

# 广西近海污染物输运模拟研究\*

朱冬琳, 陈波\*\*, 牙韩争, 董德信

(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)

**摘要:**近年来广西近海海域赤潮现象越发频繁,对近海生态环境和海洋渔业产生的负面影响不容忽视。探索赤潮发生的机制,研究其形成机理,是有效监控赤潮和准确预测赤潮的关键。本文利用 Finite Volume Coast and Ocean Model (FVCOM)模式构建广西近海水动力模型,使用步长为 30 m 的细网格计算广西沿海及涠洲岛附近环流,同时利用物质输运模型计算广西近海化学需氧量(Chemical Oxygen Demand, COD)的输运扩散情况。涠洲岛周围海域平均潮差约为 2.4 m,最大潮差为 4.8 m;平均涨潮时为 13.1 h,平均落潮时为 8.8 h;涨潮时最大流速为 1.02 m/s,涨落潮交替时涠洲岛附近流场相当复杂,岛屿周边常常形成众多小型涡旋。污染物试验结果表明,近海河口排放 COD 对涠洲岛等离陆地较远的海域影响不大,而来自外海开边界的 COD 浓度对其作用更为明显;高浓度 COD 经常在涠洲岛南湾中滞留, COD 等值线在涠洲岛处向南弯曲,导致涠洲岛西侧 COD 浓度比东侧高,而南湾和涠洲岛西北侧正是赤潮频发的地方。上述结果从动力方面表明,涠洲岛附近海域多发性的赤潮和水体富营养化与外海海水输送关系更加密切。

**关键词:**广西近海 涠洲岛 COD 物质输运 赤潮

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2019)06-0669-07



微信扫一扫,与作者在线交流(OSID)

## 0 引言

赤潮是一种由于水体营养化使得海水中某种藻类大量繁殖而导致的海水水质恶化现象。赤潮生物的爆发性繁殖会破坏海洋生态平衡,对海洋渔业、水产资源造成不良影响,给海洋经济甚至人类健康带来一系列负面影响。广西近海海域位于南中国海西侧北部湾北部,海湾众多,生态资源十分丰富,向来以海水干净著称。然而近十多年来,由于沿海地带开发,

日渐频繁的人类活动对近海海域的影响逐渐显现,赤潮事件的爆发也越来越频繁。根据 2000—2017 年广西海洋环境质量公报及其他相关资料的统计,广西共发生赤潮 27 次,其中涠洲岛 10 次,廉州湾 6 次,钦州湾 4 次,防城港 3 次,铁山港 4 次。从发生频率来看,涠洲岛附近始终是重灾区,占广西近海赤潮总数的 37%;从发生地点来看,已经有从近海海湾向外海蔓延的趋势。

赤潮的爆发与海水本身的营养程度有密切而直

\* 国家自然科学基金项目(41576024),广西重点研发计划项目(桂科 AB16380282)和广西科学院基本科研业务费(2017YJJ23012)资助。

### 【作者简介】

朱冬琳(1990—),女,助理研究员,主要从事北部湾潮汐、波浪与生态研究。

### 【\*\*通信作者】

陈波(1954—),男,研究员,主要从事海洋动力学研究, E-mail: cbgkxy@163.com。

### 【引用本文】

DOI: 10.13656/j.cnki.gkxk.20200101.002

朱冬琳,陈波,牙韩争,等.广西近海污染物输运模拟研究[J].广西科学,2019,26(6):669-675.

ZHU D L, CHEN B, YA H Z, et al. Study on numerical simulation of pollutant transport in Guangxi coastal waters [J]. Guangxi Sciences, 2019, 26(6): 669-675.

