

滆湖生态清淤尾水悬浮物控制措施

刘 坤¹ 查晓庭² 王金伟² 李峰昊²

1. 江苏中源工程管理股份有限公司 江苏 南京 211500

2. 江苏省水利建设工程有限公司 江苏 扬州 225127

摘要：生态清淤，亦称环保清淤，旨在及时清除河湖底部的污染物及底泥。这一过程不仅能改善水质，还能恢复河湖的调蓄能力，促进生态修复，从而在环境保护与经济效益之间达成双赢。悬浮物作为清淤尾水控制的六大关键指标之一，是引发水体浑浊的主要因素。本文依据悬浮物扩散理论及颗粒沉降理论，深入探讨降低悬浮物浓度的方法。通过分析结果，我们制定了有效抑制疏浚尾水中悬浮物浓度的措施，减轻了清淤尾水对周边环境的负面影响，使清淤工艺更加绿色环保。

关键词：生态清淤；悬浮物；清淤尾水

引言

悬浮物（suspended solids）是指那些悬浮在水中的固体物质，涵盖不溶于水的无机物、有机物、泥砂、黏土以及微生物等。它们对尾水的危害主要体现在两个方面：首先，悬浮物是导致尾水浑浊的主要因素；其次，水体中的有机悬浮物在沉积后容易发生厌氧发酵，进而恶化水质^[1]。因此，悬浮物含量被列为衡量水污染程度的六大关键指标之一。悬浮物的度量标准通常采用浊度来表示，浊度是指水中悬浮物对光线透过造成的阻碍程度。测量浊度的方法是利用浊度计发射光线，让光线穿过水样，然后在入射光方向90°的位置检测光线被水中悬浮颗粒物散射的程度，通过计算得出水样的浊度值。

1 悬浮物扩散理论角度

历史文献研究显示，水中悬浮物的扩散主要归因于水流的扰动^[2]。具体而言，当水流产生的剪切应力达到足以启动泥沙的临界值时，泥沙便开始上浮。绞吸船的排泥管在排出尾水中的悬浮颗粒时，这些颗粒已具有一定的初始速度，并随着水流继续向前扩散。同时，尾水排放产生的水流力还会再次搅动已经沉积的泥沙等悬浮颗粒，使它们重新悬浮在水中，并随着尾水流进行浮游扩散。为了有效控制这一现象，可以采取措施增加尾水流经的路径及其阻力，从而减缓蓄沙区内尾水的流速。这样一来，尾水中悬浮颗粒的运动速度也会相应降低。当这些悬浮颗粒的流速降至泥沙颗粒的止动流速以下时，泥沙颗粒便会由运动状态转变为静止状态^[1]。

尾水的悬浮物去除主要利用颗粒物的自然沉降特性。一方面，通过增加尾水流经达到去除悬浮物及其他污染物的目的；另一方面，泥水界面距水面的距离（排泥场水容量）决定了尾水行程阻力，从而决定沉降

速度。根据陈旭清等^[3]研究成果，在清淤工程的挖泥船型号、泥浆浓度、吹泥流量不变情况下，悬浮物浓度（SS）与排泥场水容量L的关系曲线如图：

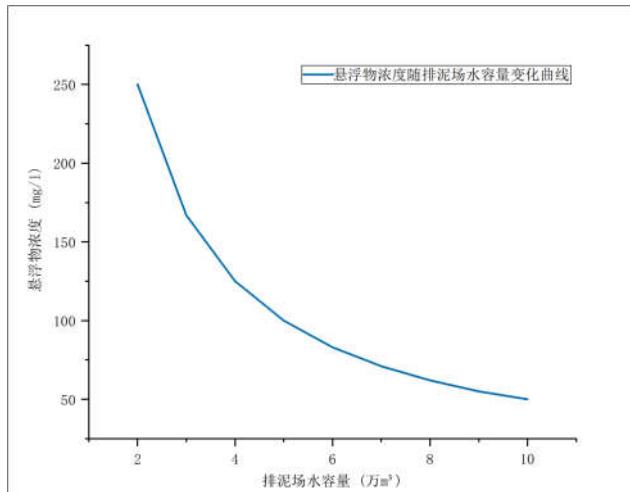


图1 悬浮物浓度与排泥场水容量关系曲线

从图中可以观察到，拐点大约出现在5万立方米（m³）的水容量处。这意味着，若排泥场需要迅速沉降颗粒物以满足悬浮物去除的要求，其最佳水容量应设定为5万m³。在实际排泥过程中，随着淤泥不断排放，泥面会逐渐上升，导致泥水界面相应缩小。这时，需要及时提升退水口的活动闸板，以增加排泥场的水面高度，确保维持一定的富余水深，从而保持所需的水容量。

