

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.10.007

# QS技术在污泥处理处置领域的碳减排应用研究

桑稳姣<sup>1</sup>, 贾丹妮<sup>1</sup>, 卢伟<sup>1</sup>, 李强<sup>1</sup>, 汪晨<sup>1</sup>, 曹诚<sup>1</sup>,  
张倩<sup>1</sup>, 徐舟影<sup>1</sup>, 李翠华<sup>1</sup>, 陈刚<sup>2</sup>

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 荆门市生态环境局京山  
分局, 湖北 荆门 431800)

**摘要:** 在我国承诺2030年前实现“碳达峰”背景下,如何减少污泥处理处置领域碳排放是必须思考和面对的问题。近年来,群体感应技术在促进污泥原位减量、提升污泥厌氧消化能力以及回收剩余污泥资源与能源方面取得了一定成果,为当前污泥处理处置碳减排研究领域提供了新思路。通过回顾以往群体感应技术在污泥领域的研究现状及在碳减排方面取得的成果,结合我国污泥泥质特点以及当前污泥处理处置技术的发展,最终思考并指出面向碳减排的群体感应技术在污泥处理处置领域面临的问题和未来发展方向。

**关键词:** 碳减排; 污泥处理处置; 群体感应

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)10-0047-08

## Applied Research of Quorum Sensing Technology Used in Carbon Emission Reduction in the Field of Sludge Treatment and Disposal

SANG Wen-jiao<sup>1</sup>, JIA Dan-ni<sup>1</sup>, LU Wei<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>, WANG Chen<sup>1</sup>, CAO Cheng<sup>1</sup>,  
ZHANG Qian<sup>1</sup>, XU Zhou-ying<sup>1</sup>, LI Cui-hua<sup>1</sup>, CHEN Gang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Jingshan Branch of Jingmen Ecological Environment Bureau, Jingmen 431800, China)

**Abstract:** Under the background of China's commitment to achieve the peak carbon value by 2030, how to reduce carbon emissions in the field of sludge treatment and disposal is a problem that must be considered and faced. In recent years, quorum sensing technology has achieved certain results in reducing in-suit sludge production, improving the anaerobic digestion capacity of sludge and recovering sludge resources and energy, which provided some new idea for research filed of carbon emission reduction in sludge treatment and disposal. By reviewing the previous research status of quorum sensing technology in the field of sludge and the achievements in carbon emission reduction, combined with the characteristics of sludge and the development of current sludge treatment and disposal technology, and the future development direction of carbon emission reduction were put forward.

**Key words:** carbon emission reduction; sludge treatment and disposal; quorum sensing

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108360)

通信作者: 桑稳姣 E-mail: whlgdxswj@126.com

## 1 我国污泥处理处置技术现状分析

截至2019年,我国污水处理量已超 $2 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ ,相应的污泥年产量超过 $6\,000 \times 10^4 \text{ t}$ (以污泥含水率为80%计),预计2025年我国污泥年产量将突破 $9\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 。2019年的统计数据表明,污泥好氧堆肥、厌氧消化、深度脱水和干化技术的处理能力分别为11 803、6 130、4 730和2 140 t/d,土地利用、焚烧、卫生填埋、建材利用技术的处理能力分别为31 282、28 555、21 504、16 989 t/d,碳排放总量达到 $1.08 \times 10^8 \text{ kgCO}_2\text{-eq/d}$ 。对污泥处理处置路线的分析可知,深度脱水为高能耗技术,而土地填埋因占地面积大、易造成二次污染而逐渐被淘汰,或仅作为应急措施。2021年6月发布的《有机肥料》(NY/T 525—2021)将污泥列为禁用原料,这意味着好氧发酵+土地利用技术应用受限;虽然污泥厌氧消化能够产生甲烷等能源气体,但是我国剩余污泥有机质含量低,热值低<sup>[1]</sup>,厌氧消化技术存在有机质利用率和生物质能产量均较低等缺点<sup>[2]</sup>;而污泥焚烧能耗高,产生飞灰、烟尘颗粒等污染物。因此,现有污泥处理处置路线均有待改进之处,仍需继续研究。

## 2 碳减排要求下的污泥处理方向分析

在我国力争2030年前实现碳达峰与2060年前达到碳中和的目标下,对污泥处理处置领域进行节能降耗的碳减排研究已成为必然趋势<sup>[3]</sup>。对2011年—2021年我国污泥处理处置相关文献进行计量学分析,发现污泥处理处置相关文献2 010篇,其中与碳排放相关的文献71篇,具体见图1。