接的关系,因此不少研究对广西海湾的环境容量进行探讨,通过实地调查或者数值模拟分析海水质量、水动力场、潮汐通量以及物质输运时间尺度<sup>[1-4]</sup>。事实上,赤潮的发生与水动力环境密不可分,很早就有学者开始研究水动力情况对赤潮的影响。徐家声<sup>[5]</sup>认为,潮流运动及余流不仅可把来自外海或其他海区丰富的营养盐、有机物携带至本区,为赤潮的形成提供物质条件,同时为赤潮生物的传播与赤潮扩散提供动力条件;Simpson 和 Hunter<sup>[6]</sup>率先提出一个物理参数  $\log(h/u^3)$ ,认为该参数值为 65~100 的海域海洋锋面出现的概率较大;后来 Hu 等<sup>[7]</sup>也提出一个类似的表征潮混合的系数,并发现该系数为 2.9~3.0 时的位置正好对应卫星观测到的叶绿素 a 的锋面;侍茂崇<sup>[8]</sup>则认为赤潮的发生与北部湾的上升流有关。另外,已有文献表明,来源于珠江口的富营养水体会通过琼州海峡进入北部湾,并影响涠洲岛周围海水水质<sup>[9-10]</sup>,而顺岸环流有可能将这种污染物带到广西近海,增大赤潮发生的可能性。考虑到包括涠洲岛在内的这一片海域的连续性和相互影响,本文利用最新的岸线地形数据,构建分辨率为 30 m 的细网格对包括涠洲岛在内的广西近海海域水动力环境进行模拟,在此基础上对污染物 COD 进行输运模拟试验,力图在尽量高的分辨率情况下重现涠洲岛周围的水动力场情况,并对污染物排放是如何通过运输扩散影响广西近海尤其是涠洲岛附近海域进行探究。

## 1 广西近海水动力场模拟

### 1.1 FVCOM 模型简介

本文使用海洋模型 Finite Volume Coast and O-

cean Model (FVCOM) 进行模拟。FVCOM 模型为美国 Massachusetts Dartmouth 州立大学陈长胜所领导的研究小组开发<sup>[11]</sup>,其控制方程与大多数海洋模式类似,包括自由表面、非线性平流项、耦合的密度和速度场、径流、垂直混合的 2.5 阶湍流闭合模型等,其最大特点便是采用水平三角形非结构网格坐标,可以很好地模拟浅海和河口地区复杂的几何岸线。在算法上,FVCOM 结合有限元法和有限差分方法,可以像有限元一样精确拟合浅海复杂岸线,又可控制计算量,从而保证较高的计算效率。

### 1.2 广西近海水动力模型的建立

模型计算范围如图 1 所示,东接雷州半岛西岸,西至钦州湾西侧的企沙,南边界到 20°30'N,包括钦州湾、廉州湾、铁山港和涠洲岛。对岸边界进行平滑处理后使用无结构网格离散计算域。模型网格由 12 552 个节点和 23 164 个三角形单元组成,计算空间步长 30~3 850 m,内外模的时间步长分别取 10 s 和 2 s。地形数据使用谷歌卫星最新岸线数据,水深来自广西近海及海湾的海图,外海开边界水位由全球潮汐模型(Nao. 99b model, Nao. 99L model)<sup>[12]</sup>提供,该模式水位数据包含 23 个分潮的信息。水深及潮位均统一至当地的平均海平面。

### 1.3 水动力模拟结果验证

为验证模型计算的可靠性,采用 2017-11-02 12:00—2017-11-03 11:00 涠洲岛附近的 3 个流速观测站和一个潮位观测站的数据对结果进行验证,各站点位置如图 1a 所示,各水文要素验证结果如图 2~5 所示。

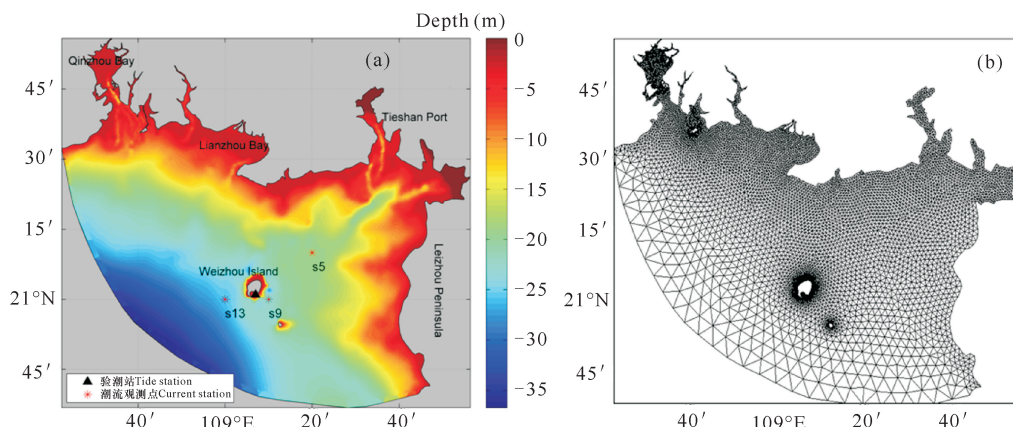


图 1 广西近海海域水深及验证资料站位示意图(a)和模型网格示意图(b)

