



温州浅滩围垦工程 对周围海域盐度分布和水质的影响*

杨茂盛, 沈永明

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在收集春季瓯江口海域附近的入海污染源位置和污染源源强等数据资料的基础上, 主要考虑海水中溶解态无机氮 (DIN)、溶解态无机磷 (DIP) 和叶绿素 a 的含量, 利用 MIKE21 模型, 考虑水体斜压, 对温州浅滩围垦工程前后周围海域水环境的水动力和水质进行了耦合数值模拟。研究结果表明: 工程并不会大范围改变瓯江口海域的水动力特征, 影响主要集中在河口附近, 体现在北口区域的流速有所增加、南口区域近河口处流速有所减小; 同时, 围垦工程导致北口潮流加大、盐度值略有增加; 工程实施后不会对周围海域水质造成大范围改变, 但是对局部海域水质的确有一定的影响, 近河口处海域的营养盐浓度和叶绿素 a 含量都呈现上升趋势, 局部区域富营养化一定程度上有所加重。

关键词: 瓯江口; 水动力; 盐度分布; 围垦工程

中图分类号: U 659; X 52

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0041-09

Influence of Wenzhou shoal land-making project on salt distribution and seawater quality nearby

YANG Mao-sheng, SHEN Yong-ming

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the collection data of position and concentration of pollution sources in spring, mainly considering the concentration level of DIN, DIP and chlorophyll-a, the current and water quality coupling numerical simulation was carried out. Taking into account baroclinic water, MIKE21 model was used before and after the Land-making Project in the Oujian Estuary. The result shows that the project would not cause great changes to the hydrodynamic characteristics in Wenzhou Bay, but it would increase the current speed in the north area and decrease the current speed in the south area near the estuary. The salt distribution in the north area changes obviously while the amount of salinity increases near the north part of the estuary. Generally, Phrase I and Phrase II projects would not cause large scale changes to the seawater quality around, but it does have a certain effect on the local seawater quality. Nutrients and chlorophyll-a near the mouth of the estuary showed a rising trend and the eutrophication was aggravated.

Keywords: Oujian Estuary; hydrodynamics; salt distribution land-making project

围垦工程在沿海城市解决人多地少矛盾、进行城市化的过程中具有重要的作用。但是围垦工程会对航道岸线、海域水沙环境和生态环境产生影响, 有必要对围垦后的具体影响进行研究。瓯

江口海域位于浙江省沿海南部, 北侧毗邻乐清湾, 南侧靠近飞云江口海域, 滩涂资源非常丰富, 是温州市重要的沿海产业区域。温州浅滩是瓯江口海域最大的浅滩, 进行温州浅滩围垦工程是温州

收稿日期: 2016-04-10

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (51579030); 国家重点基础研究发展计划项目 (2013CB430403)

作者简介: 杨茂盛 (1991—), 男, 硕士研究生, 从事海洋水动力模型和水质模型研究。

市重要的发展战略。

目前,关于瓯江口海域围垦工程对周围海域水动力和泥沙环境影响的研究已有很多^[1-3],但是关于温州浅滩围垦工程对周围海域盐度分布和水质影响的综合研究还有待完善。王勇智^[4]对灵霓北堤建立前后的水质变化进行后评价,陈雷等^[5]对2007年春季的瓯江口海域环境质量进行调查,叶新荣等^[6]对2010—2013年瓯江口海域环境质量现状进行调查分析,李佳^[7]研究了DIN和DIP分布情况对乐清湾重大围垦工程的响应。以上研究都未涉及到温州浅滩围垦一期和二期工程对周围海域盐度分布和水质造成的影响,本文对温州浅滩围垦工程对周围海域水动力和水质造成的影响进行定性定量的研究,更全面地了解瓯江口附近海域水动力环境和水质生态环境的变化。

1 数学模型

1.1 基本方程

1) 连续方程。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (1)$$

2) 动量方程。

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial x} - \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = f\bar{u}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial y} - \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

式中: t 为时间; d 为静水深, η 为水位, $h = d + \eta$ 为总水深; u 、 v 为两个方向的流速; $f = 2\Omega\sin\phi$ 为科氏力参数 (Ω 为地球自转角速度, ϕ 为经度坐标); g 为重力加速度; ρ 为水密度; ρ_0 为海水参考密度 (取 $1\,025\text{ kg/m}^3$); s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 代表4个辐射应力分量; v_t 为垂向紊动系数; p_a 为大气压强; S 为源汇项; u_s 、 v_s 为点源在 x 、 y 方向的

速度分量。

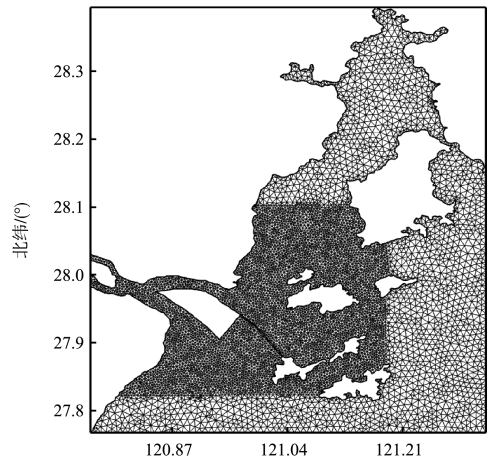
3) 盐度扩散方程。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} = F_c - k_p C + C_s S \quad (4)$$

