

郑祺, 谭鹤群, 何绪刚, 等. 池塘圈养模式尾水分离塔沉降污泥板框压滤试验研究[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(4): 259-268.  
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.04.025

## 池塘圈养模式尾水分离塔沉降污泥板框压滤试验研究

郑祺<sup>1,2</sup>, 谭鹤群<sup>1,2</sup>, 何绪刚<sup>2,3</sup>, 张义仁<sup>1,2</sup>, 夏成醒<sup>1,2</sup>

1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部水产养殖设施工程重点实验室, 武汉 430070;  
3. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070

**摘要** 为解决池塘圈养系统尾水分离塔中沉降污泥含水率高难以处理的问题, 采用“絮凝+板框压滤”的方式开展污泥脱水试验研究。选取聚合硫酸铝(PAS)、聚硅酸铝铁(PSAF)和聚合硫酸铁(PFS)3种无机絮凝剂, 以絮凝剂种类及添加量为试验因素, 以污泥比阻以及污泥滤液污染属性为试验指标, 开展污泥絮凝试验; 以滤布种类、优选出的絮凝剂添加量、过滤压力及保压时间为试验因素, 以污泥脱水率及滤液污染属性为试验指标, 开展沉降污泥的板框压滤脱水试验。结果显示: PAS、PSAF、PFS对污泥均有显著的调理效果, 其中, 当PSAF添加量为污泥干物质质量的2%时效果最佳, 此时污泥比阻可降低97.43%, 为 $2.08 \times 10^{12}$  m/kg, 滤液的内梅罗指数为3.61; 板框压滤对PSAF调理后的污泥具有良好的脱水效果, 采用涤纶621材质的滤布、PSAF添加量为污泥干物质质量的2%、过滤压力为0.3 MPa、保压时间为10 min时, 污泥板框压滤脱水试验能实现较好的脱水效果, 污泥含水率降至70.98%, 脱水率可达80.94%, 滤液内梅罗指数为4.54。研究表明, PSAF调理后板框压滤的工艺, 可作为池塘圈养系统沉降污泥的脱水工艺, 以实现污泥减量、便于运输储存的目的。

**关键词** 池塘圈养模式; 尾水分离塔; 沉降污泥; 无机絮凝剂; 脱水性能; 内梅罗指数

**中图分类号** X714 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)04-0259-10

池塘养殖是我国淡水养殖中最主要的生产模式, 已有数千年的发展历史<sup>[1]</sup>。在传统的池塘散养模式中, 池塘的最大放养密度完全取决于水体对池塘中鱼粪和残饵的清洁能力, 极大地限制了水产养殖的生产效率<sup>[2]</sup>。近些年来, 为提高池塘养殖的放养密度, 拓宽养殖户的收入来源, 圈养<sup>[3]</sup>、跑道<sup>[4]</sup>、集装箱<sup>[5]</sup>等新型养殖模式陆续诞生。其中, 华中农业大学何绪刚团队提出的池塘圈养模式尤为引人注目<sup>[6]</sup>。

不同于传统的养殖模式, 池塘圈养模式具有出色的固废排清能力和水体自净能力, 是一种环保而高效的养殖模式<sup>[7-8]</sup>。这主要得益于圈养模式中尾水分离与处理装置的合理运用。尾水分离与处理装置由尾水分离塔和人工湿地组成, 池塘圈养桶底部固液混合废弃物经螺杆泵抽取进入尾水分离塔沉淀分离后, 上清液经人工湿地脱氮除磷后回原池重复使用, 底部沉降污泥可用于制作有机肥等, 实现资源化再利用<sup>[9]</sup>。然而, 原始污泥含丰富的有机质, 且含水率高, 难以储存和运输。因此, 回收利用污泥, 必

须先对污泥进行脱水处理<sup>[10]</sup>。

目前, 机械压滤是最常用的污泥脱水工艺, 一般由压滤机实现<sup>[11]</sup>。考虑到污泥内部具有固体微粒分散、固液间粘连性大、比阻值高等特性<sup>[12]</sup>, 对污泥直接脱水的效果并不理想。因此, 对污泥进行调理以改善其脱水性能十分必要<sup>[13]</sup>。目前常用的调理方法主要有3种, 分别是物理调理、化学调理和生物调理<sup>[14]</sup>。其中, 化学调理是通过投放无机絮凝剂以改变污泥的絮体结构和粒径, 进而有效改善污泥脱水性能, 操作简单、运行成本低、效果稳定, 是最适用于污泥调理的方法<sup>[15]</sup>。王东星等<sup>[16]</sup>选取5种无机絮凝剂对疏浚淤泥进行调理, 并结合真空预压的脱水技术观测污泥脱水性能的变化, 结果表明添加适量无机絮凝剂能有效增大泥粒尺寸, 改善淤泥脱水性能, 防堵促排。吴秀等<sup>[17]</sup>为探究热活化过硫酸盐调理对厌氧消化污泥脱水性能的影响, 结果表明热活化过硫酸盐调理能够有效地破坏污泥的絮状结构, 增大污泥粒径, 从而改善其脱水性能。李世汨等<sup>[18]</sup>

收稿日期: 2024-03-30

基金项目: 湖北省科技重大专项(2023BBA001)

郑祺, E-mail: zhengqi@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 谭鹤群, E-mail: thq@mail.hzau.edu.cn.

通过聚丙烯酰胺+聚合氯化铝、粉煤灰、传统淤泥改性剂及低碱性淤泥固结剂对河道淤泥进行复合调理,表明絮凝剂对于改善淤泥脱水特性具有显著效果。

近年来已有许多研究探讨不同无机絮凝剂对污泥脱水性能的影响,但对于池塘圈养模式下尾水塔沉降污泥脱水工艺性能的研究较少。本研究以池塘圈养系统尾水分离塔中的沉降污泥为研究对象,采用常用的3种无机絮凝剂,按照5种不同的添加量调理污泥,以探究不同试验条件下污泥的脱水性能和滤液污染属性的差异性,优选出适用于圈养系统尾水沉降污泥的无机絮凝剂种类及投加量。在此基础上,选取滤布种类、优选出的絮凝剂添加量、过滤压力及保压时间为试验因素,开展沉降污泥的板框压滤脱水试验,以期为高效处理和回收沉降污泥提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1)沉降污泥。取自华中农业大学水产养殖实验教学示范中心池塘圈养模式试验基地大口黑鲈圈养系统,取样时间为每次喂食后12 h。取样时,采用螺杆泵将圈养桶底部的固液混合废弃物抽入尾水分离塔中,经1 h自然沉降后于尾水分离塔下方排污口提取污泥<sup>[9]</sup>,并存放于不透光PVC密封罐中,置于恒温4 °C的冷藏柜中储存备用。沉降污泥的含水率为(92.64±0.47)%,干污泥有机质含量为(23.01±0.98)%,黏度为(25.93±3.92)×10<sup>-3</sup> mPa,污泥比阻为(80.92±1.62)×10<sup>12</sup> m/kg,pH值为7.54±0.41。