Fig. 1 Schematic diagram of observation stations (a) and model grid (b) for water depth and verification data in the offshore waters of Guangxi

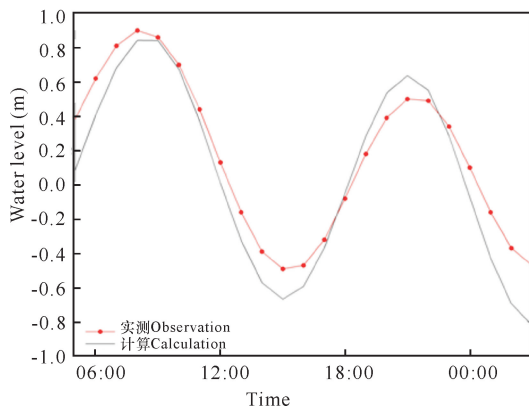


图2 潮位验证对比示意图

Fig. 2 Schematic diagram of comparison and verification of tide level

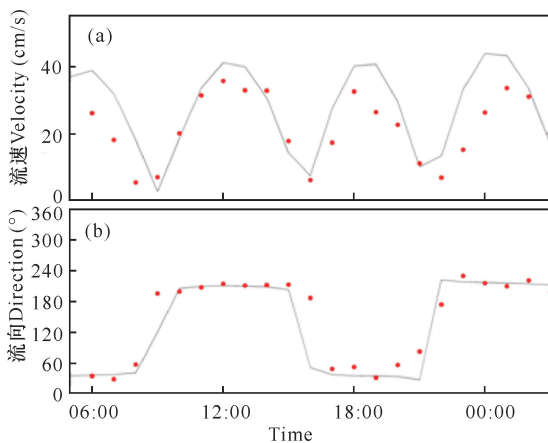


图3 S9站流速流向对比验证结果

Fig. 3 Comparison and verification result of current velocity and direction from station S9

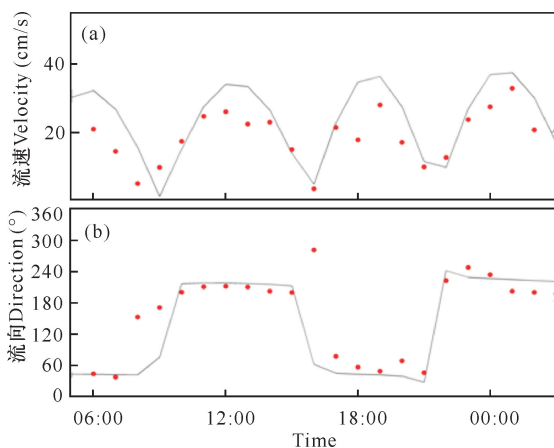


图4 S5站流速流向对比验证结果

Fig. 4 Comparison and verification result of current velocity and direction from station S5

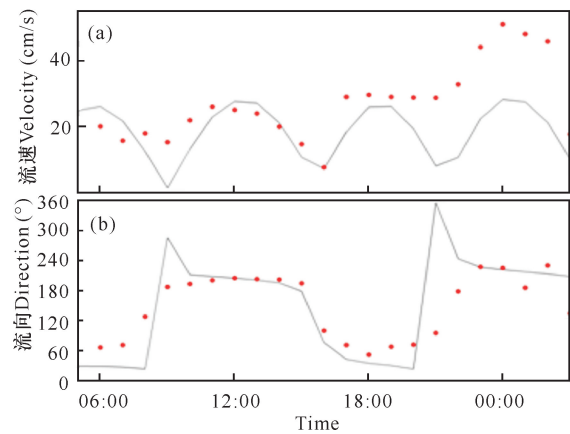


图5 S13站流速流向对比验证结果

Fig. 5 Comparison and verification result of current velocity and direction from station S13

由图2~5可知,各水文要素验证点计算值与实测值相差不大,涠洲岛潮位过程与实际检测结果基本一致。S5和S9站的潮流也与实测值基本吻合,但在S13流速偏差较大,误差一方面是由于水深精度不够细或者有误差,另一方面可能是由于S13站正好处于水深变化比较快的地区,在这些地区除潮流外,可能还有其他因素起主导作用;另外,本文的模拟试验只考虑潮汐驱动,并未考虑大气风场等其他强迫因素,因此模拟结果有一定误差。但是总体而言,模型计算值与实测值较为一致,各位相、量值及过程曲线与实际过程基本一致,可见计算结果可以反映研究海域实际的水动力过程,将本次水动力计算结果应用于污染物扩散的计算是可行的。

