 2.3 水体交换率

丰枯水期防城湾东湾、西湾保守物质浓度变化见图 6。对保守物质随时间变化分析可知,在潮汐径流和季风的共同作用下,两个海湾区域的保守物质浓度均以较快的速度减小,西湾河口区域的保守物质浓度迅速减小,保守物质浓度减小速度明显大于防城湾东湾。由于天文潮的动力作用,两个海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。

本文对丰枯水期不同时间段的保守粒子浓度进行了分析(图 7—8),可知:东湾的保守物质浓度的空间分布呈现由湾口向湾内增加,主水道保守物质浓度明显大于两侧浅水,说明主水道的水体交换能力较强,随着时间的增加,保守物质浓度减小速率降低。西湾保守物质浓度的空间分布呈现由河口向湾外增加,冲淡水主水道保守物质浓度明显大于两侧浅水,说明主水道的水体交换能力较强,随着时间的增加,保守物质浓度减小速率降低。

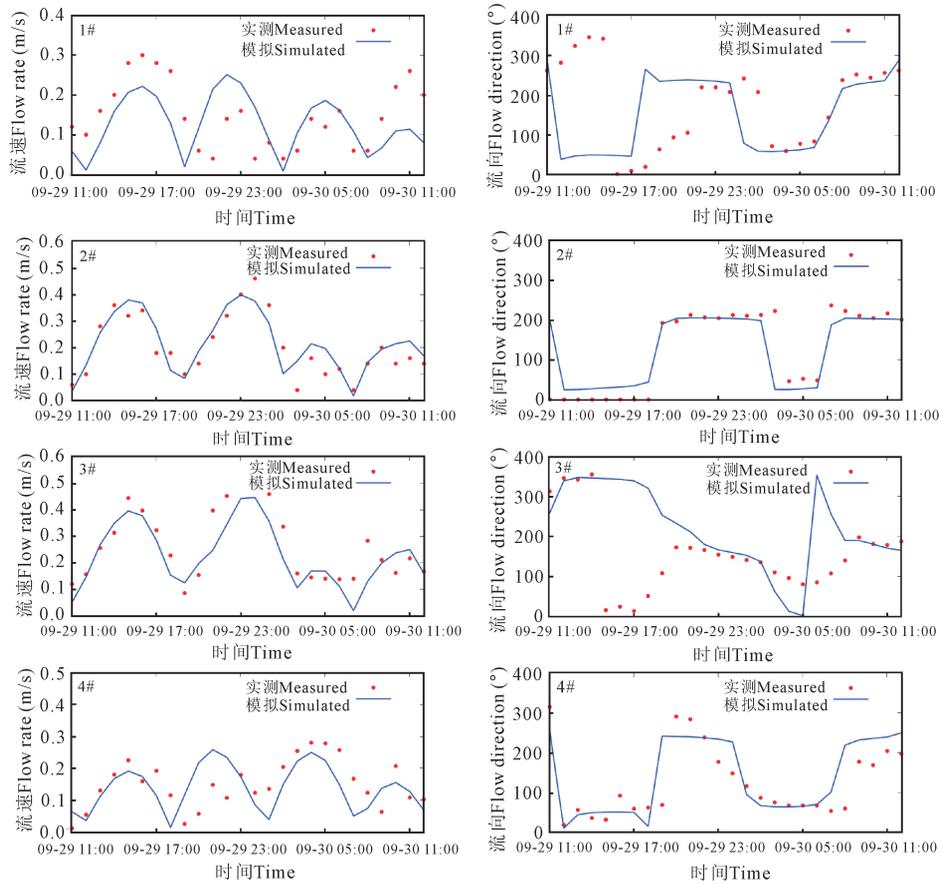


