

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.03.008

# 南水北调调节池淤泥性质及不同扰动下的沉降特征

陈 婷<sup>1</sup>, 刘宇泽<sup>1</sup>, 杨天果<sup>1</sup>, 路 桢<sup>2</sup>, 翟洪艳<sup>1</sup>

(1. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津水务集团有限公司 引江市区分公司, 天津 300122)

**摘 要:** 随着南水北调中线输水工程的运行,输水末端调节池内泥沙淤积问题逐渐显现,而很多清淤工作又必须在运行状态下开展,为此,研究了淤泥的特征,以及机械扰动、曝气扰动、加氯对淤泥沉降性能、悬浮物、有机质等的影响。结果显示,沉积淤泥的有机质含量较高(10%~13%),由附着大量藻类(以硅藻为主)的细颗粒(50~200  $\mu\text{m}$ )组成,具有较好的絮凝沉降性能。淤泥会释放大量总有机碳(TOC),机械扰动不会进一步增加TOC的释放,但曝气强度的增大会导致TOC浓度小幅度升高;机械扰动和曝气扰动对淤泥中高密度沉积层的沉降速度和体积影响不大,但会造成大量悬浮颗粒上升;加氯可降低悬浮物粒径,增加悬浮物沉降速度,但不会进一步增加TOC浓度;机械扰动、曝气扰动及加氯对淤泥中氮素浓度和赋存形态的影响都不大。因此,清淤扰动会释放大量沉降缓慢的悬浮颗粒物,对水质造成影响。清淤废水中的颗粒物仍具有很高的絮凝特征,易沉积,但是其中的大量小颗粒悬浮物是控制难点。

**关键词:** 南水北调输水工程; 悬浮颗粒; 淤泥; 供水安全; 清淤

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)03-0050-08

## Sludge Properties and Sedimentation Characteristics under Various Disturbances in Regulating Tank of the South-to-North Water Diversion Project

CHEN Ting<sup>1</sup>, LIU Yu-ze<sup>1</sup>, YANG Tian-guo<sup>1</sup>, LU Zhen<sup>2</sup>, ZHAI Hong-yan<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Yinjiang Branch, Tianjin Water Group, Tianjin 300122, China)

**Abstract:** With the operation of the middle line of the South-to-North Water Diversion Project, the issue of sludge deposition in the regulating tank at the terminus of the water transfer has become increasingly significant. However, substantial desilting efforts must be undertaken while the system remains operational. This study therefore investigated the characteristics of sludge and the impacts of mechanical disturbance, aeration disturbance, and chlorination on sludge sedimentation performance, suspended solids, and organic matters. The sludge exhibited a high organic matter content ranging from 10% to 13% and consisted of fine particles measuring between 50  $\mu\text{m}$  and 200  $\mu\text{m}$ . These particles were predominantly associated with a substantial number of algae (primarily diatoms), which contributed to its excellent flocculation and sedimentation properties. The sludge released a significant amount of total organic carbon (TOC). Mechanical disturbance did not further enhance the release of TOC; however, an

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52270009); 天津水务集团有限公司项目(2020GFW-0334)

通信作者: 翟洪艳 E-mail: zhaih@tju.edu.cn

increase in aeration intensity resulted in a slight rise in TOC. Mechanical and aeration disturbances had minimal impact on the settling velocity and volume of the high-density sediment layer within the sludge; however, these disturbances caused a significant increase in the number of suspended particles. Adding chlorine could effectively decrease the particle size of suspended solids and enhance their settling velocity without causing a further increase in TOC. Mechanical disturbance, aeration disturbance, and chlorination had minimal impact on both the nitrogen concentration and its occurrence forms in the sludge. Consequently, the desilting disturbance would result in the release of a substantial quantity of suspended particles that settle gradually, thereby impacting water quality. The particles in the desilting wastewater exhibited significant flocculation tendency, making them prone to deposition. However, a substantial number of fine suspended particles remained challenging to control.

