

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.07.017

表面活性剂-混凝剂组合调理污泥深度脱水

李千一¹, 王靖², 吉晓鹏², 林鸿¹, 邱瑀², 曾豪²,
周健¹

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆市排水有限公司, 重庆 400012)

摘要: 针对现行污水处理厂污泥脱水效能低的问题,以污泥深度脱水(含水率 $\leq 60\%$)为目标,研发表面活性剂-混凝剂组合调理技术,重点探究了调理剂组合对污泥脱水效能的影响及其作用机制。结果表明,阴离子型表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)、阳离子型表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)与混凝剂聚合氯化铝(PAC)和聚丙烯酰胺(PAM)组合调理显著提高了污泥脱水性能,当CTAB、SDS、PAC、PAM投加量分别为250、20、80、5 mg/gDS时,经组合调理后泥饼含水率降至57.06%;污泥比阻由调理前的 7.19×10^{12} m/kg降至 2.61×10^{12} m/kg;污泥的Zeta电位、接触角、中位粒径分别由-17.49 mV、 63.94° 、 $26.4 \mu\text{m}$ 提升至1.07 mV、 104.81° 、 $62.9 \mu\text{m}$;并高效溶出污泥胞外聚合物(EPS)中的蛋白质和多糖,将紧密型EPS(TB-EPS)中的色氨酸、酪氨酸等物质大量溶出至溶解性EPS(S-EPS)中;同时释放大量的污泥结合水,结合水含量由2.17 g/gDS显著降至0.90 g/gDS;另外,CTAB与SDS、PAC与PAM组合均能产生协同效应,使蛋白质二级结构组成比例显著改变,导致污泥蛋白质变得松散,EPS疏水性增强。

关键词: 污泥深度脱水; 调理; 表面活性剂; 混凝剂; 胞外聚合物

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)07-0113-09

Sludge Deep Dewatering through Combined Conditioning with Surfactants and Coagulants

LI Qianyi¹, WANG Jing², JI Xiaopeng², LIN Hong¹, QIU Tao², ZENG Hao²,
ZHOU Jian¹

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Chongqing Drainage Co. Ltd., Chongqing 400012, China)

Abstract: This study addressed the low efficiency of sludge dewatering in current wastewater treatment plants, aiming for sludge deep dewatering (moisture content $\leq 60\%$). A combined conditioning technology using surfactants and coagulants was developed, focusing on the impact of the combined conditioning agents on sludge dewatering efficiency and their underlying mechanisms. The results demonstrated that the combination of anionic surfactant sodium dodecyl sulfate (SDS), cationic surfactant cetyl trimethyl ammonium bromide (CTAB), and coagulant polyaluminum chloride (PAC), as well as

基金项目: 重庆水务集团股份有限公司创新项目(20232024000080001)

通信作者: 周健 E-mail: zhoujian126@126.com

polyacrylamide (PAM), significantly improved sludge dewaterability. Under optimal dosages of 250 mg/gDS for CTAB, 20 mg/gDS for SDS, 80 mg/gDS for PAC, and 5 mg/gDS for PAM, the moisture content of the sludge cake decreased to 57.06%. The specific resistance to filtration reduced from 7.19×10^{12} m/kg to 2.61×10^{12} m/kg. The Zeta potential, contact angle, and median particle size of the sludge improved from -17.49 mV, 63.94° , and 26.4 μm to 1.07 mV, 104.81° , and 62.9 μm , respectively. The effective extraction of proteins and polysaccharides from the extracellular polymeric substances (EPS) of the sludge led to a substantial release of tryptophan, tyrosine, and other substances from TB-EPS to S-EPS, resulting in the liberation of a significant amount of bound water. The bound water content decreased markedly from 2.17 g/gDS to 0.90 g/gDS. The combination of CTAB with SDS and PAC with PAM exhibited synergistic effects, significantly altering the secondary structure composition of sludge proteins, leading to a more dispersed protein structure and enhanced hydrophobicity of EPS.

Keywords: sludge deep dewatering; conditioning; surfactant; coagulant; extracellular polymeric substances (EPS)

目前,我国城镇污水处理厂污泥处置对准入条件(如含水率)提出了较高要求,用于园林绿化、土地改良、建材、混合填埋的污泥,均要求含水率 $\leq 60\%$ 。然而,现行污水处理厂污泥经常规机械脱水后含水率普遍在80%左右,需要通过污泥干化等技术进一步降低含水率后,才能达到污泥处置要求,存在污泥减量投资和处理成本高以及设施运行管理复杂的问题。因此,研发高效低成本的污泥深度脱水技术成为当务之急。

胞外聚合物(EPS)的含量与结构显著影响污泥脱水性能,EPS中的大量含氧官能团具有高度亲水性,阻碍了污泥絮体中水的释放^[1]。因此,通过调理破坏EPS结构是实现污泥深度脱水的重要途径。污泥调理技术主要包括物理、化学和生物法,其中最常用的是化学药剂调理。现行污水处理厂多采用单一的混凝剂调理,难以降低EPS的亲水性,且形成的污泥絮体强度小,过滤时会被压缩,因此水不易排出^[2-3];通过添加生石灰、赤泥、粉煤灰等骨架材料可提高污泥絮体强度、降低可压缩性,但其投加量较大,易导致污泥增容^[3];采用双氧水等氧化剂能有效破坏污泥EPS,但成本较高,且通常需要调节pH或与其他药剂联用,导致运行管理复杂^[4]。

表面活性剂是一类同时具有疏水基团和亲水基团的化合物,能显著降低界面张力,已被证明可以吸附在污泥表面,并通过增溶等作用将大量EPS溶解进入液相中,促进结合水转化为自由水,从而提高污泥脱水性能^[5-6]。相关研究表明,阳离子型表

