

# 精准加药系统 在土工管袋固化清淤泥浆工程中的应用

丛海兵<sup>1</sup>, 汪 清<sup>1</sup>, 夏再龙<sup>2</sup>

(1. 扬州大学 环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 浙江维美环保工程科技有限公司, 浙江 宁波 315400)

**摘要:**为提高土工管袋固化清淤泥浆工艺的可靠性,开发了泥浆固化精准加药系统,并应用于江苏省G湖清淤工程。结果表明,泥浆浓度为10%~15%时,最佳的PAC/干泥量之比为0.2%,PAM/干泥量之比为0.6‰。精准加药系统实时检测泥浆流量和浓度,计算出所需的加药量,指令加药计量泵准确投加所需的加药量,实际的加药量与计算加药量的误差在±5%左右。出水浑浊度、总氮、总磷、氨氮、高锰酸盐指数平均值分别为26.8 NTU、6.29 mg/L、0.19 mg/L、1.02 mg/L、5.04 mg/L;土工管袋内固化泥浆含水率迅速下降到70%,2周后下降到60%,5周后下降到50%。

**关键词:**精准加药; 混凝剂; 清淤泥浆; 土工管袋

**中图分类号:**X703.3 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2024)07-0001-0005

## Application of precision dosing system in geotextile bag solidification and dredging mud engineering

CONG Haibing<sup>1</sup>, WANG Qing<sup>1</sup>, XIA Zailong<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou university, Yangzhou 225127, China;  
2. Zhejiang Weimei Environmental Engineering Technology Co., Ltd., Ningbo 315400, China)

**Abstract:** In order to improve the reliability of the solidification and dredging mud technology for geotextile bags, a precise dosing system has been developed for mud solidification and applied to the G Lake dredging project in Jiangsu Province. The results showed that when the mud concentration was between 10% and 15%, the optimal PAC/dry mud ratio was 0.2%, and the PAM/dry mud ratio was 0.6‰. The precise dosing system detects the mud flow rate and concentration in real-time, calculates the required dosage, and instructs the dosing metering pump to accurately add the required dosage. The error between the actual dosage and the calculated dosage is about ±5%. The average values of effluent turbidity, total nitrogen, total phosphorus, ammonia nitrogen, and permanganate index are 26.8 NTU, 6.29 mg/L, 0.19 mg/L, 1.02 mg/L and 5.04 mg/L, respectively; The moisture content of the solidified mud inside the geotextile bag rapidly decreased to 70%, decreased to 60% after two weeks, and decreased to 50% after five weeks.

**Key words:** precision dosing; coagulant; dredging mud; geotextile bag

湖泊底泥污染是上覆水体重要的污染来源<sup>[1]</sup>,  
随着水体污染治理的深入,在巩固外源污染治理的

同时,底泥内源污染治理逐步提上议事日程<sup>[2-3]</sup>。目  
前底泥内源污染治理采用的主要方法是清淤,将污

收稿日期: 2023-12-01

基金项目: 江苏水利科技项目(2020033)