#### 1.4 水动力模拟结果分析

模型运行一个月稳定后,广西近海流场与涠洲岛附近流场分布如图6~8所示。

由图6可见,涨潮时,海水从外海涌入近海各个海湾;落潮时,海水向南退入外海,涨潮向北,落潮向南,在近岸海域的速度方向与岸线较为一致。涠洲岛周围海域平均潮差约为2.4 m,最大潮差为4.8 m;平均涨潮时为13.1 h,平均落潮时为8.8 h。涨潮中间时涠洲岛附近海域的最大潮流流速为1.02 m/s,平均流速为0.26 m/s,涨潮时涠洲岛周围大部分为东北流向,由于地形的阻挡,在涠洲岛东北端和南湾里面都形成小型涡旋。落潮中间时钦州湾的最大潮流流速为0.98 m/s,平均潮流流速为0.33 m/s,潮流流向基本与涨潮中间时的流向相反。

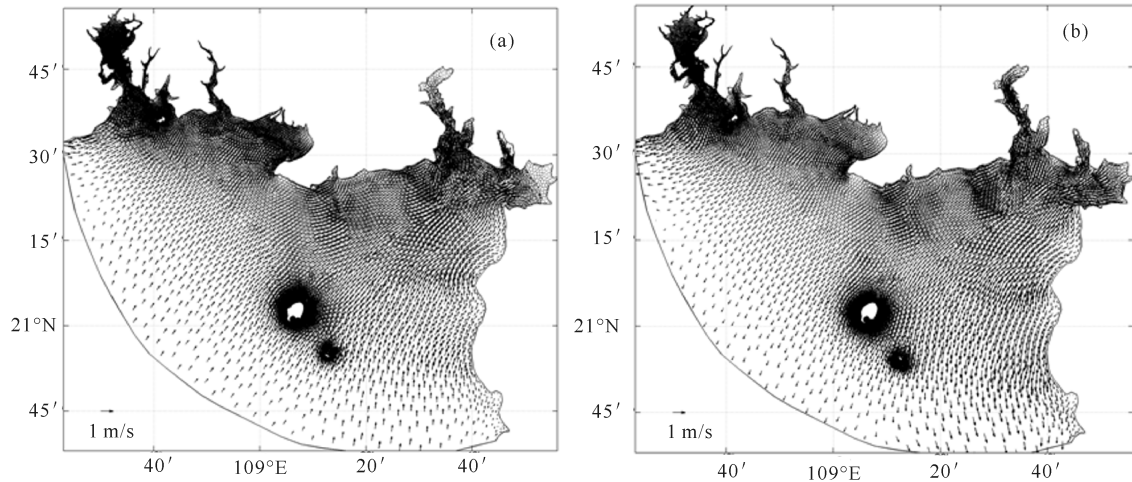


图6 涨急(a)落急(b)时的广西近海流场

Fig. 6 Current field of Guangxi coastal waters during flood (a) and ebb tide (b)

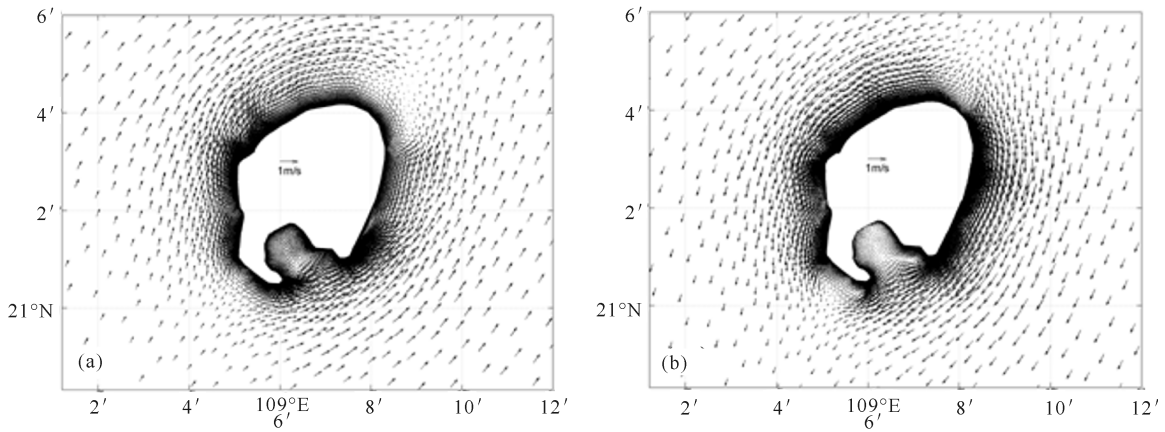


图7 涠洲岛附近海域涨落潮流场图(a. 涨急, b. 落急)

