

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.013

泥沙含水率对调蓄池水力自清系统冲洗特性的影响

张睿¹,徐旭¹,张欣²,董磊²,徐辉¹,杨浩¹

(1. 河海大学农业科学与工程学院; 2. 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司)

摘要: 针对调蓄池底部廊道内沉积泥沙累积导致的运行效能降低问题,基于物理模型试验方法,探究了泥沙含水率对调蓄池水力自清系统冲洗特性的影响及其与泥沙厚度、冲洗流量的耦合关联。结果表明:冲刷率随泥沙含水率呈非线性抛物线变化,泥沙含水率最佳区间为 12%~20%;低含水率(<12%)泥沙因黏结力与抗剪强度高抑制冲刷,高含水率(>20%)泥沙因整体自重大导致冲刷率下降;泥沙厚度显著影响冲刷效率,中含水率(12%~20%)泥沙对厚度敏感性最弱;冲洗流量与冲刷率的正相关性受含水率影响,中含水率泥沙下流量增益效应最显著;通过优化廊道边墙结构能消除菱形波干扰,不同含水率下冲刷率提升 15.34%~37.83%,冲刷形态由波浪状转为条带状。

关键词: 调蓄池;水力自清系统;泥沙含水率;冲刷率;结构优化

Influence of sediment moisture content on flushing characteristics of hydraulic self-cleaning system in storage tanks

Zhang Rui¹, Xu Xu¹, Zhang Xin², Dong Lei², Xu Hui¹, Yang Hao¹

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University);

2. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd.)

Abstract: To address the operational efficiency reduction caused by sediment accumulation in the bottom corridor of storage tanks, the influence of sediment moisture content on the flushing characteristics of a hydraulic self-cleaning system in storage tanks was investigated through physical experiments, as well as its coupling effects with sediment thickness and flushing flow rates. The results demonstrate that the scouring rate exhibits a nonlinear parabolic relationship with sediment moisture content, with an optimal moisture content range of 12%-20%. Low moisture content (<12%) inhibits scouring due to enhanced interparticle cohesion and shear strength, while high moisture content (>20%) reduces the scouring rate owing to increased self-weight. Sediment thickness significantly affects scouring efficiency, with medium moisture content (12%-20%) showing the weakest sensitivity to thickness variations. The positive correlation between flushing flow rate and scouring rate is affected by moisture content, and the effect of increased flow rate under medium moisture content is the most significant. Structural optimization of corridor sidewalls eliminates diamond wave interference, improving the scouring rate by 15.34%-37.83% across all moisture content levels and transforming scouring morphology from wavy to strip-shaped patterns.

Key words: storage tank; hydraulic self-cleaning system; sediment moisture content; scouring rate; structural optimization

调蓄池是城市雨洪管理系统的核心调控单元,调蓄池底部的廊道沉积物累积已严重制约其运行效能^[1-2]。沉积物中泥沙颗粒与有机质等形成的复合残留结构^[3],不仅减少调蓄容积,更通过微生物介导作用引发污染物二次释放的风险^[4]。虽然门式、水力翻斗等常用冲洗方式可清除部分表层沉积物^[5-6],但存在能耗高、冲洗效率低等缺陷,尤其当沉积物经长期压实形成垂向分层结构时,传统水力冲洗难以有效破坏底层粗颗粒形成的抗冲层^[7],因此亟须基于沉积物高效冲洗特性构建新型结构。上海某地下污水调蓄工程设计采用了一种基于能量自供给原理的水力自清洗系统(图 1),该系统通过进水、放空双工况协同作用实现沉积物多次高效冲洗^[8]。

调蓄池底部廊道内的泥沙冲刷过程受多因素控制。有研究揭示泥沙厚度、粒径及流场特征等单因素作用机制^[9-12],其中厚度增加显著抑制泥沙冲刷强度^[13-14],沉积床位置与冲洗闸门高度的适配可提升能量传递效率^[15],管道坡度与冲刷速率呈正相关关系^[16]。作为泥沙物理性质的核心参数,泥沙含水率通过调控颗粒

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51809081);上海市科技计划项目(23DZ1203504)