2)无机絮凝剂。聚合硫酸铝(PAS)、聚合硅酸铝铁(PSAF)、聚合硫酸铁(PFS),购自某环保科技公司,I类工业级。使用前30 min,将无机絮凝剂溶解于蒸馏水,配置成10 g/L的溶液。

3)板框压滤机滤布。滤布材质型号分别为:丙纶750B、涤纶621、丙纶2570和锦纶2036,购自某压滤机滤布生产厂家。滤布的基本特性如表1所示。

### 1.2 仪器与设备

污泥比阻测定装置:主要由真空泵、调压阀、真空抽滤箱、150 mL多孔玻璃板漏斗、150 mL玻璃磨口锥形瓶、导管等组成。小型板框压滤机:整机尺寸为0.9 m×0.7 m×0.55 m,滤室容积为10 L,出水口数量为6个,过滤压力调节范围为0.1~0.6 MPa,装置外观如图1所示。DHS16-A型自动快速水分测定

表1 滤布的基本特性

Table 1 Basic properties of filter cloth

材质 Material	型号 Model number	粒度/μm Grain Size	透气度/ (L/(m <sup>2</sup> ·s)) Permeability	单位面积克重/ (g/m <sup>2</sup> ) Grams of per unit area
丙纶 Polypropylene	750B	47	60	380
涤纶 Polyester	621	47	60	420
丙纶 Polypropylene	2570	38	40	360
锦纶 Nylon	2036	47	40	350

仪:量程为0~50 g,精度0.001 g,水分可读性0.01%。NDJ-1S型数显黏度计:量程为0.1~60 000 mPa·s,精度0.01 mPa·s。JB-80SH型析牛悬臂式强力电动搅拌机:调速范围10~2 000 r/min。GL-660型多参数水质测定仪:支持悬浮物(SS)、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)等多种水质指标检测,示值误差≤4%,重复性≤2%,试验指标测量标准如表3所示。AZ8692型pH计:量程为0~14,分辨率0.01。



图1 小型板框压滤机

Fig.1 Small-scale plate and frame filter press

### 1.3 试验方法

试验地点位于湖北省武汉市华中农业大学水产养殖实验教学示范中心。试验时间为2023年6—12月。

1)无机絮凝剂优选试验设计。以3种无机絮凝剂为材料,研究其对池塘圈养桶底排污泥脱水调理效果的差异。絮凝剂种类设4组处理:CK(蒸馏水)、T1(PAS)、T2(PSAF)、T3(PFS),每组处理以添加的无机絮凝剂质量与污泥中干物质质量之比为变量,设1%、2%、3%、4%、5%等5个水平(CK组添加与无机絮凝剂溶液等量的蒸馏水,同样设5个水平),记为A1、A2、A3、A4和A5。每组处理平行重复3次。

污泥调理:称取150 g原始污泥放入250 mL烧

杯,并将装有污泥的烧杯放置于20℃的温水浴中预先加热30 min。加热结束后,向每个烧杯中投加相应水平的无机絮凝剂溶液。为加快无机絮凝剂与污泥的反应速度,使用JB-80SH型析牛悬臂式强力电动搅拌机对烧杯内的混合物进行搅拌。先以350 r/min的速度搅拌30 s,再以40 r/min的速度搅拌3 min<sup>[19]</sup>。搅拌完成后,将污泥置于污泥比阻测定装置中进行污泥比阻测定试验。

污泥比阻及滤液污染因子的测定:将调理后的污泥倒入铺有中速定量滤纸、面积为3.85 cm<sup>2</sup>的多孔玻璃板漏斗中,调节真空泵使抽滤压力为0.08 MPa,抽滤时间为5 min,每隔30 s记录1次滤液体积V,并绘制V-t/V线性曲线图。抽滤结束后,测定泥饼的含水率及滤液各污染因子。

2)污泥板框压滤脱水试验设计。污泥压滤脱水工艺流程为:原始污泥→加入絮凝剂调理→进料

过滤→保压→卸料→泥饼及滤液检测。根据预试验及上述试验结果,选定滤布种类、PSAF添加量、过滤压力和保压时间为试验因素。设置原始污泥的过滤量为50 L,滤布种类为丙纶750B、涤纶621、丙纶2570、锦纶2036,PSAF添加量为污泥干物质质量的1%、2%、3%和4%,过滤压力取值为0.15、0.3、0.45、0.6 MPa,保压时间为5、10、15、20 min。单因素试验中,其余因素设置的基本试验条件为滤布材质涤纶621、PSAF添加量为污泥干物质质量的2%、过滤压力0.3 MPa、保压时间10 min。

3)试验指标的选取与执行标准。参考SC/T 9101—2007《淡水池塘养殖水排放要求》与实际工况,选取泥饼含水率、滤液的悬浮物(SS)、COD、TN、TP质量浓度和pH值作为试验测定指标。试验指标测定方法的执行标准及测定仪器如表2所示。

表2 试验指标执行标准及测定仪器

Table 2 Testing criteria compliance standards and measuring instruments

测定指标 Indicators	执行标准 Execution standards	测定仪器 Measuring instruments
含水率 Moisture content	HJ 1222—2021	DHS16-A型自动快速水分测定 DHS16-A automatic rapid moisture determination
pH值 Value of pH	HJ 1147—2020	AZ8692型pH笔 AZ8692 pH pen
悬浮物 Suspended solids(SS)	GB/T 11901—1989	
化学需氧量 Chemical oxygen demand(COD)	HJ/T 399—2007	GL-660型多参数水质测定仪 GL-660 multiparameter water quality analyzer
总氮 Total nitrogen(TN)	HJ 636—2012	
总磷 Total phosphorus(TP)	GB 11893—1989	

