

# 超声强化剩余污泥水解小分子化对溶解性有机物的影响

吴少奇<sup>1</sup>, 王黎<sup>1,2\*</sup>, 鲁逸飞<sup>1</sup>, 胡雨莎<sup>1</sup>, 柳焜<sup>1</sup>

(1. 武汉科技大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081;

2. 武汉科技大学环境污染绿色控制与修复技术研究中心, 湖北 武汉 430081)

**摘要:**为了探究超声强化污泥水解小分子化过程中溶解性有机物(DOMs)的产生途径以及变化情况,进行了超声强化污泥水解试验和序批式污泥厌氧消化试验。结果表明,超声强化污泥水解引起的胞外聚合物(EPS)破解导致污泥粒径从32.52 μm减小到了26.23 μm,有机物从紧密EPS向可溶EPS转移从而产生DOMs,可溶EPS的COD值从232 mg/L增加到2180 mg/L。可溶性蛋白质和可溶性多糖的释放程度均与能量输入比呈正相关,且二者是生成短链脂肪酸(SCFAs)的重要底物。厌氧消化过程中,SCFAs生成量随着EPS的破解而增加,乙酸和丙酸占SCFAs总质量的67.4%~85.0%。未处理污泥的主要荧光组分为类蛋白质物质,而经过超声预处理后污泥的主要荧光组分为类蛋白质物质和类腐殖酸物质。

**关键词:**超声预处理;剩余污泥;厌氧消化;溶解性有机物

中图分类号:X705

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)12-0121-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.12.025

## Effect of excess sludge hydrolysis enhanced by ultrasound on dissolved organic matters in anaerobic digestion

WU Shao-qi<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1,2\*</sup>, LU Yi-fei<sup>1</sup>, HU Yu-sha<sup>1</sup>, LIU Kun<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Research Center of Green Control and Restoration Technology for Environmental Pollution, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** In order to investigate the generation and changes of dissolved organic matters (DOMs) during the hydrolysis process of sludge enhanced by ultrasound and anaerobic digestion, sludge hydrolysis enhanced by ultrasonic test and sequential batch sludge anaerobic digestion test are carried out. The results show that decomposition of extracellular polymeric substances (EPS) caused by sludge hydrolysis enhanced by ultrasonic reduces the particle size of sludge from 32.52 μm to 26.23 μm, and organic matters shift from tightly bounded EPS into soluble EPS, which leads to the generation of DOMs. COD of soluble EPS increases from 232 mg·L<sup>-1</sup> to 2,180 mg·L<sup>-1</sup>. The release degrees of both soluble protein and soluble polysaccharide are positively correlated with the specific energy input, both are important substrates for the production of short-chain fatty acids (SCFAs). In the anaerobic digestion process, the amount of SCFAs produced increases with the decomposition of EPS, and acetic acid and propionic acid totally accounts for 67.4% - 85.0% of the total mass of SCFAs. The main fluorescent components of untreated sludge are protein-like substances, and the main fluorescent components of sludge after ultrasonic pretreatment are protein-like substances and humic acid-like substances.

**Key words:** ultrasonic pretreatment; excess sludge; anaerobic digestion; dissolved organic matters

剩余污泥是污水处理厂中产生的生物废弃物,包含有机物、重金属和病原体等污染物,已成为我国亟须面对的重大环境问题<sup>[1]</sup>。厌氧消化是处理剩余污泥的有效方式,可实现生物能源的回收、污泥量的减少以及生物量的稳定<sup>[2]</sup>。污泥水解是厌氧消化的必然阶段,复杂的大分子有机物在这一阶段先被水解成溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM),随后DOMs则进一步被降解成小分子产物,

如短链脂肪酸(short-chain fatty acids, SCFAs)等物质<sup>[3]</sup>。然而,污泥絮体的复杂性和微生物细胞壁的存在,水解阶段成为制约污泥小分子化的关键因素<sup>[4-5]</sup>。因此,有必要通过增加预处理步骤来提高水解速率。

超声用于剩余污泥预处理可实现细胞内和细胞外的物质提取<sup>[6]</sup>。Michela等<sup>[7]</sup>发现污泥超声预处理可有效地破坏胞外聚合物(extracellular polymeric

