



# 钱塘江河口围涂工程对杭州湾 水动力和水环境的影响\*

邹志年, 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:** 基于钱塘江河口特殊的自然特征, 自 20 世纪 60 年代开始, 钱塘江河口进行了大范围的治江围涂。由 MIKE 软件建立了杭州湾水动力水质模型, 探讨钱塘江河口围涂工程对杭州湾潮流场、盐度场以及水质的影响。研究表明, 仅在工程区域附近影响了杭州湾水域的水动力特征, 使得河口区的流速增大; 围涂工程使得湾内盐度等值线后退, 有效地减弱了杭州湾的盐水入侵; 工程后随钱塘江而来的污染物得到了更快的扩散稀释, 减弱了河口区水体的污染。

**关键词:** 杭州湾; 治江围涂; 水动力; 水环境

中图分类号: U 659; X 52

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0026-08

## Influence of the reclamation project at Qiantang estuary on the hydrodynamics and water environment in Hangzhou bay

ZOU Zhi-nian, SHEN Yong-ming

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

**Abstract:** On account of the special natural characteristics of Qiantang estuary, the regulation and reclamation in large scale on Qiantang estuary have been carried out since 1960's. Based on the numerical simulation of the hydrodynamics and water environment in Hangzhou bay by MIKE, the influence on flow field, salinity field and water quality of Hangzhou bay has been studied. The result shows that the project affects only its adjoining waters, and it increases the speed of water flow in the estuary. The project can also make the salinity contour backward, and decrease the intensity of saltwater intrusion. The contamination from the Qiantang river will diffuse faster after the reclamation project, while it will reduce the water pollution in Qiantang estuary.

**Keywords:** Hangzhou bay; regulation and reclamation; hydrodynamics; water environment

钱塘江河口是世界著名的强潮海湾, 河床宽浅, 主槽摆动频繁, 河床冲淤剧烈, 河势很不稳定。钱塘江特殊的自然特性给防洪、御潮和排涝带来了极为不利的影 响, 为了减轻其河床冲淤变化大、主槽频繁摆动的危害, 自 20 世纪 60 年代开始, 进行了大规模的治江围涂, 钱塘江河口不断缩窄江道、稳定河槽。经过五十多年的努力,

钱塘江河口共围垦土地 160 万亩 (1 066.7 km<sup>2</sup>), 围垦区域即岸线的变化区域见图 1。在钱塘江河口围涂工程不断实施的同时, 还应该重视大规模围涂工程对杭州湾的水动力、水环境所产生的影响。

已有很多学者对钱塘江河口围涂工程对其周边海域水动力环境的影响进行了研究。鲁海燕等<sup>[1]</sup> 基于数值模型预测研究了钱塘江北岸海宁三

收稿日期: 2016-04-28

\*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: 邹志年 (1991—), 男, 硕士研究生, 从事水动力环境的数值模拟研究。

期治江围涂工程对钱塘江涌潮的影响; 谢亚力<sup>[2]</sup>探讨了钱塘江河口区治江围涂对杭州湾风暴潮的影响; 倪勇强等<sup>[3]</sup>则是研究了河口区治江围涂对杭州湾海床的影响。



图 1 钱塘江河口岸线变化

笔者对钱塘江河口及杭州湾水域进行数值模拟, 并利用该模型重点模拟分析钱塘江河口围涂工程的实施对杭州湾水动力、水环境造成的影响。

## 1 杭州湾水动力、水环境数值模拟

### 1.1 模型的建立

首先利用 MIKE 软件构建了大尺度东海水动力模型, 之后以水动力和温盐模拟为基础, 耦合 Ecolab 模块, 建立小范围的杭州湾水动力水质耦合模型, 模拟研究围涂工程实施前后杭州湾水动力、水环境的变化。

大尺度东海水动力模型范围包括长江口、杭州湾以及临近海域, 计算网格见图 2, 测站布置见图 3。初始的潮位和流速定为 0; 外海开边界主要考虑  $K_1$ 、 $M_2$ 、 $O_1$ 、 $S_2$  共 4 个主要分潮作用, 由海洋图集<sup>[4]</sup>获取调和常数并插值, 后利用潮汐预报方法得到; 钱塘江和长江的上游潮流边界分别设置在坐标  $120.185^\circ\text{E}$ 、 $30.215^\circ\text{N}$  和坐标  $119.9^\circ\text{E}$ 、 $32^\circ\text{N}$  处, 以点源的方式设置边界, 取芦茨埠站和大通站的流量资料作为边界条件; 温盐边界数据则是由海洋图集的温盐等值线插值得到; 模型考虑了大气温度、相对湿度、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。由于模型模拟区域较广, 区域内水深变化明显, 近岸地区水深最浅不到 10 m, 而外海区域的水深最深可以达到 110 m, 为了提高模型的精度, 更好地模拟近岸低水区的局部变化, 模型均采用渐变非结构化三角网格, 并对钱塘江河口处的网格进行加密。

