

基于倾倒区淤积分析的多倾倒区容量评估影响研究

葛瑛芳¹, 王丽华², 艾丛芳³, 周晓蓓⁴, 李鑫彪³

(1.浙江省水利水电工程质量与安全中心, 浙江 杭州 310012; 2.杭州杭港地铁有限公司, 浙江 杭州 311121; 3.大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024; 4.松阳县东坞水库发展有限公司, 浙江 丽水 323400)

摘要:海上倾倒作为处理港口、航道建设产生疏浚物的主要处理方式, 对海洋经济的发展起至关重要的作用。为深入研究倾倒区淤积物对周边地形变化的影响, 本研究建立了二维水动力模型与泥沙模型。通过对疏浚物倾倒过程模拟计算结果进行详尽的分析, 计算各倾倒区在疏浚物年倾倒后倾倒区内水深的变化情况, 并将其与同工况下多倾倒区共同倾倒情况进行了对比。研究结果表明, 共同倾倒后相邻倾倒区淤积厚度增加, 限制倾倒区的原有容量。这一研究为后续多倾倒区容量评估提供了科学依据, 可以为海洋倾倒区的合理规划与使用提供指导。

关键词:海洋倾倒区; 水动力; 疏浚物; 泥沙淤积

中图分类号: X143

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2024)05-0797-09

Impact analysis of multi-dumping area capacity assessment based on dumping area sedimentation analysis

GE Yingfang¹, WANG Lihua², AI Congfang³, ZHOU Xiaobei⁴, LI Xinbiao³

(1.Zhejiang Water Resources and Hydropower Quality & Safety Management Center, Hangzhou 310012, China; 2.Hangzhou MTR Corporation Limited, Hangzhou 311121, China; 3.School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 4.Songyang Dongwu Reservoir Development Limited Company, Lishui 323400, China)

Abstract: Dumping at sea, as the main way to deal with the dredge produced by the construction of ports and waterways, plays a vital role in the development of marine economy. In order to further study the topographic changes and effects of the adjacent dump area on the surrounding dump area, a two-dimensional hydrodynamic model and a sediment model were established in this study. Through the detailed analysis of the simulation results of the dumping process of dredging materials, we calculated the change of water depth in the dumping area after the dumping of dredging materials in each dumping area, and compared it with the common dumping situation of multiple dumping areas under the same working condition. After joint dumping, the siltation thickness of the adjacent dumping area increases and the original capacity of the dumping area is limited. This study provides a scientific basis for the subsequent capacity assessment of multiple dumping areas, and is helpful to provide guidance for the rational planning and use of marine dumping areas.

Key words: ocean dumping area; hydrodynamic force; desilting material; sediment accumulation

收稿日期: 2024-05-31, 修订日期: 2024-06-17

作者简介: 葛瑛芳(1975—), 女, 浙江杭州人, 高级工程师, 硕士研究生, 研究方向为水利工程建设管理、水利科技推广与应用, E-mail: 3650163@qq.com

通信作者: 艾丛芳(1980—), 男, 辽宁鞍山人, 副教授, 博士, 主要研究方向为环境水力学和计算水力学, E-mail: aicongfang@dlut.edu.cn

海洋倾废区是国家划定的可依法进行海洋倾废的特定海域^[1]。海上倾倒是处理港口、航道等建设产生的疏浚物的主导方式^[2]。港口、航道等建设产生大量的疏浚物^[3],包括淤泥、砂砾、有机物质^[4]等,为保障船舶通行安全^[5],海上疏浚成为必要的活动^[6]。目前,处置这些疏浚物一般采用海上倾倒、吹填和资源化利用三种处置方式^[7],其中海上倾倒占主体,每年向海洋倾倒的物质中,疏浚物^[8]占比达95%以上。实践证明,合理处置海洋疏浚物,可以达到经济、安全的目的^[9]。

在海洋工程领域,采用海上倾倒进行疏浚物处置是一种常见的海洋活动^[10]。随着海洋经济的不断发展,大量的疏浚物产生,海上疏浚也不再限于单一的倾倒区划分,通常涉及到多个倾倒区同时进行倾倒活动。倾倒^[11]入海的沉积物^[12]变化受海洋水动力过程的影响,可能对相邻倾倒区原有容量产生一系列复杂而深远的影响。然而,对于这种影响的研究和理解仍然相对不足。因此,深入探讨多倾倒区共同倾倒后泥沙淤积对相邻倾倒区原有容量^[13]的影响,具有重要的科学意义和工程实践价值。

长江口^[14]是中国最重要的河口之一,其海洋倾废区的环境管理直接关系到长江经济带的生态安全和可持续发展。近年来,长江口区域内的海上疏浚作业频繁,泥沙和废弃物的倾倒量巨大,为减少对海洋环境的影响^[15-16],涉及多个倾倒区的共同使用。这种多倾倒区共同倾倒的模式,虽然在一定程度上缓解了单一倾倒区的压力,但也带来了新的环境挑战。本文针对长江口四个拟选倾倒区,通过系统分析多倾倒区共同倾倒对相邻倾倒区原有容量的影响机制,探讨其影响程度,为海洋倾废区的管理^[17]和规划提供科学依据和决策支持^[18]。