面活性剂调理污泥的效果优于阴离子型和非离子型^[7]。此外,表面活性剂可以与其他方法结合来提高污泥脱水效果。例如,He等^[8]将阳离子型表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)与Fenton反应联合使用,能将污泥含水率降至68.1%,对污泥脱水性能的改善优于单独添加CTAB,但需要调节pH为酸性,可能对脱水设备产生腐蚀;另有研究者^[9]提出阴离子型表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)、HCl、 FeCl_3 组合的调理技术,能将污泥含水率降至59.65%,但药剂投加量大,且SDS会使污泥絮体间产生静电斥力,影响污泥絮凝。笔者在前期试验中发现,阳离子型表面活性剂CTAB与阴离子型表面活性剂SDS以一定比例组配能产生协同效应,表现出更好的界面性能,可显著改善污泥脱水性能。但目前对于阴、阳离子型表面活性剂组合用于污水处理厂污泥深度脱水的相关研究鲜有报道。

鉴于此,本研究以污泥深度脱水(含水率 $\leq 60\%$)为目标,提出阴、阳离子型表面活性剂(SDS、CTAB)与混凝剂聚合氯化铝(PAC)和阳离子型聚丙烯酰胺(PAM)组合的污泥调理技术,重点探究调理剂组合对污泥脱水性能的影响,并通过对污泥调理前后Zeta电位、结合水、接触角、粒径分布、EPS含量及蛋白质结构变化规律的解析,探究作用机理,旨在探寻污泥深度脱水新途径。

1 材料与方法

1.1 试验污泥及调理药剂

试验用污泥取自某城镇污水处理厂的二沉池,

基本的理化性质如下:总固体(TS)为 (18.89 ± 0.08) g/L,挥发性悬浮物/总悬浮物(VSS/TSS)为 0.51 ± 0.06 , pH为 6.98 ± 0.07 ,污泥比阻(SRF)为 $(7.12 \pm 0.07) \times 10^{12}$ m/kg,污泥含水率为 $(98.11 \pm 0.08)\%$ 。

试验用试剂包括:CTAB、SDS、PAC和PAM。用去离子水将PAC和PAM配制成溶液后备用。

1.2 试验方法

在室温条件下,将100 mL试验污泥加入250 mL烧杯中,加入表面活性剂CTAB和SDS后,快速(300 r/min)搅拌10 min;然后,加入PAC并快速(300 r/min)混合1 min,再加入PAM并缓慢(60 r/min)搅拌10 min。反应结束后,将试验污泥倒入过滤装置中脱水10 min,测定污泥滤饼含水率。

试验分为两部分,具体如下:

① 各调理剂组分对污泥脱水性能的影响

在前期预试验得出的调理剂初步组合基础上,首先通过单因素试验探究各调理剂组分投加量对污泥脱水性能的影响,确定各组分最佳投加量。

CTAB投加量的影响试验:在SDS、PAC、PAM投加量分别为20、60、5 mg/gDS的条件下,设置7组平行试验,CTAB投加量分别控制为0、50、100、150、200、250、300 mg/gDS。

SDS投加量的影响试验:在CTAB、PAC、PAM投加量分别为250、60、5 mg/gDS的条件下,设置6组平行试验,SDS投加量分别控制为0、5、10、20、30、40 mg/gDS。

PAC投加量的影响试验:在CTAB、SDS、PAM投加量分别为250、20、5 mg/gDS的条件下,设置6组平行试验,PAC投加量分别控制为0、20、40、60、80、100 mg/gDS。

PAM投加量的影响试验:在CTAB、SDS、PAC投加量分别为250、20、80 mg/gDS条件下,设置6组平行试验,PAM投加量分别设为0、1、3、5、7、9 mg/gDS。

② 调理剂最佳组合及其作用机理

采用平行对比试验,探究调理剂最佳组合对污泥脱水性能的影响及其作用机理。设计7个试验组和1个空白对照组(原泥),各试验组具体调理方案如下:CTAB(250 mg/gDS)、SDS(20 mg/gDS)、PAC(80 mg/gDS)、PAM(5 mg/gDS)、CTAB(250 mg/gDS)+SDS(20 mg/gDS)、PAC(80 mg/gDS)+PAM(5 mg/gDS)、CTAB(250 mg/gDS)+SDS(20 mg/gDS)+PAC(80 mg/gDS)+PAM(5 mg/gDS)。

1.3 分析项目与方法

污泥滤饼含水率采用重量法测定;污泥比阻采用布氏漏斗试验测定;污泥的粒径分布和比表面积采用激光粒度分析仪测定;污泥的接触角采用接触角测量仪测定;将试验污泥离心后,收集上清液,采用纳米粒度及Zeta电位分析仪测定污泥的Zeta电位;污泥的结合水含量采用DSC法测定,仪器为装有液氮冷却系统的差示扫描量热仪。

采用热提取法分三层提取污泥EPS,各层EPS中的蛋白质含量采用改良Lowry法测定,以牛血清白蛋白为标样;多糖含量采用蒽酮-硫酸法测定,以葡萄糖为标样。EPS的三维荧光光谱(3D-EEM)采用荧光分光光度计测定。采用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)表征EPS中的主要官能团。