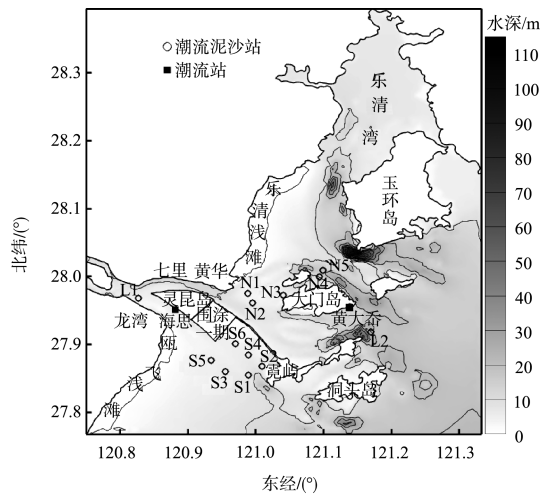
式中: C 为物质浓度; k_p 为线性衰减速率; C_s 为源的物质浓度; F_c 为水平扩散系数。

1.2 模型设置

1) 计算范围。MIKE21 模型计算范围西部至 $120^\circ 45'$ 经线, 东部至 $121^\circ 20'$ 经线, 北部至乐清湾顶, 南部至 $27^\circ 46'$ 纬线。东西距离约 60 km , 南北距离约 70 km , 面积约 $2\,600\text{ km}^2$ 。计算区域包括瓯江口及其附近灵昆岛、大门岛和洞头岛等岛屿, 域内最大水深达 100 m 以上, 位于玉环岛南部, 见图1。



a) 计算网格



b) 地形及测站分布

图1 模型计算网格、地形及测站布置

2) 网格划分。MIKE21 模型采用非结构的三角形网格, 对重点研究区域的网格进行了进一步加密。

3) 边界条件。潮汐开边界采用潮汐驱动, 根据调和分析法, 给出开边界潮位; 温盐开边界系从海洋图集^[8-9]上提取逐月平均值后插值得到, 在海底和陆地边界, 温盐法向梯度为零; 营养盐浓度开边界的数据系文献[10]中的实际测站数据; 海面边界综合考虑了大气温度、相对湿度、云量、降雨量和蒸发量等因素, 数据采用 ECMWF(欧洲中期天气预报中心)资料, 数据精度 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$, 用 4×4 矩阵覆盖本区域。

4) 污染源强。根据文献[10-11]详细的调查结果, 2007 年春季至 2009 年春季期间瓯江口海域附近的主要污染源可归类为 12 个, 其中乐清湾沿岸有 10 个、瓯江干流 1 个、龙湾区排污口 1 个。图 6 给出源强的名称和位置。瓯江干流源强径流采用月平均径流量并加以修正, 其余源强径流采用年平均流量。

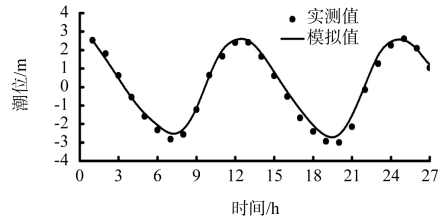
5) 初始条件。MIKE21 模型潮流场的计算采用“冷启动”, 初始水位和流速均设置为 0; 温度和盐度采用冷启动预算一年的结果作为初始条件; 初始条件对水质计算结果的影响一般在开始阶段, 在计算稳定后, 初始条件对计算结果的影响可忽略。溶解氧 DO 初始浓度为 8.5 mg/L , 生化需氧量 BOD 初始浓度为 0.3 mg/L , 无机氮初始浓度为 0.2 mg/L , 磷酸盐初始浓度为 0.035 mg/L 。

6) 参数设置。模型计算中采用干湿边界, 干水深为 0.005 m , 淹没水深为 0.1 m , 采用 Smagorinsky 公式, 涡黏系数 C_s 取 0.28。模型计算时间是 2009-02-26—2009-05-18。

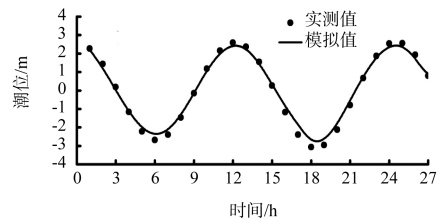
2 模型验证

2.1 水动力验证

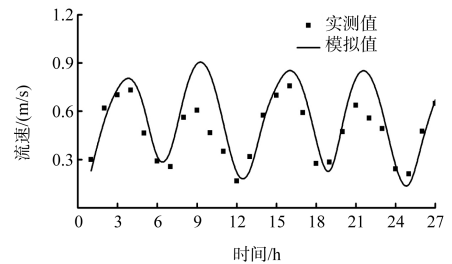
这里给出了部分测站大潮期间的潮位、流速过程的验证曲线(图 2), 计算的潮位、流速均与实测值吻合良好。所以本文建立的耦合模型可为围涂工程引起的水动力环境影响计算提供可靠的基础。



