

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.099



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



## 氧化-絮凝调理对剩余污泥脱水性能的影响

夏加华<sup>1</sup>, 饶汀<sup>1</sup>, 季娟<sup>1</sup>, 刘安康<sup>2</sup>, 梁炎凯<sup>3</sup>, 孙永军<sup>3</sup>

(1. 南京江北新区公用控股集团有限公司, 南京 210044; 2. 南京沃谱瑞环境研究院有限公司, 南京 211100;  
3. 南京工业大学城市建设学院, 南京 211816)

**摘要:** 针对污水处理厂污泥脱水难度大、运行成本高等问题, 深入研究 NaClO 投加量、污泥混合液 pH 值以及在 NaClO 最佳投加量和污泥混合液最佳 pH 值下耦合聚合硫酸铁(PFS)和三氯化铁(FeCl<sub>3</sub>)对污泥脱水性能的影响, 以期获得氧化-絮凝调理对活性污泥脱水性能的影响机制。结果表明, 在 NaClO 投加量为 40 mg/g DS(绝干污泥)和污泥混合液 pH 值为 3 时, PFS 耦合 NaClO 调理后的泥饼含水率和污泥比阻(Specific Cake Resistance, SRF)分别降至 85.86% 和  $4.74 \times 10^{11}$  m/kg; FeCl<sub>3</sub> 耦合 NaClO 调理后的泥饼含水率和污泥比阻分别降至 86.36% 和  $3.93 \times 10^{11}$  m/kg。调理后的污泥絮体粒径  $D_{50}$  的大小关系为: NaClO+PFS > NaClO+FeCl<sub>3</sub> > pH 值 > 原泥 > NaClO。显然, 经过氧化-絮凝调理后的污泥絮体粒径明显增大, 滤液中的有机质含量降低。氧化-絮凝调理可使活性污泥比阻显著降低, 脱水性能显著改善。NaClO 耦合 PFS 和 NaClO 耦合 FeCl<sub>3</sub> 有望成为高效环保、价格低廉的新型污泥脱水调理剂。

**关键词:** 污水处理; 污泥调理; 污泥脱水; 次氯酸钠; 絮凝

**中图分类号:** X703.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2023)03-0173-10

## Effects of oxidation-flocculation conditioning on dewatering performance of activated sludge

XIA Jiahua<sup>1</sup>, RAO Ting<sup>1</sup>, JI Juan<sup>1</sup>, LIU Ankang<sup>2</sup>, LIANG Yankai<sup>3</sup>, SUN Yongjun<sup>3</sup>

(1. Nanjing Jiangbei New Area Public Utilities Holding Group Co., Ltd., Nanjing 210044, P. R. China;  
2. Nanjing Water Purification Environmental Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211100, P. R. China;  
3. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, P. R. China)

**Abstract:** In view of the difficulty of sludge dewatering and high operating cost in wastewater treatment plants, the effect of NaClO dosage, pH value of the sludge mixture, and the coupling of polymerized ferric sulfate (PFS)/ ferric chloride (FeCl<sub>3</sub>) under the optimal dosage of NaClO and the optimum pH value of the sludge

**收稿日期:** 2022-08-01

**基金项目:** 江苏省自然科学基金(BK20201362); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才资助项目(JNHB-038)

**作者简介:** 夏加华(1981-), 男, 高级工程师, 主要从事水务建设运营管理研究, E-mail: xiayu\_610@sina.com。

孙永军(通信作者), 男, 博士, 副教授, E-mail: sunyongjun@njtech.edu.cn。

**Received:** 2022-08-01

**Foundation items:** Natural Science Foundation of Jiangsu Province in China (No. BK20201362); 2018 Six Talent Peaks Project of Jiangsu Province (No. JNHB-038)

**Author brief:** XIA Jiahua (1981-), senior engineer, main research interest: water construction operation management, E-mail: xiayu\_610@sina.com.

SUN Yongjun (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: sunyongjun@njtech.edu.cn.

mixture on the dewatering performance of sludge were studied in depth, in order to obtain the influence mechanism of oxidation-flocculation conditioning on the dewatering performance of activated sludge. The results showed that when the dosage of NaClO was 40 mg/g DS and pH value of the sludge mixture was 3, the moisture content of mud cake and sludge specific resistance (SRF) after PFS coupled NaClO conditioning were reduced to 85.86% and  $4.74 \times 10^{11}$  m/kg, respectively. The moisture content and sludge specific resistance of the mud cake after FeCl<sub>3</sub> coupling NaClO conditioning were reduced to 86.36% and  $3.93 \times 10^{11}$  m/kg, respectively. The relationship of the conditioned sludge floc size  $D_{50}$  is: NaClO+PFS>NaClO+FeCl<sub>3</sub>>pH value >raw sludge>NaClO. Obviously, after oxidation-flocculation conditioning, the particle size of the sludge flocs increased significantly, and the organic matter content in the filtrate decreased. Oxidation-flocculation conditioning can significantly reduce SRF and improve the dewatering performance. NaClO coupled PFS and NaClO coupled FeCl<sub>3</sub> are expected to be novel sludge dewatering conditioners with high efficiency, environmental protection and low price.

**Keywords:** sewage treatment; sludge conditioning; sludge dewatering; sodium hypochlorite; flocculation

城镇化和工业化发展产生了大量的生活污水和工业废水,在污水厂处理过程中会产生大量副产物——剩余污泥<sup>[1]</sup>。生活污水厂的剩余污泥包括生化单元和预处理/深度处理单元产生的污泥,其中,生化污泥是水处理过程中产生的一种由细菌细胞、难溶有机物等成分组成的胶体结构物质,由于含有大量有机质且易发酵产生异味,需对其采取安全、环保、有效的调理脱水,以便最终处置和资源化利用,否则会给环境带来严重污染<sup>[2]</sup>。污泥脱水是污泥处理中必不可少的环节。由于市政污泥具有黏度高、絮体松散、有机物含量高等特点,城市污水处理厂广泛采用的机械脱水方法脱水效率受到很大限制。因此,有必要在机械脱水前对污泥进行预处理,以提高污泥脱水效率,降低处理后污泥的含水率<sup>[3]</sup>。