作者简介: 张睿(1984—),男,副教授,博士,主要从事水能开发利用研究。E-mail: gulie1984@163.com

通信作者: 张欣(1969—),男,教授级高级工程师,硕士,主要从事排水系统工程设计研究。E-mail: zhangxin@smedi.com

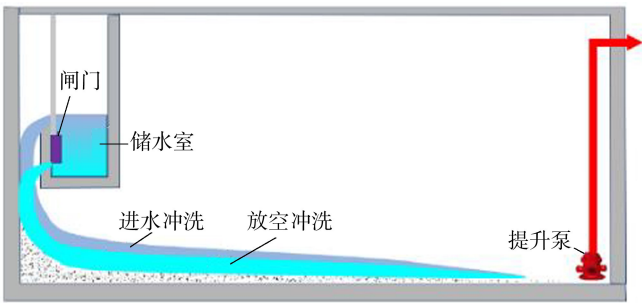


图1 调蓄池水力自清系统工作原理示意图

Fig.1 Working principle of hydraulic self-cleaning system in storage tank

间黏结力及孔隙水压力等来改变泥沙状态^[17-18],但关于泥沙含水率对泥沙冲刷的影响以及与泥沙厚度、冲洗流量的交互作用尚缺乏研究。大部分研究聚焦单一泥沙的含水率对冲刷的影响规律。Debnath等^[19]通过黏土-砂混合沉积物试验,发现含水率和黏土含量是控制冲刷率的关键参数。Hawke等^[20]的稳定性模型进一步表明,含水率对泥沙侵蚀呈非线性影响,低含水率泥沙通过增强基质吸力抑制冲刷,高含水率泥沙通过触发块体运动改变侵蚀模式。Sun等^[21]研究表明,泥沙含水率低时,临界剪切应力增大,因此需要更高流速才能启动冲刷。赵万杰^[22]通过直剪试验证实,黏性泥沙在含水率较大的情况下,其抗剪强度、黏结力、内摩擦角均随着含水率的增大而减小,且满足递减的指数关系。有研究进一步揭示含水率对冲刷的非线性调控特性;He等^[23]发现黄河黏性土冲刷率随含水率呈指数增长,但当黄河黏性土含水率接近液限时,因其结构液化反而抑制输沙;Kong等^[24]的降雨模拟试验揭示了含水率阈值效应的调控机制,产沙量随含水率升高呈非线性下降。上述试验研究揭示了泥沙含水率对冲刷的调控规律,但一般聚焦于河道中的天然泥沙,而对调蓄池内的黏性泥沙研究较少。此外,现有研究未明确分析泥沙厚度及冲洗流量与泥沙含水率的交互效应。

调蓄池水力自清系统的沉积物物理特性(泥沙含水率 w 、泥沙厚度 h_s)与水力参数(冲洗流量 Q)耦合作用尚未量化,亟须探究该系统进水冲洗过程中水流流动特性及其对底部沉积物的冲洗效果。本文基于物理模型试验对水力自清系统进水冲洗过程进行研究,分析进水冲洗水流的流动特性以及泥沙含水率对冲洗特性的影响,探究泥沙含水率与泥沙厚度及冲洗流量的耦合关联,并提出调蓄池底部廊道结构优化方案。

1 试验模型与方法

1.1 调蓄池模型

调蓄池水力自清系统的结构布置示意图如图2所示。根据重力相似准则搭建线性比尺 $\lambda_L=10$ 的物理模型,其布置示意图如图3(a)所示。该模型采用自循环开敞式的试验系统,尾部蓄水槽与出水调节池之间采用闸门控制。本文聚焦调蓄池进水阶段底部廊道泥沙的冲洗特性,因此仅在单个廊道进行冲刷试验,对储水式第一仓进行隔断处理,结构改造如图3(b)所示。根据张瑞瑾^[25]的起动流速公式,选用中值粒径为0.25 mm、密度为1250 kg/m³的塑料沙作为模型试验沙,起动流速比尺为3.33。

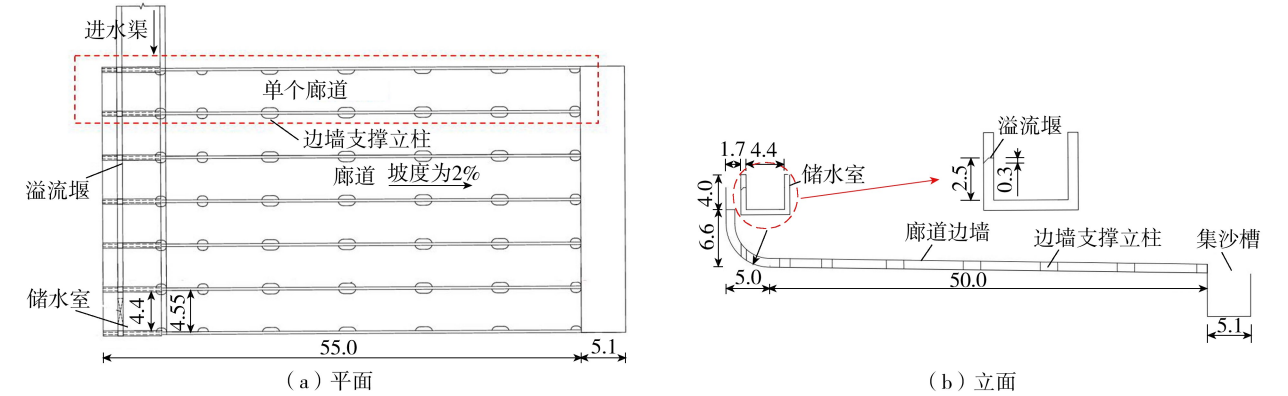


图2 调蓄池水力自清系统结构布置示意图(单位:m)

Fig.2 Structural layout diagram of hydraulic self-cleaning system in storage tank (unit: m)

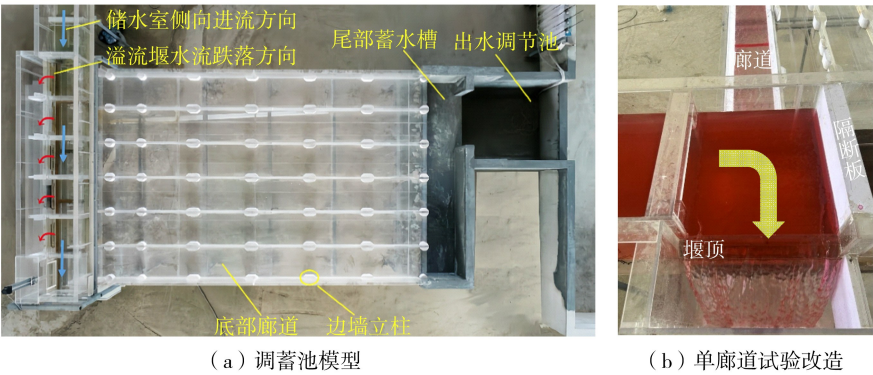


图 3 调蓄池进水冲洗物理试验模型

Fig. 3 Physical experimental model of inflow flushing in storage tank

1.2 试验方法

采用控制变量法设计模型试验, w 设置 0%、4%、8%、12%、16%、20%、24%、28%、32% 9 组, h_s 设置 4、6、8、10 cm 4 组, 单廊道 Q 设置 0.53、1.07、1.58、2.12 m³/s 4 组。本文仅研究进水冲洗阶段冲洗水流直接作用于廊道泥沙的时间, 因此将堰顶水流开始跌落至尾部蓄水槽水面与廊道末端齐平的时长作为试验冲刷时长。冲刷结束后记录廊道内残留泥沙形态及烘干后质量, 泥沙冲刷率 η 的计算公式为:

$$\eta = \left(1 - \frac{m_0}{m}\right) \times 100\% \tag{1}$$

式中: m 、 m_0 分别为进水冲洗前、后调蓄池底部廊道沉积物的初始质量与剩余质量。

2 结果与分析

2.1 泥沙含水率对冲刷率的影响分析

为探究 w 对水力自清系统进水冲洗阶段泥沙冲刷的影响规律, 选取 $h_s = 10$ cm、 $Q = 2.12$ m³/s 工况, 对 9 组含水率进行试验分析。