1 材料与方法

1.1 水动力模型简介

水动力模块基于 Boussinesq 近似和静压假设,是模型的基础计算模块,为模型中其他模块提供计算条件。在静水压强假设下,液体质点运动的垂向加速度可以忽略不计,压强沿水深的分

布近乎静水压强,流线呈几乎相互平行的直线^[19]。基于静水压强假设的数值模型因其计算方法的高效性,故在河道规划、洪水预报、湖泊环流以及海洋潮汐运动等领域被广泛采用。该模型基本方程为:

连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

运动方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial hU^2}{\partial x} + \frac{\partial hUV}{\partial y} - fVh + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(2Ah \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[Ah \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial hV^2}{\partial y} + \frac{\partial hUV}{\partial x} + fUh + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} = \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(2Ah \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[Ah \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

其中: x 、 y 为笛卡尔坐标系坐标; t 为时间变量; η 为相对于参考基面的水位; h 为总水深, $h = h_0 + \eta$; U 、 V 分别为 x 、 y 方向上的垂线平均流速; f 为科氏力系数($f = 2\omega \sin \varphi$, ω 为地球自转角速度, φ 为纬度); ρ_0 为水体参考密度; g 为重力加速度; A 为水平紊动粘性系数,由 Smagorinsky (1963)提出的亚格子法进行计算,见式(4), C_s 为经验系数, l 为网格特征长度。

$$A = C_s^2 l^2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

在控制方程的求解过程中使用有限体积法进行离散;计算域采用三角形或四边形网格离散;时间积分采用显式欧拉格式;计算中采用干湿网格方法对浅滩进行处理。

1.2 计算区域设置及网格划分

根据倾废区拟选的位置(如图1所示),我们选择了适当的计算范围,建立了二维水动力模型。为全面了解倾废区附近海域的潮流情况,对该区域进行了精细的三角形网格划分和模型的加密处理。整个模型的计算域包括5582个节点和10952个网格,采用UTM-51坐标投影。计算域和网格划分如图1、图2、图3所示。

1.3 模型验证

为确保建立模型准确性,对其水动力进行验

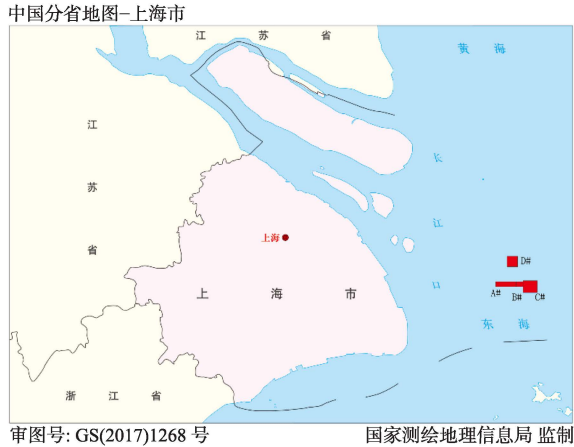


图1 倾倒地位置分布

Fig. 1 Dumping area location distribution map

证,图4为水动力特性对比结果。通过水动力计算结果与实测数据比较可知,计算域内各测点的潮位、流速、流向计算值与实测值拟合较好。建立的二维水动力模型能够较好地反映出河口海域潮流的变化特征,可用于后续泥沙模型的计算。

1.4 泥沙模型

疏浚物的倾倒地引起海床面冲淤变化可分为两个主要部分:一是悬浮泥沙输运导致的床面冲淤变化,二是泥沙直接沉降到倾倒地内引起的床面变化。事实上,在倾倒地过程中,约有95%的泥沙会直接沉积到倾倒地内。其中,部分沉积的泥

沙在波浪和潮流力的作用下可能会重新悬浮,而重新悬浮的泥沙也可能再次沉积,从而达到一种平衡状态。另一部分沉积在床面上的泥沙受潮流剪切力的影响,其运动速度较缓慢,可能需要几天甚至几个月的时间尺度。此外,这些泥沙的移动路径和距离受到床面形态、泥沙性质以及底泥的密实程度等因素的影响,呈现复杂多变的特征。

本文通过模拟分析倾倒地活动引起的床面变化。床面冲淤变化方程:

$$\gamma_0 \frac{\partial z_b}{\partial t} = D - E \quad (5)$$

式中: γ_0 为泥沙干密度; z_b 为地形高程,淤积通量 D 由下式计算:

$$D = \begin{cases} \omega_b c_b \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right) & \tau_b < \tau_{cd} \\ 0 & \tau_b \geq \tau_{cd} \end{cases} \quad (6)$$

式中: ω_b 为泥沙沉降速度; c_b 为泥沙浓度; τ_b 为底床切应力; τ_{cd} 为淤积临界切应力。式(5)中的冲刷通量 E 采用下式计算:

$$E = \begin{cases} M \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right) & \tau_b > \tau_{ce} \\ 0 & \tau_b \leq \tau_{ce} \end{cases} \quad (7)$$