目前,污泥脱水调理方法很多,主要有以下几种:1)物理调理:机械法、利用超声处理、冷热交替处理、微波调理、添加物理调理剂;2)化学调理:投加絮凝剂、强氧化剂等调理污泥;3)生物法:如生物絮凝或生物淋滤等<sup>[4]</sup>。物理调理法运用物理作用使污泥结构、性质发生变化而达到预处理的目的。其中,机械预处理是在高强度的剪切力或碰撞、搅拌等作用下对污泥细胞进行破壁,目前已经较少单一采用,通常与其他调理技术联合使用。化学调理法中投入使用最广泛的是投加化学调理剂法,化学调理剂包括无机絮凝剂如聚合氯化铝、聚合硫酸铁、氯化铁等,有机絮凝剂如聚丙烯酰胺等。生物调理虽具有处理污泥量大、不会造成二次污染等优点,但目前关于生物絮凝剂的研究较少,技术不成熟,很难大规模使用,且生物法本身处理效率也较低<sup>[5]</sup>。

徐文迪等<sup>[6]</sup>采用Fe<sup>3+</sup>/EDTA-2Na类芬顿体系强化了市政污泥,调理后污泥胞外聚合物被破坏,结合水被释放,脱水后泥饼含水率降至67.8%。黄锦佳等<sup>[7]</sup>采用超声-生物沥浸-氧化钙联合调理市政污泥,经预调理联合超高压压滤系统处理后,泥饼含水率降低至49.94%。罗璐等<sup>[8]</sup>投加15%溶菌酶在30 min内(无需调节污泥pH值)可使污泥含水率和毛细吸水时间(Capillary Suction Time, CST)分别降低25%和65%。综合考虑成本、技术成熟程度、受环境制约程度等因素,目前化学调理是污泥调理技术中最常见的工程化选择。化学调理的脱水效率在很大程度上取决于絮凝剂的特性。常见的化学调理剂包括无机絮凝剂和有机絮凝剂。无机絮凝剂虽然有价格低廉、易大规模投入使用等优点,但其用量较多且生成的絮体较小,把一些重金属代入污泥造成环境污染等缺点也限制了其应用;而大量的丙烯酰胺单体会造成污泥毒性的累积,对人类和周围生态环境造成不利影响,进而限制其发展<sup>[9]</sup>。联合调理成为近期研究的热点,不同的药剂联合使用,通过试验得到其最佳的投配比,可提高污泥的脱水性能,降低投加量和成本。

笔者采用次氯酸钠(NaClO)、聚合硫酸铁(PFS)和三氯化铁(FeCl<sub>3</sub>)3种水处理药剂进行污泥预处理,以泥饼含水率、污泥比阻(SRF)作为评价污泥脱水性能的指标。将滤液pH值、污泥pH值、滤液COD、SEM、UV、荧光光谱、絮体粒径作为脱水性能机理的检测指标,通过考察不同化学调理剂的投加量对各类指标的影响来测试不同药剂的投加量,在成本和效果上进行优化,为污水处理厂污泥预处理提供可靠的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

次氯酸钠、聚合硫酸铁、三氯化铁、硫酸银、硝酸铁、硝酸铈、硝酸钴、酒石酸钾钠、抗坏血酸等均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。硫酸汞和酒石酸氧锑钾均为分析纯,购自上海麦克林生物化学有限公司。实际污泥水样取自南京某污水处理厂二沉池污泥,原污泥泥质见表1。

表1 原污泥泥质

Table 1 characteristics of original mud

原泥含水率/%	有机质含量/%	污泥比阻 SRF/(m·kg <sup>-1</sup> )	pH值
99.16	55.52	4.15×10 <sup>12</sup>	7.70

### 1.2 污泥调理与脱水试验

在室温下,用NaClO、PFS和FeCl<sub>3</sub>进行污泥调理试验,分别取200 mL污泥置于6个500 mL的烧杯中。NaClO的投加量分别为10、20、30、40、50、60 mg/g DS。将烧杯置于六联混凝搅拌器上,在350 r/min下转动2 min,接着75 r/min转动15 min,静置30 min后进行抽滤脱水。选出NaClO最佳投加量后,在NaClO最佳投加量的基础上,将污泥pH值调至2、4、6、8、10、12(使用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和NaOH),重复上述步骤进行试验。选出污泥的最佳pH值后,在NaClO最佳投加量和最佳污泥pH值基础上,联合PFS(40、60、80、100、120、140 mg/g DS)及FeCl<sub>3</sub>(40、60、80、100、120、140 mg/g DS)重复上述步骤进行试验。污泥脱水采用真空抽滤,保持真空抽滤的压力为0.05 MPa,连续抽滤2 min,记录抽滤时间及对应时间内抽出的滤液体积。在投加完药剂并进行搅拌后,测量污泥的pH值。在污泥脱水之后,取滤液,测量滤液的pH值和滤液的COD、UV全波段、荧光光谱、Zeta电位。根据污泥脱水时的读数计算SRF。在泥饼烘干后,测量滤饼的含水率并进行SEM分析。

### 1.3 污泥指标分析方法

COD采用哈希测定仪(DR1010,哈希公司,美国)测定;泥饼粒径分析采用激光粒度分析仪(Winner2018,济南微纳颗粒仪器股份有限公司,中国);SEM采用扫描电镜(SU8010,日立高科技有限公司,日本);滤液UV全波段采用紫外/可见分光光度计(UV-5500PC,上海元析仪器有限公司,中国)测定;滤液pH值、泥饼pH值测定方法见《城市

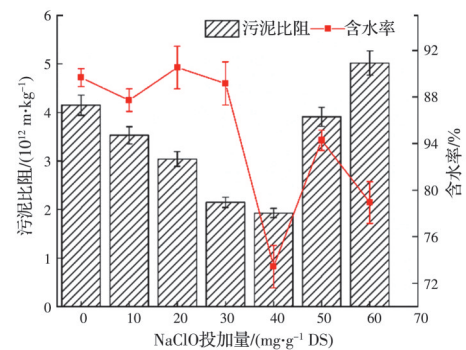
污水处理厂污泥检验方法》(CJ/T 221—2005)<sup>[10]</sup>。

## 2 试验结果与讨论

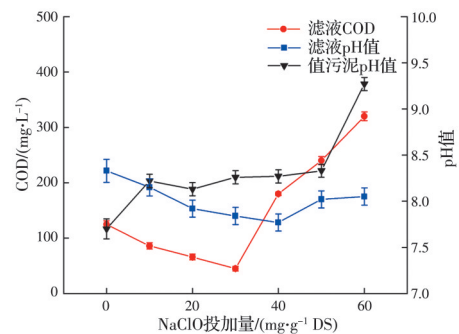
### 2.1 NaClO投加量对污泥脱水性能的影响

NaClO投加量对污泥脱水性能的影响如图1所示,随着NaClO投加量的增加,污泥的SRF先下降后上升。当NaClO投加量为40 mg/g DS时,污泥比阻最低为1.93×10<sup>12</sup> m/kg。滤饼含水率变化趋势与污泥比阻相同,滤饼含水率最低为73.44%,此时NaClO投加量为40 mg/g DS。滤液COD随着NaClO投加量的增加先下降后上升。当NaClO投加量为30 mg/g DS时,滤液COD含量最低为45 mg/L。滤液pH值随PFS投加量的增加先缓慢下降再缓慢上升,pH值最低为7.77,此时NaClO投加量为40 mg/g DS。污泥pH值随NaClO投加量的增加逐渐增大,污泥pH值最高为9.27,此时NaClO投加量为140 mg/g DS。