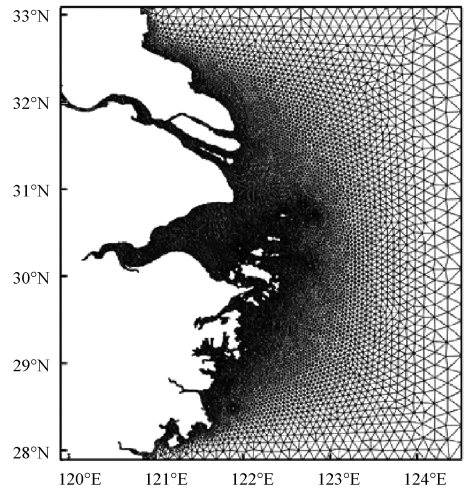


图 2 东海计算网格

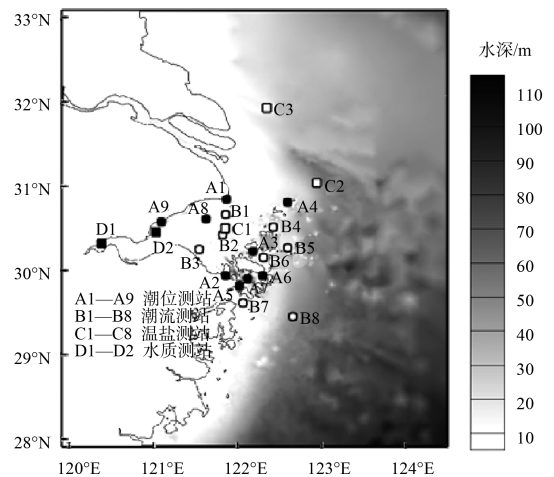


图 3 地形以及实测站点布置

小范围的杭州湾水动力水质耦合模型的模拟区域包括钱塘江河口、杭州湾以及杭州湾外邻近海域, 范围大致为  $120^\circ\text{E} \sim 123^\circ\text{E}$ 、 $29.6^\circ\text{N} \sim 31.2^\circ\text{N}$ , 网格设置见图 4a), 由大尺度东海水动力模型为其提供潮位、温盐等边界条件, 其他模型参数设置与大尺度模型一致。根据图 1 杭州湾历年围涂岸线的变化, 绘制围涂工程实施后的计算域网格(图 4b))。

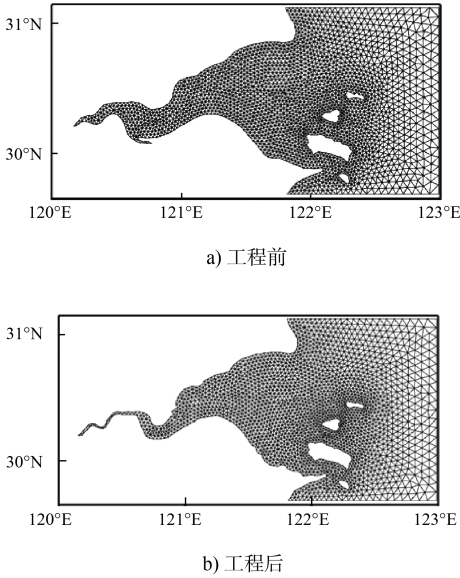


图4 计算域网格设置

数学模型的控制方程主要包括 1 个连续方程和 2 个动量方程。

连续方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (1)$$

x 方向动量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \frac{\partial(wu)}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \end{aligned} \quad (2)$$