由图 4 可知, 随着 w 增大, η 先增大后减小。 w 由 0% 增至 16% 时, η 从 31.9% 增至 80.8%, 说明对于水力自清系统廊道内泥沙而言, 干燥状态下的冲洗效果最差, 含水率增大能对冲洗起促进作用, 其原因在于泥沙含水率低时, 颗粒间以摩擦力为主, 黏结力随含水率增加而逐渐形成^[26], 但此时水分起到润滑作用, 能削弱颗粒间的摩擦力, 因此含水率增大使泥沙更易被水流剥离。 w 由 16% 增至 32% 时, η 降低至 57.3%, 说明含水率过量提升反而对水力自清系统廊道泥沙冲洗起阻碍作用, 这部分原因是水分增多后, 泥沙自重增加, 需更高剪切力才能剥离^[25]。单颗粒泥沙起动临界水流剪切力 τ_c 的计算公式为:

$$\tau_c = (\gamma_s - \gamma_w) D \tan \varphi \tag{2}$$

式中: γ_s 为泥沙容重, N/m³; γ_w 为水容重, N/m³; D 为粒径, mm; φ 为内摩擦角, (°)。泥沙容重随含水率增大而增大, 导致 τ_c 增大, 从而削弱冲洗效果。

调蓄池进水过程为侧向进流, 如图 5(a) 所示, 当水位超过储水室堰顶后跌落至廊道圆弧段, 堰顶两侧流速不同导致水流在圆弧段的落点有所偏差, 如图 5(b)(c) 所示。当存在流速差的跌落水流进入廊道后, 廊道右侧的流速高于左侧(沿主流方向), 由此产生偏流现象, 同时廊道两侧的边墙立柱使内部产生菱形波现象, 如图 6(a) 所示; 冲洗水流的偏流使廊道的右侧泥沙冲刷量大、左侧残留较多, 并且菱形波使边墙立柱间存在冲刷死角而导致泥沙局部淤积滞留; 廊道末端的冲洗水流流速降低, 使得泥沙冲刷形态更易受菱形波影响而呈现波浪状分布, 如图 6(b) 所示。

由图 7 可知, 对于纯干沙状态($w = 0\%$), 泥沙冲刷形态呈块状间断侵蚀、末端泥沙表面出现龟裂状细沙

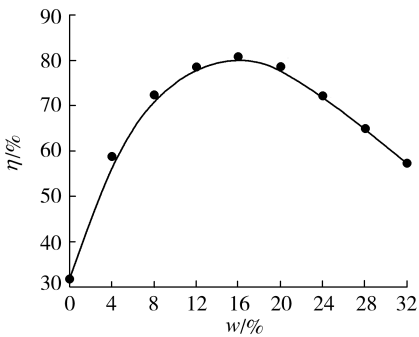


图 4 η 随 w 的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of η with w

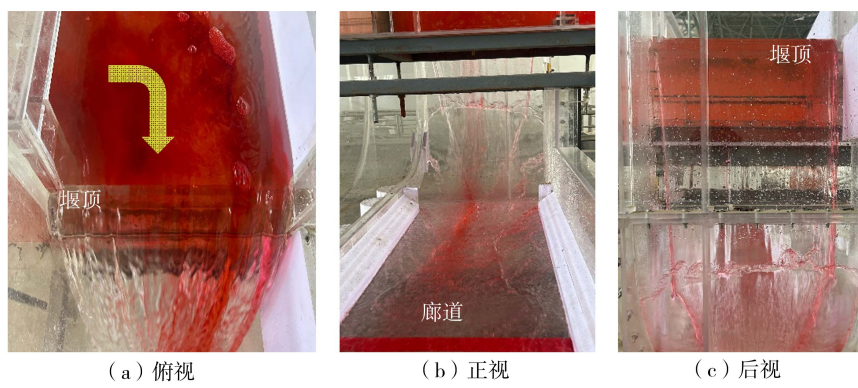


图 5 廊道圆弧段流态
Fig. 5 Flow regime in arc section of corridor



图 6 底层廊道流态及泥沙冲刷形态
Fig. 6 Flow regime and sediment scouring morphology in bottom corridor

