·施　工·

高压射流对点吸式清淤影响试验研究*

洪国军[1,2,3]，程书凤[2,3]，李铁键[1]，尹纪富[2,3]，冒小丹[2,3]，舒敏骅[2,3]

（1. 清华大学，水圈科学与水利工程全国重点实验室，北京 100084；
2. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司，上海 201208；
3. 航道疏浚技术交通行业重点实验室，上海 201208）

摘要：针对高压射流对点吸式清淤效果的影响特性，设计并搭建了高压射流-点吸式清淤物理模型试验装置，提出适用于小管径管道的泥浆浓度测量方法。通过一系列工况试验，系统探究了不同高压射流流速对清淤过程中吸入泥浆浓度动态变化、水体浊度值及浚后地形特征的影响。结果表明：在高压射流作用下，点吸式清淤的泥浆浓度-时间曲线呈显著“几”字形特征，且清淤初期即达到浓度峰值；随着高压射流流速增加，吸入泥浆浓度与水体浊度均呈现显著递增趋势。进一步分析地形演化规律发现，高压射流流速增大促使清淤坑形态逐步发育为“缓坡-平台-陡坡”三段式结构；清淤坑轴长与深度均随射流流速增加显著增长，但当流速超过临界阈值后，轴长增速趋缓，射流动能在竖向与水平方向的能量分配呈现差异化特征，最终导致径深比呈减小趋势。

关键词：高压射流；清淤；点吸式清淤；泥浆浓度；浊度；浚后地形

中图分类号：U615.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)08-0233-08

Experimental study on the effect of high-pressure jet on point-suction dredging

HONG Guojun[1,2,3], CHENG Shufeng[2,3], LI Tiejian[1], YIN Jifu[2,3], MAO Xiaodan[2,3], SHU Minhua[2,3]

(1. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 201208, China;
3. Key Laboratory of Waterway Dredging Technology, Ministry of Transport, Shanghai 201208, China)

Abstract: Aiming at the influence characteristics of high-pressure jet on the performance of point suction dredging, a physical model test system for the high-pressure jet-point suction dredging coupling is designed and fabricated, and a slurry concentration measurement method adapted to small-diameter pipelines is proposed. Through a series of working-condition tests, the effects of different high-pressure jet velocities on the dynamic variation of suction slurry concentration, water turbidity, and post-dredging terrain features are systematically investigated. The results indicate that under high-pressure jet action, the concentration-time curve of point suction dredging displays a distinct zigzag-shaped pattern, with the concentration peak achieved in the initial dredging stage. As the high-pressure jet velocity increases, both the suction slurry concentration and water turbidity exhibit a significant upward trend. Further analysis of terrain evolution reveals that an increase in high-pressure jet velocity drives the gradual development of the dredging pit morphology into a “gentle slope-platform-steep slope” three-stage structure. Both the axial length and depth of the dredging pit grow significantly with rising jet velocity. However, when the velocity exceeds a critical threshold, the axial length growth rate decelerates. The differential allocation of jet kinetic energy between vertical and horizontal directions ultimately leads to a decreasing trend in the length-to-depth ratio.

Keywords: high-pressure jet; dredging; point-suction dredging; slurry concentration; turbidity; post-dredging terrain

收稿日期：2025-11-21　　**录用日期：**2025-12-24

***基金项目：**清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室开发基金资助项目(sklhse-2024-E-01)

作者简介：洪国军(1982—)，男，教授级高级工程师，从事疏浚技术与装备及海洋工程技术装备研究工作。

水运工程

随着疏浚的多元化发展，疏浚场景的差异性对疏浚设备和疏浚工艺提出了更高的要求。近些年河湖库清淤成为热点[1-3]，同时码头下方清淤同样面临着急迫的需求[4-6]。河湖库常因水深及复杂地形导致大型清淤设备无法部署，且陆路交通不便制约重型机械运输。码头下方桩距密集、水面净空不足，传统清淤机械难以进入作业，同时需避免碰撞桩基引发结构风险，并减少泥浆扩散对航道运营的干扰。生态保护要求进一步增加难度，清淤过程需严格抑制底泥污染物扩散，避免二次污染，而传统绞吸或挖掘作业易扰动原生土层，加剧水质恶化。针对上述空间受限与环保难题，吊泵点吸式清淤技术通过垂直吊装模式突破水深与净空限制，结合模块化吸泥罩设计适应狭窄桩间环境，为深水库区与运营中码头提供“精准微创”的解决方案。