**Key words:** South-to-North Water Diversion Project; suspended particle; sludge; water supply safety; desilting

南水北调中线一期工程自2014年运行以来,有效缓解了河南、河北、北京和天津等地的水资源短缺问题,但随着工程的进行,南水北调中线总干渠及其终端构筑物内逐渐出现了泥沙淤积的问题。淤积的泥沙主要来源于引江水中的悬浮颗粒物。引江水中的悬浮颗粒物是一个复杂的混合物,包括来自水源和流经地区的细颗粒泥沙,还包括浮游植物等有机物,例如藻类及其衍生的有机物<sup>[1-3]</sup>。有机物中藻类的贡献很大,2021年全年南水北调中线干渠的藻密度都较高,平均为 $(6.79 \pm 7.15) \times 10^6$  cells/L<sup>[1-2]</sup>,藻类以硅藻、绿藻、蓝藻为主<sup>[3]</sup>。硅藻门是生物量最高的类群,其中尖针杆藻(*Synedra acus*)的生物量要远高于其他物种,其次为绿藻门的空星藻(*Coelastrum sphaericum*)<sup>[4]</sup>。随着引江水的输送,总干渠的泥沙、藻类以及水体运输过程中外部飘入的灰尘等被运送到终端调节池(例如泵站调节池)内,导致泥沙大量淤积,而且淤积速度逐年上升,使得调节池有效库容减小,蓄水调节能力下降。沉积的淤泥可能会由于水流速度、降水量等水文气象条件的变化而释放导致再悬浮状态,引发二次水质污染问题<sup>[5]</sup>。因此泥沙淤积问题极易造成水质恶化现象,威胁供水安全(水量和水质),给相关运营管理部门造成管理和成本的压力。针对淤泥问题,运营单位不得不开展原位清淤工作,然而有关南水北调工程中类似的原位清淤引起的水质问题报道较少,为了掌握清淤工作中可能带来的水质波动,保证清淤的安全、有效实施,急需了解淤积泥沙的性质特征和扰动条件下的沉降性能。而且对于含有大量

淤泥的清淤废水,也需继续了解其中悬浮固体的沉降性能,以便开展清淤废水的处理和排放工作。

鉴于此,笔者以天津某泵站调节池的沉积淤泥为研究对象,探究机械扰动、曝气扰动以及加氯对淤泥沉降性能、悬浮物和总有机碳(TOC)释放等的影响。通过对悬浮物、淤泥的物理化学性质特征分析,研究泥沙沉积特性,以期为南水北调相关泵站或构筑物的运行管理和后续处理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点与采样方法

在泵站调节池的进水口处布设采样点,采样时间为2020年9月—10月。采用手持式水质采样器采集水样,采用抓斗式采泥器采集表层淤泥,在4℃下保存和运输。用50目筛去除淤泥中的落叶等大块杂质后进行性质测定和实验。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 机械扰动对淤泥的影响

取淤泥40 mL,倒入烧杯中稀释至400 mL,使用六联电动搅拌器搅拌,搅拌强度分别为50、150 r/min,搅拌时间为10 min,搅拌后转移至量筒,最终稀释至440 mL进行沉降,分别在0、0.5、1、2、4、8、16、24 h时记录沉降效果。沉降24 h后取上清液进行测定分析。

#### 1.2.2 曝气扰动对淤泥的影响

取淤泥40 mL,倒入烧杯中稀释至400 mL,然后转移至量筒,最终稀释至440 mL,使用气泡石曝气头分别曝气1、10 min后进行沉降,气体流量为60 mL/min,分别在0、0.5、1、2、6、12、24 h时记录沉降

效果。沉降24 h后取上清液进行测定分析。

### 1.2.3 加氯对淤泥的影响

取淤泥40 mL,倒入烧杯中稀释至440 mL,然后加入次氯酸钠溶液,投加浓度分别为0.1、1.0 mg/L(以 $\text{Cl}_2$ 计),之后立刻转移至量筒进行沉降,分别在0.2、0.5、1、2、4、8、16、24 h时记录沉降效果。沉降24 h后取上清液进行测定分析。

### 1.3 藻类分析方法

水中藻类的固定方法:采集100 mL水样,现场加入1.5 mL鲁哥试剂固定藻类,在棕色玻璃瓶中低温保存4 h内运送到实验室。水样静置48 h,采用虹吸的方法除去上清液,将样品浓缩至10 mL。

底泥中藻类的固定方法:取泥水交界处的淤泥,用50目筛去除淤泥中落叶等大块杂质后混匀,取1.0 mL混匀的底泥样品至50 mL离心管中,用离心机在2 000 r/min下离心30 min,然后用移液枪贴管壁吸取含藻清液25 mL,稀释至100 mL后加入1.5 mL鲁哥试剂固定藻类,静置48 h后采用虹吸的方法除去上清液,将样品浓缩至10 mL。

吸取浓缩后的样品滴入0.1 mL的浮游生物计数框内,在Olympus BX51显微镜下以全片计数法进行浮游藻类的定量计数。每个样品平行计数2次,取平均值,每次计数结果与平均值之差应在 $\pm 15\%$ 内,否则应增测一次,直至计数结果均符合要求。参照《中国淡水生物图谱》<sup>[6]</sup>和《中国淡水藻类——系统、分类及生态》<sup>[7]</sup>鉴定藻种类。

### 1.4 检测项目及方法

悬浮固体(SS)、高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )、总氮(TN)、氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )、硝酸盐氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )和总磷(TP)分别采用重量法、酸性高锰酸钾法、碱性过硫酸钾消解-分光光度法、纳氏试剂分光光度法、紫外分光光度法和钼锑抗分光光度法测定。滤后水样的总有机碳(TOC)含量采用INNOVOX ES总有机碳分析仪测定(误差在10%以内)。有机质含量(VS/TS)采用烧失量法测定<sup>[8]</sup>。另外,采用Winner 2000湿法激光粒度分析仪对沉降淤泥进行粒径分析,采用超高分辨场发射扫描电镜观察淤泥颗粒形态。

