

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.15.014

# 典型污水处理工艺的污泥调理机制研究

蓝梅<sup>1,2,3</sup>, 应媛媛<sup>1,2,3</sup>, 罗海慧<sup>1,2,3</sup>, 黄文清<sup>1,2,3</sup>, 李思敏<sup>1,2,3</sup>

(1. 河北工程大学 污水处理及资源化利用河北省工程研究中心, 河北 邯郸 056038;  
2. 河北工程大学 邯郸市城市水利用技术重点实验室, 河北 邯郸 056038; 3. 河北工程大学 河北省水污染控制与水生态修复技术创新中心, 河北 邯郸 056038)

**摘要:** 为分析经过硫酸盐高级氧化处理后的市政污泥荧光蛋白组成和含量的变化及其对提高污泥脱水性能的影响,用二价铁活化过硫酸氢钾(PMS)调理三种不同工艺产生的市政污泥,并采用三维荧光光谱(EEM)和平行因子分析法(PARAFAC)进行分析。结果表明,类色氨酸蛋白是影响污泥脱水性能的重要因素,降低类色氨酸蛋白含量可以有效提高污泥脱水性能。从结构上看,在市政污泥胞外聚合物(EPS)中,类色氨酸蛋白的含量从内层紧密黏附型胞外聚合物(TB-EPS)向外层可溶性胞外聚合物(S-EPS)逐渐减少,其中TB-EPS是决定污泥脱水性能的微生物保护层。而以氧化沟为代表的污水处理工艺产生的剩余污泥比AAO和MSBR产生的剩余污泥更难脱水,这缘自于氧化沟工艺微生物处于内源呼吸期所形成的芽孢或其他休眠体保护,因此对于氧化沟污泥的调理脱水需要通过其他更有针对性的技术实现。

**关键词:** 污泥脱水; 过硫酸盐; 荧光蛋白; 三维荧光光谱

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)15-0094-07

## Sludge Conditioning Mechanism of Typical Wastewater Treatment Processes

LAN Mei<sup>1,2,3</sup>, YING Yuan-yuan<sup>1,2,3</sup>, LUO Hai-hui<sup>1,2,3</sup>, HUANG Wen-qing<sup>1,2,3</sup>,  
LI Si-min<sup>1,2,3</sup>

(1. Hebei Engineering Research Center of Sewage Treatment and Resource Utilization, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Handan Key Laboratory of Urban Water Utilization Technology, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. Hebei Technology Innovation Center of Water Pollution Control and Water Ecological Remediation, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** This paper conditioned the municipal sludge produced by three different processes by divalent iron activated peroxydinitrite (PMS), and analyzed the changes in fluorescent protein composition and content of municipal sludge after peroxydinitrite advanced oxidation treatment and its effect on improving sludge dewatering performance by three-dimensional fluorescence spectroscopy (EEM) and parallel factor analysis (PARAFAC). Tryptophan-like protein was an important factor affecting the sludge dewatering performance, and reducing tryptophan-like protein content effectively improved the sludge dewatering performance. From the perspective of structure, the content of tryptophan-like protein in extracellular polymeric substance (EPS) of municipal sludge gradually decreased from the inner layer of

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2022065)

通信作者: 蓝梅 E-mail: lanmei@hebeu.edu.cn; 李思敏 E-mail: chyeli@126.com

tightly bounded EPS (TB-EPS) to the outer layer of soluble EPS (S-EPS), in which TB-EPS was the microbial protective layer that determined the sludge dewatering performance. However, the excess sludge from wastewater treatment processes represented by oxidation ditch was more difficult to dewater than the excess sludge from AAO and MSBR, which was due to the protection of spores or other dormant bodies formed by microorganisms in the oxidation ditch process during the endogenous respiratory period. Therefore, the conditioning and dewatering of sludge from oxidation ditch needs to be realized by other more targeted conditioning technologies.

**Key words:** sludge dewatering; persulfate; fluorescent protein; EEM

活性污泥法在污水处理行业应用广泛,但在处理污水的同时也产生了大量剩余污泥,导致处理成本增加<sup>[1]</sup>,并带来了一系列问题<sup>[2]</sup>。微生物外部抵御环境扰动的胞外聚合物(EPS),在为微生物提供养分的同时也结合了大量的水,给污泥脱水环节造成阻碍,是污泥脱水的难点。污泥调理脱水环节采用的化学絮凝剂仅能对污泥起到加快聚合的作用<sup>[3]</sup>,由此得到含水率约为80%的污泥,这会造成后续运输成本的增加并为最终处置带来不便,因此提高污泥脱水性能是妥善处置污泥的关键。