虽然吊泵点吸式清淤技术能够突破环境的限制，但由于其不具备破土能力，其适用性较窄，生产效率较低，而高压射流技术可以很好地弥补吊泵点吸式清淤的缺陷。针对疏浚领域的高压射流技术，国内外学者研究较多，洪国军等[7]研究了淹没高压射流的流体形态，提出提高高压冲水压力可有效解决低压冲水时拖尾问题的建议，其采用模型为单喷嘴射流，侧重于机理研究；周忠玮等[8]采用数模和物模相结合的方法，探究了淹没高压水射流对硬质黏土切削的规律，指出在高压射流作用下，硬质黏土切削深度随切削速度的增大而减小，随射流压力的增大而增大；陈浩等[9]采用数值模拟的方法，进一步对耙吸挖泥船喷嘴流场进行模拟，从破土量评估提出最佳喷射角度；Xiao 等[10]探究了射流压力和岩石岩性对砂岩破碎特性和效率的影响，指出水射流冲击能够有效破裂荷载岩石；Liu 等[11]研究了射流压力、横向速度、喷嘴直径、间距和切割次数等关键参数对切割效率的影响。上述研究多集中于高压射流技术的破土或破岩能力，但将高压射流技术应用于点吸式清淤方式，以弥补泵自吸破土能力的不足研究较少。为解决小管径管道泥浆浓度监测的难题，本文提出一种基于压力-流量参数的泥浆浓度（泥浆中固体颗粒体积占泥浆总体积的比值）测量方法，构建多参数耦合的物理模型试验平台，探究高压射流对清淤效率、浊度以及浚后地形的综合影响。

1　试验布置

1.1　总体布置

试验在疏浚技术装备国家工程研究中心古翠路试验基地开展。为使研究成果更具实用意义，选择某高桩码头为原型场景，采用 1∶10 的模型比尺开展物理模型试验，泥面坡度为 1∶4，物理模型布置见图 1。

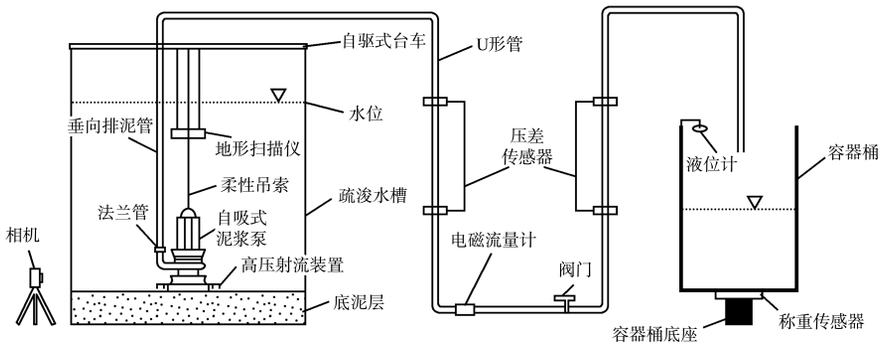


图 1　物理模型布置

Fig. 1　Physical model layout

1.2　试验装置和仪器

为探究高压射流对清淤扩散的影响，在清淤泵的四周布置 4 个浊度传感器，以清淤泵为中心，均匀布置在泵周围的 4 个桩基附近，浊度传感器距泵吸口的距离均为 0.7 m，距泥面的底部距离均为 0.15 m。模型清淤装置由泵吸设备、高压射流

系统、管道监测系统和尾端称重取样系统四部分组成。泵吸设备可以提供 10 m^3/h 的流量，扬程 15 m，通过调节阀门的开度控制流量，试验所用额定流量为 5 m^3/h。高压射流为直径 20 cm 的环形结构，共设置 8 个直径为 1 mm 喷嘴，角度为向外侧 30°，均匀布设在泵吸口外围，带高压射流自吸泵实物见图 2。管道监测系统可以对抽吸的泥浆流量、浓度等参数进行实时监测，管路系统内径 45 mm，管道监测系统实物见图 3。称重取样系统可以对管道监测系统精度进行验证。