在NaClO投加量较低时,NaClO投加量的增加可以提高污泥的过滤性能。这是因为NaClO的氧化作用使得污泥的胞外聚合物被氧化,使其分子量



(a) NaClO投加量对污泥比阻和滤饼含水率的影响



(b) NaClO投加量对滤液COD、滤液pH值和污泥pH值的影响

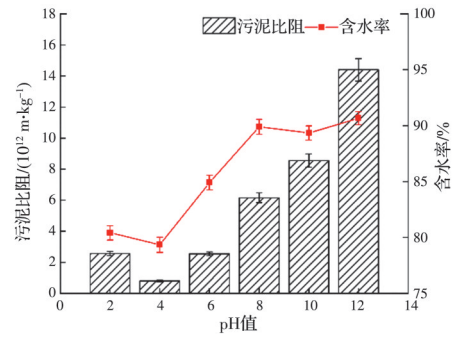
图1 NaClO投加量对污泥脱水性能的影响  
Fig. 1 Effect of NaClO dosage on dewatering performance of sludge

和黏性降低,从而提高了污泥的过滤性能。但当 NaClO 作用达到最优之后,如果继续增加用量,污泥比阻不但没有明显改善,甚至比原始污泥的脱水性能更差。当 NaClO 投加量超过 40 mg/g DS 时,污泥比阻明显有增大趋势,表现出污泥脱水性能的抑制效果。这可能是因为高投加量 NaClO 释放了过量的  $\text{ClO}^-$ ,  $\text{ClO}^-$  与水反应生成 HClO, HClO 能够渗透穿过 EPS(胞外聚合物)层,对污泥结构造成过度破坏,释放出过多的 EPS,使污泥絮体崩解,最终堵塞污泥脱水通道,絮凝效果下降。泥饼含水率的变化趋势与污泥比阻类似,进一步说明过量 NaClO 对污泥脱水性能有抑制作用。滤液 COD 先下降后急剧上升是因为低投加量 NaClO 能有效溶解污泥中的有机物并将其氧化成更小的分子,通过网捕卷扫作用使污泥中的有机质留在泥饼中。当 NaClO 投量过高时,过量的  $\text{ClO}^-$  与  $\text{H}^+$  发生反应产生氯气,消解后的样品变成绿色且浑浊,严重影响 COD 的测定<sup>[11]</sup>。滤液 pH 值先下降后上升的原因是  $\text{ClO}^-$  与水反应生成 HClO, HClO 具有弱酸性,随着过量 NaClO 的加入,NaClO 与水反应生成 NaOH,导致滤液 pH 值的上升。污泥 pH 值上升的原因是 NaClO 与水反应生成 NaOH,因此污泥呈碱性。综合考虑 SRF、泥饼含水率和滤液 COD 3 个指标后,NaClO 的最佳投加量为 40 mg/g DS。

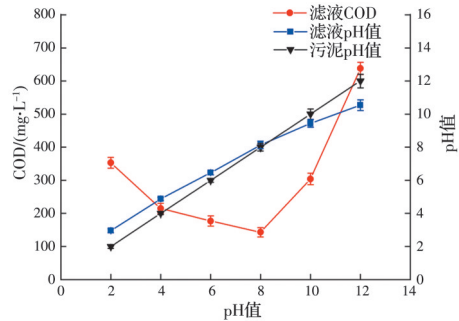
## 2.2 pH 值对污泥脱水性能的影响

pH 值对污泥脱水性能的影响如图 2 所示,随着 pH 值的上升,污泥的 SRF 先下降后上升。当 pH 值为 4 时,污泥比阻最低为  $8.03 \times 10^{11} \text{ m/kg}$ 。滤饼含水率变化趋势与污泥比阻相同。当 pH 值为 4 时,滤饼含水率最低,为 79.35%。随着 pH 值的上升,滤液 COD 先下降后急剧上升,当 pH 值为 8 时,滤液 COD 含量最低,为 143 mg/L。滤液 pH 值和污泥 pH 值都逐步上升。

图 2 所示结果表明,酸性条件更有利于污泥脱水,这是因为在酸性条件下 NaClO 调理能更有效地破坏污泥结构,进而去除污泥中的 EPS。研究表明,EPS 的溶解会使污泥中的结合水释放,提高污泥脱水性能。同时,酸性条件能促进微小絮体的凝聚,水中的  $\text{H}^+$  与污泥表面的负电荷发生电中和,使得污泥表面的电荷趋于电中性,提高了污泥脱水性能。而碱性条件会破坏污泥絮体,过量的  $\text{OH}^-$  使污泥表面的电负性增大,污泥颗粒斥力增大,降低污泥脱水性能。泥饼含水率的变化趋势与污泥比阻类似,进一步说明了酸性条件更有利于污泥脱水能



(a) pH 值对污泥比阻和滤饼含水率的影响



(b) pH 值对滤液 COD、滤液 pH 值和污泥 pH 值的影响

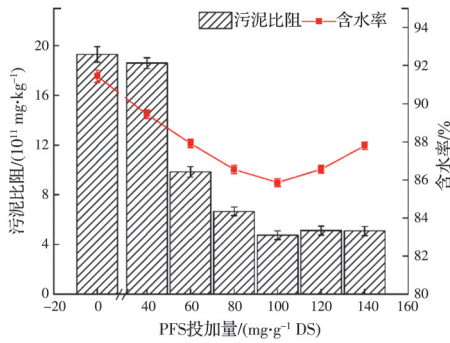
图 2 pH 值对污泥脱水性能的影响

Fig. 2 Effect of pH value on dewatering performance of sludge

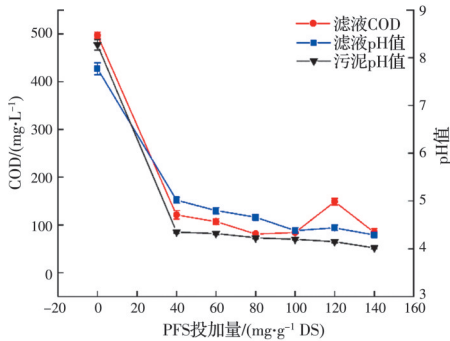
力的提升,碱性条件会恶化污泥的脱水性能。当 pH 值为 8 时,滤液中 COD 最小,这是因为在中性和弱碱性条件下污泥的电性趋于电中性,污泥中的 EPS 不易被破坏,通过网捕卷扫作用使污泥中的有机质留在泥饼中<sup>[12]</sup>。碱性条件下,  $\text{OH}^-$  增大了污泥的电负性,颗粒间排斥力增大,污泥释放过多的 EPS 于滤液中,导致滤液 COD 的急剧上升。综合考虑 SRF、泥饼含水率和滤液 COD 3 个指标后,最佳 pH 值为 4。