Fig. 7 Current field map around Weizhou Island during flood (a) and ebb tide (b)

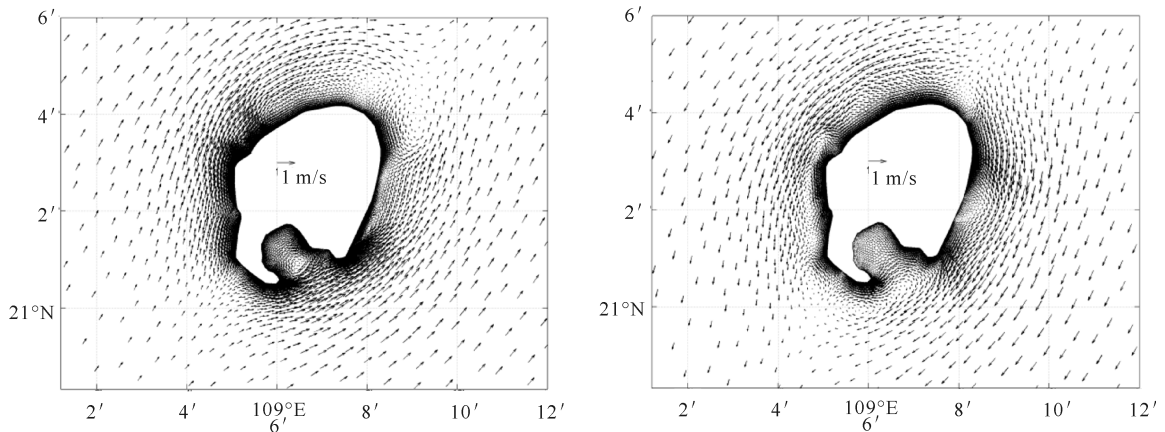


图8 涠洲岛附近海域涨落潮交替时期的流场图

Fig. 8 Current field map around Weizhou Island in transition period between flood and ebb tide

事实上,在高分辨率网格下(图7~8),可以发现涠洲岛附近的流场非常复杂,尤其是涨落潮交替时,涠洲岛周边常常形成零星分布的小型涡旋。在南湾里面,涨潮时南湾形成气旋式涡旋,落潮时流线向内

凹,使得整个南湾流速偏东南,落潮时还会在南湾东侧口门形成更小尺度的涡旋。涡旋会影响污染物输运扩散路径甚至挟带部分污染物,且复杂的动力场和南湾三面环陆的地形,极有可能让污染物在此处堆

积; 涠洲岛周边的复杂涡旋和流场在对物质输运方面到底有什么影响, 是否会将涠洲岛附近的污染物聚集到岸边, 这些问题都值得进一步探究。

## 2 广西近海污染物输运模拟

### 2.1 污染物输运模型的建立

为探究涠洲岛周围复杂流场对污染物输运及水体富营养化到底有何影响, 我们进行了 COD 污染物输运试验, 将 COD 视作保守可溶性污染物, 利用模式计算其输运路径和对涠洲岛周边海域的影响。

预测模式采用保守物质迁移扩散方程, 其与温度盐度方程类似, 只是多了一个源项, 如下式所示:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( A_h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A_h \frac{\partial C}{\partial y} \right) + S, \quad (2.1)$$

式中:  $C$  为污染物浓度,  $A_h$  为水平方向的扩散系数,  $S$  为源项,  $u$ 、 $v$  分别为东西、南北向的流速, 由水动力模型提供。

考虑研究区域内 4 条广西近海河流——钦江、茅岭江、大风江和南流江的入海 COD 和径流, 其中 COD 和径流量都均取 11 月多年月平均值, 具体数据见表 1。

COD 背景浓度取广西科学院 2018 年在广西近海走航测得的 14 个站位的平均值 0.78 mg/L, COD 开边界浓度取则取琼州海峡附近 14 个站点的平均值 1.34 mg/L。