图 2　带高压射流自吸泵

Fig. 2　Equipped with high-pressure jet self-priming pump

图 3　管道监测系统

Fig. 3　Pipeline monitoring system

1.3　试验用土

基于某高桩码头区地层为粉细砂土层，试验用土选为粉细砂土，原状土密度 1.8 g/cm^3，中值粒径为 0.018 mm，试验用土的粒径级配曲线见图 4。直剪试验测得土体的黏聚力为 21.95 kPa，内摩擦角为 10.0°；通过静力触探试验测得土体的 30 cm 深度的平均贯入阻力为 91.86 kPa。

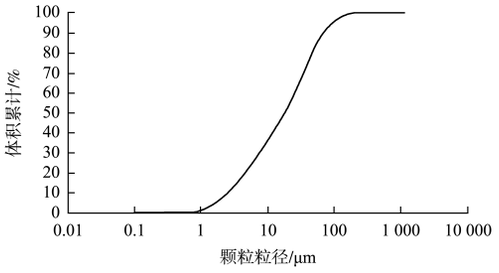


图 4　试验用土粒径级配曲线

Fig. 4　Particle size grading curve of experimental soil

1.4　试验工况设计

针对高压射流压力对点吸式清淤的影响，所用高压射流装置采用可调压控制，共分为 4 组工况，第 1 组工况无高压射流作用，破土清淤单纯依赖自吸泵的吸力，作为对照组；其余组次分别施加不同的泵压力，工况具体设置见表 1。各组工况吊泵的吊索初始阶段均处于松弛状态，即初始阶段泥泵始终与泥面接触，随着清淤的进程，靠自身重力下降。在吊索松弛状态阶段，忽略地形坡度的影响，工况 1 泵吸口与泥面(泥泵底部)的距离约 5 cm，其余工况泵吸口距泥面约 8 cm(高压喷嘴底部低于泥泵底部约 3 cm)。吊索的下放长度为 20 cm，当清淤坑深度超过 20 cm 后，泥泵不再下降，吸口、喷嘴与泥面的距离逐步增大，直至试验停止。在整个试验过程中，泥泵只沿水深方向移动，水平方向无任何移动。

表 1　工况设置

Tab. 1　Working conditions setting

工况	高压射流压力/MPa	喷嘴流速/(m·s^{-1})
1	-	-
2	0.234	15
3	0.356	20
4	0.515	25

2　小管径管道泥浆浓度测量方法

当前对于管径较大的管道，浓度测量方法较为成熟，有放射性测量法、电阻层析成像法、超声法等[12]；但对于小管径管道，其浓度测量方法多依赖于取样。由于取样法难以满足监测数据的连续性，研究提出了一种基于帕斯卡定理和管道沿程阻力损失特性的管道泥浆浓度测量装置，以

实现小管径物理模型试验中泥浆浓度的连续测量。U 形管测量装置模型见图 5，在上游管道侧(即 U 形管的左侧，泥浆由 U 形管左侧流向右侧)布设 1#压差传感器，测量其压差 Δp_1，在管道下游布设 2#压差传感器，测量其压差 Δp_2，在管道底部布设电磁流量计，测得管道内的泥浆的流量，进一步通过公式推演，获得管道内泥浆的浓度。

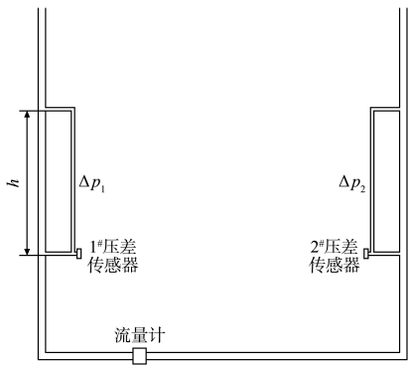


图 5　U 形管测量装置

Fig. 5　U-tube measuring device

在管道输送清水时，由于管道内沿程摩阻和局部阻力的存在，存在以下关系：

$$\begin{cases}\Delta p_1 = -I_{f1} - \Delta f_1 \\ \Delta p_2 = I_{f2} + \Delta f_2\end{cases} \tag{1}$$