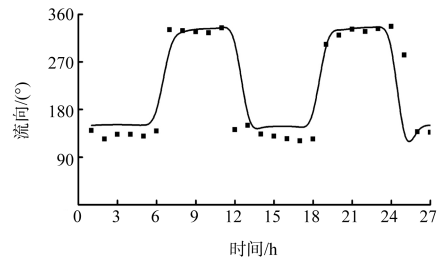
a) 海思潮位



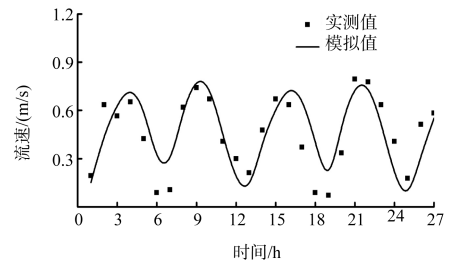
b) 黄大岙潮位



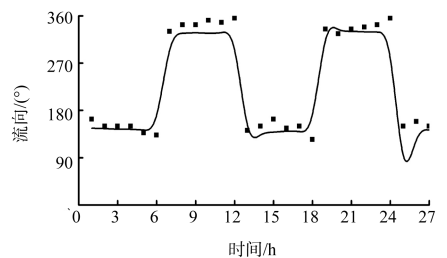
c) S1流速



d) S1流向



e) S3流速



f) S3流向

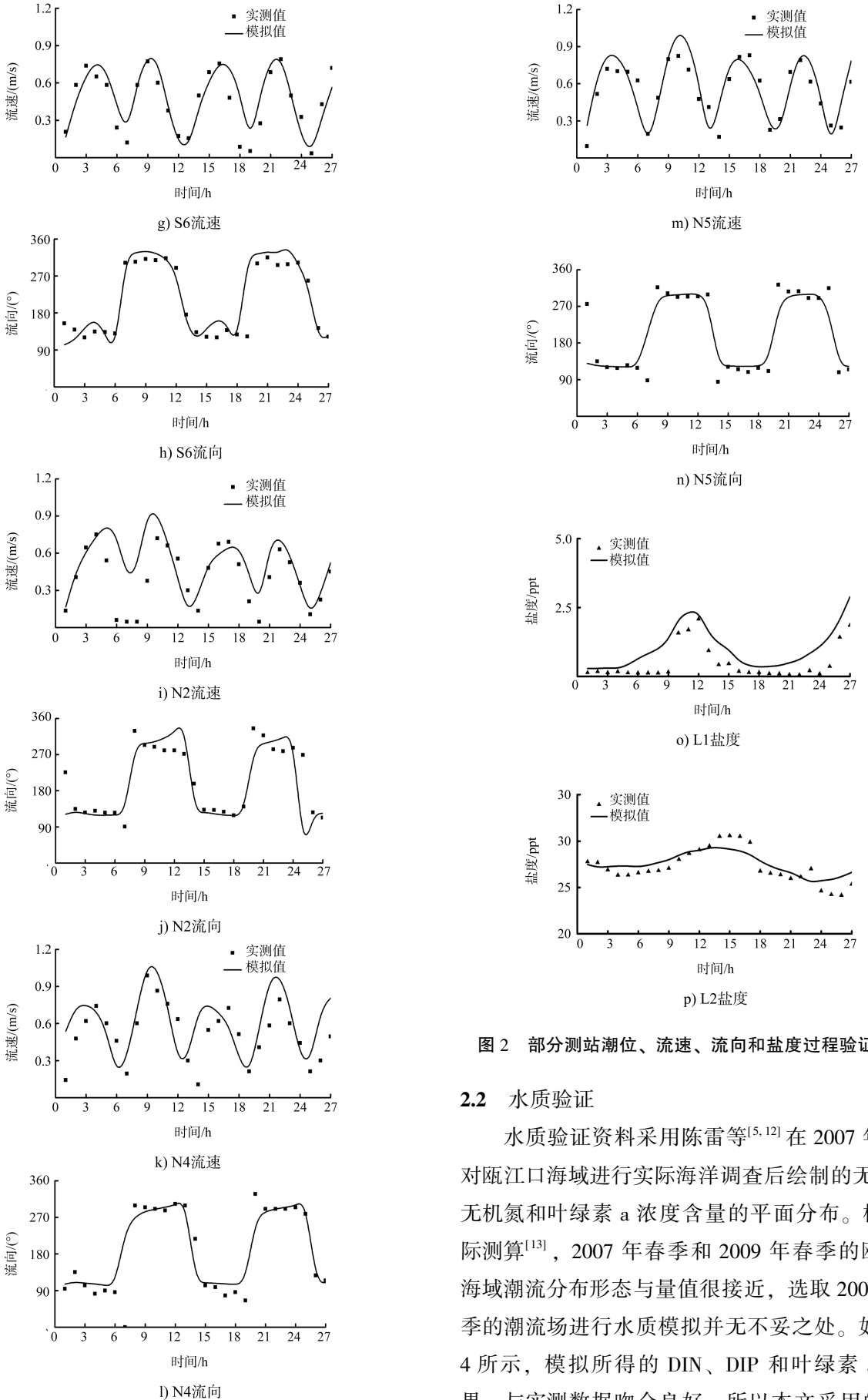
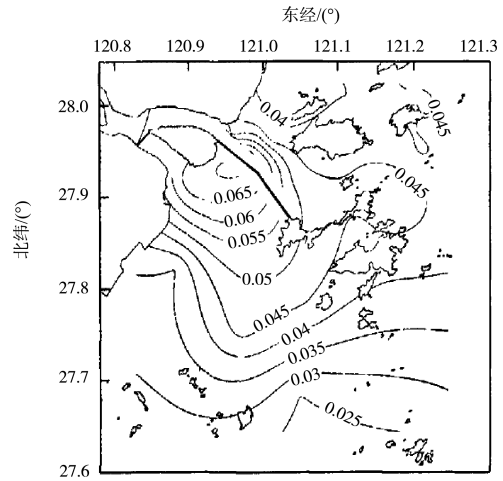


