

河道底泥性质 对絮凝剂脱水固结效果分析研究

耿晓明, 秦 亮, 王曦鹏, 蔡 敏, 黄苏宁

(南京市秦淮河河道管理处, 江苏 南京 210012)

摘要: 为探究疏浚工程中河道底泥理化性质对絮凝剂脱水固结效果的影响, 通过改变底泥粒度大小、pH值、氮磷污染程度和有机质含量, 研究了其对不同絮凝剂脱水固结效果的影响。

关键词: 底泥脱水; 絮凝剂; 脱水固结; 疏浚

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2024)10-0066-0007

Analysis and study on the dehydration and consolidation effect of flocculant on the properties of river sediment

GENG Xiaoming, QIN Liang, WANG Xipeng, CAI Min, HUANG Suning

(Nanjing Qinhuai River Administration Office, Nanjing 210012, China)

Abstract: To investigate the influence of physicochemical properties of river sediment on the dehydration and consolidation effect of coagulants in dredging projects, the effects of different coagulants on dehydration and consolidation effects were studied by changing sediment particle size, pH value, nitrogen and phosphorus pollution level, and organic matter content.

Key words: dehydration of sediment; flocculant; dehydration and consolidation; dredge

底泥是为底栖生物、微生物及水生生物提供生活场所及营养物质, 对水生态系统中物质及能量的循环有重要作用^[1]。但是, 随着城市化进程的加快, 河道淤积十分严重, 导致河床抬高, 通航能力下降, 水环境质量下降^[2]。加强河道疏浚是水利工程的当务之急, 但是如何合理处置疏浚后的河道淤泥是全世界面临的环境问题, 疏浚河道淤泥量大而复杂, 如果处置不当, 不仅会占用大量土地, 还会造成二次污染^[3], 因此, 为大量疏浚河道底泥寻找一条环境

友好型出路是首先要解决的问题。

絮凝脱水技术是指在底泥中添加絮凝剂将底泥中的固相颗粒聚集起来, 形成较大的絮团, 使泥浆体系脱稳, 最终絮团发生沉降, 达到脱水的目的^[4]。化学絮凝法工艺流程简单, 脱水效率较高, 费用较低, 在实际工程中得到广泛应用。目前针对底泥絮凝脱水技术的相关研究, 大部分研究集中在絮凝剂的制备、改性以及絮凝剂对底泥理化性质的影响, 底泥本身理化性质对絮凝剂的脱水固结效果影响

收稿日期: 2024-05-12

作者简介: 耿晓明(1987—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水土资源管理工作。E-mail: 363162823@qq.com

研究相对较少。外秦淮河主城区段长 15.6 km,上游起自运粮河口,流经南京主城秦淮、雨花、建邺和鼓楼这 4 个区,最后汇入长江。外秦淮河作为城市内河,沿途接纳大量的生活污水与工农业废水,超过其污染负荷时,将会造成水体污染。2021—2023 年,外秦淮河主城区段实施了清淤工程,本文结合南京市外秦淮河底泥疏浚工程实例,通过改变底泥理化性质,探究底泥理化性质对不同絮凝剂脱水固结效果的影响,以期对不同类型的底泥寻找合适的絮凝剂,为后续清淤工程中淤泥的处理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验淤泥来自南京市外秦淮河中和桥至三汊河口闸段,将采集的样品进行自然风干,清除明显的杂质后,保存备用。絮凝药剂采用聚合氯化铝(PAC)、阴离子聚丙烯酰胺(APAM)、阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)和壳聚糖(CS)4种絮凝剂。

1.2 絮凝脱水固结试验

试验主要内容包括底泥粒度、pH 值、氮磷污染程度和有机质含量对不同絮凝剂脱水固结效果的影响。絮凝剂分成 4 组,分别是聚铝/阴离子聚丙烯酰胺(PAC/APAM)、聚铝/阳离子聚丙烯酰胺(PAC/CPAM)、聚铝/壳聚糖(PAC/CS)和壳聚糖(CS)。

