



长江口航道疏浚土利用至横沙浅滩 数值模拟研究*

李 波¹, 付 桂^{1,2}, 顾峰峰³, 李为华⁴

(1. 交通运输部长江口航道管理局, 上海 200003; 2. 上航鸿工程管理有限公司, 上海 200137;
3. 上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201; 4. 华东师范大学, 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

摘要: 针对 2020 年后长江口深水航道疏浚土全部外抛至海洋倾倒区造成疏浚土资源浪费的问题, 利用三维潮流泥沙数学模型 SHIWM-3D 对疏浚土综合利用至横沙浅滩进行固沙保滩的方案进行了数值模拟, 综合分析横沙浅滩流态分布、泥沙输运扩散情况、疏浚土落淤效果以及对深水航道回淤的影响。结果表明: 1) 航道疏浚土吹泥上滩后部分泥沙直接落淤, 部分泥沙则随涨落潮流扩散输运。2) 横沙浅滩区域大潮期间呈现冲刷状态, 小潮期间呈现淤积状态, 疏浚土在浅滩总体表现为淤积。3) 航道疏浚土吹泥上滩至横沙浅滩区域对深水航道的回淤影响不大。4) 长江口航道疏浚土利用至横沙浅滩的方案是可行的, 是解决 2020 年以后长江口航道疏浚土综合利用的可持续发展方向之一。

关键词: 长江口航道; 疏浚土; 横沙浅滩; 输运; 淤积

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0106-08

Numerical simulation on utilization of dredged soil in Yangtze Estuary channels to Hengsha shoal

LI Bo¹, FU Gui^{1,2}, GU Feng-feng³, LI Wei-hua⁴

(1. Yangtze Estuary Waterway Administration Bureau, Shanghai 200003, China;

2. Shanghai Hanghong Engineering Management Co., Ltd., Shanghai 200137, China;

3. Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China;

4. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Dredged soil in deep-water channels of the Yangtze Estuary is all dumped into marine dumping areas after 2020, which leads to waste of dredged soil resources. This paper uses a three-dimensional mathematical model of tidal current and sediment (SHIWM-3D) and numerically simulates the scheme of comprehensive utilization of dredged soil to the Hengsha shoal for sand stabilization and beach protection. In addition, the paper comprehensively analyzes the fluid flow distribution, sediment transport and diffusion, sediment deposition effect of dredged soil, and its influence on sediment deposition in deep channels. The results show that: 1) Some sediments are deposited directly after the dredged soil is blown onto the beach, while others are diffused and transported with tidal currents. 2) Scour and siltation states appear in the Hengsha shoal during spring and neap tides, respectively, and the dredged soil is generally deposited in the shoal. 3) The deposition of the deep channels is slightly affected when the dredged soil in channels is blown onto the Hengsha shoal. 4) It is feasible to apply dredged soil in Yangtze Estuary channels to Hengsha shoal, which provides a direction for sustainable and comprehensive utilization of dredged soil in Yangtze Estuary channels after 2020.

Keywords: Yangtze Estuary channel; dredged soil; Hengsha shoal; transport; deposition

收稿日期: 2022-03-17

*基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(21DZ1201700、21DZ1201002)

作者简介: 李波(1987—), 男, 工程师, 从事航道维护疏浚工程管理与航道治理研究。

2020 年随着上海市横沙东滩涂整治工程的结束, 长江口航道疏浚土综合利用也无法继续, 疏浚土资源又重新回到了全部外抛废弃的状态。2020 年长江口 12.5 m 深水航道 5 432 万 m^3 疏浚土全部外抛, 2021 年长江口 12.5 m 深水航道 5 866 万 m^3 疏浚土全部外抛。据估算, 未来几年长江口 12.5 m 深水航道每年将继续产生 5 500 万 m^3 左右的疏浚土, 如得不到有效的利用, 将造成资源的严重浪费^[1-5]。

在长江大保护战略推进和围填海严控政策下, 疏浚土资源化利用的程度需进一步加强, 利用的模式也需创新。借鉴美国路易斯安那州对海岸防护和利用密西西比河疏浚土进行湿地修复等做法, 可采取积极有效的措施, 利用疏浚土吹填上滩, 对处于侵蚀环境下的滩面实施泥沙补给, 缓解滩面侵蚀, 并可进一步塑造滩涂基底, 为滩涂生态环境优化提供基础^[6]。综合长江口滩涂现状, 横沙浅滩是当前实现疏浚土资源化利用最为适宜的区域。