图2 部分测站潮位、流速、流向和盐度过程验证曲线

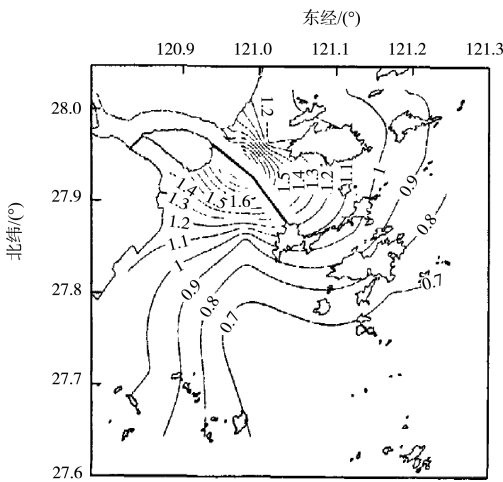
2.2 水质验证

水质验证资料采用陈雷等^[15,12]在2007年4月对瓯江口海域进行实际海洋调查后绘制的无机磷、无机氮和叶绿素a浓度含量的平面分布。根据实际测算^[13]，2007年春季和2009年春季的瓯江口海域潮流分布形态与量值很接近，选取2009年春季的潮流场进行水质模拟并无不妥之处。如图3、4所示，模拟所得的DIN、DIP和叶绿素a的结果，与实测数据吻合良好。所以本文采用的耦合

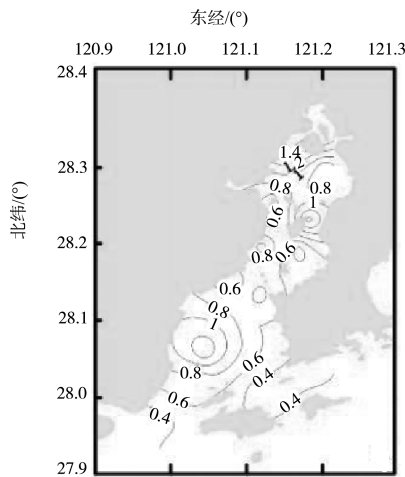
模型可以为围垦一期和二期工程引起的水环境水质影响计算提供可靠的基础。



a) 实测无机磷(单位: mg/L)

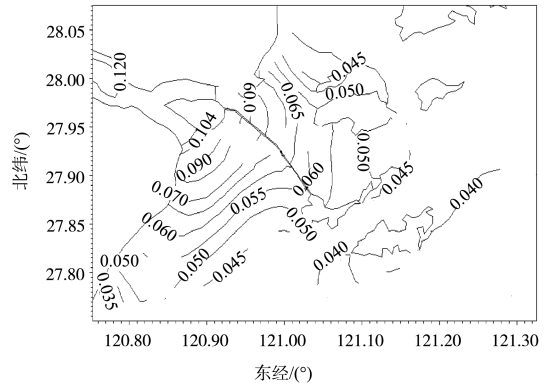


b) 实测无机氮(单位: mg/L)

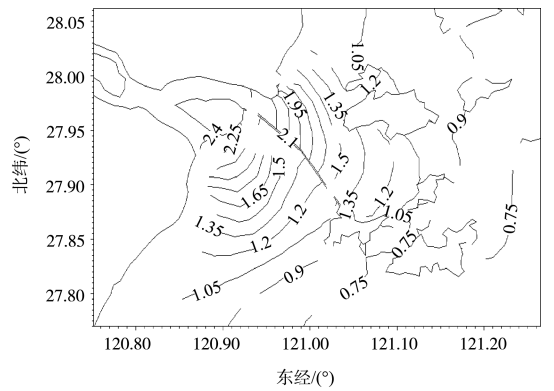


c) 实测叶绿素a(单位: 10^{-3} mg/L)

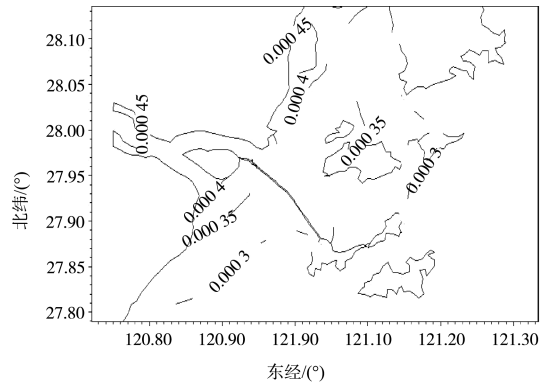
图 3 瓯江口实测 DIP、DIN 和叶绿素 a 平面分布



a) 模拟无机磷(单位: mg/L)



b) 模拟无机氮(单位: mg/L)



c) 模拟叶绿素a(单位: mg/L)