式中: M 是冲刷系数; τ_{ce} 为床层冲刷临界切应力。

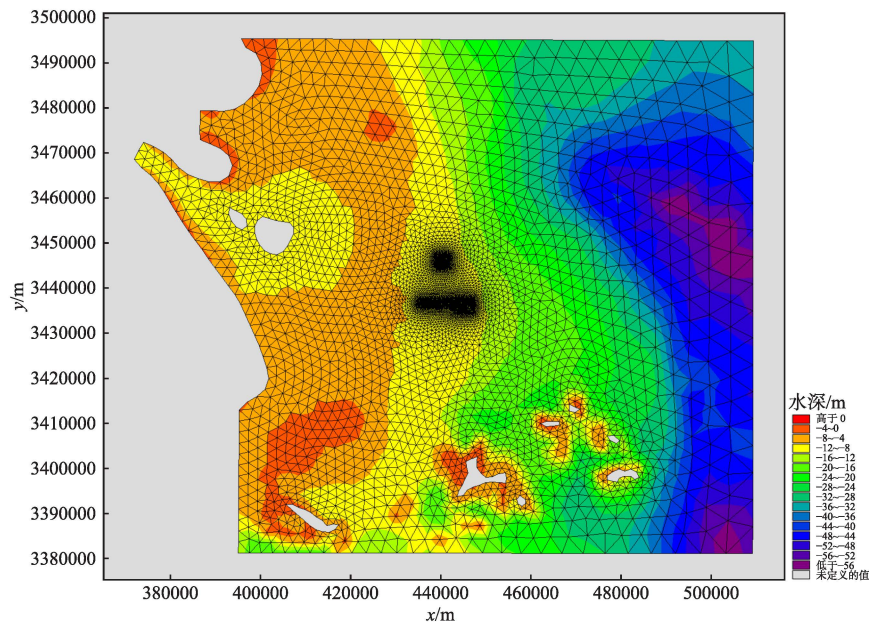


图2 模型计算域网格划分

Fig. 2 Model computing domain meshing

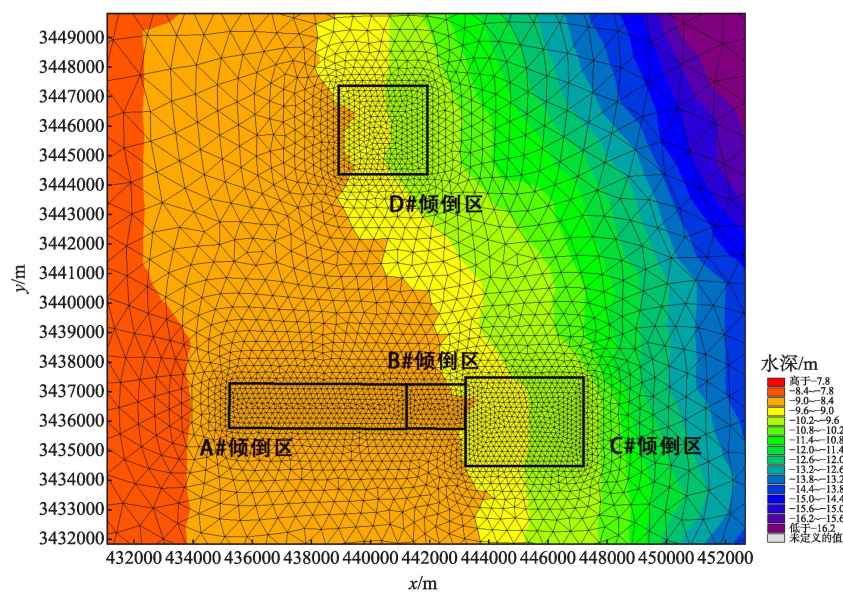
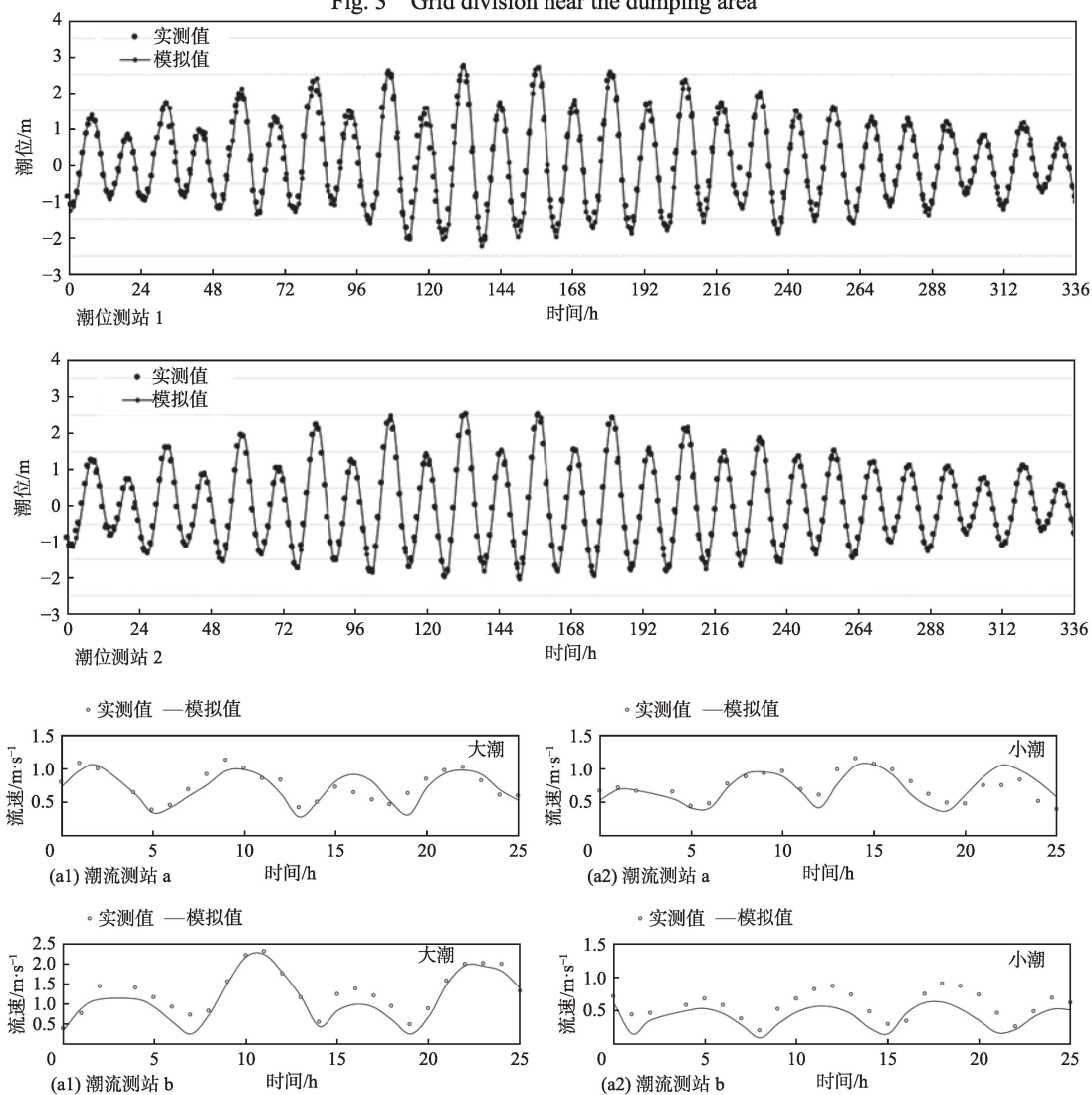