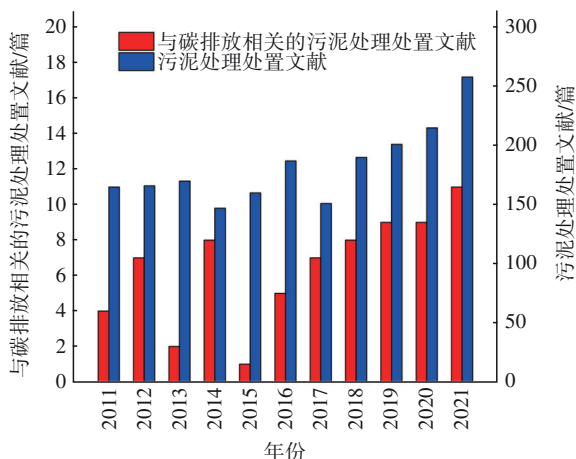


图1 2011年—2021年污泥处理处置文献数量统计

Fig.1 Statistics of the number of literature on sludge treatment and disposal from 2011 to 2021

由图1的统计结果可以看出,与污泥处理处置相关的文献量总体呈逐年上升趋势,个别年份稍有波动。2015年前,与碳排放相关的污泥处理处置文献量波动幅度较大。2015年12月,第21届联合国气候变化大会在巴黎成功召开并签署《巴黎协定》,鼓舞了科研工作者积极投身有关温室气体排放的研究,推动了全社会寻找应对气候变化的解决方案。2015年后,与碳排放相关文献的发表量逐年增加,表明污泥处理处置领域的碳排放研究已逐渐受到重视。

### 2.1 污泥处理处置领域的碳减排分析计算

目前,污泥处理处置领域的碳减排研究主要从两方面进行:一是回收剩余污泥中的资源与能源,以抵消污泥处理处置过程的能耗;二是减少污泥处理处置过程中温室气体的排放量,降低设施运行能耗,减少因药剂投加所产生的碳源。

污泥处理处置过程中碳减排总量计算公式<sup>[4]</sup>如下:

$$\text{CERs} = R_1 + R_2 - R_3 - R_4 - R_5 \quad (1)$$

式中: CERs为污泥碳减排总量;  $R_1$ 为回收能源替代化石燃料燃烧的碳减排量;  $R_2$ 为减少回收资源初次生产能耗而产生的碳减排量;  $R_3$ 为处理过程排放 $\text{N}_2\text{O}$ 气体产生的碳排放量,因COD转化成 $\text{CO}_2$ 属于自然界碳循环、 $\text{CH}_4$ 属于可回收能源,故二者均不计算在内;  $R_4$ 为运行能耗方面的碳排放量;  $R_5$ 为药剂投加带来的碳排放量。

污泥处理处置领域的碳排放计算边界如图2所示。

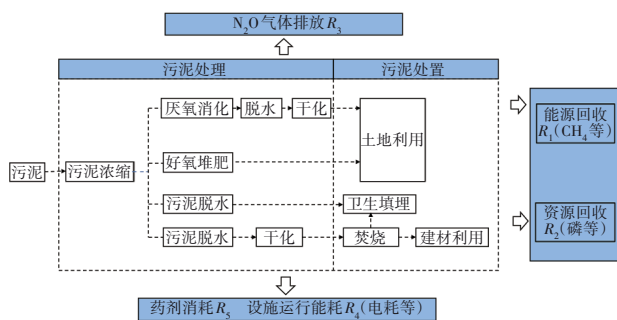


图2 污泥处理处置领域碳排放计算边界

Fig.2 Calculation boundary of carbon emission involved in sludge treatment and disposal

对我国主要污泥处理处置技术碳排放来源构成进行分析,根据碳排放来源不同,分为直接碳排放、间接碳排放和碳汇三部分。结果如表1所示。

表1 污泥处理处置技术碳排放来源构成  
Tab.1 Source composition of carbon emission in  
sludge treatment and disposal

技术类型	碳汇		直接碳排放	间接碳排放	
	能源回收 $R_1$	资源回收 $R_2$	$N_2O$ 排放 $R_3$	运行能耗 $R_4$	药剂消耗 $R_5$
污泥浓缩				√	√
厌氧消化	√	√		√	
好氧堆肥	√	√		√	
污泥脱水				√	√
污泥干化				√	
土地利用		√	√		
卫生填埋			√		
污泥焚烧	√		√	√	
建材利用		√	√		