其中：

$$\begin{cases} I_f = \rho_{\mathrm{w}} \lambda \cdot \dfrac{h}{d} \cdot \dfrac{v^2}{2g} \\ \lambda = 0.11\left(\dfrac{68\upsilon}{vd} + \dfrac{\varepsilon}{d}\right)^{0.25}\end{cases} \tag{2}$$

$$\Delta f = \rho_{\mathrm{w}} \xi \frac{v^2}{2g} \tag{3}$$

式中：Δp_1 和 Δp_2 分别为上游管道和下游管道压差；I_{f1} 和 I_{f2} 分别为上游管和下游管的清水摩阻损失；Δf_1 和 Δf_2 分别为上游管和下游管的局部阻力损失；ρ_{w} 为清水密度；g 为重力加速度；h 为压差计安装高度；λ 为沿程水力摩阻系数；υ 为清水的运动黏度；v 为管道流体流速；ε 为管壁当量粗糙度；ζ 为局部阻力损失系数；d 为输送管道内径。

在管道输送泥浆时，存在以下关系：

$$\begin{cases}\Delta p_1 = \rho_m g h - \rho_w g h - I_{m1} - \Delta m_1 \\ \Delta p_2 = \rho_m g h - \rho_w g h + I_{m2} + \Delta m_2\end{cases} \tag{4}$$

其中：

$$I_{\mathrm{m}} = \rho_m \lambda \cdot \frac{h}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \tag{5}$$

$$\Delta m = \rho_m \xi \frac{v^2}{2g} \tag{6}$$

式中：ρ_m 为泥浆密度；I_{m1} 和 I_{m2} 分别为输送泥浆时上游管和下游管的摩阻损失；Δm_1 和 Δm_2 分别为输送泥浆时上游管和下游管的局部阻力损失；I_{m} 为泥浆沿程摩阻损失；Δm 为局部阻力损失。

考虑到整个 U 形管泥浆浓度和速度相等，则可得 $I_{m1} = I_{m2}$，$\Delta m_1 = \Delta m_2$，根据式(4)，可以得到式(7)，通过式(7)可以计算出整个 U 形管内的泥浆平均密度 ρ_m。

$$\rho_m = \frac{\Delta p_1 + \Delta p_2}{2gh} + \rho_{\mathrm{w}} \tag{7}$$

左侧管道和右侧管道泥浆浓度单独计算，考虑到该试验采用的特定工况，泥浆输送过程中流速变化较小，速度的较小变化对 λ 的值影响较小，采用直接率定 λ 的方式替代对管壁当量粗糙度的率定，简化公式。进一步，考虑到 I_m 和 Δm 计算形式相同，引入总的阻力损失系数 ϕ，如式(8)所示，则由式(5)、式(6)、式(8)可得式(9)，通过清水工况率定获得阻力损失系数 ϕ，再通过式(10)获得泥浆密度，通过密度和浓度转换式(11)获得泥浆的浓度。

$$\phi = \lambda \frac{h}{d} + \xi \tag{8}$$

$$I_m + \Delta_m = \rho_m \phi \frac{v^2}{2g} \tag{9}$$

其中：

$$\begin{cases}\rho_m = (\Delta p_1 + \rho_{\mathrm{w}} g h) / \left(g h - \phi \dfrac{v^2}{2g}\right) \\ \rho_m = (\Delta p_2 + \rho_{\mathrm{w}} g h) / \left(g h + \phi \dfrac{v^2}{2g}\right)\end{cases} \tag{10}$$

$$C = \frac{\rho_m - \rho_{\mathrm{w}}}{\rho_o - \rho_{\mathrm{w}}} \tag{11}$$

式中：ϕ 为总的阻力系数；C 为泥浆浓度；ρ_{o} 为土体干密度。

通过上述操作，可以获取 3 个浓度值，分别

水运工程

为上游管道泥浆浓度、下游管道泥浆浓度和 U 形管泥浆平均浓度，其中上游浓度和下游浓度基于管道泥浆摩阻损失特性获取，平均浓度通过液压传递原理获取，三者之间可以相互印证。不同测量方法下获得的浓度对比曲线见图 6，由图 6 可知，基于液压传递原理和基于管道沿程摩阻损失所获得的管道泥浆浓度值吻合较好，基于沿程摩阻损失特性的方法对压差传感器波动更加敏感，部分时刻会出现异常突刺点，后续的不同工况对比分析采用 U 形管内平均浓度。由浓度流量测得的产量和称重体积测量得到的产量对比见图 7，由图可知，两种方法测得的泥浆产量值较为接近，射流流速 15、20、25 m/s 三种工况对应的误差分别为 3.82%、6.27% 和 1.79%，平均误差为 3.96%。取样收集泥浆测量其质量和体积，理论上是最可靠的测量方法，该试验结果表征了本文提出的 U 形管测量方法精度尚可。