图3 倾倒区附近网格划分

Fig. 3 Grid division near the dumping area



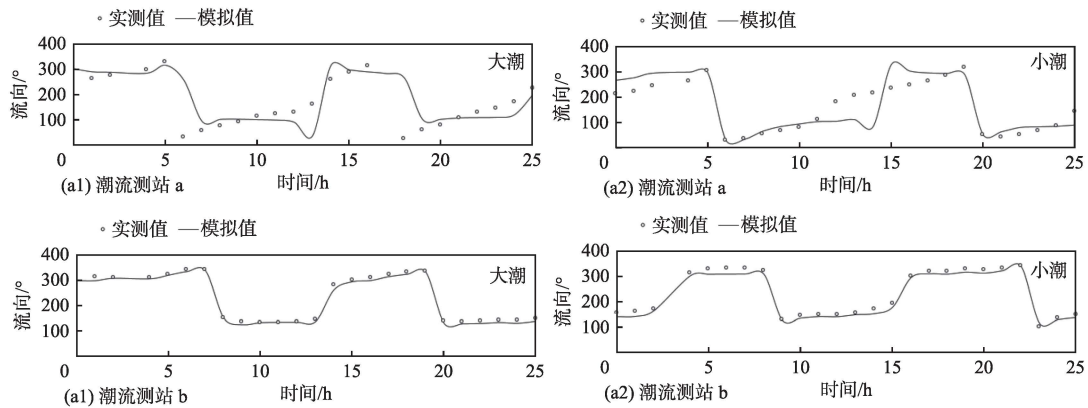


图4 潮位与潮流测站验证曲线

Fig. 4 Verification curve of tidal level and current

2 结果与讨论

2.1 疏浚物倾倒模拟

疏浚物倾倒进入水体后,形成了高浓度的水沙混合物,这种异重流的形成过程主要受到倾倒时水流速度的影响。通常情况下,我们采用远区模型来模拟倾倒产生的悬浮泥沙随水流的对流扩散,而对近区的情况则进行了简化处理。

基于已确定的淤积情形,我们进行了淤积模拟计算,模拟时长均为1年。在疏浚物倾倒后,较大颗粒的非粘性泥沙主要沉积在倾倒区内,而具有较强迁移能力的粘性泥沙则部分随着潮流迁移到倾倒区外部。在疏浚物倾倒后,易于运输的粘性泥沙主要随着潮流方向进行迁移。以下是具体的模拟情景:

结合倾倒区年倾倒量,并综合周边海域的倾倒需求,模拟计算长江口A#、B#、C#和D#倾倒区疏浚物年倾倒量在1000万方、940万方、1500万方和500万方情景下各倾倒区及周围海域海床面淤积情况如图5—图8所示。

迁移性较弱的非粘性泥沙在倾倒区底部淤积,导致倾倒区水深变浅。通过数值模拟和分析,我们得到了不同倾倒区疏浚物淤积的时空分布特征。模拟结果显示,在均匀倾倒情况下,疏浚物在倾倒区中部淤积深度较大,倾倒区四周淤积深度相对较小。倾倒一年后A#、B#、C#、D#倾倒区平均水深分别变浅1.07 m、2.97 m、1.19 m、0.53 m。