y 方向动量方程：

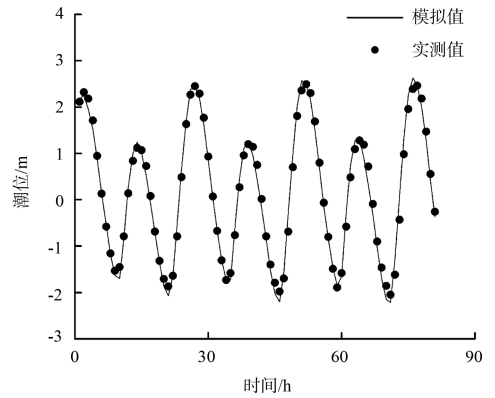
$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial z} = -fv - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \\ \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $t$  为时间； $x$ 、 $y$ 、 $z$  为坐标； $d$  为静水深， $\eta$  为水位， $h=d+\eta$  为总水深； $u$ 、 $v$ 、 $w$  为 3 个方向的流速； $f=2\Omega\sin\phi$  为科氏力参数（ $\Omega$  为地球自转角速度， $\phi$  为纬度坐标）； $g$  为重力加速度； $\rho$  为水密度， $\rho_0$  为海水参考密度（取  $1\,025\text{ kg/m}^3$ ）； $s_{xx}$ 、 $s_{xy}$ 、 $s_{yx}$ 、 $s_{yy}$  为 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； $F_u$ 、 $F_v$  为水平应力项。

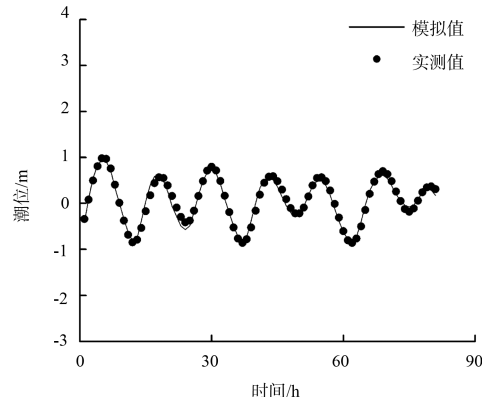
## 1.2 模型的验证

### 1.2.1 潮位和潮流验证

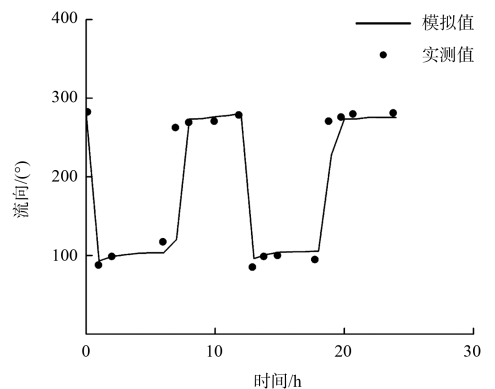
选取 2008 年 7 月的潮位和潮流模拟值进行验证(实测值取自潮汐表)，共验证 9 个潮位测站、8 个潮流测站，结果显示模拟值和实测值拟合良好，虽然流速验证上有些许误差，但转流时刻和流速最大值发生的时刻与实测数据吻合较好，说明模型模拟的潮流结果是可以反映杭州湾海域的潮流场特征的。图 5 为潮位测站 A1、A2 以及潮流测站 B1 的验证结果。



a) A1潮位



b) A2潮位



c) B1流向

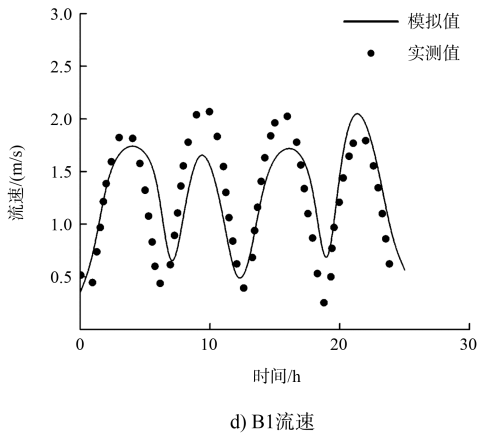
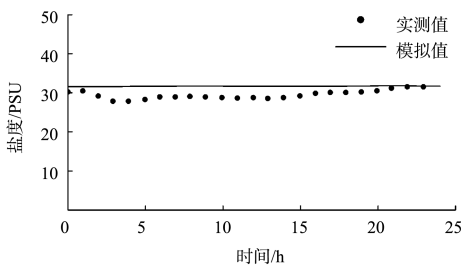