#### 1.4 评价方法

本试验采用污泥脱水性能和滤液的污染属性综合评价无机絮凝剂的污泥调理效果。

1)污泥比阻。污泥比阻是一个综合评估污泥脱水性能的指标,通常情况下,污泥比阻的值越大,污泥的脱水难度越大,当污泥比阻大于10×10<sup>12</sup> m/kg时,污泥极难脱水。污泥比阻的测定步骤如下:抽滤前后,采用DHS16-A型自动快速水分测定仪测定原泥含水率 $\omega_i$ 与泥饼含水率 $\omega_f$ ;抽滤结束后,采用NDJ-1S型数显黏度计测量滤液黏度值 $\mu$ 。根据公式(1)~(2)计算污泥比阻。

$$S_{RF} = \frac{2bPA^2}{\mu C} \quad (1)$$

$$C = \frac{(1 - \omega_i)(1 - \omega_f)}{\omega_i - \omega_f} \quad (2)$$

式(1)~(2)中, $S_{RF}$ 为污泥比阻,m/kg; $P$ 为抽滤压力,Pa; $A$ 为抽滤面积,m<sup>2</sup>; $\mu$ 为滤液黏度值,Pa·s; $b$ 为直线V-t/V的斜率; $\omega_i$ 为抽滤前污泥含水率,%; $\omega_f$ 为抽滤后泥饼含水率,%。

2)污泥脱水率。污泥脱水率是衡量污泥处理过程中水分去除效率的指标,其值越高,说明污泥脱水效果越好。污泥脱水率测定方法如下:使用DHS16-A型自动快速水分测定仪,分别测定过滤前的原泥含水率 $\omega_1$ 和过滤后的泥饼含水率 $\omega_2$ ,根据公式(3)计算污泥脱水率。

$$D_R = \frac{100(\omega_1 - \omega_2)}{\omega_1(100 - \omega_2)} \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中, $D_R$ 为污泥脱水率,%; $\omega_1$ 为原始污泥含水率,%; $\omega_2$ 为泥饼含水率,%。

3)滤液的污染属性评价。内梅罗指数法是评价水质污染程度的常用方法<sup>[19]</sup>。通常情况下,内梅罗污染指数法能够兼顾评价体系中各污染指标的贡献程度,综合反映水体的整体污染水平,其值越小,说明水质的污染属性越低。内梅罗指数计算公式如(4)~(6)所示。

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (4)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (5)$$

$$P_N = \sqrt{\frac{\bar{P}^2 + P_{\max}^2}{2}} \quad (6)$$

式(4)~(6)中,  $P_i$  为污染因子  $i$  的污染指数, 无量纲;  $C_i$  为污染因子  $i$  的实测质量浓度, mg/L;  $S_i$  为污染因子  $i$  的标准质量浓度, mg/L, 以 SC/T 9101—2007《淡水池塘养殖水排放要求》中各种污染因子的Ⅱ级排放标准限值为标准值;  $\bar{P}$  为样本单因子指数的均值, 无量纲;  $P_N$  为样本的内梅罗指数值, 无量纲;  $P_{\max}$  为样本中单因子指数的最大值, 无量纲。

## 2 结果与分析

### 2.1 无机絮凝剂种类及添加量对污泥脱水性能的影响

T1、T2、T3 和 CK 中, 调理抽滤后泥饼含水率的测定结果如表 3 所示。原泥含水率为  $(92.64 \pm 0.47)\%$ , 对照组 CK 的泥饼含水率整体稳定在  $88.86\% \sim 90.31\%$ , 较原泥有所下降, 但其污泥比阻

均大于  $10 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ , 污泥仍处于难脱水状态, 因此添加蒸馏水对污泥脱水性能的改善效果不显著。而 T1、T2 和 T3 处理的泥饼含水率保持在  $65.36\% \sim 71.80\%$ , 较 CK 组有明显下降, 且污泥比阻也下降明显, 保持在  $1.98 \times 10^{12} \sim 3.99 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ , 说明添加无机絮凝剂能显著改善污泥的抽滤脱水效果。

当无机絮凝剂的种类不同时, 泥饼含水量也存在差异。如表 3 所示, 相同添加量条件下, PSAF 处理的污泥脱水效果均优于 PAS 和 PFS, 污泥脱水率保持在  $82.12\% \sim 85.01\%$ , 污泥比阻保持在  $1.98 \times 10^{12} \sim 3.36 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ 。此外, 在 T1、T2 和 T3 处理中, 随着无机絮凝剂添加量的增加, 污泥比阻均呈现出先下降后上升的趋势, 说明添加适量的无机絮凝剂才能最大程度地发挥其改善污泥脱水性能的作用。由表 3 可知, 添加污泥干物质质量 3% 的 PSAF 对污泥脱水性能的改善最明显。此时, 污泥比阻为  $1.98 \times 10^{12} \text{ m/kg}$ , 较原泥降低  $97.93\%$ , 污泥脱水率为  $85.01\%$ 。

表 3 3 种无机絮凝剂对污泥脱水性能的影响

Table 3 Effect of three inorganic coagulant on dewatering of sludge

处理 Treatment	泥饼含水率/% Moisture content				污泥比阻/( $10^{12} \text{ m/kg}$ ) Specific resistance to filtration			
	CK	T1	T2	T3	CK	T1	T2	T3
A1	$90.31 \pm 0.17a$	$69.23 \pm 0.14d$	$68.27 \pm 0.16a$	$69.26 \pm 0.12c$	$77.97 \pm 0.89a$	$2.86 \pm 0.01c$	$2.26 \pm 0.01c$	$3.06 \pm 0.04c$
A2	$90.26 \pm 0.11a$	$68.35 \pm 0.14e$	$67.41 \pm 0.11b$	$67.82 \pm 0.12d$	$77.29 \pm 1.04a$	$2.34 \pm 0.05d$	$2.08 \pm 0.03d$	$2.87 \pm 0.03c$
A3	$89.68 \pm 0.10a$	$70.04 \pm 0.16c$	$65.36 \pm 0.11e$	$66.69 \pm 0.14e$	$71.61 \pm 0.36b$	$2.93 \pm 0.04c$	$1.98 \pm 0.02e$	$2.20 \pm 0.06d$
A4	$89.63 \pm 0.14a$	$71.06 \pm 0.24b$	$66.23 \pm 0.10d$	$70.11 \pm 0.16b$	$69.10 \pm 0.80b$	$3.21 \pm 0.19b$	$2.81 \pm 0.01b$	$3.51 \pm 0.36b$
A5	$88.86 \pm 0.16a$	$71.69 \pm 0.15a$	$66.56 \pm 0.20c$	$71.80 \pm 0.16a$	$67.93 \pm 0.47c$	$3.92 \pm 0.04a$	$3.36 \pm 0.02a$	$3.99 \pm 0.07a$