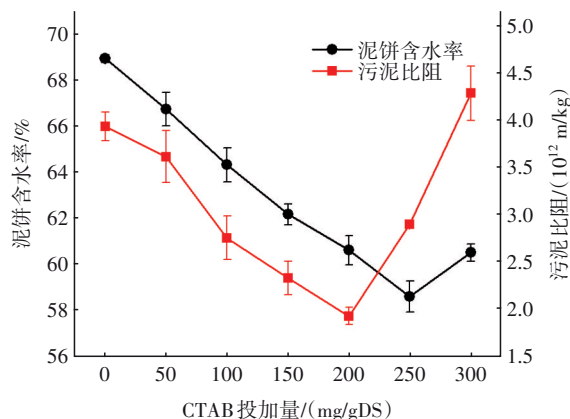
2 结果与讨论

2.1 各调理剂组分对污泥脱水性能的影响

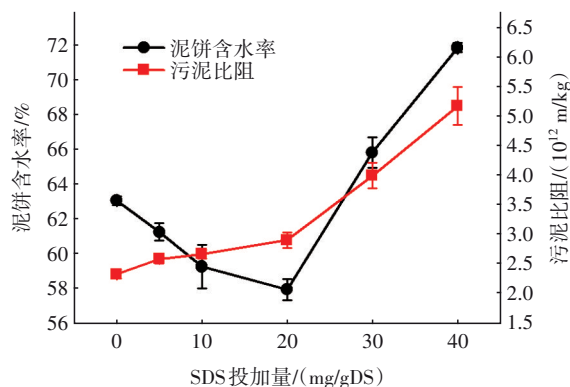
组合调理时CTAB投加量对污泥脱水性能的影响如图1(a)所示。可知,随着CTAB投加量的增加,泥饼含水率和污泥比阻均呈现先下降后上升的趋势,但二者变化不完全同步。当CTAB投加量为200 mg/gDS时,泥饼含水率为60.58%,污泥比阻降至 1.92×10^{12} m/kg;当CTAB投加量增至250 mg/gDS时,泥饼含水率继续降至58.57%,但污泥比阻升至 2.89×10^{12} m/kg。这可能是由于CTAB投加量从200 mg/gDS增加到250 mg/gDS时,仍然能够通过溶解EPS释放出更多的水分,但同时大量EPS的释放增大了污泥黏性和污泥颗粒间的阻力,影响了过滤速率^[10]。当CTAB投加量继续增至300 mg/gDS时,泥饼含水率升至60.48%,污泥比阻大幅升至 4.29×10^{12} m/kg,脱水性能恶化。在本试验中,各组污泥均能在短时间内完成脱水,对脱水速率的影响较小;而且当CTAB投加量为200 mg/gDS时,污泥含水率可能达不到 $\leq 60\%$ 的目标,因此,为了实现污泥最大程度脱水,组合调理剂中CTAB的投加量宜采用250 mg/gDS。

组合调理时SDS投加量对污泥脱水性能的影响如图1(b)所示。可知,随着SDS投加量的增加,泥饼含水率呈现先下降后上升的趋势,污泥比阻则逐步增大。当SDS投加量为20 mg/gDS时,泥饼含水率从初始的63.04%降至57.91%,污泥比阻则由初始的 2.32×10^{12} m/kg增至 2.90×10^{12} m/kg;继续投加

SDS,污泥脱水性能迅速恶化。污泥比阻增大的原因可能是带负电的SDS会使得污泥颗粒间产生静电斥力,影响了污泥的絮凝,且SDS的投加导致大量EPS溶出,细小颗粒堵塞过水通道使得污泥脱水速率变慢。当SDS投加量超过20 mg/gDS后,过滤阻力显著增大,水分难以排出,导致泥饼含水率升高^[11];当SDS投加量达到40 mg/gDS时,泥饼含水率和污泥比阻分别增至71.84%和 5.17×10^{12} m/kg,并观察到大量泡沫。故SDS投加量宜为20 mg/gDS。



a. CTAB投加量的影响



b. SDS投加量的影响

图1 CTAB和SDS投加量对污泥脱水性能的影响

Fig.1 Effect of dosages of CTAB and SDS on sludge dewatering efficiency

另外,组合调理时PAC投加量对污泥脱水性能的影响试验结果显示,随着PAC投加量的增加,泥饼含水率和污泥比阻均呈现先下降后上升的趋势,当PAC投加量为80 mg/gDS时,泥饼含水率和污泥比阻分别降至57.26%和 2.52×10^{12} m/kg,此时污泥脱水性能最佳;继续增加PAC投加量,过量的PAC可能会使污泥颗粒重新带上正电荷,从而产生静电斥力,降低絮凝效果,导致污泥脱水性能恶化^[12]。因此,PAC投加量宜为80 mg/gDS。

组合调理时PAM投加量对污泥脱水性能的影响试验结果显示,随着PAM投加量的增加,泥饼含水率和污泥比阻均呈现先下降后上升的趋势。当PAM投加量为5 mg/gDS时,泥饼含水率和污泥比阻分别降至57.33%和 2.61×10^{12} m/kg,此时污泥脱水性能最佳;继续增加PAM投加量,污泥比阻和泥饼含水率均增大,可能是因为过量的长链有机高分子通过与污泥颗粒吸附架桥,形成更加紧密的絮体结构,导致部分水分被包裹其中而难以释放^[13]。因此,PAM的最佳投加量为5 mg/gDS。

2.2 组合调理剂改善污泥脱水性能的作用机理

2.2.1 调理剂组合对污泥脱水性能的影响

调理剂组合对污泥脱水性能的影响如图2所示。可知,将CTAB与SDS组合后,泥饼含水率低于单独投加CTAB或SDS;将PAM与PAC组合后,泥饼含水率低于单独投加PAM或PAC。阴、阳离子型表面活性剂组合调理时,泥饼含水率并不能稳定达到60%以下,且污泥比阻较高,将它们再与混凝剂(PAC+PAM)组合并对污泥进行调理后,泥饼含水率进一步降至57.06%,显著低于原泥脱水后的含水率(76.55%)。此外,4种药剂组合调理亦可大幅提升污泥脱水速率,使污泥比阻由原泥的 7.19×10^{12} m/kg降至 2.61×10^{12} m/kg,污泥脱水速率的提升主要归因于混凝剂的使用,PAM和PAC分别能将污泥比阻降至 2.06×10^{12} 和 2.23×10^{12} m/kg。综上所述,CTAB、SDS、PAM和PAC组合调理可显著提升污泥脱水性能,稳定实现污泥深度脱水的预期目标。