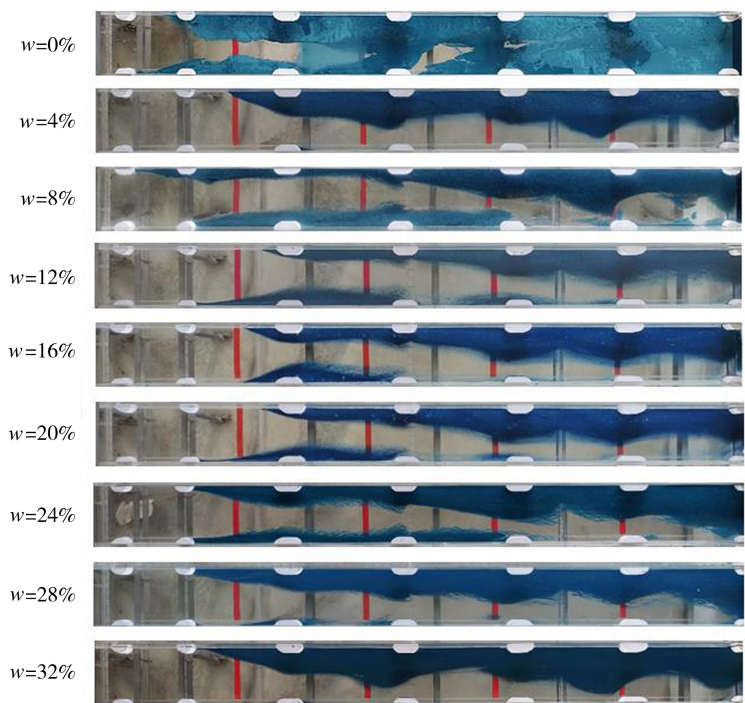


图 7 不同含水率对应的泥沙冲刷形态分布
Fig. 7 Distribution of sediment scouring morphology corresponding to different moisture contents

薄膜的分布特征,原因是干燥泥沙颗粒间空隙大,导致冲刷水流优先填充孔隙而非剥离泥沙,因此冲洗水流流速衰减迅速,导致悬移质泥沙更易发生二次沉降。当 $w=4\%$ 时,泥沙冲刷形态整体沿廊道左侧堆积,表现为泥沙残留多、堆积厚度高且覆盖面积大。当 w 增大至 $8\% \sim 24\%$ 范围,廊道内泥沙冲刷形态有所改善,表现为廊道中段泥沙残留在两侧柱间冲洗死角区域且呈对称分布,末端泥沙堆积均匀减薄、面积减少,此外冲刷形态轮廓边缘细沙薄膜增多。当 w 增大至 $24\% \sim 32\%$ 时,泥沙冲刷形态又沿廊道左侧堆积,而且更易受菱形波干扰,冲刷形态呈波浪状分布的现象加剧。结合图 4 进一步分析可得, w 由 0% 增大至 16% , η 增大,对应冲刷形态表现为泥沙堆积面积减少、残留长度缩短; w 由 16% 增大至 32% , η 减小,冲刷形态也与之对应。不同 η 在冲刷形态上的表现规律不同, $\eta \leq 70\%$,冲刷形态均沿廊道左侧分布; $\eta > 70\%$,冲刷形态在廊道中段呈对称分布规律。 η 相近时,冲刷形态上表现一致; w 为 4% 和 32% 、 8% 和 24% 、 $12\% \sim 20\%$ 时, η 相近,冲刷形

态呈现规律一致。

2.2 w 与 h_s 的交互影响分析

为分析 w 与 h_s 对 η 的交互影响作用,在 $Q=2.12\text{ m}^3/\text{s}$ 时,对 3 组 $w(4\%、16\%、28\%)$ 下泥沙厚度增加对冲刷衰减的影响规律进行试验研究。

由图 8 可知, $w=4\%$ 时,随着 h_s 由 4 cm 增至 10 cm, η 呈线性下降趋势,降幅达 39.29%,此现象可由库仑公式解释。

低含水率泥沙颗粒间开始形成黏结力,且有效应力随含水率降低而升高,因此当 $w=4\%$ 时,泥沙整体抗剪强度高,同时厚度增加使泥沙层形成更稳定的结构,水流需克服更多阻碍才能引发冲刷,从而使冲刷率随厚度增加显著衰减; $w=16\%$ 时, η 随 h_s 增加的衰减速率大幅降低,降幅仅为 4.64%,且冲刷率始终维持在 80% 以上,说明该含水率下泥沙厚度对冲刷的抑制作用削弱,冲刷过程趋于稳定;泥沙含水率增大至 30% 左右,接近轻质塑料沙液限 w_L ,薄层泥沙($h_s \leq 6\text{ cm}$)液化效应显著,水流可分散表层颗粒,而厚层泥沙($h_s \geq 8\text{ cm}$)因自重压力大,形成整体稳定性更高的淤积体,需更大冲洗能量才能破坏泥沙结构。因此当 $w=28\%$ 时, h_s 在 4~8 cm 范围内, η 仅下降 8.2%,但 h_s 增至 10 cm 时, η 骤降至 64.88%。综上,低含水率且泥沙厚度大,显著降低泥沙冲刷效果,而高含水率且泥沙厚度小,则提高冲刷效果。

由图 8 可知,当 $h_s=4,6\text{ cm}$ 时, η 随含水率升高呈下降趋势;当 $w=4\%$ 时 η 达到同组最高峰,说明低含水率薄层泥沙总阻力较低,冲洗水流更易剥离泥沙颗粒;当 $w=16\%,28\%$ 时,水分削弱泥沙颗粒间黏结力使其易分散为悬浮质,同时薄层泥沙受自重抑制冲刷作用弱,水流携沙能力未受显著限制,因此 η 均匀维持在 80% 以上。当 $h_s=8,10\text{ cm}$ 时,含水率对冲刷率呈非线性调控作用;当 $w=4\%$ 时, η 远低于同组其余工况,其原因在于该含水率下颗粒间黏结力叠加厚层自重抑制效应,导致泥沙临界剪切应力高,从而显著阻碍冲刷效果;当 $w=16\%$ 时, η 均维持在 80% 以上,说明该含水率下水流可穿透厚层泥沙实现高效冲刷,厚度阻碍作用被有效抑制;厚层泥沙含水率提升至液限状态更易受自重阻碍作用影响,冲洗水流能量耗散增多,因此当 $w=28\%$ 时, η 随 h_s 的增加出现突变, h_s 增至 10 cm 时, η 骤降至 64.88%。