作者简介: 丛海兵(1968—),男,教授,博士,研究方向为水环境治理技术。E-mail: chb9903@126.com

染底泥移出水体<sup>[4-5]</sup>。水下绞吸船清淤法是目前大型水体清淤的主要方法,通过水下绞刀将底泥搅拌成泥浆,再利用泥浆泵抽吸、管道输送至岸边的淤泥堆场,然后进行泥浆固化。该方法采用泵吸或真空抽吸法吸取泥浆,避免了污染淤泥和空隙水的扩散,减轻了清淤对水体的污染,而泥浆流态化输送,易实施,工作效率高<sup>[6-8]</sup>。绞吸船清淤的泥浆含固率5%~25%,呈流态,需要在堆场进行固化减量,采用的方法有自然晾干法、板框压滤法、土工管袋固化法等<sup>[9]</sup>。自然晾干法依靠水的自然蒸发和下渗提高泥浆的含固率,成本低,但耗时长、占地面积大。板框压滤法是借用了工业泥浆的固化技术,首先向泥浆中加入混凝剂,使细颗粒凝聚成絮状大颗粒,再注入压滤布袋中,利用高压将水压出。板框压滤法固化速度快,固化泥含固率高,但能耗大、效率低、成本高,不适合大型湖泊清淤<sup>[10-11]</sup>。土工管袋固化法将泥浆输送入土工管袋中,在输送管道中加入混凝剂,投加了混凝剂的泥浆被絮凝成大颗粒沉淀在管袋中,清水依靠重力和较低的压力渗出管袋,使泥浆得到固化<sup>[12-13]</sup>。土工管袋固化泥浆技术以其固化速度快、效率高、成本低、占地面积小等优点越来越受到行业的重视,但土工管袋固化泥浆技术存在一定的不足,即管道中泥浆流量和浓度随时变化,波动范围大,导致所需的药剂流量也会随之变化,若采用传统的人工加药法,会导致加药量不足而达不到絮凝效果或加药量过大而浪费药剂<sup>[14-15]</sup>。因此,本文拟开发精准投药自动加药系统,对泥浆流量和浓度进行实时动态监测,准确加入所需的混凝剂,保障处理效果,实现土工管袋固化泥浆技术系统的稳定运行,为清淤底泥的高效快速固化提供理

论依据和技术支撑。

## 1 工艺流程及方法

### 1.1 工艺流程

绞吸船抽吸湖泊淤泥-土工管袋固化泥浆的清淤流程图如图1所示,由淤泥绞吸、泥浆输送、土工管袋固化及堆场、加药系统组成。绞吸式清淤船利用绞刀将底泥搅动成流动状态的泥浆,用泵抽吸送入输泥管道中,输泥管道由浮子支撑浮于水面,输泥管道将泥浆送入堆场的土工管袋中。加药系统包括泥浆浓度计和流量计、聚合氯化铝(PAC)配药设备、聚丙烯(PAM)配药设备、PAC和PAM加药计量泵、加药自动控制柜。加药自动控制系统采集泥浆流量和浓度,计算出需要投加的PAC和PAM的药剂量,指令加药计量泵向输泥管道内加入所需的药剂量。泥浆与药剂在管道中充分混合,泥浆颗粒在药剂作用下凝聚成大颗粒而沉淀,实现土水分离,清水在重力和较小的压力作用下渗出管袋外,泥浆颗粒存留在管袋中,完成泥浆固化。

### 1.2 精准加药方法

安装于输泥管道上的浓度计和流量计检测到实时的泥浆流量和浓度,输入到自控系统中,自控系统计算出需要投加的PAC和PAM药剂流量,计算公式如下:

$$Q_{\text{药}} = \frac{Q_{\text{泥}} \times C_{\text{泥}} \times K}{C_{\text{药}}} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{药}}$ 为药剂流量, $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $Q_{\text{泥}}$ 为泥浆流量, $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $C_{\text{药}}$ 为药剂浓度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_{\text{泥}}$ 为泥浆浓度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $K$ 为药剂与干泥量之比, $K$ 值通过实验确定。