为探究相邻倾倒区淤积物对周边倾倒容量

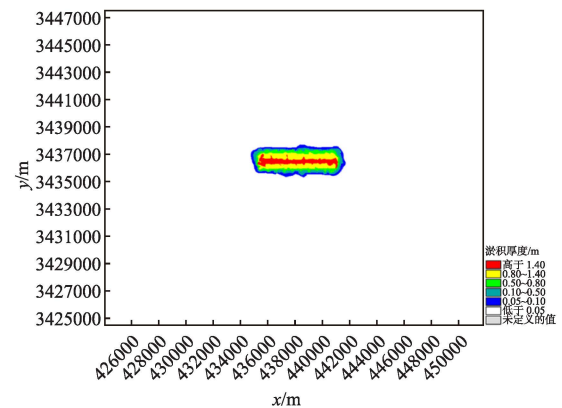


图5 年倾倒量1000万方情况下A#倾倒区内水深变化

Fig. 5 Change of water depth in A# dumping area with an annual dumping volume of 10 million cubic meters

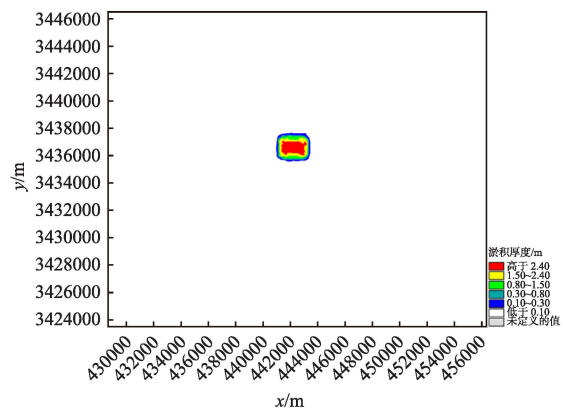


图6 年倾倒量940万方情况下B#倾倒区内水深变化

Fig. 6 Change of water depth in A# dumping area with an annual dumping volume of 9.4 million cubic meters

的影响,将各倾倒区单一倾倒时的工况进行叠加,模拟计算疏浚物同时向四个倾倒区倾倒情况

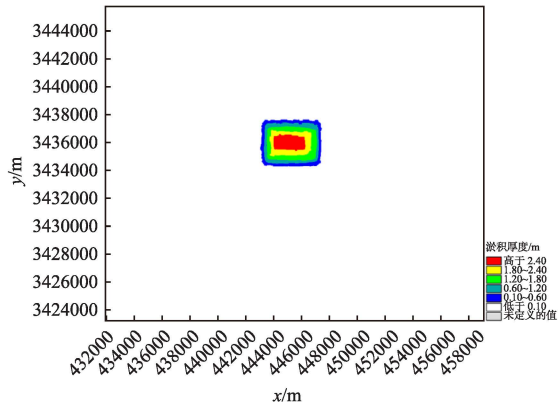


图 7 年倾倒入量 1500 万方情况下 C#倾倒入区内水深变化

Fig. 7 Change of water depth in A# dumping area with an annual dumping volume of 15 million cubic meters

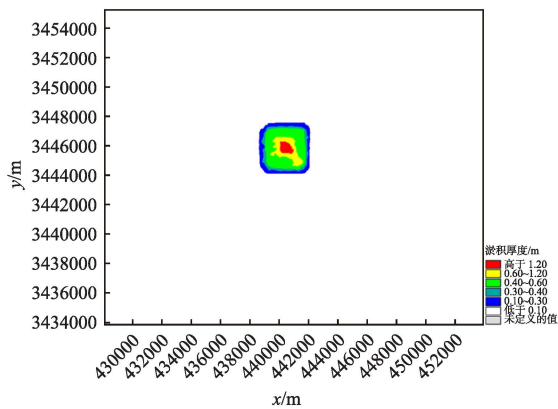


图 8 年倾倒入量 500 万方情况下 D#倾倒入区内水深变化

Fig. 8 Change of water depth in D# dumping area with an annual dumping volume of 0.5 million cubic meters

下,各倾倒入区内的海床淤积情况,如图 9 所示。在叠加工况一下,疏浚物同时倾倒入后各倾倒入区内的海床呈现出不同的淤积情况。长江口 A#倾倒入区在年倾倒入量 1000 万方、B#倾倒入区在年倾倒入量 940 万方、C#倾倒入区在年倾倒入量 1500 万方、D#倾倒入区在年倾倒入量 500 万方情景下,倾倒入一年后各倾倒入区内的平均水深分别变浅 1.10 m、3.04 m、1.21 m 和 0.53 m。除 D#倾倒入区外,各倾倒入区内疏浚物的平均淤积厚度较之前的单一倾倒入计算均有所增加。

从限制倾倒入区原有容量的角度,探讨相邻倾倒入区疏浚物倾倒入淤积物的主要影响,以位于相邻倾倒入区中间的 B#倾倒入区为参考,适当增加 A#、C#、D#倾倒入区的年倾倒入量,分析各倾倒入区之间疏浚物的淤积影响。具体研究如下:

