

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0014

何平,唐雪晨,杨磊,等. 环保型防扩散剂在绞吸过程中的防扩散性能研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 98-104. HE P, TANG X C, YANG L, et al. Study on the anti-diffusion performance of environmentally-friendly anti-diffusion agents in the cutter-suction process[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 98-104. (in Chinese)

# 环保型防扩散剂在绞吸过程中的防扩散性能研究

何平,唐雪晨,杨磊,贾冬霜,吴燕

(天津科技大学 化工与材料学院, 天津 300457)

**摘要:**针对疏浚工程中底泥扩散问题,设计了一套绞吸试验装置,通过 CFD 模型预测出底泥的扩散分布,在绞吸过程中投加环保型防扩散剂 CPAM、PSF 及复配 CPAM/PSF,通过对底泥的沉降速率、上覆水体浊度及 COD、粒径以及 SEM 形貌变化等来探究防扩散剂在绞吸过程中的防扩散效果。结果表明:在投加的防扩散剂中 CPAM 对底泥的防扩散效果最佳,当 CPAM 的投加量为 15 mg/L 时,相对最终的底泥沉降率来说,95% 泥样基本是在瞬间沉降,且沉降 1 h 后上覆水体浊度达到最低值 10.23 NTU, COD 达到最低值 12.0 mg/L,相对未添加防扩散剂的上覆水体浊度、COD 下降率分别为 83.6%、89.1%,从其沉降泥样 SEM 图片中也可以看出其底泥颗粒粒径增大最为明显,中值粒径达到 19.250  $\mu\text{m}$ ,相对未添加防扩散剂的底泥颗粒粒径增长率为 117%,在底泥的防扩散上表现出良好效果。

**关键词:**疏浚工程; CFD 模型; 绞吸过程; 防扩散

中图分类号: X52 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on the anti-diffusion performance of environmentally-friendly anti-diffusion agents in the cutter-suction process

HE Ping, TANG Xuechen, YANG Lei, JIA Dongshuang, WU Yan

(College of Chemical Engineering and Materials Science, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of sediment diffusion in dredging projects, we designed a cutter suction experiment device. The diffusion distribution of sediment was predicted by CFD model. CPAM, PSF and CPAM/PSF were added during the cutter suction process. We explored the anti-diffusion effect of anti-diffusion agents in cutter suction process in terms of the sediment settling rate, turbidity of overlying water, COD, particle size, and SEM morphology changes. The results showed that: CPAM had the best effect on preventing sediment diffusion. When CPAM dosage was 15 mg/L, 95% of the mud samples basically settled in an instant relative to the final sediment settling rate; after 1 hour of settling, the turbidity of the overlying water reached the lowest value of 10.23 NTU and COD reached the lowest value of 12.0 mg/L, which were respectively 83.6% and 89.1% lower than the turbidity and COD of the overlying water without anti-diffusion agent. From the SEM pictures of the sediment samples, it can be seen that the sediment particle size increased the most obviously, with the median particle size reaching 19.250  $\mu\text{m}$ , which was 117% higher than that of the sediment without the anti-diffusion agent. The agent showed good effects in preventing the spread of sediment.

**Key words:** dredging project; CFD model; cutter suction process; anti-diffusion

收稿日期: 2018-09-04 修回日期: 2018-11-28 网络出版时间: 2018-12-04

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181203.0910.006.html>

基金项目: 中交天航环保工程有限公司基金(1700030003; 1700030031)

作者简介: 何平(1993—), 男, 河南信阳人, 主要从事污染底泥重金属脱除方面研究。E-mail: 1793695248@qq.com

通信作者: 吴燕(1976—), 女, 湖南岳阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事污染控制化学方面研究。E-mail: wuyan@tust.edu.cn

目前,疏浚是解决江河湖海受污染底泥的一种行之有效而且应用比较广泛的方法<sup>[1-6]</sup>。然而针对底泥疏浚后的生态效益问题一直有两种争议,其一为改善水质,另一种为破坏原有的生态系统<sup>[7]</sup>。基于环境影响的疏浚事件鲜有报道,美国环境保护署<sup>[8,9]</sup>研究了小范围疏浚对墨西哥海湾的理化性质、底栖生物群落组成等在疏浚前后的影响变化;其中有一部分是由于疏浚过程中的机械扰动而导致底泥扩散,从而对生态环境造成影响。

