



台州湾浅滩取土区方案优化研究^{*}

刘 红，方 伟，王大伟，林 娜，肖烈兵

（中交上海航道勘察设计研究院有限公司，上海 200124）

摘要：采用潮流数学模型和地形冲淤预报模式相结合的方法，探讨台州湾浅滩取土区长宽比和不同的实施方案下对流场和航道冲淤的影响，为取土区的方案优化提供科学依据。研究表明：台州湾浅滩取土区开挖后对工程区附近的流场和地形冲淤变化的影响相对较大，取土区 3 km 以外的区域影响幅度显著减小。在取土区容积一定的情况下，长宽比和长深比越小，对大范围流场和椒江口主航道冲淤变化的影响越小；与全开挖方案相比，分仓开挖方案对航道淤积的影响可减少约 30% 左右。

关键词：台州湾；取土区；航道淤积

中图分类号：TV 148

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2012)12-0148-08

Project optimization of borrow area in shoal of Taizhou bay

LIU Hong, FANG Wei, WANG Da-wei, LIN Na, XIAO Lie-bing

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Based on the tidal flow mathematical model and erosion-deposition prediction model, we analyze the flow field variation and waterway siltation density to explore the effects under different ratios of length to width and implementation schemes for the borrow area in the shoal of Taizhou bay. It is shown that the variation amplitude of the flow field and waterway siltation density is relatively large on the engineering area after the borrow area is excavated, and that decreases significantly in the region 3km outside the borrow area. Under the condition of certain volume of the borrow area, the ratios of length to width and length to depth are smaller, and the amplitude of flow field variation and waterway siltation density is smaller. Compared with the full excavation schemes, the amplitude of the waterway siltation density can be reduced about 30% by the segmental excavation schemes. This research result may serve as reference for the planning and design of the borrow area.

Key words: Taizhou bay; borrow area; waterway siltation

随着社会经济的快速发展，城市用地的矛盾日渐突出，因此，利用丰富的滩涂资源进行促淤圈围已成为缓解城市用地矛盾的有效途径。围海造地一方面创造了稀缺的土地资源，新增土地指标可置换城市发展用地；另一方面土地开发不涉及拆迁补偿费用，具有较大的成本优势。

然而，采砂不当会将引起河床调整，给工

程附近的航道安全和通航环境安全带来一定的影响。现有研究表明，大量的河床采沙可能引发河流下游水位降低和潮汐动力增强^[1]、局部水流紊乱^[2]、河床普遍下切和河床冲淤^[3-4]、影响航道水深和通航环境安全^[5]等一系列问题。毛野^[6]研究表明，采砂坑对水流的作用类似于跌坎，采砂使河床局部变形，河道横向次生流和平面流场也被迫

收稿日期：2012-10-10

^{*}基金项目：中交上海航道勘察设计研究院有限公司专业建设项目（2010-120S）；河口海岸学国家重点实验室开放基金项目（SKLEC-KF201201）

作者简介：刘红（1978—），男，博士，高级工程师，从事河口海岸水动力和工程泥沙研究。

调整,水流流态变化将引起溯源冲刷。毛尽乔^[7]对采砂坑紊动特性研究表明,沿主流方向形成纵向涡旋导致采砂坑上游缘口冲刷,坑内的横向次生流则造成横向侵蚀,进而导致河床全面调整,影响河床稳定和航道水深的维护。因此,采砂对河床和港航工程的影响不容忽视。

近年来,随着数值模拟技术的不断发展与成熟,不少学者已将数学模型应用于采砂工程。国内外河道采砂影响分析数值模拟方法,包括经验分析法、水流数值模拟、泥沙数值模拟、采砂坑数值模拟等,对采砂河道进行数值模拟是分析预测采砂影响的主要研究手段^[8-9]。李孟国等^[10]采用潮流数学模型结合平衡水深经验公式计算出水道的泥沙淤积厚度,分析采砂造成的航道淤积变化和航道水深的影响。吴祥华等^[11]采用潮流数学模型分析采砂前后工程区附近的流场变化,并从河势、防洪、水环境、通航、航道和生态等方面分析了采砂对长江口南槽河段的综合影响。穆锦斌等^[12]对采砂后河段冲淤变化及采砂区内泥沙回淤进行了预测。但是上述研究大多集中在取土区对河道流场和流态的影响方面,对航道冲淤变化的影响考虑较少,而且没有考虑采砂区尺度变化对河道的影响。

台州湾循环经济产业集聚区位于椒江口两侧,是浙江省首批通过省政府审批成立的14个产业集聚区之一。根据台州湾循环经济产业集聚区的相关规划,南侧浅滩将先期实施围垦造地工程、后期实施配套工程建设项目。为了减少吹填取土对椒江口主航道的影响,开展了取土区方案优化的试验研究。

本文将以太州湾浅滩取土区为例,采用潮流数学模型和地形冲淤预报模式等分析方法,探讨取土区长宽比和不同的实施方案下对椒江口主航道淤积的影响,为取土区的方案优化提供科学依据,为其他海域取土区的设计提供重要的参考和借鉴。