2 结果与分析

2.1 底泥粒度对絮凝剂脱水固结效果的影响

如图 1 所示,当絮凝剂剂量相同时,底泥粒径小

于 16 μm 颗粒占比越小,脱水固结效果越好。当底泥粒径小于 16 μm 颗粒占比在 66.25% 以下时,各组絮凝剂对底泥的脱水固结效果相近,泥饼含水率都在 33.38%~35.68% 之间,底泥过滤比阻均达到易脱水水平(比阻小于 $9 \times 10^{10} \text{ cm/g}$)。

随着细颗粒底泥比例的增大,泥饼含水率和过滤比阻迅速升高,当底泥粒径小于 16 μm 颗粒占比大于 70% 时,PAC/APAM 和 PAC/CPAM 的脱水固结效果减弱程度更大,泥饼含水率和比阻值均处于 PAC/CS 和 CS 之上。主要原因在于絮凝剂本身性质的不同,APAM 和 CPAM 的分子量远大于 CS,因此,其吸附架桥絮凝团聚底泥颗粒的能力要大于 CS,形成的絮体体积更大。但随着底泥中细颗粒组分比例的增大,PAM 絮凝剂形成的大絮体对水分的包裹性更强,反而不利于絮体中水分的排出。而 CS 的表面活性基团更多,电中和能力更强^[5],形成的絮体小但密实,更利于水分的排出。

2.2 底泥 pH 值对絮凝剂脱水固结效果的影响

如图 2 所示,对于 PAC/APAM 和 PAC/CPAM,底泥 pH 值介于 6~8 的酸碱范围内,脱水固结效果几乎不受 pH 的影响,都达到了易脱水的水平,同时 PAC/APAM 的脱水固结效果要略强于 PAC/CPAM。当底泥 pH 值小于 5 或大于 9 时,各组的含水率和比阻均开始有升高的趋势,当底泥 pH 值达到 10 时,絮凝剂的脱水固结效果最差。这是因为在酸性环境下,PAC 主要以 Al^{3+} 及小部分羟基配合物 $[\text{Al}_3(\text{OH})_3]^{7+}$ 的形态存在,配位水解能力较弱,较难形成稳定絮体;在碱性环境下,PAC 主要以 $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ 的形态存在,与带负电荷的底泥颗粒相斥,不利于底泥絮体