## 2 结果与讨论

### 2.1 调节池内水、淤泥和悬浮物性质特征

调节池进水水质良好,TOC为3.0~3.7 mg/L、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为1.9~3.5 mg/L、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 为0.59~0.66 mg/L、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为0.16~0.25 mg/L。调节池内淤积了大量泥沙,表层淤泥含水率为82%~84%,pH约为7,湿泥密度为 $(1.14\pm 0.2)$  g/mL。调节池进水口处淤泥有机质含量为10%~13%,有机质含量较高。淤泥中TN含量为 $(3\,924\pm 165)$  mg/kg,TP为 $(355.7\pm 71.5)$  mg/kg。

进水中悬浮固体的粒径集中分布在50~200  $\mu\text{m}$ 之间,中值粒径为70  $\mu\text{m}$ 。调节池进水口附近的淤泥颗粒粒径集中分布在116~169  $\mu\text{m}$ ,中值粒径为129  $\mu\text{m}$ ,约有32%的淤泥颗粒粒径 $<62$   $\mu\text{m}$ 。淤泥颗粒的扫描电镜图像显示,淤泥颗粒被大量藻类附着。水中及淤泥中的藻种类分布如图1所示。

水中及淤泥中的藻种类分布如图1所示。

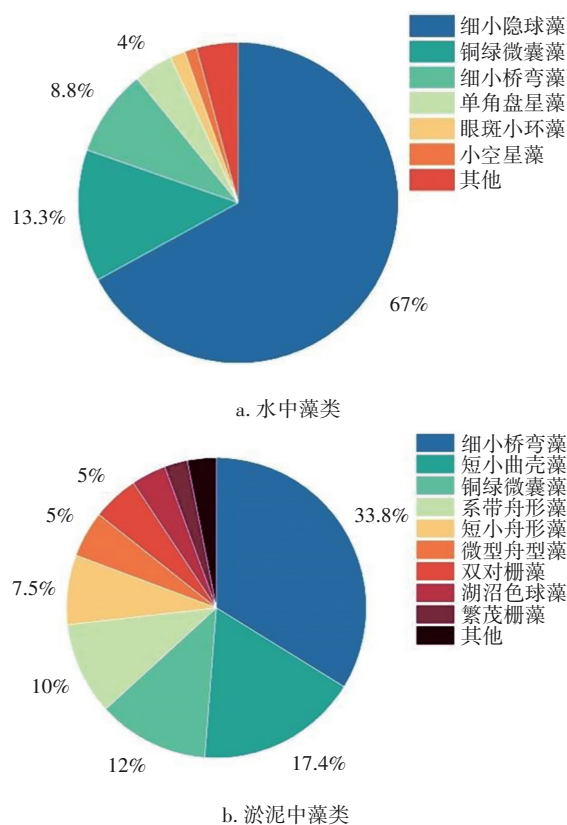


图1 水和淤泥中藻类分布

Fig.1 Distribution of algal species in water and sludge

水中藻细胞密度为 $2.10\times 10^6$  cells/L,共检测出3门14属20种,其中蓝藻的相对丰度最高,为80.3%。水中的优势藻种包括细小隐球藻(*Aphanocapsa delicatissima*)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)和细小桥弯藻(*Cymbella parva*)。淤泥中藻细胞密度为 $6.42\times 10^5$  cells/L,共检测出3门12属17种,其中硅藻最多,共8种,相对丰度为75.5%。淤泥中的优势藻种包括细小桥弯藻(*Cymbella parva*)、短小曲壳藻



藻(*Achnanthes exigua*)和铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)。淤泥中的藻类丰富度及数量低于相应的上覆水。

由以上分析可知,调节池内的淤泥颗粒是包裹大量藻类的细颗粒泥沙。根据文献,当颗粒粒径 $< 62\ \mu\text{m}$ 时,颗粒可定义为细颗粒<sup>[9]</sup>。细颗粒泥沙因其粒径较小,具有胶体微粒特有的絮凝现象,一旦发生絮凝后,其原有的重力作用将失去主导作用,胶体间的絮凝作用将使其基本特性与单颗粒相比发生质的变化,黏性细颗粒泥沙絮团相对于单个颗粒而言,絮团个体尺度增大,相对密度变小,在一定的含沙量范围内沉降速度提高<sup>[10-11]</sup>。天然水体中发生细颗粒吸附和絮凝的现象比较普遍,长江河口泥沙就是典型的黏性细颗粒泥沙<sup>[11]</sup>。进水为引江水的调节池沉积淤泥应该是由黏性细颗粒泥沙絮凝沉积形成,沉积物沉淀速度快,呈非牛顿流体状态,具有弹性,难以破坏。因此清淤过程需要通过剧烈的机械搅拌或水气扰动先将沉积淤泥破坏,同时将泥水吸出。采集的淤泥样品在实验室自然沉降后再进行实验,每次实验将 40 mL 淤泥倒入烧杯中稀释至 440 mL 后,都会释放出大量有机碳,但每组实验的释放情况有波动,TOC 平均浓度为 $(56.15 \pm 11.44)\ \text{mg/L}$ 。吸出的泥水中大量颗粒物容易重新蓄积沉淀,同时产生含有大量悬浮物的清淤废水,清淤废水长时间静置(超过 24 h)后仍可见成层的淤泥。由于细颗粒沉积层的特征,清淤扰动的区域目测仅在清淤钻头附近,该区域相对调节池而言面积较小,同时由于进水中悬浮物浓度波动较大,因此很难判断清淤期间出水中悬浮物浓度波动是否由清淤造成。