1 研究区概况

台州湾位于浙江省中部沿海,为开敞的河口

湾,呈喇叭型向外延伸,外缘有东矾列岛、台州列岛为屏障,海域开阔,水深大多小于10 m,在椒江口外发育有水深小于2 m的拦门沙浅滩。台州湾海岸属于淤泥质海岸,以平直的淤涨型岸滩为主,潮滩十分发育,大型的滩涂有南岸的台州浅滩,北岸的南洋海涂和北洋海涂。

1.1 流域来水来沙

台州湾上游的椒江口属于山溪性强潮河口,多年平均径流量51.7亿 m³。径流年均和时均分配不均,洪枯季径流量变化悬殊,汛期(5—10月)径流量占全年总径流量的3/4,枯期(11—翌年4月)径流量占1/4。多年平均输沙量为122万t,流域输沙主要集中于汛期,输沙占全年的94.4%。

1.2 潮汐

椒江河口海域属非正规半日潮浅海潮,涨潮历时小于落潮历时,其涨落潮历时差值达2 h以上,甚至达5 h以上,是我国潮汐不等较显著的海区之一。台州湾各测站的平均潮差均较大,约4 m左右,和浙南的乐清湾、温州湾等同属于我国强潮海湾之一,潮差分布以湾的东部和南部较小,西部河口区较大。

1.3 波浪

据大陈站21 a(1960—1980年)的资料统计,累年平均波高1.2 m,最大波高为14.4 m。

1.4 潮流

台州湾外旋转流明显,湾内河口以往复流为主。能反映台州湾潮流运动形式的M₂分潮,K绝对值均小于0.4,并且以湾外向湾内至湾顶逐渐递减,表明潮流运动形式从湾外以旋转流为主,逐渐向湾顶港汊河道过渡到以往复流为主。基本上涨潮流向西北,落潮流向东南。椒江口受河口地形及河槽的约束,涨、落潮水流方向与河槽轴线基本一致。

取土区位置及台州湾流速矢量见图1,台州湾附近平均流速、流向见表1。

1.5 泥沙特征

台州湾附近含沙量东部低、西部高,尤其是西部即椒江口内为高含沙量区。含沙量的平面分布为自椒江口、海岸向海方向递减。椒江口

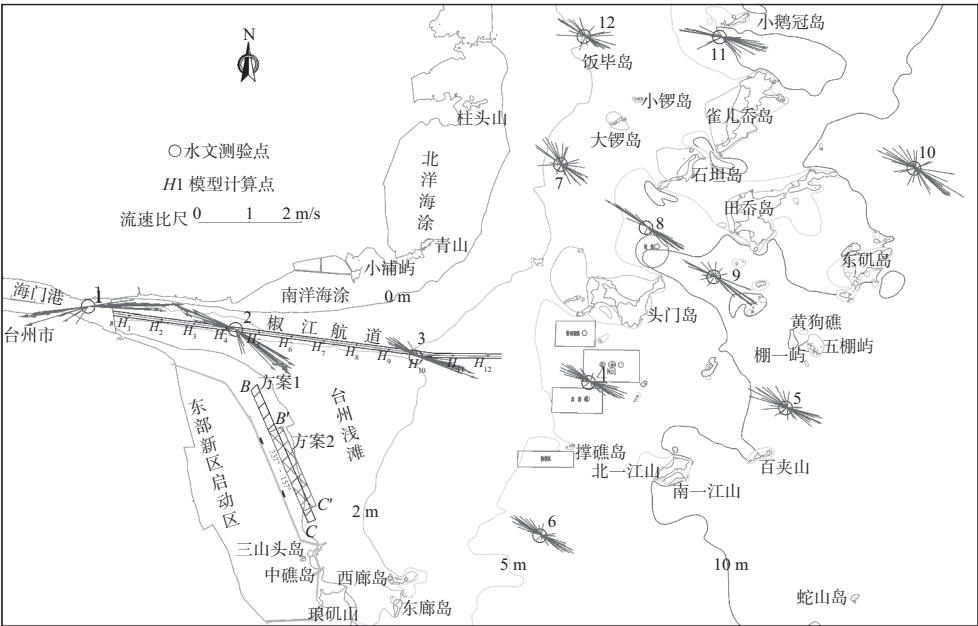


图1 取土区位置及台州湾流速矢量图

表1 台州湾附近平均流速、流向

站位	大 潮				小 潮			
	涨潮流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	涨潮流向/ ($^{\circ}$)	落潮流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	落潮流向/ ($^{\circ}$)	涨潮流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	涨潮流向/ ($^{\circ}$)	落潮流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	落潮流向/ ($^{\circ}$)
1 [#]	1.05	262	0.9	89	0.78	266	0.61	91
2 [#]	0.87	298	0.88	122	0.57	298	0.62	119
3 [#]	0.49	304	0.71	103	0.32	288	0.45	89
4 [#]	0.42	301	0.48	113	0.26	297	0.24	120
5 [#]	0.51	299	0.48	113	0.28	288	0.26	98
6 [#]	0.43	306	0.43	120	0.23	285	0.23	109