由疏浚设备的疏挖引起的二次污染现象引起了人们的关注,国内外<sup>[10-20]</sup>都致力于研究其解决方法。美国相关专利提出在绞刀大环内侧设置特定的铲板,用以引导被切削下来的泥沙到达吸泥口处。中国以绞吸式挖泥船为例,从2006年开始,天津航道勘察设计研究院<sup>[21]</sup>就有人针对绞吸过程中的底泥漏挖扩散问题,改进绞刀的结构,进而达到减少底泥扩散,减轻水体二次污染。2014年中交天津港航勘察设计研究院有限公司<sup>[22-23]</sup>针对二次污染等问题,设计了一种带防扩散罩的环保疏浚绞刀,在此基础上,本试验通过在绞刀绞吸过程中投加不同环保型防扩散剂,研究其不同投加量对绞吸过程中底泥防扩散的影响,并探讨防扩散机理。环保型防扩散剂是一种少量加入就能较明显的防止颗粒扩散的物质,其本质为絮凝剂。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本文以太湖底泥为研究对象,其基本物性见表1。试验时将含水率为25.4%的底泥铺设于玻璃缸底,并加入一定量的水,模拟疏浚底泥环境,绞吸装置中投加不同量的防扩散剂 CPAM、PSF 及复配 CPAM/PSF,进行模拟试验。其中编号1号为空白;编号2号、3号、4号投加量分别为5、10、15的CPAM;编号5、6、7号为投加量分别为50、100、150 mg/L的PSF;编号8号、9号、10号投加量分别为5 mg/L/50 mg/L、5 mg/L/100 mg/L、5 mg/L

/150 mg/L的复配 CPAM/PSF。

### 1.2 防扩散试验

#### 1.2.1 试验装置

试验装置包括:人工湖泊、底泥堆场、绞吸系统、移动系统、监测系统,见图1。人工湖泊、底泥堆场分别为一个长宽高为0.8 m×0.5 m×0.4 m的玻璃缸和一个体积为20 L的龙头瓶;绞吸系统为主系统,包含直径为18 mm的绞刀、直径为6 mm的吸泥管、电动搅拌机、调压器、循环水式真空泵;移动系统为移动滑轨和动力装置;监测系统包含三个位置的录像装置。

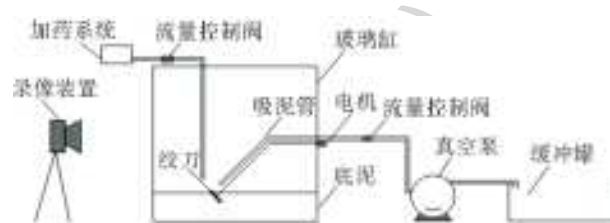


图1 疏浚底泥防扩散研究试验系统

Fig. 1 Experimental system for the anti-diffusion study of sediment dredging

#### 1.2.2 试验方法

用玻璃水缸模拟湖泊底泥环境,向其中加入定量底泥(15 kg 含水率为25.4%的底泥)和定量水(液面高度为10 cm),搅拌均匀后沉降24 h左右,留待用。根据图1连接好试验装置,固定绞刀转速、真空度、绞刀移动速度后,投加不同量的防扩散剂。随后打开搅拌及真空泵,同时开始计时和录像。

试验采用100 mL的比色管进行1 h的沉降试验,取定点扩散后的水样混合均匀后倒入比色管中静置沉降,同时计时并记录样品高度,并对沉降1 h后的上覆水体进行取样,水样约30 mL,以蒸馏水为参照标准,采用HI93703-11型浊度仪测其浊度取少量沉降后底泥样品,按一定浓度(一般在9%~12%)分散均匀后,在Ls激光衍射粒度分析仪测定底泥的颗粒粒径,并测取底泥的SEM照片。每组试验平行三次。

表1 疏浚底泥基本物性

Tab. 1 The basic properties of sediment

| 含水率/% | 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 容重/(g·cm <sup>-3</sup> ) | pH   | 孔隙度/% | 含盐量/% | 有机质含量/% |
|-------|--------------------------|--------------------------|------|-------|-------|---------|
| 25.4  | 2.92                     | 25.40                    | 6.93 | 54.45 | 0.28  | 4.82    |

### 1.3 疏浚底泥绞吸过程CFD模型建立

#### 1.3.1 CFD模型

CFD是计算流体动力学的简称。它是伴随着计算机技术、数值计算技术的发展而发展的。CFD

相当于“虚拟”地在计算机做试验,用以模拟仿真实际的流体流动情况。本文通过Gambit建立模型,采用MRF(多重坐标系)的方法建立两个流体区域,即moving area(流动区域)和static area(相对静止区域),并对模型划分网格。