图 4 瓯江口模拟 DIP、DIN 和叶绿素 a 平面分布

3 工程影响分析

温州浅滩位于灵昆岛与霓屿岛之间, 沿浅滩北侧连接灵昆岛与霓屿岛的灵霓大堤, 已于 2006 年建成。一期工程就是在浅滩周围建立围堰, 把浅滩围垦起来变为陆地, 已于 2010 年底完工。二期工程尚在建设中, 部分促淤堤已于 2013 年完工(图 5)。故在上一节已经验证的耦合模型的基础上, 保持基本参数设置不变, 添加围垦工程进行

模拟, 参照 2010—2013 年叶新荣等^[6]对瓯江口海域环境现状进行调查的测站布置, 布置输出站点, 输出潮位、潮流、DIP、DIN 和叶绿素 a 等的模拟结果。

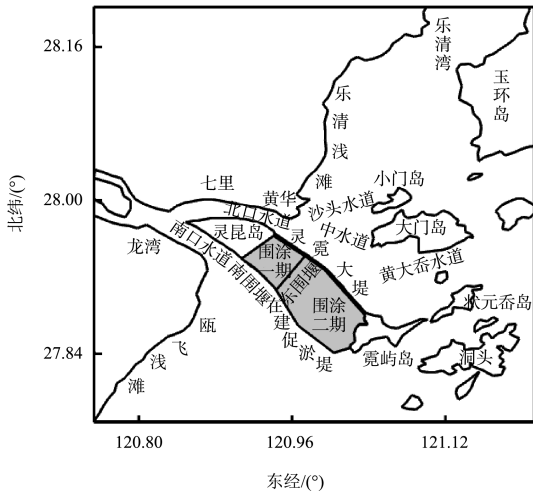


图 5 一期和二期工程位置

如图 6 所示, 所有测站按照区域可以划分为北口区域、南口区域和外海区域。北口区域: L01~L18(自西向东); 南口区域: L19~L28(自西向东); 外海区域: L29 和 L30。按照以上划分的区域来讨论瓯江口海域水质变化情况。

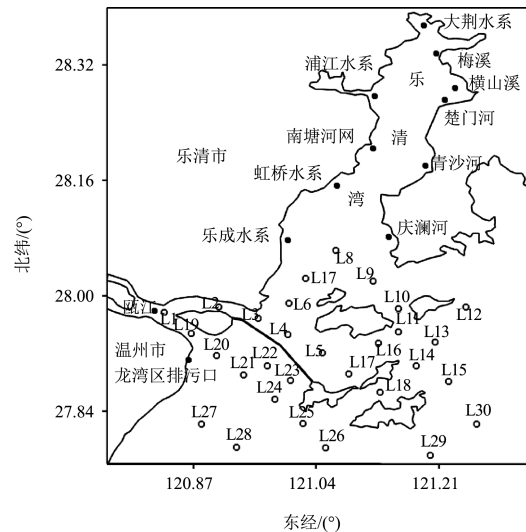
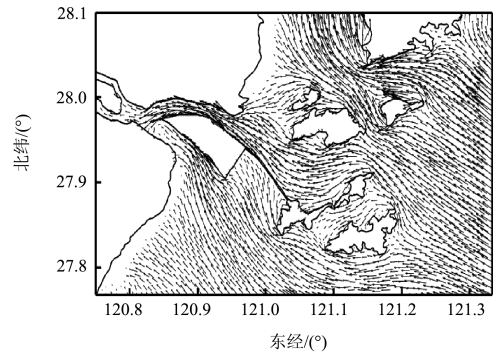


图 6 污染源强设置和输出站点分布

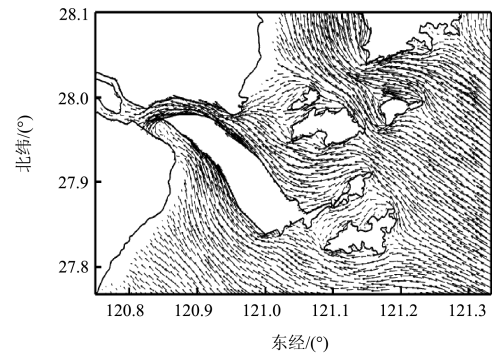
3.1 潮流影响

由图 7 可见, 受群岛遮蔽的影响, 瓯江口海域的涨落潮水流均被分为几股, 近岸河口处以明显的往复流为主。乐清湾的涨潮水流主要来自靠

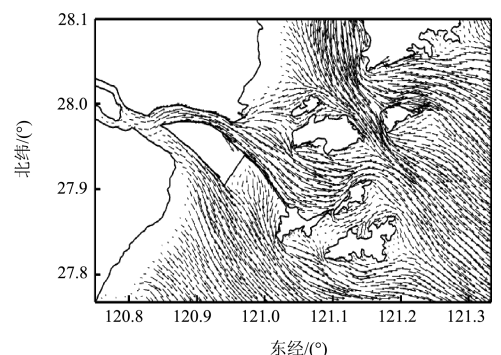
近玉环岛南侧的水道, 其次由鹿西岛和大门岛之间的黄大岙水道的部分涨潮流补给, 落潮水流沿涨潮水流路径流出; 瓯江口的涨潮水流分为南口和北口而不同, 北口主要来自于黄大岙水道—中水道—北口水道, 该水道为瓯江口水流出海的主要通道, 其次由沙头水道—北口水道和大门水道—北口水道的涨潮流补给, 落潮水流沿涨潮水流路径流出, 南口主要来自于霓屿岛南侧水道—南口水道, 落潮水流也沿涨潮水流路径流出。乐清湾和瓯江口的涨落潮水流不发生直接交换, 各自的流向泾渭分明。对比可知, 工程后该区域的潮流运动规律没有发生根本性的改变。