内1[#]垂线含沙量最高，大潮涨、落潮平均含沙量分别为7.35 kg/m³和5.16 kg/m³；椒江口2[#]和3[#]垂线平均含沙量其次，其他垂线的平均含沙量在0.03 ~ 0.234 4 kg/m³（图2）。1[#]~2[#]和3[#]垂线水域含沙量递降梯度最大。

悬沙 D_{50} 为0.005 ~ 0.007 mm，底质 D_{50} 在0.008 ~ 0.023 mm，泥沙类型主要为黏土质粉砂。

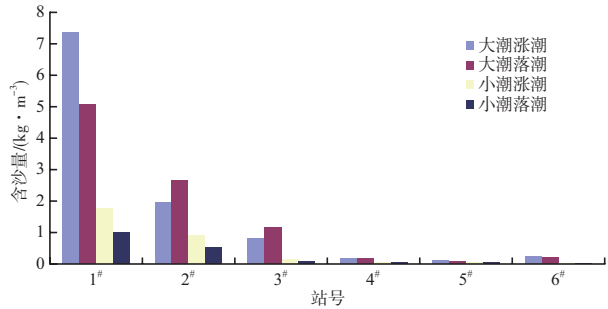


图2 大、小潮潮段平均含沙量分布

2 取土区方案设计

取土区选择在工程区东侧十一塘前沿水域（图1），取土区近边界距现有海塘线约0.65 km。取土区原滩面高程0 m（85高程），工程的取土区面积约为4.08 km²，取土平均深度约为8.5 m，取土方量约为3 700万m³[13]。

方案1：BC段总长约8.1 km，宽460 m，长宽比为17.6:1，离椒江口主航道约2.9 km。方案2：B' C' 段总长约5 km，宽820 m，长宽比为6.1:1，离椒江口主航道约5.1 km。

为尽量减少取土坑的引流效应，减少工程实施后对周边流场的影响，优化方案1按照隔仓方案实施，每650 m长度设置分仓，两仓之间留50 m隔埂不开挖，BC段共分为11仓；优化方案2按照每900 m设置分仓，两仓之间留50 m隔埂不开挖，B' C' 段共分为5个仓（图1，3）。

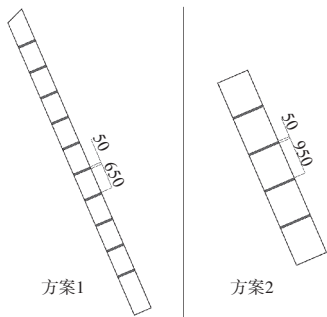


图3 取土区分仓实施方案

3 研究方法

3.1 二维潮流数学模型

本数模研究采用的软件为丹麦水力研究所 (DHI) 开发的MIKE21软件中的FM模块进行计算, 模型求解采用非结构网格中心网格有限体积法求解, 对计算区域内滩地干湿过程, 采用水位判别法处理。

从潮位验证结果来看, 模型计算所得的潮位

值与实测值吻合程度较好, 高、低潮时间的相位差在0.5 h以内, 高、低潮位的差值也控制在10 cm 以内。从流速、流向的验证结果来看, 工程区大部分测点的验证结果良好, 急流与憩流出现的时刻与实测值的偏差在0.5 h以内, 潮段平均流速的误差基本在10%以内, 主流流向和平均流向值偏差小于10° (图4, 5)。