随着过硫酸盐氧化法在污泥脱水<sup>[4]</sup>等领域探索的逐渐深入,EPS被认为是影响污泥脱水性能的关键因素。但EPS结构复杂,从外向内可分为可溶性EPS(S-EPS)、松散附着EPS(LB-EPS)和紧密结合EPS(TB-EPS),各部分之间疏密不同、相互黏连,剩余污泥经过调理后会产生内层向外层的转化,因此难以辨别阻碍污泥脱水的主要因素<sup>[5-6]</sup>。

笔者采用硫酸亚铁( $\text{FeSO}_4$ )活化过硫酸氢钾(PMS)对实际污水厂AAO、氧化沟和MSBR三种典型工艺产生的剩余污泥进行调理,通过三维荧光光谱-平行因子分析法(EEM-PARAFAC)分析活性污泥EPS的荧光蛋白构成、含量及占比情况,揭示不同污水处理工艺中剩余污泥荧光蛋白组分结构的区别;通过对S-EPS、LB-EPS和TB-EPS经以 $\text{Fe}(\text{II})/\text{PMS}$ 为代表的高级氧化法处理后的变化,并结合污泥脱水性能改善程度,探究高级氧化法对AAO等典型工艺剩余污泥的处理效果,旨在为提高不同污水处理工艺剩余污泥的脱水性能提供理论支持,并促进高级氧化技术在污泥脱水领域的发展和应用。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验污泥来自于邯郸市区内3个污水处理厂,

其中N-1为AAO工艺污泥,N-2为氧化沟工艺污泥,N-3为MSBR污泥。分别取自各厂浓缩池或二沉池,采用12目筛网去除杂质,在4℃下保存。浓缩池和二沉池污泥分别静沉12和18h后去除上清液,所取污泥在72h内完成试验。污泥基本性质见表1。过硫酸氢钾复合盐、硫酸亚铁均为分析纯。采用DFC10A型毛细吸水时间测定仪检测毛细吸水时间(CST),采用荧光分光光度计分析蛋白质。

表1 污泥样品基本性质

Tab.1 Basic properties of sludge samples

编号	pH	含水率/%	CST/s	TSS/( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	VSS/( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )
N-1	7.1±0.1	95.4	57.7±8.4	52.440	23.568
N-2	6.5±0.1	98.0	35.0±6.3	34.302	26.842
N-3	6.9±0.1	98.4	42.2±10.8	20.980	16.816

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 试验步骤

搅拌转速及时间参考污泥调理脱水参数<sup>[7-8]</sup>。取250 mL污泥置于烧杯中,投加1.2 mmol/g(投量以VSS为依据,下同)的PMS后以300 r/min搅拌10 min,再投加1.2 mmol/g的 $\text{FeSO}_4$ 以100 r/min搅拌30 min,以CST表征污泥脱水性能,并对样品进行测定。

### 1.2.2 EPS提取和EEM光谱分析

污泥EPS采用改良热提取方法提取<sup>[9]</sup>,为减少提取样本的差异性,每种原泥或处理污泥分别取自9个50 mL平行样离心管上清液,所提取EPS上清液过0.45  $\mu\text{m}$ 滤膜。所有原泥及处理污泥保持原有浓度进行提取、过滤和测试。

EEM光谱的激发波长( $\lambda_{\text{Ex}}$ )和发射波长( $\lambda_{\text{Em}}$ )均为200~550 nm,增量为10 nm。在10 nm的 $\lambda_{\text{Ex}}$ 和 $\lambda_{\text{Em}}$ 狭缝宽度下,以60 000 nm/min的扫描速率记录光谱。采用MATLAB R2020a软件装载的DOM Fluor

工具箱进行运算分析,样品均扣除拉曼散射和去除瑞利散射后进行PARAFAC计算。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Fe(II)/PMS体系对污泥脱水性能的影响

对3种污泥分别进行Fe(II)/PMS处理,污泥脱水性能的变化如图1所示。可以看出,对N-2污泥的处理效果最差,CST由30.2 s降低至25 s,CST降低率仅为17%。而N-1污泥和N-3污泥经处理后CST约降低40%。未处理污泥中N-2的脱水效果最好,这是由于AAO和MSBR工艺污泥处于生长曲线减数增殖期后期,而氧化沟工艺属于延时曝气法,其污泥处于生长曲线的内源呼吸期,有机物稳定且含量较少,少量的有机质对结合水的束缚较弱,更多的自由水导致N-2的CST更低。