参考 IPCC 排放因子系数法,按各省市区的实际情况确定排放因子,若无相关数据,则按 IPCC 缺省值确定。

碳减排计算公式具体如下:

$$R_1 = \sum (C_{Si} \times \lambda_i \times EF_s / q) \quad (2)$$

$$R_2 = \sum C_{Zi} \times W_{Zi} \times EF_{Zi} \quad (3)$$

$$R_3 = \sum C_{Ni} \times 298 \quad (4)$$

$$R_4 = \sum C_{Ei} \times EF_E + \sum C_{Hi} \times EF_H \quad (5)$$

$$R_5 = \sum C_{Mi} \times EF_{Mi} \quad (6)$$

式中: $C_{Si}$ 为污泥处理处置*i*环节中回收的能源,kJ; $\lambda_i$ 为污泥处理处置*i*环节能源回收效率,%; $EF_s$ 为能源的碳排放因子,统一按标煤的碳排放因子计算,kgCO<sub>2</sub>/kg; $q$ 为标准煤热值,取 29 300 kJ/kg; $C_{Zi}$ 为污泥处理处置*i*环节中的干污泥质量,kg; $W_{Zi}$ 为不同利用物中某利用元素的质量分数; $EF_{Zi}$ 为不同利用物回收产生的碳排放因子,kgCO<sub>2</sub>/kg; $C_{Ni}$ 为污泥处理处置*i*环节产生的 N<sub>2</sub>O,kg;298 为 IPCC 规定 N<sub>2</sub>O 全球增温潜势(298 kgCO<sub>2</sub>/kg); $C_{Ei}$ 为污泥处理处置*i*环节的耗电量,kW·h; $EF_E$ 为电能产生的碳排放因子,kgCO<sub>2</sub>/(kW·h); $C_{Hi}$ 为污泥处理处置*i*环节燃料质量,kg; $EF_H$ 为燃料燃烧产生的碳排放因子,kgCO<sub>2</sub>/kg; $C_{Mi}$ 为污泥处理处置*i*环节中药品种消耗量,kg; $EF_{Mi}$ 为药品投加产生的碳排放因子,kgCO<sub>2</sub>/kg。

碳汇(回收能源与资源用于替代燃料或原料)用以抵消污泥处理处置过程中温室气体产生的直接排放量、药剂消耗和运行能耗产生的间接排放量。因此,由表 1 可知,污泥脱水和卫生填埋是碳排

放的主要来源,污泥焚烧属于中等碳排放水平,好氧发酵与土地利用具有低碳排放效应,厌氧消化产生甲烷等生物质能,具有碳减排效应。

现阶段从剩余污泥中回收资源的技术成为热点,然而我国污泥有机质含量偏低,在实现资源与能源利用上有先天不足,单单依靠资源与能源回收技术完成领域内碳减排目标的可行性不大。相比于剩余污泥处理处置技术,污泥原位减量技术可在处理过程中实现污泥减量,达到减少温室气体产生、节省后续处理处置能耗与药耗的碳减排目的,具有一定的碳减排潜能。

2.2 具有碳减排潜能的污泥原位减量技术

污泥原位减量技术,即在污水处理过程中使污泥产量降低的技术。其主要通过裂解-隐性生长、投加解偶联剂等方式影响微生物的增殖、衰减和水解,进而达到减少污泥产量的目的。目前常见的污泥原位减量工艺或技术有好氧-沉降-厌氧工艺(Oxic-settling-anaerobic, OSA)、高级氧化技术、微波/超声波技术等。大多数情况下,一种污泥原位减量工艺或技术往往涉及多种污泥减量机理。

OSA 工艺通过增加厌氧单元,使污泥在好氧与厌氧环境下交替,最终实现污泥减量的工艺。OSA 工艺操作简单,不释放有毒有害物质。秦浩然<sup>[5]</sup>采用 OSA-MBR 组合工艺在实际污水处理厂进行了中试,结果表明工艺剩余污泥减量率达 40.51%,污泥减量效果明显提升。但由于脱氮除磷效果较差、占地面积大,且同时厌、好氧交替循环增大了基建投资和运行费用,因此并未大规模投入实际应用。

