



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.201812151

中图分类号 X705

文献标识码 A

王森, 程赛鸽, 肖雪莉, 等. Fe<sup>2+</sup>活化过硫酸盐对市政污泥 EPS 性能的影响[J]. 环境工程学报, 2019, 13(9): 2243-2249.

WANG Sen, CHENG Saige, XIAO Xueli, et al. Effect of Fe<sup>2+</sup> activated persulfate on EPS properties of sewage sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(9): 2243-2249.

## Fe<sup>2+</sup>活化过硫酸盐对市政污泥 EPS 性能的影响

王森<sup>1,2,\*</sup>, 程赛鸽<sup>1,2</sup>, 肖雪莉<sup>1</sup>, 来凡<sup>1</sup>

1. 陕西科技大学环境科学与工程学院, 西安 710021

2. 陕西科技大学, 轻工工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021

第一作者: 王森 (1979—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 固体废物资源化等。E-mail: wangsen@sust.edu.cn

\*通信作者

**摘要** 针对污泥难以脱水、处理难度大的问题, 通过过硫酸盐高级氧化技术联合造纸污泥作为骨架对市政污泥进行调理, 以泥饼含水率、污泥比阻 (SRF)、毛细吸水时间 (CST)、胞外聚合物 (EPS) 中蛋白质和多糖的分布关系, 以及滤饼和滤液中总氮、总磷含量为指标, 研究 Fe<sup>2+</sup>活化过硫酸盐联合造纸污泥骨架构建体对 EPS 的影响。结果表明: 将造纸污泥与市政污泥 1:2 混合, 再添加过硫酸盐和 Fe<sup>2+</sup>, 对污泥的调理效果最好, 泥饼的含水率由 74.52% 降至 69.57%, SRF 降低了 66.23%; 蛋白质和多糖的分布关系为 S-EPS>LB-EPS>TB-EPS, 滤饼中总氮所占比例由 94.60% 下降至 65.62%, EPS 被有效破解, 污泥脱水效果显著改善。

**关键词** 市政污泥; 造纸污泥; 骨架; 胞外聚合物 (EPS)

污泥作为城市污水处理厂的主要废物, 因其含有大量病原微生物、寄生虫卵、重金属以及大量难降解的有机物<sup>[1]</sup>, 所以, 污泥最终的处理处置技术广受关注。截至 2017 年 12 月, 我国建成污水处理厂 5 072 座, 年产生含水率 80% 的污泥超过 5×10<sup>7</sup> t, 如果这些污泥得不到妥善处置, 将对环境和生态造成严重危害。目前, 对于污泥的处置多采用填埋和堆肥, 填埋处理要求污泥的含水率达到 60% 以下<sup>[2]</sup>, 而我国大多数污水处理厂不能达标, 所以, 须在污泥脱水之前对污泥进行调理, 改变污泥的组织结构, 减小污泥的黏性, 实现污泥高效脱水<sup>[3]</sup>。有研究<sup>[4]</sup>发现, 污泥难以脱水的主要原因是由于胞外聚合物 (EPS) 的存在, 将 EPS 絮体破解, 释放内部水分, 才能实现污泥高效脱水。EPS 是细菌分泌于体外的一些高分子聚合物, 主要成分是多糖、蛋白质和核酸等高分子物质。

此外, 随着我国造纸行业的发展, 造纸污泥的量也在逐年增加。造纸污泥是制浆造纸过程中产生的固体废物, 富含碳酸钙、高岭土等无机物和纤维素、半纤维素、木素等有机物, 并且还存在着部分成分复杂的污染物, 如果处理不当, 将对环境造成严重危害<sup>[5]</sup>。

目前, Fenton 法和酸处理法用于污泥调理, 但对 pH 的要求较为苛刻<sup>[6]</sup>。高级氧化法中的过硫酸盐经过渡金属、紫外以及热活化产生的硫酸根自由基 (SO<sub>4</sub><sup>·-</sup>), 其氧化还原电位 E<sub>0</sub>=2.50~3.10 eV<sup>[7]</sup>, 具有很强的氧化性和非选择性, 可以氧化绝大部分有机物, 使 EPS 絮体破解。宋秀兰等<sup>[8]</sup>和 ZHEN 等<sup>[9]</sup>采用亚铁离子活化过硫酸盐对污泥进行调理, 可以有效降低污泥的含水率, 提高污