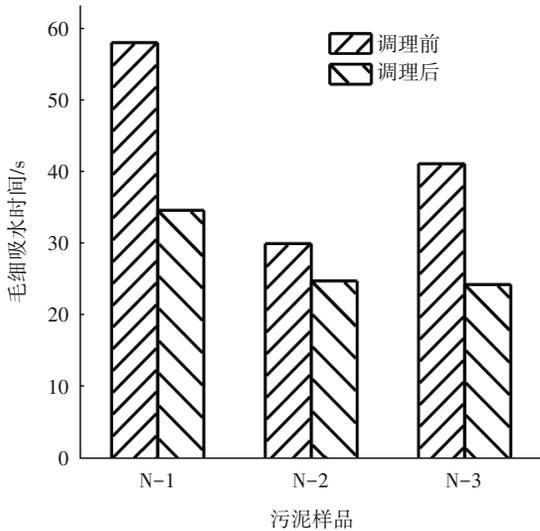
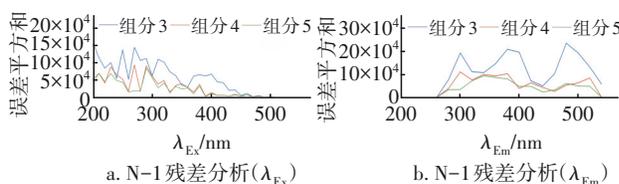


图1 Fe(II)/PMS体系中污泥脱水性能的变化

Fig.1 Change of sludge dewatering performance in Fe(II)/PMS system

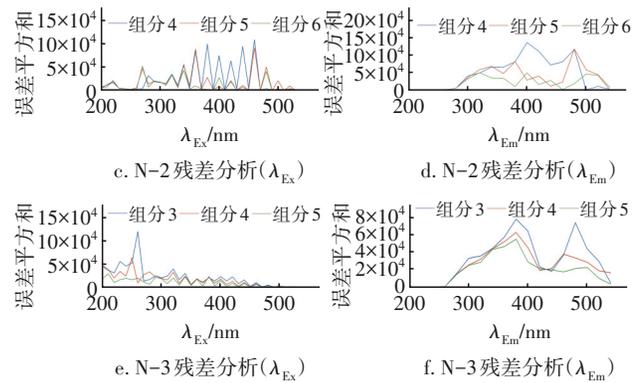
### 2.2 污泥EPS的DOM平行因子组分分类

采用PARAFAC平行因子对污泥中分层的EPS进行光谱分析,通过残差分析确定组分数,以污泥中组分构成与含量较为丰富的原泥S-EPS为组分数判定,见图2。分析发现,N-1和N-3污泥的组分4相同,而对于N-2污泥而言,由于组分4的分类无法满足其结构判定,因此采用组分5进行计算。



a. N-1残差分析( $\lambda_{Ex}$ )

b. N-1残差分析( $\lambda_{Em}$ )



c. N-2残差分析( $\lambda_{Ex}$ )

d. N-2残差分析( $\lambda_{Em}$ )

e. N-3残差分析( $\lambda_{Ex}$ )

f. N-3残差分析( $\lambda_{Em}$ )

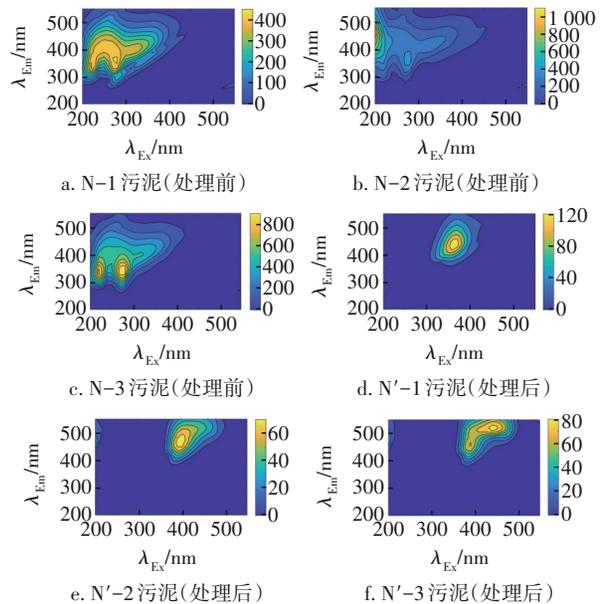
图2 三种工艺污泥的残差分析

Fig.2 Residual analysis of sludge from three processes

### 2.3 污泥EPS的DOM平行因子分析

#### 2.3.1 污泥S-EPS荧光蛋白组分的变化

三种工艺污泥处理前后S-EPS的三维荧光光谱如图3所示。



a. N-1污泥(处理前)

b. N-2污泥(处理前)

c. N-3污泥(处理前)

d. N-1污泥(处理后)

e. N-2污泥(处理后)

f. N-3污泥(处理后)

图3 三种工艺污泥处理前后S-EPS的三维荧光光谱

Fig.3 Three-dimensional fluorescence spectra of S-EPS in sludge from three processes before and after treatment