以横沙浅滩作为疏浚土生态化利用试点区域, 利用三维潮流泥沙数模计算模拟疏浚土的输运、冲淤、成滩过程, 研究横沙浅滩区域疏浚土综合利用效果及对深水航道回淤的影响。研究结果可为长江口航道疏浚土综合利用研究提供一定的借鉴和参考。

1 研究方法

1.1 模型计算范围及网格介绍

使用上海航道勘察设计研究院研发的三维潮流泥沙数学模型 SHIWM-3D^[7] 进行研究, 该模型计算范围上游起自大通, 下游至绿华山以东约 250 km, 北至大丰港附近, 南侧包括整个杭州湾。为了准

确反映工程区的潮流场, 模型网格很好地拟合了长江口北槽航道工程和长江口自然岸线, 并在北槽区域局部加密。计算网格单元为 447×269 , 垂线分 10 层, 见图 1。采用变时间步长(5~10 s)。

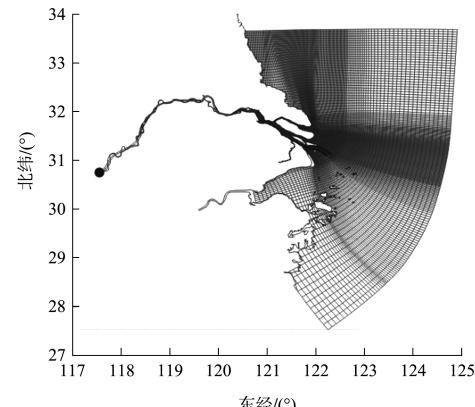


图 1 数学模型网格

1.2 模型外边界条件设置

水动力边界: 模型外海开边界由 16 个调和常数分布插值给出, 上游由大通流量控制, 水、沙验证取验证时段流量过程。

泥沙含量开边界: 上游大通边界取近年来大通年均含沙量, 约为 0.14 kg/m^3 ; 外海边界取 0.1 kg/m^3 。

1.3 计算水文地形资料

模型方案计算地形选用 2017 年 11 月长江口大范围地形, 风场选用欧洲 ECMWF 风场数据。本底方案工程边界以 2017 年长江口工程岸线为准, 其中横沙东滩工程按全部完工设置, 同时考虑南槽航道治理一期工程实施。

为保证模型能够较好地反映北槽区域的水、沙分布, 三维潮流泥沙数学模型对长江口 2017 年 2 月(枯季)和 2017 年 7 月(洪季)两次水文泥沙测验成果进行了验证, 主要包括潮位、潮流及含沙量。各验证使用的边界条件见表 1。

表 1 数模验证试验边界条件

验证工况	时段	径流	风场
枯季潮位、潮流、含沙量验证	2017 年 2 月	大通实测, 约 $14\,000 \text{ m}^3/\text{s}$	ECMWF 风场
洪季潮位、潮流、含沙量验证	2017 年 7 月	大通实测, 约 $55\,800 \text{ m}^3/\text{s}$	ECMWF 风场

1.4 模型验证

潮位验证选取长江口区域中浚站、六滧站、

北槽中站、吴淞站、崇头站、牛皮礁站、白茆站、鸡骨礁站等 8 个潮位站的数据。从潮位验证结果

来看,长江口数学模型计算潮位过程与各潮位站实测数据基本吻合,高、低潮时间的相位差最大0.25 h、不超过0.50 h,最高、最低潮位误差8 cm、在±0.1 m以内,符合JTS/T 231-2—2021《水运工程模拟试验技术规范》精度控制要求。

潮流验证选取长江口南港2个水文点、南槽6个水文点、横沙通道1个水文点和北槽自上而下14个水文点2017年7月的长江口洪季实测水文资料数据进行分析验证。潮流验证结果表明:模型计算值与水文测点实测值基本吻合,憩流时间和最大流速出现的时间偏差最大0.25 h、不超过0.50 h,流速过程线的形态基本一致,涨落潮段平均流速最大误差8.2%、小于10%,平均流向误差最大7.3°、小于10°,流路与现场观测资料基本一致,符合JTS/T 231-2—2021《水运工程模拟试验技术规范》精度控制要求。