图 9 所示的是在 3 组含水率下,水力自清系统对不同厚度泥沙的冲刷形态,反映水力自清系统冲洗作用受泥沙厚度影响的差异。受跌落偏流与菱形波叠加效应的影响,所有工况下冲刷形态呈右侧冲刷充分、左侧呈波浪状堆积(沿主流方向)的分布规律,且厚度增加使残留泥沙向廊道起始端蔓延的长度增加。当 $w=4\%、h_s=4\text{ cm}$ 时,廊道内泥沙冲刷效果显著,说明低含水率时,薄层泥沙易受冲洗水流剥离;当 $h_s \geq 6\text{ cm}$ 时,冲洗残留泥沙向起始端延伸的距离大幅增加,说明低含水率时,泥沙厚度增加,显著削弱冲洗效果。当 $w=16\%$ 时,各厚度的泥沙冲刷形态较均匀, $h_s=10\text{ cm}$ 的残留长度较同组低泥沙厚度仅增加 10%,说明该含水率下泥沙厚度对冲刷的抑制作用较弱。

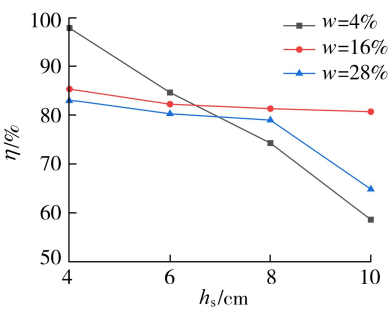


图 8 3 组 w 下 η 随 h_s 的变化

Fig. 8 Variation of η with h_s under three moisture content levels

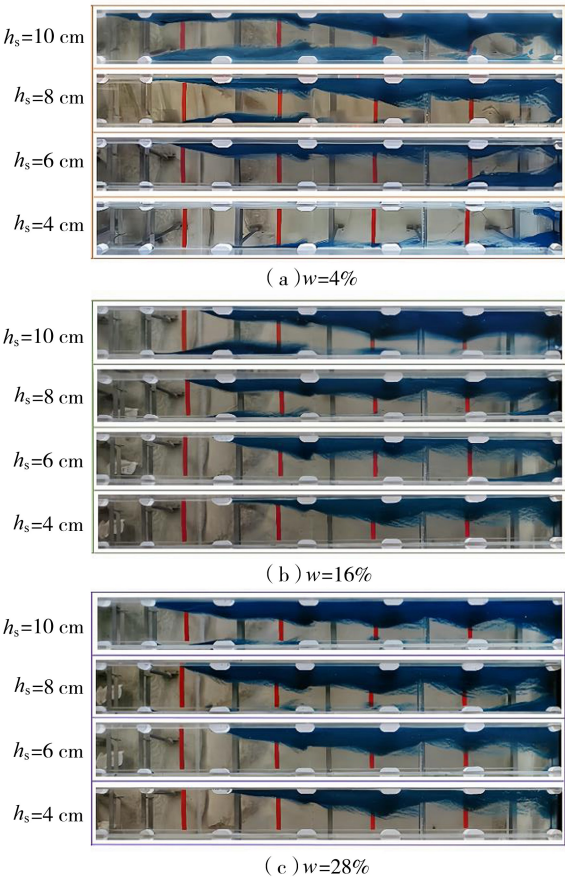


图 9 3 组 w 下不同 h_s 对应的泥沙冲刷形态

Fig. 9 Scouring morphology corresponding to different sediment thicknesses at three moisture content levels

当 $w=28\%$ 、 $h_s \leq 8\text{ cm}$ 时,泥沙冲刷形态与 $w=16\%$ 组同工况相似,仅泥沙残留面积增多; $h_s=10\text{ cm}$ 时,冲刷残留长度较同组低泥沙厚度增加 24% 且泥沙堆积厚度增加,说明该含水率下泥沙自重增大,使泥沙整体密实性提高,从而显著提升抗冲强度。

2.3 含水率与冲洗流量的交互影响分析

为分析泥沙含水率与冲洗流量对泥沙冲刷率的交互影响作用,在 $h_s=10\text{ cm}$ 时,对 4%、16%、28% 3 组含水率下冲洗流量增加对泥沙冲刷影响的规律进行分析。

由图 10 可知,当 $w=4\%$ 时, Q 由 $0.53\text{ m}^3/\text{s}$ 增至 $2.12\text{ m}^3/\text{s}$, η 由 55.60% 增至 58.63%, 仅上升 5.45%, 说明该含水率下泥沙的密实结构限制了水流穿透, 水流能量增大对泥沙冲刷的提升效果较弱。当 $w=16\%$ 时, 冲洗流量增大, η 由 67.4% 提升至 80.78%, 说明该含水率的泥沙对冲洗流量敏感度最高, 冲洗流量提高显著增强悬移质泥沙输移能力。当 $w=28\%$ 时, 冲洗流量的增加使得 η 仅提升 3.74%, 这是由于厚层高含水率泥沙受自重抑制作用, 削弱 Q 对 η 的增益效果。因此, 冲刷率与冲洗流量的正相关性受泥沙含水率的影响, 当 $w=16\%$ 时, 对冲洗流量调控最为敏感且对冲刷效率的影响最为突出。

由图 11 可知, 当 $Q=0.53\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 冲刷形态呈前端冲刷充分、中后端波浪状堆积增厚的规律, 说明低流速下水流能量不足以维持泥沙长距离输移, 悬移质泥沙在廊道末端因流速骤降而重新沉积。当 $Q=1.07\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 廊道右侧前端呈条带状分布, 左侧后端呈波浪状分布菱形波扰动, 形成波浪状残留, 源于水流能量不足导致冲刷形态分布不均。当 $Q=1.58\text{ m}^3/\text{s}$ 及 $Q=2.12\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 廊道左侧堆积增多、右侧残留减少, 说明流量增大导致偏流现象加剧。此外, 在相同冲洗流量下, 泥沙残留长度受含水率影响, 当 $w=16\%$ 时, 残留泥沙较其他组整体缩短、堆积厚度减薄。