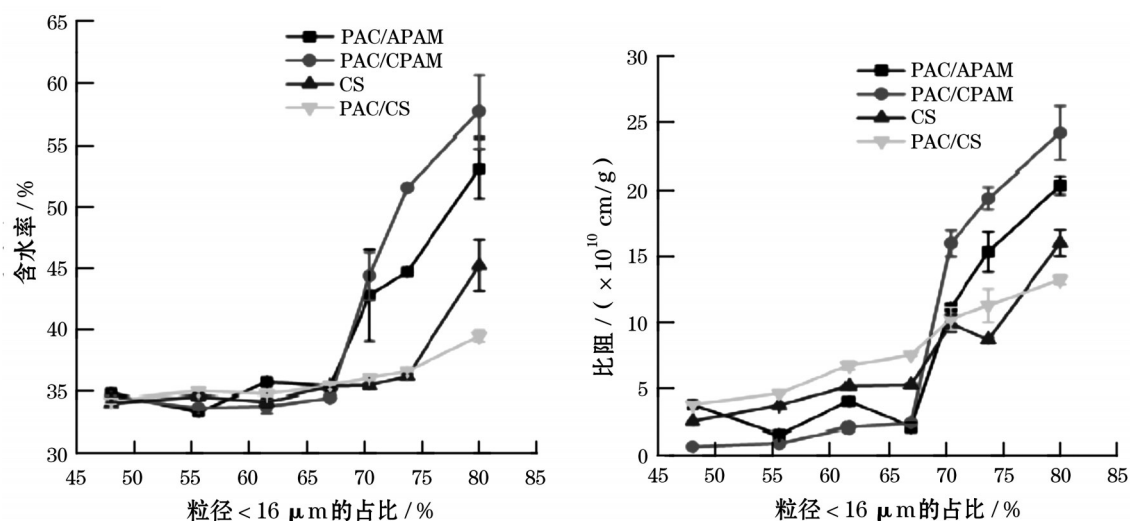


图 1 底泥粒度对絮凝剂脱水效果的影响

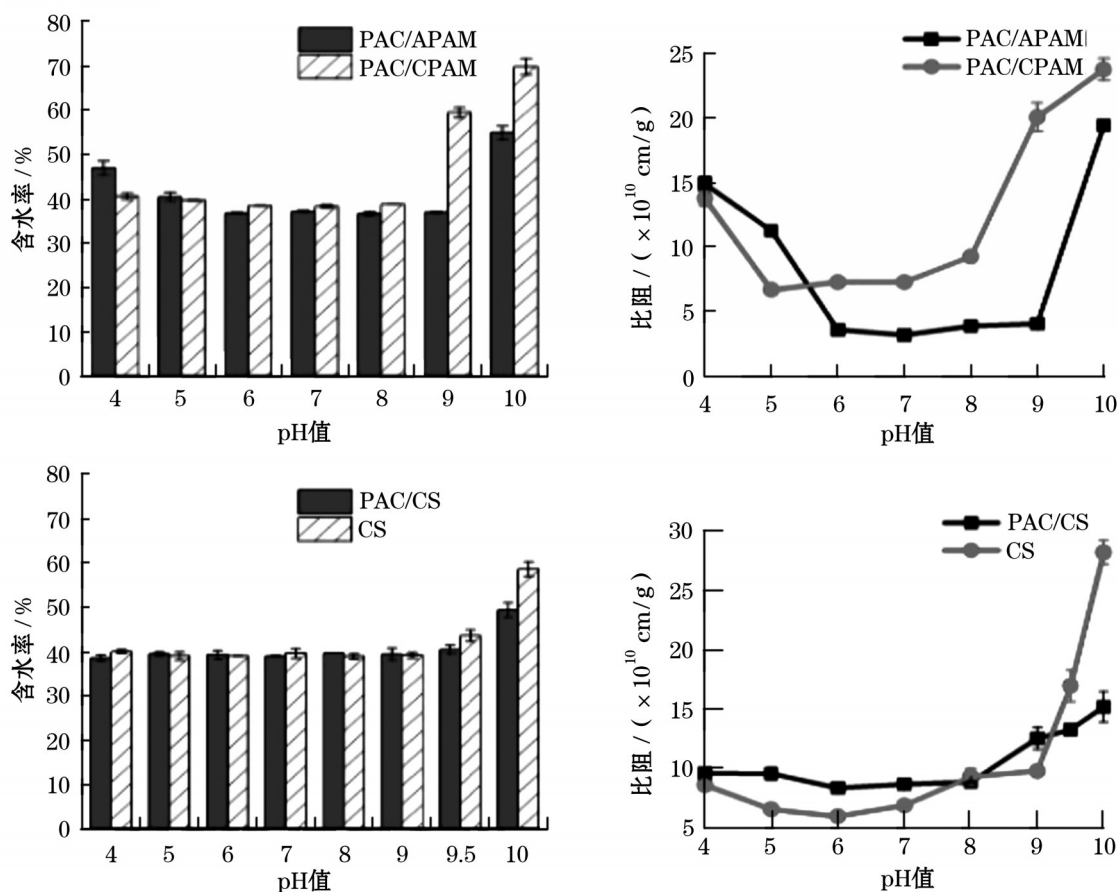


图2 底泥pH值对絮凝剂脱水效果的影响

的生成^[6]。

对于PAC/CS和CS,底泥pH值对絮凝剂的脱水固结效果影响较小。底泥pH值介于4~9的酸碱范围内,同等絮凝剂剂量之下,两组泥饼的含水率基本持平,维持在38.52%~39.95%之间。当底泥pH值大于9.5时,絮凝剂的脱水固结效果效果大幅减弱。主要是因为CS易溶于弱酸性环境,并且产生质子化氨基,可以吸附并中和带负电荷的底泥颗粒,提高絮凝能力^[7];而在碱性条件下CS质子化程度下降,不利于底泥颗粒的絮凝团聚。

2.3 底泥氮磷污染程度对絮凝剂脱水固结效果的影响

如图3中所示,在絮凝剂剂量相同的情况下,各组泥饼含水率差异不大,基本都处于35.10%~37.79%的范围内。PAC/APAM和PAC/CPAM的底泥过滤比阻均降低到易脱水水平,底泥不同程度N、P污染的因素并未对PAC/APAM和PAC/CPAM的脱水固结效果产生负面影响。