收稿日期:2020-02-06;修回日期:2020-10-14

基金项目:湖北省技术创新专项重大项目(2019ACA152)

作者简介:吴少奇(1993-),男,硕士研究生,研究方向为污泥的处理与资源化利用,jl85761886@163.com;王黎(1960-),男,博士,教授,研究方向为环境污染控制,通讯联系人,wangliwkd@163.com。

substances, EPS), 从而提高污泥厌氧消化产甲烷潜力。李道甲等<sup>[8]</sup>发现剩余污泥超声破解可实现污泥减量化, 并促进污泥中 EPS 的含量及多糖和蛋白质组分的增加。

目前, 超声强化污泥水解小分子化方面的研究偏向于通过改变超声预处理条件(如声能密度、超声时长)<sup>[9]</sup>, 或者超声与其他方法联合的途径(如超声-碱联合、超声-氧化剂联合)来提高污泥厌氧消化产酸或产甲烷效率<sup>[10-12]</sup>。然而, 剩余污泥产酸和产甲烷与 DOMs 密不可分。DOMs 在超声强化污泥水解后的产生途径, 以及在厌氧消化过程中如何进一步转化为关键性物质方面的报道较少。此外, 此类研究大多数采用的是城镇废水所产生的剩余污泥, 工业废水产生的污泥则涉及较少。

笔者主要探究了超声强化污泥水解小分子化过程中溶解性有机物(DOMs)的产生途径和变化情况。以工业废水剩余污泥为实验材料, 通过超声强化污泥水解试验和序批式污泥厌氧消化试验, 分析了超声预处理后 DOMs 的产生途径以及 DOMs 对污泥厌氧消化的影响, 以期为提高工业废水剩余污泥生物能源回收的效率提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 污泥来源

试验所用污泥来自某石化厂配套污水处理厂的二沉池, 其工艺为粉末碳活性污泥法(Powder activated carbon treatment, PACT)。污泥经重力沉降 24 h 后弃去上清液, 得到的浓缩污泥于 4℃ 条件下保存。接种污泥来自实验室培养的厌氧污泥。浓缩污泥和接种污泥的性质如表 1 所示。

表 1 浓缩污泥和接种污泥的性质

参数	浓缩污泥	接种污泥
总悬浮固体(TS)/(g·L <sup>-1</sup> )	55.6±0.80	34.7±0.4
挥发性固体(VS)/(g·L <sup>-1</sup> )	29.8±0.6	14.8±0.2
pH	6.8±0.2	7.1±0.1
总化学需氧量(TCOD)/(g·L <sup>-1</sup> )	54.7±0.5	26.2±0.1
溶解性化学需氧量(SCOD)/(mg·L <sup>-1</sup> )	232±28.0	975±18.0
可溶性蛋白质/(mg·L <sup>-1</sup> )	65±10.0	84±7.5
可溶性多糖/(mg·L <sup>-1</sup> )	22±2.5	30±4.1

### 1.2 超声强化污泥水解试验

取 300 mL 浓缩污泥, 在 20 kHz 的频率下进行超声预处理。将探针的尖端放在污泥样品 1 cm 处。通过水浴将预处理期间的温度控制在 (35±1)℃ 范围之内。污泥样品的能量输入比(specific energy

input, SEI) 分别设置为 0、6、12、18 kJ/(g TS) 和 24 kJ/(g TS)。每组实验设置 2 个平行样。根据式(1)计算施加总的能量输入(J)<sup>[13]</sup>。

$$SEI = (P \cdot t) / (V \cdot TS) \quad (1)$$

其中: SEI 为能量输入比, kJ/(g TS); P 为功率输入, W; t 为超声处理时间, s; V 为污泥体积, L; TS 为总固体质量浓度, g/L。

超声强化污泥水解的条件如表 2 所示。预处理后, 50 mL 污泥用于 SCOD、蛋白质、多糖和粒径的测定分析, 250 mL 污泥用于后续的厌氧消化试验。

表 2 超声强化污泥水解的条件

样品编号	SEI/[kJ·(g TS) <sup>-1</sup> ]	能量/J	时间/min	输入功率/W
1	6	100084	14	120
2	12	200187	21	159
3	18	300251	23	200
4	24	400334	28	238