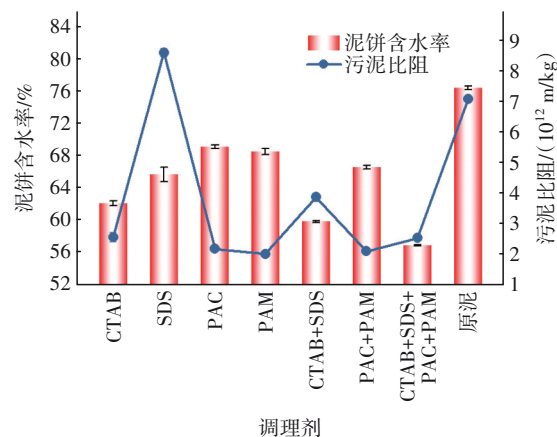


图2 调理剂组合对污泥脱水性能的影响

Fig.2 Effect of conditioning agent combinations on sludge dewatering efficiency

2.2.2 调理剂组合对污泥理化性质的影响

调理剂组合对污泥基本理化性质的影响如图3

所示。Zeta 电位是衡量污泥胶体稳定性的重要参数,其值主要取决于污泥 EPS 表面的带电基团。EPS 表面的大量阴离子官能团使得污泥颗粒表面带负电性,从而在污泥絮体之间产生很强的排斥力,导致污泥絮凝脱水困难。由图 3(a)可知,投加 CTAB、PAC 和 PAM 均能显著提升污泥 Zeta 电位;而单独投加 SDS 时,由于其不具有中和污泥表面负电荷的能力,可能会使污泥负电性增强;将 SDS 与其他

调理剂组合使用,则可大大减弱其对 Zeta 电位的不利影响。值得注意的是,单独投加 PAC 时,由于电荷中和是唯一的混凝途径,达到最佳混凝效果时,污泥的 Zeta 电位 (-0.06 mV) 最接近等电点。而 CTAB+SDS+PAC+PAM 组合调理时,污泥 Zeta 电位由 -17.49 mV 显著上升到 1.07 mV,高于等电点,说明除了电荷中和作用外,组合调理剂还通过吸附架桥、网捕和卷扫等其他途径进行混凝。

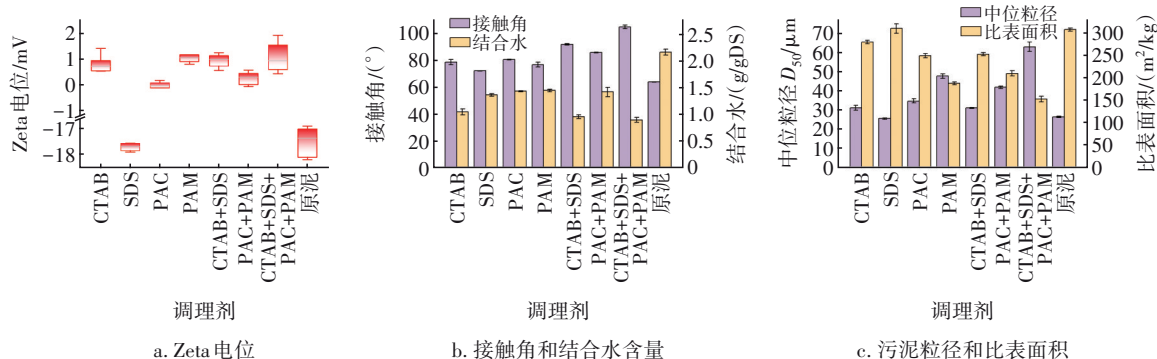


图3 调理剂组合对污泥理化性质的影响

Fig.3 Effect of conditioning agent combinations on physicochemical properties of sludge

污泥结合水通过物理和化学作用束缚在污泥中,需要通过改变EPS结构或溶胞等方式将其转化为自由水。由图3(b)可知,不同调理剂组合均能降低污泥结合水含量,其中,PAC和PAM通过电荷中和、吸附架桥等方式破坏EPS表面带负电的亲水性基团,从而释放部分结合水,但是PAC与PAM组合对释放结合水的协同效果不明显。使用表面活性剂调理后污泥结合水含量比PAC和PAM调理后更低,而且CTAB与SDS组合调理时,释放结合水的效果优于单一表面活性剂调理。CTAB+SDS+PAC+PAM组合调理能够将结合水含量由原污泥的 2.17 g/gDS降至 0.90 g/gDS。对于污泥接触角,CTAB与SDS组合调理时,污泥接触角由 63.94° 增至 91.78° ,PAC、PAM调理则分别将污泥接触角提高到 80.56° 和 76.68° ;当表面活性剂与混凝剂组合调理时,接触角进一步增加到 104.81° ,表明表面活性剂与混凝剂均能影响污泥亲疏水性,且具有协同效应,组合调理能够使污泥的疏水性更强。

污泥粒径对污泥性质有显著影响,较小的絮体在过滤过程中容易堵塞滤孔,从而降低污泥脱水性能。由图3(c)可知,单独投加SDS增加了污泥中小颗粒的数量,使得 D_{50} 稍减至 $25.6 \mu\text{m}$,证明小颗粒堵塞滤孔是SDS使得污泥比阻增大的原因之一;