2.4 廊道优化改造

已有研究证明, 菱形波扰动会造成水流能量耗散^[27-28]。对于调蓄池水力自清系统进水阶段冲洗而言, 边墙立柱引起的菱形波使廊道内产生冲洗死角, 对泥沙冲刷效果产生不利影响。基于此, 本文提出消除边墙立柱干扰的廊道几何优化方案, 如图 12 所示。当 $h_s=10\text{ cm}$ 、 $Q=2.12\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 对 4%、16% 以及 28% 含水率开展廊道结构优化后的冲刷试验, 分析该改造对水力自清系统冲刷效率的优化程度。

由图 13 可知, 结构优化后的廊道内流态平稳顺滑, 仅入口处产生水流冲击波, 且未影响后续流态, 可见廊道改造消除了廊道内菱形波扰动。由 14(a) 可知, 廊道改造后, 当 $w=4\%$ 、16%、28% 时, 水力自清系统 η 分别提升了 37.83%、15.34%、31.64%, 这源于改造后的边墙增强跌落水流的能量传递效率, 使冲洗水流更集中于底部泥沙的剥离; 图 14(b) 显示, 廊道改造后冲刷形态显著改善, 菱形波扰动消失, 残留泥沙分布由改造前的一侧波浪状堆积转变为条带状堆积, 泥沙残留长度及堆积厚度均显著减少, 且消除了冲刷死

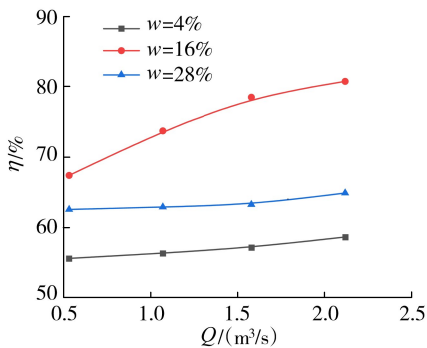


图 10 3 组含水率下 η 随 Q 的变化
Fig. 10 Variation of η with Q under three moisture content levels

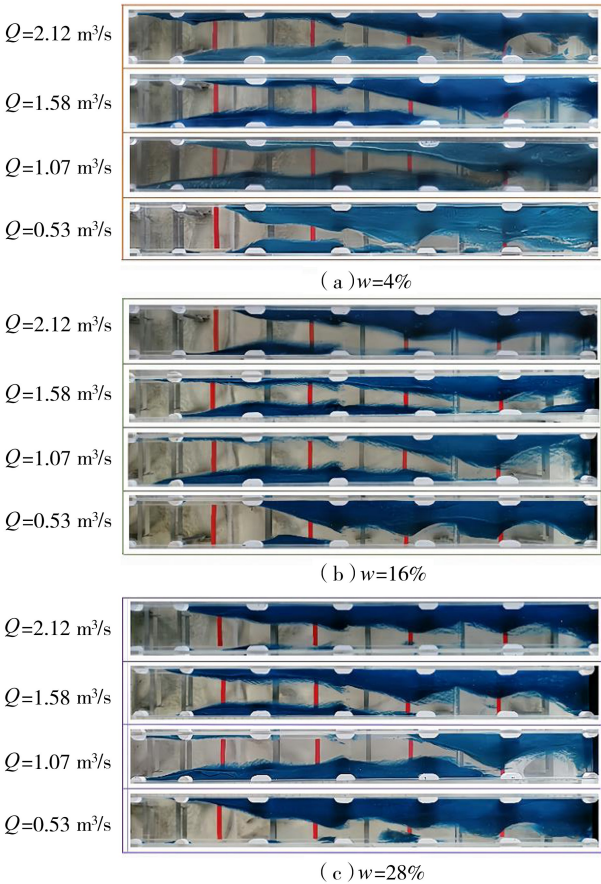


图 11 3 组 w 下不同 Q 对应的泥沙冲刷形态
Fig. 11 Scouring morphology corresponding to different flushing flow rates at three moisture content levels