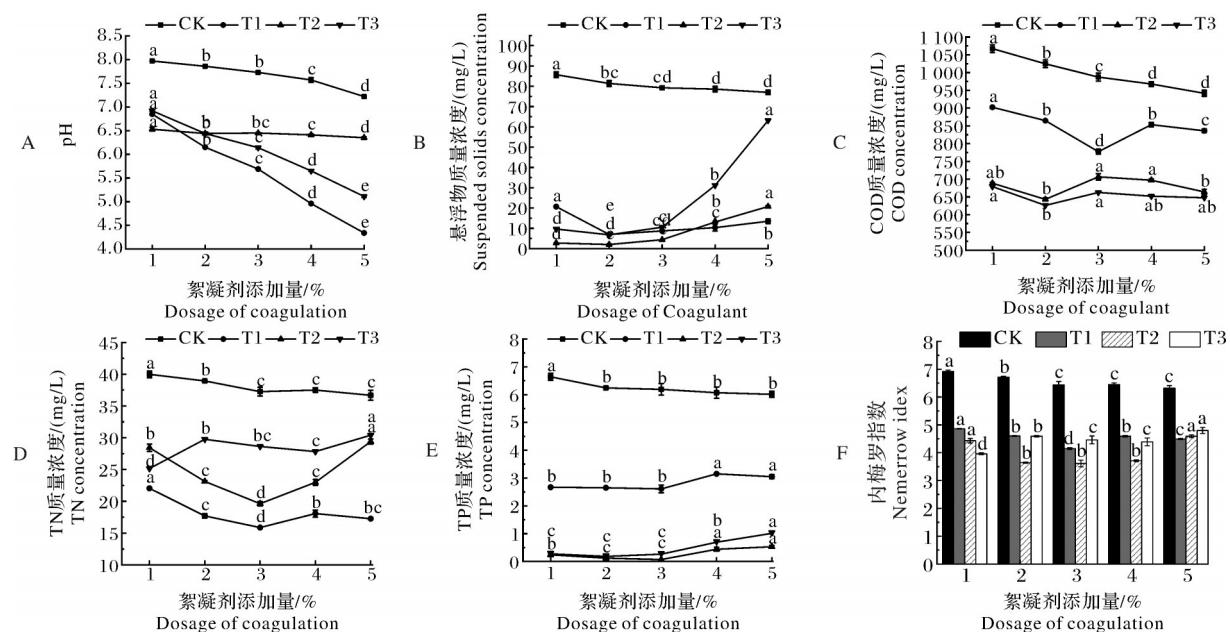
注: A1~A5 分别代表无机絮凝剂添加剂量为污泥干物质质量的 1%、2%、3%、4%、5%; CK 为对照组, T1、T2 和 T3 分别表示 PAS、PSAF 和 PFS 处理; 同一列的小写字母表示组间差异有统计学意义 (LSD 法,  $P < 0.05$ )。Note: A1~A5 represent the dosage of inorganic coagulants as 1%, 2%, 3%, 4%, 5% of the dry mass of sludge respectively. CK is control group, and T1, T2 and T3 represent the treatments of PAS, PSAF and PFS in this table, respectively. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments (LSD,  $P < 0.05$ )。

### 2.2 无机絮凝剂种类及添加量对滤液水质的影响

各组处理下滤液污染因子测定结果如图 2 所示。5 种添加量水平下, 与 CK 相比, 3 种无机絮凝剂都能显著降低滤液的 SS、TN、TP 和 COD 质量浓度, 其中对 SS 和 TP 的降低效果最为明显, 以添加量为 2%~3% 的 PSAF 降低效果最佳, 已达到 SC/T 9101—2007《淡水池塘养殖水排放要求》中的 I 级排放标准。而对 TN、COD 的降低效果略差, 其质量浓度仍远超 SC/T 9101—2007《淡水池塘养殖水排放要求》中的 II 级标准。

由图 2F 可知, 滤液内梅尔指数表现出与上述污

染因子相同的降低趋势, 3 种絮凝剂均显著降低了滤液的污染属性。其中, 添加污泥干物质质量 2% 的 PSAF 时, 滤液的内梅尔指数最小, 表明此时滤液的污染属性最低。综合考虑脱水率、污泥比阻和滤液污染属性, 尽管 3 种无机絮凝剂均能改善污泥的脱水性能, 降低滤液的污染属性, 但 PSAF 对污泥脱水效果的调理作用要优于 PAS 和 PFS, 且在添加量为污泥干物质质量的 2% 时, 对污泥综合调理性能的改善效果最佳。因此, 后续的污泥板框压滤脱水试验选择 PSAF 为污泥的调理剂。



同组中不同小写字母表示差异显著(LSD,  $P<0.05$ ),下同。Not containing the same lowercase letters in same group indicates significant differences(LSD,  $P<0.05$ ).The same as below.

图2 3种无机絮凝剂对污泥滤液污染属性的影响

Fig.2 Effect of three types of inorganic coagulants on the pollutant properties of sludge filtrate