含沙量验证站点同上,采用2017年7月各站点表、中、底层含沙量过程线验证。从模型计算值与实测值对比来看,含沙量过程及趋势基本一

致,潮段平均含沙量偏差23.1%、在30%以内,符合JTS/T 231-2—2021《水运工程模拟试验技术规范》的精度控制要求。

2 数值模拟分析

2.1 长江口航道疏浚土概况

2.1.1 航道疏浚土抛坑吹泥情况

目前,长江口航道疏浚土吹泥上滩是指在吹泥站通过绞吸船将耙吸船运输至吹泥站的航道疏浚土吹填上滩,或者是耙吸船将运输的航道疏浚土直接艏吹上滩。2016年6—10月在长兴岛艏吹疏浚土206万m³进行陆域吹填。2010—2019年,长江口航道疏浚土分别抛坑至1#、2#、C1-1、3#、4#、5#、6#坑(图2),之后吹泥上滩完成了上海横沙东滩三期、六期、七期、八期等滩涂整治项目。2016—2019年完成疏浚土抛坑吹泥方量3 112万、4 473万、3 407万、2 383万m³,年均抛坑3 344万m³,与长江口深水航道回淤季节性分布特征一致,洪季抛坑量多、枯季抛坑量少(图3)。



图2 长江口航道疏浚土储泥坑位置

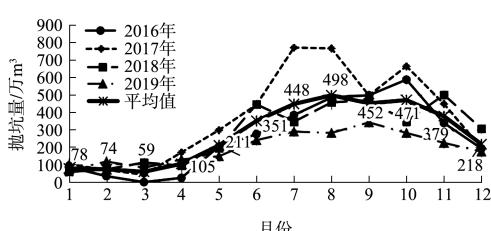


图3 2016—2019年航道疏浚土月度抛坑吹泥量

2.1.2 疏浚土土质概况

对长江口深水航道的各疏浚单元(主要为维护重点部位南港圆圆沙段及北槽中下段)的疏浚土样品进行分析,中值粒径均值分布见图4。从图4来看,深水航道疏浚土中值粒径在纵向上总体呈上游粗、下游细,其中南港圆圆沙段疏浚土粗,各航道

单元疏浚土中值粒径均值在 $0.129 \sim 0.212$ mm，属细砂粒级；北槽中下段疏浚土相对较细，各航道单元疏浚土中值粒径均值在 $0.037 \sim 0.126$ mm，以

粗粉砂、极细砂为主，北槽中下段疏浚量比例为全槽的 80%，疏浚土平均中值粒径为 0.04 mm，疏浚土湿密度为 1.2 t/m³。

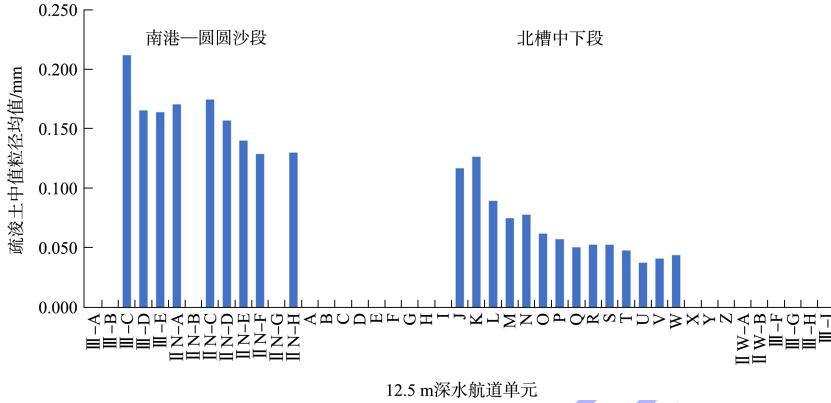
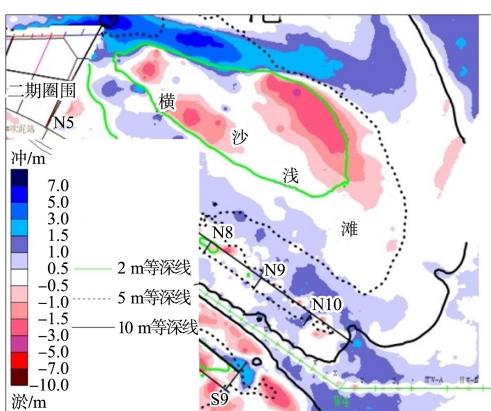