角区域。当 $w=16\%$ 时,廊道内 η 达到最高峰,仅廊道末端残留少量泥沙。可见,廊道结构改造显著提升了调蓄池水力自清系统的泥沙冲刷率。

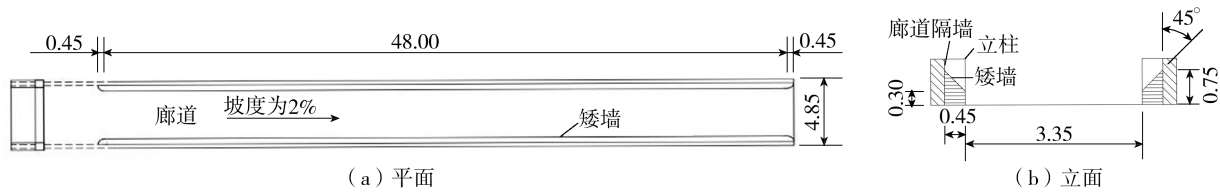


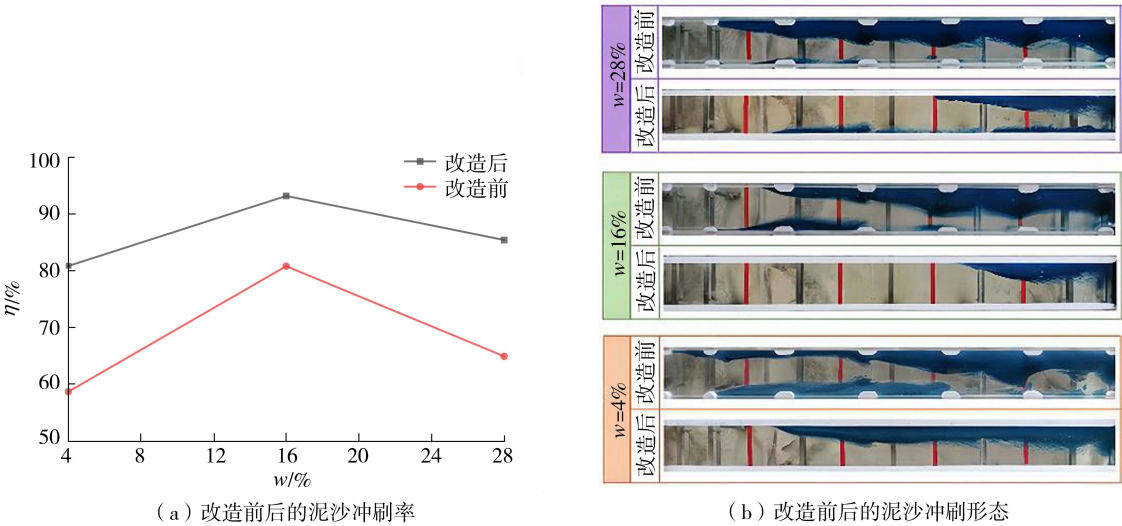
图 12 调蓄池底部廊道结构优化示意图(长度单位:m)

Fig. 12 Schematic diagram of the optimized bottom corridor structure in storage tank (length unit: m)



图 13 廊道改造后内部水流流态

Fig. 13 Internal flow regime after corridor modification



(a) 改造前后的泥沙冲刷率

(b) 改造前后的泥沙冲刷形态

图 14 廊道改造前后泥沙冲刷效果对比

Fig. 14 Comparison of sediment scouring effects before and after corridor modification

3 结 论

- a. 水力自清系统进水冲洗的冲刷率随泥沙含水率呈抛物线变化,含水率在 12%~20% 范围内冲洗效果更好;泥沙的物理性质随着含水率产生变化,颗粒间的内部作用力与泥沙自重效应相互影响,改变泥沙抗冲条件。
- b. 泥沙厚度与泥沙含水率的交互作用对水力自清系统冲刷产生显著影响,薄层泥沙含水率低时冲洗效果好,薄层泥沙含水率提高使冲刷效果趋于稳定,厚层泥沙仅在含水率为 16% 时冲洗效果好,含水率为 4% 和 28% 时受泥沙厚度的削弱影响显著,证明低含水率的厚层泥沙削弱冲刷效果,而高含水率的薄层泥沙冲刷效果较好;水力自清系统的冲刷率与冲洗流量的正相关性受底部泥沙含水率影响,泥沙含水率为 16% 时冲洗流量对调蓄池水力自清系统冲刷的增益效果最显著。
- c. 通过改造廊道边墙结构,菱形波干扰得到消除、冲洗水流流态得以改善,水力自清系统的冲刷率得到大幅提升,泥沙冲刷形态由一侧波浪状转为条带状。

参考文献:

[1] Sun Yan, Li Yu, Xu Bo, et al. Operational reliability of urban drainage systems under uncertainties[J]. Journal of Environmental

Management,2023,331:117241.