### 2.3 污泥板框压滤脱水试验结果

#### 1)不同压滤工艺参数对污泥脱水效果的影响。

不同压滤工艺参数对污泥板框压滤脱水效果的影响如图3所示,污泥板框压滤脱水后的泥饼含水率较原泥均有显著下降,泥饼含水率在70.98%~75.44%。

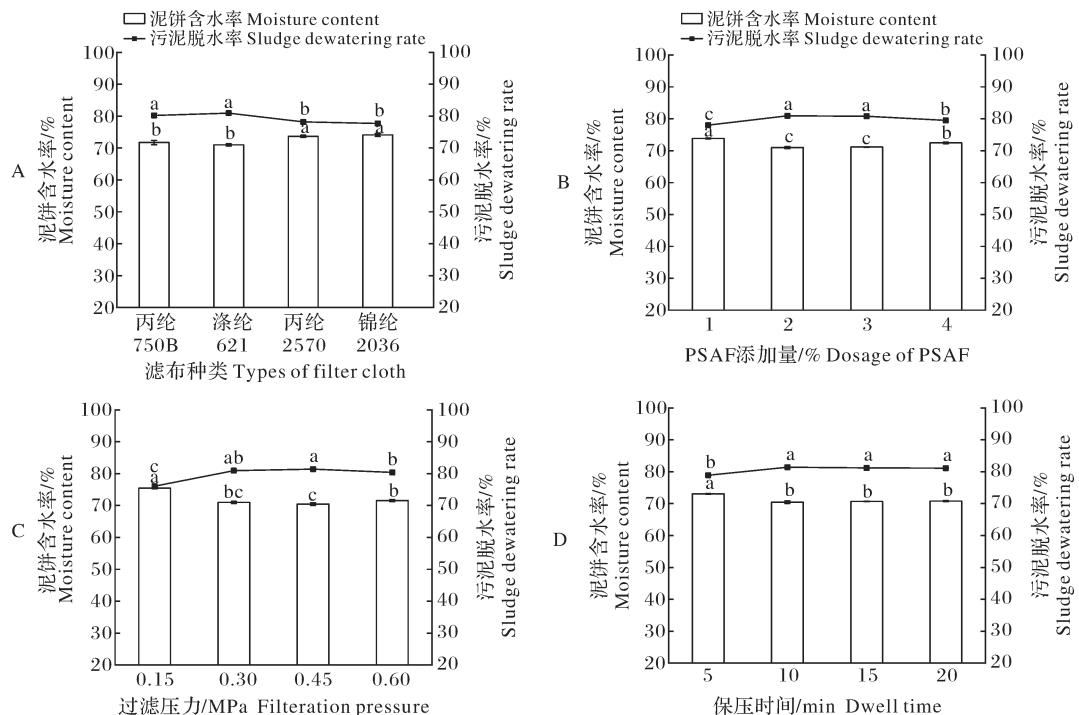


图3 不同压滤工艺参数对污泥脱水效果的影响

Fig.3 Effect of various factors on the dewatering efficiency of sludge

不同滤布种类对污泥脱水效果产生显著差异,采用涤纶621材质的滤布效果优于其他材质,导致泥饼含水率降至70.98%,污泥脱水率达到80.94%。随着无机絮凝剂PSAF添加量的增加,污泥的脱水效果呈现先增后减的趋势,最佳效果在PSAF添加量为污泥干

物质质量的2%时,泥饼含水率为70.98%。过滤压力不同对脱水效果影响显著,随着压力增加,脱水效果先增后减。当过滤压力由0.15 MPa增加到0.3 MPa时,泥饼含水率从75.44%下降至70.98%,污泥脱水率从76.06%上升至80.94%。然而,当过滤压力进一步增加至0.45 MPa时,泥饼含水率为70.46%,污泥脱水率为81.41%,脱水效果与0.3 MPa相比无显著差异。但当过滤压力再增至0.6 MPa时,泥饼含水率为71.56%,污泥脱水率为80.39%,脱水效果显著下降。保压时间由5 min延长至10 min时,泥饼含水率由73.04%下降至70.46%,而由10 min延长20 min时,泥饼含水率无明显变化。因此,PSAF添加量、过滤压力、保压时间均存在最佳范围以获得最佳脱水效果。

2)不同压滤工艺参数对滤液污染属性的影响。由表4可知,不同因素和水平处理对滤液指标的影响存在差异。在保持PSAF添加量不变的情况下,改变

滤布种类、过滤压力和保压时间会导致滤液的pH值和TP质量浓度略微波动,使得滤液的pH值接近中性,维持在6.84~6.90,TP质量浓度在0.21~0.28 mg/L。当滤布种类不同时,滤液的SS、COD和TN质量浓度会有不同程度的变化。使用涤纶621材质的滤布进行压滤时,滤液的COD和SS质量浓度优于其他3种滤布,而TN质量浓度则没有显著差异。随着过滤压力和保压时间的变化,滤液的SS、COD、TN质量浓度和内梅罗指数均呈现先减小后增大的趋势。当其他因素保持不变时,随着无机絮凝剂添加量的增加,滤液的pH值会下降,而其他指标整体呈现上升后下降的趋势。不同处理下滤液的污染属性有所不同,滤液中质量浓度较高的主要污染物为COD和TN,而内梅罗指数维持在4.44~5.30。在其他条件不变的情况下,PSAF添加量分别为2%和3%时的内梅罗指数没有显著差异。

表4 不同压滤工艺参数对滤液污染属性的影响

Table 4 Effect of various factors on the pollutant properties of sludge filtrate

因素 Factor		pH	SS/(mg/L)	COD/(mg/L)	TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	内梅罗指数 Nemerow index
滤布种类 Types of filter cloth	丙纶750B	6.90±0.02b	10.21±0.19f	906.67±35.12a	24.13±1.35e	0.27±0.05b	4.71±0.17d
	涤纶621	6.85±0.02b	8.62±0.44g	866.67±32.15c	26.79±2.96e	0.28±0.03b	4.54±0.15d
	丙纶2570	6.86±0.02b	8.60±0.23g	950.67±6.03a	25.08±0.76e	0.27±0.05b	4.94±0.03d
	锦纶2036	6.87±0.03b	8.12±0.74g	941.67±11.27a	29.80±0.26abcd	0.26±0.02b	4.97±0.34ab
PSAF添加量/% Dosage of PSAF	1	6.99±0.05a	11.02±0.18f	873.33±13.87bc	27.65±0.85abcd	0.40±0.04a	4.62±0.06cd
	2	6.85±0.02bc	8.62±0.44f	866.67±32.15c	26.79±2.96e	0.28±0.03b	4.54±0.15d
	3	6.76±0.02c	8.76±0.15g	845.33±36.12c	25.39±0.81e	0.23±0.01b	4.44±0.18d
	4	6.50±0.02d	23.01±0.74b	931.00±11.27ab	27.27±1.26bcd	0.49±0.02a	4.91±0.07bc
过滤压力/MPa Input pressure	0.15	6.91±0.04ab	8.23±0.07g	858.33±11.87c	29.36±1.05abcd	0.24±0.02b	4.66±0.16cd
	0.30	6.85±0.02b	8.62±0.44f	866.67±32.15c	26.79±2.96e	0.28±0.03b	4.54±0.15d
	0.45	6.85±0.04b	20.39±0.24cde	958.67±5.69a	32.89±1.46ab	0.24±0.02b	5.22±0.20a
	0.60	6.85±0.03b	36.55±0.30a	938.67±7.57a	33.33±1.23a	0.23±0.02b	5.29±0.17a
保压时间/min Dwell time	5	6.86±0.04b	20.55±0.47c	952.00±10.82a	31.99±1.69ab	0.21±0.01b	5.09±0.17ab
	10	6.85±0.02b	8.62±0.44f	866.67±32.15c	26.79±2.96e	0.28±0.03b	4.54±0.15d
	15	6.84±0.02b	19.37±0.55e	989.33±4.93a	33.33±1.38a	0.21±0.02b	5.30±0.05a
	20	6.86±0.02b	19.95±0.17cde	971.67±8.50a	32.89±1.46ab	0.24±0.02b	5.25±0.20a