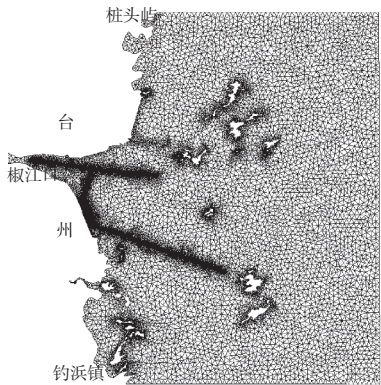
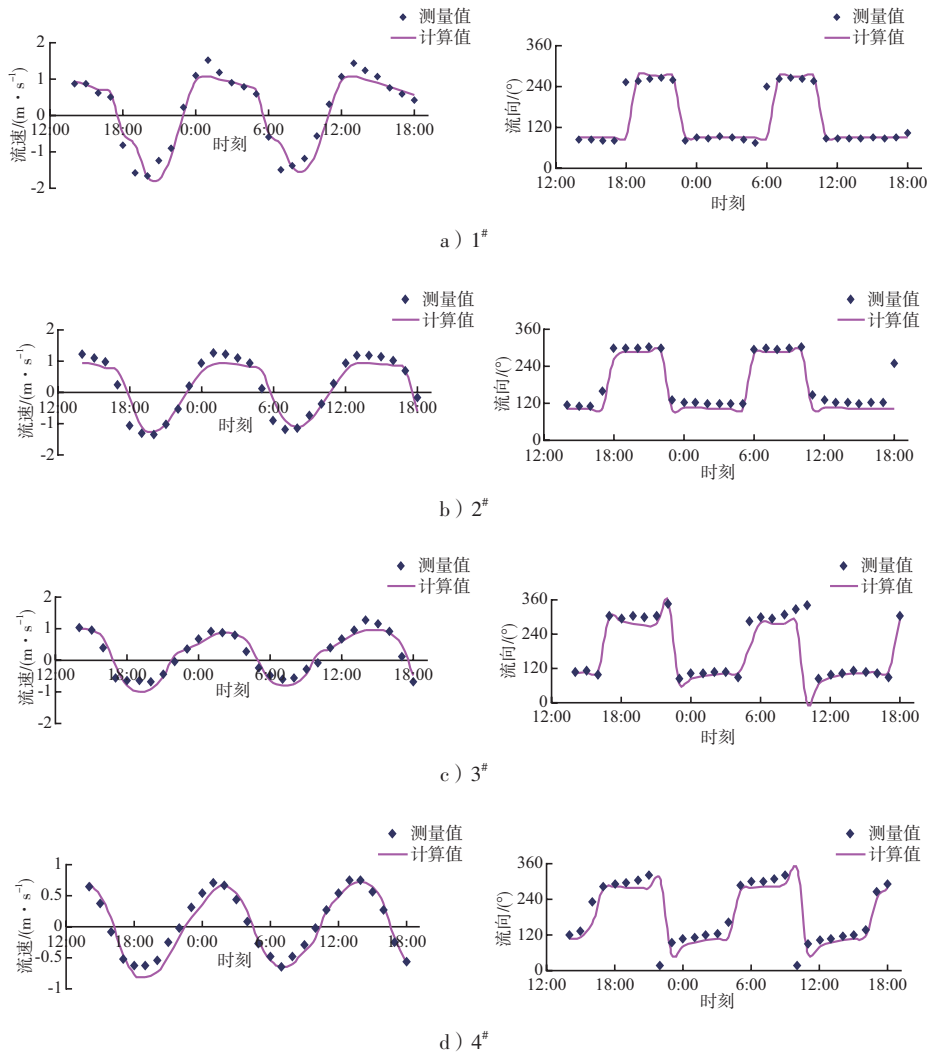


图4 模型计算范围



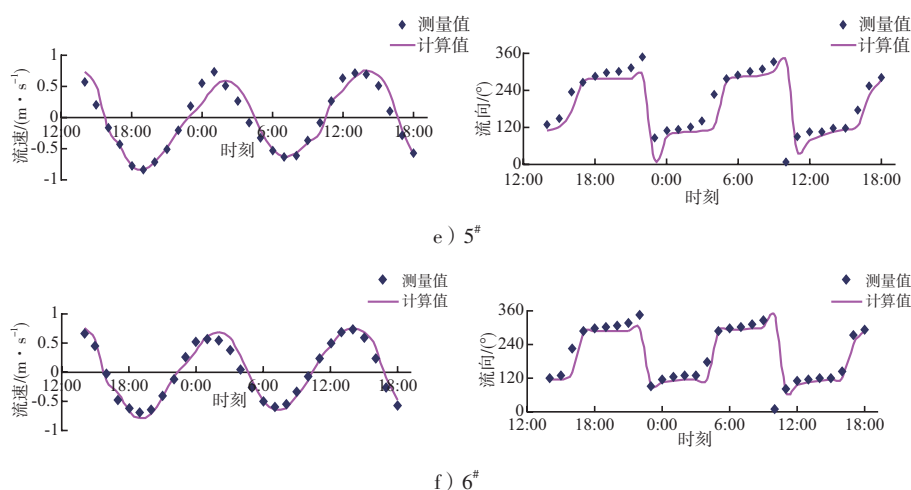


图5 大潮流速、流向验证结果

从以上潮位、流速、流向的验证结果来看,本模型符合JTS/T 231-2—2010《海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程》中的计算精度要求,所模拟的流域能够较好地体现工程区域附近的水流特征,可以用本模型来研究工程后的水动力特性。

3.2 航道冲淤计算

工程实施后,改变了局部水流条件和含沙量分布,从而影响海床的地形冲淤。按照目前国内外泥沙问题的研究现状,工程实施后海床冲淤预测采用半经验半理论公式进行估算。

根据窦国仁潮汐水流悬沙运动方程和挟沙力公式推导出冲淤计算模式,预测工程实施后工程区及附近海床冲淤变化。

由窦国仁^[14]潮汐水流悬沙运动微分方程:

$$\frac{\partial(AS)}{\partial t} + \frac{\partial(Q_x S)}{\partial x} + \alpha B \omega (S - S^*) = 0 \quad (1)$$