高级氧化技术不仅能减少污泥的干基产量,还能提高污泥的脱水性能。近些年,高铁酸盐法、臭氧氧化等成为常用的高级氧化技术,相比于其他生物与物理技术,高铁酸盐法能够有效破解污泥细胞,使得胞内物质大量溶出,且 Fe(VI)的还原产物 Fe(III)能够有效促进污泥的沉降性能与脱水性能,但其储存难度大、在水体中不稳定易分解等缺点尚待解决<sup>[6]</sup>。臭氧氧化与高铁酸盐法原理类似,通过破坏细胞壁与细胞膜,将胞内有机物释放到液相中,同时氧化大分子物质供微生物利用。臭氧具有清洁、高效及改善污泥沉降性能等优点,但会与任何还原剂发生反应,从而导致剩余污泥的氧化效率降低<sup>[7]</sup>。

解偶联剂是基于微生物代谢过程中电子传递



与磷酸化反应相耦联原理开发出的能抑制耦联磷酸化的化合物。这类化合物使微生物呼吸链中电子传递所产生的能量不能合成ATP,而只能以热的形式散发,降低了微生物的真实产率。然而,化学解耦联剂价格高且难降解,长期使用可能会导致微生物产生耐药性,同时,使用不当还可能存在环境二次污染的风险。常用的解耦联剂有四氯水杨酰苯胺(TCS)、二硝基苯酚(DNP)、对硝基苯酚(PNP)、三氯苯酚(TCP)等。研究<sup>[8]</sup>表明,投加0.8 mg/L的TCS,可使污泥产量降低63%,同时可提高上清液中可溶性微生物产物(SMP)的回收效率。

微波加载实现污泥原位减量主要分为三个阶段:第一个阶段是破解污泥絮体结构;第二个阶段是破碎微生物细胞壁与细胞膜,释放胞内有机物;第三个阶段是有机物发生水解反应,促进微生物隐性生长。其优点是效率高、处理过程绿色无污染以及能提高污泥的可生物降解性。基于微波预处理的污泥减量工程结果表明,污泥减量率达29.1%~40.9%<sup>[9]</sup>。Jiang等<sup>[10]</sup>试验结果表明,微波预处理技术通过破坏污泥絮凝体和生物质细胞膜,促进了污泥中挥发性脂肪酸(VFA)的释放。Chen等<sup>[11]</sup>研究发现,微波处理后污泥减量可达43.03%。微波技术的溶出效应促进了微生物胞内物质的溶出,提升了污泥资源化回收效率,而其生物效应促进了微生物隐性生长,实现了污泥减量。

超声波主要是利用水力剪切力,通过交替的压缩和扩张,以微气泡的形成、生长和破裂压碎污泥细胞壁,进而使得胞内物质释放,改善污泥的脱水性能和可生物降解性。但是,超声波作用于污泥存在衰减的弊端。

### 2.3 实现碳减排目标的污泥资源化利用技术

剩余污泥的资源回收主要针对污泥中氮、磷、钾等无机物与脂质、蛋白质、碳水化合物、挥发性脂肪酸等有机物质,能源回收则主要针对污泥中的化学能,包括利用厌氧消化、微生物电解池回收氢气与甲烷等生物质能,利用燃料电池将化学能转变为电能回收。

传统厌氧消化技术可用于污泥稳定和能源、资源回收,但反应时间长、回收效率低。因此厌氧消化与其他污泥预处理技术耦合,提升能源与资源回收的研究逐步兴起。在提升资源回收方面,有研究者<sup>[12]</sup>将污泥热水解后利用黑曲霉菌发酵,再与厌氧

消化结合,最终污泥中有机物转化为有价值的纤维材料与挥发性脂肪酸,有机物利用率达75%。在提升能源回收方面,厌氧消化结合热水解预处理工艺可提高沼气产率,产气效率从0.15 m<sup>3</sup>/(kgVS·d)提升至0.26 m<sup>3</sup>/(kgVS·d)<sup>[13]</sup>。厌氧消化技术与超声波、微波、热水解技术耦合能提高资源与能源回收效率,减少处理过程中温室气体的排放,引领碳减排要求下厌氧消化的发展方向。但需注意的是,超声波这类物理技术会带来电耗,在减少碳排放方面有一定的局限性。故需研究厌氧消化产能的作用机理,从微生物学角度研究污泥中资源与能源回收的限制因素,探求从根本上提高能源与资源回收的方法。