## 2.3 NaClO 耦合 PFS 对污泥脱水性能的影响

NaClO 耦合 PFS 对污泥脱水性能的影响如图 3 所示,随着 PFS 投加量的增加,污泥的 SRF 先下降后上升。当 PFS 投加量为 100 mg/g DS 时,污泥比阻最低为  $4.74 \times 10^{11} \text{ m/kg}$ 。滤饼含水率变化趋势与污泥比阻相同。当 PFS 投加量为 100 mg/g DS 时,滤饼含水率最低,为 85.86%。随着 PFS 投加量的增加,滤液 COD 缓慢下降,当 PFS 投加量为 140 mg/g DS 时,滤液 COD 含量最低,为 84 mg/L。滤液 pH 值随 PFS 投加量的增加缓慢下降,当 PFS 投加量为 140 mg/g DS 时,滤液 pH 值最低,为 4.29。污泥 pH 值随 PFS 投加量的增加缓慢下降,当 PFS 投加量为 140 mg/g DS 时,污泥 pH 值最低,为 4.02。



(a) PFS 投加量对污泥比阻和滤饼含水率的影响



(b) PFS 投加量对滤液 COD、滤液 pH 值和污泥 pH 值的影响 (NaClO 投加量为 40 mg/g DS, pH 值为 4)

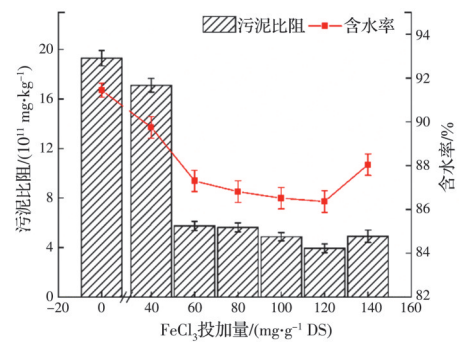
图 3 NaClO 耦合 PFS 对污泥脱水性能的影响

Fig. 3 Effect of NaClO coupled PFS on dewatering performance of sludge

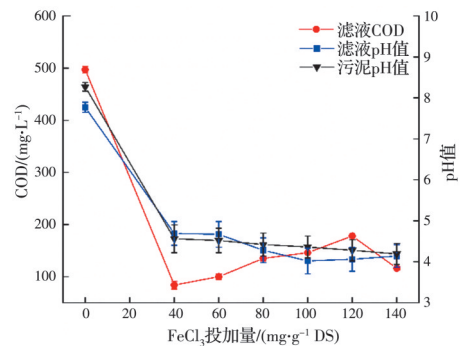
NaClO 耦合 PFS 可以显著提高污泥过滤性能。在相同条件下,NaClO 耦合 PFS 可以使污泥脱水效果更好。经 NaClO 氧化后,污泥絮体被分散,部分 EPS 被溶解,难以进一步压缩脱水。因此,有必要提高污泥絮体的强度和压缩性能,进而提高污泥脱水性能。PFS 能有效中和污泥表面的负电荷,形成紧密稳定的絮体,使污泥颗粒聚集成团,有利于后续机械脱水过程的进行,从而有利于污泥水分的脱离<sup>[13]</sup>。当 PFS 投加量过多时,PFS 自身长链结构相互粘连,破坏污泥颗粒表面的电中性,导致颗粒脱稳,污泥比阻和滤饼含水率、滤液 COD 上升。污泥 pH 值和滤液 pH 值降低是因为 PFS 本质上是多核羟基络合物的中间产物,PFS 与颗粒物的吸附实际上是表面络合配位作用。PFS 吸附污泥颗粒表面后,溶液中的羟基依然受 PFS 的影响继续进行水解沉淀,直到吸附饱和成为氢氧化物沉淀,因此,污泥和滤液呈酸性。综合考虑 SRF、泥饼含水率和滤液 COD 3 个指标后,PFS 的最佳投加量为 100 mg/g DS。

## 2.4 NaClO 耦合 FeCl<sub>3</sub> 对污泥脱水性能的影响

NaClO 耦合 FeCl<sub>3</sub> 对污泥脱水性能的影响如图 4 所示,随着 FeCl<sub>3</sub> 投加量的增加,污泥的 SRF 先下降后上升。当 FeCl<sub>3</sub> 投加量为 120 mg/g DS 时,污泥比阻最低为  $3.93 \times 10^{11}$  m/kg。滤饼含水率变化趋势与污泥比阻相同。当 FeCl<sub>3</sub> 投加量为 120 mg/g DS 时,滤饼含水率最低,为 86.36%。随着 FeCl<sub>3</sub> 投加量的增加,滤液 COD 缓慢上升后略有下降,当 FeCl<sub>3</sub> 投加量为 40 mg/g DS 时,滤液 COD 含量最低,为 84 mg/L。滤液 pH 值随 FeCl<sub>3</sub> 投加量的增加缓慢下降,当 FeCl<sub>3</sub> 投加量为 140 mg/g DS 时,滤液 pH 值最低,为 4.14。污泥 pH 值随 FeCl<sub>3</sub> 投加量的增加缓慢下降,当 FeCl<sub>3</sub> 投加量为 140 mg/g DS 时,污泥 pH 值最低,为 4.02。



(a) FeCl<sub>3</sub> 投加量对污泥比阻和滤饼含水率的影响



(b) FeCl<sub>3</sub> 投加量对滤液 COD、滤液 pH 值和污泥 pH 值的影响

图 4 NaClO 耦合 FeCl<sub>3</sub> 对污泥脱水性能的影响

Fig. 4 Effects of NaClO coupled with FeCl<sub>3</sub> on dewatering performance of sludge