加药自控系统指令加药计量泵按照计算出的 $Q_{\text{药}}$

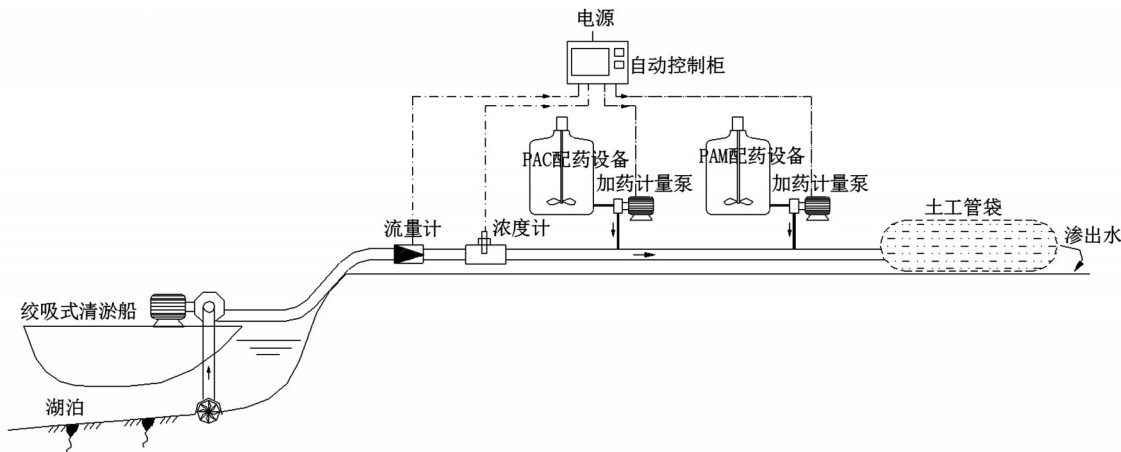


图1 精准加药土工管袋固化湖泊清淤泥浆工艺流程

准确输出相应的流量。

### 1.3 材料与方法

#### 1.3.1 材料

##### (1)药剂

药剂包括混凝剂和助凝剂。混凝剂为聚合氯化铝(PAC),采用市售的PAC干粉加自来水稀释成浓度为5%的溶液备用。助凝剂为聚丙烯酰胺(PAM),采用的是阴离子926型,分子量1 900万,水解度18%~25%,加水配置成浓度为1‰的溶液备用。

##### (2)泥样

泥样为江苏省G湖的绞吸式清淤船抽吸的泥浆,实验时将泥浆放入100 L的收纳箱,清理掉泥浆中的树枝、石头等杂质,用烘干法测定泥浆浓度。每次实验前,充分混匀箱体中的泥浆,取出倒入烧杯中,加水稀释配制成浓度为10%~15%的泥浆待用。

##### (3)土工管袋

采用的土工管袋为PP材质,单位面积质量250 g/m<sup>2</sup>,断裂强度大于52 kN/m,等效孔径0.3~0.6 mm,渗透性大于25 L/m<sup>2</sup>/s。

#### 1.3.2 应用方法

精准加药系统应用于江苏省G湖清淤工程中,湖泊清淤总面积约5.8 km<sup>2</sup>,清淤量共计约200万m<sup>3</sup>。底泥有机质、全氮、总磷含量分别介于67.11~123.06 g/kg、1.7~3.02 g/kg、0.12~0.4 g/kg之间。根据我国第二次土壤普查分类表,该底泥属于富含有机质土,全氮达到一级土壤级别,总磷达到五级土壤级别。底泥pH值在7.11~7.42之间,属于中性土壤。底泥粒径主要介于2.5~32 μm之间,中位粒径15.03 μm。

精准加药系统应用于土工袋固化泥浆工程时,首先进行最佳投药量实验,确定PAC和PAM投加量,再将相关参数输入自控系统,进行精准加药系统工程运行,监测处理效果。

##### (1)PAC最佳投加量实验

将配制好的泥浆分别装入7个1L烧杯中,放置于搅拌机上,以150 r/min的速度搅拌10 s后分别向7个杯中加入不同量的PAC,使杯中PAC与干泥量之比分别为0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%,继续搅拌20 s后,再向各杯中加入相同量的PAM,PAM与干泥量之比为0.2‰,搅拌20 s。改变转速为60 r/min搅拌1 min。取出烧杯,静置沉淀10 min,用移液枪从水面下3 cm吸取上清液测定浑浊度。

##### (2)PAM最佳投加量实验

将配制好的泥浆分别装入若干个1L烧杯里,放置于搅拌机上,以150 r/min的速度搅拌10 s后向每个烧杯里加入相同量PAC,使杯中PAC/干泥量之比为0.2%,继续搅拌20 s后再向各个杯中加入不同量的PAM,使杯中PAM/干泥量之比分别为0.1‰、0.2‰、0.3‰、……、1.1‰,继续搅拌20 s。改变转速为60 r/min搅拌1 min。取出烧杯,静置沉淀10 min,用移液枪从水面下3 cm吸取上清液测定浑浊度。剩余泥浆使用全玻抽滤装置测定污泥比阻。

##### (3)精准加药土工管袋固化清淤泥浆工程应用

精准加药土工管袋固化清淤泥浆工艺规模为600 m<sup>3</sup>/h左右,泥浆浓度10%~15%,根据泥浆的实时流量与浓度,以及药剂与干泥量的比值K,利用(1)式计算出PAC和PAM的投加流量,由计量泵实现准确投加。工程自2023年5月至10月运行。每天取土工管袋滤出水500 mL,测定浑浊度、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)。用不锈钢双管分层取样器取土工管袋内固化底泥,将取样器上、中、下3层的泥样取出混合后,测定其含水率,每周取样测定一次。