### 1.3.2 参数的设置

本试验采用的是四面体混合网格。如图 2 所示为在建立模型后对模型划分网格,对于 moving 区,该区域为绞刀中心区域,需要在此设置转速大小,故需要划分精细的网格,且单个网格质量比较高,耗时长,总网格数为 245 048;而对于 static 区,它相对于流动区域的相对速度为 0,且离绞刀比较远,对划分网格要求不高,网格质量一般,耗时短,总网格数为 1 022 005。其边界条件设置见表 2。

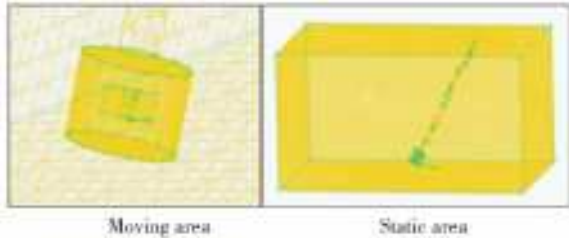


图 2 CFD 模型网格分布

Fig. 2 The grid distribution of CFD model

表 2 边界条件参数

Tab. 2 Boundary conditions parameters list

| 边界       | 类型     | 参数        | 备注                |
|----------|--------|-----------|-------------------|
| Inlet    | 速度进口   | 1.5 m/s   | 管速                |
| Outlet   | 速度出口   | 100%      | 管路出口,无回流          |
| Moving   | 流动区域   | 12.56 r/s | 转速,绝对速度           |
| Static   | 相对静止区域 | 0         | 相对速度              |
| Impeller | 绞刀     | 0         | (Moving wall)相对速度 |

表 3 试验及 CFD 模型参数、雷诺数、 $\delta$  值

Tab. 3 List of experimental and CFD model parameters, Reynolds number and  $\delta$  value

| $N/(r \cdot \min^{-1})$ | $H/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ | $K/(\text{Pa} \cdot \text{sn})$ | $\eta$ | $U_{\infty}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $Re$  | $Re_g$  | $\delta/\%$ |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------|---|-------|---------|-------------|
| 90                      | 0.006~0.008                    | 0.062                           | 0.710  | 1.0   | 3 675 | 3 602.9 | 1.96        |
| 120                     | 0.01~0.03                      | 0.192                           | 0.562  | 1.5   | 3 920 | 3 508.4 | 10.50       |
| 180                     | 0.02~0.17                      | 0.355                           | 0.533  | 2.0   | 4 410 | 4 084.4 | 7.38        |

由表 3 数据表明  $\delta$  的最大值为 10.50%,根据 Chen<sup>[24]</sup> 和 Metzner<sup>[25]</sup> 的研究, $\delta$  小于 30%,因此该 CFD 模型能够用来模拟绞吸过程。

## 2 结果与讨论

### 2.1 绞吸过程流体速度分布

在 CFD 模型模拟绞吸过程中,从图 3 可以看出,流体在不同的绞刀转速下具有不同的速度分布,其中蓝色区域和红色区域分别代表低速和高速流动区域。在流动区域内,越靠近绞刀的地方流体流动的相对速度越慢,在绞刀边界上流体流动相对速度为 0 m/s,而在流动区域边界上,流体流动相对速度达到最大值 1.6 m/s。

### 1.3.3 运算模型选择

试验过程假设为紊流流动,且收敛速度比较快,所以采用的求解方程为 standard  $k-\epsilon$  模型。

建立模型之后,本文把文件导入 FLUENT,开始进行拟合运算。

模型拟合完后,本文对模型进行一些简单分析,主要包括扩散范围,强度,速度分布,湍流强度等。

### 1.3.4 模型校正和检验

本文采用雷诺数校正试验和模拟值<sup>[24]</sup>。当试验流体为非牛顿流体时,雷诺数的表达式为

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\eta} \quad (1)$$

式中: $\rho$  为底泥密度; $N$  为绞刀转速; $D$  为绞刀直径; $\eta$  为动力黏度。其中  $\rho=1 225 \text{ kg/m}^3$ ,  $D=0.020 \text{ m}$ ,  $\eta$  值见表 3。

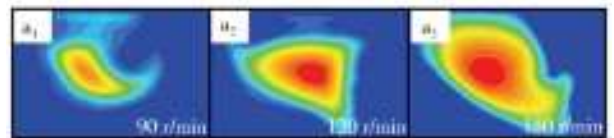
CFD 模型中的流动区域的雷诺数的表达式与管流相似为<sup>[25]</sup>

$$Re_g = \frac{\rho U_{\infty}^{2-n} d^n}{K(0.75 + \frac{0.25}{n})^n 8^{n-1}} \quad (2)$$