NaClO 耦合 FeCl<sub>3</sub> 可以显著提高污泥过滤性能。在相同条件下,NaClO 耦合 FeCl<sub>3</sub> 可以使污泥脱水效果更好。这是由于在 NaClO 氧化过程中溶解分散了部分 EPS,导致细胞内容物和结合水的释放。加入 FeCl<sub>3</sub> 后,污泥颗粒表面吸附着 Fe<sup>3+</sup>,破碎的污泥絮体重新聚合,形成体积更大的絮体,FeCl<sub>3</sub>

中的 $\text{Fe}^{3+}$ 与水中的 $\text{OH}^-$ 发生架桥反应,使污泥颗粒聚集,同时中和污泥表面的负电荷,使Zeta电位降低,污泥胶体颗粒相互吸附,形成更加稳固的沉淀,提高污泥的脱水性能<sup>[14]</sup>。当 $\text{FeCl}_3$ 投加量超过 $120 \text{ mg/g DS}$ 时,污泥比阻有明显增大趋势,表现出污泥脱水性能的抑制效果。这是因为 $\text{FeCl}_3$ 浓度过高时,过多的 $\text{Fe}^{3+}$ 会破坏污泥颗粒表面的电中性,造成污泥胶体颗粒的脱稳,吸附的污泥胶体颗粒总量也随之减小,絮凝效果下降。滤液COD会随着 $\text{FeCl}_3$ 投加量的增加而上升,因为污泥中的部分有机质无法被吸附在抽滤后的泥饼中<sup>[15]</sup>。污泥pH值和滤液pH值降低是因为 $\text{Fe}^{3+}$ 会和水发生反应,生成 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,因此,污泥pH值和滤液pH值会随着 $\text{FeCl}_3$ 投加量的增加而上升。

## 2.5 化学调理剂对污泥粒径的影响

最佳投加量条件下使用各调理剂调理污泥的絮体粒径分布如图5所示,添加不同调理剂后,粒径分布遵循同一规律:随着粒径的增大,粒径所占比例均呈现先增多后减少的趋势。原泥、 $\text{NaClO}$ 、 $\text{pH}$ 、 $\text{NaClO}$ 耦合PFS和 $\text{NaClO}$ 耦合 $\text{FeCl}_3$ 调理后污泥的 $D_{50}$ 分别为 $0.902$ 、 $0.432$ 、 $2.448$ 、 $2.699$ 、 $2.548 \mu\text{m}$ 。加入 $\text{NaClO}$ 调理后,污泥的中位粒径最小, $\text{NaClO}$ 耦合PFS调理后污泥的中位粒径最大。

原泥的絮体松散,投加复合调理剂能中和絮凝

体表面负电荷,使胶体离子之间的排斥力减小,絮体容易发生碰撞和聚集,形成粒度大、结构致密的絮凝微粒。对比5种调理剂在最佳投量下污泥絮体的尺寸可以看到,5种调理剂调理后的污泥颗粒中位粒径的大小关系为: $\text{NaClO}$ 耦合PFS $>$  $\text{NaClO}$ 耦合 $\text{FeCl}_3$  $>$  $\text{pH}$  $>$ 原泥 $>$  $\text{NaClO}$ 。投入 $\text{NaClO}$ 后,污泥的中位粒径从 $0.902 \mu\text{m}$ 下降到 $0.432 \mu\text{m}$ ,这是由于 $\text{NaClO}$ 氧化调理破坏污泥结构和溶解部分EPS,使污泥破碎成更小的颗粒<sup>[16]</sup>。 $\text{NaClO}$ 耦合PFS调理后的污泥中位粒径最大,表明在PFS作用下,游离的污泥絮体重新组合,并通过形成“骨架”嵌入到污泥结构中,形成更大的絮体,得到了更好的污泥脱水效果。

## 2.6 化学调理剂对污泥抽滤滤液性质的影响

2.6.1 滤液的三维荧光光谱图分析 最佳投加量条件下使用各调理剂调理污泥的滤液三维荧光光谱如图6所示,原泥滤液中蛋白质峰(A)强度较高,投加各种调理剂后,蛋白质峰的强度明显下降,其中,蛋白质峰最弱的是 $\text{NaClO}$ 耦合PFS调理后的污泥滤液。加入 $\text{NaClO}$ 后,增强了污泥滤液中的类蛋白质组分的分解与去除,加入PFS后, $\text{Fe}^{3+}$ 强化了 $\text{NaClO}$ 的氧化作用,同时,通过长链卷扫作用重聚合、吸附有机物小分子,使污泥滤液中类蛋白质的含量进一步降低<sup>[17]</sup>。

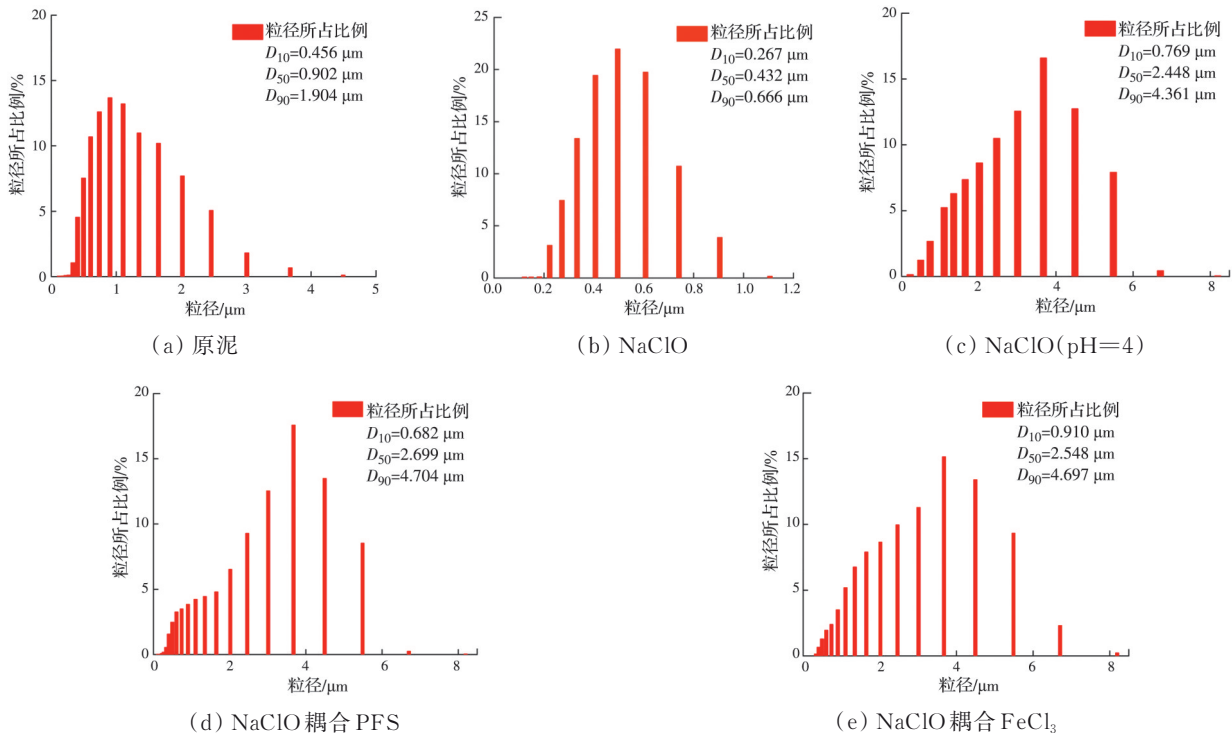


图5 最佳投加量条件下使用各调理剂调理污泥的絮体粒径分布

Fig. 5 The floc particle size distribution of the conditioned sludge using various conditioners under the optimal dosage conditions