a) 工程后涨潮



b) 工程前涨潮



c) 工程后落潮

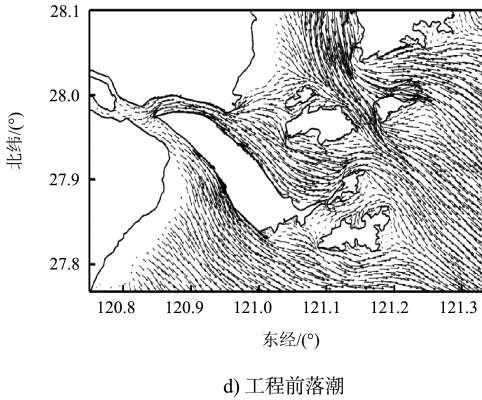


图 7 涨潮和落潮期间流场分布

选取部分具有代表性的输出站位进行潮流变化分析(表 1)。工程实施前, 瓯江口海域潮流总体上呈现落潮流速大于涨潮流速、北口水域流速大于南口水域流速、口门流速大于口外流速的特点, 说明北口水域相对南口水域来说是涨落潮水流

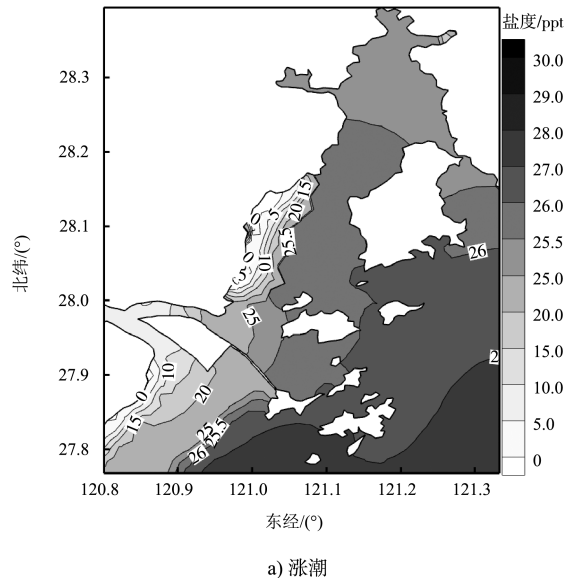
的主要通道。工程实施后, 各个代表点的流速对比工程前, 北口区域在总体上呈略有增大的趋势, 南口区域在靠近河口处流速呈现减小的趋势, 但是从一期工程南围堤处往外, 流速呈现增大的趋势。其中, 七里和黄华附近 L2、L3 大潮涨急和落急流速增加幅度比较大, 说明北口水道潮流流速增加明显; 黄大乔水道和沙头水道附近的 L5、L7 大潮涨潮流速增加, 落潮流速减小, 涨潮流速增加更明显, 这有利于水道水深的保持, 对通航具有积极意义; 南口区域的 L20 大潮涨急流速和落急流速分别降低 0.03 和 0.13 m/s, 幅度较大, 说明南口水道流速降低明显; 位于南口水道南侧的 L27 流速则有所增大; 外海区域 L30 流速变化幅度不大, 表明工程对海域水动力环境影响的范围有限。

表 1 围垦工程后代表点流速变化

| 位置 | 代表点 | 大潮涨急/(m/s) | | | 涨急 变化率/% | 大潮落急/(m/s) | | | 落急 变化率/% |
|----------|-----|------------|------|--------|-------------|------------|------|-------|-------------|
| | | 工程前 | 工程后 | 差值 | | 工程前 | 工程后 | 差值 | |
| 北口 区域 | L1 | 0.49 | 0.49 | -0.005 | -1.02 | 0.92 | 0.96 | 0.04 | 4.35 |
| | L2 | 0.87 | 0.91 | 0.04 | 4.60 | 1.47 | 1.52 | 0.05 | 3.40 |
| | L3 | 0.87 | 0.92 | 0.05 | 5.75 | 1.32 | 1.38 | 0.06 | 4.55 |
| | L5 | 1.11 | 1.11 | 0.005 | 0.45 | 1.21 | 1.20 | -0.01 | -0.41 |
| | L7 | 0.43 | 0.45 | 0.02 | 4.65 | 0.55 | 0.53 | -0.02 | -3.64 |
| | L16 | 0.70 | 0.68 | -0.02 | -2.86 | 1.05 | 1.06 | 0.01 | 0.95 |
| 南口 区域 | L19 | 0.61 | 0.59 | -0.02 | -3.28 | 1.11 | 1.07 | -0.04 | -3.60 |
| | L20 | 0.87 | 0.84 | -0.03 | -3.45 | 1.29 | 1.16 | -0.13 | -10.08 |
| | L27 | 0.53 | 0.58 | 0.05 | 9.43 | 0.63 | 0.72 | 0.09 | 14.29 |
| 外海 | L30 | 0.77 | 0.77 | 0.00 | 0.00 | 0.96 | 0.96 | 0.00 | 0.00 |