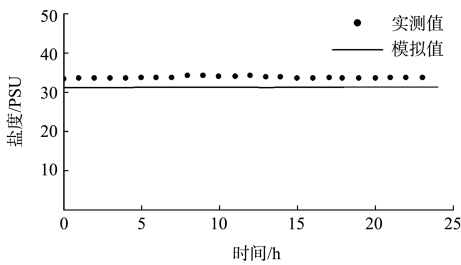
图 5 部分测站潮位、潮流验证

### 1.2.2 盐度验证

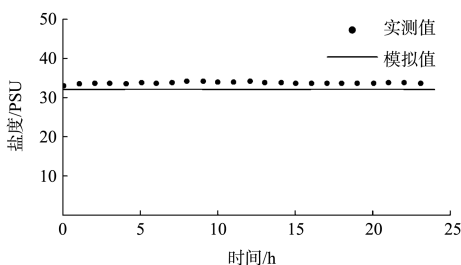
利用实测盐度数据对模型的温盐模拟进行验证, 验证了 C1、C2 以及 C3 共 3 个盐度测站, 每个测站在水域垂向方向上进行分层, 对表、中、底层的盐度分别进行验证, 验证结果均比较良好, 说明盐度模拟基本合理, 图 6 为 C2 盐度测站的验证结果。



a) 表层



b) 中层

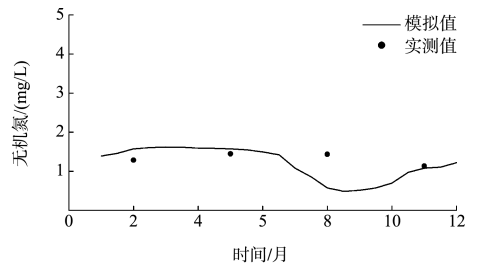


c) 底层

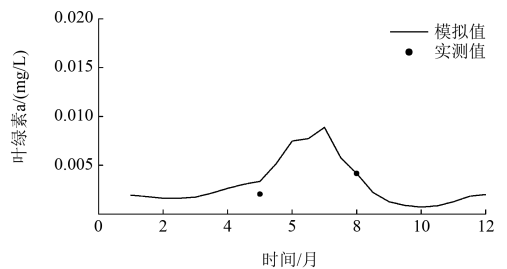
图 6 测站 C2 的盐度验证曲线

### 1.2.3 水质验证

影响杭州湾水域水质的主要因素有叶绿素 (Chl) 和营养盐, 而营养盐的组成主要包括无机氮 (DIN) 和无机磷 (DIP), 主要研究钱塘江河口围涂工程对杭州湾内叶绿素和无机氮含量的影响<sup>[5]</sup>。取叶绿素和无机氮浓度与实测值进行验证, 模拟值能与实测值稳定在一个量级内, 误差较低, 说明可以通过该模型对钱塘江河口围涂工程实施后的杭州湾海域水环境进行深入分析, 图 7 为 D1 测站的无机氮浓度验证和 D2 测站的叶绿素浓度验证。



a) D1



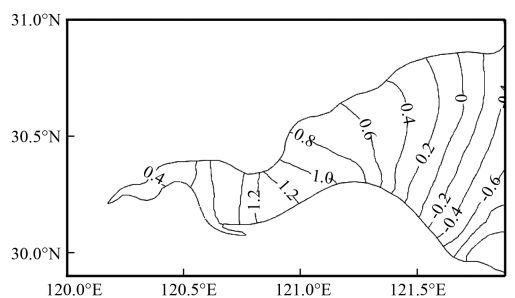
b) D2

图 7 杭州湾叶绿素和无机氮的浓度变化验证

## 2 钱塘江河口围涂工程对杭州湾水动力的影响

### 2.1 潮位的影响

由杭州湾小尺度水动力水质耦合模型绘制工程前后的潮位分布, 选择涨潮过程中, 钱塘江河口处为高潮位的时刻进行对比, 工程前后潮位对比见图 8。



a) 工程前

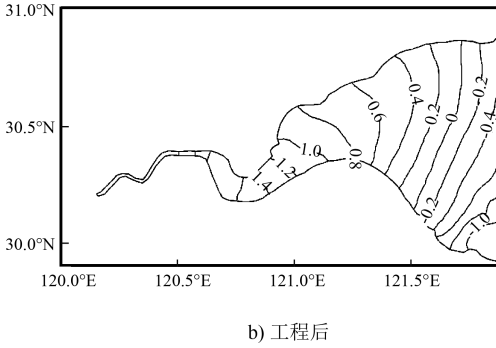


图8 工程前后潮位对比 (单位: m)