微生物燃料电池(Microbial fuel cell, MFC)和微生物电解池(Microbial electrolysis cell, MEC)最初用于处理难降解有机废水,因其具有回收清洁能源、污泥产量少的优点而受到污泥处理领域的关注。He等<sup>[14]</sup>研究发现,回流污泥经电化学裂解处理后,污泥产量减少40%。在污泥减量方面,发酵产酸菌与产电菌形成共生机制,剩余污泥中的有机物在水解发酵菌作用下生成小分子有机酸,产电菌利用小分子有机酸生成氢气,有机物含量减少,实现污泥减量。在回收能源方面,MFC中位于阳极的产电菌(EAB)通过代谢底物有机物产生电子,电子传递到阴极后与电子受体反应产生电势差从而产生电能。而MEC是电子被外电源收集后送往阴极,质子传至阴极表面与电子结合生成氢气。尽管电化学技术具有回收剩余污泥资源与能源、污泥减量的作用,是实现碳减排目标的潜在技术,然而电子传递效率低、污泥中有机物难以利用使得该技术多适用于厌氧消化污泥处理。未来若需直接应用于剩余污泥处理,可考虑结合能使污泥中有机物充分释放的污泥预处理技术。我国污泥处理处置技术碳减排潜力分析如图3所示。

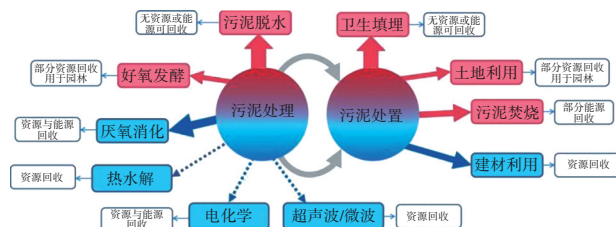


图3 我国剩余污泥处理处置技术碳减排潜力分析

Fig.3 Potential analysis of excess sludge treatment and disposal technology about carbon emission reduction in China

其中红色表示碳排放量较高的技术,蓝色表示具有碳减排效应的技术,箭头粗细代表碳排放或碳减排程度,虚线所指表示可与厌氧消化结合以提高资源与能源回收的污泥预处理技术。

### 3 群体感应技术在污泥处理领域的研究

许多研究表明,群体感应技术在调控微生物功能与行为方面发挥着重要作用。相比于物理、化学技术,它具有环保无污染、作用效果可持续、节省能源等优点。近些年,其在污泥原位减量以及剩余污泥资源与能源回收方面取得了一定的研究进展,受到更多关注。

群体感应(Quorum sensing, QS)是细菌间特殊的交流方式,许多细菌都能合成并释放一种被称为自诱导物(Autoinducer, AI)的信号分子,当达到某一临界浓度时, AI能调动菌体内特定基因的表达,调控细菌一系列的生理行为。群体感应淬灭(Quorum quenching, QQ)通过抑制 AI 合成、降解 AI 以及阻断 AI 与 AI 受体蛋白互作 3 种方式,干扰和破坏自身诱导的 QS,进而抑制细菌行为的基因表达。因此, QS 与 QQ 共同调控微生物群落间的动态平衡。根据信号分子和感应机制的不同,目前 QS 的特征信号分子及其感应机制可分为四类:①革兰氏阴性菌分泌的酰基高丝氨酸内酯类(Acylated homoserine lactones, AHLs)分子,其由 LuxI/R 型信号系统调控。该系统包括 AHLs 信号分子、AHLs 合成酶(LuxI)、AHLs 受体蛋白(LuxR), LuxI 诱导合成 AHLs,随之 AHLs 以自由扩散形式穿过细胞膜,分泌到胞外。②革兰氏阳性细菌分泌的寡肽类(Autoinducing peptide, AIP)分子,其 QS 系统由专一性 ABC 转运系统和信号转导系统两个部分组成。专一性 ABC 转运系统由 ATP-结合盒转运复合物构成;而信号转导系统由胞内响应调节子和位于膜上的受体组氨酸蛋白激酶组成。AIP 分子在体内产生的前导肽 AgrD 蛋白被切割,随后短肽信号分子被膜通道蛋白 AgrB 加工,再经修饰后由 ATP-结合盒转运系统或其他跨膜蛋白运输, AIP 信号分子由 AgrC 双组分感应蛋白信号交换系统(Two-component signal transduction system, TCSTS)识别并将信息传递给细胞,通过双组分蛋白质的磷酸化及去磷酸化调控目标基因的表达与转录。③革兰氏阴性和阳性细菌均会产生一种用于种间交流的 AI-2 分子,细菌通过同时识别自身和其