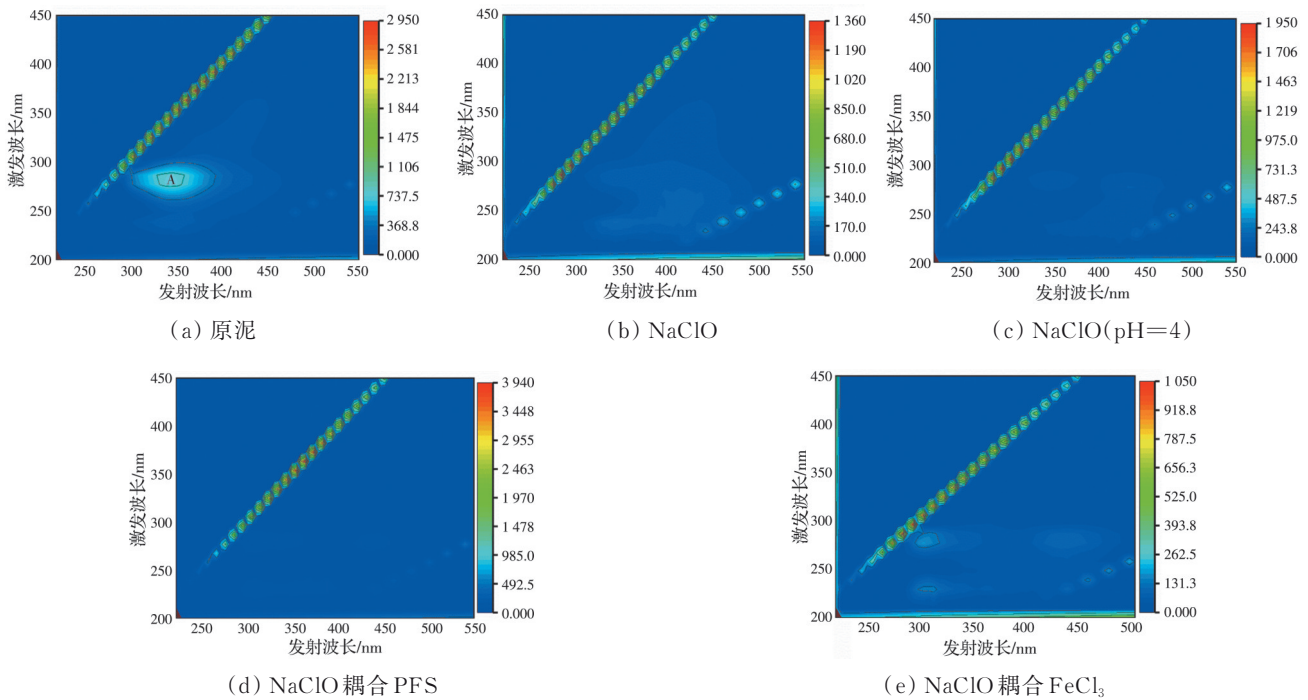
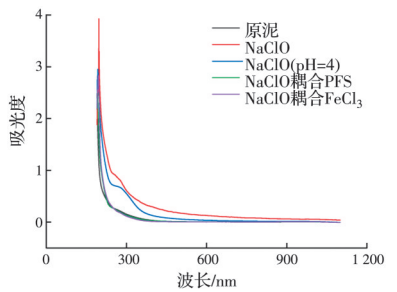
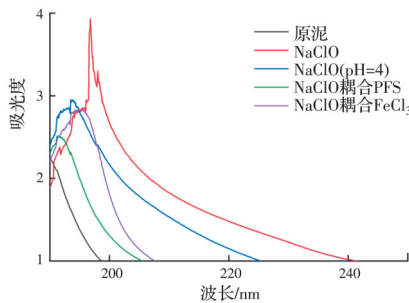


图 6 最佳投加量条件下使用各调理剂调理污泥的滤液三维荧光光谱  
**Fig. 6 Three-dimensional fluorescence spectra of sludge filtrate conditioned by various conditioners under the optimal dosage conditions**

2.6.2 滤液的 UV 光谱分析 最佳投加量条件下使用各调理剂调理污泥滤液的 UV 全波段分析如图 7 所示,经过调理后的污泥滤液在 190~210 nm 之间



(a) 190~1 100 nm 全波段扫描



(b) 190~240 nm 波段分析

图 7 最佳投加量条件下使用各调理剂调理污泥滤液的 UV 全波段分析

**Fig. 7 UV full-band analysis of sludge filtrate conditioned by various conditioners under the optimal dosage conditions**

有明显的吸收峰,原泥没有吸收峰。其中,NaClO 的波峰在 196.8 nm 处,吸光度为 3.928 1。调节 pH 值后的污泥滤液波峰在 193.5 nm 处,吸光度为 2.952 3。NaClO 耦合 PFS 调理后的污泥滤液的波峰在 191.2 nm 处,吸光度为 2.510 9。NaClO 耦合 FeCl<sub>3</sub> 调理后的污泥滤液的波峰在 194.9 nm 处,吸光度为 2.829 7。其中,NaClO 耦合 PFS 调理后污泥滤液的吸光度最低。

其中,190~210 nm 为有机酸和芳香族化合物的特征波段,因此,加入调理剂处理后滤液中存在大量难降解的芳香族化合物。加入 NaClO 后的吸光度最大为 3.928 1,NaClO 释放了 ClO<sup>-</sup>,ClO<sup>-</sup> 与水反应生成 HClO,HClO 能够渗透穿过 EPS 层,污泥中大量难降解的芳香族化合物被释放到滤液中,加入 PFS 和 FeCl<sub>3</sub> 后吸光度有所下降,这可能是因为在降解过程中不饱和键被破坏<sup>[18]</sup>。图 7 表明,NaClO 耦合 PFS 或 FeCl<sub>3</sub> 可以减少污泥中的有机酸与芳香族化合物。