3.2 盐度影响

由工程前瓯江口海域涨落潮盐度分布(图 8)可知, 总体来看, 瓯江口海域的盐度值从外海到口门附近逐渐变小, 受上游径流的影响, 口门附近的盐度梯度比较大, 而外海的盐度梯度比较小; 受岛屿、岸线和海底不规则地形的影响, 盐度等值线并不光滑, 呈现舌状分布, 越往外海, 形状越明显。乐清湾区域因为没有大的径流流入, 所以盐度一直比较大; 涨潮时刻高含盐的海水持续向口门内涌入, 口内盐度有增大的趋势; 落潮时刻径流和海水都往口门外流动, 口内盐度有减小的趋势。



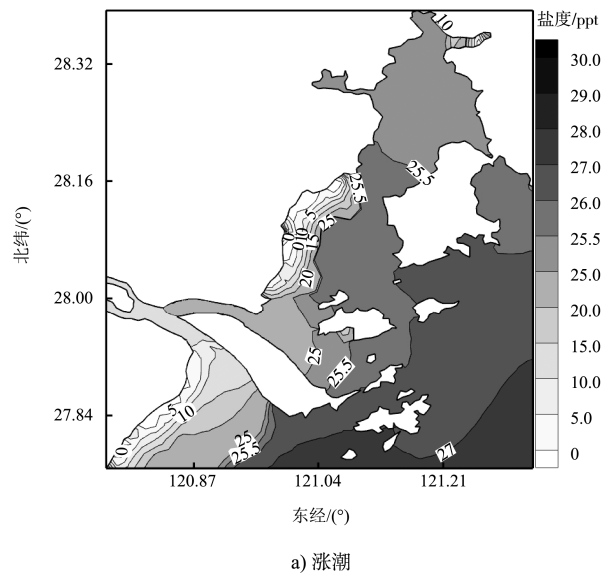
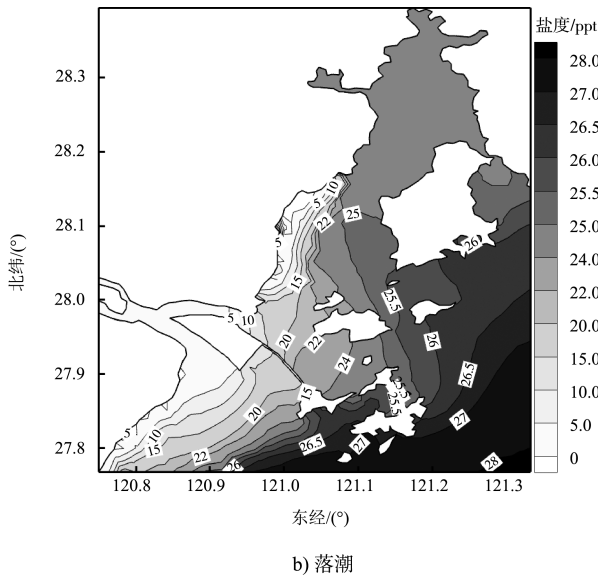


图8 工程前涨潮和落潮盐度模拟值分布

由图9可知,围垦工程实施后,涨潮时,北口区域25‰等值线由原先的黄华和大门岛中间扩展到大门岛最西端。北口区域20‰等值线进一步向口内移动,移动到原来的10‰附近;落潮时,北口区域24‰等值线和22‰等值线都由原来的大门岛和霓屿岛中间向口门方向移动。总体来说,北口区域在围垦工程后出现盐度增加的趋势,这应该是由于围垦工程后北口的潮流量变大导致的结果。围垦工程实施后,南口区域盐度等值线被围垦工程截断,涨潮时,10‰和15‰等值线略有上溯,但是移动距离有限。20‰、25‰等值线均未见明显改变;落潮时,5‰~20‰的等值线均有所下移,但是距离不大,工程对南口区域盐度分布的影响有限。工程实施后,乐清湾、洞头海域和外海海域,涨潮和落潮期间,盐度等值线变化均不大,可以认为工程对这些区域的盐度分布几乎没有影响。

3.3 水质影响

工程实施后,如图10所示,全区域的DIN、DIP浓度都呈现上升趋势,其中北口区域DIN平均上升2.6%,DIP平均上升1.5%。南口区域DIN平均上升3.4%,DIP平均上升2.1%,南口区域比北口区域营养盐浓度相对增加较多,而且越是靠近河口,浓度上升越明显,最大上升比例出现在南口水道L20测站,其DIN浓度上升11.72%,DIP浓度上升13.31%,这与该测站附近的流速减小呈现正相关。