CTAB可通过电荷中和起到一定的絮凝作用,使污泥 D_{50} 小幅升高,比表面积减小;而PAC和PAM能够显著增大污泥粒径,尤其是加入PAM后, D_{50} 升至 $47.7 \mu\text{m}$,试验中观察到大量明显的污泥絮团,这得益于PAM较强的电荷中和作用及吸附架桥能力^[14]。经表面活性剂与混凝剂组合调理后,污泥 D_{50} 由原污泥的 $26.4 \mu\text{m}$ 增加至 $62.9 \mu\text{m}$,比表面积则由 $306.8 \text{ m}^2/\text{kg}$ 降至 $152.5 \text{ m}^2/\text{kg}$,说明细小污泥颗粒减少,污泥更易聚集,更有利于过滤。

2.2.3 调理剂组合对污泥EPS的影响

调理剂组合对污泥EPS中蛋白质和多糖含量的影响如图4所示。可知,原污泥的蛋白质和多糖大部分存在于TB-EPS中,尤其是多糖,在S-EPS和LB-EPS中的含量分别只有 0.274 和 0.685 mg/gVSS 。加入表面活性剂后,溶出的EPS总量明显增加,且大部分是S-EPS和LB-EPS,TB-EPS含量减少;CTAB与SDS组合调理后,对EPS的增溶效果更为显著,进一步促进了蛋白质和多糖的溶出;同时,混凝剂PAC也能通过压缩双电层使得更多的亲水基团被破坏,将内层EPS裂解到上清液中,提高了S-EPS含量;有研究认为,PAM对EPS的破坏作用较小^[15],但在本试验中,投加PAM后可观察到内层EPS转化为外层EPS,表明PAM同样通过电荷中和

作用分解了一部分EPS。然而,PAC和PAM组合调理并没有进一步增强EPS的溶解。并且,PAC、PAM与CTAB和SDS组合调理后,溶出的EPS总量也没有增加,可能是因为部分溶出的蛋白质已经被分解而无法定量测出。总之,组合调理剂使得污泥EPS

更易于释放和溶解,污泥经调理后提取的EPS中蛋白质总含量由原污泥的34.597 mg/gVSS增加到150.574 mg/gVSS,多糖总含量由原污泥的4.189 mg/gVSS增加到29.732 mg/gVSS。其中,S-EPS、LB-EPS含量远高于TB-EPS含量。

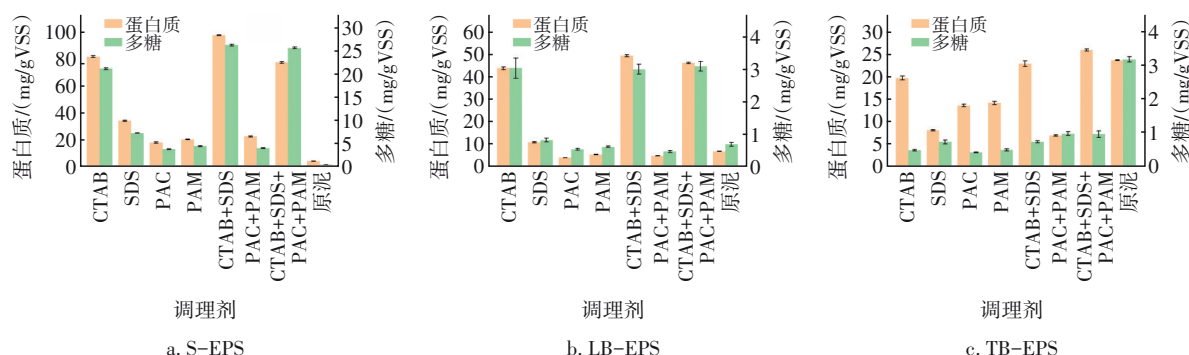
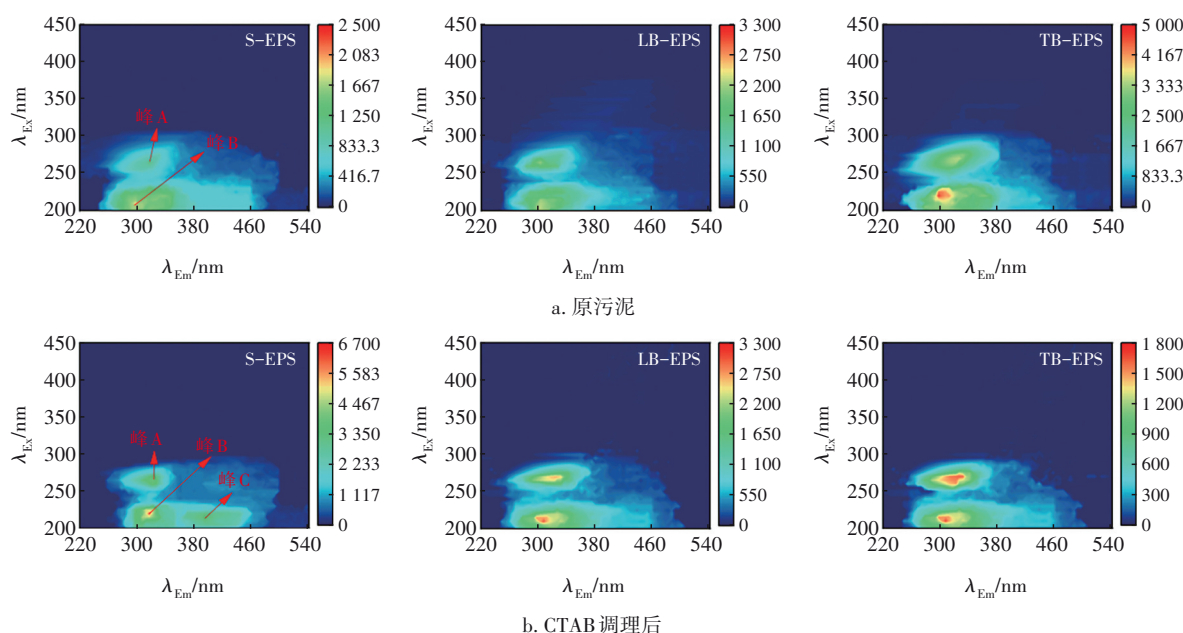