N-1主要显示了3个类腐殖质峰和1个类色氨酸峰。组分1( $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=260\text{ nm}/540\text{ nm}$ )发射波长较高,不常见于一般的芳香类氨基酸和海洋类腐殖酸,但该荧光区域在张海威等<sup>[10]</sup>的研究中有所体现;组分2( $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=240\text{ nm}/400\text{ nm}$ ;  $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=330\text{ nm}/400\text{ nm}$ )为类富里酸物质<sup>[11]</sup>;组分3( $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=220\text{ nm}/340\text{ nm}$ ;  $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=280\text{ nm}/340\text{ nm}$ )为类色氨酸的两个峰,其中S峰略有偏移,可能与过量有机质干扰有关;组分4( $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=250\text{ nm}/480\text{ nm}$ ;  $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=360\text{ nm}/$

480 nm)为类腐殖酸的A、C峰。在N-2中显示出4个类腐殖质峰和1个类色氨酸蛋白峰,其中组分4和组分5较为复杂,但从主峰来看,两组分更偏向属于水中常见的类腐殖酸( $\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}=350\sim 440\text{ nm}/430\sim 510\text{ nm}$ )。N-3也展现出了3个类腐殖质峰和1个类色氨酸蛋白峰,与N-1的光谱涉及区域均呈现高度相似状态。分析发现,经调理后的N'-1、N'-2和N'-3污泥组分均为类腐殖质峰,符合类腐殖酸(高激发、发射波长)荧光反应。

图4为污泥处理前后S-EPS组分的变化。可以看出,三种工艺污泥的类色氨酸蛋白含量均不高,仅占原泥S-EPS中荧光组分的3%~4%,其中N-1、N-2和N-3污泥类腐殖质占比分别为96.89%、95.86%和96.63%,是以类腐殖质为主体构成S-EPS。总体来看,经过Fe(II)/PMS体系处理以后的污泥S-EPS中,荧光组分明显下降,充分体现了该体系的降解效果。

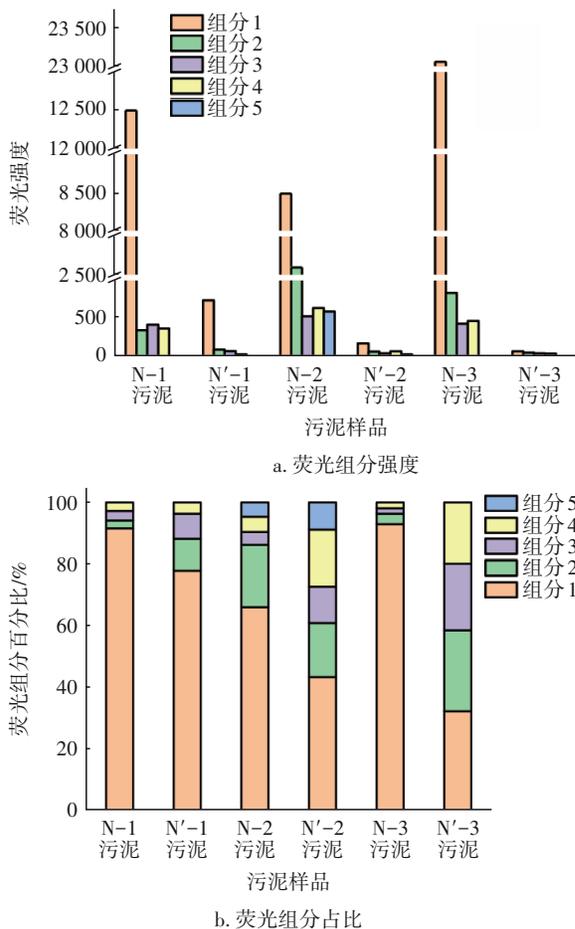


图4 污泥处理前后S-EPS组分的变化

Fig.4 Change of S-EPS components in sludge before and after treatment

### 2.3.2 污泥LB-EPS荧光蛋白组分的变化

三种工艺污泥处理前后LB-EPS的三维荧光光谱如图5所示。可知,N-1、N-2和N-3污泥均在同组分(组分1和组分2)检出类色氨酸蛋白峰,剩余组分则为类腐殖质峰,其中N-2污泥和N-3污泥组分4的类腐殖酸中有紫外类富里酸。