对比图8中工程前后的潮位分布可以看出,围涂工程实施后,由于河口区河床的束窄,潮流在由湾口向湾顶的传播过程中,潮位被抬高,即工程后钱塘江河口区的潮位要高于工程前的潮位,并且潮位的变化集中在工程区域附近,远离工程区的水域潮位变化不大。

### 2.2 潮流场的影响

由杭州湾小尺度水动力水质耦合模型分别模拟围涂工程实施前后杭州湾内潮流场的变化,选取杭州湾涨潮、落潮时的潮流场分析围涂工程对杭州湾潮流场造成的影响,围涂工程前后涨潮、落潮时的流场见图9。

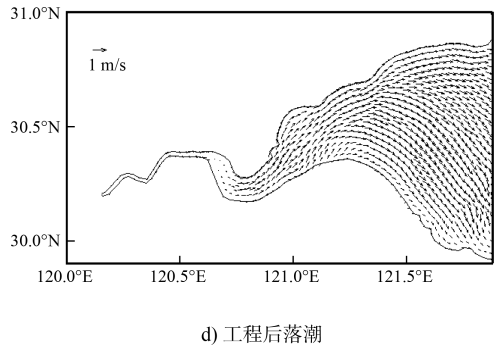
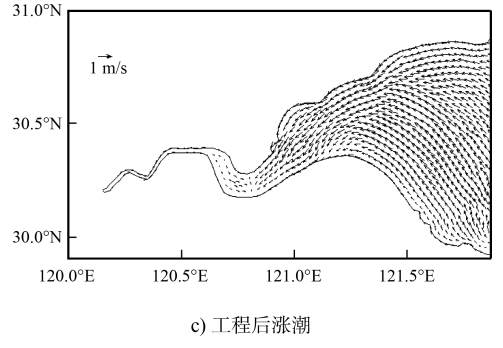


图9 工程前后流场对比

对比围涂工程前后涨潮、落潮时的潮流场可以看出,钱塘江河口围涂工程并未对杭州湾湾内的潮流场造成显著的影响,涨潮、落潮时刻的流场并未发生明显改变,流场情况和工程前一致。但是在钱塘江河口的工程区附近水域,流场发生了明显的改变,在涨潮时和落潮时刻流速均有一定的增大。这是因为围涂工程导致了江道的缩窄,从而使得工程区附近水域的流速产生了一定的增大。

为了更直观地研究围涂工程对杭州湾潮流场的影响,自钱塘江河口向杭州湾内分别取11个代表点进行流速分析,代表点位置见图10。

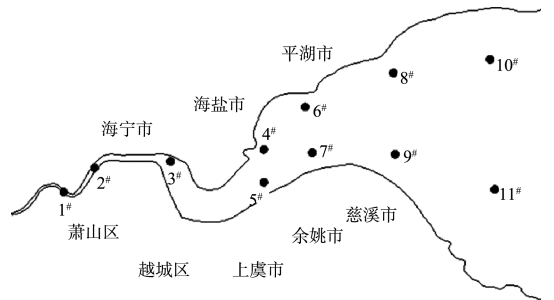
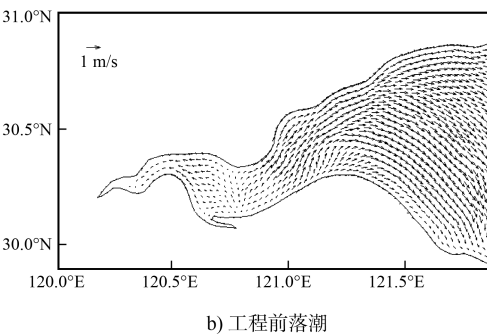
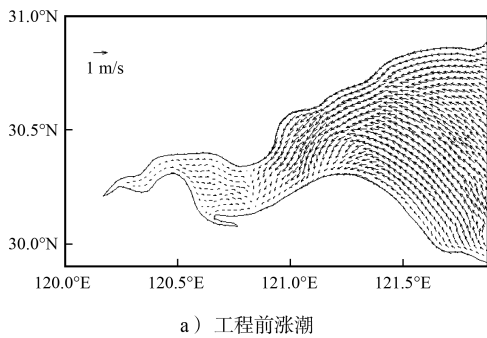