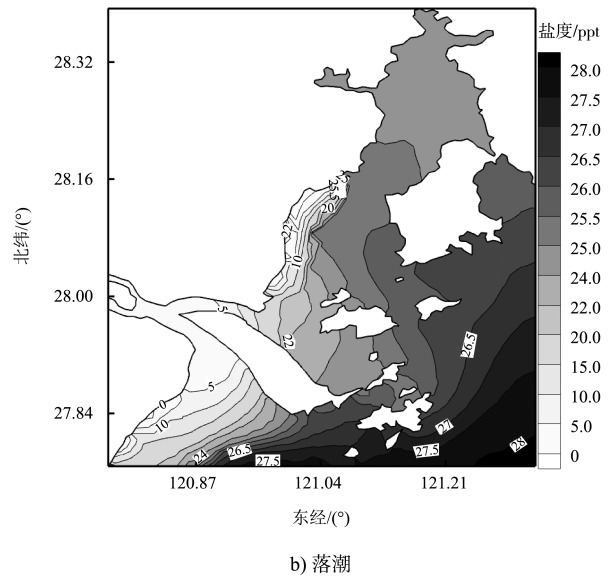
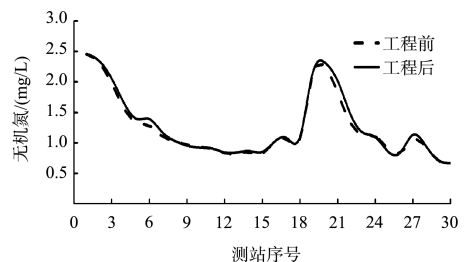
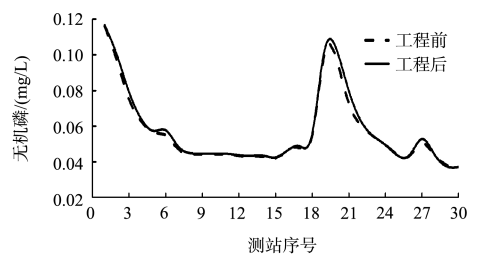


图9 工程后涨潮和落潮盐度模拟值分布



a) DIN



b) DIP

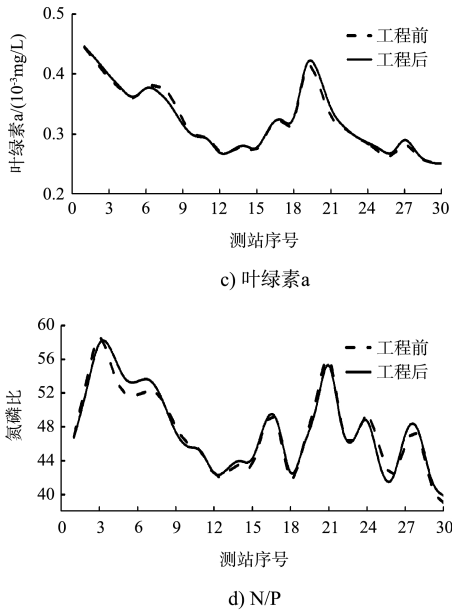


图 10 工程对海域水质影响

结合水动力模拟结果来看, 出现上述变化的原因, 应该是由于围垦工程的实施导致了整个区域水体半交换时间变长、纳潮量变小, 导致全区域污染物扩散速度减慢, 尤其是近岸处原来水流不畅的区域污染物浓度进一步提升。另外, 北口区域氮磷比总体上来说有所上升, 由于磷限制作用, 虽然 DIN 浓度上升, 但是叶绿素 a 的浓度变化不大; 南口区域氮磷比总体上来说有所下降, 磷限制减弱, 叶绿素 a 的浓度有所上升。

4 结论

1) 围垦工程实施后, 瓯江口海域大范围的潮流动力特征并没有发生改变, 瓯江口海域北口区域的流速总体上呈现增加的趋势, 南口区域流速在近河口处呈现减小的趋势, 在围垦一期工程南围堤以外区域呈现略微增大的趋势。

2) 围垦工程实施后, 瓯江口海域的盐度涨落潮分布规律与工程前基本一致, 北口区域的盐度值略有增加。

3) 围垦工程完工后, 瓯江口海域的营养盐浓度仅在近河口处有所增加, 南口水道比北口水道营养盐含量相对增加较多, 叶绿素 a 的变化趋势受氮磷比影响明显。瓯江口海域其他区域水质变化不明显, 幅度在 1% 以内, 工程不会引起海域水质的大范围改变。

参考文献:

- [1] 李孟国, 王正林. 温州浅滩围涂工程的可行性研究[J]. 中国港湾建设, 2001 (5): 30-33.
- [2] 李孟国, 闫勇, 麦苗, 等. 复杂河口河道封堵后有关的潮流和泥沙问题[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1 438-1 445.
- [3] 郑敬云. 河口地区围涂开发的水环境动力特征研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [4] 王勇智, 鲍献文, 王曙光. 我国海洋工程海洋环境影响后评价方法初探—以温州灵霓北堤工程海洋环境影响后评价为例[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(1): 139-144.
- [5] 陈雷, 徐兆礼, 姚炜民, 等. 瓯江口春季营养盐、浮游植物和浮游动物的分布[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1 571-1 577.
- [6] 叶新荣, 张荣保, 许恒韬, 等. 瓯江口海域环境质量现状分析与评价[J]. 科技创新导报, 2014(28): 120-123.
- [7] 李佳. 乐清湾 DIN、DIP 分布数值模拟及其对重大海岸工程的响应[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [8] 海洋图集编委会. 渤海, 黄海, 东海海洋图集(水文)[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [9] 海洋图集编委会. 渤海, 黄海, 东海海洋图集(化学)[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [10] 黄秀清, 姚炎明, 王金辉, 等. 乐清湾海洋环境容量及污染物总量控制研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.
- [11] 张扬, 陈青青, 汪彬彬. 温州市龙湾区内河水质现状调查研究[J]. 中国环境管理, 2014(2): 40-44.
- [12] 陈雷, 徐兆礼, 陈胜, 等. 2007 年乐清湾富营养化空间特征及其成因分析[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(1): 91-97.
- [13] 单慧洁. 温州近海建设工程环境影响潮汐潮流数值模拟[D]. 宁波: 宁波大学, 2014.

(本文编辑 武亚庆)