### 1.3 序批式污泥厌氧消化试验

以 500 mL 的消化瓶为反应器进行序批式污泥厌氧消化试验。加入 250 mL 超声预处理后的污泥和 50 mL 接种污泥, 对照实验组使用未处理的污泥。厌氧消化前, 用氮气吹扫消化瓶 2~3 min, 保持反应器内处于厌氧环境。然后将消化瓶置于恒温振荡箱中(温度为 35℃, 振荡速度为 180 r/min), 厌氧消化 14 d。在厌氧消化期间, 每 2 d 取 1 次污泥样品(10 mL), 用于测定蛋白质、多糖和 SCFAs 含量。

### 1.4 分析方法

#### 1.4.1 污泥性质的表征

TS、VS、SCOD 和 TCOD 按照标准《水和废水分析检测方法(第四版)》进行测定; pH 采用 pH 计(PB-10)进行测定; 污泥粒度分布采用激光粒度分析仪(Mastersizer-2000)进行测定; 蛋白质采用考马斯蓝染色法进行测定, 以牛血清白蛋白为标准物质; 多糖采用硫酸-苯酚法进行测定, 以葡萄糖为标准物质; SCFAs 的含量通过高效液相色谱仪(U-3000)进行测定<sup>[14]</sup>。溶解性物质的测定: 污泥样品需在 10 000 r/min 条件下离心 10 min, 取上清液并通过 0.45 μm 滤膜过滤。

#### 1.4.2 EPS 的提取与分析

根据文献[15]中所述的方法, 采用热提取法对超声预处理后的污泥进行 EPS 的提取, 收集可溶 EPS、紧密 EPS 和松散 EPS。提取的上清液需通过 0.45 μm 滤膜过滤, 以分析 EPS 的含量。

#### 1.4.3 DOMs 的特征分析

为了进一步分析超声强化污泥水解对厌氧消化

过程中 DOMs 成分的影响,利用三维荧光分光光度计(RF-6000)对序批式厌氧消化试验后的污泥进行三维荧光光谱(EEM)检测,操作步骤参照文献[16]。

## 2 结果与讨论

### 2.1 超声强化污泥水解对污泥性质的影响

#### 2.1.1 EPS 质量浓度的变化

超声强化污泥水解对 EPS 质量浓度的影响如表 3 所示。

表 3 能量输入比对 EPS 质量浓度和分布的影响

	未处理	6[kJ· (g TS) <sup>-1</sup> ]	12[kJ· (g TS) <sup>-1</sup> ]	18[kJ· (g TS) <sup>-1</sup> ]	24[kJ· (g TS) <sup>-1</sup> ]
$\rho$ (可溶 EPS)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	232	505	1185	1470	2180
$\rho$ (松散 EPS)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	303	393	978	1256	1046
$\rho$ (紧密 EPS)/ (mg·L <sup>-1</sup> )	795	603	495	431	420

从表 3 中可知, EPS 的破解效果随 SEI 增强而提高。未处理的污泥,紧密 EPS 在 EPS 的占比最大。超声预处理后,可溶 EPS 的 COD 值从初始的 232 mg/L 增加到了 2 180 mg/L[24 kJ/(g TS) 条件下],紧密 EPS 的 COD 值从初始的 795 mg/L 下降到 420 mg/L,松散 EPS 则呈先增后减的变化趋势。上述结果说明超声作用于污泥后,部分 EPS 和微生物碎片发生溶解并逐步向外层 EPS 转移,从而导致可溶 EPS 的 COD 值升高<sup>[17]</sup>。超声对 EPS 的结构破坏为有机物从固相进入液相提供了途径, DOMs 的产生反映出超声预处理可有效地提高污泥水解的增溶效果<sup>[18]</sup>。

#### 2.1.2 DOMs 的变化

蛋白质与多糖作为 EPS 的主要成分<sup>[19]</sup>,超声预处理后在液相中的变化可进一步说明 DOMs 的产生情况。可溶性蛋白质和可溶性多糖质量浓度随 SEI 的变化趋势如图 1 所示。