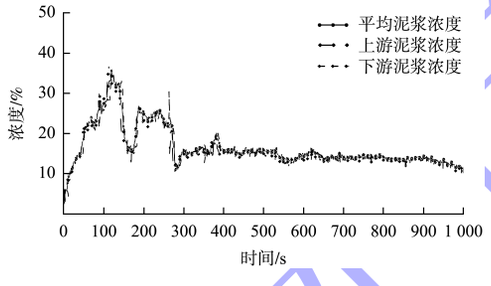


图 6　不同测量方法测得的浓度对比

Fig. 6　Comparison of concentrations measured by different measurement methods

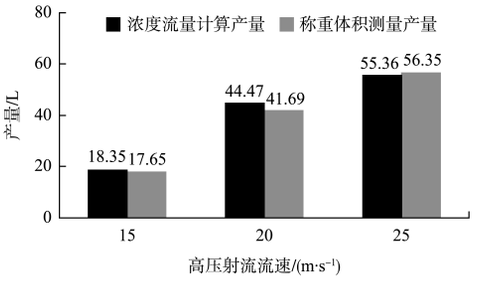


图 7　不同测量方法下测得的产量对比

Fig. 7　Comparison of yield measured by different measurement methods

3　试验结果分析

3.1　高压射流对吸泥浓度的影响

本节主要探究高压射流对吸泥浓度的影响，基于提出的细管径管道泥浆浓度测量方法，各工况吸泥过程中的泥浆浓度变化历时曲线见图 8，由图可知，不同工况下的浓度历时曲线均呈现“几”字形状，且在清淤开始后较快出现峰值。这是由于清淤开始时，高压射流作用于泥面，形成高浓度悬浮体，泥泵抽吸泥浆浓度上升，随着抽吸作业的进行，形成小体积的清淤坑，受高压射流扰动的泥面面积增大，吸泥泵吸入的泥浆浓度达到峰值，随着清淤作业的进行，清淤坑的面积增大，深度增加，喷嘴与泥面的距离增大，高压射流的沿程衰减显著，泥泵吸口附近的高浓度悬浮体难以维持，泥泵吸入的泥浆浓度逐渐减小。随着高压射流流速越大，泥浆历时曲线的峰值出现越早，且峰值越大。高压射流 25 m/s 工况下，在大峰值出现后又出现了 2 个小峰值，这是由于吸泥过程中，清淤坑边坡塌陷，部分土体滑落至吸泥口附近，在高压射流作用下形成高浓度悬浮体，使吸泥浓度明显升高。据此提出施工优化建议：提升高压射流的流速并选定合适的单点清淤时长，两者对于清淤效率的提升具有显著作用。

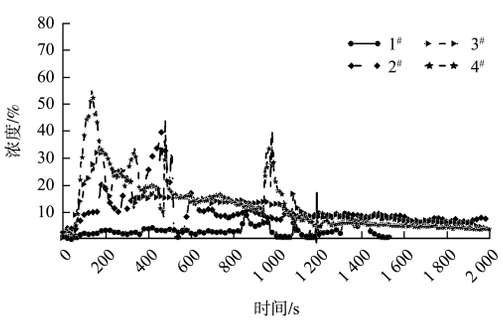


图 8　不同高压射流流速下管道内泥浆浓度变化历时曲线

Fig. 8　Duration curves of slurry concentration changes in pipelines under different high-pressure jet velocities

工况 3 部分时段流量和浓度的历时曲线见图 9，由图 9 可知，随着泥浆浓度的增大，流量会有一定程度的下降，整体呈现浓度越大，流量越小的趋势。浓度在迅速变化时，流量波动较大；当浓度趋于稳定时，虽然相较清水工况流量偏小，但差异不大。这是因为试验所用泥泵功率固定，流量与浓度之间相互影响，建议在施工时选用变频泵，在吸泥浓度较大时提高泵的转速，进而提高生产效率。