#### 1.4 测试分析方法

水质的TN、TP、COD<sub>Mn</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N指标采用哈希公司的DRB200多参数测定仪消解器和DR900多参数测定仪及配套的试剂测定。浑浊度采用哈希公司的2100Q型便捷式浊度仪测定。

污泥比阻采用全玻抽滤装置测定。泥浆含固率用烘干法测定。

## 2 应用结果与分析

### 2.1 药剂最佳投加量

#### 2.1.1 PAC最佳投药量

泥浆含固率为10%,PAM与干泥量之比为0.2‰时,不同PAC投加量下上清液浑浊度如图2所示。

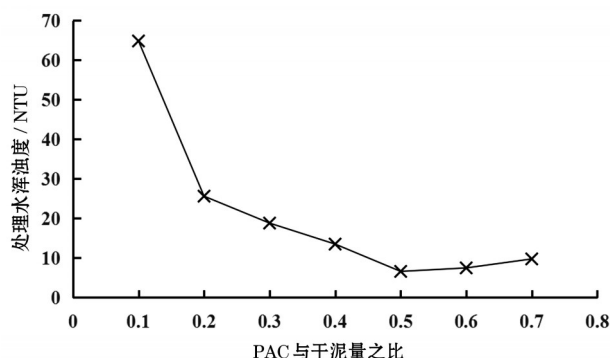


图2 不同PAC投药量下处理水浑浊度



从图2可见,上清液的浑浊度随着PAC投药量的增加而降低,当PAC与干泥量之比为0.5%时上清液浑浊度达到最低值为6.6 NTU。继续增大PAC投药量后,上清液浑浊度呈小幅上升的趋势。PAC的作用是使胶体态的细微颗粒脱稳,凝聚成较大颗粒,使水澄清,如果PAC投加量不足,水中还有分散态细微颗粒,水的浑浊度高;PAC投加量过多时,胶体颗粒会重新稳定,从而使得混凝效果变差。当PAC与干泥量之比为0.2%时上清液浑浊度为25.6 NTU,出水较为清澈,已达到出水浑浊度小于40 NTU的要求。因此,考虑节约药剂成本,建议PAC投加量范围为PAC与干泥量之比介于0.2%~0.5%之间。

### 2.1.2 PAM最佳投药量

分别针对10%浓度泥浆和15%浓度泥浆进行了PAM投加量优化实验,采用的PAC与干泥量之比为0.2%,不同PAM投药量下处理水的浑浊度和污泥比阻如图3所示。

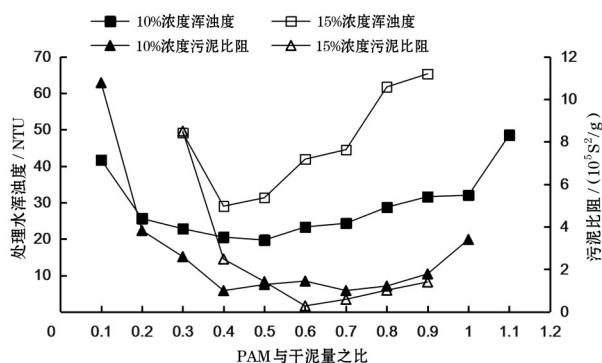


图3 不同PAM投药量下处理水浑浊度和污泥比阻

由图3可见,当泥浆浓度为10%、PAC与干泥量之比为0.2%时,在PAM与干泥量之比为0.4‰处污泥比阻达到最低值 $0.999 \times 10^5 \text{ S}^2/\text{g}$ ,上清液浑浊度为20.5 NTU,满足出水浑浊度要求。

当泥浆浓度为15%、PAC与干泥量之比为0.2%时,在PAM与干泥量之比为0.6‰处污泥比阻达到最低值 $0.281 \times 10^5 \text{ S}^2/\text{g} \times 10^5 \text{ S}^2/\text{g}$ ,上清液浑浊度为41.9 NTU。虽PAM与干泥量之比为0.4‰和0.5‰时,上清液的浑浊度更低,但污泥比阻过高,滤水性差,所以并不适合作为最佳投药量。