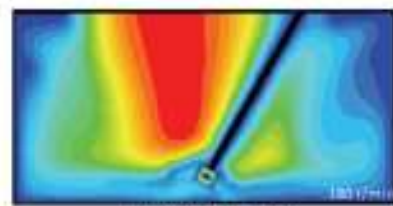
式中: $\rho$  为底泥密度; $d$  为流动区域的直径, $d=0.04 \text{ m}$ ;  $U_{\infty}$  是流体在流动区域出口的平均速度,其值见表 3。

$$\delta = \left| \frac{Re - Re_g}{Re} \right| \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\delta$  为相对误差。



(a) 不同转速下流体流动范围



(b) 流体速度分布



图 3 不同转速下流体速度分布

Fig. 3 Fluid velocity profiles at different rotational speeds



从图 3(a)可以看出,流体的流速从绞刀中心向外呈递减的趋势,流体的扩散范围随绞刀的转速的增大而增大。由于绞刀的特殊形状,和其作用角度的关系,会使得在不同的转速下,流体会不同的流动方向和区域。从图 3(b)可以看出,在绞吸的过程中,不同的位置流体速度分布不同,这是由于绞刀的机械扰动、绞刀的倾斜角度以及吸泥管的抽吸力所造成的。通过 CFD 模拟可以清晰明确的预测出实际流体的流动方向、方位和强度。由于流体的流动强度越大,底泥扩散的就越快,根据流体的流动方向、方位和强度可以预测出底泥的扩散分布。在绞吸过程中,通过在高速流动区域投加环保型防扩散剂 CPAM、PSF 及复配 CPAM/PSF 来探究防扩散剂对底泥的防扩散效果。

## 2.2 防扩散剂对底泥沉降速率的影响

如图 4 所示,投加防扩散剂能够增加底泥的沉降

速率。从图 4(a)可以看出,随着 CPAM 投加量的增加,底泥在前 20 min 内的沉降速率较快,其中当 CPAM 的投加量为 15 mg/L 时,底泥最终沉降百分率达 82%,相对最终的沉降底泥来说,95%泥样基本是在瞬间沉降。从图 4(b)可以看出,PSF 投加量为 50 mg/L 时,底泥沉降效果较差,这可能是由于 PSF 的投加量过少所致,以至于作用效果不明显。当 PSF 投加量为 100、150 mg/L 时,底泥最终的沉降百分率在 85%,在前 10 min 左右,相对最终的沉降底泥来说,沉降速率为 78%。从图 4(c)可以看出,当复配 CPAM/PSF 的投加量为 5 mg/L/50 mg/L 时,底泥的最终沉降百分率达 82%,相对最终的沉降底泥来说,85%的底泥能够在瞬间沉降,而当复配 CPAM/PSF 的量为 5 mg/L/100 mg/L 及 5 mg/L/150 mg/L 时,底泥的沉降速率及最终的沉降百分率相较于投加量为 5 mg/L/50 mg/L 的低。