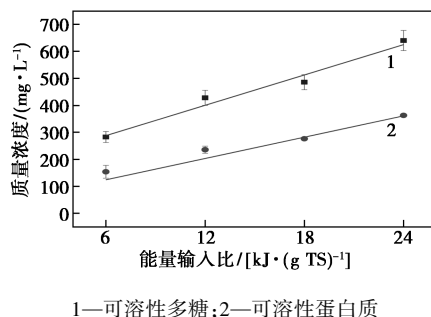
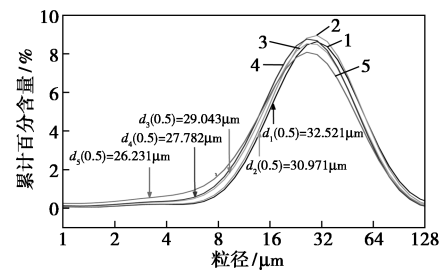


图 1 超声预处理后溶解性有机物的变化

从图 1 可以看出,可溶性蛋白质的质量浓度与 SEI 正相关( $R^2=0.9749$ ),相应的蛋白质的质量浓度变化为 283、428、486 mg/L 和 640 mg/L。可溶性多糖的释放程度则要低于可溶性蛋白质,这是由于工业废水污泥中多糖在 EPS 的占比要低于蛋白质<sup>[20]</sup>。可溶性多糖的质量浓度同样与 SEI 正相关( $R^2=0.9795$ ),对应的可溶性多糖的质量浓度的变化为 154、236、277 mg/L 和 363 mg/L。结果表明, EPS 中固态有机物向 DOMs 的转化有利于与微生物的接触,从而提高污泥厌氧消化的反应效率。

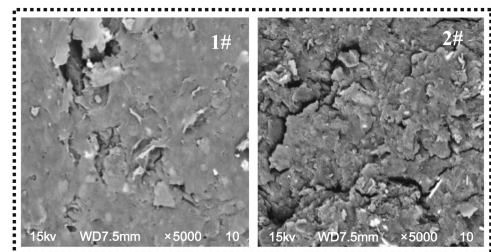
#### 2.1.3 污泥的粒径和形貌变化

污泥粒度分布变化是 EPS 破解效果的微观体现。超声强化污泥水解对污泥微观形态的影响如图 2 所示。



1—未处理;2—6 kJ/(g TS);3—12 kJ/(g TS);  
4—18 kJ/(g TS);5—24 kJ/(g TS)

(a) 粒径的分布图



1—未处理;2—超声预处理后[24 kJ/(g TS)]

(b) SEM 图

图 2 超声强化污泥水解对污泥微观形态的影响

从图 2(a)中可以看出,污泥颗粒随着能量输入比的增大而减小,中位粒径从原始的 32.52  $\mu\text{m}$  减小到 26.23  $\mu\text{m}$ ,这也证实了部分 EPS 在超声预处理后得以脱落<sup>[21]</sup>。粒度变化幅度较小,这是由于粉末碳具有很强的吸附能力,致使 EPS 结构比较稳定。超声产生的剪切力导致紧密 EPS 仅部分转化为了松散 EPS,而未进入液相, EPS 中有机物的释放不够充分<sup>[22]</sup>。

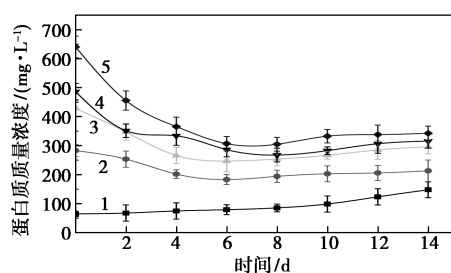
通过观察 SEM 图发现,未处理的污泥干燥后表面较为光滑平整,仅存在少量的层状结构。而超声预处理后的干化污泥形貌粗糙,出现较多的片层状

结构。这是由于 EPS 内部的微生物细胞壁受环境中·OH 的氧化作用而破裂,细胞壁堆积、叠加所形成的<sup>[23]</sup>。实验现象可表明超声强化污泥水解有利于微生物细胞壁结构的破坏,促进细胞内物质的释放。