### 3 讨论

池塘圈养桶底排污泥处理过程中,脱水是回收污泥的重要步骤。本研究以池塘圈养系统中尾水分离塔中的沉降污泥为研究对象,依次开展无机絮凝剂优选试验及污泥压滤脱水工艺参数优化试验。试

验结果表明:当滤布为涤纶621材质、无机絮凝剂采用PSAF且添加量为污泥干物质质量的2%、过滤压力为0.3 MPa、保压时间为10 min时,对污泥的综合调理效果最好,此时污泥脱水率达到80.94%,滤液的内梅罗指数为4.54。

### 3.1 无机絮凝剂对沉降污泥调理效果的影响

试验结果表明,向污泥中投加一定量无机絮凝剂和蒸馏水都能够有效增强污泥的脱水性能。其中,蒸馏水能在小范围内降低泥饼含水率。这可能是由于添加蒸馏水使污泥黏度下降,降低了脱水难度。但与无机絮凝剂相比,蒸馏水作用十分有限<sup>[20]</sup>,这主要与污泥颗粒表面的负电荷、胞外聚合物具有极强的持水性有关。而铝系、铁系的无机絮凝剂(如PAS、PFS和PSAF),能有效破坏这种持水性,改善污泥脱水性能。一方面,金属阳离子能中和污泥颗粒表面的负电荷,减小污泥颗粒间的排斥力<sup>[21]</sup>;另一方面,阳离子增加会增大微生物细胞膜内渗透压,导致细胞膜破裂<sup>[22]</sup>,抑制胞外聚合物的形成;同时,阳离子会和胞外聚合物相互作用,以改变胞外聚合物的吸附特性,促进胞外聚合物形成易于过滤的絮凝体。相对于PAS和PFS,PSAF中金属阳离子含量较高及种类更多,因此,PSAF的使用效果优于PAS和PFS。然而,不同添加量的同种无机絮凝剂对污泥脱水性能的改善效果有差异。污泥的脱水性能随絮凝剂添加量的增加呈现出先增强后减弱的趋势,这也与Du等<sup>[23]</sup>的结论基本符合。刘康安等<sup>[24]</sup>认为,只有投加适量的含有金属离子的无机絮凝剂才能达到最佳的调理效果。一方面,金属阳离子含量过少,对污泥的作用有限;另一方面,过多的金属离子可能会破坏微生物细胞膜,释放细胞质内容物,破坏絮凝体结构稳定性;另外,Yu等<sup>[25]</sup>研究指出,过度的金属阳离子水解会使污泥的胞外聚合物分解,造成大量富含亲水基团的多糖分子溢出,反而抑制了污泥的脱水性能。

此外,由于无机絮凝剂主要通过金属离子的吸附作用和化学反应以去除滤液中的污染物,因此无机絮凝剂的种类对滤液中不同污染物的去除效果有所差异。本试验中,就COD和TN而言,无机絮凝剂对于滤液中TP去除的效果较好。Yu等<sup>[26]</sup>研究表明,污泥中约有10%~30%的无机磷以矿物磷酸盐的形式游离在污泥聚磷菌外,其余形式的磷则分布于细胞内。由于无机絮凝剂中金属离子的作用,细胞内部的磷随污泥颗粒沉降并进入污泥中,细胞外部的无机磷则被捕获,形成难溶性的正磷酸盐<sup>[27]</sup>,最后进入污泥中。本试验中,PSAF和PFS对滤液中总磷的处理效果要优于PAS,这主要与铝元素和铁元素在滤液中存在形式有关。Yang等<sup>[28]</sup>研究表明,使

用Fe(Ⅲ)化合物处理污泥时,污泥中发生了铁循环,出现了Fe(Ⅲ)和Fe(Ⅱ)共存的状态。而滤液中Fe(Ⅲ)和Fe(Ⅱ)不但能捕获污泥中的无机磷,两者间的异化还原反应可能会进一步促进正磷酸盐的产生,因此使用含铁的无机絮凝剂(如PSAF、PFS)对污泥滤液中的TP去除效果要优于PAS。试验中3种无机絮凝剂对滤液中的COD和TN均有一定的去除效果,但是效果并不明显,这与前人的研究相似<sup>[29-30]</sup>。这可能是由于无机絮凝剂中金属离子与污泥中的可溶性有机物及含氮化合物生成的产物与水具有较好的互溶性,造成其对滤液中的COD和TN的去除效果不佳。除以上3种污染物,滤液的SS质量浓度、pH值也与无机絮凝剂的种类及添加量有关。当无机絮凝剂投加过量时,金属离子水解后会降低水体的pH值,并且使污泥颗粒间斥力变大,增大滤液的SS质量浓度。

### 3.2 不同压滤工艺参数对沉降污泥调理效果的影响

污泥压滤脱水过程中,滤布种类、过滤压力以及保压时间对污泥脱水效果及滤液中部分污染物指标有影响。通常情况下,污泥的压滤效率与滤布的材质、编制方式和透气度密切相关。本试验中所采用的丙纶750B和涤纶621均为复丝长纤维滤布,而丙纶2570和锦纶2036为单丝长纤维滤布<sup>[31]</sup>,复丝滤布较单丝滤布具有更大的厚度。此外,涤纶材质的滤布相对于丙纶和锦纶的透气度较低,因此,尽管丙纶2570的孔径更小,但涤纶621材质的滤布在污泥脱水效果方面表现出更高的效率。此外,在合理范围内增大过滤压力和延长保压时间均可以有效提升污泥的脱水效率。但当过滤压力和保压时间超过合理范围时,对污泥脱水效果改善不明显,且滤液表现出更高的污染属性,这可能与污泥本身的特性和过滤介质已达到饱和状态有关,并且,压力过大可能会损坏滤布,使得污泥中的污染物透过滤布进入滤液中,进而降低压滤效果。

综上所述,PAS、PSAF和PFS对尾水分离塔沉降污泥均有一定的调理效果,且随无机絮凝剂添加量的增加,呈现先增强后减弱的趋势。3种无机絮凝剂在合理范围对污泥脱水性能均有良好的改善效果,但综合评估污泥脱水效果及滤液污染属性后,PSAF对污泥的调理效果最优。根据污泥板框压滤脱水试验结果,处理后污泥滤液并非所有指标都达

到了SC/T 9101—2007《淡水池塘养殖水排放要求》中Ⅱ级排放标准,其中主要污染因子为COD和TN。因此,可以考虑使用多种絮凝剂对污泥进行复合调理,并采用如吸附法、生物法等方式对压滤后的污泥滤液进行进一步处理。

## 参考文献 References

[1] LIU X G, SHAO Z Y, CHENG G F, et al. Ecological engineering in pond aquaculture: a review from the whole-process perspective in China[J]. *Reviews in aquaculture*, 2021, 13(2): 1060-1076.