表 1 广西近海河口 11 月 COD 浓度和径流数据

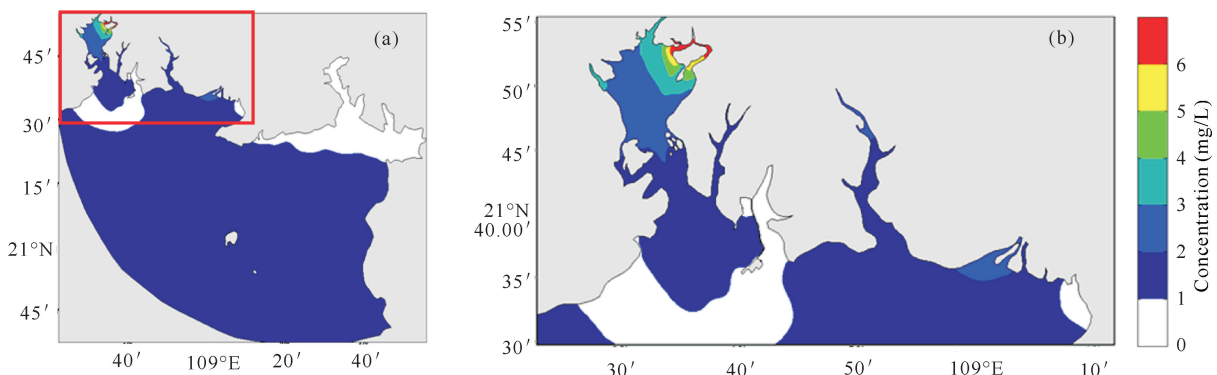
Table 1 COD concentration and river discharge data of Guangxi coastal estuaries

河流 River	COD 平均浓度 Average COD concentration (mg/L)	月平均径流量 Average river discharge (m <sup>3</sup> /s)
南流江 Nanlijiang River	3.1	99.20
钦江 Qinjiang River	6.4	27.39
大风江 Dafengjiang River	2.8	18.52
茅岭江 Maolingjiang River	3.3	40.12

### 2.2 污染物输运结果分析及讨论

污染物模型稳定运行 50 d 后的结果如图 9 所示, 在水动力场作用下, 近海河流排放的 COD 不断扩散, 钦州湾内的钦江和茅岭江 COD 都较高, 因此茅尾海内尤其是两大河口附近 COD 浓度较高。虽然随着张落潮位置有所变动, 但是 COD 浓度高于 2 mg/L 的影响范围基本保持在龙门群岛以北, 浓度高于 1 mg/L 的影响范围则徘徊在钦州湾口; 南流江排放 COD 浓度高于 2 mg/L 的区域也基本局限于河口附近海域, 大风江的 COD 影响区域则更小。

从图 9 可知, 尽管河流入海 COD 浓度较高, 但受地形等因素影响, 影响范围多局限于海湾和河口附近, 在离岸较远处由于距离和海水稀释等原因, 影响很小; 而 20°30'N 以南的区域, 大部分海区 COD 超过 1 mg/L, 这部分主要来自开边界上持续输入的 COD 的影响, 这种影响远比近岸排放更为直接和迅速, 模型稳定运行大概第 7 天时(图 10a), 在开边界影响下 COD 便已经扩散至涠洲岛海域附近, 并且在涠洲岛复杂流场的影响下发生一些值得注意的变化。



(b)为(a)中红色方框放大区域  
(b) specifies the area in (a) with a red rectangle

图 9 模式稳定运行 50 d 后 COD 扩散情况

Fig. 9 COD diffusion after model stable operation for 50 d

污染物最初是从涠洲岛南侧的南湾触及岛屿的(图 10a),而且在落潮时滞留在南湾内(图 10b),这一现象并非偶然,更高浓度的 COD 扩散至涠洲岛时都会发生类似的滞留现象(图 10c~f)。从图中还可看出,由于岛屿地形的阻挡,COD 等值线在涠洲岛附近

向南凹陷,即在涠洲岛东西两侧会形成向北的高浓度 COD“水舌”,使得岛屿西端的 COD 浓度常比东端要高(图 10b、c、e、f),而南湾和涠洲岛西北端恰好是赤潮多发的地区<sup>[9]</sup>。