收稿日期: 2018-12-21; 录用日期: 2019-04-01

基金项目: 陕西省科技计划项目 (2018SF-377); 轻工工程国家级实验教学示范中心 (陕西科技大学) 开放课题 (2018QGSJ02-04); 西安市科技计划项目 (2017068CG/RC031(SXKD002)); 陕西省技术创新引导专项基金资助项目 (2019CGXNG-039)

泥的脱水效果。

基于上述研究基础,本研究采用 $\text{Fe}^{2+}$ 活化过硫酸盐联合造纸初沉污泥对市政污泥进行调理,探究不同调理方式对市政污泥的各项指标的影响,以期解决市政污泥高含水率、难以脱水的难题。

## 1 材料与方法

### 1.1 污泥来源及性质

实验污泥取自某污水处理厂的浓缩池污泥(原泥),污泥性质如表1所示。骨架构建所用的造纸污泥取自某造纸废水处理厂初沉污泥,有机质(VSS/TSS)为44.25%。

表1 污泥的特性  
Table 1 Characteristics of sludge

含水率/%	污泥比阻/( $10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	毛细吸水时间/s	pH	有机质(VSS/TSS)/%
98.68	238.97	199.8	6.71	49.85

### 1.2 实验药品及仪器设备

实验药品:过硫酸钾( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ )、硫酸亚铁( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )、氢氧化钠(NaOH)、氯化钠(NaCl)、苯酚( $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ )、考马斯亮蓝( $\text{C}_{47}\text{H}_{48}\text{N}_3\text{NaO}_7\text{S}_3$ )、抗坏血酸( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ )、钼酸铵( $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ),所用药品均为分析纯,浓硫酸(98%)。

实验仪器设备:毛细吸水时间测定装置(HDFC-10A型,北京恒奥德仪器仪表有限公司)、污泥比阻测定装置(KL-WBC-1型,武汉科林高教学设备有限公司)、黏度计(NDJ-8SN型,上海平轩科学仪器有限公司)、恒温干燥箱(WGL-125B型,天津泰斯特仪器有限公司)、紫外分光光度计(SP-UV1100型,上海奥析科学仪器有限公司)、搅拌器(JJ-4型,国华电器有限公司)、雷磁pH计(PHS-3C型,上海仪电科学仪器有限公司)、马弗炉(KSL-1200X型,上海虔钧科学仪器有限公司)、手提式压力蒸汽灭菌锅(DSX-280B型,济南欧迪医疗器械有限公司),化学需氧量(COD)快速测定仪(5B-6C型,上海沛升仪器设备有限公司)等。

### 1.3 实验方法

将取回的污泥放置在 $4^\circ\text{C}$ 冰箱中保存。实验取200 mL待测污泥于500 mL烧杯中,置于机械搅拌器上搅拌5 min,加入过硫酸钾继续搅拌10 min,继续加入硫酸亚铁继续搅拌5 min,最后加入100 mL造纸初沉污泥继续搅拌10 min,量取100 mL污泥进行污泥比阻的测定,量取10 mL调理后的污泥进行毛细吸水时间测定。污泥脱水实验在各个条件下进行3次,以保证实验的可靠性。

### 1.4 脱水效果性能评价

1) 污泥泥饼含水率:泥饼含水率是作为表征污泥调理效果好坏最为直观的参数,泥饼含水率越低,污泥调理效果越好。

2) 污泥比阻 SRF: SRF 是表征污泥过滤特性的综合指标,SRF 越大,表示污泥脱水效果越差<sup>[10]</sup>, SRF 按式(1)进行计算。

$$R_{\text{SRF}} = \frac{2PA^2b}{\mu C} \quad (1)$$

式中: $R_{\text{SRF}}$ 为污泥比阻, $10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $P$ 为过滤压力,Pa;  $A$ 为过滤面积, $\text{m}^2$ ;  $b$ 为布氏抽滤实验的 $t/V$ 对 $V$ 作线性图的斜率, $\text{s} \cdot \text{m}^{-6}$ ;  $\mu$ 为滤液黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $C$ 为单位体积滤液产生的滤饼质量,kg。