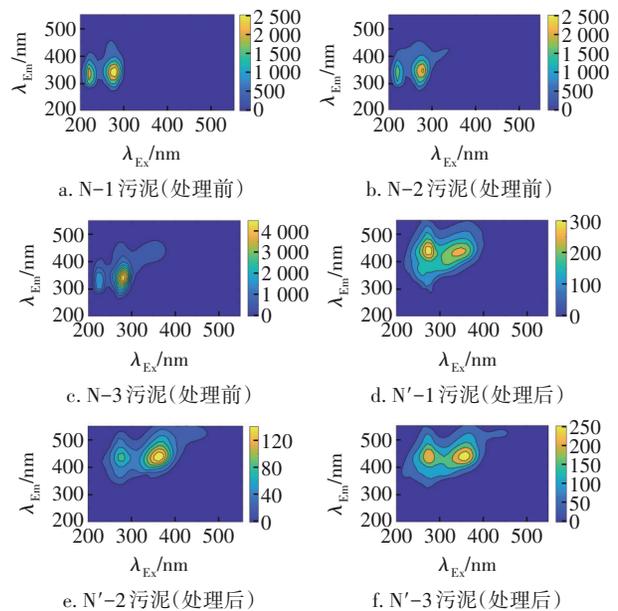
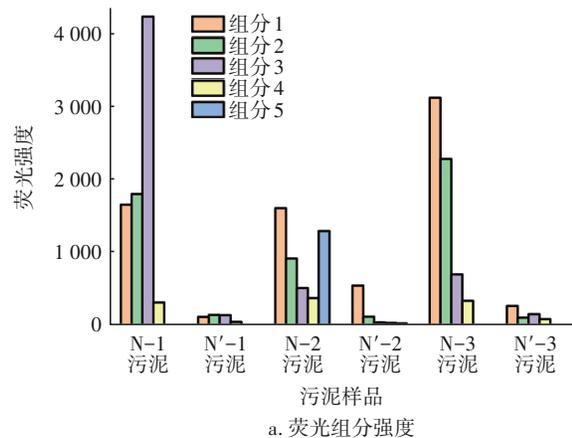


图5 三种工艺污泥处理前后LB-EPS的三维荧光光谱  
Fig.5 Three-dimensional fluorescence spectra of LB-EPS in sludge from three processes before and after treatment

但从图6中的荧光强度发现,其类富里酸部分占比不高,尤其是N-2污泥中类富里酸含量更低(组分5)。调理后的N'-1、N'-2和N'-3仅检出类腐殖质,这与S-EPS相同,类腐殖质作为大分子有机质较类色氨酸蛋白更不容易被完全分解。3种污泥的LB-EPS类色氨酸蛋白占比较S-EPS更高,可以达到40%以上,类色氨酸蛋白占比的排序为:N-3(83.67%)>N-2(53.54%)>N-1(43.23%)。



a. 荧光组分强度

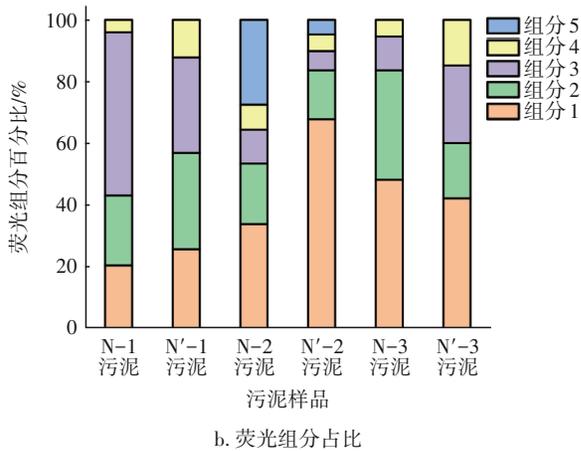


图 6 污泥处理前后 LB-EPS 组分的变化

Fig.6 Change of LB-EPS components in sludge before and after treatment

N-2 污泥的类色氨酸蛋白荧光强度也低于其他污泥。处理阶段, N-2 的 LB-EPS 中类色氨酸蛋白较其他污泥去除量更少, 这可能是导致 N-2 污泥处理前脱水效果好但处理后效果较差的原因之一。

### 2.3.3 污泥 TB-EPS 荧光蛋白组分的变化

三种工艺污泥处理前后 TB-EPS 的三维荧光光谱见图 7。可以看出, TB-EPS 中的荧光蛋白结构更为复杂, N-2 污泥有类酪氨酸蛋白被检出。而处理污泥 TB-EPS 中的 N'-1 有两个类腐殖质峰, 组分 2 为类酪氨酸蛋白, 组分 3 为类色氨酸蛋白, 类似的结果也出现在 N'-2 和 N'-3 中。