图 4 深水航道疏浚土中值粒径均值分布

2.2 数模方案设置

目前横沙浅滩已面临浅滩串沟发育、滩面冲刷、中高滩涂开始散乱等问题，滩涂面积呈减少趋势，尤其是低滩区甚至呈现明显冲刷迹象，见图 5a)。据统计，2010 年 8 月—2019 年 11 月期间，横沙浅滩 5 m 沙体体积累计减少近 9 000 万 m^3 （每年约 1 000 万 m^3 ），面积减少近 40 km^2 ，2020 年略有回升，见图 5b)。未来长江下泄泥沙仍将处于较低值，横沙浅滩不仅难以获得自然泥沙补给，

还可能面临进一步侵蚀态势，这种状态的持续发展必将引起滩体形态改变、滩面泥沙流散，危及周边河势稳定。为缓解甚至改变近年来横沙浅滩冲刷侵蚀局面、稳定长江口的防洪(潮)安全、筑牢河口生态基地，横沙浅滩已迫切需要采取适当的固沙保滩措施，在采取一定工程措施条件下，利用北槽航道疏浚土作为沙源，通过吹泥上滩方式，人为增加浅滩的来沙量，以缓减浅滩滩面的侵蚀。



a) 2010年8月—2020年11月横沙浅滩冲淤变化

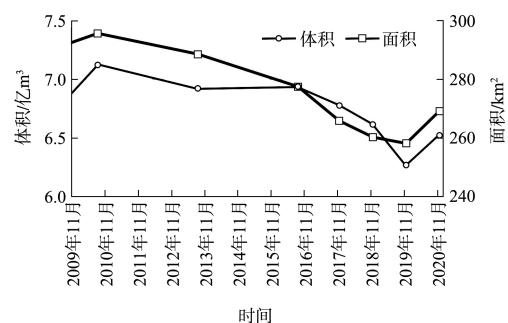


图 5 横沙浅滩近期变化

本文探讨长江口航道疏浚土吹泥上滩至横沙浅滩的淤积效果及流失情况，为后续横沙浅滩固

沙保滩工程的研究及实施提供借鉴。为此，利用
长江口深水航道北坝田原3#~6#吹泥站，在横沙浅

滩上对应布设 4 个吹泥点(图 6), 进行疏浚土吹泥上滩至横沙浅滩模拟研究。考虑疏浚土利用受不同季节回淤分布、船机配备、施工能力等实际

条件的影响, 4 个吹泥站的年上滩总量暂按年均 3 344 万 m^3 考虑。考虑洪枯季差异, 各月吹泥上滩平均量见图 3。



图 6 横沙浅滩上滩方案

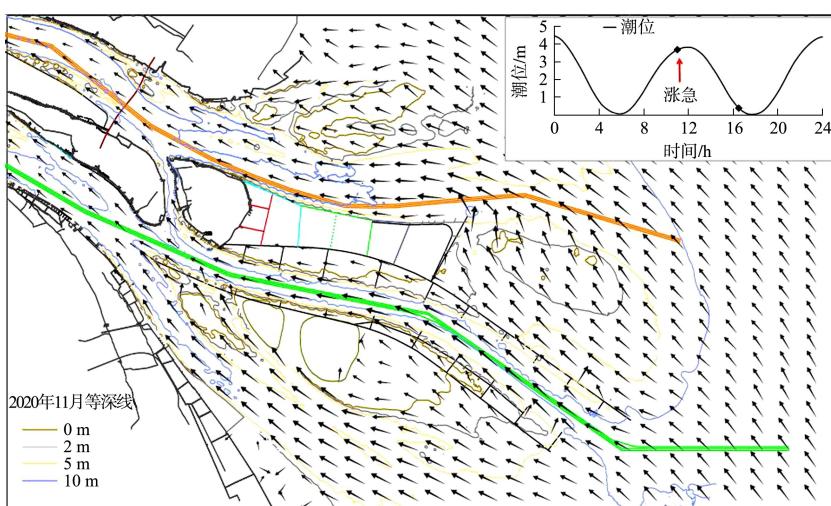
潮流泥沙数学模型计算时限为 2017 年整年。水动力边界, 上游大通流量取 2017 年 1—12 月每日逐时数据, 模型外海开边界由 16 个调和常数分布插值给出。泥沙含量开边界, 大通年均含沙量取值 $0.14 \text{ kg}/\text{m}^3$, 外海边界取 $0.1 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。在横沙浅滩设置 4 个点源(Q1~Q4)泥沙进行扩散, 每个源汇项每月取当月平均沙量进行泥沙输出扩散; 泥沙中值粒径取北槽航道疏浚土粒径均值 0.04 mm 。底部的临界淤积和冲刷应力分别取 0.4 、 $0.6 \text{ N}/\text{m}^2$ 。