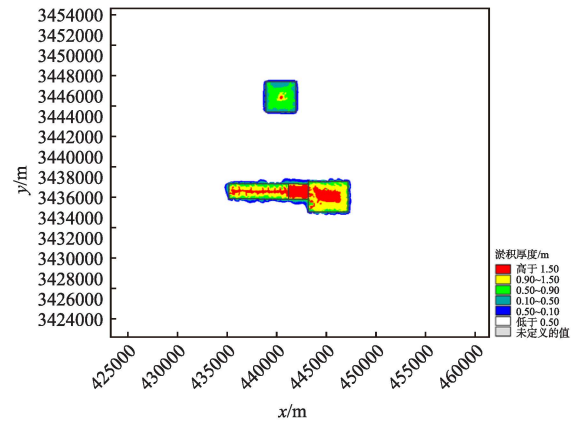


图 9 叠加工况下各倾倒入区内水深变化

Fig. 9 Water depth change in each dumping area under superposition condition 1

首先,分别模拟计算 A#倾倒入区在年倾倒入量 1500 万方、2000 万方, C#倾倒入区在年倾倒入量 2000 万方、2500 万方和 D#倾倒入区在年倾倒入量 1000 万方、1500 万方情况下倾倒入区内海床淤积情况,如图 10—图 15 所示。随后,对各工况进行叠加计算。叠加工况二各倾倒入区的倾倒入量为: A#年倾倒入量 1500 万方, B#年倾倒入量 940 万方, C#年倾倒入量 2000 万方, D#年倾倒入量 1000 万方;叠加工况三各倾倒入区的倾倒入量为: A#年倾倒入量 2000 万方, B#年倾倒入量 940 万方, C#年倾倒入量 2500 万方, D#年倾倒入量 1500 万方。叠加计算后倾倒入区内淤积情景如图 16 和图 17 所示。

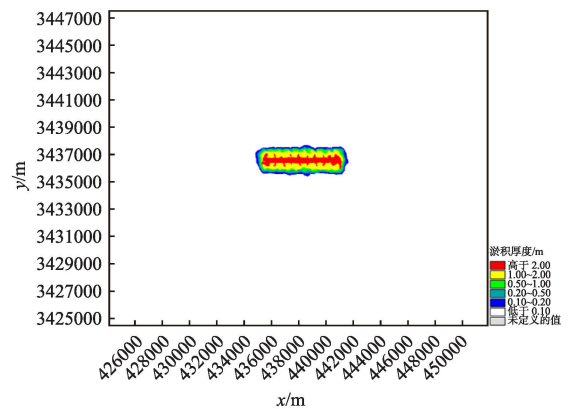


图 10 年倾倒入量 1500 万方情况下 A#倾倒入区内水深变化

Fig. 10 Change of water depth in A# dumping area with an annual dumping volume of 15 million cubic meters

2.2 叠加前后淤积对比分析

表 1—表 3 给出了叠加工况下各倾倒入区在单

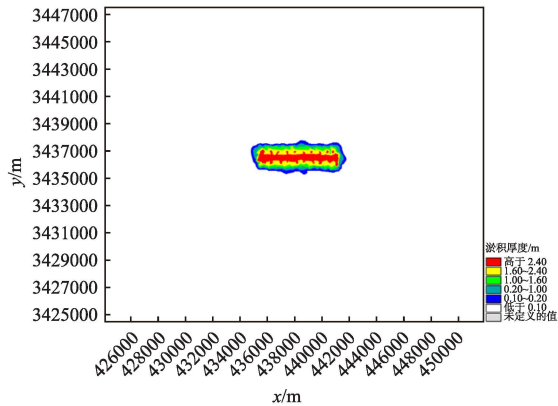


图 11 年倾倒地量 2000 万方情况下 A#倾倒地内水深变化
Fig. 11 Change of water depth in A# dumping area with an annual dumping volume of 20 million cubic meters
A# Dumping area annual dumping volume 20 million square sedimentation

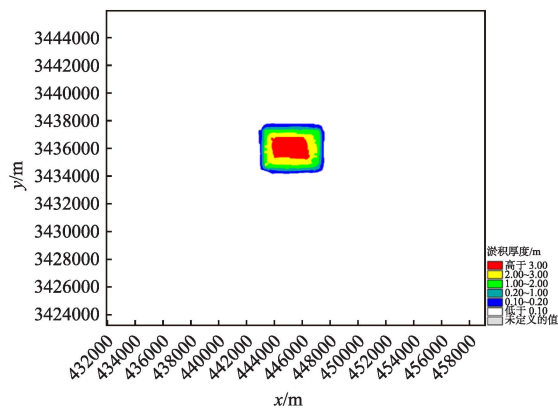


图 12 年倾倒地量 2000 万方情况下 C#倾倒地内水深变化
Fig. 12 Change of water depth in C# dumping area with an annual dumping volume of 20 million cubic meters

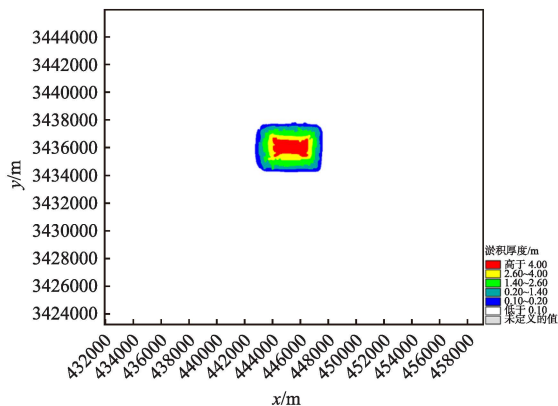


图 13 年倾倒地量 2500 万方情况下 C#倾倒地内水深变化
Fig. 13 Change of water depth in C# dumping area with an annual dumping volume of 25 million cubic meters