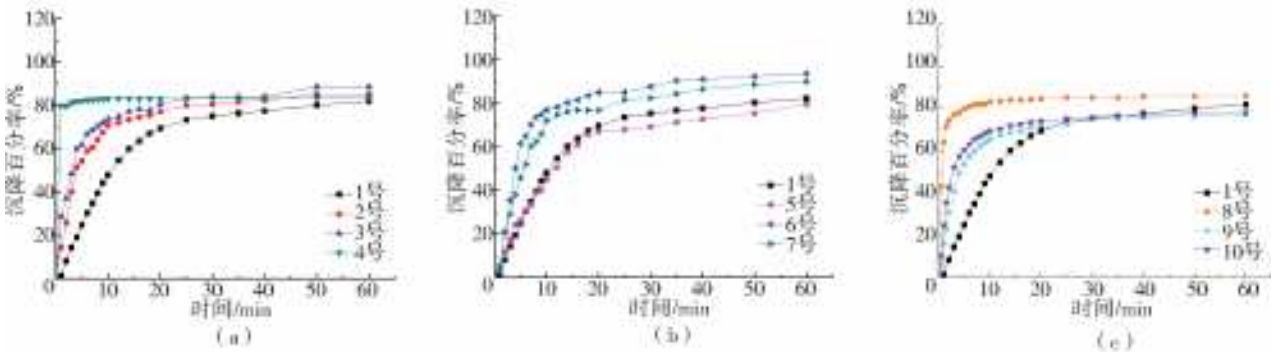


图 4 不同防扩散剂投加量底泥的沉降速率

Fig. 4 Settling rate of sediment at different dosages of anti-diffusion agent

这一原因是防扩散剂 CPAM 作为阳离子有机高分子絮凝剂,其较长的分子链,相互交织成网,具有很强的吸附架桥和网捕的作用,使底泥颗粒聚集成大颗粒;而防扩散剂 PSF 为无机高分子絮凝剂,其中含有大量的三价铁离子,带正电荷的聚合物链骨架对颗粒进行缠绕吸附及架桥,使颗粒进行团聚。虽然二者对泥的絮凝原理都是吸附架桥原理,但无机高分子絮凝剂的分子量和尺度远低于有机高分子,其絮凝架桥能力仍较有机高分子絮凝剂有较大差距。在分别投加最佳量的 CPAM 及 PSF 时,由于 CPAM 的分子量较 PSF 高,其对泥的吸附架桥作用更强烈,CPAM 相对 PSF 对泥的絮凝效果更佳;而当 CPAM 与 PSF 复配时,在复配的防扩散剂中 CPAM 用量较单独投加 CPAM 的最佳量少,使得其对泥的絮凝效果没有投加最佳量的 CPAM 好。而絮凝剂对泥的团聚作用越强,团聚粒径就越大,在重力作用下泥的沉降速率越快。

## 2.3 防扩散剂对上覆水体浊度的影响

在沉降试验后,立即取上清液测水体的浊度,从图 5 可以看出,投加不同防扩散剂可以降低水体的浊度,且随着投加量的增大,上覆水体浊度都呈减小的趋势。其中投加 CPAM 的效果整体要优于 PSF 及复配 CPAM/PSF,以 CPAM 投加量为 15 mg/L

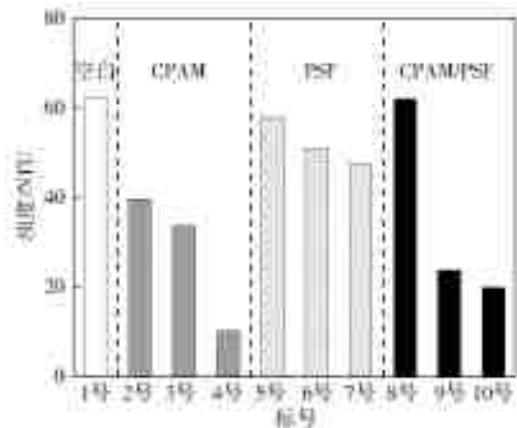


图 5 不同防扩散剂投加量上清液浊度

Fig. 5 Turbidity of overlying water at different dosages of anti-diffusion agent

时效果最优,其浊度达到最低值 10.23 NTU,这可能与 CPAM 投加量为 15 mg/L 时,相对最终的底泥沉降率,95%泥样基本是在瞬间沉降有关,从而降低水体浊度,提高水质。投加防扩散剂 PSF 虽然上覆水体较空白组的浊度有所降低,且随着添加量的增加浊度逐渐降低,但浊度仍然较大,效果不佳。投加复配 CPAM/PSF 时,可以看出投加量为 5 mg/L/100 mg/L 及 5 mg/L/150 mg/L 时浊度明显降低,效果较好。

### 2.4 防扩散剂对上覆水体 COD 的影响

在沉降试验后,立即取上清液测水体的 COD,从图 6 可以看出,投加不同防扩散剂可以降低水体的 COD,且随着投加量的增大,上覆水体 COD 都呈减小的趋势。这是由于投加防扩散剂将水体中的悬浮物以及还原性物质集聚絮凝在底泥颗粒中,从而改善水体的水质。在投加不同防扩散剂后,水体 COD 较不添加防扩散剂均有较大改善,其中以 CPAM 投加量为 15 mg/L 时效果最优,其 COD 达到最低值 12.0 mg/L,有效改善水体水质。

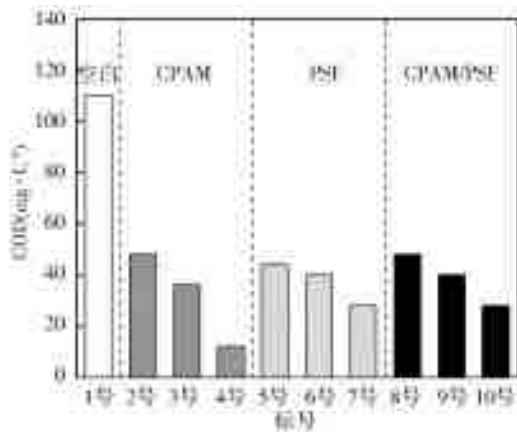


图 6 不同防扩散剂投加量上清液 COD  
Fig. 6 COD of overlying water at different dosages of anti-diffusion agent