[2] LIU H K, LI H D, WEI H, et al. Biofloc formation improves water quality and fish yield in a freshwater pond aquaculture system[J]. *Aquaculture*, 2019, 506: 256-269.

[3] PARAN B C, JEYAGOBI B, KIZHAKEDATH V K, et al. Production of juvenile mud crabs, *Scylla serrata*: captive breeding, larviculture and nursery production [J/OL]. *Aquaculture reports*, 2022, 22: 101003 [2024-03-30]. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.101003>.

[4] MAO W W, WU S Y, WANG D K, et al. Design of synchronous feeding device for runway-style breeding pond [C]// 2021 International Conference on Electronics, Circuits and Information Engineering (ECIE). January 22-24, 2021. Zhengzhou, China. New York: IEEE, 2021: 108-111.

[5] 贾松鹏,王磊,徐双阳,等.陆基推水集装箱养殖大口黑鲈生长特点分析[J].*水产科学*,2022,41(4):622-628. JIA S P, WANG L, XU S Y, et al. Growth characteristics of largemouth bass *Micropterus salmoides* cultured in land-based container with recycling water[J]. *Fisheries science*, 2022, 41(4): 622-628(in Chinese with English abstract).

[6] 何绪刚,侯杰.池塘圈养模式研究进展[J].华中农业大学学报,2021,40(3):21-29. HE X G, HOU J. Research progress on pond Juanyang mode[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(3): 21-29 (in Chinese with English abstract).

[7] 梁则优,谭鹤群,郑祺,等.3种滤料对池塘圈养尾水处理效果的影响[J].华中农业大学学报,2024,43(2):56-63. LIANG Z Y, TAN H Q, ZHENG Q, et al. Experimental study of filter media filtration for pond captive tailwater treatment[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2024, 43 (2): 56-63 (in Chinese with English abstract).

[8] 朱明,谭鹤群,牛智有,等.我国淡水渔业转型升级路径与工程科技创新重点研究[J].华中农业大学学报,2024,43(2):1-9. ZHU M, TAN H Q, NIU Z Y, et al. Research on transformation and upgrading path of freshwater fisheries and key directions of engineering science and technology innovation in China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2024, 43(2):1-9 (in Chinese with English abstract).

[9] 周小荻,李金能,王洁,等.固液分离塔-垂直流人工湿地技术处理池塘圈养尾水的应用研究[J].*水生生物学报*,2023,47(11):1798-1806. ZHOU X D, LI J N, WANG J, et al. Application study of solid-liquid separation tower coupled vertical flow constructed wetland in pond-cultivated tailwater[J]. *Acta hydrobiologica sinica*, 2023, 47 (11) : 1798-1806 (in Chinese with English abstract).

[10] 王琳,李德彬,刘子为,等.污泥处理处置路径碳排放分析[J].*中国环境科学*,2022,42(5):2404-2412. WANG L, LI D B, LIU Z W, et al. Analysis on carbon emission from sludge treatment and disposal [J]. *China environmental science*, 2022, 42 (5):2404-2412 (in Chinese with English abstract).

[11] 许金泉,程文,耿震.隔膜式板框压滤机在污泥深度脱水中的应用[J].*给水排水*,2013,49(3):87-90. XU J Q, CHENG W, GENG Z. Application of the diaphragm type plate and frame filter press on advanced sludge dewatering[J]. *Water & wastewater engineering*, 2013, 49 (3) : 87-90 (in Chinese with English abstract).

[12] XIAO K K, ABBT-BRAUN G, HORN H. Changes in the characteristics of dissolved organic matter during sludge treatment: a critical review [J/OL]. *Water research*, 2020, 187: 116441 [2024-03-30]. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116441>.

[13] LIN W, LIU X, DING A, et al. Advanced oxidation processes (AOPs)-based sludge conditioning for enhanced sludge dewatering and micropollutants removal: a critical review [J/OL]. *Journal of water process engineering*, 2022, 45: 102468 [2024-03-30]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115938>.

[14] WÓJCIK M, STACHOWICZ F. Influence of physical, chemical and dual sewage sludge conditioning methods on the dewatering efficiency[J]. *Powder technology*, 2019, 344: 96-102.

[15] WU W, LI X S, ZHOU B, et al. Impacts of floc breakage on dewaterability of chemically conditioned sludges and implications on practical conditioning strategies [J/OL]. *Chemical engineering journal*, 2023, 459: 141626 [2024-03-30]. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141626>.

[16] 王东星,唐奔锴,伍林峰.疏浚淤泥化学絮凝-真空预压深度脱水效果评价[J].*岩土力学*,2020,41(12):3929-3938. WANG D X, TANG Y K, WU L F. Evaluation on deep dewatering performance of dredged sludge treated by chemical flocculation-vacuum preloading [J]. *Rock and soil mechanics*, 2020, 41(12):3929-3938 (in Chinese with English abstract).

[17] 吴秀,方迪,危亚云,等.热活化过一硫酸盐调理强化厌氧消化污泥脱水的研究[J].*环境科学学报*,2021,41(11):4547-4553. WU X, FANG D, WEI Y Y, et al. Improved dewaterability of anaerobically digested sewage sludge by thermally activated peroxyomonosulfate [J]. *Acta scientiae circumstantiae*, 2021, 41(11):4547-4553 (in Chinese with English abstract).

[18] 李世汨,陈文峰,夏新星,等.低碱性环保固化剂调理淤泥的板框压滤脱水试验研究[J].*长江科学院院报*,2023,40(3):46-51. LI S M, CHEN W F, XIA X X, et al. Experimental

study on dewatering of plate-and-frame filter press for sludge treatment with a low-alkaline environmental modifier [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40 (3): 46-51 (in Chinese with English abstract).

[19] 吴彦,平巍,王翔,等.稻壳粉添加剂提高污泥的脱水效果研究[J].农业工程学报,2019,35(2):229-234.WU Y, PING W, WANG X, et al. Study on dewatering effect of sewage sludge by adding rice husk flour [J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35 (2) : 229-234 (in Chinese with English abstract).