图4 调理剂组合对三层EPS中蛋白质和多糖的影响

Fig.4 Effects of combined conditioners on proteins and polysaccharides in each layer of EPS

为进一步探究调理剂组合对污泥EPS中蛋白质的影响,采用三维荧光光谱法进行分析,结果见图5。原污泥的各层EPS能够识别出两个峰,经调理后可识别出三个峰,根据激发波长/发射波长($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}$)所处的特定区域,可知峰A($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=265\sim275$ nm/320~335 nm)、峰B($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=205\sim225$ nm/305~320 nm)和峰C($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=205\sim220$ nm/400~415 nm)分别与类蛋白质物质(色氨酸)、芳香族蛋白质(酪氨酸)和黄腐酸相关联^[16]。此外,在 $\lambda_{Ex}>250$ nm、 $\lambda_{Em}>380$ nm的区域观察到强度较弱的荧光,表明存在少量腐

殖酸类物质。原污泥中主要存在蛋白质类物质,经表面活性剂调理后,S-EPS和LB-EPS中芳香族蛋白质尤其是酪氨酸显著增加,黄腐酸也有所增多,腐殖酸类物质依旧很少;而TB-EPS中色氨酸、酪氨酸、黄腐酸等含量低于原污泥。黄腐酸是易溶于水的腐殖酸,说明表面活性剂使得污泥内层的蛋白质、腐殖酸大量溶解到了外层。此外,表面活性剂与混凝剂组合调理后,酪氨酸溶出量显著多于色氨酸,这可能表明组合调理剂调理污泥时,酪氨酸的溶出对于污泥脱水性能的改善更为关键^[17]。



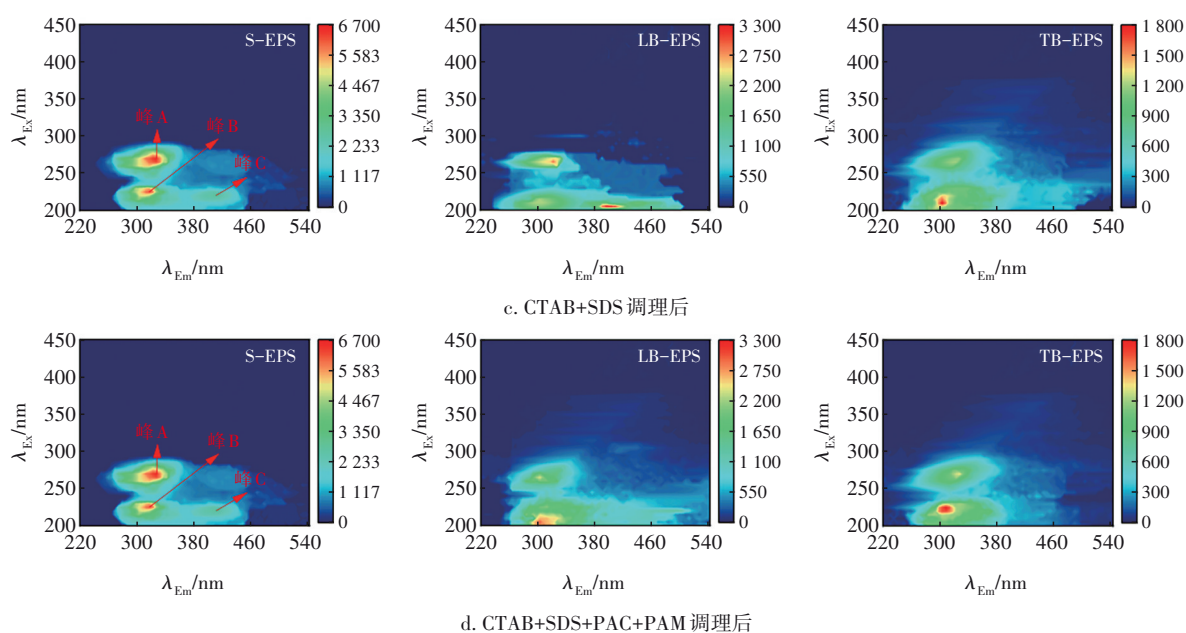
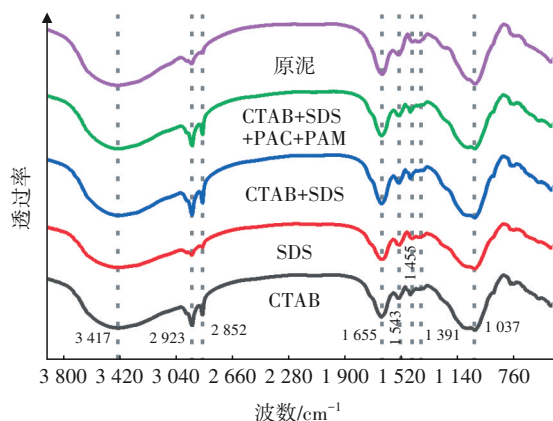