对于PAC/CS和CS,最终泥饼含水率基本持平,但底泥过滤比阻存在一定差异。尤其是PAC/CS底

泥比阻,随着底泥N、P污染程度的升高,底泥过滤比阻有升高趋势。CS单独调理效果较好,基本不受底泥N、P污染程度的影响。

2.4 底泥有机质含量对絮凝剂脱水固结效果的影响

对照组原始底泥在PAC/APAM(500/30)mg/L的剂量下,泥饼含水率为38.50%,底泥过滤比阻为 8.66×10^{10} cm/g。从图4可以看出,在低有机质条件下,PAC/APAM泥饼含水率和过滤比阻分别为63.51%和 29.61×10^{10} cm/g,相比于未添加有机质的对照组增大了约1.7倍和3.4倍,说明随着底泥中有机质含量的提高,底泥絮凝脱水固结效果受到显著影响。而当APAM剂量增加至50 mg/L时,泥饼含水率降为37.15%,比阻降至 7.7×10^{10} cm/g。在中有机质条件下,PAC剂量需进一步提高至750 mg/L,APAM剂量为50 mg/L时,比阻可降至 2.27×10^{10} cm/g,泥饼含水率达到37.82%。在高有机质条件下,PAC剂量需进一步提高至1 000 mg/L,APAM在50 mg/L添加量下,过滤比阻达到 8.5×10^{10} cm/g,脱水泥饼含水率可降至39.66%。