图10 流速代表点位置

代表点 1#~3# 位于钱塘江河口围涂工程附近的水域中, 4#~11# 点则位于距离围涂工程相对较远

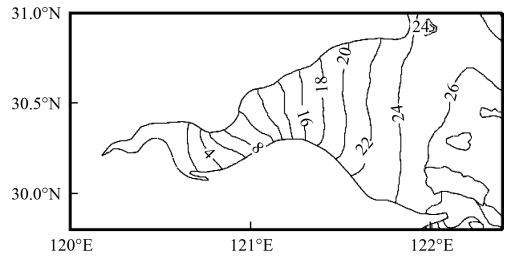
的杭州湾水域中, 围涂前后涨落急时刻各流速点的流速变化见表 1。

表 1 代表点流速变化

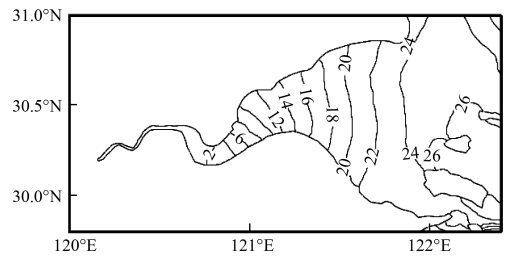
代表点	落急时刻/(m/s)			变化率/%	涨急时刻/(m/s)			变化率/%
	工程前	工程后	差值		工程前	工程后	差值	
1	0.08	0.15	0.07	81.52	0.07	0.16	0.09	138.72
2	0.08	0.15	0.07	88.15	0.07	0.16	0.09	125.13
3	0.15	0.11	-0.04	-25.10	0.13	0.12	-0.01	-9.03
4	0.53	0.53	0.00	0.09	0.46	0.46	0.00	0.34
5	0.42	0.39	-0.03	-6.37	0.32	0.35	0.03	8.97
6	0.45	0.47	0.02	4.76	0.45	0.49	0.04	8.76
7	0.50	0.52	0.01	2.67	0.45	0.44	-0.02	-3.86
8	0.51	0.52	0.01	2.16	0.45	0.50	0.05	10.91
9	0.51	0.53	0.01	2.48	0.47	0.47	0.00	0.59
10	0.60	0.60	0.01	1.52	0.43	0.45	0.02	4.83
11	0.73	0.74	0.01	1.58	0.49	0.51	0.02	4.68

从表 1 可以看出, 位于围涂工程附近的 1#~3# 代表点在工程后流速的变化率相对较大, 其中 1#、2# 点流速的变化率更是超过了 80%, 而位于杭州湾内的 4#~11# 点的流速变化率则相对较小, 这表明围涂工程对周边潮流场的影响是有限的, 它只能影响工程附近水域的潮流, 而距离围涂工程越远的点, 流速变化越小。1#、2# 代表点的流速在工程后出现了激增, 这是由于围涂工程导致了钱塘江河口的河床束窄, 过水断面减小, 使得河口的流速变大, 而后过渡到杭州湾内 4#~11# 代表点, 这些点的位置距离围涂工程较远, 工程前后岸线地形变化不大, 流速的变化率减小到了 10% 以下, 这同工程前后的流场图的结果是一致的。

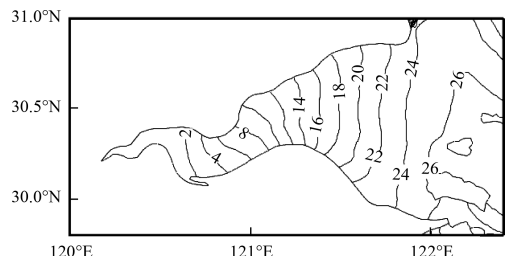
围涂工程实施前后夏季涨憩和落憩时杭州湾的表层盐度分布。



a) 工程前涨憩



b) 工程后涨憩



c) 工程前落憩

### 3 钱塘江河口围涂工程对杭州湾水环境的影响

#### 3.1 盐度场的影响

模型模拟结果以及相关学者的研究成果显示, 杭州湾内的盐度在东西方向上存在着一定的梯度, 即自湾内向湾外盐度逐渐增加<sup>[6]</sup>。并且受强潮流混合作用, 杭州湾内的盐度分布在垂向上是比较均匀的, 湾内表层和底层的盐度相一致, 所以本文选取杭州湾表层盐度分布来分析钱塘江河口围涂工程对杭州湾盐度场产生的影响, 图 11 分别是