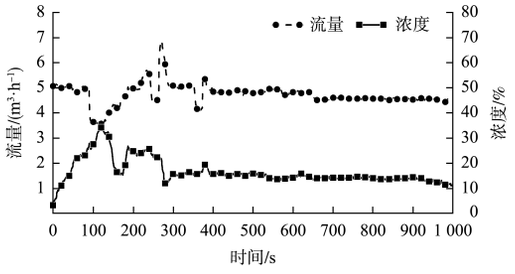


图 9　工况 3 泥浆流量和浓度历时曲线

Fig. 9　Duration curve of slurry flow and concentration for condition 3

3.2　高压射流对浊度的影响

试验采用的浊度计为光学仪器，测得的浊度实际通过遮光度换算，结果受泥沙粒径的影响。因此试验之前，预先对浊度计进行标定。在记录浊度计度数的同时，从浊度计附近进行取样、称重、烘干等测试真实的泥浆浓度。实际浊度与浊度计的读数线性关系见图 10，通过拟合曲线可知，由于固体颗粒粒径的影响，传感器采集数据与取样数据并不相同，整体呈线性关系，通过数据拟合可以获取该比例系数约为 3.672 3，试验过程中浓度测量值取传感器读数的 3.672 3 倍作为结果值。

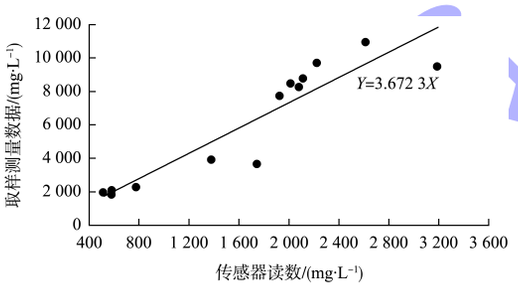


图 10　浊度传感器标定

Fig. 10　Calibration of turbidity sensor

基于试验设计，通过将清淤过程中 4 个浊度计监测值与修正系数 3.672 3 相乘，再求取算术平均值，以确定不同工况下的清淤浊度表征值。不同工况下清淤浊度见图 11，由图可知，相较于无射流工况，高压射流工况下浊度呈显著提升趋势，且浊度随射流流速增大而递增。其机制在于，射流流速升高会增大作用于底泥介质的射流压力，进而强化对底泥的扰动效应，促使更高浊度的固体颗粒悬浮体系形成。从工程效应来看，高压射流虽能提高清淤过程中悬浮物的裹挟浓度，却也会引发水体浊度水平上升，然清淤全过程的平均浊度值仍维持在 400 mg/L 以内。

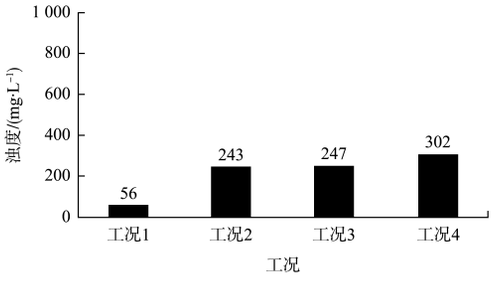
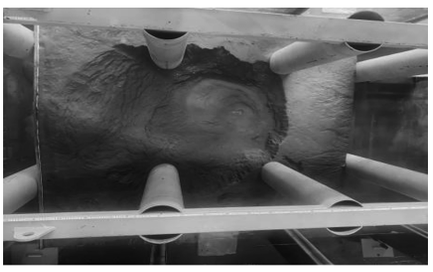


图 11　不同工况下的浊度

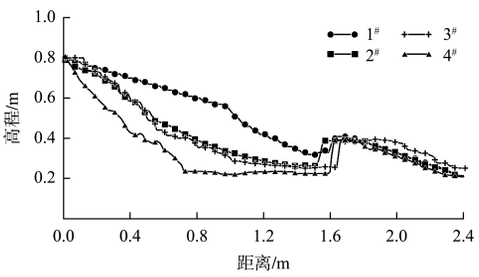
Fig. 11　Turbidity under different working conditions