2.6.3 滤液 Zeta 电位分析 最佳投加量条件下使用各调理剂调理污泥滤液的 Zeta 电位如图 8 所示,添加调理剂后,Zeta 电位整体呈增大趋势,Zeta 电位由大到小的顺序为:NaClO 耦合 FeCl<sub>3</sub>>NaClO 耦合 PFS>NaClO (pH=4)>NaClO>原泥,其中,NaClO 耦合 PFS 和 NaClO (pH=3) 的 Zeta 电位接

近于0,趋近于电中和。NaClO和带负电荷的胶体颗粒在静电引力下发生强烈的相互作用,从而使得胶体脱稳,发生絮凝形成絮体。当絮凝剂为最佳投加量时,Zeta电位应该接近或者等于0,加入PFS后, $\text{Fe}^{3+}$ 与污泥絮体表面的负电荷发生电中和反应,使污泥滤液的Zeta电位趋近于0,表明NaClO耦合PFS为最佳的联合调理剂投加方式<sup>[19]</sup>。

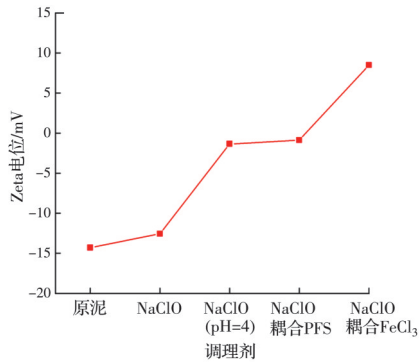


图8 最佳投加量条件下使用各调理剂调理污泥滤液的Zeta电位

Fig. 8 Zeta potential of sludge filtrate conditioned by various conditioners under the optimal dosage conditions

## 2.7 化学调理剂对污泥微观形态的影响

污泥经最佳投加量调理后的SEM图如图9所示。原泥的结构比较完整及松散,表面较光滑,脱水性能较差。经NaClO氧化调理后,污泥絮体变得更加疏松多孔;经PFS和 $\text{FeCl}_3$ 调理后,颗粒更加立体,边缘更清晰,形成粗糙的大絮体,且富含大孔隙的结构。原泥颗粒分布无序,表面结构松散、粗糙,大量水分被截留在里面,导致污泥脱水性能差,加入NaClO后,由于NaClO的强氧化性,其攻击污泥絮体的EPS层,使污泥絮体崩解,所以颗粒表面更加粗糙多孔。NaClO耦合PFS、NaClO耦合 $\text{FeCl}_3$ 调理后的污泥孔隙结构明显改善,孔隙数量增多,提供了水过滤通道,降低了污泥有机质的可压缩性<sup>[20]</sup>。PFS和 $\text{FeCl}_3$ 通过电荷中和和网捕卷扫作用增大絮体尺寸,有助于絮体沉降脱水。结果表明,泥饼的表面微观形貌结果与污泥脱水性能相对应。

## 2.8 化学调理剂的成本分析

化学调理的成本是整个污泥处理成本的重要组成部分。传统采用聚合氯化铝(10%液体、单价800元/t)/聚合硫酸铁(10%液体、单价400元/t)+阳离子聚丙烯酰胺(单价16000元/t),聚铁或聚铝投加量按250 kg/t绝干污泥计,阳离子聚丙烯酰胺

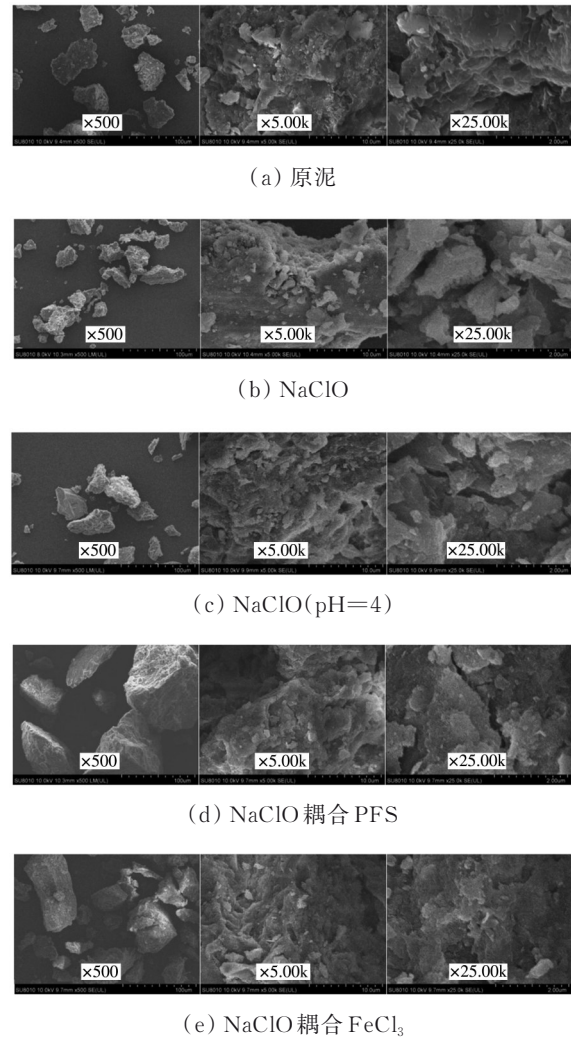


图9 污泥经最佳投加量调理后的SEM图

Fig. 9 SEM images of sludge after conditioning with optimum dosage

投加量按5 kg/t绝干污泥计,则传统污泥调理剂成本为180~280元/t绝干污泥。根据本研究中NaClO(10%有效氯、单价1100元/t)耦合PFS(10%液体、单价400元/t)的投加量(NaClO投加量为40 kg/t绝干污泥、PFS投加量为100 kg/t绝干污泥)计算出来的成本为84元/t绝干污泥。由此可见,该方法的污泥调理剂成本相对较低(未考虑污泥pH值调节费用)。但考虑实际污泥泥质、污泥pH值、试验规模、实际压滤机工况、药剂市场价变化等因素,成本存在一定变化。需要采用中试进一步验证研究成果及其成本状况。