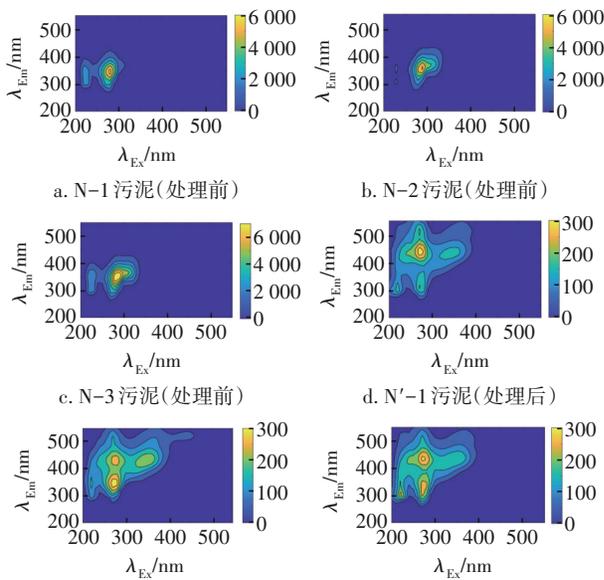


图 7 三种工艺污泥处理前后 TB-EPS 的三维荧光光谱

Fig.7 Three-dimensional fluorescence spectra of TB-EPS in sludge from three processes before and after treatment

污泥处理前后 TB-EPS 组分的变化如图 8 所示。可以看出, N-1 污泥在 TB-EPS 中的类色氨酸蛋白占比处于高位, 含有 78.25% 的类色氨酸蛋白, 其污泥脱水性能也最差, 而 N-2 污泥中类色氨酸蛋白仅有 40.25%, 其原泥脱水性能则最优, 而类腐殖质的作用不够明显, 因此初步推测影响污泥脱水性能的一类蛋白中以色氨酸类蛋白为主。Luo 等<sup>[12]</sup>对 EPS 中色氨酸的研究发现, 色氨酸蛋白可以有效起到还原作用; Zhu 等<sup>[13]</sup>则发现, 阻止色氨酸蛋白生成将增强污泥的脱水性能, 进一步解释了类色氨酸蛋白影响脱水的原因, 由此认为类色氨酸蛋白的占比增高对污泥脱水有不利影响。

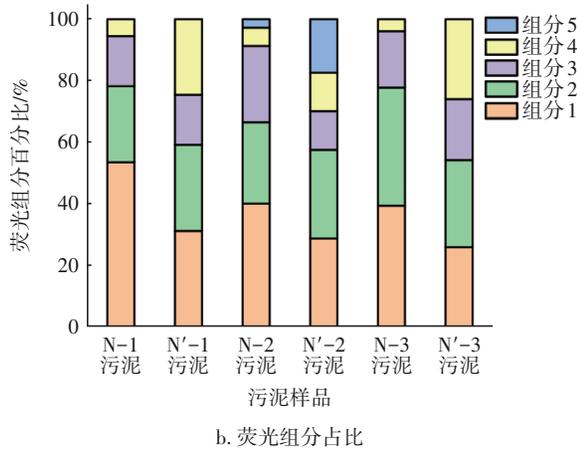
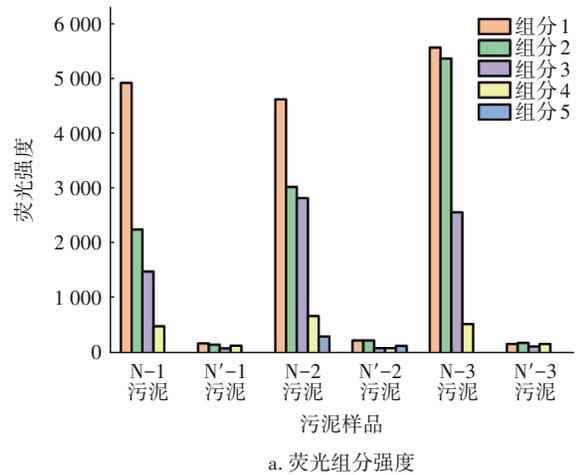


图 8 污泥处理前后 TB-EPS 组分的变化

Fig.8 Change of TB-EPS components in sludge before and after treatment

处理后污泥的 TB-EPS 展现出了与其他 EPS 不同的变化, 处理后的组分结构更复杂, N-1 和 N-3 污泥在处理后被检测到了原泥中没有出现的类酪氨酸蛋白, 其占比分别为 27.87% 和 25.91%。这种变化与微生物细胞中蛋白质溶出有关, 相对而言

EPS中蛋白质与多糖占总有机质的大部分,微生物细胞则仅占极少部分,不能证明该蛋白质是污泥脱水的主要影响因素。因此,依旧认为类色氨酸蛋白是荧光蛋白中影响污泥脱水的最主要因素。