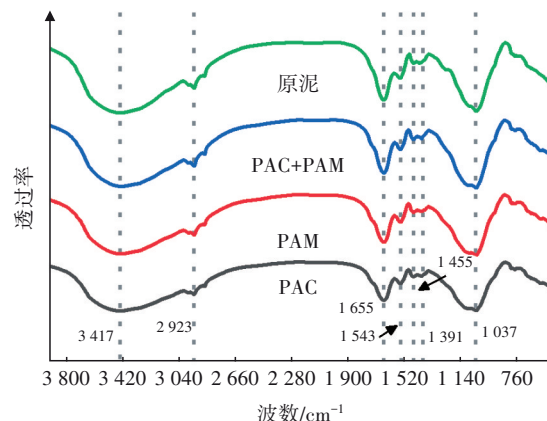
图5 原污泥和经不同药剂调理后污泥EPS的三维荧光光谱

Fig.5 3D-EEM of EPS of raw sludge and sludge conditioned by different chemical agents

为了进一步探究调理剂组合对污泥EPS结构特征的影响,在 $400\sim4\,000\text{ cm}^{-1}$ 范围内对污泥进行红外光谱分析,结果如图6所示。 $3\,417\text{ cm}^{-1}$ 处的峰为O—H键的伸缩振动; $2\,923\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,852\text{ cm}^{-1}$ 处的峰分别对应烃链中 CH_2 基团的对称和不对称伸缩振动,加入CTAB后会检测到 $2\,852\text{ cm}^{-1}$ 处的峰。FTIR光谱中反映EPS组成和功能信息的主要范围一般为 $600\sim1\,800\text{ cm}^{-1}$ 区域^[18], $1\,655\text{ cm}^{-1}$ 处的峰表示蛋白质酰胺中C=O键的伸缩振动; $1\,543\text{ cm}^{-1}$ 处的峰与蛋白质酰胺中—CO—NH基团的N—H和C—N键的拉伸和弯曲振动有关; $1\,455\text{ cm}^{-1}$ 处的峰是— CH_3 和— CH_2 中C—H的弯曲振动; $1\,391\text{ cm}^{-1}$ 处的峰是羧基的对称伸缩振动; $1\,037\text{ cm}^{-1}$ 处的峰与多糖C—O键有关(C—O—C环振动和C—OH伸缩振动)^[19]。



a. 表面活性剂调理前后



b. 混凝剂调理前后

图6 原污泥及调理后污泥的FTIR光谱

Fig.6 FTIR spectra of raw sludge and conditioned sludge

综上所述,污泥EPS中存在丰富的蛋白质和多糖,经调理后蛋白质和多糖特征峰的位置变化微弱,说明官能团种类并未改变。但是加入表面活性剂后,污泥EPS特征峰的透射率降低,表明污泥中部分蛋白质和多糖被分解。

选取FTIR光谱图中对蛋白质二级结构组分最敏感的蛋白质酰胺I带($1\,600\sim1\,700\text{ cm}^{-1}$ 区域),使用OMNIC和PeakFit软件对红外光谱图进行去卷积、二阶导数分析和FSD曲线拟合处理,获得蛋白质二级结构的相对含量如表1所示。蛋白质的二级结构主要包括 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规卷曲等,是影响污泥疏水性的关键因素。由表1可知,污

泥经调理后, α -螺旋占比下降, β -折叠占比增加, 采用表面活性剂调理后这一现象更为明显, 且CTAB与SDS具有协同效应, 能进一步促进 α -螺旋结构向 β -折叠结构等转化。CTAB+SDS+PAC+PAM组合调理使得 α -螺旋的占比由25.03%下降至16.02%, β -折叠占比则由15.32%升至32.32%, 从而让大量的蛋白质疏水基团暴露; 同时, α -螺旋/(β -折叠+无规卷曲)的比值由0.70降至0.34, 这表明组合调理剂能够使得污泥EPS中的蛋白质结构更加松散^[20], 疏水性增强, 有利于污泥中结合水的释放。

表1 原污泥及调理后污泥EPS中蛋白质二级结构的相对含量

Tab.1 Relative contents of protein secondary structure in EPS of raw sludge and conditioned sludge

项目	二级结构占比/%				α -螺旋/(β -折叠+无规卷曲)
	β -折叠	无规卷曲	α -螺旋	β -转角	
CTAB	29.74	14.44	18.75	37.07	0.42
SDS	29.49	14.97	16.31	39.23	0.37
PAC	19.10	21.21	23.58	36.11	0.59
PAM	15.91	22.01	24.90	37.18	0.66
CTAB+SDS	30.43	14.70	18.33	36.54	0.41
PAC+PAM	27.24	13.22	16.83	42.71	0.42
CTAB+SDS+PAC+PAM	32.32	15.37	16.02	36.29	0.34
原污泥	15.32	20.32	25.03	39.33	0.70

3 结论

① CTAB+SDS+PAC+PAM组合调理剂能显著提高污泥的脱水性能, 当4种药剂的投加量分别为250、20、80、5 mg/gDS时, 污泥比阻由 7.19×10^{12} m/kg降至 2.61×10^{12} m/kg, 泥饼含水率由76.55%降至57.06%, 能够实现污泥的深度脱水。

② CTAB+SDS+PAC+PAM组合调理能够将污泥的Zeta电位、接触角、中位粒径分别由-17.49 mV、63.94°和26.4 μ m提升至1.07 mV、104.81°和62.9 μ m; 并高效溶出污泥EPS中的蛋白质和多糖, 释放大量的结合水, 使EPS中蛋白质溶出总量由原污泥的34.597 mg/gVSS增加到150.574 mg/gVSS, 多糖溶出总量由原污泥的4.189 mg/gVSS增加到29.732 mg/gVSS; 污泥中的结合水含量则由2.17 g/gDS显著下降至0.90 g/gDS。