式中: A 为河床断面面积; S 为含沙量; Q_x 为 x 方向的流量; α 为泥沙沉降机率; B 为河宽; ω 为悬沙沉降速度; S^* 为水流挟沙能力。

令 H 为水深, q 为 x 方向的单宽流量,则式(1)改写为:

$$\frac{\partial(HS)}{\partial t} + \frac{\partial(qS)}{\partial x} + \alpha \omega (S - S^*) = 0 \quad (2)$$

在潮周期内对式(2)积分并化简得到:

$$H_1 - H_2 = \frac{\alpha \omega T}{\rho_s} (S_{*1} - S_{*2}) \quad (3)$$

式中: H_1 , H_2 为工程前、后的水深; ρ_s 为泥沙干密度; S_{*1} , S_{*2} 为工程前、后的水流挟沙能力。

窦国仁^[14]通过对泥沙起动机率等统计概念分

析得到的挟沙能力公式可简化为:

$$S^* = k \frac{u^2}{gH} \quad (4)$$

式中: k 为挟沙力系数; u 为流速; g 为重力加速度; H 为水深。

将式(4)代入式(3)中得到:

$$\Delta H = H_1 - H_2 = \frac{\alpha \omega S_{*1} T}{\rho_s} \left[1 - \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^2 \frac{H_1}{H_2} \right] \quad (5)$$

式中: u_1 , u_2 为工程前、后的流速。对式(5)求解得到:

$$H_2 = \frac{H_1 - a + \sqrt{(a - H_1)^2 + 4abH_1}}{2} \quad (6)$$

$$\Delta H = H_1 - H_2 = \frac{H_1 + a - \sqrt{(a - H_1)^2 + 4abH_1}}{2} \quad (7)$$

式中: $a = \frac{\alpha \omega S_{*1} T}{\rho_s}$, $b = \left(\frac{u_2}{u_1} \right)^2$ 。

本预报模式的基本思路是,当工程实施后流速增加,则挟沙力增强,海床发生冲刷,流速减小则海床发生淤积。因此,由二维潮流数学模型得到的工程前、后流速的变化情况即可估算海床冲淤的幅度。

1) 根据浙江近岸海洋工程泥沙数模研究经验,悬沙沉降机率 α 取0.2~0.4。

2) 工程区悬沙中值粒径为0.006 mm,按照絮凝沉降 ω 取0.000 5 m/s。

3) 淤积物干密度按 $\rho_s = 1\ 750 D_{50}^{0.183}$ 计算,本海区底质中值粒径平均为0.011 2 mm,淤积物干密度 ρ_s 取值为770 kg/m³。

4) 工程前水深 H_1 由台州湾1:30 000海图

(2004年)和工程区1:5 000测图(2011年)得到。

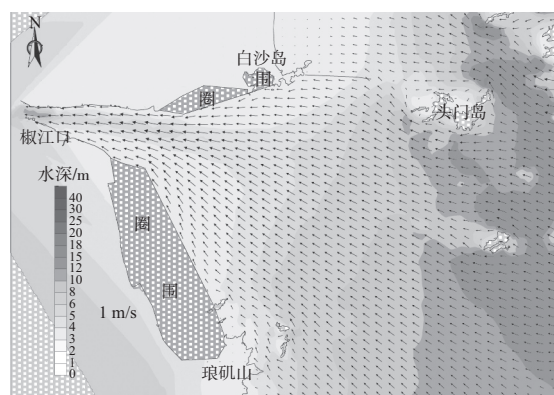
5) 水流挟沙能力 S 由2009年4—5月大小潮水文测验资料得到。

6) 工程前、后流速 u_1 和 u_2 由二维潮流数学模型得到。

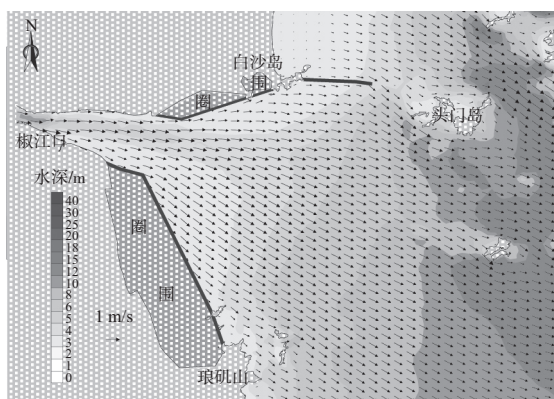
4 结果及分析

4.1 工程前流场分布

工程前台州湾附近海域急流时刻流场的分析表明(图6), 受地形和岸线影响, 湾内呈现出明显的往复流特性; 湾内涨、落急时刻主流线基本沿NW~SE方向; 涨急时刻, 经过头门岛与大茶花岛之间的潮流与来自SE向的潮流在湾内汇合流入椒江口; 落急时刻, 基本沿着涨潮流的流路流向外海, 只是小部分水流在经过连岛公路时受其阻挡作用, 绕过头门岛流进外海。