图 4 各站位表层潮流验证曲线

Fig. 4 Surface current verification curves in each stations

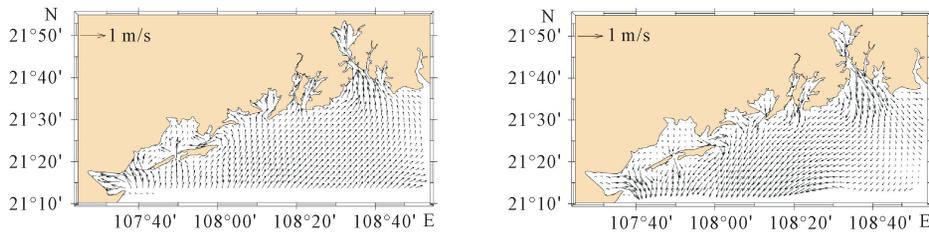


图 5 大潮涨急(左)和落急(右)时刻流场

Fig. 5 Flow field of high (left) and low (right) tide during spring period

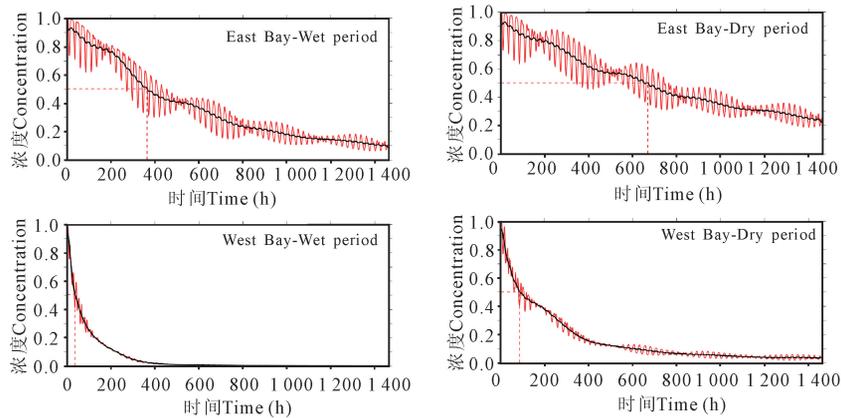


图 6 东、西湾丰水期和枯水期保守物质浓度变化曲线

Fig. 6 The variation curve of the concentration of the conservative substance in the East Bay and the West Bay during the wet and dry period