调节池在 2020 年 4 月—10 月运行期间有不定期的清淤操作,这期间出水 TN 为 $(2.2 \pm 1.2)\ \text{mg/L}$ 、TP 为 $(0.03 \pm 0.03)\ \text{mg/L}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 为 $(2.4 \pm 0.7)\ \text{mg/L}$ ,TP 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度符合国家地表水 II 类水质标准,但 TN 浓度高于国家地表水 III 类水质标准限值,TN 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度波动相对较大。因此,针对调节池可能采用的清淤技术对淤泥的扰动,研究了淤泥中氮元素和有机物释放对上覆水水质的影响。

## 2.2 机械扰动对淤泥的影响

机械搅动是一种清淤方法,即通过大力搅动来破坏沉积淤泥层。由于当地调节池需要全年运行,清淤工作只能在调节池运行状态下进行,因此有必

要了解机械扰动对水质的影响。经不同强度机械搅动后,淤泥沉降过程中各层体积变化如图 2 所示。

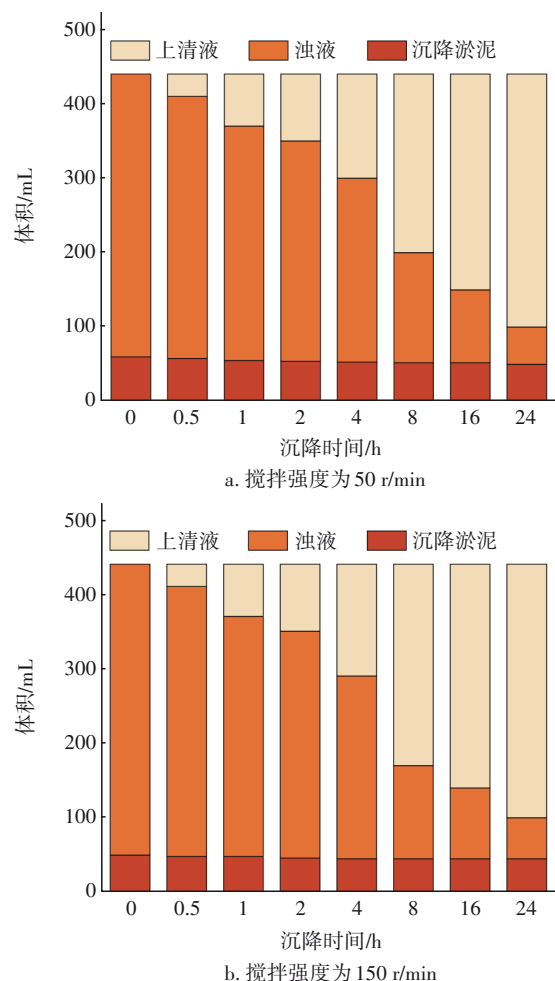


图2 不同强度机械扰动后淤泥沉降过程中各层体积变化  
Fig.2 Change in each layer volume during sludge settling after mechanical disturbance with different intensities

在强度为 50 和 150 r/min 的搅拌扰动下,源自进水口的淤泥的沉积层(高密度沉积层)快速形成,分别为 60、50 mL,该高密度沉积层的体积随沉降时间变化不大,说明淤泥主体絮体具有非常快的沉降性能,其进一步压缩的空间不大。搅动初期,沉积层之上出现浊液层,表明有大量悬浮固体释放,之后悬浮固体随时间缓慢下沉,上层出现清液层。150 r/min 扰动过的溶液中浊液层下降速度略快于 50 r/min 扰动过的溶液。在强度为 50 和 150 r/min 的搅拌扰动下,浊液层沉降 4 h(接近调节池内最大水力停留时间)后分别比初始下降了 35% 和 37%,沉降 24 h 后,50 和 150 r/min 扰动过的溶液中浊液层仍分别剩余 50 和 55 mL,上清液体积占比均为 77.3%,上

清液中的SS浓度分别为916.3和550.0 mg/L。对两种搅拌强度下前2 h的浊液层体积变化进行一级动力学拟合,下降的速率常数分别为 $42.1 \text{ h}^{-1}$  ( $R^2=0.92$ )和 $43.3 \text{ h}^{-1}$  ( $R^2=0.91$ )。经50和150 r/min扰动后浊液层的TOC浓度分别为64.59和58.45 mg/L,说明机械扰动强度对TOC浓度影响不大。