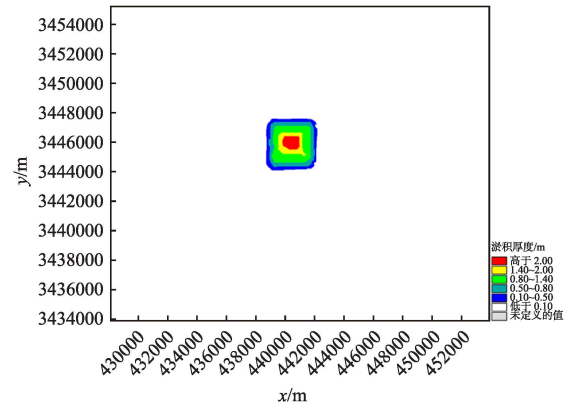


图 14 年倾倒地量 1000 万方情况下 D#倾倒地内水深变化
Fig. 14 Change of water depth in D# dumping area with an annual dumping volume of 10 million cubic meters

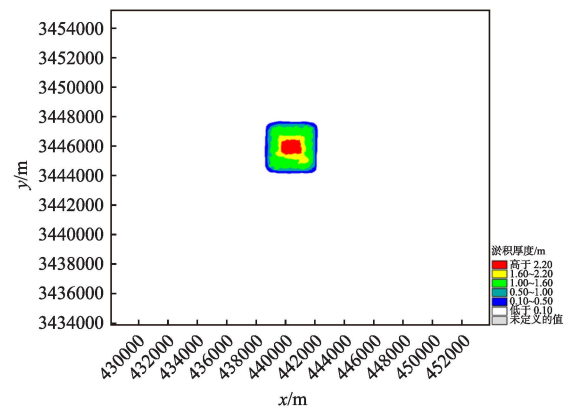


图 15 年倾倒地量 1500 万方情况下 D#倾倒地内水深变化
Fig. 15 Change of water depth in D# dumping area with an annual dumping volume of 15 million cubic meters

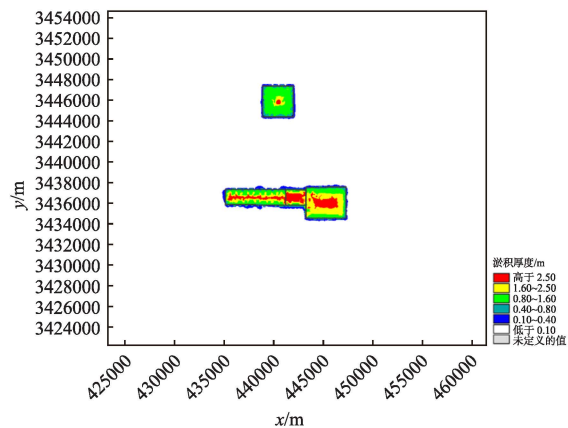


图 16 叠加工况二下各倾倒地内水深变化
Fig. 16 Water depth change in each dumping area under superposition condition 2

一倾倒地时与多倾倒地同时倾倒地各倾倒地内平均淤积厚度的对比情况。模拟计算结果表明, 各

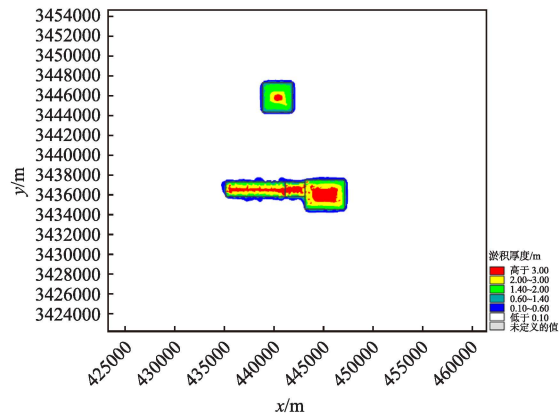


图 17 叠加工况三下各倾倒区内水深变化

Fig. 17 Water depth change in each dumping area under superposition condition 3

倾倒区随年倾倒量的逐渐增大,倾倒区内的淤积厚度也呈递增趋势。相邻的 A#、B#、C#倾倒区之间的淤积物在海流作用下,发生迁移。迁移的淤积物进入邻近倾倒区,导致沉积物含量增加。当相邻区域的沉积物进入并产生堆积时,三个倾倒区临界处淤积厚度显著增加,倾倒区有效容量被占用,减少了倾倒区能够接纳疏浚物的空间,致使实际倾倒量达不到单一倾倒时评估的容量。

表 1 叠加工况一:倾倒区单一倾倒与共同倾倒平均淤积厚度

Tab.1 Comparison of average siltation thickness between single dumping and common dumping in dumping area under the same working condition

倾倒区及倾倒 工况	单一倾倒淤积 厚度/m	共同倾倒淤积 厚度/m	相差 百分比
A#(1000万方/年)	1.07	1.10	2.61%
B#(940万方/年)	2.97	3.04	2.23%
C#(1500万方/年)	1.19	1.21	1.81%
D#(500万方/年)	0.53	0.53	0.00%

表 2 叠加工况二:倾倒区单一倾倒与共同倾倒平均淤积厚度

Tab.2 Comparison of average siltation thickness between single dumping and common dumping in dumping area under the same working condition