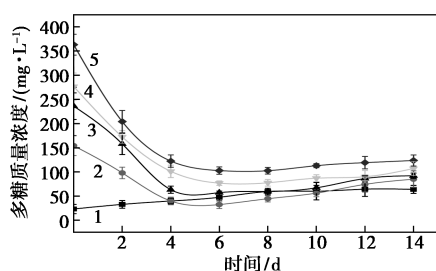
## 2.2 超声预处理污泥厌氧消化过程分析

### 2.2.1 溶解性有机物的变化过程

可溶性蛋白质和可溶性多糖在厌氧消化过程中的变化是 DOMs 变化的重要表现<sup>[24]</sup>。污泥厌氧消化过程中 DOMs 的变化情况如图 3 所示。



(a) 可溶性蛋白质



(b) 可溶性多糖

1—未处理;2—6 kJ/(g TS);3—12 kJ/(g TS);  
4—18 kJ/(g TS);5—24 kJ/(g TS)

图 3 厌氧消化过程中 DOMs 的变化

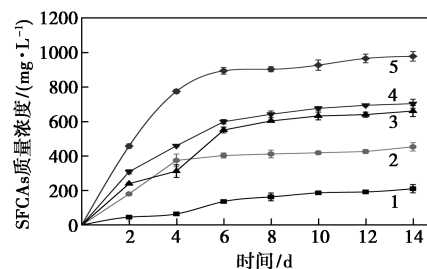
从图 3(a)中可以看出,超声预处理后的污泥在 0~6 d 的厌氧消化过程中,可溶性蛋白质质量浓度迅速降低。EPS 的破解致使蛋白质释放,液相中的可溶性蛋白质为微生物提供了可直接利用的底物,因此可溶性蛋白质的质量浓度出现降低的趋势。在 7~14 d 的厌氧消化过程中,可溶性蛋白质质量浓度逐渐趋于平稳。说明 EPS 中蛋白质从固相向液相的转化速率与反应器中可溶性蛋白被降解的速率趋于平衡,可溶性蛋白的质量浓度保持相对稳定。第 14 d 时未处理和 6、12、18、24 kJ/g TS 的可溶性蛋白的质量浓度分别为 148、213、296、316 mg/L。徐敏慧等<sup>[25]</sup>通过对超声联合碱解预处理污泥进行厌氧消化实验后发现,可溶性蛋白的质量浓度在 0~9 d 下降,10~21 d 呈平稳态势。而未处理的污泥,在 0~8 d 可溶性蛋白质质量浓度

没有明显的变化,直到第 9 d 才有较明显的上升趋势。结果表明,EPS 的破解可促进蛋白质在厌氧消化过程中的转化。

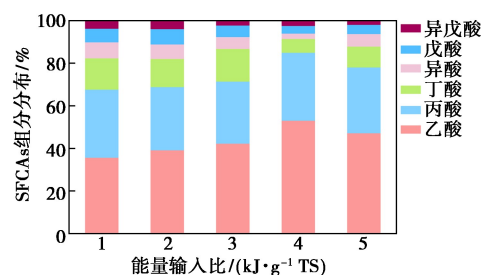
从图 3(b)可以看出,可溶性多糖的变化情况与蛋白类基本一致,且同样是厌氧微生物直接利用的底物。但由于从 EPS 中释放的多糖要少于蛋白质,平稳时反应器内可溶性多糖的质量浓度低于可溶性蛋白的质量浓度。第 14 d 时未处理和 6、12、18 kJ/(g TS)和 24 kJ/(g TS)的可溶性蛋白的质量浓度分别为 64、85、92、107 mg/L 和 124 mg/L。

### 2.2.2 短链脂肪酸的产生

短链脂肪酸(SCFAs)是 DOMs 进一步小分子化后的产物,常作为剩余污泥生物能源回收的目标产物<sup>[26]</sup>。EPS 的破解对 SCFAs 的产生和组成的影响如图 4 所示。



(a) 含量变化



(b) 组分变化

1—未处理;2—6 kJ/(g TS);3—12 kJ/(g TS);  
4—18 kJ/(g TS);5—24 kJ/(g TS)

图 4 EPS 的破解对 SCFAs 的影响

从图 4(a)可以看出, EPS 的破解明显促进了 SCFAs 产生,且随着 EPS 的破解效果提高而增加。第 14 d 时,SCFAs 质量浓度遵循以下顺序:24 kJ/(g TS) (978 mg/L) > 18 kJ/(g TS) (703 mg/L) > 12 kJ/(g TS) (661 mg/L) > 6 kJ/(g TS) (453 mg/L) > 未处理 (211 mg/L)。对于预处理后的污泥,SCFAs 生成量在厌氧消化 0~6 d 迅速上升,这与可溶性蛋白质和可溶性多糖质量浓度下降迅速相吻合。上述现象说明厌氧微生物优先利用了液相中 DOMs,其中可溶性蛋白质和可溶性多糖是产生短链脂肪酸的重要底