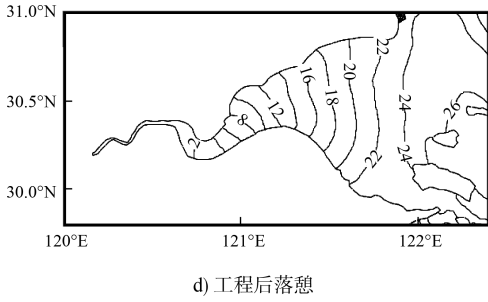


图 11 夏季涨憩、落憩潮时杭州湾内的盐度分布(单位:PSU)

对比图 11 中围涂工程前后的杭州湾内盐度场的变化可以看出：围涂工程实施后，在夏季，无论涨憩还是落憩，杭州湾内盐度均有所减小，小于 24 PSU 的低盐度区面积增大，湾内小于 24 PSU 的盐度等值线向湾外方向均有一定程度的回退，这表明围涂工程实施后，湾内水体与外海的交换量减少，水体盐度普遍减小，从而使得围涂工程后，杭州湾内盐度等值线后退、低盐度区面积扩大。而工程后杭州湾的盐度场，无论是涨憩还是落憩，盐度的平面分布和之前从湾顶到湾口梯度增加的特征保持一致，这说明围涂工程的实施并未破坏杭州湾水体原有的盐度结构。

### 3.2 水质的影响

通过验证良好的杭州湾水质模型对钱塘江河口围涂工程实施前后的杭州湾水质进行模拟，统计钱塘江河口围涂工程区域附近 D1 和 D2 测站的无机氮和叶绿素的月平均浓度，结果见图 12。

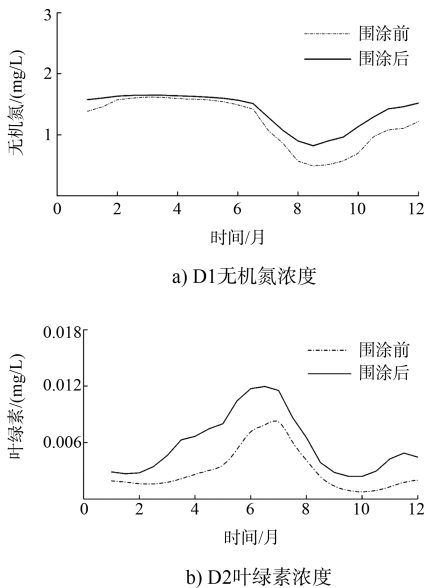


图 12 工程前后钱塘江河口月平均叶绿素和无机氮浓度变化曲线

由图 12 对比结果可知，钱塘江河口围涂工程实施前，叶绿素浓度在春夏季逐渐增加，在 7 月到达峰值，浓度为 0.008 mg/L，后逐渐降低，在 10 月达到最低值，浓度为 0.001 mg/L；而无机氮浓度则是在春夏季节稳定在 1.5 mg/L，在 7 月之后略有降低，后在 12 月回到 1.5 mg/L。对比围涂工程实施后的营养盐组成可以看出，由于钱塘江河口处江道的缩窄及水域面积的减少，叶绿素浓度和无机氮浓度较工程前均有一定程度的升高。其中叶绿素的浓度变化相对较为明显，7 月的峰值由 0.008 mg/L 涨至 0.012 mg/L，最低浓度值也由 0.001 mg/L 上涨至 0.003 mg/L，而无机氮的浓度虽也有一定的增加，但涨幅不够明显，仅在低浓度期 8、9、10 月有明显的浓度增加，无机氮浓度由原本的 0.5 mg/L 涨至 1 mg/L，其余月份依旧稳定在 1.5 mg/L。

对比钱塘江河口围涂工程前后无机氮浓度(图 13)，可以清晰地看出，围涂工程使得江道缩窄，钱塘江径流中的污染物相较于工程前，更加充分地向外海域扩散，更快地得到了稀释，故围涂工程的实施，加速了钱塘江污染物的稀释扩散。