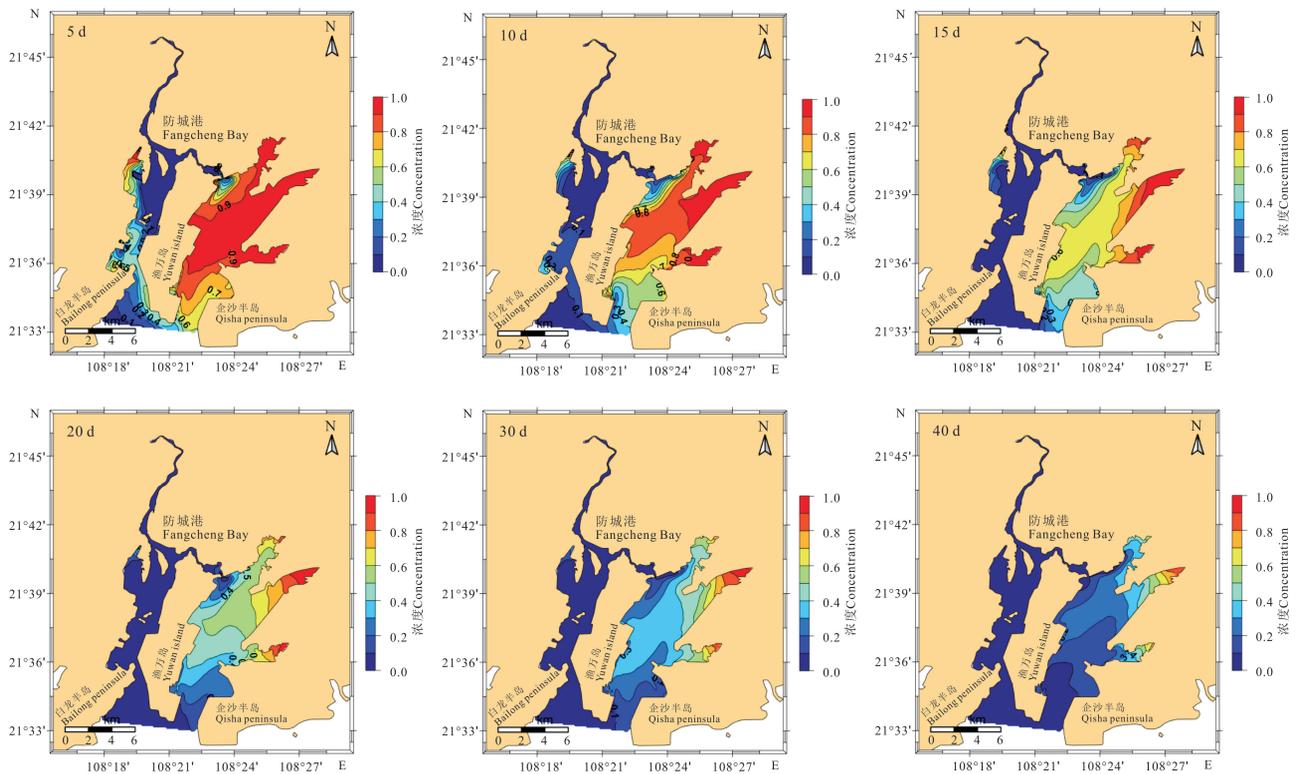


图7 防城湾丰水期保守物质浓度分布

Fig. 7 Distribution of conservative substance concentration in Fangcheng Bay during the wet period