他细菌分泌的 AI-2 信号分子,进行自身生理特性调节,从而适应新环境。AI-2 信号分子主要成分为呋喃硼酸二酯,呋喃硼酸二酯的合成一般需要 LuxS 蛋白参与。④其他,如第二信使分子 c-di-GMP,可将胞外信号转换为胞内信号,完成胞外信息和胞内反应的通信工作。在细菌细胞中,2 分子三磷酸鸟苷(GTP)在二鸟苷环化酶(DGC)的催化作用下合成 c-di-GMP。而磷酸二酯酶(PDE)则催化形成 2 分子 GTP 降解 c-di-GMP。

#### 3.1 提升厌氧消化能力

现有研究表明, QS 信号分子能够提高污泥厌氧消化的能源回收效率<sup>[15]</sup>,与污泥处理处置碳减排有关污泥。厌氧消化产甲烷需经历水解、酸化、产氢产乙酸、产甲烷四个阶段,克服产氢产乙酸、产甲烷这两个限速阶段是提升污泥能源回收效率的关键因素<sup>[16]</sup>。

在产甲烷菌群体感应研究方面,早期发现产甲烷古菌 6AC 具有群体感应,可产生 AHLs 信号分子。Du 等<sup>[17]</sup>采用宏基因组技术对比现有 QS 基因数据库,得出大部分产甲烷菌的 QS 系统是基于 AHLs 介导的结论。Ma 等<sup>[18]</sup>利用二氯甲烷合成 C10-HSL,降低了信号分子投加成本,发现 C10-HSL 投加量为 5 000 nmol/L 时鬃毛甲烷菌丰度从 35% 上升到 47%。在产氢产乙酸菌研究方面,张玉鹏<sup>[16]</sup>揭示了产氢产乙酸菌与产甲烷菌之间的群体感应调节机制与共生机制,嗜氢产甲烷菌群分泌 OXOC14-HSL 刺激其与同型产乙酸菌群增长,维持系统内极低的氢分压,使产氢产乙酸菌群正常代谢生长。Li 等<sup>[19]</sup>将微生物接种体积提高至 10%,通过增加微生物密度,使微生物产生内源 AHLs,增强厌氧消化过程中产乙酸菌和产甲烷菌的合作共生,甲烷产量提升至 4.19 mmol/(gMLVSS·d),与微生物接种体积为 2.5% 相比,甲烷产量提高了 2.15 倍。这些研究表明,通过 QS 技术调控产甲烷菌和产乙酸菌的丰度,达到了增加甲烷产量的效果。除影响产甲烷与产氢产乙酸菌群外, QS 对系统中其他菌群也具有调控作用。Nguyen 等<sup>[20]</sup>发现投加 2.4 μg/L 的 AHLs 淬灭酶(AiiM)可使革兰氏阳性菌与阴性菌之间的平衡被打破,阴性菌数量减少,甲烷产量受到严重抑制,说明厌氧消化产甲烷过程需要各种菌群参与各阶段的反应,未来应关注 QS 在厌氧消化产甲烷过程中对复杂微生物群落的调控机制,总结厌氧消化过程

中菌群间的相互影响。

3.2 促进电化学产氢产能

近年来,研究发现QS具有强化电子传递活性的功能,这一功能可用来提高电化学产氢与产能效率。Cai等<sup>[21]</sup>向MEC中投加信号分子,发现MEC中胞外电子传递效率提高,从而提升了能量回收效率。他还发现,仅添加10 mmol/L的3OC6-HSL,MEC产氢率就提高了81.82%,推测是因为信号分子通过增强部分EAB活性,加速胞外电子从微生物细胞高效转移到电极上,从而提高了产氢率。Chen等<sup>[22]</sup>研究了QS对MFC能源回收效率的影响,发现

10 μmol/L的AHLs使能量回收率从20.5%增加到36.2%,停止投加两个月后仍能维持良好的系统产电性能。Liu等<sup>[23]</sup>发现,投加2.13 mg/L的游离亚硝酸进行预处理,再加入10 μmol/L的3OC6-HSL,可使剩余污泥中79.7%的碳水化合物和75.0%的蛋白质转化为氢气,达到4.3 mg/gVSS的最高产氢量。现有研究均证明QS可以较好地提升MEC与MFC的能源回收效率,且作用效果具有长效性。未来可考虑QS技术耦合污泥预处理技术,进一步提高能源回收率。QS在污泥处理领域的典型研究<sup>[15-16,19-23]</sup>如表2所示。