倾倒区及倾倒 工况	单一倾倒淤积 厚度/m	共同倾倒淤积 厚度/m	相差 百分比
A#(1500万方/年)	1.61	1.63	1.78%
B#(940万方/年)	2.97	3.07	3.27%
C#(2000万方/年)	1.58	1.60	1.35%
D#(1000万方/年)	1.06	1.06	0.00%

表 3 叠加工况三:倾倒区单一倾倒与共同倾倒平均淤积厚度

Tab.3 Comparison of average siltation thickness between single dumping and common dumping in dumping area under the same working condition

倾倒区及倾倒 工况	单一倾倒淤积 厚度/m	共同倾倒淤积 厚度/m	相差 百分比
A#(2000万方/年)	2.13	2.15	1.22%
B#(940万方/年)	2.97	3.09	3.96%
C#(2500万方/年)	1.97	1.99	1.08%
D#(1500万方/年)	1.60	1.60	0.00%

3 结 论

(1)多倾倒区共同倾倒会导致相邻倾倒区容量减少,堆积的倾倒物占用相邻区域空间,限制其容量的利用。同时,倾倒物质的堆积会增加相邻区域的淤积程度。

(2)对于相邻的多倾倒区,由于海流扩散,夹在 A#和 C#倾倒区中间的 B#倾倒区受相邻倾倒的影响相对明显。B#倾倒区的平均淤积厚度随着 A#和 C#倾倒量的增加,其所受影响也进一步增大,这限制了其原有容量。相反,随着 A#和 C#倾倒量的增加,其倾倒区内的平均淤积厚度受 B#倾倒区影响也逐渐减小。

(3)对于单一存在的 D#倾倒区,因其距离相邻的 A#、B#、C#倾倒区较远,淤积厚度与各倾倒区疏浚物在单一倾倒时的情况基本一致,倾倒区实际容量受多倾倒区共同倾倒的影响可忽略。

(4)本文的研究结果可以为近岸多个相邻海洋倾倒区的容量评估提供一定的科学依据,同时也可促进海洋工程领域的可持续发展和生态环境保护。

参考文献:

[1] JUNG J M, CHOI K Y, CHUNG C S, et al. Fractionation and risk assessment of metals in sediments of an ocean dumping site[J]. Marine pollution bulletin, 2019, 141: 227-235.

[2] 翟月, 冯嘉琦. 倾倒区二维水沙数值模拟研究[J]. 水利技术监督, 2022(11): 196-200.

[3] BRUCE P, BRADSHAW C, OHLSSON Y, et al. Inconsistencies in how environmental risk is evaluated in Sweden for dumping dredged sediment at sea[J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 755443.

[4] 杨文超. 推动疏浚物资源化利用向多样化精细化产业化方向发展[J]. 环境经济, 2021(7): 22-25.

- [5] MOOG O, STUBAUER I, HAIMANN M, et al. Effects of harbour excavating and dredged sediment disposal on the benthic invertebrate fauna of River Danube (Austria)[J]. *Hydrobiologia*, 2018, 814(1): 109-120.
- [6] 萧尔钊. 分析港口航道疏浚工程施工技术[J]. *珠江水运*, 2022(7): 60-62.
- [7] 宋爽, 王召伟, 韩建波, 等. 污染疏浚物处置方法国际研究与应用进展[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(5): 805-812.
- [8] BATES M E, FOX-LENT C, SEYMOUR L, et al. Life cycle assessment for dredged sediment placement strategies[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 511: 309-318.
- [9] 张世民, 陈德文, 邓兆青. 东碇倾倒地疏浚泥悬沙输移和 seabed 冲淤数值模拟[J]. *海洋通报*, 2014, 33(5): 541-551.
- [10] 曾秀山. 疏浚物海上处置的若干问题[J]. *海洋开发与管理*, 1988(3): 36-37.
- [11] 兰林, 毛媛媛, 张颖. 基于功能协调与空间管控的河道保护格局研究[J]. *水利规划与设计*, 2022(1): 9-12, 60.
- [12] DONÁZAR-ARAMENDÍA I, SÁNCHEZ-MOYANO J E, GARCÍA-ASENCIO I, et al. Environmental consequences of dredged-material disposal in a recurrent marine dumping area near to Guadalquivir estuary, Spain[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 161: 111736.
- [13] AI C F, MA Y X, HAN C W, et al. Capacity assessment of the recurrent disposal of dredged materials in a marine disposal area[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2024, 249: 107005.
- [14] 胡正云. 长江口重要湿地生态系统格局变化研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- [15] KATSIARAS N, SIMBOURA N, TSANGARIS C, et al. Impacts of dredged-material disposal on the coastal soft-bottom macrofauna, Saronikos Gulf, Greece[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 508: 320-330.
- [16] 朱志清, 叶林安, 章紫宁, 等. 海洋倾倒地对附近海域环境影响分析——以嵊泗上川山为例[J]. *海洋开发与管理*, 2020, 37(5): 52-56.
- [17] 孙淑艳, 许自舟, 刘述锡, 等. 基于非现场监管的海洋倾废监督管理系统[J]. *海洋环境科学*, 2023, 42(1): 160-164.
- [18] 姜万钧, 屈文, 马海静. 青岛港董家口港区航道工程临时海洋倾倒地及其周边海域水质评价[J]. *海洋开发与管理*, 2018, 35(8): 51-59.
- [19] 李永利. 浮游生物对某近海取水口阻塞风险评估研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.

(本文编辑: 曲丽梅)