a) 大潮涨急



b) 大潮落急

图6 工程前大潮涨、落急时刻流场

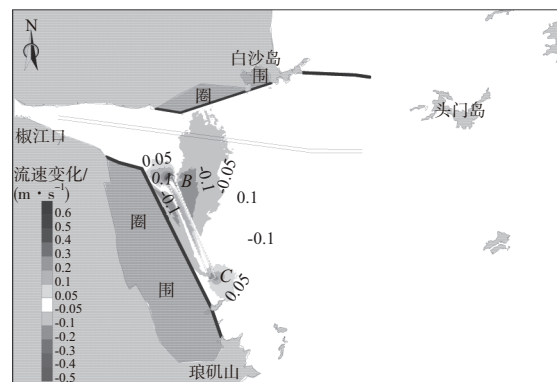
4.2 完全开挖方案

取土方案1及方案2完全开挖条件下, 工程区域附近流速、流向变化相对较大, 3 km以外的区域

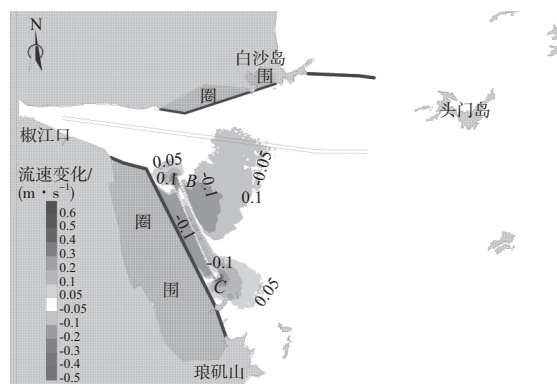
影响幅度明显减小或基本不受影响。方案实施后取土区东西两侧流速均有所减小, 南北两侧端点流速均有所增大, 方案2实施后影响范围相对较小。

方案1实施后, 由于取土区的引流效应, 椒江口口门附近流速略有增加, 椒江口主航道上段($H_1 \sim H_4$)附近涨、落潮平均流速最大增加幅度为0.02 m/s; 出口门后由于水面展宽, 流速减小, 航道中段($H_5 \sim H_{10}$)涨、落潮平均流速最大减小幅度分别为0.06 m/s和0.05 m/s; 口外段($H_{11} \sim H_{12}$)涨、落潮平均流速基本不受影响(图7, 表2)。

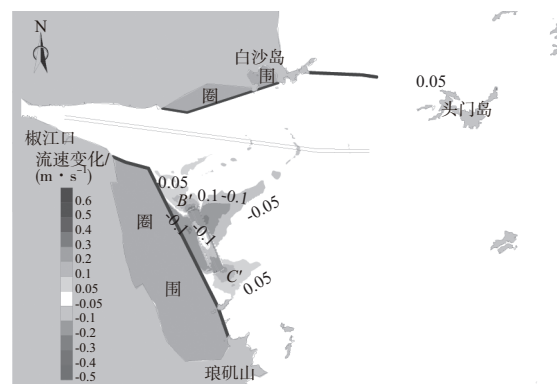
方案2实施后椒江口主航道流速变化范围和幅度小于方案1, 航道中段($H_5 \sim H_{10}$)涨、落潮平均流速最大减小幅度分别为0.03 m/s和0.04 m/s。



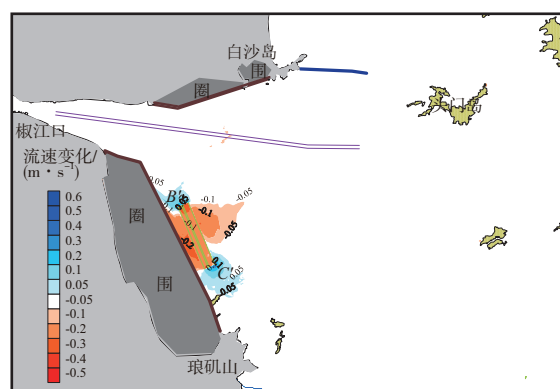
a) 方案1涨潮平均流速



b) 方案1落潮平均流速



c) 方案2涨潮平均流速



d) 方案2落潮平均流速

图7 大潮条件下完全开挖后涨、落潮平均流速变化

表2 完全开挖条件下椒江口主航道流速变化(大潮)