## 2.2 精准加药管袋固化泥浆应用效果

### 2.2.1 加药量随泥浆量变化过程

精准加药自控系统将指令加药计量泵加入计算的加药量,实际运行中,每15 s计算调整一次加药量,加药计量泵能根据计算加药量及时调整加药

量,使加药量紧随计算加药量波动。现展示一天中整点的运行数据,泥浆流量和浓度变化过程如图4所示。泥浆流量波动范围为467~739  $\text{m}^3/\text{h}$ ,浓度波动范围为15.5~154.8  $\text{g/L}$ 。自控系统设定PAC与干泥量之比为0.2%,PAM与干泥量之比为0.6‰。PAC和PAM的配置浓度分别为3%和1.8‰,按照式(1)可计算出所需的PAC和PAM的计算加流量分别介于0.29~3.99  $\text{m}^3/\text{h}$ 和2.51~34.82  $\text{m}^3/\text{h}$ 之间,变化过程如图5所示。由此可见,所需的计算加药流量变化幅度大且变化频繁,若采用传统的人工调节加药量的方法难以控制,会导致加药量不够或过量。加药计量泵根据自控系统发出的加药指令,尽可能调节到计算加药流量,实际的加药量过程如图5所示。PAC实际加药量与计算加药量的相对误差为4.57%,PAM实际加药量与计算加药量的相对误差为5.3%,且大部分为正误差。

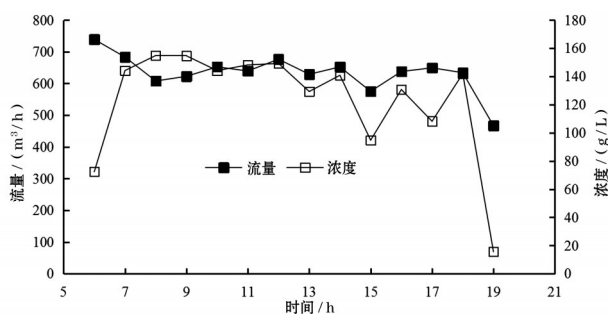


图4 泥浆流量和泥浆浓度变化过程

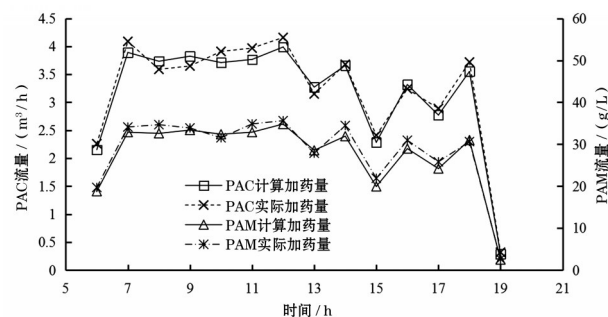


图5 药剂计算加药量和实际加药量变化过程

### 2.2.2 土工管袋滤出水水质

土工管袋滤出水速度快,水质清澈。取样检测土工管袋滤出的水样,检测总氮、总磷、氨氮、高锰酸盐指数、浑浊度指标,综合分析评估出水水质。滤出水浑浊度和高锰酸盐指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )如图6所示,总氮、总磷、氨氮如图7所示。