沉降2、8、20 h后,测定机械强度为150 r/min时淤泥中TN、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 的含量,结果如图3所示。可知,淤泥的TN含量为32.3~33.1 mg/L,其中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为6.2~8.7 mg/L, $\text{NO}_3^--\text{N}$ 和 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 含量低于检出限,有机氮含量约占总氮的73.7%~90.0%。机械扰动对淤泥中氮素浓度和赋存形态的影响不大。

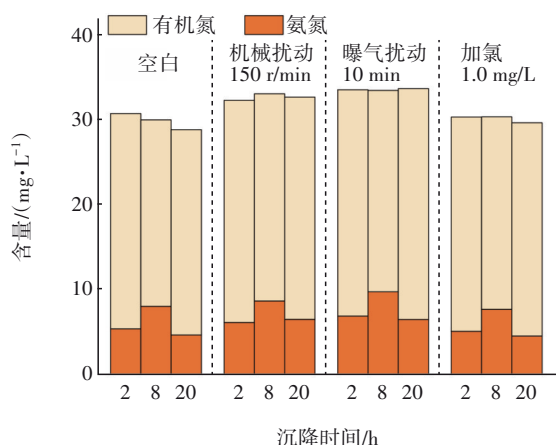


图3 不同扰动条件下氮素含量的变化

Fig.3 Change in nitrogen content under different disturbances

取浊液与沉降淤泥交界处的淤泥进行粒径分析,结果见表1。

表1 扰动条件对淤泥粒径的影响

Tab.1 Effect of disturbance conditions on particle sizes of sludge

扰动条件	光学浓度	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	$D_{98}/\mu\text{m}$	<10 $\mu\text{m}$ 的比例/%
搅拌 50 r/min	4.9	4.0	25.0	65.1	88.7	25
搅拌 150 r/min	9.9	3.1	6.2	16.0	22.5	71
曝气 1 min	9.1	3.1	16.2	43.8	54.7	43
曝气 10 min	3.3	2.0	5.2	20.5	28.1	67
加氯 0.1 mg/L	6.0	2.7	4.4	7.2	10.7	97
加氯 1.0 mg/L	6.0	2.3	4.5	7.5	10.8	97

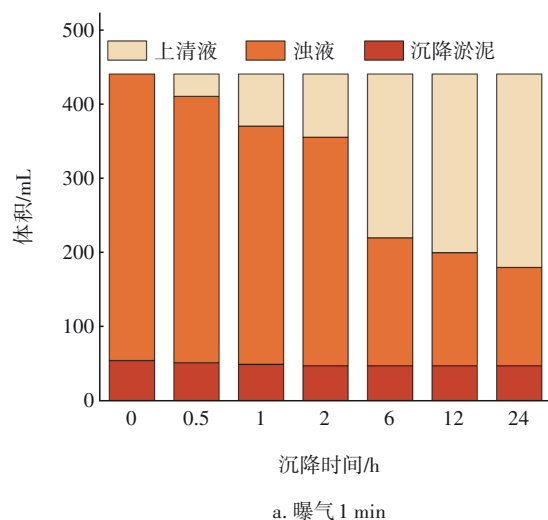
由表1可知,经50 r/min机械扰动后,淤泥的中值粒径为25.0  $\mu\text{m}$ ,粒径<10  $\mu\text{m}$ 的颗粒占比为25%;经150 r/min机械扰动后,淤泥的中值粒径为

6.2  $\mu\text{m}$ ,粒径<10  $\mu\text{m}$ 的颗粒占比为71%。可见,搅拌强度的增大使淤泥中悬浮物粒径有一定程度的减小,这可能会导致淤泥中细小颗粒的上浮。

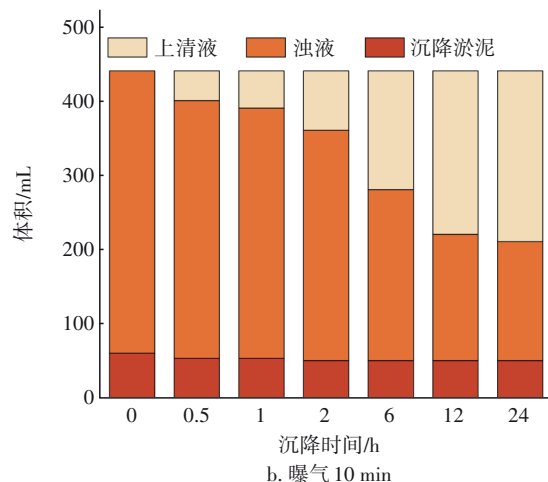
综上可知,淤泥的高密度沉积层沉降速度很快,机械扰动对高密度沉积层体积影响较小,但是会释放大量沉降缓慢、有机物含量高的微小悬浮物,搅拌强度对淤泥释放有机碳的影响不大。