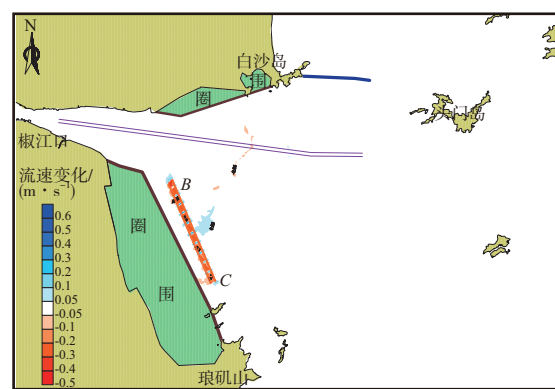
采样点	涨潮平均流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)			落潮平均流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		
	工程前	方案1 变幅	方案2 变幅	工程前	方案1 变幅	方案2 变幅
H_1	1.09	0.01	0	0.89	0.02	0
H_2	0.92	0	0	0.80	0.02	0.01
H_3	0.83	0.02	0.01	0.81	0.02	0
H_4	0.88	0.01	0.01	0.79	0.01	0
H_5	0.77	-0.04	-0.01	0.81	0	0
H_6	0.70	-0.06	-0.03	0.78	-0.04	-0.01
H_7	0.59	-0.04	-0.01	0.70	-0.05	-0.04
H_8	0.6	-0.03	-0.02	0.65	-0.03	-0.02
H_9	0.57	-0.01	-0.02	0.60	-0.02	-0.02
H_{10}	0.51	0.01	0	0.56	-0.03	-0.02
H_{11}	0.51	0	-0.01	0.51	-0.01	0
H_{12}	0.51	0	0	0.47	0	0

注: 变幅正值表示流速增加, 负值表示流速减小。

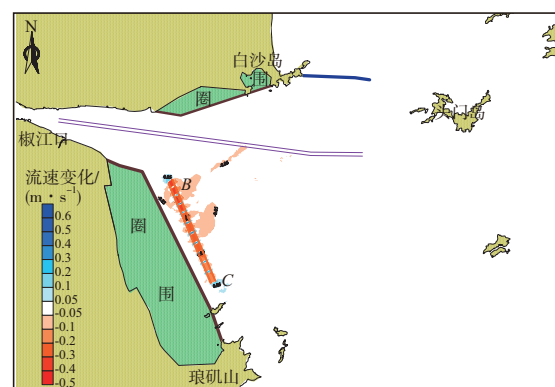
4.3 分仓开挖方案

取土方案1和方案2按分仓开挖实施后, 工程区附近流速、流向变化相对较大, 两方案实施后取土区内流速最大减小幅度均为0.3 m/s, 取土区1 km 范围外流场基本不受影响, 方案2分仓开挖方案实施后影响范围较小。

方案1按分仓开挖实施后, 椒江口主航道上段($H_1 \sim H_4$)附近涨、落潮平均流速增大0.01 m/s; 航道中段($H_5 \sim H_{10}$)涨、落潮平均流速最大减小幅度分别为0.04 m/s和0.03 m/s; 口外段($H_{11} \sim H_{12}$)涨、落潮平均流速基本不受影响(图8, 9, 表3)。方案2按分仓开挖实施后椒江口主航道流速变化范围和幅度也小于方案1, 航道中段($H_5 \sim H_{10}$)涨、落潮平均流速最大减小幅度分别为0.03 m/s和0.02 m/s。

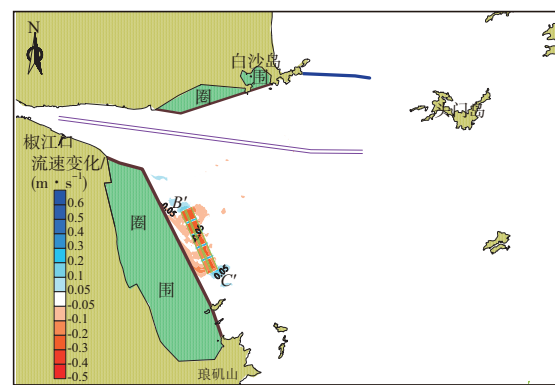


a) 涨潮平均流速

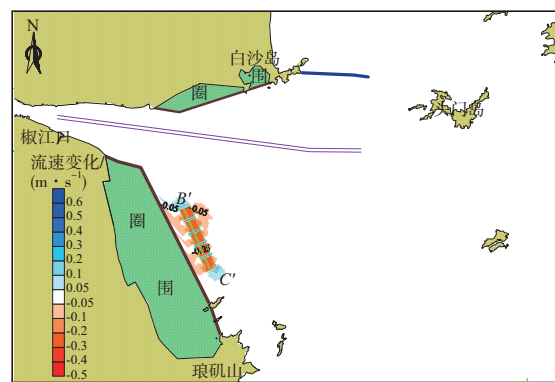


b) 落潮平均流速

图8 大潮条件下方案1分仓开挖后涨、落潮平均流速变化



a) 涨潮平均流速



b) 落潮平均流速

图9 大潮条件下方案2分仓开挖后涨潮平均流速变化

表3 大潮分仓开挖条件下椒江口主航道流速变化

采样点	涨潮平均流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)			落潮平均流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	工程前	方案1 变幅	方案2 变幅	工程前	方案1 变幅	方案2 变幅
H_1	1.09	0	0	0.89	0	0
H_2	0.92	0.01	0	0.80	0.01	0.01
H_3	0.83	0	0	0.81	0	0
H_4	0.88	0	0	0.79	-0.01	0
H_5	0.77	-0.02	0	0.81	-0.03	0
H_6	0.70	-0.04	-0.03	0.78	-0.03	0.02
H_7	0.59	-0.03	-0.02	0.70	-0.02	-0.01
H_8	0.60	-0.02	-0.01	0.65	-0.02	-0.01
H_9	0.57	-0.01	-0.01	0.60	-0.01	-0.01
H_{10}	0.51	-0.01	0	0.56	0	-0.01
H_{11}	0.51	0	0	0.51	0	0
H_{12}	0.51	0	0	0.47	0	0