#### 2.4 亚铁活化过硫酸盐法污泥脱水机制

目前普遍认为,亚铁/过硫酸盐法对污泥的处理以活化过程中产生的 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 、部分 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和水分子作用形成的 $\cdot\text{OH}$ 对有机物的氧化分解作用为主导<sup>[14]</sup>。以AAO污泥为例,污泥经处理后S-EPS、LB-EPS和TB-EPS的荧光蛋白强度均有大幅下降,且在TB-EPS中有类酪氨酸蛋白检出,这代表自由基对EPS形成了有效的结构性破坏,并打破了其内部微生物细胞,同样的结果也出现在氧化沟和MSBR污泥中。还有研究发现,Fenton与类Fenton等高级氧化法对污泥也有类似的处理效果<sup>[15]</sup>。因此认为,高级氧化法对于污泥调理脱水的作用效果,主要缘于自由基对污泥EPS中蛋白质结构的氧化破坏作用,这使污泥无法保持高含水率的疏松絮体模式。

从3种污泥的EPS分析发现,氧化沟原泥在S-EPS和LB-EPS部分的类色氨酸蛋白占比与AAO和MSBR污泥没有较大差异,TB-EPS中类色氨酸蛋白占比则明显较少,因此认为TB-EPS是阻碍污泥脱水的最主要因素。综上所述,污泥的荧光蛋白组成结构如图9所示,若针对TB-EPS中类色氨酸蛋白进行处理,将有效提升污泥的脱水性能。

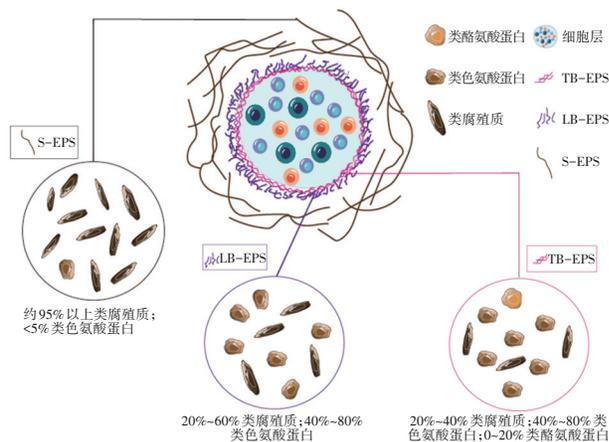


图9 典型市政污泥荧光蛋白结构及占比

Fig.9 Structure and percentage of fluorescent protein in typical municipal sludge

污泥的EPS组分结构变化与进水基质、溶解氧和温度特别是污水处理工艺等多种因素有关,这可能导致氧化沟污泥与其他污泥的组分结构不同。

试验所用的氧化沟和MSBR污泥来自不同的污水处理工艺,但进水相同,且取同月污泥进行试验,可以在一定程度上排除进水基质、温度的干扰,因此更可能是工艺不同导致的溶解氧、泥龄差异,使氧化沟污泥在脱水性能和EPS组成方面区别于其他工艺污泥。

通过前述对于EPS的分析发现,氧化沟污泥的类腐殖质占比明显较低,类色氨酸蛋白占比较高,且TB-EPS中含有类酪氨酸蛋白,这展示了氧化沟污泥在内源呼吸期消耗自身养分的状态,而此阶段的氧化沟污泥为保护自身可能形成了芽孢或其他休眠体,从而影响了自由基对该污泥的分解效果。因此,相比于内源呼吸期污泥(如氧化沟污泥),高级氧化技术对减数增殖期的污泥(如AAO和MSBR工艺)脱水调理过程更加有效,对于氧化沟污泥的处理则需要更有针对性的调理技术。

### 3 结论

① 从EPS结构来看,TB-EPS是阻碍污泥脱水的最主要因素,类色氨酸蛋白则是影响污泥脱水性能的决定因素,类色氨酸蛋白占比越高则污泥脱水性能越差。

② 高级氧化法对AAO和MSBR工艺的剩余污泥处理效果更好(CST降低约40%),而氧化沟污泥处理效果不佳(CST降低约17%),这缘于氧化沟工艺微生物处于内源呼吸期所形成的芽孢或其他休眠体保护,从而影响了调理污泥的效果。

③ 以AAO、氧化沟和MSBR为代表的市政污泥呈现相似的荧光蛋白结构,TB-EPS作为最内层的EPS,具有0~20%的类酪氨酸蛋白、40%~80%的类色氨酸蛋白,LB-EPS拥有40%~80%的类色氨酸蛋白和20%~60%的类腐殖质,S-EPS呈现约95%以上的类腐殖质和少量类色氨酸蛋白(不足5%)。

#### 参考文献:

- [1] CHEN Z, ZHANG W J, WANG D S, *et al.* Enhancement of waste activated sludge dewaterability using calcium peroxide pre-oxidation and chemical re-flocculation [J]. *Water Research*, 2016, 103: 170-181.
- [2] TIAN L X, GUO H X, WANG Y F, *et al.* Insights into Fe(II)-sulfite-based pretreatment strategy for enhancing short-chain fatty acids (SCFAs) production from waste activated sludge: performance and mechanism [J].