对照组原始底泥在PAC/CPAM(500/40)mg/L的

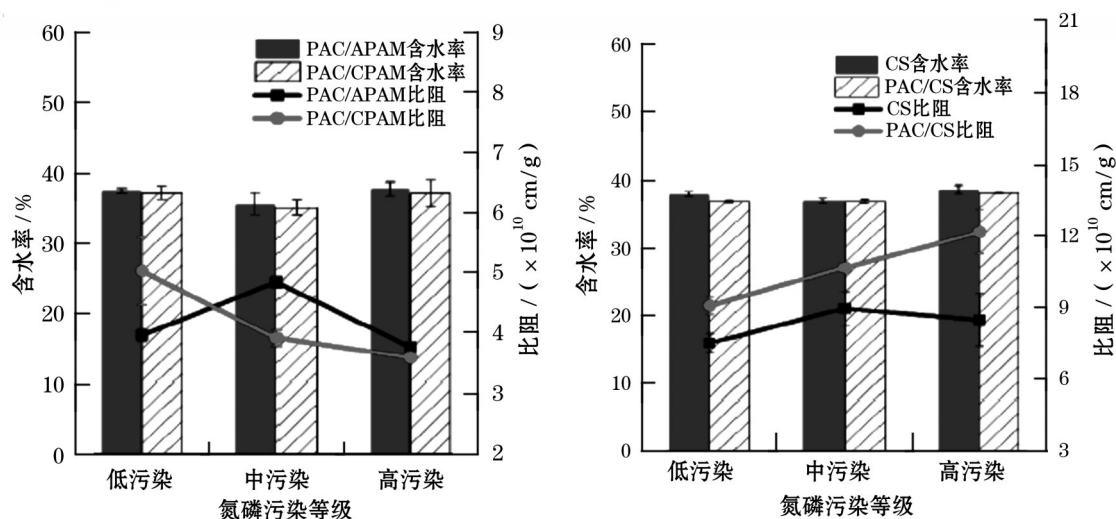


图3 底泥氮磷污染程度对絮凝剂脱水效果的影响

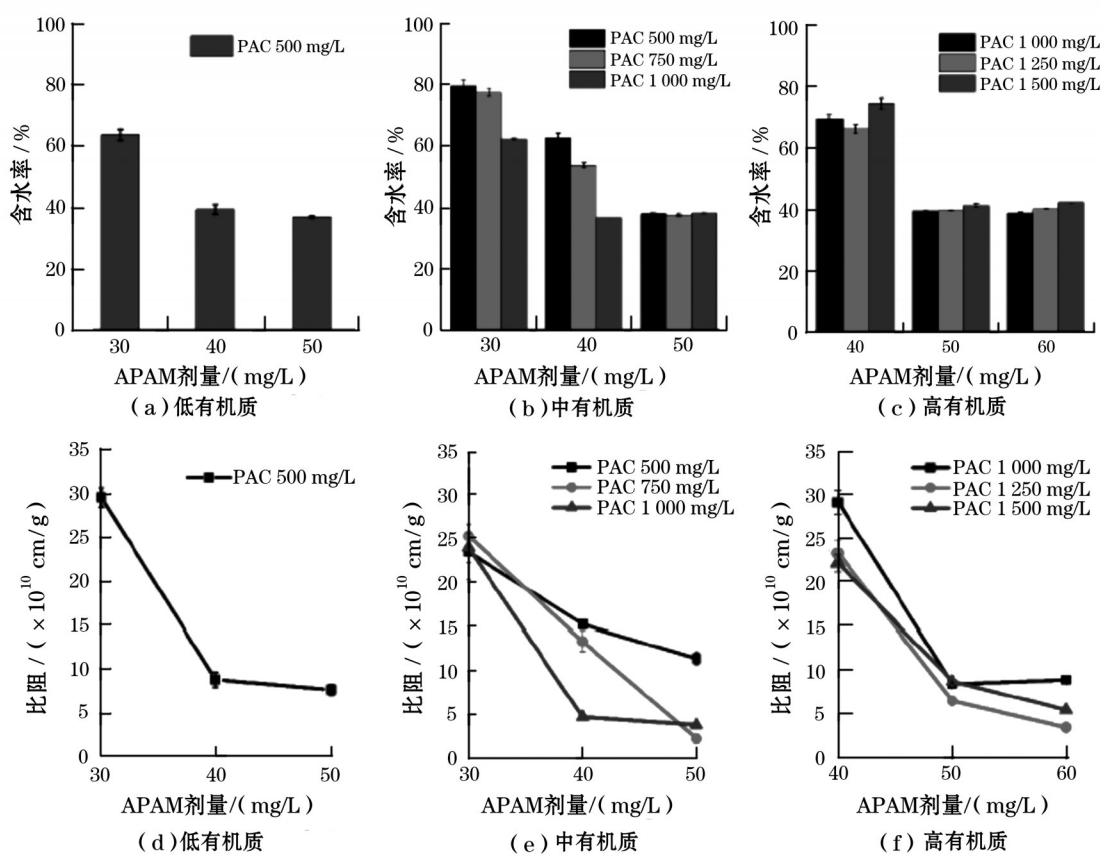


图4 底泥有机质含量对PAC/APAM脱水固结效果的影响

剂量下,底泥过滤比阻为 6.85×10^{10} cm/g,泥饼含水率为36.68%。如图5所示,随着底泥中有机质含量增加,PAC/CPAM的脱水固结效果显著降低。在低有机质条件下,当PAC剂量在500 mg/L时,CPAM从

40~60 mg/L,底泥过滤比阻削减幅度较小,很难达到易脱水水平。如果继续提高CPAM的投加量,到一定程度后反而会增大底泥的黏度,增大脱水难度。在中有机质条件下,当PAC在1 250 mg/L,CPAM在