3.3　高压射流对浚后地形的影响

浚后清淤坑的形态见图 12a)，根据地形扫描仪扫测获取的浚后地形数据，提取中心剖面点高程，各工况浚后地形中心剖面线见图 12b)。无高压射流工况(工况 1)下清淤坑呈现较缓上坡与较陡下坡的两段式结构特征；针对施加高压射流的工况(工况 2~4)，随着高压射流流速由 15 m/s 递增至 25 m/s，清淤坑体积呈现显著增大趋势，其上坡坡度逐步变陡，下坡坡度趋于收敛，最终逐渐发育为较缓上坡-平地过渡带-较陡下坡的三段式结构形态。



a) 浚后地形



b) 浚后地形中心纵剖面线

图 12　清淤后地形及各工况地形中心纵剖面线

Fig. 12　The post-dredging terrain and longitudinal profile lines of the terrain center under different working conditions

为探究射流流速对清淤坑形态特征的影响，进一步提取各工况下清淤坑的特征参数，不同射流流速下清淤坑轴长和纵横比(纵轴与横轴长度比值)见图 13，不同射流流速下清淤深度与径深比(清淤坑纵轴长度与清淤深度的比值)见图 14。由图 13 可知，随着射流流速的提升，清淤坑纵轴与横轴长度均呈增长趋势；当射流流速增至某一临界值后，纵轴与横轴长度的增长幅度趋于平缓，未出现显著增量。随射流流速增加，清淤坑纵横比呈减小趋势，且始终显著低于无射流工况下的对应值。这一现象可归因于：无射流作用时，坡度是主导清淤坑形态的关键因素；而随射流流速提升，射流动力对清淤坑形态的塑造作用逐渐占优，坡度的相对影响效应随之衰减。由图 14 可知，随射流流速的提升，清淤坑深度呈显著增长趋势。其力学机制为：射流通过动能传递作用于土体，引发深层土体的扰动并使其处于悬浮状态，进而借助吸泥泵实现泥沙的输移排出。图 14 同时呈现不同射流流速下径深比的变化特征。分析可知，径深比在 4~6 区间内变化，随着射流流速的增加，径深比呈现先增大后减小的趋势：当射流流速从初始值提升至 15 m/s 时，径深比呈上升态势；而当射流流速超过 15 m/s 后，径深比逐步下降。该规律表明，随着射流流速的增加，射流对清淤坑深度的作用效应强于其对清淤坑尺度的作用效应。

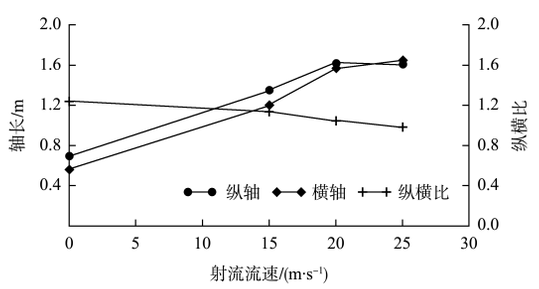


图 13　不同射流流速下清淤坑轴长和纵横比

Fig. 13　Axial length and aspect ratio of dredging pits under different jet velocities

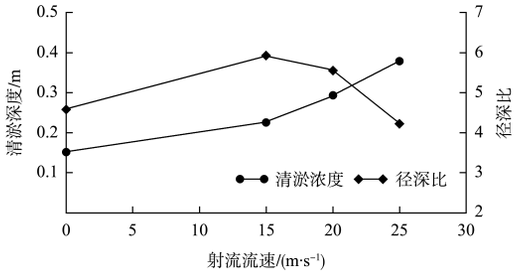


图 14　不同射流流速下清淤深度与径深比

Fig. 14　Dredging depth and length depth ratio under different jet velocities

4　结论

1）高压射流作用下，点吸式清淤的浓度-时间曲线呈现典型“几”字型特征，且清淤初期即出现峰值。随高压射流流速增大，清淤过程中吸入泥浆浓度与水体浊度均呈显著升高趋势，表明射流动能输入强化了底泥扰动与清淤效率。