物<sup>[27]</sup>。在厌氧消化过程中,SFCAs的产生速率明显降低,说明反应器中DOMs被大量消耗,SFCAs的产生需要微生物先对EPS进行破解。因此,EPS中有有机物的释放对提高剩余污泥的能量回收效率十分有意义。

剩余污泥厌氧消化产生的SFCAs通常包括乙酸、丙酸、丁酸、异丁酸、戊酸以及异戊酸。图4(b)表示厌氧消化第14d不同能量输入比下单个短链SFCAs的质量分数。从图4(b)中可知,乙酸和丙酸是SFCAs中的主要成分,占总质量的67.4%~85.0%。Li等<sup>[28]</sup>在0.5W/mL声能密度下分别对污泥超声预处理20、40、80min和100min,然后进行厌氧消化,结果发现,SFCAs的主要成分是乙酸和丙酸,占总质量的70.4%~83.3%。因此,EPS中释放的有机物更容易转化为乙酸和丙酸。

### 2.2.3 厌氧消化过程中DOMs的成分分析

有机物的不饱和脂肪链和芳香环上的官能团具有一定的荧光特性,可反映出有机物自身在结构、非均质性和分子动力学特征等方面的信息<sup>[29]</sup>。因此,通过EEM分析进一步探究厌氧消化过程中DOMs的组分情况。厌氧消化过程中污泥的荧光分析结果如图5所示。

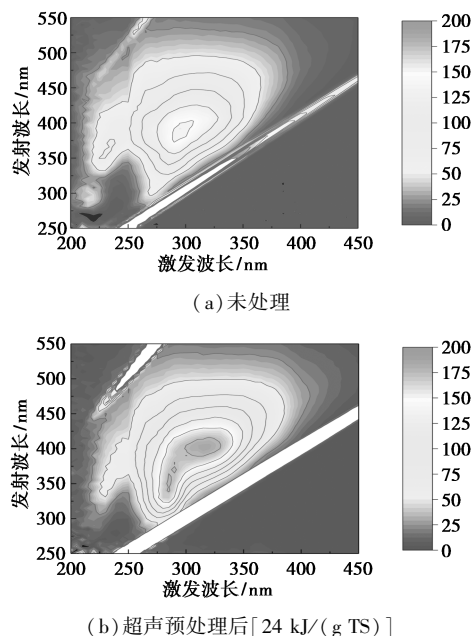


图5 厌氧消化过程中污泥的EEM图

由图5中可以看出,未处理污泥的荧光区域的激发波长为275~290nm、发射波长为330~360nm,对应的荧光组分为类蛋白质;而经过超声预处理后,污泥的荧光区域的激发波长为280~290nm、发射波长为340~360nm和激发波长为300~325nm、

发射波长为390~420nm,分别对应类蛋白质和类腐殖酸物质<sup>[30]</sup>。超声预处理污泥中类蛋白物质的荧光强度要高于未处理污泥。同时,超声强化污泥水解不仅促进了SFCAs的产生,也致使腐殖酸物质这类难降解物质在厌氧消化过程中大量生成。

## 3 结论

为了探究超声强化污泥水解小分子化过程中DOMs的产生以及变化情况。通过超声强化污泥水解试验和序批式污泥厌氧消化试验,分析了超声预处理后DOMs的产生途径以及DOMs在厌氧消化过程中的变化情况,得出如下结论:

(1) 超声强化污泥水解引起的EPS破解导致污泥粒径从32.52 $\mu\text{m}$ 减小到了26.23 $\mu\text{m}$ ,有机物从紧密EPS向可溶EPS转移而产生DOMs,可溶EPS的COD值从232mg/L增加到了2180mg/L。

(2) 可溶性蛋白质和可溶性多糖的释放程度与能量输入比呈正相关,且二者是生成SCFAs的重要底物。厌氧消化过程中,SCFAs的生成量随着EPS的破解而增加,乙酸和丙酸占SCFAs总质量的67.4%~85.0%。