水质监测34次,其中滤出水浑浊度介于10.3~47.3 NTU,平均值为26.8 NTU,低于40 NTU占比

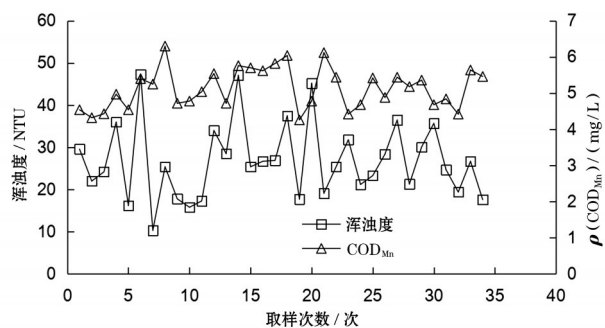


图6 滤出水浑浊度和高锰酸盐指数监测数据

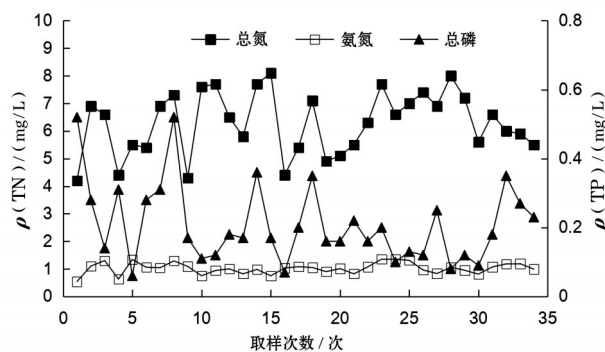


图7 滤出水中总磷、总氮、氨氮监测数据

92%,满足《池塘养殖尾水排放标准》(DB32/4043—2021)一级特别排放限值。出水中氨氮质量浓度介于0.54~1.35 mg/L,平均值为1.02 mg/L,达到地表水Ⅲ、Ⅳ类水标准比例分别为56%、100%。出水中高锰酸盐指数质量浓度介于4.26~5.82 mg/L,平均值为5.04 mg/L,均达到地表水Ⅲ类水标准。出水中总磷质量浓度介于0.11~0.32 mg/L,平均值为0.19 mg/L,达到地表水Ⅲ、Ⅳ类水标准比例分别为65%、92%。出水中总氮质量浓度介于4.2~8.1 mg/L,平均值为6.29 mg/L,超过地表水Ⅴ类水标准,这主要是因为底泥的有机污染较重,呈黑色,间隙水中存在大量的溶解性有机氮和氨氮,经绞吸船扰动后释放到泥浆中。

### 2.2.3 固化泥浆含水率下降过程

土工管袋中泥浆含水率随固化时间变化的关系如图8所示。投加药剂后的泥浆含水率下降分两个阶段,第一个阶段是凝聚颗粒下沉后,上部的重力水快速渗出土工管袋,泥浆含水率从处理前的85%~90%迅速下降到第一天的70%,体积缩小到原有的1/2~1/3。第二阶段是沉淀的泥浆颗粒内部和颗粒之间的重力水,受到颗粒叠加重力挤压,颗粒间隙变小,重力水被挤出;同时伴随着蒸发毛细作用,使颗粒内部的水移动到土工管袋表面而挥发。第二阶段的出水速度慢,固化两周后,泥浆含水率

下降到60%,达到项目收方标准,可装车外运。固化5周后含水率下降到50%,可以开展生态修复

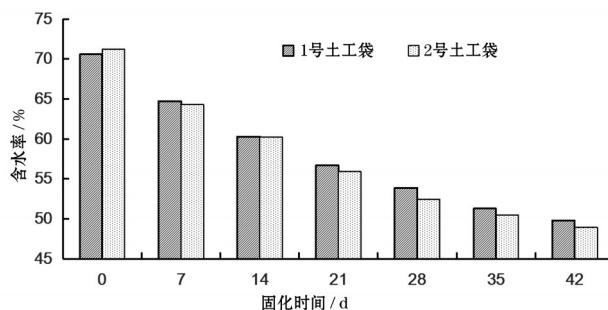


图8 土工管袋固化泥浆含水率变化过程

绿化作业等工作,实现土地的有效利用。

## 3 结论

(1)处理浓度为10%~15%G湖清淤泥浆时,最佳的PAC与干泥量之比为0.2%,最佳的PAM与干泥量之比为0.6‰。精准加药自控系统根据实时泥浆流量和浓度计算出需要投加的药剂剂量,指令加药计量泵投加相应的药剂剂量,加药量随进泥流量和浓度动态变化,实际的加药量与计算加药量的误差在±5%左右。

(2)精准加药系统运行后,土工管袋固化泥浆滤出水的浑浊度介于10.3~47.3 NTU之间,氨氮、高锰酸盐指数、总磷、总氮质量浓度分别介于0.54~1.35 mg/L、4.26~5.82 mg/L、0.11~0.32 mg/L、4.2~8.1 mg/L之间。土工管袋内泥浆含水率快速下降到70%,固化两周后下降到60%,5周后下降到50%。