底部泥沙沉降速度, 考虑泥沙浓度较大时的抑制沉速, 取值 $0.3 \text{ mm}/\text{s}$; 沉降概率取值 0.2 ; 底部粗糙长度取值 0.01 mm ; 卡门系数取值 0.4 。

2.3 方案实施效果

2.3.1 横沙浅滩流态分布

数模结果显示, 横沙浅滩的动力主要为口外潮动力; 涨潮流主要由东南流向西北, 绕过 N23 堤头进入北港; 落潮流主要沿横沙浅滩南侧深槽沿北导堤向东南运输。见图 7。



a) 涨急

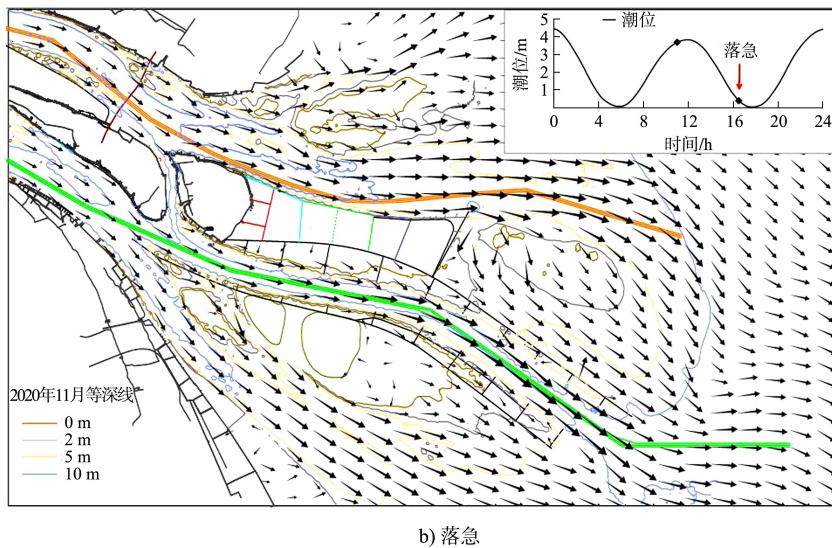


图 7 横沙浅滩涨落潮流场动力分布

2.3.2 泥沙输运扩散效果

疏浚土上滩后部分泥沙直接落淤，部分泥沙则随涨落潮流扩散输运。涨潮期间上滩的疏浚土在滩面呈顺时针输运，输运范围主要集中于横沙浅滩区域；落潮期间上滩的疏浚土，部分泥沙出浅滩后，随落转涨顺时针水流由北槽口门进入北槽以及横沙浅滩区，见图 8。