综上所述，排泥场围堰的设计高程应高于最高泥面一定的富余度，这个富余度的大小取决于排泥场的面积以及拐点在曲线上的位置。提高排泥场围堰的高程，意味着可以留有更多的富余水深，这样做能够减少絮凝剂的用量和成本，同时增大水质控制的灵活性和可操作性。

2 颗粒的沉淀理论角度

在排泥场未有完全沉降的颗粒，经过退水口处加入絮凝剂变成大的絮凝颗粒进入沉淀池，絮凝颗粒粒径的理论沉降速率 ω_0 一般采用斯托克斯定律进行计算：

$$\omega_0 = 1/18 * (\rho_s - \rho) g r^2 / \mu \mu \quad (1)$$

式中： ω_0 为理论沉降速率， ρ_s 为土颗粒密度； ρ 为水密度， r 为土颗粒粒径， μ 为液体的运动黏性系数，以细颗粒絮团为主，是较为均匀的疏浚泥浆可视为牛顿体。采用“钱宁及马惠民针对牛顿体的研究公式”进行计算^[4]：

$$\mu = (1 + 2.55 s_v) / \rho_s \quad (2)$$

式中： s_v 为吹填土含沙量是泥沙所占体积与浑水体积之比。在排泥场区域存在群体沉速影响，采用以下公式计算实际土颗粒沉速 ω ：

$$\omega / \omega_0 = (1 - s_v)^m \quad (3)$$

式中： ω 为实际土颗粒沉速， ω_0 为理论沉降速率由式(1)求得， m 为待定参数，采用试验条件较为接近的科研工作者研究成果，取4.5。

用排泥场与沉淀池子围堰水位落差H与需留住的土颗粒的下沉速度 ω 之比计算出下沉时间：

$$t = H / \omega \quad (4)$$

通过沉淀池流径长度L结合，可以计算出留住该颗粒的排泥场至沉淀池泄水口临界流速 v_0 ：

$$v_0 = L / t \quad (5)$$

综上看出，在清淤工程的挖泥船型号、泥浆浓度、吹泥流量不变情况下，絮凝颗粒沉降因素只与排泥场与沉淀池子围堰水位落差H、沉淀池流径长度L、泄水口临界流速有关。

3 工程实施

3.1 工程概况

工程建设地点位于常州市武进区南部-滆湖。滆湖湖北区和湖南区断面的水质枯水期NH₃-N、TN和TP超标严重，水质污染也最为严重，丰水期水质相对较好。不同水期各断面水质类别统计分析结果表明，滆湖水质TN为IV~V类；高锰酸盐指数达到Ⅲ~I类：NH₃-N随不同水期变化较大，为Ⅱ~IV类；TP为IV~V类。综合以上各单项指标，总体上目前滆湖水质为V类。水环境问题已成为武进和湖西乃至太湖流域经济社会协调发展的瓶颈^[2]。

为了有效削减底泥内源污染、改善湖泊水体质量、确保滆湖作为备用水源地的水质安全，对滆湖实施生态清淤及修复工程显得尤为重要。本工程的核心内容是利用环保绞吸船对滆湖湖区的污染底泥进行生态清淤作业，随后通过输泥管道将清淤出的底泥输送至陆地上的排泥场。在排泥场，底泥经过沉降和絮凝处理后，尾水部分排回滆湖；而对于沉降产生的淤泥，则采用真空预压工艺进行固结处理。本工程尾水监测具体指标范围如下表所示：

表1 尾水检测相关指标

工程项目	检测项目	达标值	相关标准
排泥场余水	PH	6~9	
	COD	≤ 20mg/L	《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》
	氨氮	≤ 1mg/L	(DB32/1072-2018)表1中标准
	总磷	≤ 0.2mg/L	
	总氮	≤ 6mg/L	
	SS	≤ 30mg/L	《地表水资源质量标准(SL63-94)表1三级标准

3.2 悬浮物措施选取与施工

3.2.1 工程参数

本工程的围堰原设计参数如下：施工图规定排泥场围堰的顶部宽度需达到4米，高度不得低于6米，且坡比不得陡于1:2.5，围堰材料可选用粘土或就地挖取的土壤进行填筑。项目所在地的原始地面高程为0米，而图纸要求复垦后的高程应达到6.2米。

通过显微图像法观测，进入沉淀池的絮团粒径大约在1毫米至15毫米之间；而采用摄像分析法测量得到的絮团粒度范围则在1毫米至9毫米之间。综合以上数据，我们设定絮团粒径以1毫米至10毫米的线性增长为基准，且工程设计要求沉淀池必须能够截留粒径大于2毫米的颗粒。