- Bioresource Technology, 2022, 353: 127143.
- [ 3 ] XIAO K K, PEI K Y, WANG H, *et al.* Citric acid assisted Fenton-like process for enhanced dewaterability of waste activated sludge with in-situ generation of hydrogen peroxide [J]. Water Research, 2018, 140: 232-242.
- [ 4 ] LI A M, HUANG C, FENG X, *et al.* Upgradation of sludge deep dewatering conditioners through persulfate activated by ferrous: compatibility with sludge incineration, dewatering mechanism, ecological risks elimination and carbon emission performance [J]. Environmental Research, 2022, 211: 113024.
- [ 5 ] RAYNAND M, VAXELAIRE J, OLIVIER J, *et al.* Compression dewatering of municipal activated sludge: effects of salt and pH [J]. Water Research, 2012, 46 (14) :4448-4456.
- [ 6 ] GUO J Y, GAO Q F, CHEN Y H, *et al.* Insight into sludge dewatering by advanced oxidation using persulfate as oxidant and  $Fe^{2+}$  as activator: performance, mechanism and extracellular polymers and heavy metals behaviors [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112476.
- [ 7 ] 时亚飞. 活化过硫酸盐-骨架构建体复合调理污泥深度脱水研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2014.  
SHI Yafei. Study on a Novel Composite Conditioner Combining Activated Persulfate and Skeleton Builder for Deep Dewatering of Sewage Sludge [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2014(in Chinese).
- [ 8 ] 高雯,董良飞,张凤娥,等. 不同调理剂对含油污泥脱水性能的影响研究[J]. 中国给水排水, 2016, 32(19): 115-119.  
GAO Wen, DONG Liangfei, ZHANG Feng'e, *et al.* Influence of different conditioners on dewaterability of oily sludge [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (19): 115-119(in Chinese).
- [ 9 ] YIN C Q, MENG F G, CHEN G H. Spectroscopic characterization of extracellular polymeric substances from a mixed culture dominated by ammonia-oxidizing bacteria[J]. Water Research, 2015, 68: 740-749.
- [ 10 ] 张海威,张飞,李哲,等. 新疆艾比湖主要入湖河流精河与博尔塔拉河三维荧光光谱特性及其与水质的关系[J]. 湖泊科学, 2017, 29(5): 1112-1120.  
ZHANG Haiwei, ZHANG Fei, LI Zhe, *et al.* Characteristics of three dimensional fluorescence spectra and its correlation with water quality in Jinghe and Bortala River from Lake Ebinur' s major inflow tributaries, Xinjiang[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(5): 1112-1120(in Chinese).
- [ 11 ] 林绍霞,肖致强,张转铃,等. 贵州草海水体溶解性有机物的荧光光谱特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1325-1335.  
LIN Shaoxia, XIAO Zhiqiang, ZHANG Zhuanling, *et al.* Fluorescence spectral characteristics and source apportionment of dissolved organic matters in water of Caohai Lake, Guizhou Province [J]. China Environmental Science, 2021, 41 (3) : 1325-1335 (in Chinese).
- [ 12 ] LUO X X, ZHOU X Y, PENG C Y, *et al.* Bioreduction performance of Cr ( VI ) by microbial extracellular polymeric substances (EPS) and the overlooked role of tryptophan [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 433: 128822.
- [ 13 ] ZHU Y W, XIAO K K, ZHOU Y, *et al.* Profiling of amino acids and their interactions with proteinaceous compounds for sewage sludge dewatering by Fenton oxidation treatment [J]. Water Research, 2020, 175: 115645.
- [ 14 ] 高金龙,马玉琳,孟庆来,等. 二价铁活化过硫酸盐降解土壤中十溴联苯醚[J]. 环境工程学报, 2016, 10 (12): 7339-7343.  
GAO Jinlong, MA Yulin, MENG Qinglai, *et al.* Degradation of decabromodiphenyl ether in soil by sulfate activated with ferrous ions [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10 (12) : 7339-7343(in Chinese).
- [ 15 ] JESSIELEENA A A, PRIYANKA M, SARAVANAKUMAR M P. Comparative study of Fenton,  $Fe^{2+}/NaOCl$  and  $Fe^{2+}/(NH_4)_2S_2O_8$  on tannery sludge dewaterability, degradability of organics and leachability of chromium [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 402: 123495.

作者简介: 蓝梅(1969- ), 女, 广东梅州人, 博士, 教授, 主要研究方向为高级氧化技术及其模型、城市污水和工业废水处理技术。

E-mail: lanmei@hebeu.edu.cn

收稿日期: 2022-08-23

修回日期: 2022-12-30

(编辑: 任莹莹)