3) 毛细吸水时间 CST: CST 也是污泥脱水效果的表征指标, CST 越大,污泥脱水效果越差<sup>[11]</sup>。

4) 污泥 EPS: 污泥中 EPS 分为溶解型 EPS(S-EPS)、松散结合型 EPS(LB-EPS)、紧密结合型 EPS

(TB-EPS), 参照文献中的方法<sup>[12]</sup>提取EPS, 测定蛋白质和多糖含量, 蛋白质采用考马斯亮蓝法<sup>[13]</sup>, 多糖采用苯酚硫酸法<sup>[14]</sup>, 探究胞外聚合物的破解程度。

5) 滤饼和滤液中总氮、总磷: 由于脱氮除磷工艺过程中, 氮和磷被微生物吸收合成细胞, 通过排泥得到去除<sup>[15]</sup>, EPS 破解后, 氮、磷释放进入滤液中, 造成滤液中总氮和总磷的含量增加。

## 2 结果与讨论

### 2.1 造纸污泥投加量对污泥泥饼含水率的影响

造纸污泥投加量对污泥泥饼含水率的影响如图1所示。由图1可以看出, 未经调理的污泥泥饼含水率为74.52%, 采用过硫酸盐联合造纸初沉污泥调理后, 泥饼的含水量显著降低。随着初沉污泥与原泥混合比例的增加, 泥饼的含水率先迅速降低, 后又出现上升的趋势; 当初沉污泥与原泥以1:2的体积比混合时, 泥饼的脱水效果达到最好, 泥饼含水率降至69.57%。这是因为造纸初沉污泥中含有细小纤维、碳酸钙等物质<sup>[5]</sup>, 一定量的细小纤维可以在污泥中起到骨架支撑的作用, 使污泥在抽滤过程中保持多孔性, 形成水通道, 使污泥内部的水分高效脱出<sup>[16]</sup>。随着初沉污泥投加量的增加, 细小纤维的含量增加, 会在污泥脱水过程中阻塞水通道, 不利于水分的脱出, 所以初沉污泥与原泥最优的混合比例为1:2。

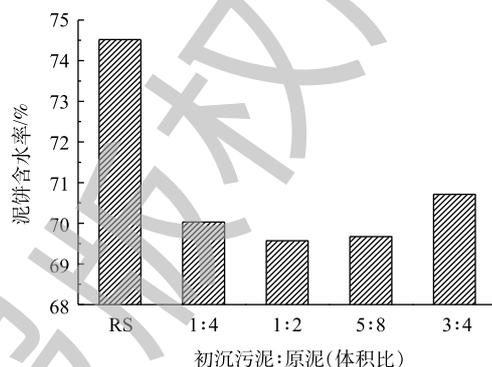


图1 不同混合比例对污泥泥饼含水率的影响  
Fig. 1 Effect of different mixing ratios on the moisture content of sludge cake

### 2.2 污泥初始 pH 对污泥泥饼含水率及 EPS 的影响

污泥初始 pH 对泥饼含水率的影响如图2所示。由图2可以看出, 随着污泥初始 pH 的增加, 泥饼含水率出现先降低后增加的趋势; 当污泥初始 pH=6 时, 泥饼的含水率由74.52%降至70.46%。在酸性条件下, 随着 pH 的增大, 泥饼的含水率下降。这是因为当 pH<3 时, 硫酸根自由基的氧化性能受到抑制, 使得泥饼含水率没有明显的降低。当 3<pH<6 时, EPS 会在酸性条件下破解, 形成细小的絮体, 使内部的水分释放, 在抽滤过程中过小的絮体可能会导致污泥系统崩溃, 堵塞水通道, 使内部的水分不能顺利脱出。当 pH=6 时, 由于体系接近于中性环境, 一方面由于硫酸根自由基的氧化性能, 另一方面由于酸环境, 污泥含水率可以显著降低。当污泥初始 pH>7 时, 污泥系统处于碱性环境, 体系中的 Fe<sup>2+</sup>和 Fe<sup>3+</sup>会形成低活性的氢氧化物沉淀<sup>[17]</sup>, 导致能活化过硫酸盐的 Fe<sup>2+</sup>量减少, 限制了过硫酸盐的氧化效率。