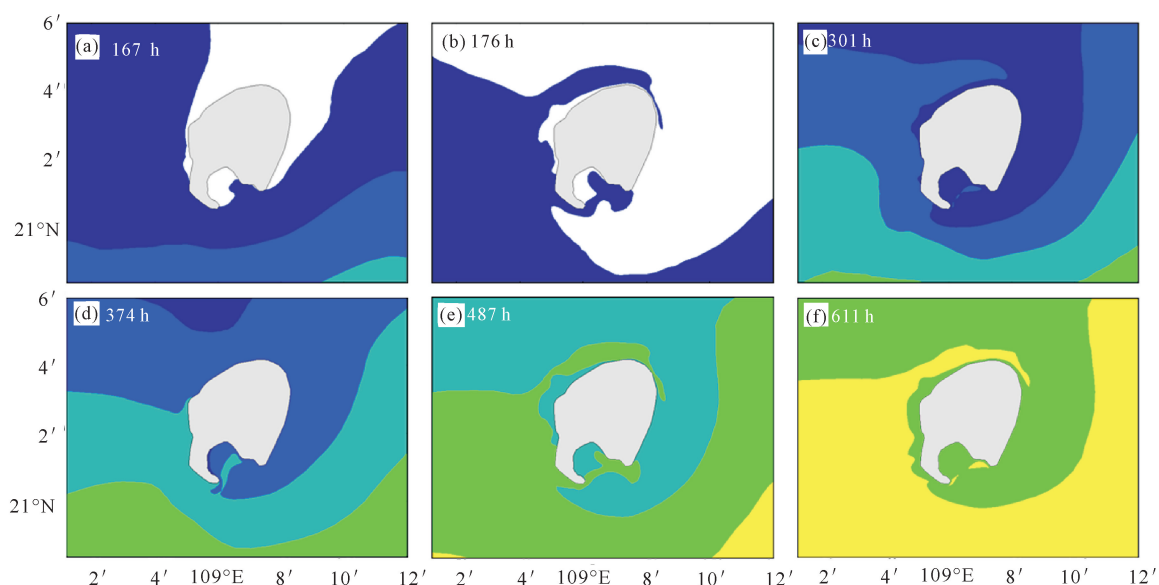


图 10 涠洲岛附近海域自模式运行稳定后不同时段 COD 浓度分布

Fig. 10 COD concentration distribution in different periods in the sea area near Weizhou Island since the model operation has stabilized

赤潮的发生是多种因素作用的结果,除水质上污染物或者营养物质要达到某个阈值,还与水动力环境相关,过强的流速或者过于激烈的海况,都不利于赤潮生物的繁殖。因此虽然涠洲岛两侧更远处也有高浓度的 COD“水舌”,但这些地区受涨落潮影响,流速大,水动力作用太强,反而不利于赤潮生物繁衍生存。在涠洲岛附近海域,COD 的滞留提供水体营养化这一必备条件,而导致这种滞留的水动力环境在涠洲岛周围,尤其是在南湾里,要远比外海平静,相对流速较小,水体交换能力弱(可以看到低浓度 COD 也会被留在湾内),所以更有可能发生赤潮。

污染物输运试验结果表明,外海开边界的 COD 对涠洲岛等远离岸边的海域的影响,较近岸河流排放的影响更为明显,可以推断,涠洲岛多发性的赤潮和水质富营养化与琼州海峡海水输送关系更加密切。

### 3 结论

本文利用 FVCOM 建立广西近海水动力模型,利用最新的岸线地形数据,构建分辨率为 30 m 的细网格对包括涠洲岛在内的广西近海海域水动力环境和污染物输运进行模拟,主要分析研究涠洲岛附近的

水动力特征和污染物输运扩散情况。涠洲岛周围海域平均潮差约为 2.4 m,最大潮差为 4.8 m;平均涨潮时为 13.1 h,平均落潮时为 8.8 h。涨潮中间时最大潮流流速为 1.02 m/s,平均流速为 0.26 m/s,涨潮时涠洲岛周围大部分为东北流向。落潮中间时钦州湾的最大潮流流速为 0.98 m/s,平均潮流流速为 0.33 m/s,潮流流向基本与涨潮中间时的流向相反。涠洲岛附近的流场非常复杂,尤其是涨落潮交替时,涠洲岛周边常常形成小型涡旋;在涠洲岛南端的南湾里,涨潮时南湾形成气旋式涡旋,落潮时流线向内凹,使得整个南湾流速偏东南;落潮时还会在南湾东侧口门形成更小尺度的涡旋。