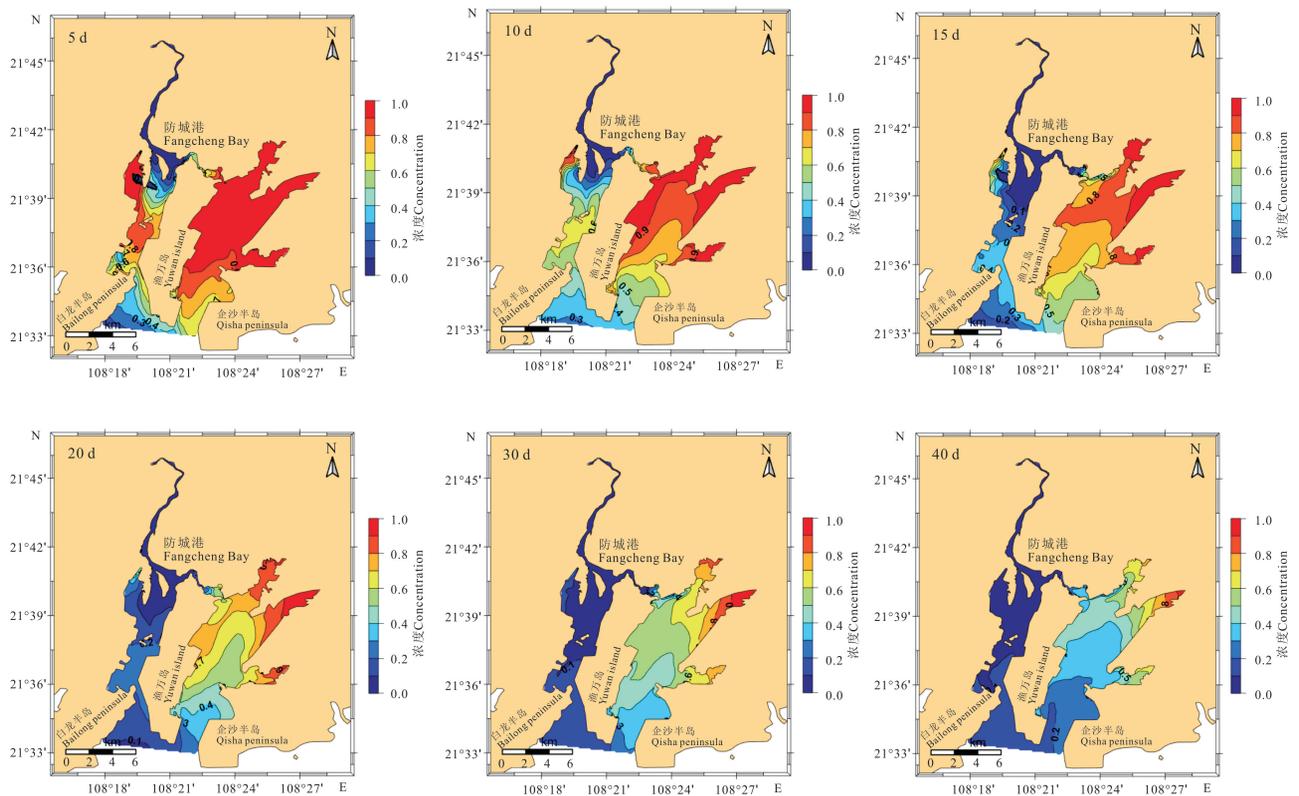


图8 防城湾枯水期保守物质浓度分布

Fig. 8 Distribution of conservative substance concentration in Fangcheng Bay during the dry period

## 2.4 水体交换时间

经计算,防城湾西湾、东湾水体半交换时间如表 2 所示,防城湾西湾丰水期水体半交换周期约为 1.7 d,枯水期水体半交换周期约为 3.6 d,东湾丰水期水体半交换周期约为 15.2 d,枯水期水体半交换周期约为 27.8 d。从半交换周期来看,丰水期半交换周期明显短于枯水期,径流对污染物扩散起到加速作用,作用较季风明显。

表 2 防城湾海域水体交换情况

Table 2 Water exchange situation of Fangcheng Bay

研究海域 Research area	面积 Area (km <sup>2</sup> )	半交换周期 Half cycle of water exchange (d)	
		丰水期 Wet period	枯水期 Dry period
西湾 West Bay	33.78	1.7	3.6
东湾 East Bay	60.27	15.2	27.8

## 3 结论

防城湾海域水交换时间主要受防城河径流和潮流的影响,防城河丰水期径流量 99.85 m<sup>3</sup>/s,枯水期径流量为 33.28 m<sup>3</sup>/s,数值模拟显示西湾最大流速可达 1 m/s,东湾最大流速为 0.9 m/s。

因防城河的存在,西湾保守物质浓度的空间分布呈现由河口向湾外增加,冲淡水主水道保守物质浓度明显大于两侧浅水,说明主水道的水体交换能力较强。东湾的保守物质浓度的空间分布呈现由湾口向湾内增加,主水道保守物质浓度明显大于两侧浅水。两湾随着时间的增加,保守物质浓度减小速率降低。

西湾因潮流流速较大,加上防城河径流的影响,其水交换时间明显较东湾短,半交换期在丰水期为 1.7 d,枯水期为 3.6 d;东湾因与西湾通过狭长水道相连,在丰水期可明显看到径流的影响,半交换时间为 15.2 d,枯水期其影响效果不明显,半交换时间为 27.8 d。

综上,防城湾西湾水交换能力较好。在未来的防城湾使用规划中,选择水交换能力较强的西湾中部的东侧沿岸,东湾应该选择在中部海域。

### 参考文献

[1] 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.  
[2] 高抒,谢钦春. 狭长形海湾与外海水体交换的一个物理

模型[J]. 海洋通报, 1991, 10(3): 1-9.