## 2.3 曝气扰动对淤泥的影响

清淤工作中为了搅动起压实沉积的淤泥,可能会采用高压水气搅动的方法,因此研究了曝气扰动对淤泥的影响,结果如图4所示。



a. 曝气 1 min



b. 曝气 10 min

图4 不同强度曝气扰动后淤泥沉降过程中各层体积变化  
Fig.4 Change in each layer volume during sludge settling after aeration disturbance with different intensities

经1和10 min曝气扰动后,高密度沉积层快速形成,体积分别为55、60 mL,该体积随时间变化不大,在2 h后分别降至48、50 mL,随后不再发生变化,说明淤泥主体絮体的沉降性能很好。1 min曝气

扰动后形成的浊液层厚度比 10 min 曝气扰动的略小,沉降速度略高。例如,沉降 2 h 时,1 和 10 min 曝气扰动后的浊液层厚度分别为 307 和 310 mL,沉降 24 h 时分别为 132 和 160 mL。可见曝气时间的增加对悬浮物沉降略有不利影响。对两个曝气强度下前 2 h 的浊液层体积变化进行一级动力学拟合,下降的速率常数分别为  $39.2 \text{ h}^{-1}$  ( $R^2=0.88$ ) 和  $32.8 \text{ h}^{-1}$  ( $R^2=0.94$ ),下降速度比机械扰动条件下要慢。经 1 和 10 min 曝气扰动后上清液的 SS 浓度分别为 660.0 和 440.0 mg/L,浊液层的 TOC 浓度分别为 59.20 和 73.20 mg/L。曝气打散了原本的大颗粒物质,使泥沙更不易沉降,导致 TOC 浓度增加。曝气 10 min 后,淤泥中  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 含量低于检出限, TN 为 33.5 ~ 33.7 mg/L,  $\text{NH}_4^+$ -N 为 6.5 ~ 9.8 mg/L,有机氮约占总氮的 70.9% ~ 81.0% (见图 3),可见曝气扰动对淤泥中氮素浓度和赋存形态的影响不大。

对浊液与沉降淤泥交界处的淤泥粒径进行分析发现,经 1 min 曝气扰动过的淤泥中值粒径为  $16.2 \mu\text{m}$ ,粒径  $<10 \mu\text{m}$  的颗粒占比为 43%;经 10 min 曝气扰动过的淤泥中值粒径为  $5.2 \mu\text{m}$ ,粒径  $<10 \mu\text{m}$  的颗粒占比为 67% (见表 1)。可见,曝气扰动使淤泥中悬浮物粒径有一定程度的减小,这可能会导致淤泥中细小颗粒的上浮,从而对悬浮物的沉降产生不良影响。因此,曝气扰动对高密度沉积层体积影响较小,但是会造成大量沉降缓慢、有机物含量高的微小悬浮物释放,导致 TOC 浓度增加。

机械扰动和曝气扰动均会造成大量沉降缓慢的悬浮颗粒物的释放。相比机械扰动,曝气扰动对浊液层体积的影响较小,对浊液层 TOC 浓度的影响较大。这些引江水中的颗粒物和沉积物形态与天然及人工湖库差异较大,机械扰动和曝气扰动的影响范围还有待考察。有文献模拟了原位生态清淤施工过程(绞吸式挖泥船)对巢湖水质的影响,生态清淤施工中悬浮物扩散影响范围可达到周边约 660 m<sup>[12]</sup>。但是也有研究表明,在有效淤泥原位遮盖和快速抽吸的条件下,清淤施工(深水绞吸式挖泥船)仅造成距离挖泥船绞刀头 20 m 范围内的水中 TN、TP、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的提高,而且污染物升高持续时间较短,对水库取水口水质基本无影响<sup>[13]</sup>。可见,选择环保高效的清淤技术设备对缩小清淤的影响范围非常重要。