## 3 结论

研究了不同工况条件下化学调理药剂耦合对剩余污泥脱水性能的影响,结果表明,适宜的



NaClO投加量和pH值能有效降低调理后污泥比阻和脱水后泥饼含水率。NaClO耦合FeCl<sub>3</sub>作为复合调理剂进行污泥深度脱水处理,可使调后的污泥比阻和脱水后滤饼含水率、滤液COD分别降低至 $3.93 \times 10^{11}$  m/kg、86.36%和178 mg/L。相比于单一调理剂,投加复合调理剂对污泥的脱水效果改善明显,有效增大絮体粒径,减少滤液中的有机质释放,且在絮凝过程中复合调理剂对污泥泥质和滤液有机物浓度的影响较小,有利于污泥后续处置和滤液的回流处理。

### 参考文献

- [1] 熊子康, 郑怀礼, 尚娟芳, 等. 污水反硝化脱氮工艺中外加碳源研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 168-181.
- XIONG Z K, ZHENG H L, SHANG J F, et al. State-of-the-art review of adding extra carbon sources to denitrification of wastewater treatment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 168-181. (in Chinese)
- [2] 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]. Journal of Water Process Engineering, 2022, 45: 102468.
- [3] TOUTIAN V, BARJENBRUCH M, LODERER C, et al. Impact of process parameters of thermal alkaline pretreatment on biogas yield and dewaterability of waste activated sludge [J]. Water Research, 2021, 202: 117465.
- [4] WEI H, GAO B Q, REN J, et al. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: A review [J]. Water Research, 2018, 143: 608-631.
- [5] CAO B D, ZHANG T, ZHANG W J, et al. Enhanced technology based for sewage sludge deep dewatering: A critical review [J]. Water Research, 2021, 189: 116650.
- [6] 徐文迪, 何茜, 常沙, 等. 基于Fe<sup>3+</sup>/EDTA-2Na的类芬顿对剩余污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学研究, 2022, 35(6): 1475-1481.
- XU W D, HE X, CHANG S, et al. Effect of Fenton-like sludge conditioner on waste activated sludge dewatering performance based on Fe<sup>3+</sup>/EDTA-2Na [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(6): 1475-1481. (in Chinese)
- [7] 黄锦佳, 梁嘉林, 杨贤, 等. 超声-生物沥浸-氧化钙联合超高压压滤系统实现市政污泥深度脱水及其泥饼的毒性评估[J]. 环境科学学报, 2020, 40(5): 1745-1759.
- HUANG J J, LIANG J L, YANG X, et al. Deep dewatering of sewage sludge by ultrasonic-bioleaching-lime conditioning combined with ultrahigh pressure filtration system and its toxicity evaluation [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(5): 1745-1759. (in Chinese)
- [8] 罗璐, 施周, 周先敏, 等. 溶菌酶改善剩余污泥脱水性能的效果及影响因素研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(2): 1006-1013.
- LOU L, SHI Z, ZHOU X M, et al. Enhancement of activated sludge dewatering performance by lysozym and its influencing factors [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(2): 1006-1013. (in Chinese)
- [9] 甄广印, 吴太朴, 陆雪琴, 等. 高级氧化污泥深度脱水技术研究进展[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(9): 1108-1113, 1119.
- ZHEN G Y, WU T P, LU X Q, et al. A review on advanced oxidation processes for enhancing sewage sludge dewatering [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(9): 1108-1113, 1119. (in Chinese)
- [10] 城市污水处理厂污泥检验方法: CJ/T 221—2005 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- Determination method for municipal sludge in wastewater treatment plan: CT/T 221—2005 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)
- [11] 赵晓琦, 王毅力, 张达鑫, 等. 活性污泥脱水性能与电化学阻抗谱参数的关联特性[J]. 环境工程学报, 2022, 16(3): 954-961.
- ZHAO X Q, WANG Y L, ZHANG D X, et al. Study on the correlation between dewatering performance of activated sludge and electrochemical impedance spectroscopy parameters [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(3): 954-961. (in Chinese)
- [12] 陆香玉, 俞海祥, 陈亚, 等. 化学絮凝与电絮凝调理污泥脱水性能影响作用的对比研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(3): 257-267.
- LU X Y, YU H X, CHEN Y, et al. Comparison of the effects of chemical flocculation and electric flocculation conditioning on sludge dewatering performance [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(3): 257-267. (in Chinese)
- [13] 孙文全, 朱辉, 孙永军, 等. 响应面法优化光聚合CMCTS-g-CPAM及其污泥脱水性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(4): 150-158.
- SUN W Q, ZHU H, SUN Y J, et al. Optimization of photopolymerization CMCTS-g-CPAM by response surface methodology and evaluation of sludge dewatering performance [J]. Journal of Civil and Environmental

- Engineering, 2019, 41(4): 150-158. (in Chinese)
- [14] WU B R, DAI X H, CHAI X L. Critical review on dewatering of sewage sludge: Influential mechanism, conditioning technologies and implications to sludge re-utilizations [J]. Water Research, 2020, 180: 115912.
- [15] ZHENG H L, SUN Y J, GUO J S, et al. Characterization and evaluation of dewatering properties of PADB, a highly efficient cationic flocculant [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(7): 2572-2582.
- [16] SUN W Q, ZHU H, SUN Y J, et al. Enhancement of waste-activated sludge dewaterability using combined Fenton pre-oxidation and flocculation process [J]. Desalination and Water Treatment, 2018, 126: 314-323.
- [17] 王杰, 陈钰, 赵玉婷, 等. 芬顿氧化钙体系联合DDBAC对污泥脱水性能的影响[J]. 环境工程学报, 2021, 15(4): 1424-1431.
- WANG J, CHEN Y, ZHAO Y T, et al. Effect of Fenton's reagent and CaO system combined with DDBAC on sludge dewaterability [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(4): 1424-1431. (in Chinese)
- [18] 王伟云, 王词稼, 徐鑫, 等. 氧化预处理对污泥蛋白质提取及脱水性的影响[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(5): 2285-2292.
- WANG W Y, WANG C J, XU X, et al. Effect of oxidation pretreatment on protein extraction and dewatering of sludge [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(5): 2285-2292. (in Chinese)
- [19] 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 等. 不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 928-935.
- FENG Q Y, GAO B Y, YUE Q Y, et al. Effect of different cationic polyacrylamide organic dehydrating agents on sludge dewatering performance [J]. Environmental Science, 2022, 43(2): 928-935. (in Chinese)
- [20] 郭绍东, 李晨曦, 黄兴虎, 等. 次氯酸钠与亚铁对污泥破解及脱水效果的影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(8): 3130-3137.
- GUO S D, LI C X, HUANG X H, et al. Effects of sodium hypochlorite and ferrous iron on sludge disintegration and dewatering [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(8): 3130-3137. (in Chinese)

(编辑 黄廷)