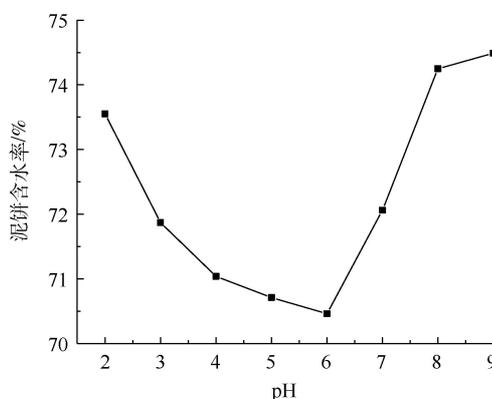


图2 不同 pH 对污泥泥饼含水率的影响  
Fig. 2 Effect of different pHs on the moisture content of sludge cake

### 2.3 不同调理方式对污泥脱水效果的影响

不同调理方式对污泥泥饼含水率、SRF 以及 CST 的影响如图3和图4所示。由图3和图4可以看出, 未经调理的原泥经抽滤脱水后泥饼的含水率为74.52%, SRF 为  $238.97 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ , CST 为 199.8 s; 采用亚铁活化过硫酸盐调理后, 原泥泥饼的含水率降至70.41%,

SRF 下降至  $80.75 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 单独使用初沉污泥调理后, 泥饼含水率降至 72.09%, SRF 降至  $189.70 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 经初沉污泥复合调理后污泥泥饼的含水率 69.57%, 污泥 SRF 下降至  $80.71 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 较原泥含水率降低 6.64%, 污泥比阻降低了 66.23%。

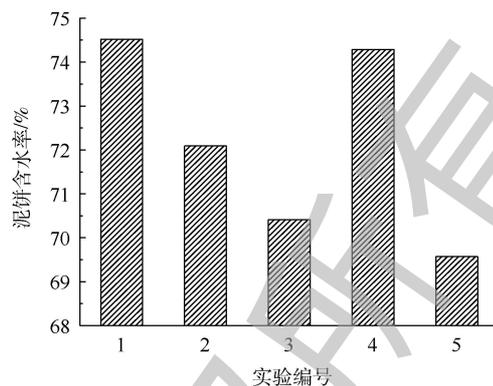
第 2 组较第 1 组的含水率、SRF 和 CST 有所降低。这是因为初沉污泥中含有的细小纤维在污泥抽滤过程中形成了水通道, 使水分有效脱出。污泥调理示意图如图 5 所示。第 3 组的含水率较第 1、2 组有所降低。这是因为亚铁活化过硫酸盐产生强氧化性的  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  将胞外聚合物氧化破解, 细胞内部水分释放, 降低泥饼含水率。第 4 组与第 5 组相比, 泥饼的含水率以及 SRF、CST 指标较高。这可能是因为造纸污泥中的纤维粒径过大, 不能起到骨架支撑的作用, 不利于内部水分脱除。第 5 组将原泥与初沉污泥进行混合后再用过硫酸盐进行调理,  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  的强氧化性可以将纤维分解为小粒径, 使其在污泥内部成功搭建骨架, 胞外聚合物破解后将内部的水分释放, 可以通过水通道将水分抽滤脱除, 使泥饼的含水率进一步降低, 这一现象与吴彦<sup>[16]</sup>的研究结果一致, 当稻壳粉的粒径为 109~150  $\mu\text{m}$  时, 泥饼的含水率降至最低。

#### 2.4 不同调理方式对污泥滤液 COD 的影响

不同调理方式对污泥滤液 COD 的影响如图 6 所示。由图 6 可以看出, 原泥滤液 COD 为  $67.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 经过硫酸盐调理之后滤液 COD 上升至  $114.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这是因为  $\text{SO}_4^{\cdot-}$  将 EPS 破解使细胞内部的蛋白质、多糖、核酸等有机物释放进入污泥中, 经过滤后有机物进入滤液中, 导致滤液 COD 含量升高。而经造纸污泥联合调理之后滤液 COD 上升至  $1104.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 较原泥滤液 COD 增加了 16.5 倍。这是因为初沉污泥中含有 EPS 和大量有机物, 在构建骨架的同时, 部分有机物进入滤液中, 造成滤液 COD 值急剧增加。