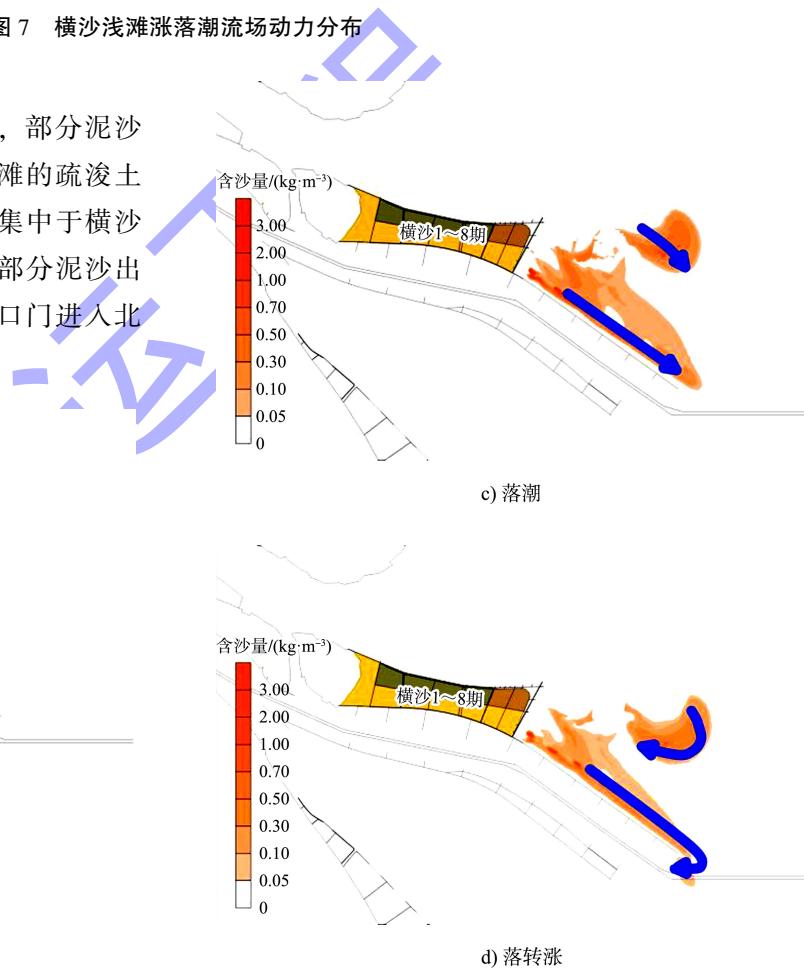
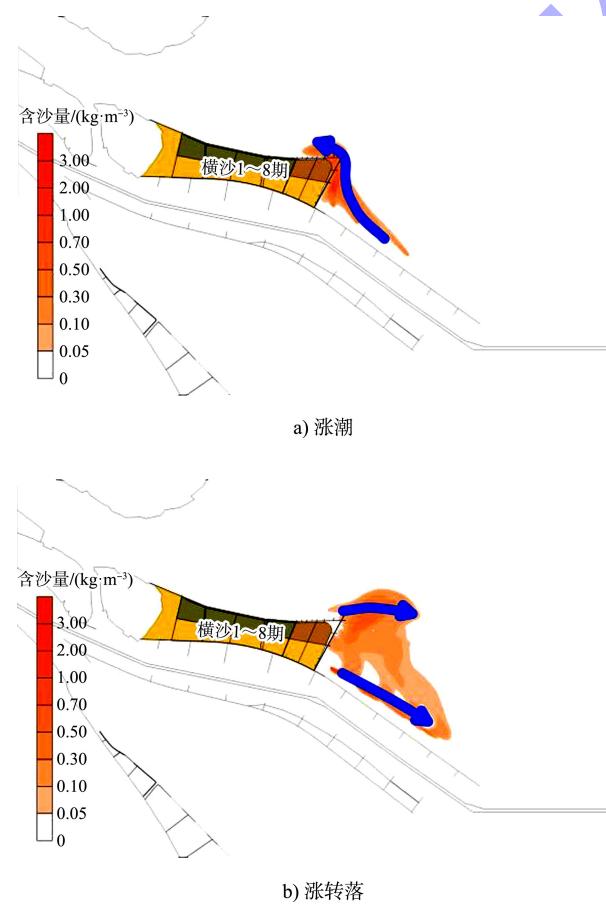


图 8 疏浚土输运路径

疏浚土上滩持续一个月后，出横沙浅滩区域（统计边界见图 9）的泥沙输运综合扩散率约为 40%，其中疏浚土主要从北边界流出横沙浅滩范围，东侧边界由于北港流出的疏浚土在落转涨的过程中顺时针转动，在涨潮时从该边界进入浅滩；

同时一部分疏浚土在落潮时期沿着北导堤北侧流出该断面，落转涨时部分疏浚土重新进入浅滩。

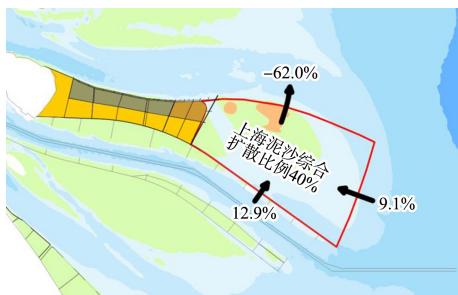


图 9 横沙浅滩疏浚土输运比例

2.3.3 疏浚土落淤效果

根据潮流泥沙数学模型计算成果，在不考虑浅滩上波浪掀沙的前提下，浅滩区域大潮期间呈现冲刷状态、小潮期间呈现淤积状态。小潮期间浅滩的淤积量大于大潮期间的冲刷量，疏浚土在浅滩总体表现为淤积。在本研究方案设定的疏浚土上滩量条件下，一个月后疏浚土在浅滩的淤积效果见图 10。泥沙主要淤积在浅滩南侧部分，淤积厚度基本在 0.1 m 以内；另外北槽下段北坝田区域也有部分泥沙淤积，厚度在 0.05 m 以内；深水航道区域未见显著淤积。疏浚土上滩后的落淤量与总上滩量相比，偏乐观估算结果约为 35%。