(3) 未处理污泥的荧光组分为类蛋白质,而经过超声预处理后污泥的荧光区域为类蛋白质和类腐殖酸物质。

## 参考文献

- [1] Zhen G, Lu X, Kato H, *et al.* Overview of pretreatment strategies for enhancing sewage sludge disintegration and subsequent anaerobic digestion: Current advances, full-scale application and future perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69:559-577.
- [2] Yuan H, Zhu N. Progress in inhibition mechanisms and process control of intermediates and by-products in sewage sludge anaerobic digestion[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 58: 429-438.
- [3] Li X Y, Peng Y Z, He Y L, *et al.* Applying low frequency ultrasound on different biological nitrogen activated sludge types: An analysis of particle size reduction, soluble chemical oxygen demand (SCOD) and ammonia release[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, 112:42-50.
- [4] 田月臣. 超声波与碱联合预处理剩余污泥的实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [5] Zhang Q, Hu J, Lee D J, *et al.* Sludge treatment: Current research trends[J]. *Bioresour Technol*, 2017, 243: 1159-1172.
- [6] Alfredo L C, Figueiras C C, Pedreguera A Z, *et al.* Effect of ultrasonic pretreatment on the semicontinuous anaerobic digestion of waste activated sludge with increasing loading rates [J].

- International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 130:32-39.
- [7] Michela S, Giada R, Valentina C, *et al.* Tests on the effect of ultrasonic treatment on two different activated sludge waste [J]. Environment Protection Engineering, 2014, 4(1):23-34.
- [8] 李道甲, 员建, 马华继, 等. 连续流超声对低水温活性污泥性能和污泥减量的影响 [J]. 中国给水排水, 2019, 35(9):16-22.
- [9] Xu X Z, Dan C, Wang Z H, *et al.* Study on ultrasonic treatment for municipal sludge [J]. Ultrasonics-Sonochemistry, 2019, 57:29-37.
- [10] 徐慧敏, 何国富, 戴晓虎, 等. 超声联合碱解预处理对剩余污泥破解和厌氧消化的影响 [J]. 环境工程学报, 2017, (5):3073-3078.
- [11] 沈会山. 超声波破碎联合  $\text{ClO}_2$  氧化污泥的效能研究 [J]. 工业用水与废水, 2016, 47(4):84-87.
- [12] Lizama A C, Figueiras C C, Herrera R R, *et al.* Effects of ultrasonic pretreatment on the solubilization and kinetic study of biogas production from anaerobic digestion of waste activated sludge [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 123:1-9.
- [13] Pilli S, Yan S, Leblanc R J, *et al.* Ultrasonic pretreatment of sludge: A review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(1):1-18.
- [14] 孙绪顺, 褚春风, 李春杰. 反相高效液相色谱测定厌氧反应上清液中挥发性脂肪酸 [J]. 净水技术, 2009, (5):68-70.
- [15] Xiao K, Chen Y, Jiang X, *et al.* Variations in physical, chemical and biological properties in relation to sludge dewaterability under Fe (II)-oxone conditioning [J]. Water Research, 2017, 109:13-23.
- [16] Hu H, Liao K, Shi Y, *et al.* Effect of solids retention time on effluent dissolved organic nitrogen in the activated sludge process: Studies on bioavailability, fluorescent components, and molecular characteristics [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(6):3449-3455.
- [17] Dan L, Keke X, Yun C, *et al.* Transformation of dissolved organic matters produced from alkaline-ultrasonic sludge pretreatment in anaerobic digestion: From macro to micro [J]. Water Research, 2018, 142:138-146.
- [18] Li W, Yu N J W, Fang A R, *et al.* Co-treatment of potassium ferrate and ultrasonication enhances degradability and dewaterability of waste activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 361:148-155.
- [19] 蔺舒. 低声能密度超声波破解污泥的效果研究 [J]. 环境污染与防治, 2015, 37(2):78-82.
- [20] 康晓荣. 超声联合碱促进剩余污泥水解酸化及产物研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [21] 刘苗苗. 活性污泥投加粉末活性炭对硝化反硝化的影响研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2017.
- [22] Le N T, Julcour L C, Delmas H. An executive review of sludge pretreatment by sonication [J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 37:139-153.
- [23] 江云, 朱曙光, 欧阳匡, 等. 超声破解对剩余污泥内含营养物质及粒径的影响 [J]. 环境工程学报, 2018, 12(5):1303-1309.
- [24] Kang X R, Zhang G M, Chen L, *et al.* Effect of initial pH adjustment on hydrolysis and acidification of sludge by ultrasonic pretreatment [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(22):12372-12378.
- [25] 徐慧敏, 秦卫华, 李中林, 等. 超声联合热碱预处理促进剩余污泥中温厌氧消化研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(1):93-99.
- [26] 李平, 朱凤霞, 王丽苹, 等. 基于碳源回用目标的剩余污泥水解酸化产物调控研究 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(4):676-680.
- [27] Liu Y L, Li X, Kang X R, *et al.* Effect of extracellular polymeric substances disintegration by ultrasonic pretreatment on waste activated sludge acidification [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, 102:131-136.
- [28] Li X Y, Guo S Y, Peng Y Z, *et al.* Anaerobic digestion using ultrasound as pretreatment approach: Changes in waste activated sludge, anaerobic digestion performances and digestive microbial populations [J]. Biochemical Engineering Journal, 2017, 139:139-145.
- [29] 元信石. 污泥预处理强化及厌氧消化特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [30] 蔡文良, 许晓毅, 杜嫔, 等. 嘉陵江重庆段 DOM 三维荧光光谱的平行因子分析 [J]. 环境科学研究, 2012, 25(3):276-281. ■