### 2.5 防扩散剂对底泥颗粒粒径的影响

如图 7 所示,在投加防扩散剂后底泥的中值粒径增大。从图 7 可以看出,当投加防扩散剂 CPAM 时,底泥的中值粒径随着投加量的增大而增大,且投加量为 15 mg/L 时,底泥的中值粒径达到 19.250  $\mu\text{m}$ ,相对空白组上升 117%;当投加防扩散剂 PSF 时,底泥的中值粒径随着其投加量的增加并没有太大的变化,并且与 CPAM 投加量为 10 mg/L 时的数值相近,但整体粒径均有增大的倾向;而投加复配 CPAM/PSF 时,与防扩散剂 PSF 相似,底泥的中值粒径随着投加量的增多没有太大变化。

从图 7 底泥的颗粒中值粒径可以看出,投加

PSF 及复配 CPAM/PSF 时,中值粒径变化不大,且明显小于投加量为 15 mg/L 的 CPAM 的中值粒径,说明分别投加最佳量的 CPAM、PSF,CPAM 比 PSF 对底泥的絮凝效果要好,且复配 CPAM/PSF 对泥的絮凝效果也较 CPAM 的差,也论证了投加量为 15 mg/L CPAM 的沉降速率最快的结论。

在绞吸时投加不同防扩散剂,底泥的中值粒径增大。这是由于防扩散剂 CPAM、PSF 本身作为絮凝剂,当粒径较小的泥浆颗粒扩散至加入点附近时,由于絮凝的作用使泥浆颗粒迅速团聚成粒径较大的颗粒,增大泥浆颗粒自重,减小其受剪切扩散力影响导致的泥浆层滑移,最终也起到防止泥浆扩散的作用。

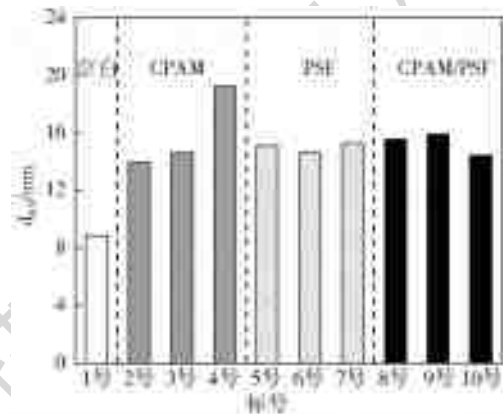


图 7 不同防扩散剂投加量底泥中值粒径  
Fig. 7 Median sediment particle size at different dosages of anti-diffusion agent

从图 8 可以看出,加入防扩散剂 PSF、CPAM 及复配 CPAM/PSF 后,泥浆颗粒的粒径在一定程度上都有所增大,其中当 PSF 投加量为 150 mg/L、CPAM 为 10 mg/L 以及 CPAM/PSF 为 1/30 时底泥的断面形貌相似,而当 CPAM 投加量为 15 mg/L 时,底泥 SEM 的变化最为显著,其颗粒直径明显增大,这论证了上述投加量为 15 mg/L CPAM 时底泥中值粒径最大。

## 3 结论

本研究通过底泥的扩散分布,探究了在绞吸过程中投加防扩散剂 CPAM、PSF 及复配 CPAM/PSF 对底泥的防扩散性能影响,通过数据分析得出以下结论。

(1)在绞吸过程中,投加防扩散剂 CPAM、PSF 及复配 CPAM/PSF 均能增加底泥的沉降速率,当防扩散剂 CPAM 的投加量为 15 mg/L 时,底泥的沉降速率最快,相对最终的底泥沉降率来说,95%泥样基本是在瞬间沉降。