#### 2.5 不同调理方式对污泥 EPS 的影响

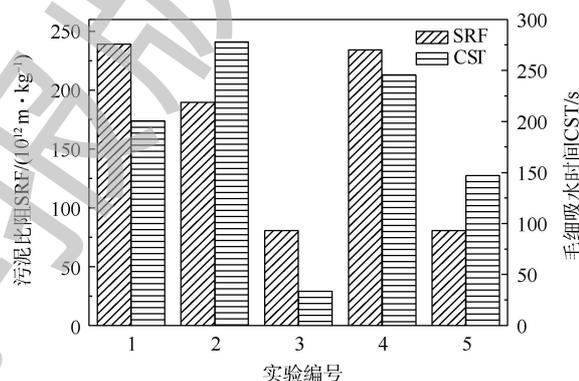
不同调理方式对污泥 EPS 中蛋白质 (PN) 和多糖 (PS) 的影响如图 7 所示。由图 7 可以看出, 原泥中 PN 和 PS 的分布关系为 TB-EPS>LB-EPS>S-EPS, 经调理后 PN 和 PS 的分布关系为 S-EPS>LB-



注: 1. 原泥; 2. 原泥→初沉污泥; 3. 原泥→ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8 \rightarrow \text{FeSO}_4$ ; 4. 原泥→ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8 \rightarrow \text{FeSO}_4 \rightarrow$ 初沉污泥; 5. 原泥→初沉污泥→ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8 \rightarrow \text{FeSO}_4$ 。

图 3 不同调理方式对污泥泥饼含水率的影响

Fig. 3 Effect of different conditioning methods on the moisture content of sludge cake



注: 1. 原泥; 2. 原泥→初沉污泥; 3. 原泥→ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8 \rightarrow \text{FeSO}_4$ ; 4. 原泥→ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8 \rightarrow \text{FeSO}_4 \rightarrow$ 初沉污泥; 5. 原泥→初沉污泥→ $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8 \rightarrow \text{FeSO}_4$ 。

图 4 不同调理方式对污泥 SRF 和 CST 的影响

Fig. 4 Effect of different conditioning methods on sludge SRF and CST

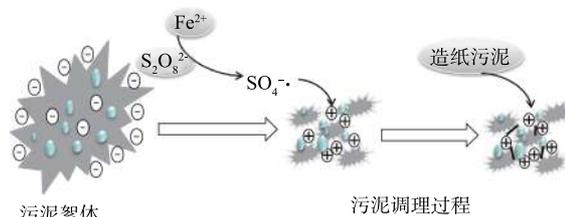
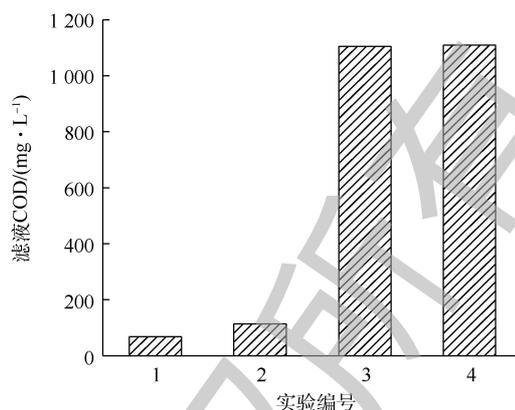


图 5 污泥调理过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of sludge conditioning process

EPS>TB-EPS, 其中变化最为显著的是第 4 组。由图 7(a) 可以看出, S-EPS 中的 PN 由 1.92 mg·g<sup>-1</sup> 上升至 14.074 mg·g<sup>-1</sup>, 较原泥增加 61.56%; PS 由 1.99 mg·g<sup>-1</sup> 上升至 20.48 mg·g<sup>-1</sup>, 较原泥增加 55.25%。同时, 由图 7(b) 可以看出, 经调理后污泥的 S-EPS 中的 PN 和 PS 明显增多, 而 TB-EPS 和 LB-EPS 中的 PN 和 PS 也显著增多, 这一结果与张昊<sup>[18]</sup>的研究相一致。