## 2.4 加氯对淤泥的影响

加氯处理是调节池在夏季高藻期、高用水量时临时采取的防止藻类进入后续水厂的措施,其对淤泥的影响如图 5 所示。

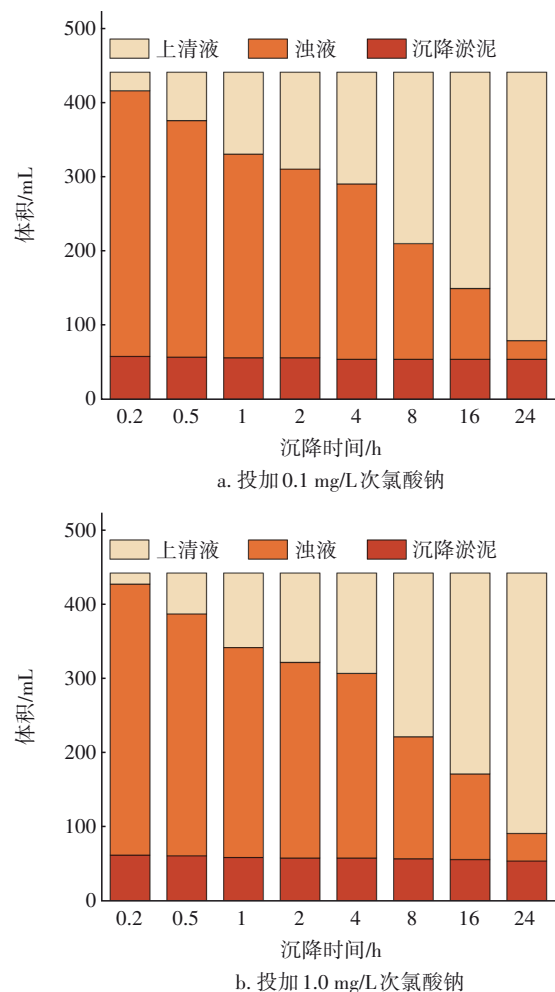


图5 投加不同浓度氯后淤泥沉降过程中各层体积变化  
Fig.5 Change in each layer volume during sludge settling after adding different concentrations of chlorine

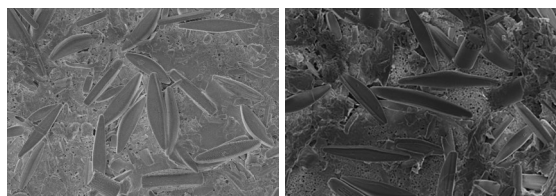
投加 0.1 和 1.0 mg/L 次氯酸钠后,高密度沉积层快速形成,体积分别为 59、61 mL,该体积随时间变化不大,24 h 后分别降至 55、53 mL。对两种氯浓度下前 2 h 的浊液层体积变化进行一级动力学拟合,下降的速率常数分别为  $51.0 \text{ h}^{-1}$  ( $R^2=0.90$ ) 和  $49.9 \text{ h}^{-1}$  ( $R^2=0.89$ ),浊液层下降速度较快,比机械和曝气扰动分别快 18%、40%。当投加 0.1 mg/L 次氯酸钠时,上清液的 SS 浓度为 660.0 mg/L;当次氯酸钠投加量增至 1.0 mg/L 时,上清液的 SS 浓度增大 44.4%。投加 0.1 和 1.0 mg/L 次氯酸钠后,上清液的 TOC 浓度分别为 49.27 和 56.11 mg/L。投加 1.0



mg/L次氯酸钠后,淤泥中的TN为29.7~30.4 mg/L,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 为4.6~7.7 mg/L,  $\text{NO}_3^--\text{N}$ 和 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 低于检出限,有机氮约占总氮的74.6%~84.7%(见图3),可见加氯对淤泥中氮素浓度和赋存形态的影响不大。

对浊液与沉降淤泥交界处的淤泥粒径进行分析发现,投加0.1 mg/L次氯酸钠时,淤泥的中值粒径为4.4  $\mu\text{m}$ ,粒径<10  $\mu\text{m}$ 的颗粒占比为97%;投加1.0 mg/L次氯酸钠时,淤泥的中值粒径为4.5  $\mu\text{m}$ ,粒径<10  $\mu\text{m}$ 的颗粒占比也为97%(见表1),可知加氯量对淤泥中悬浮物粒径几乎无影响。综上,加氯对高密度沉积层的体积影响很小,较大加氯量会使SS浓度升高,但是对淤泥释放有机质影响不大。

对氯投加量为0和1.0 mg/L的淤泥进行扫描电镜分析,结果见图6。从图6(a)可以清晰地看到,淤泥颗粒上附着有大量的藻类,硅藻的藻丝体和胶质管会对沉积颗粒进行黏结<sup>[14]</sup>,因此大量硅藻容易附着在泥沙颗粒上。图6(b)显示,加氯后,淤泥中藻类的分布密度略有降低,但是仍然有大量的藻类附着,说明加氯仅造成了部分藻类的解脱附。



a. 氯投加量=0 mg/L

b. 氯投加量=1.0 mg/L

图6 氯投加量为0和1.0 mg/L时淤泥的扫描电镜图像

Fig.6 SEM pictures of sludge under chlorine dosages of 0 mg/L and 1.0 mg/L

### 3 结论

① 淤积在调节池内的大量泥沙,有机质含量高,颗粒粒径较小,并被大量的藻类附着,絮凝沉降性能较好。

② 机械扰动和曝气扰动对高密度沉积层的沉降速度和体积影响不大,但是会引起大量悬浮颗粒上升,悬浮颗粒沉降速度较慢,悬浮的浊液层中颗粒有机碳浓度较高;淤泥会释放大量TOC,机械扰动不会进一步增加TOC的释放,但曝气强度的增大会导致TOC浓度小幅度升高;投加次氯酸钠可以使淤泥中悬浮物粒径有一定程度的减小,提高悬浮颗粒物的沉降速度,投加1.0 mg/L次氯酸钠后24 h

内沉降速度为13.6 mL/h;机械扰动、曝气扰动及加氯对淤泥中氮素浓度和赋存形态的影响都不大。

③ 具有扰动的清淤过程会引起大量沉降缓慢的悬浮颗粒物的释放,这些悬浮物容易进入下游水厂,增大水厂处理负荷。清淤得到的淤泥废水整体上具有很高的絮凝特征,其主体颗粒物容易沉积,大量小颗粒悬浮物是清淤废水处理的重点。