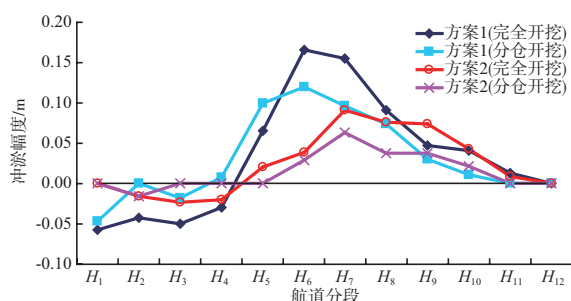
注: 变幅正值表示流速增加, 负值表示流速减小。

4.4 航道冲淤影响分析

根据上述地形冲淤计算模式, 计算取土区完全开挖和分仓方案实施后的椒江口主航道的冲淤变化情况。由计算结果的分析可知(图10), 方案实施后航道上段($H_1\sim H_4$)略有冲刷, 航道中段($H_5\sim H_{10}$)将会发生淤积, 航道外段($H_{11}\sim H_{12}$)基本不受影响。

方案1完全开挖方案实施后椒江口主航道 $H_1\sim H_3$ 段略有冲刷, 最大冲刷幅度为0.06 m, 航道 $H_5\sim H_{10}$ 段发生淤积, 航道 H_6 段淤积0.17 m, 由 H_6 向两侧逐渐减小; 方案1分仓开挖方案实施后, 椒江口主航道 H_6 段淤积0.12 m, 与全开挖方案相比, 淤积幅度减小约29.4%。方案2完全开挖方案实施后椒江口主航道 $H_1\sim H_3$ 段略有冲刷, 最大冲刷幅度为0.03 m, 航道 H_7 段淤积0.09 m, 受影响的区段主要集中在 $H_6\sim H_{10}$ 段, 由 H_7 向两侧逐渐减小; 方案2分仓开挖方案实施后, 椒江口主航道 H_7 段淤积0.06 m, 淤积幅度减小约33.3%。

采砂坑对河床的影响范围和程度主要取决于采砂坑的形状、大小以及采砂坑与河道的相对位置等因素^[2]。根据上述流场和航道冲淤分析的研究表明, 方案1(长宽比为17.6:1)实施后对椒江口主航道的影响要小于方案2(长宽比为6.1:1), 说明在面积大致相等的情况下, 取土区长宽比越小, 其引流效应越小, 对周边涉水工程的影响越小; 与全开挖方案相比, 分仓实施方案对航道淤积的影响可减少约30%左右。已有研究的分析表



注: 正值表示冲刷, 负值表示淤积。

图10 不同方案实施后椒江口主航道地形冲淤变化

明, 长深比越大, 水位降落越明显, 采砂区长度的增加对水位跌落影响较大^[15]。

根据上述研究成果, 在进行取土区规划和设计时, 在满足取土方量和吹泥管排距的前提下, 尽可能选择长宽比和长深比相对较小的方案, 并且采用分仓开挖的方案, 以减小取土区对周边涉水工程的影响。

5 结论

1) 取土区长宽比越小, 工程实施后对周边涉水工程的影响越小。方案1(长宽比为17.6:1)全开挖方案实施后, 航道中段($H_5\sim H_{10}$)涨、落潮平均流速最大减小幅度分别为0.06 m/s和0.05 m/s, 航道最大淤积幅度为0.17 m; 方案2(长宽比为6.1:1)全开挖方案实施后, 航道中段涨、落潮平均流速最大减小幅度分别为0.03 m/s和0.04 m/s, 航道最大淤积幅度为0.09 m。

2) 与取土区全部开挖方案相比, 分仓开挖方案实施后对航道淤积的影响可减少约30%左右。方案1分仓开挖方案实施后, 航道中段($H_5\sim H_{10}$)涨、落潮平均流速最大减小幅度分别为0.04 m/s和0.03 m/s, 航道最大淤积幅度为0.12 m; 方案2(长宽比为6.1:1)分仓开挖方案实施后, 航道中段涨、落潮平均流速最大减小幅度分别为0.03 m/s和0.02 m/s, 航道最大淤积幅度为0.06 m。

3) 在进行取土区规划和设计时, 在满足取土方量和吹泥管排距的前提下, 尽可能选择长宽比和长深比相对较小的方案, 并且采用分仓开挖的方案, 以减小取土区对周边涉水工程的影响。

(下转第161页)