- [3] LUFF R, POHLMANN T. Calculation of water exchange times in the ICES-boxes with aeulerian dispersion model using a half-life time approach [J]. Ocean Dynamics, 1995, 47(4): 287-299.
- [4] TAKEOKA H. Exchange and transport time scales in the Seto In-land Sea [J]. Continental Shelf Research, 1984, 3(4): 327-341.
- [5] CHENG R T, CASULLI V. On Lagrangian residual currents with applications in south San Francisco Bay, California [J]. Water Resources Research, 1982, 18(6): 1652-1662.
- [6] 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.
- [7] 李希彬,张秋丰,牛福新,等. 渤海湾水交换的数值研究[J]. 海洋学研究, 2013, 31(3): 83-88.
- [8] 朱金龙,徐艳东,朱淑香,等. 岸线变迁对芝罘湾海域水交换的影响研究[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(1): 145-152.
- [9] 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.
- [10] 陶磊,孙健,刘海英,等. 潮汐和季风作用下渤海湾水交换研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(5): 99-107.
- [11] 王聪,林军,陈丕茂,等. 大亚湾水交换的数值模拟研究[J]. 南方水产, 2008, 4(4): 8-15.
- [12] 陈宪云,何小英. 防城港东湾纳潮量减弱及其影响分析[J]. 广西科学, 2014, 21(4): 365-369.
- [13] 蒋磊明,陈波,邱绍芳. 围填海工程对防城港湾及其周边水动力条件环境变化的影响分析[J]. 广西科学院学报, 2009, 25(2): 116-118.
- [14] 马腾,刘文洪,宋策,等. 基于 MIKE3 的水库水温结构模拟研究[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(2): 68-71.
- [15] WALDMAN S, BASTON S, NEMALIDINNE R, et al. Implementation of tidal turbines in MIKE 3 and Delft3D models of Pentland Firth & Orkney Waters [J]. Ocean & Coastal Management, 2017, 147: 21-36.
- [16] 黄少彬,李开明,姜国强,等. 基于 MIKE3 模型的珠江口水体交换研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(8): 134-140.
- [17] 李娜,娄安刚,张学庆,等. 基于 MIKE3 的渤海三维温盐数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2019(2): 1-9.
- [18] 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.
- [19] CHATFIELD C. The analysis of time series: An introduction [M]. 2th ed. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 1991.

## Study on Water Exchange Capacity of Fangcheng Bay in Dry and Wet Season Based on MIKE3 Model

ZHOU Zhengqiao<sup>1</sup>, XIA Wei<sup>1</sup>, QIU Wenbo<sup>2</sup>, LI Guanyu<sup>2</sup>

(1. The Navigation Guarrantee Center of South China Sea (NGCS) MOT Guangzhou Hydrographic Center, Guangzhou, Guangdong, 510320, China; 2. Nation Ocean Technology Center, Tianjin, 300111, China)

**Abstract:** In order to have a comprehensive understanding of the water exchange capacity in Fangcheng Bay, a high-resolution MIKE3 hydrodynamic numerical model based on the unstructured triangular grid is established. Using Lagrange proton tracing method, the half exchange period and commutative law of water are selected as the evaluation indexes to evaluate the water exchange capacity of Fangcheng Bay in dry and wet seasons. The results show that the water exchange in Fangcheng Bay is mainly controlled by runoff and tide. Due to the existence of Fangcheng River, the spatial distribution of the concentration of conservative substances in the West Bay increased from the estuary to the outside of the bay, and the spatial distribution of the concentration of conservative substances increase from the estuary to the inside of the bay. With the increase of time, the rate of decline in the concentration of conservative substances in the two bays decreases. The water exchange time in West Bay is obviously less than that in East Bay. The half exchange period of West Bay is 1.7 d in wet season and 3.6 d in dry season, while the half exchange period of East Bay is 15.2 d in wet season and 27.8 d in dry season.

**Key words:** MIKE3, water exchange, half cycle of water exchange, water exchange rate, Fangcheng Bay

责任编辑:符支宏



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxkx@gxas.cn

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