### 参考文献:

- [1] ZHANG L, YIN W, WANG C, *et al.* Untangling microbiota diversity and assembly patterns in the world's largest water diversion canal [J]. *Water Research*, 2021, 204: 117617.
- [2] 张春梅, 朱宇轩, 宋高飞, 等. 南水北调中线干渠浮游植物群落时空格局及其决定因子[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(3): 675-686.  
ZHANG Chunmei, ZHU Yuxuan, SONG Gaofei, *et al.* Spatiotemporal pattern of phytoplankton community structure and its determining factors in the channel of the middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(3): 675-686 (in Chinese).
- [3] 张春梅, 米武娟, 许元钊, 等. 南水北调中线总干渠浮游植物群落特征及水环境评价[J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(3): 47-54.  
ZHANG Chunmei, MI Wujuan, XU Yuanzhao, *et al.* Phytoplankton community characteristics and water environment assessment in the main channel of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project [J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(3): 47-54 (in Chinese).
- [4] 任海平, 段春建, 张铁财, 等. 南水北调中线总干渠悬浮物时空分布及其与浮游植物的关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(11): 2473-2480.  
REN Haiping, DUAN Chunjian, ZHANG Tiecai, *et al.* Spatial distribution and variation of suspended solids in the main channel of the middle route of the South-to-North Water Diversion Project and relationships with phytoplankton community [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(11): 2473-2480 (in Chinese).
- [5] YANG Y L, ZHANG D W, QUAN J, *et al.* Water quality assessment of middle route of South-North Water Diversion Project based on modified Nemerow index method [J]. *Water Supply*, 2021, 21(3): 1005-1015.

- [6] 韩茂森,束蕴芳. 中国淡水生物图谱 [M]. 北京:海洋出版社, 1995.  
HAN Maosen, SHU Yunfang. Atlas of Fresh Water Biota in China [M]. Beijing: China Ocean Press, 1995 (in Chinese).
- [7] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态 [M]. 北京:科学出版社, 2006.  
HU Hongjun, WEI Yinxin. The Freshwater Algae of China: Systematics, Taxonomy and Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2006 (in Chinese).
- [8] 陈森,陈颖,赵九强,等. 土壤烧失量与有机质含量的关系研究 [J]. 四川环境, 2021, 40(5): 17-21.  
CHEN Sen, CHEN Ying, ZHAO Jiuqiang, *et al.* Study on the relationship between soil loss on ignition and organic matter content [J]. Sichuan Environment, 2021, 40(5): 17-21 (in Chinese).
- [9] 陈曦. 长江口细颗粒泥沙静水沉降试验研究 [D]. 青岛:中国海洋大学, 2013.  
CHEN Xi. Experimental Study on Deposition in Static Water of Fine Sediment of Yangtze River Estuary [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese).
- [10] 金鹰,王义刚,李宇. 长江口粘性细颗粒泥沙絮凝试验研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(3): 61-63.  
JIN Ying, WANG Yigang, LI Yu. Experimental study on flocculation of cohesive fine grain sediment at Yangtze River estuary [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2002, 30(3): 61-63 (in Chinese).
- [11] 杨铁笙,熊祥忠,詹秀玲,等. 粘性细颗粒泥沙絮凝研究概述 [J]. 水利水运工程学报, 2003(2): 65-77.  
YANG Tiesheng, XIONG Xiangzhong, ZHAN Xiuling, *et al.* On flocculation of cohesive fine sediment [J]. Hydro-Science and Engineering, 2003(2): 65-77 (in Chinese).
- [12] 景有志,徐磊,张岩. 生态清淤施工过程中对巢湖水质影响的模拟 [J]. 环境影响评价, 2021, 43(2): 92-96.  
JING Youzhi, XU Lei, ZHANG Yan. Simulation of the effect of ecological desilting on water quality in Chaohu Lake [J]. Environmental Impact Assessment, 2021, 43(2): 92-96 (in Chinese).
- [13] 汤德意,沈杰. 生态清淤及淤泥处置技术在水库整治中的应用 [J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3): 70-75.  
TANG Deyi, SHEN Jie. Application of ecological dredging and silt disposal technique in reservoir dredging engineering [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(3): 70-75 (in Chinese).
- [14] 李永新,田友萍,李银. 四川黄龙钙华藻类及其生物岩溶作用 [J]. 中国岩溶, 2011, 30(1): 86-92.  
LI Yongxin, TIAN Youping, LI Yin. Tufa algae and biological karstification at Huanglong, Sichuan [J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(1): 86-92 (in Chinese).

作者简介:陈婷(2000- ),女,辽宁朝阳人,硕士研究生,主要研究方向为水处理技术。

E-mail: chenting8028@163.com

收稿日期:2023-08-31

修回日期:2024-01-19

(编辑:刘贵春)

加强生态保护和修复,  
提升生态系统多样性、稳定性、持续性