(3)精准加药土工管袋固化清淤泥浆工艺运行稳定,实现了固化药剂的精准投加,保障了固化效果,节省了药剂剂量,降低了工作强度,工艺是可行的。

### 参考文献:

- [1] 张曼,殷鹏,支鸣强,等.太湖藻型及草型湖区底泥内源污染及释放机制研究[J].环境科学学报,2023,43(6):247-257.
- [2] 从“重水轻泥”到“泥水并重”污泥处置产业面临新的使命和机遇[J].中国环保产业,2023(1):16-17.
- [3] 蔡金榜,孙旭,苏良湖,等.漏湖污染源调查与分析[J].江苏农业科学,2018,46(5):224-227.
- [4] 李成花,单建军,王大伟.城市河道内源污染治理的方案比选及实施[J].治淮,2023(12):55-57.
- [5] 孙媛媛,刘伦华.浅水湖泊内源污染治理探索与实践[J].水利规划与设计,2023(7):40-43.

(下转第11页)

因素叠加影响增加扰动时间,颗粒物沉降时间会延长,但水体污染物浓度并不一定随时间延长而升高。随着环保绞吸式清淤技术的更新,施工影响将进一步减小,清淤效果也会得到显著改善。

#### 参考文献:

- [1] 陈超,钟继承,邵世光,等.太湖西北部典型疏浚/对照湖区内源性营养盐释放潜力对比[J].湖泊科学,2014,26(6):829-836.
- [2] 徐锦前,钟威,蔡永久,等.近30年长荡湖和溇湖水环境演变趋势[J].长江流域资源与环境,2022,31(7):1641-1652.
- [3] 朱林,汪院生,邓建才,等.长荡湖表层沉积物中营养盐空间分布与污染特征[J].水资源保护,2015,31(6):135-140.
- [4] 孙媛媛,刘伦华.浅水湖泊内源污染治理探索与实践[J].水利规划与设计,2023(7):40-43.
- [5] 卢德明,赵俞斌.河道环保绞吸式清淤施工技术[J].中国水能及电气化,2018(9):15-17.
- [6] 闫云华.绞吸式挖泥船泥浆流速与浓度双参数的MFAC研究[D].武汉:武汉理工大学,2022.
- [7] 李军.绞吸挖泥船疏浚优化研究[D].江苏科技大学,2021.
- [8] 陈宝.绞吸式挖泥船疏浚作业生产率预测[D].上海:上海电机学院,2022.
- [9] 生态环境部.GB15618—2018,土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)[S].北京:中国环境出版集团,2018.
- [6] 王雷刚,赵小宁,王浪.零河水库清淤工程清淤方案浅析[J].陕西水利,2022(12):142-144.
- [7] 张力,王丽君,王宁,等.环保清淤技术在二十埠河清淤工程中的应用[J].江苏水利,2021(2):66-69.
- [8] 杨毅.环保式清淤技术及在南淝河清淤工程中的应用[J].绿色科技,2015(1):174-176.
- [9] 黄朝煊,孙杰.河库清淤重难点分析及措施探究——以浙江省温岭市太湖水库环保清淤工程为例[J].施工技术,2018,47(S1):1047-1051.
- [10] 刘珩,韩文杰.河湖清淤底泥处理工艺[J].珠江水运,2023(5):50-52.
- [11] 胡现.生态清淤和底泥处置的实践和思考[J].低碳世界,2022,12(2):50-52.
- [12] 蓝蓉.滇池环保疏浚工程中的新型土工管袋围堰——国内首次土工管袋围堰生产性试验工程设计[J].云南环境科学,2002(1):39-42.
- [13] 黄涛,沈保根,鄢俊,等.巢湖淤泥土工管袋脱水效果试验研究[J].水运工程,2022(4):25-29.
- [14] 陈文明.土工管袋脱水固结在某河道疏浚工程中的试验研究[J].珠江水运,2023(23):9-11.
- [15] 郑华,尹昭宇,林宇杰,等.土工管袋用于湿地疏浚淤泥脱水处理效果评估[J].浙江水利科技,2022,50(4):51-55.

(上接第5页)