在退水口处，淤泥占总体流体的体积比例为1%，土颗粒的密度为2470千克每立方米。排泥场与沉淀池之间的围堰水位落差H设定为1米。当净淤泥疏浚量为500立方米每小时时，若退水口设置为两孔，则流速为1.2米每秒；若设置为三孔，则流速降低至0.8米每秒^[3]。

3.2.2 参数计算

1) 围堰高度与稳定性计算

根据图1，本工程排泥场的富于水深至少保留0.28米。综合考虑水质、排泥场面积、沉降及富余水深，最终确定围堰断面设计按：顶宽4.0m，高度取8m，外坡为1:2.5，内坡为1:3施工。为确保安全性，运用Auto-bank软件参数建模，对围堰稳定性进行计算如图。

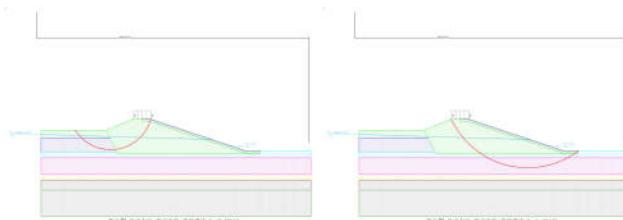


图2 围堰稳定性计算

经计算施工设计的围堰左滑稳定安全系数 $F_s = 2.84928$ ；右滑稳定安全系数 $F_s = 5.138$ ；安全性较高。

2) 沉淀池流径长度计算

将退水口相关参数代入颗粒理论沉淀公式，将计算结果列于下表。

500m³/h净淤泥疏浚量下，采用两孔退水口的沉淀池流径计算：

表2 两孔退水口流径计算

运动粘度系数 (m ² /s)	理论沉降速率 (m/s)	实际沉降速率 (m/s)	沉降时间 (s)	长度 (m)
3.66×10^{-4}	0.010356365	0.010309842	96.99	116.39

500m³/h净淤泥疏浚量下，采用三孔退水口的沉淀池流径计算：

表3 三孔退水口流径计算

运动粘度系数 (m ² /s)	理论沉降速率 (m/s)	实际沉降速率 (m/s)	沉降时间 (s)	长度 (m)
3.66×10^{-4}	0.010356365	0.010309842	96.99	77.60

可以看出，增加退水口孔数可以显著缩短沉淀池流径。拦截絮团粒径大于2mm颗粒采用两孔退水口需要116.39m流径的沉淀池，采用三孔退水口需要77.60m流径的沉淀池。考虑工程的用地及后期整平土等实际情况，本工程采取三孔退水口80m流径的沉淀池作为实施方案。

3.2.3 实施效果

本工程经过优化后，决定采用高度为8米的围堰断面设计，并配置三孔退水口以及80米流径的沉淀池进行施工。施工完成后，我们对尾水进行了每天三次的过程监测，结果显示尾水中的悬浮物浓度均稳定在15mg/L左右，这一数据符合业主及设计方对尾水悬浮物的具体要求。为了更直观地追踪尾水悬浮物的沉淀路径实际情况，我们对排泥场及沉淀池进行了航拍，所得的实际图像如下所示：



图3 排泥场悬浮物浓度变化航拍图

可以看出，尾水在经过三孔退水口进行80m沉淀池后，显著变清。实际证明，该优化方案效果明显，具有很好实际应用价值。

4 结论

为了深入探究水质悬浮物的影响因素，我们引入了悬浮物扩散理论与悬浮物沉淀理论进行分析。分析结果显示，悬浮物的主要影响因素包括围堰的高度、排泥场与沉淀池之间的围堰水位落差、沉淀池的流径长度以及泄水口的临界流速。基于这些理论分析结果，并结合某具体工程项目的尾水要求，我们制定了一系列尾水悬浮物的控制措施。这些措施有效地满足了业主、设计方以及环保部门对水质悬浮物浊度的相关要求，成功实现了环保疏浚的目标。然而，悬浮物的影响因素远不止上述提到的几种，悬浮物的聚合成因也仍在进一步的探索之中。因此，本次研究存在一定的局限性。在未来的工作中，我们将着重研究化学药剂的配比以及合适的加药泥水浓度，以期在这一领域取得更加深入的进展。

参考文献

[1] 黄彬阳.疏浚尾水悬浮物沉降理论分析及控制措施[J].珠江水运,2020,(12):29-31.DOI:10.14125/j.cnki.zjsy.2020.12.014.

[2] 陈涛静.洞庭湖区内河某锚地疏浚悬浮物扩散数值模拟[J].绿色科技,2021,23(22):123-125.DOI:10.16663/j.cnki.lskj.2021.22.032.

[3] 陈旭清,沈建国,朱伟.环保清淤中施工及退水过程污染控制技术的应用[J].江苏水利,2012(03):36-37. DOI:10.16310/j.cnki.jssl.2012.03.005.