- [2] 徐乾轲,张力方,张建民.雨水调蓄池体型优化数值模拟研究[J].水利规划与设计,2023(3):69-74. (Xu Qianke,Zhang Lifang,Zhang Jianmin. Numerical simulation study on shape optimization of rainwater storage tank[J]. Water Resources Planning and Design,2023(3):69-74. (in Chinese))
- [3] Tang Yangbo. Sediment movement in storm sewer systems[D]. Alberta: Civil and Environmental Engineering University of Alberta,2020.
- [4] 周骅.调蓄池功能提升试验研究与改进对策[J].给水排水,2018,54(5):16-20. (Zhou Hua. Experimental study and improvement strategies for functional enhancement of storage tanks[J]. Water & Wastewater Engineering,2018,54(5):16-20. (in Chinese))
- [5] 肖艳,徐建初.世博浦东园区雨水泵站初期雨水调蓄池冲洗方式设计[J].给水排水,2009,45(3):50-52. (Xiao Yan,Xu Jianchu. Design of flushing methods for the initial rainwater storage tank of a rainwater pumping station in the Pudong area of the Expo[J]. Water & Wastewater Engineering,2009,45(3):50-52. (in Chinese))
- [6] 笪健,王德生,曹兴坤,等.潍坊市超大型调蓄池工艺设计与建设特点[J].中国给水排水,2020,36(18):85-89. (Da Jian,Wang Desheng,Cao Xingkun,et al. Process design and construction characteristics of a super-large storage tank in weifang city [J]. China Water & Wastewater,2020,36(18):85-89. (in Chinese))
- [7] 李成瑶,程立,王同飞,等.白洋淀典型区域清淤前后沉积物的氮磷扩散通量研究[J].环境科学学报,2021,41(4):1401-1409. (Li Chengyao,Cheng Li,Wang Tongfei,et al. Study on nitrogen and phosphorus diffusion fluxes in sediments before and after dredging in typical areas of Baiyangdian[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2021,41(4):1401-1409. (in Chinese))
- [8] 张睿,何琪,徐旭,等.调蓄池水力自清系统放空冲洗特性[J].河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):47-53. (Zhang Rui,He Qi,Xu Xu,et al. Characteristics of emptying flushing in the hydraulic self-cleaning system of storage tanks[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(2):47-53. (in Chinese))
- [9] Guo Qizhong,Fan Chiyuan,Raghaven R,et al. Gate and vacuum flushing of sewer sediment;laboratory testing[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2004,130(5):463-466.
- [10] Bong T,Son Y,Kim K S. Experimental modeling of suspended sediment transport considering the flow rate and grain size[J]. Journal of Coastal Research,2019,35(3):637-647.
- [11] Guillen-Ludena S,Toapaxi J A,Castillo L G. Flushing capacity of a stored volume of water:an experimental study[J]. Water,2022,14(17):2607.
- [12] Shahsavari G,Arnaud-Fassetta G,Campisano A. A field experiment to evaluate the cleaning performance of sewer flushing on non-uniform sediment deposits[J]. Water Research,2017,118:59-69.
- [13] Todeschini S,Ciaponi C,Papiri S. Laboratory experiments and numerical modelling of the scouring effects of flushing waves on sediment beds[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics,2010,4(3):365-373.
- [14] 耿立馨.合流制管道沉积物冲刷模型试验研究[D].武汉:武汉理工大学,2013.
- [15] Feng Haofer,Du Shengtao,Zhu D Z. Numerical study of effects of flushing gate height and sediment bed properties on cleaning efficiency in a simplified self-cleaning device[J]. Water Science and Technology,2023,88(3):542-555.
- [16] Liu Cuiyun,Lyu Wenke,Liu Qi,et al. Analysis and calculation of sediment scouring rate at different locations of storm sewer[J]. Water Science and Technology,2021,84(6):1340-1353.
- [17] 龙玉民.重塑黏性土 $c\varphi$ 值影响因素研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [18] Kashani M M,Lai S H,Ibrahim S B,et al. An investigation into the effects of particle texture,water content and parallel plates' diameters on rheological behavior of fine sediment[J]. International Journal of Sediment Research,2016,31(2):120-130.
- [19] Debnath K,Chaudhuri S. Closure to "bridge pier scour in clay-sand mixed sediments at near-threshold velocity for sand" by koustuv debnath and susanta chaudhuri[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2011,137(10):1306-1307.
- [20] Hawke R,Mcconchie J. In situ measurement of soil moisture and pore-water pressures in an 'incipient' landslide;lake tutira, new zealand[J]. Journal of Environmental Management,2011,92(2):266-274.
- [21] Sun Yan,Li Yu,Xu Bo,et al. Operational reliability of urban drainage systems under uncertainties[J]. Journal of Environmental Management,2023,331:117241.
- [22] 赵万杰.黄河下游黏性泥沙起动冲刷试验研究[D].郑州:华北水利水电大学,2020.
- [23] He Na,Yang Liuqing,Xu Linjuan,et al. Experimental study on the scouring rate of cohesive soil in the lower Yellow River[J]. Coatings,2022,12(3):418.
- [24] Kong Y Y,Cheng Z Y,Ren J K,et al. The impact of antecedent moisture content on slope erosion in dispersive soils in the

western Jilin Region, China[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2024, 22(3): 2257-2275.

[25] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.

[26] Bonhomme C, Petrucci G. Should we trust build-up/wash-off water quality models at the scale of urban catchments? [J]. *Water Research*, 2016, 108: 422-431.

[27] Yang Haoming, Zhu D Z, Zhang Yiping, et al. Numerical investigation on bottom shear stress induced by flushing gate for sewer cleaning[J]. *Water Science and Technology*, 2019, 80(2): 290-299.

[28] Staufer P, Pinnekamp J. In situ measurements of shear stresses of a flushing wave in a circular sewer using ultrasound[J]. *Water Science and Technology*, 2008, 57(9): 1363-1368.

(收稿日期: 2025 - 06 - 18 编辑: 彭桃英)

(上接第 37 页)

[33] 孔令婷, 钱真, 刘敏. 基于熵权 TOPSIS 评价法的上海市应对太湖流域超标准洪水调度策略研究[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(3): 55-61. (Kong Lingting, Qian Zhen, Liu Min. Study on scheduling strategies in Shanghai City for managing over-standard floods from the Taihu Basin based on entropy-weighted TOPSIS evaluation method[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(3): 55-61. (in Chinese))

[34] 姜雅男, 于永进, 李长云. 基于改进 TOPSIS 模型的绝缘纸机-热老化状态评估方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(6): 1572-1582. (Jiang Ya' nan, Yu Yongjin, Li Changyun. Evaluation method of insulation paper deterioration status with mechanical-thermal synergy based on improved TOPSIS model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(6): 1572-1582. (in Chinese))

[35] Liao Xinli, Xu Wei, Zhang Junlin, et al. Analysis of affected population vulnerability to rainstorms and its induced floods at county level: a case study of Zhejiang Province, China[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 75: 102976.

[36] Ming Xiaodong, Liang Qiuhua, Richard D, et al. A quantitative multi-hazard risk assessment framework for compound flooding considering hazard inter-dependencies and interactions[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 607: 127477.

[37] Zhang Qian, Yu Hao, Li Zhenning, et al. Assessing potential likelihood and impacts of landslides on transportation network vulnerability[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2020, 82: 102304.

[38] Mesías-Ruiz G A, Borra-Serrano I, Peña J M, et al. Weed species classification with UAV imagery and standard CNN models: assessing the frontiers of training and inference phases[J]. *Crop Protection*, 2024, 182: 106721.

[39] 铁永波, 阮崇飞, 杨顺, 等. 云南省贡山县“5·25”暴雨诱发地质灾害的特征与形成机制 [J]. *水土保持通报*, 2021, 41(2): 10-15. (Tie Yongbo, Ruan Chongfei, Yang Shun, et al. Characteristics and Mechanism of Geological Disasters Induced by “5·25” Rainstorm in Gongshan County of Yunnan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(2): 10-15. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 11 - 04 编辑: 刘晓艳)