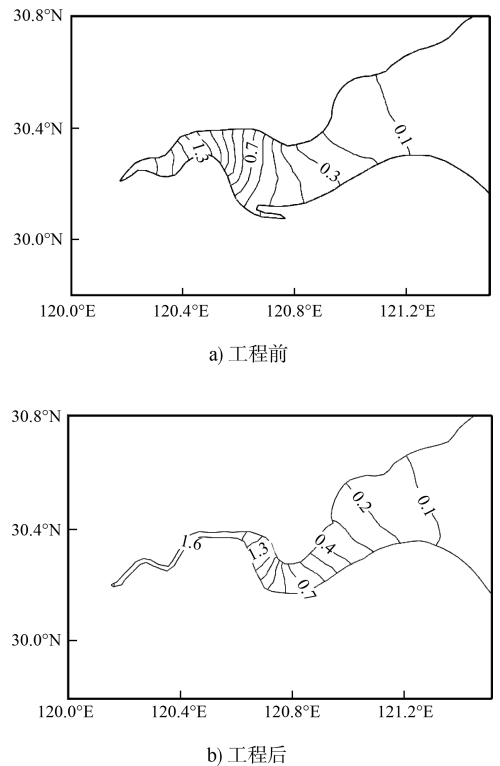


图 13 工程前后无机氮浓度分布 (单位: mg/L)

#### 4 结语

1) 潮位。围涂工程的实施, 使得河口工程区的潮位有了一定程度的增加, 而远离工程区的水域潮位变化不大。

2) 流速。围涂工程后, 钱塘江河口的江道束窄, 河口区域流速增大。

3) 盐度。围涂工程后, 杭州湾内水体与外海的交换量减少, 水体盐度普遍减小, 湾内盐度等值线后退, 低盐度区面积扩大, 这表明围涂工程的实施, 使得杭州湾水域的盐水入侵减弱。

4) 水质。围涂工程后, 由于江道的缩窄, 钱塘江河口段的无机氮和叶绿素浓度有了一定的升高, 但是与此同时, 围涂工程也使得钱塘江径流中的污染物更快地向外海域扩散稀释, 在一定程度上也减弱了钱塘江中上游排放的污染物对河口附近水域的污染。

#### 参考文献:

- [1] 鲁海燕, 潘存鸿, 卢祥兴, 等. 钱塘江海宁三期治江围涂工程对涌潮影响的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(5): 484-491.
- [2] 谢亚力, 黄世昌, 王瑞锋, 等. 钱塘江河口围涂对杭州湾风暴潮影响数值模拟[J]. 海洋工程, 2007, 25(3): 61-67.
- [3] 倪勇强, 林洁. 河口区治江围涂对杭州湾水动力及海床影响分析[J]. 海洋工程, 2003, 21(3): 73-77.
- [4] 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.
- [5] 高生泉, 陈建芳, 金海燕, 等. 杭州湾及邻近水域营养盐的时空分布与富营养化特征[J]. 海洋学研究, 2011, 29(3): 36-47.
- [6] 孔亚珍, 丁平兴, 贺松林. 长江口外及毗邻海域盐度的时空变化特征[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(4): 427-434.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 19 页)

- [10] 中交第一航务工程局有限公司, 福建省交通基本建设工程质量监督检测站. 水运工程质量检验标准: JTS 257—2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [11] 王建中, 范红霞, 朱立俊, 等. 和畅洲航道深水航道整治右汊水动力改善措施分析[J]. 水运工程, 2014(9): 11-17.
- [12] 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 南京水利科学研究院. 内河航运工程水文规范: JTS 145-1—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [13] 刘德进, 冯海暴, 冯甲鑫, 等. 深水大流速定点精确抛填装置及施工方法: 中国, 201511029947. 6 [P]. 2015-12-31.
- [14] 刘德进, 曲俐俐, 冯甲鑫, 等. 钢缆拉力实时动态监测装置: 中国, 201620110011.X [P]. 2016-02-03.
- [15] 冯海暴, 曲俐俐, 曾凡军, 等. 深水抛填船实时测控验收系统及施工方法: 中国, 201511031613.2 [P]. 2015-12-31.
- [16] 刘亚龙. HY-2 雷达高度计海面高度定标技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [17] 李国庆. 单波束测深仪设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [18] 牛刚. 基于嵌入式的回声测深仪系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [19] 胡昌顺. 单波束测深仪系统仿真设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [20] 程剑刚. 网络 RTK 技术联合数字测深仪在湖泊库容测量中的应用[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [21] 孙建东. 回声测深仪数字系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [22] 吕继书, 万仕平, 李玮. GPS 结合测深仪水下地形测量原理与应用[J]. 天然气与石油, 2010(2): 50-51.

(本文编辑 王璁)