## (上接第 120 页)

- [8] 王强, 卜锦春, 魏世强, 等. 赤铁矿对砷的吸附解吸及氧化特征 [J]. 环境科学学报, 2008, 28(8):1612-1617.
- [9] 张从军, 甘义群, 蔡鹤生. 利用钢渣处理含铜废水的试验研究 [J]. 环境科学与技术, 2005, (1):87-88, 110, 121.
- [10] 朱红, 商平. 硫铁矿烧渣在环境治理中的应用 [J]. 天津化工, 2007, 21(3):24-26.
- [11] 王谦, 张宏波, 戴丽雅, 等. 响应面法优化亚氯酸钠湿法脱硝工艺的研究 [J]. 现代化工, 2017, (1):157-160.
- [12] Kontogiannopoulos K N, Patsios S I, Karabelas A J. Tartaric acid recovery from winery lees using cation exchange resin: Optimization by response surface methodology [J]. Separation and Purification Technology, 2016, 165:32-41.
- [13] 祝方, 李璐玮, 程畅, 等. Box-Behnken 响应面分析法对双阳极电 Fenton 法处理垃圾渗滤液工艺的优化 [J]. 环境工程学报, 2016, 10(4):1749-1754.
- [14] Yagho Bimoghaddam M, Shafaei S Z, Noaparast M, *et al.* Modeling and optimization of low-grade Mn bearing ore leaching using response surface methodology and central composite rotatable design [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(12):4126-4143.
- [15] Dariush Azizi, Sied Ziaedin Shafaei, Mohammad Noaparast, *et al.* Empirical model for bio-extraction of copper from low grade ore using response surface methodology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9):2295-2305.
- [16] 唐远, 印万忠, 迟晓鹏. 金矿石全泥氰化浸出的响应面分析和优化 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2017, 45(2):246-251.
- [17] 龙云飞, 张玉, 苏静, 等. 响应面优化改进硫脲法浸出炼锌渣中银的工艺 [J]. 无机盐工业, 2015, 47(1):13-17.
- [18] 高美丽. 由赤铁矿渣制备七水合硫酸亚铁和聚硅硫酸铁的合成 [D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
- [19] 杨美艳, 聂少平, 李景恩, 等. 利用响应面分析法优化香薷中挥发油提取工艺 [J]. 食品科学, 2008, 29(9):222-225.
- [20] 万俊, 蒋爱民, 曲直, 等. 响应面法优化 Camembert 干酪加工工艺 [J]. 现代食品科技, 2012, (7):121-125.
- [21] 张秀红, 孙静超, 李琪. 响应面法优化茉莉花茶茶多糖提取工艺 [J]. 基因组学与应用生物学, 2010, 29(3):603-608. ■