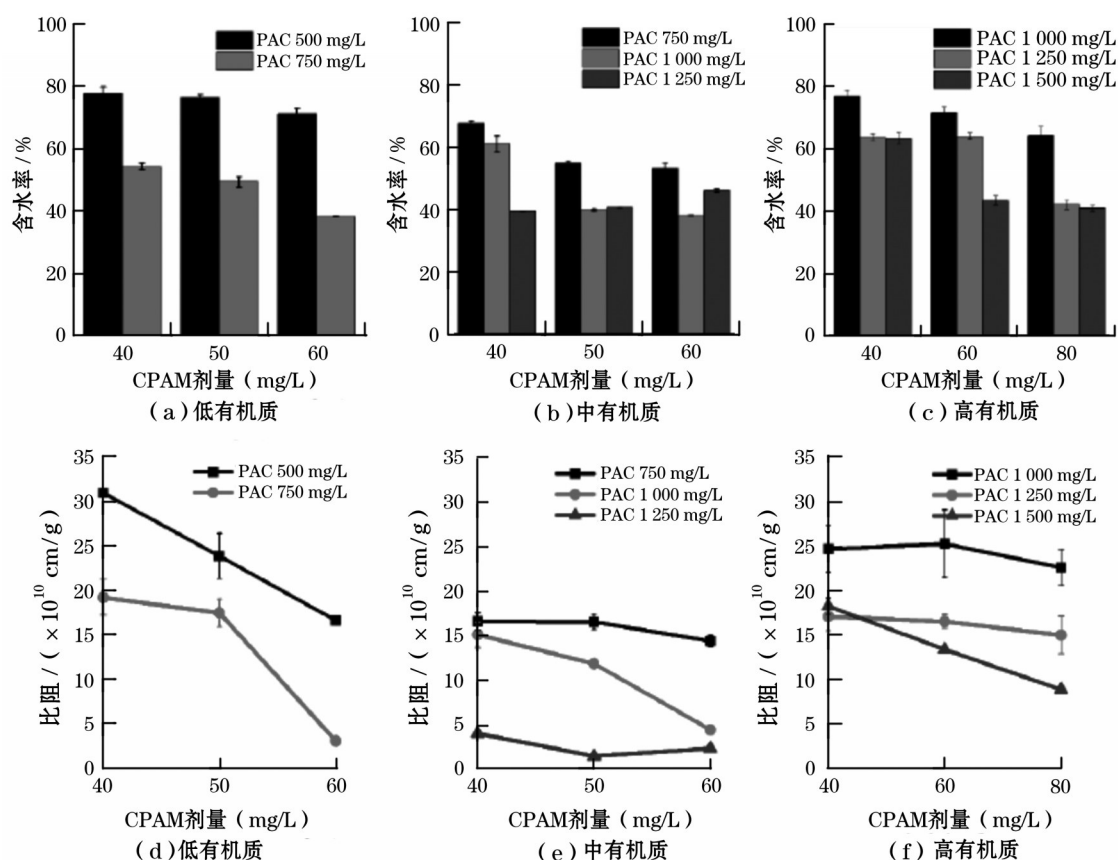


图5 底泥有机质含量对PAC/CPAM脱水固结效果的影响

40~60 mg/L的剂量范围内,底泥过滤比阻均达到了易脱水的水平标准之下,泥饼含水率基本持平,且随着CPAM剂量的进一步增大,泥饼含水率有增大的趋势,由最低39.56%升高至46.18%。因此,当过滤比阻降低至合适水平时,进一步增大CPAM的投加量,会恶化脱水泥饼的含水率。随着底泥有机质含量的进一步提高,底泥脱水难度进一步增大。当PAC剂量增加至1 500 mg/L,CPAM剂量为80 mg/L,底泥过滤比阻刚达到易脱水水平标准之下,脱水泥饼含水率为40.86%。

对照组原始底泥,在CS(150 mg/L)的剂量下可以达到易脱水水平,底泥比阻和含水率分别降低至 8.93×10^{10} cm/g和40.54%。当底泥有机质升高时,底泥脱水固结效果迅速下降。随着CS剂量的进一步逐渐增加至250 mg/L,底泥过滤比阻仍未达到易脱水水平,说明随着底泥有机质含量的升高,CS单独调理对底泥的脱水性能的改善是有限的。

如图6所示,CS剂量在150 mg/L的条件下,随着PAC投加量的增大,底泥过滤比阻和含水率显著降低。在PAC/CS(500/150) mg/L的剂量下,低有机质底泥比阻已降低至易脱水水平,泥饼含水率为

41.18%。当PAC投加量进一步增大时,泥饼含水率不能继续降低,反而呈现小幅度增大的趋势,说明500 mg/L的PAC和CS已发挥合适的电中和作用,更大的PAC投加量既增加脱水成本也不利于达到最优的泥饼含水率。对于中有机质底泥,PAC最佳投加量为1 000 mg/L,进一步增大投加量对底泥比阻影响不大反而会导致泥饼含水率的升高。PAC与CS的联合调理对高有机质底泥的脱水能力提升有限,在PAC 1 500 mg/L的剂量下,泥饼含水率仅降低至44.28%,比阻仍未达到易脱水水平。