[20] 吴佳欢,张岳琦,朱明,等.污泥调理脱水后残余水分存在形态及空间分布[J].环境工程,2023,41(3):42-48.WU J H, ZHANG Y Q, ZHU M, et al. Water combination types and spatial distribution of residual water in sludge cake [J]. Environmental engineering, 2023, 41(3): 42-48 (in Chinese with English abstract).

[21] 秦怀婷,曾小林,刘程琳.聚合硫酸铁的制备、改性及应用研究进展[J].工业水处理,2023,43(7):53-61.QIN H T, ZENG X L, LIU C L. Research progress on preparation, modification, and application of polyferric sulfate [J]. Industrial water treatment, 2023, 43(7): 53-61 (in Chinese with English abstract).

[22] 母锐敏,王曦晗,马桂霞,等.藻类胞外聚合物的产生因素及其在污水处理和生物絮凝方面的应用[J].微生物学通报,2023,50(3):1324-1336.MU R M, WANG X H, MA G X, et al. Factors influencing the production of algal extracellular polymers and their application in wastewater treatment and biological flocculation [J]. Microbiology China, 2023, 50 (3) : 1324-1336 (in Chinese with English abstract).

[23] DU Y J, CAO B D, ZHANG W J, et al. Improvement of wastewater sludge dewatering properties using polymeric aluminum-silicon complex flocculants conditioning: Importance of aluminum/silicon ratio [J/OL]. Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects, 2017, 530: 134-145 [2024-03-30]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.07.042>.

[24] 刘康安,李运宝,杨凡,等.铁铝盐复合硅酸钾调理污泥脱水性能试验研究[J].应用化工,2020,49(2):321-325.LIU K A, LI Y B, YANG F, et al. Experimental study on dewaterability by ferric salt and aluminum salt combined with potassium silicate conditioning sludge [J]. Applied chemical industry, 2020, 49(2): 321-325 (in Chinese with English abstract).

[25] YU W B, WEN Q Q, YANG J K, et al. Novel insights into extracellular polymeric substance degradation, hydrophilic/hydrophobic characteristics, and dewaterability of waste activated sludge pretreated by hydroxylamine enhanced Fenton oxidation [J]. ACS ES&T engineering, 2021, 1(3):385-392.

[26] YU B H, LUO J H, XIE H H, et al. Species, fractions, and characterization of phosphorus in sewage sludge: a critical review from the perspective of recovery [J/OL]. Science of the total environment, 2021, 786: 147437 [2024-03-30]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147437>.

[27] 张伟军,原浩,张彧,等.污泥稳定化过程中磷的转化规律和生物有效性[J].安全与环境工程,2022,29(5):212-222.ZHANG W J, YUAN H, ZHANG Y, et al. Transformation and bioavailability of phosphorus in the process of sludge stabilization [J]. Safety and environmental engineering, 2022, 29 (5): 212-222 (in Chinese with English abstract).

[28] YANG Y F, ZHANG Y B, LI Y, et al. Nitrogen removal during anaerobic digestion of wasted activated sludge under supplementing Fe(Ⅲ) compounds [J]. Chemical engineering journal, 2018, 332:711-716.

[29] 王瑞,杨福兴,曲广森.絮凝剂对活性污泥降解有机物及除磷的影响[J].水处理技术,2021,47(2):54-58. WANG R, YANG F X, QU G M. Effect of flocculant on organic matter degradation and phosphorus removal by activated sludge [J]. Technology of water treatment, 2021, 47 (2) : 54-58 (in Chinese with English abstract).

[30] LIANG H, SHAN S J, LI X Y, et al. Preparation of cationic aggregates derived from sewage sludge for efficient capture of organic matter [J/OL]. Chemosphere, 2023, 333: 138909 [2024-03-30]. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138909>.

[31] ZERIN I, DUTTA E. A review article on applications of filter cloth [J]. International journal of clothing science, 2018, 5(1): 1-6.

## Plate-and-frame pressured filtration of sediment sludge from solid liquid separator in mode of pond captive farming

ZHENG Qi<sup>1,2</sup>, TAN Hequn<sup>1,2</sup>, HE Xugang<sup>2,3</sup>, ZHANG Yiren<sup>1,2</sup>, XIA Chengxing<sup>1,2</sup>

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Aquaculture Facility Engineering, Wuhan 430070, China;

3. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**Abstract** The method of “coagulation+plate and frame filtration” was used to conduct dehydration experiments to solve the problem of difficulty in handling high moisture in the sediment sludge from the solid liquid separator in the mode of pond captive farming. Experiments on coagulation of sludge were conducted with types and dosage of three inorganic coagulants including polyaluminum sulfate (PAS), poly silicate aluminum ferric (PSAF), and poly ferric sulfate (PFS) as experimental factors, and the specific resistance of sludge and pollution properties of sludge filtrate as experimental indexes. Experiments on the dehydration of sediment sludge with plate and frame pressured filtration were conducted with the type of filter cloth, the optimal dosage of the selected coagulant, the pressure of filtration and the time of holding pressure as experimental factors, and the dehydration rate of sludge and pollution properties of filtrate as experimental indexes. The results showed that PAS, PSAF, and PFS all had significant effects on conditioning sludge. When the dosage of PSAF was 2% of the dry matter mass of sludge, the effect was optimal. At this time, the specific resistance of sludge was reduced by 97.43%, to  $2.08 \times 10^{12}$  m/kg, with the Nemerow index of the filtrate of 3.61. Plate and frame pressured filtration had good performance of dehydration on the sludge conditioned with PSAF. The dehydration effect of sediment sludge with plate and frame pressured filtration was good, with the moisture in sludge reduced to 70.98%, the dehydration rate reaching 80.94%, and the Nemerow index in the filtrate being 4.54 when the filter cloth was made of polyester 621, the dosage of PSAF was 2% of the dry matter mass of sludge, the pressure of filtration was 0.3 MPa, and the time of holding pressure was 10 minutes. It is indicated that the approach of plate and frame pressured filtration after PSAF conditioning can be used as an effective dehydration technique for sediment sludge in the mode of pond captive farming to achieve the goal of reducing the volume of sludge to be convenient for transportation and storage.

**Keywords** mode of pond captive farming; solid liquid separator; sediment sludge; inorganic coagulants; performance of dehydration; Nemerow index

(责任编辑:陆文昌)