(2)在绞吸过程中,投加防扩散剂 CPAM、PSF

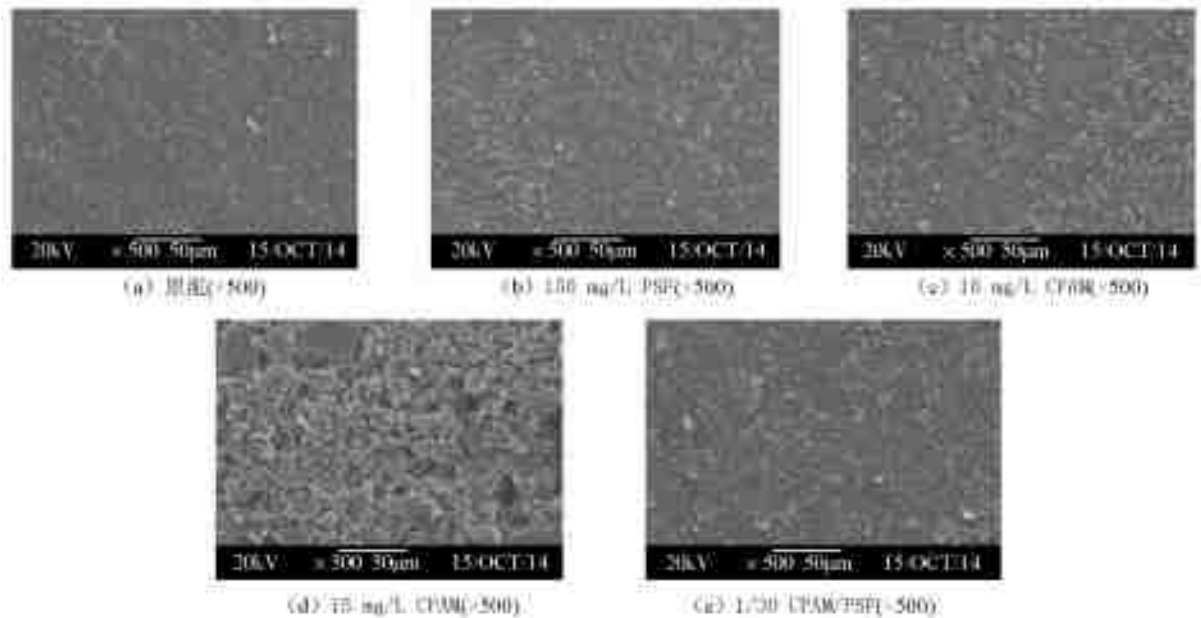


图8 不同防扩散剂投加量泥样 SEM 图片

Fig. 8 SEM pictures of mud at different dosages of anti-diffusion agent

及复配 CPAM/PSF 均能降低上覆水体浊度及 COD 值,当防扩散剂 CPAM 的投加量为 15 mg/L 时,底泥沉降 1 h 后其上覆水体浊度、COD 分别达到最小值 10.23 NTU、12.0 mg/L,相对未添加防扩散剂的上覆水体浊度、COD 下降率分别为 83.6%、89.1%,有效改善上覆水体水质。

(3)在绞吸过程中,投加防扩散剂 CPAM、PSF 及复配 CPAM/PSF 均能增大底泥的粒径,从不同防扩散剂投加量后泥样 SEM 图片及中值粒径增长率来看,当防扩散剂 CPAM 的投加量为 15 mg/L 时中值粒径增长最为明显,其底泥的中值粒径达到 19.250  $\mu\text{m}$ ,相对未添加防扩散剂的底泥的中值粒径增长率达 117%。

#### 参考文献(References):

- [1] YEE T W, LAWSON C R, WANG Z Y, et al. Geotextile tube dewatering of contaminated sediments, Tianjin Eco-City, China [J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2012, 31(4): 39-50.
- [2] 方申柱, 韩久春, 王文江, 等. 疏浚底泥微波干燥特性及耗能分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(6): 1128-1132. (FANG S Z, HAN J C, WANG W J, et al. Microwave drying characteristics and energy consumption analysis of dredged sediment[J]. *South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology*, 2015, 13(6): 1128-1132. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.06.023.
- [3] LIU C, SHAO S, SHEN Q, et al. Use of multi-objective dredging for remediation of contaminated sedi-

ments: A case study of a typical heavily polluted confluence area in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(22): 17839-49.

- [4] URBAN S R, CORREA A X R, SCHETTINI C A F, et al. Physicochemical and ecotoxicological evaluation of estuarine water quality during a dredging operation [J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2010, 10(1): 65-76.
- [5] 韩久春, 方申柱, 王文江, 等. 疏浚底泥微波干燥特性及耗能分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(3): 493-496, 517. (HAN J C, FANG S Z, WANG W J, et al. Microwave drying characteristics and energy consumption analysis of dredged sediment [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(3): 493-496, 517. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.03.020.
- [6] SANGITA S, SATAPATHY D R, KAR R N, et al. Impact of dredging on coastal water quality of dhamra Orissa [J]. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, 2014, 43(1): 33-38.
- [7] RAMIN E, WAGNER D S, YDE L, et al. A new settling velocity model to describe secondary sedimentation [J]. *Water Research*, 2014(66): 447-458.
- [8] KHALID R A, RUSSELL S J, MARCKS B G, et al. Toxic contaminant uptake in dredged sediment marshes [C]// *Dredging and Dredged Material Disposal*. ASCE, 2015.
- [9] PARSON L E, SWAFFORD R. Beneficial use of sediments from dredging activities in the gulf of Mexico [J]. *Journal of Coastal Research*, 2012, 60(60): 45-50.
- [10] 雷晓玲, 丁娟, 雷雨. 疏浚过程中的环境影响分析及其对策研究[J]. *环境工程*, 2015, 33(2): 140-142. (LEI