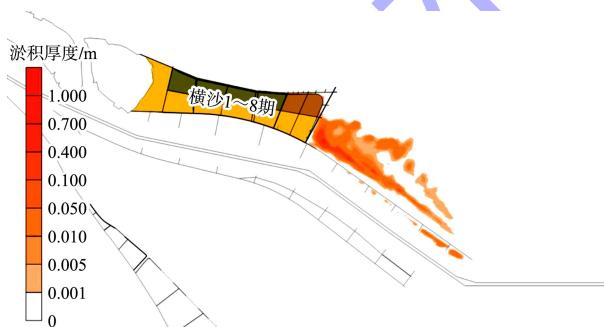


图 10 疏浚土上滩一个月后淤积效果

2.3.4 综合情况

统计了疏浚土上滩一个月后各个去向所占比例，扩散出浅滩范围的疏浚土占比 40%、留在浅滩区域的疏浚土占比 60%。在留在浅滩区域的疏浚土中，一部分落淤下来，另一部分仍存在于浅滩水体中。在浅滩落淤的疏浚土占总量的 35%，仍在浅滩水体中的疏浚土占总量的 25%，疏浚土

去向统计见图 11。疏浚土落淤会造成滩面地形改变，疏浚土上滩的淤积效果也会随之改变。累积到第 8 个月以后，每个月落淤比例基本稳定在 24.4% 左右，淤积比例随时间变化见图 12。

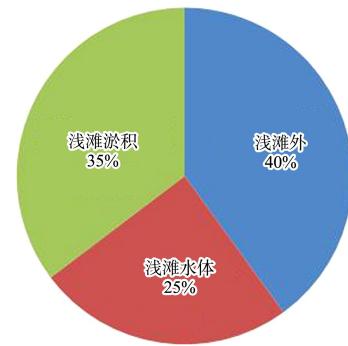


图 11 疏浚土去向统计

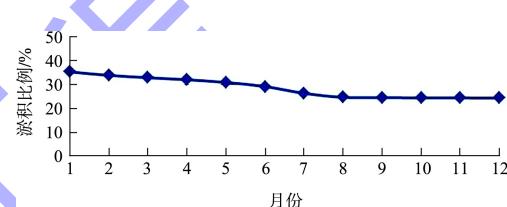


图 12 疏浚土淤积比例随时间变化

2.4 对深水航道回淤的影响

根据模型计算，方案实施后，约有 0.8% 的上滩疏浚土参与了深水航道的回淤，造成回淤增加区段主要在 K—P 单元间，以 3 344 万 m^3/a 的上滩量估算，深水航道回淤量增加约 27 万 m^3 。

3 结论

1) 通过分析认为，长江口航道产生的疏浚土吹泥上滩后部分泥沙直接落淤，部分泥沙则随涨落潮流扩散运输。对此可考虑在横沙浅滩南侧、北侧和东侧构筑一段护滩堤，减少疏浚土随涨落潮流的扩散。

2) 横沙浅滩区域大潮期间呈现冲刷状态，小潮期间呈现淤积状态，小潮期间浅滩的淤积量大于大潮期间的冲刷量，疏浚土在浅滩总体表现为淤积。

3) 长江口航道疏浚土吹泥上滩至横沙浅滩区域后，对深水航道的回淤影响不大。

4) 长江口航道疏浚土利用至横沙浅滩的方案是可行的，是解决 2020 年以后长江口航道疏浚土

综合利用的可持续发展方向之一。

5) 必须指出, 本文在数值计算定量分析中仅考虑了潮流这一泥沙输移首要动力因素, 未考虑浅滩上的波浪掀沙作用的影响, 相应固沙保滩效果的定量预测结果偏于乐观, 而上滩泥沙的周边扩散影响预测结果可能偏于保守。

参考文献:

- [1] 徐元, 朱治. 长江口深水航道治理工程疏浚土综合利用[J]. 水运工程, 2009(4): 127-133.
- [2] 高敏, 朱剑飞. 长江口深水航道治理工程疏浚土利用现状及前景[C]//第十九届世界疏浚大会论文集. 北京: 世界疏浚协会联合会, 2010: 267-271.