表1所示,随着底泥有机质含量的升高,PAC剂量需要对应提升,在PAC/APAM,低、中、高有机质含量底泥所需PAC剂量从500 mg/L逐步升高至1 000 mg/L才能达到适宜的脱水固结效果,PAC/CPAM和PAC/CS也呈现相同的规律。但综合PAC与3种有机絮凝剂的联合的泥饼相关数据结果,对于底泥中有机质含量的变化,PAC/APAM的泥饼含水率和过滤比阻影响程度最小。

3 结 论

本研究以南京市外秦淮河底泥疏浚工程为背

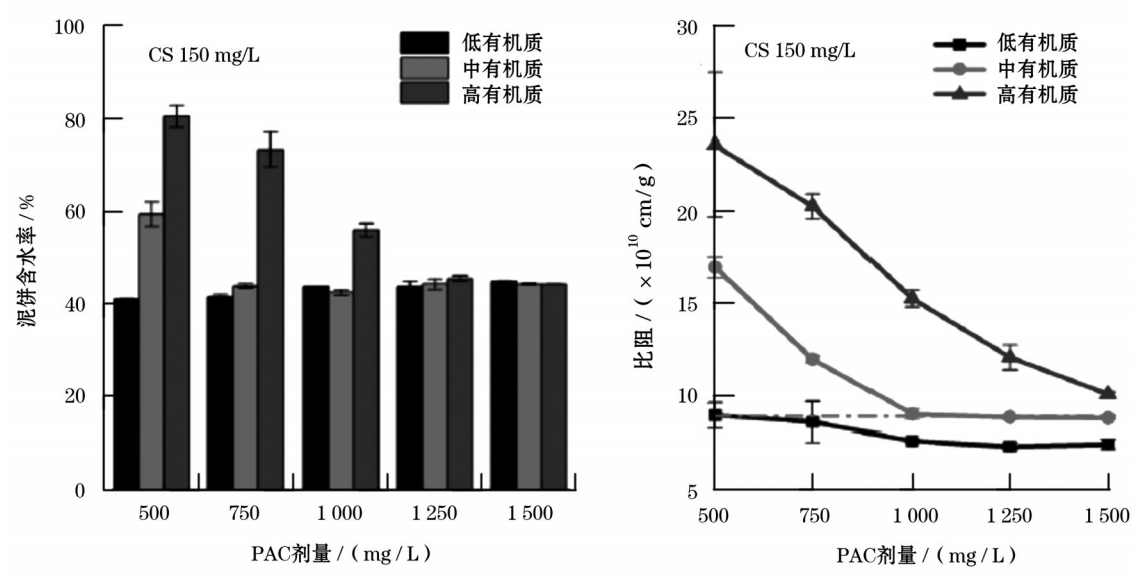


图6 底泥有机质含量对PAC/CS脱水固结效果的影响

表1 不同有机质底泥最优絮凝剂剂量脱水固结效果汇总

絮凝剂	组别	剂量/(mg/L)	泥饼含水率/%	比阻/(×10 ¹⁰ cm/g)
PAC/APAM	Control	500/30	38.50	8.66
	低有机质	500/50	37.15	7.70
	中有机质	750/50	37.82	2.27
	高有机质	1 000/50	39.66	8.50
PAC/CPAM	Control	500/40	36.68	6.85
	低有机质	750/60	38.24	3.12
	中有机质	1 000/60	38.08	4.37
	高有机质	1 500/80	40.86	8.93
PAC/CS	Control	150	40.54	8.93
	低有机质	500/150	41.18	8.98
	中有机质	1 000/150	42.48	9.05
	高有机质	1 500/150	44.28	10.10

景实例,通过改变底泥理化性质,探究底泥理化性质对不同絮凝剂脱水固结效果的影响。结论如下:

- (1)底泥的粒径增大,PAC/APAM、PAC/CPAM、PAC/CS和CS的泥饼含水率和过滤比阻都迅速升高,脱水固结效果都下降,与PAC/APAM和PAC/CPAM相比,PAC/CS和CS脱水固结效果更好。
- (2)底泥的pH值对于絮凝剂的脱水固结效果影响较大,对于PAC/APAM和PAC/CPAM来说,底泥的pH值介于6~8之间,脱水固结效果最好;对于PAC/CS和CS来说,底泥的pH值介于4~9之间,脱