- X L, DING J, LEI Y. Environmental impact analysis and countermeasures in dredging process[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(2): 140-142. (in Chinese))
- [11] PAZOS M, IGLESIAS O, GOMEZ J, et al. Remediation of contaminated marine sediment using electrokinetic-Fenton technology[J]. Journal of Industrial & Engineering Chemistry, 2013, 19(3): 932-937.
- [12] DONG J L, XI W C, TONG L J, et al. The effects of dredging on nitrogen balance in sediment-water microcosms and implications to dredging projects[J]. Ecological Engineering, 2013, 52: 167-174.
- [13] YIN K, GIANNIS A, WONG A S Y, et al. EDTA-Enhanced thermal washing of contaminated dredged marine sediments for heavy metal removal[J]. Water Air & Soil Pollution, 2014, 225(8): 2024.
- [14] 田宇, 周兰, 吴燕. 改良 Fenton 体系对疏浚底泥脱水性能的影响[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3): 502-505, 567. (TIAN Y, ZHOU L, WU Y. Effect of improved Fenton system on dredged sludge dehydration[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(03): 502-505, 567 (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2015.03.022.
- [15] WANG S, ZHU W, LY Y, et al. An investigation into changes in phosphorus forms and phosphorus leaching from dredged sediments solidification of Taihu lake [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2016, 25(12): 5399-5405.
- [16] ERFTEMEIJER P L, RIEGL B, HOEKSEMA B W, et al. Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals: a review[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, 64(9): 1737-1765.
- [17] WANG W W, JIANG X, WA S H, et al. Calculation of environmental dredging depth of contaminated sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake[J]. China Environmental Science, 2011, 31(6): 1013-1018.
- [18] SANTOS-FERREIRA A, DIAS E, SILVA P F D, et al. Dredging of vila do conde harbor, portugal-contamination of sediments[J]. Procedia Engineering, 2015, 116: 939-946.
- [19] STEVENS C E, DIAMOND A W, GABOR T S. Aunran call surveys on small wetlands in Prince Edward Island, Canada restored by dredging of sediments[J]. Wetlands, 2016, 22(1): 90-99.
- [20] WANG H, PANG Y. Deposited sediment dredging to reduce internal pollutant loading for a waterfront shallow lake in Zhenjiang of China[J]. Advanced Materials Research, 2011, 356-360: 1170-1174.
- [21] 张志军, 董暄. 重型绞吸船挖岩施工中装驳工艺[J]. 中国港湾建设, 2014(5): 53-56. (ZHANG Z J, DONG X. The technology of barging in the construction of heavy winch suction vessel[J]. China Harbour Engineering, 2014(5): 53-56. (in Chinese)) DOI: 10.7640/zggwjs201405013.
- [22] 肖博, 孙守胜. 绞吸式挖泥船横移系统加速施工[J]. 中国港湾建设, 2015(9): 77-80. (XIAO B, SUN S S. The horizontal movement system of the cutter suction dredger accelerates construction[J]. China Harbour Engineering, 2015(9): 77-80. (in Chinese)) DOI: 10.7640/zggwjs201509019.
- [23] 郭志勇, 杨建华, 陈九肖. 绞吸挖泥船新型环保绞刀设计[J]. 中国港湾建设, 2014(12): 66-68. (GUO Z Y, YANG J H, CHEN J X. Design of new environmental protection cutter for cutter suction dredger[J]. China Harbour Engineering, 2014(12): 66-68. (in Chinese)) DOI: 10.7640/zggwjs201412016.
- [24] CHEN Y R. Impeller power consumption in mixing livestock manure slurries [J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24(1): 187-192.
- [25] METZNER A B, REED J C. Flow of non-Newtonian fluids correlation of laminar, transition, and turbulent-flow regions[J]. Aiche Journal, 1955(1): 434-440.