③ CTAB+SDS+PAC+PAM组合调理剂通过改

变EPS的组成和结构显著影响污泥亲疏水性。组合调理剂将TB-EPS中的色氨酸、酪氨酸等蛋白质大量溶出至S-EPS。各调理剂组分均能改变蛋白质二级结构, 并且CTAB与SDS、PAC与PAM组合均能产生协同效应。CTAB+SDS+PAC+PAM组合调理降低了蛋白质二级结构中 α -螺旋的占比、提高了 β -折叠的占比, 将 α -螺旋/(β -折叠+无规卷曲)的比值由0.70降至0.34, 有助于强化蛋白质疏水基团的暴露, 使蛋白质结构更加松散, EPS疏水性增强。

参考文献:

- [1] 郑松超, 张彦平, 李添添, 等. 紫外协同零价铁活化过硫酸盐调理污泥脱水研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(11): 15-22.
ZHENG S C, ZHANG Y P, LI T T, et al. Ultraviolet coupled with zero-valent iron to activate persulfate for improving sludge dewaterability [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(11): 15-22 (in Chinese).
- [2] WEI H, GAO B Q, REN J, et al. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: a review[J]. Water Research, 2018, 143: 608-631.
- [3] 戈拯, 张义鑫, 刘吉宝, 等. 改性骨架材料应用于污泥深度脱水的研究进展[J]. 中国环境科学, 2023, 43(11): 5787-5799.
GE Z, ZHANG Y X, LIU J B, et al. Research progress on the application of modified skeletal materials for sludge deep dewatering [J]. China Environmental Science, 2023, 43(11): 5787-5799 (in Chinese).
- [4] XIA J H, JI J, HU Z Q, et al. Application of advanced oxidation technology in sludge conditioning and dewatering: a critical review [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(15): 9287.
- [5] LI Z J, LI Y F, WANG D B, et al. Insights into cetyl trimethyl ammonium bromide improving dewaterability of anaerobically fermented sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 435: 134968.
- [6] HOU J C, HONG C, LING W, et al. Research progress in improving sludge dewaterability: sludge characteristics, chemical conditioning and influencing factors [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 351: 119863.
- [7] GUAN R P, YUAN X Z, WU Z B, et al. Functionality of surfactants in waste-activated sludge treatment: a review [J]. Science of the Total Environment, 2017,

- 609; 1433-1442.
- [8] HE D Q, CHEN J Y, BAO B, et al. Optimizing sludge dewatering with a combined conditioner of Fenton's reagent and cationic surfactant [J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, 88: 21-30.
- [9] HE X J, HE L, LIN Z Y, et al. Deep dewatering of activated sludge using composite conditioners of surfactant, acid and flocculant: the mechanism and dosage model [J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150899.
- [10] LIU X S, WANG J, LIU E H, et al. Municipal sludge dewatering properties and heavy metal distribution: effects of surfactant and hydrothermal treatment [J]. Science of the Total Environment, 2020, 710: 136346.
- [11] ZHANG J H, YANG H, YANG L, et al. Improved sludge dewaterability by combining SDS pre-treatment conditioning with PDMDAAC flocculation [J]. Desalination and Water Treatment, 2019, 158: 59-66.
- [12] YANG P, LI D D, ZHANG W J, et al. Flocculation-dewatering behavior of waste activated sludge particles under chemical conditioning with inorganic polymer flocculant: effects of typical sludge properties [J]. Chemosphere, 2019, 218: 930-940.
- [13] 曹秀芹,刘溢文,付兴民,等. PAM与PAC复配调理对污泥脱水及流变的影响[J]. 应用化工, 2023, 52(9): 2571-2575.
- CAO X Q, LIU Y W, FU X M, et al. The effect of PAM and PAC compound conditioning on sludge rheology and dewatering [J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(9): 2571-2575 (in Chinese).
- [14] WANG H F, HU H, WANG H J, et al. Combined use of inorganic coagulants and cationic polyacrylamide for enhancing dewaterability of sewage sludge [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 211: 387-395.
- [15] LI L X, PENG C, DENG L H, et al. Understanding the synergistic mechanism of PAM-FeCl₃ for improved sludge dewaterability [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 301: 113926.
- [16] 何妙琳,张彦平,李一兵. 电解耦合Fe²⁺活化过硫酸盐强化污泥脱水及其机理[J]. 中国给水排水, 2023, 39(15): 15-22.
- HE M L, ZHANG Y P, LI Y B. Enhancement and mechanism of electrolysis coupled Fe²⁺-activated persulfate oxidation for excess sludge dewatering [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(15): 15-22 (in Chinese).
- [17] HE S F, FENG L K, ZHAO W X, et al. Composition and molecular structure analysis of hydrophilic/hydrophobic extracellular polymeric substances (EPS) with impacts on sludge dewaterability [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 462: 142234.
- [18] 何舒霏. 影响污泥脱水性能的EPS理化参数识别及反馈机制探究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- HE S F. Identification of EPS Physicochemical Parameters Affecting Sludge Dewatering Performance and Exploration of Feedback Mechanisms [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022 (in Chinese).
- [19] PAN W L, ZHANG X, DENG R, et al. TA and CTAB treatment synergistically enhance activated sludge dewatering by lowering proteins and boosting Zeta potential [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(4): 113102.
- [20] DING A, LIN W, CHEN R L, et al. Improvement of sludge dewaterability by energy uncoupling combined with chemical re-flocculation: reconstruction of floc, distribution of extracellular polymeric substances, and structure change of proteins [J]. Science of the Total Environment, 2022, 816: 151646.
-
- 作者简介:李千一(2000—),男,湖南郴州人,硕士研究生,主要研究方向为污泥脱水技术。
- E-mail:2352339618@qq.com
- 收稿日期:2025-03-17
- 修回日期:2025-05-12

(编辑:刘贵春)