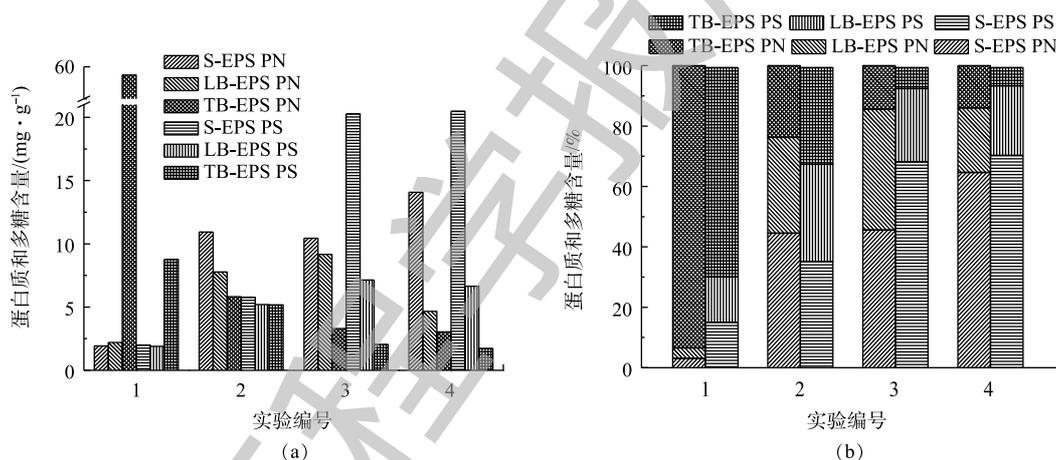
因为污泥中的 EPS 被 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>氧化破解, 使细胞内部的 PN 和 PS 等物质释放, 转化为溶解态, 使得 S-EPS 中 PN 和 PS 含量增大。调理后 PN 和 PS 的含量较原泥有大幅降低, 因为 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>具有强氧化性, 可以将 PN 和 PS 氧化分解为小分子的有机物。骨架复合调理较单独使用过硫酸盐调理的 S-EPS 中 PN 和 PS 要多, 是因为造纸污泥中也存在 EPS, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>会将其氧化释放, 使得 PN 和 PS 的含量增多。



注: 1.原泥; 2.原泥→K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>→FeSO<sub>4</sub>; 3.原泥→K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>→FeSO<sub>4</sub>→初沉污泥; 4.原泥→初沉污泥→K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>→FeSO<sub>4</sub>。

图 6 不同调理方式对污泥滤液 COD 的影响

Fig. 6 Effect of different conditioning methods on COD values of sludge filtrate



注: 1.原泥; 2.原泥→K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>→FeSO<sub>4</sub>; 3.原泥→K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>→FeSO<sub>4</sub>→初沉污泥; 4.原泥→初沉污泥→K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>→FeSO<sub>4</sub>。

图 7 不同调理方式对污泥 EPS 的影响

Fig. 7 Effect of different conditioning methods on sludge EPS

### 2.6 不同调理方式对滤饼和滤液中总氮、总磷的影响

不同调理方式对滤饼和滤液中总氮、总磷的影响如图 8 所示。由图 8(a) 可以看出, 原泥泥饼中总氮的含量为 295.75 mg·g<sup>-1</sup>, 总磷的含量为 85.00 mg·g<sup>-1</sup>。这是因为经脱氮除磷工艺后, 将大部分的氮和磷固定在污泥当中, 最终随污泥排出污水处理系统。由图 8(b) 可以看出, 经过硫酸盐单独调理的污泥, 泥饼中总磷的含量较原泥所占比例更大。这是因为污泥中存在 Fe<sup>3+</sup>和 Fe<sup>2+</sup>, 会吸附泥饼中的磷, 产生沉淀, 截留在泥饼中造成泥饼中总磷所占比例增加, 这一结果与阚丹等<sup>[19]</sup>的研究中混价铁氢氧化物对无机磷的吸附/沉淀相一致。