2）随着高压射流流速增加，清淤坑形态逐渐演化，形成较缓上坡-平地过渡带-较陡下坡的三段式结构；其轴长与清淤深度均显著增加，但当流速增至临界值后，轴长增速明显放缓。进一步分析揭示，射流流速增大时，其对清淤坑深度方向的塑造作用强于水平尺度方向，体现了射流动能在竖向与水平向作用的差异化效应。

参考文献：

[1] 郇翔天. 河湖库淤积治理中底泥清淤的内涵与发展方向[J]. 工程建设与设计, 2024(24): 217-219.
HUAN X T. Connotation and development direction of sediment dredging in the management of river, lake and reservoir [J]. Construction & design for engineering, 2024(24): 217-219.

[2] 王仲梅, 赵荥, 张文皎, 等. 解放村水库清淤方案制定研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(S1): 5-6, 20.
WANG Z M, ZHAO X, ZHANG W J, et al. Research on the formulation of dredging plan for Jiefangcun Reservoir[J]. Yellow River, 2023, 45(S1): 5-6, 20.

[3] 宋政昌, 高玺. 长江流域水库清淤及淤积物利用研究[J]. 人民长江, 2024, 55(S2): 38-41.

SONG Z C, GAO X. Research on reservoir dredging and sediment utilization in the Yangtze River Basin [J]. Yangtze River, 2024, 55(S2): 38-41.

[4] 黄飞宇, 赵飞, 沈伟平. 洋山深水港区四期工程码头下方清淤技术[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(3): 43-47.
HUANG F Y, ZHAO F, SHEN W P. Dredging technology of remove silt under the wharf at Yangshan deep water port area phase Ⅳ project[J]. China harbour engineering, 2020, 40(3): 43-47.

[5] 龚圣勇. 沿海集装箱码头下方及后方清淤技术探究[J]. 中国水运, 2017(7): 68-69.
GONG S Y. Research on dredging technology under and behind coastal container terminals [J]. China water transport, 2017(7): 68-69.

[6] 赵煜, 蔡忠志, 尤再进, 等. 考虑结构安全的桩基码头清淤施工方案优化[J]. 水利水运工程学报, 2024(5): 10-21.
ZHAO Y, CAI Z Z, YOU Z J, et al. Optimization of desilting construction scheme for pile foundation wharves considering structural safety [J]. Hydro-science and engineering, 2024(5): 10-21.

[7] 洪国军, 江帅, 尹纪富, 等. 耙吸挖泥船高压冲水淹没射流演化过程试验[J]. 水运工程, 2018(10): 42-46, 67.
HONG G J, JIANG S, YIN J F, et al. Experiment on evolution process of high pressure water jet on trailing suction hopper dredger[J]. Port & waterway engineering, 2018(10): 42-46, 67.

[8] 周忠玮, 尹纪富, 施绍刚, 等. 淹没高压射流垂直切削硬质黏土数值与试验研究[J]. 水运工程, 2019(4): 1-6.
ZHOU Z W, YIN J F, SHI S G, et al. Numerical and experimental study on vertical cutting of hard clay by high pressure water jet under submerged condition [J]. Port & waterway engineering, 2019(4): 1-6.

[9] 陈浩, 孙守胜, 郭志勇. 耙头高压冲水喷嘴流场数值模拟及分析[J]. 水运工程, 2022(2): 202-208.
CHEN H, SUN S S, GUO Z Y. Numerical simulation and analysis of flow field in high-pressure flushing nozzle of drag head [J]. Port & waterway engineering, 2022(2): 202-208.

[10] XIAO S Q, XIAO J C, REN Q Y, et al. Fracture pattern and failure mechanism of sandstone impacted by a high-pressure water jet under different stress loading states[J]. Engineering fracture mechanics, 2025, 320: 111068.

[11] LIU F W, WANG Y S, HUANG X. Cutting efficiency of extremely hard granite by high-pressure water jet and prediction model of cutting depth based on energy method [J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 2024, 83(4): 95.

[12] CHENG S, XING J, WANG F, et al. Comparison of different methods of measurement of slurry concentration in pipe [C]//Proceedings of the Thirty-third (2023) International Ocean and Polar Engineering Conference. Cupertino, 2023: ISOPE-I-23-243.

(本文编辑 赵娟)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司等以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费，所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部