污染物输运试验模拟结果发现,近岸河口排放的 COD 尽管浓度较高,但影响范围有限,而开边界上来自外海的 COD 对涠洲岛影响远比近岸要迅速和直接。复杂的动力场和南湾三面环陆的地形,使南湾经常出现高浓度 COD 的滞留;而涠洲岛地形造成的流场改变也使得岛屿西端的污染物浓度常常高于东端,这些都与实际调查中赤潮发生的地点相吻合,这为涠洲岛多发性的赤潮和水质富营养化与琼州海峡海水输送关系更加密切这一猜测,提供了更加有力的

证据。

赤潮的发生与水动力因素相关,然而这并不是唯一的影响因子,下一步应采集赤潮发生时涠洲岛周围以及琼州海峡附近海域的营养盐数据,进一步验证水动力的作用。

#### 参考文献

- [1] 蓝文陆,杨绍美,苏伟. 环钦州湾河流入海污染物通量及其对海水生态环境的影响[J]. 广西科学, 2012, 19(3): 257-262.
- [2] 李萍,莫海连,郭钊. 2016年北部湾近岸海域海水环境质量评价[J]. 海洋湖沼通报, 2019(1): 54-64.
- [3] 高劲松,陈波,陆海生,等. 钦州湾潮流场及污染物输运特征的数值研究[J]. 广西科学, 2014, 21(4): 345-350.
- [4] 何帅. 茅尾海水质数值模拟及环境容量研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [5] 徐家声. 水动力状况与赤潮生物的聚集和扩散[J]. 海洋环境科学, 1994, 13(3): 19-22.
- [6] SIMPSON J H, HUNTER J R. Fronts in the Irish Sea [J]. Nature, 1974, 250: 404-406.
- [7] HU J Y, KAWAMURA H, TANG D. Tidal front around the Hainan Island, northwest of the South China Sea [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (C11): 1-9.
- [8] 侍茂崇. 北部湾环流研究述评[J]. 广西科学, 2014, 21(4): 313-324.
- [9] 侍茂崇,陈波. 涠洲岛东南部海域高浓度氮和磷的来源分析[J]. 广西科学, 2015, 22(3): 237-244.
- [10] 吴敏兰. 北部湾北部海域营养盐的分布特征及其对生态系统的影响研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- [11] CHEN C, LIU H, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(1): 159-186.
- [12] MATSUMOTO K, TAKANEZAWA T, OOE M. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan [J]. Journal of Oceanography, 2000, 56: 567-581.

## Study on Numerical Simulation of Pollutant Transport in Guangxi Coastal Waters

ZHU Donglin, CHEN Bo, YA Hanzheng, DONG Dexin

(Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Beibu Gulf Marine Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

**Abstract:** In recent years, the red tide phenomenon in the coastal waters of Guangxi has become more frequent, and the negative impact on the coastal ecological environment and marine fisheries cannot be ignored. Research into the mechanism of red tide occurrence and formation are the keys to effectively monitoring and accurately predicting the incident of red tide. In this paper, the FVCOM (Finite Volume Coast and Ocean Model) model was used to construct a dynamic model. A fine grid with a step length of 30 m was used to calculate the circulation around the coast of Guangxi and Weizhou Island. At the same time, a chemical transport model was used to calculate the transport and diffusion of Chemical Oxygen Demand (COD) in Guangxi coastal waters. The average tidal range was about 2.4 m, with the maximum tidal range of 4.8 m. The average duration of rise and fall was 13.1 h and 8.8 h, respectively. The maximum speed during flood tide was 1.02 m/s. The current field around Weizhou Island was quite complicated during the transition period between flood and ebb tide, with the formation of small-size vortexes distributed around the island. Pollutant test results show that COD emissions from coastal estuaries have little effect on waters far away from the land, such as Weizhou Island, while the effect of COD concentration from the open sea boundary is more obvious. The high concentrations of COD are often stacked in the south bay of Weizhou Island, the contour lines of COD curve southward at Weizhou Island, resulting in a higher COD concentration on the west side than on the east side. The red tide incidents occur frequently in the south bay and the northwest side of Weizhou Island. The above results indicate from the dynamic side that the frequent occurrence of red tide and water eutrophication in the waters near Weizhou Island are more closely related to offshore seawater transport.

**Key words:** Guangxi coastal waters, Weizhou Island, COD, transport, red tide

责任编辑:米慧芝