经初沉污泥复合调理后, 泥饼中总氮所占比例下降, 由原泥的 94.60% 下降至 65.62%。这是因为 2 种污泥中的 EPS 被破解, 将含有 N 元素的物质(蛋白质、核酸等)释放到滤液中, 造成滤液中总氮的增加, 而总磷由于 Fe<sup>3+</sup>和 Fe<sup>2+</sup>的存在并无显著变化。总氮和总磷分布关系的变化验证了 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的强氧化性能可破解 EPS, 从而提高污泥脱水性能。

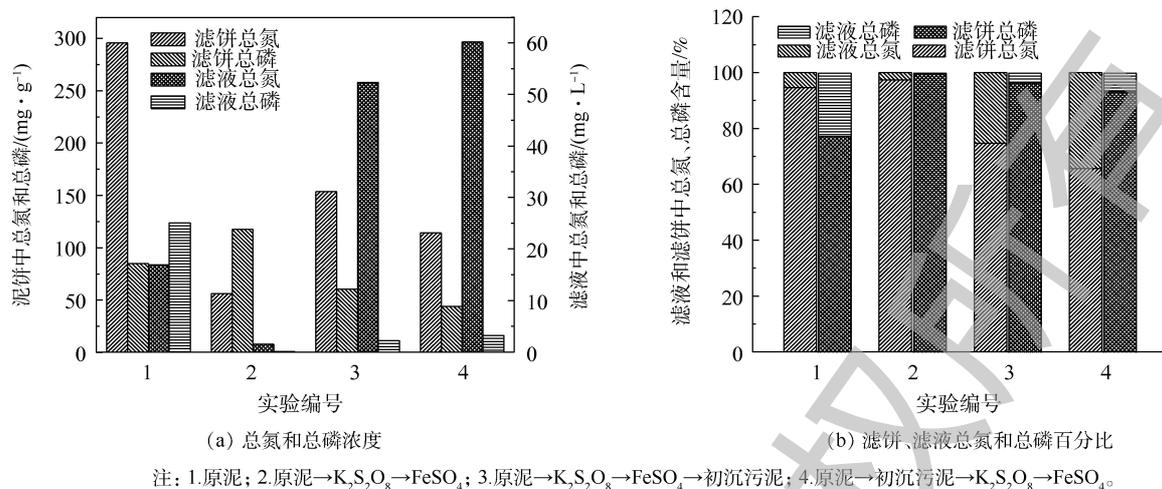


图8 不同调理方法对滤饼和滤液中总氮、总磷的影响

Fig. 8 Effect of different conditioning methods on total nitrogen and total phosphorus in filter cake and filtrate

### 3 结论

1) 经初沉污泥复合调理后污泥的脱水效果显著增强, SRF由  $121.18 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$  下降至  $32.67 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 降低了 73.04%; 泥饼含水率由 75.51% 下降至 71.75%, 降低了 4.98%。

2) 经过硫酸盐调理之后滤液 COD 由  $67.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  上升至  $114.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 而经造纸污泥联合调理之后滤液 COD 上升至  $1,104.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 较原泥滤液 COD 增加了 16.5 倍。

3) 过硫酸盐可以有效破解 EPS, 使细胞内部水分释放, 并通过初沉污泥骨架形成的水通道排出, 从而有效降低泥饼的含水率, 调理后泥饼中 PN 和 PS 的分布关系为 S-EPS>LB-EPS>TB-EPS。

4) 经调理后的污泥由于 EPS 的破解, 使泥饼中总氮所占比例由原泥的 94.60% 下降至 65.62%, 而总磷由于  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  所产生的吸附/沉淀作用并无显著变化。