(上接第 54 页)

参考文献:

- [1] 陈秀瑛, 古浩, 孙萍. 长江下游航道疏浚砂综合利用研究[J]. 中国水运, 2021(10): 126-128.
- [2] 水利部. 交通运输部关于加强长江干流河道疏浚砂综合利用管理工作的指导意见[J]. 中华人民共和国水利部公报, 2020(3): 20-21.
- [3] 魏巍, 杨保存, 杨晓松. 粉细砂与混凝土接触面强度影响因素显著性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(2): 77-82.
- [4] 李玉根, 张慧梅, 刘光秀, 等. 风积砂混凝土基本力学性能及影响机理 [J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (5): 1212-1221.
- [5] 郭东, 苏春义, 彭自强, 等. 海水拌和珊瑚礁砂混凝土力学性能及微观结构[J]. 建筑材料学报, 2018, 21 (1): 41-46.
- [6] 宋云涛, 董光辉, 徐雪鸿, 等. 基于废弃超细砂的细粒混凝土性能试验研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(11): 157-161.
- [7] 邵欣, 汪彭生, 章环境. 特细砂混凝土二级界面微观结构研究[J]. 人民长江, 2014, 45(13): 75-78, 105.
- [8] 王松亮, 杨占彪, 韩乐乐, 等. 机制砂与特细砂复配在混凝土中的应用研究[J]. 中国水泥, 2021(9): 100-102.
- [9] 李升涛, 陈徐东, 张伟, 等. 基于长江下游超细疏浚砂的碱激发矿渣混凝土力学性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(1): 335-343.

[3] 季岚, 唐臣, 张建锋, 等. 长江口疏浚土在横沙东滩吹填工程中的应用[J]. 水运工程, 2011(7): 163-167.

[4] 赵德招, 刘杰, 程海峰, 等. 长江口深水航道疏浚土处理现状及未来展望[J]. 水利水运工程学报, 2013(2): 26-32.

[5] 王恒宾, 唐臣, 楼飞, 等. 2020 年后长江口深水航道疏浚土处置方案研究[J]. 中国港湾建设, 2017, 37 (10): 22-26.

[6] 国家海洋环境监测中心. 长江口航道疏浚土用于生态化利用可行性研究和政策分析[R]. 大连: 国家海洋环境监测中心, 2021.

[7] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 长江口航道疏浚土用于生态化利用试点应用方案数模研究报告[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2021.

(本文编辑 武亚庆)

[10] 程晓来, 刘翌辰, 任龙芳. 孤石机制砂与细砂混合比例对混凝土性能的影响[J]. 建材世界, 2021, 42 (4): 26-29.

[11] BRESLER B, PISTER K S. Strength of concrete under combined stresses[J]. J. Am. Concrete Inst., 1958, 55 (9): 321-345.

[12] YU Z P, TANG R, LI F R, et al. Experimental study and failure criterion analysis on combined compression-shear performance of rubber concrete(RC) with different rubber replacement ratio[J]. Construction and building materials, 2021, 123088: 123105.

[13] OTTOSEN N S. A failure criterion for concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1977, 103 (4): 527-535.

[14] 杨健辉, 张鹏, 王涛, 等. 全轻页岩陶粒混凝土三轴受压试验及其破坏准则[J]. 工程力学, 2015, 32 (10): 89-98, 105.

[15] 陈宇良, 朱玲, 吉云鹏, 等. 三轴受压粉煤灰陶粒轻骨料混凝土力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2021, 39(10): 1-12.

[16] 彭自强, 李达, 周毅, 等. 珊瑚礁砂混凝土双轴受压强度试验与应力空间破坏准则[J]. 武汉理工大学学报, 2018, 40(5): 66-70.

[17] 高丹盈, 宋帅哥, 杨林. 真三轴应力下塑性混凝土性能及破坏准则[J]. 水力学报, 2014, 45 (3): 360-367.

(本文编辑 武亚庆)