- 水固结效果最好。
- (3)底泥氮磷污染程度对于絮凝剂的脱水固结效果影响很小,对于PAC/APAM、PAC/CPAM和CS来说,底泥不同程度N、P污染程度并未对其脱水固结效果产生影响;对于PAC/CS来说,底泥不同程度N、P污染程度并对其脱水固结效果影响很小。
- (4)底泥有机质含量对絮凝剂的脱水固结效果影响与絮凝剂的剂量有很大关系,随着底泥有机质含量的升高,PAC剂量需要对应提高,在PAC/APAM,低、中、高有机质含量底泥所需PAC剂量从

500 mg/L逐步升高至1 000 mg/L才能达到适宜的脱水固结效果,PAC/CPAM和PAC/CS也呈现相同的规律。从效果来看,对于底泥中有机质含量增加,PAC/APAM的泥饼含水率和过滤比阻受其影响程度最小。

参考文献:

- [1] 毕磊,邱凌峰. 污染底泥修复治理技术[J]. 中国环保产业,2010(11):32-35.
- [2] YUKE W, TIANCAI C, JINGGAN S, et al. Experimental study on static characteristics of the Yellow River silt under (triaxial) consolidated undrained conditions [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2023, 41 (3): 285-294.

- [3] YUKE W, GAN W, YUKUAI W, et al. Recycling of dredged river silt reinforced by an eco-friendly technology as microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) [J]. Soils and Foundations, 2022, 62 (6): 1012-1016.
- [4] 杨磊. 絮凝体系用于环保疏浚底泥脱水及其温度干扰机理研究[D]. 天津:天津科技大学,2020.
- [5] YANG R, LI H, HUANG M, et al. A review on chitosan-based flocculants and their applications in water treatment [J]. Water Research, 2016 (95): 59-89.
- [6] 王郑,仲米贵,黄雷,等. 聚合氯化铝-壳聚糖复合絮凝剂对活性蓝19的脱色研究[J]. 工业水处理, 2017, 37 (9): 21-25.
- [7] 郭康鹰. 造纸污泥基有机高分子絮凝剂制备、效能及作用机制研究[D]. 济南:山东大学,2021.

(上接第65页)

结果,最大水位差为2.95 m,这意味着在正常运行情况下,闸站能够抵御2.95 m的水位差而不发生渗漏。

4 结 论

本文针对河闸安全监测可视化程度不足及防洪预警分析能力不够的问题,设计了河闸安全监测分析预警系统的总体框架和技术架构。文章深入剖析了网关服务结构和处理机制,构建了三维可视化的实现方法和流程,并基于BIM+GIS技术研发了区域河闸安全监测分析预警系统。研究表明,BIM联合GIS技术通过数字化手段将水利设施建设的各阶段(设计、施工、运营维护)紧密联结,提供三维可视化的工作环境,设计方案直观、施工流程清晰、资源管理高效。BIM技术强化了各方协作与沟通,减少信息孤岛,提升整体工作效率。然而,BIM技术在水利设计中还需克服技术培训门槛高、技术推广难

度大等难题。

参考文献:

- [1] THEILER M, SMARSLY K. IFC Monitor—An IFC schema extension formodeling structural health monitoring systems [J]. Advanced Engineering Informatics, 2018 (37): 54-65.
- [2] Ahn H Y, KWAK H Y, SUK J S. Contractors' transformation strategies for adopting building information modeling[J]. Journal of Management in Engineering, 2015, 32 (1): 5-6.
- [3] BRYDE D, BROQUETAS M, VOLM M J. The project benefits of Building Information Modelling (BIM) [J]. International Journal of Project Management, 2013, 31 (7): 971-980.
- [4] 刘懿韬. BIM技术发展及其在水利工程中的应用[J]. 水利规划与设计, 2019 (10): 64-66, 132.
- [5] 蔡佳含. BIM技术在建筑工程项目成本管理应用中的影响因素研究[D]. 重庆:重庆大学,2022.