### 参考文献

- [1] KRACH K R, BURNS B R, LI B, et al. Odor control for land application of lime stabilized biosolids[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2008, 8(3/4): 369-378.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质: GB/T 23485-2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [3] 高廷耀, 顾国维, 周琪. 水污染控制[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [4] MARIE C, ZHANG Y R, YANG J K. Extracellular polymeric substances and sludge solid/liquid separation under *Moringa oleifera* and chitosan conditioning: A review[J]. *Environmental Technology Reviews*, 2017, 6(1): 59-73.
- [5] 毛杰, 林珩, 郑柏存, 等. 造纸污泥表面改性的研究[J]. *中国造纸*, 2017, 36(1): 31-35.
- [6] SUN W Q, TANG M D, SUN Y J, et al. Effective sludge dewatering technique using the combination of Fenton's reagent and CPAM[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2018, 96(6): 1256-1263.
- [7] 邵永, 肖蕾, 吴云霞, 等. 过硫酸钠降解印染有机废水的研究进展[J]. *应用化工*, 2017, 46(1): 180-183.
- [8] 宋秀兰, 石杰, 吴丽雅. 过硫酸盐氧化法对污泥脱水性能的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(11): 5585-5590.
- [9] ZHEN G Y, LU X Q, ZHAO Y C, et al. Enhanced dewaterability of sewage sludge in the presence of Fe(II)-activated persulfate oxidation[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 116: 259-265.
- [10] MA W C, ZHAO L, LIU H L, et al. Improvement of sludge dewaterability with modified cinder via affecting EPS[J]. *Frontiers*

of Environmental Science and Engineering, 2017, 11(6): 19-32.

- [11] 徐文迪, 常沙, 明铁山, 等. 基于硫酸根自由基(SO<sub>4</sub><sup>·-</sup>)的污泥预处理技术[J]. 环境工程学报, 2018, 12(5): 1528-1535.
- [12] LI X Y, YANG S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. *Water Research*, 2007, 41(5): 1022-1030.
- [13] 赵璐, 何婷, 丁文欢, 等. 考马斯亮兰法(Bradford法)测定驼乳中蛋白质的含量[J]. 应用化工, 2016, 45(12): 2366-2368.
- [14] GHOLIKANDI G B, ZAKIZADEH N, MASIHI H. Application of peroxymonosulfate-ozone advanced oxidation process for simultaneous waste-activated sludge stabilization and dewatering purposes: A comparative study[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 523-531.
- [15] 孟维, 汪莘, 唐文涛. 反硝化聚磷菌在低碳源城市污水脱氮除磷处理中的应用[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(7): 91-95.
- [16] 吴彦. 稻壳基骨架颗粒制备及调理城市污泥脱水作用和机理分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [17] LU M C, LIN C J, LIAO C H, et al. Dewatering of activated sludge by Fenton's reagent[J]. *Advances in Environmental Research*, 2003, 7(3): 667-670.
- [18] 张昊. 基于新型骨架构建体与高级氧化剂的污泥复合调理及脱水研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [19] 阚丹, 孙静娴, 张雯, 等. 混价铁氢氧化物对无机磷的吸附/沉淀[J]. 土壤, 2012, 44(3): 520-524.

(本文编辑: 金曙光, 曲娜, 郑晓梅)

## Effect of Fe<sup>2+</sup> activated persulfate on EPS properties of sewage sludge

WANG Sen<sup>1,2,\*</sup>, CHENG Saige<sup>1,2</sup>, XIAO Xueli<sup>1</sup>, LAI Fan<sup>1</sup>

1. School of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China

2. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China

\*Corresponding author, E-mail: wangsen@sust.edu.cn

**Abstract** In response to the difficulty in sewage sludge dewatering and treatment, the combination of Fe<sup>2+</sup>-activated persulfate oxidation and skeleton builders of paper sludge was used to condition the sewage sludge. In this study, moisture content of sludge cake, specific resistance to filtration (SRF), capillary suction time (CST), the distribution of protein and polysaccharide in the EPS, and the total nitrogen and total phosphorus content in the filter cake and filtrate were used to evaluate the effect of above combination on the EPS. The result showed that when the sewage sludge was mixed with the paper sludge with a ratio of 1:2, the addition of Fe<sup>2+</sup> and persulfate could result in the best dewaterability effect. The moisture content of sludge cake decreased from 74.52% to 69.57%, and the SRF was reduced by 66.23%. The distribution of protein and polysaccharide was S-EPS>LB-EPS>TB-EPS, and the proportion of total nitrogen in cake decreased from 94.60% to 65.62%. The EPS was effectively disrupted, and the sludge dewaterability was significantly improved.

**Keywords** sewage sludge; paper sludge; skeleton; extracellular polymeric substance (EPS)