表2 QS在污泥处理领域的应用研究  
Tab.2 Research on QS in the sewage and sludge treatment field

信号分子	投加浓度	研究领域	目的	研究结果
C6-HSL、C8-HSL等		厌氧消化	研究甲烷发酵过程中涉及的功能菌群的群体行为	辨识出功能菌群的特征信号分子,并分析了其对功能菌群行为的调节作用
AHLs 淬灭酶	2.4 μg/L	厌氧消化	研究革兰氏阴性菌与阳性菌数量对产甲烷的影响	甲烷产量受到严重抑制
3OC6-HSL	10 mmol/L	微生物电解池	研究信号分子对MEC中胞外电子传递效率的提升机制	信号分子通过增强部分电活性细菌活性,将胞外电子从微生物细胞高效转移到电极上,提高产氢率
AI-2	10.5 mg/L	厌氧消化	通过操纵AI-2介导的QS来缩短厌氧消化过程的恢复期	AI-2减少乙酰生成,增强氢营养型产甲烷作用,导致五氯苯酚浓度冲击期间VFA积累减少,甲烷产量增加
OXOC6-HSL、C10-HSL		厌氧消化	通过微生物密度调节内源性AHLs,以增强厌氧消化中产乙酸菌和产甲烷菌的共养作用	厌氧消化中的共养产乙酸菌和产甲烷菌通过QS系统双向调控EPS的产生,构建共养菌系,使丙酸和丁酸的甲烷发酵效率提高
C4-HSL、C6-HSL、3OC12-HSL	10 μmol/L	微生物燃料电池	研究群体感应对MFC能源回收效率的影响	短期内10 μmol/L的AHLs使能量回收率从20.5%增加到36.2%
3OC6-HSL	357 μmol/L	微生物电解池	研究微生物电解细胞活性的提高对VFAs产量和有机质利用率的促进作用	剩余污泥中79.7%的碳水化合物和75.0%的蛋白质转化为氢气,达到4.3 mg/gVSS的最高产氢量

4 面向碳减排的QS技术应用与发展思考

在碳减排背景下,污泥处理处置的核心为污泥原位减量和剩余污泥资源与能源的高效回收利用。污泥原位减量技术如基于生物捕食原理的Cannibal工艺,利用外加群体感应淬灭剂使微生物的捕食增强和胞外聚合物减少,但如何利用QS调控微生物功能菌群,进一步降低污泥产率,实现更大的碳减排潜力,还有待研究。现有QS技术在回收能源方面取得了一些进展,主要体现在厌氧消化产沼气、电化学产氢等方面。QS技术在资源回收方面主要体现

在对磷的回收上,且尚处于初步探索阶段。然而污泥中资源种类多,信号分子能否促进污泥中蛋白质、脂肪酸、乳酸等资源回收的研究尚待开展。并且,信号分子种类繁多,多种信号分子共存时的相互作用规律还有待进一步明确,不同外界环境对QS调控微生物所产生的影响尚需更多探求,这些都限制了QS技术在资源与能源回收方面的应用与发展。

通过QS技术调控微生物以减少直接温室气体排放方面的研究主要体现在微观层面,即通过基因分析与N<sub>2</sub>O的增多与减少进行关联,宏观上QS影响



温室气体排放的量化研究较少。由此可见,C6-HSL抑制了反硝化菌的 $N_2O$ 积累活性,表明QS对反硝化作用的调控可能会减少 $N_2O$ 的产生与释放。

综合分析, QS技术在污泥领域的碳减排应用可集中在以下五个方面:

① 突破QS技术应用于污泥原位减量领域的技术瓶颈。已有研究表明,基于生物捕食原理的污泥原位减量技术受QS调控会改变菌群结构与活性,最终达到污泥减量效果。未来可深入研究QS技术与其他污泥原位减量技术耦合带来的碳减排效应,以预处理技术为手段,微生物菌群靶向调控为方向,从源头实现污泥减量,减少后续处理处置的碳排放量。

② 深入研究QS技术促进污泥厌氧消化产氢、产甲烷的调控机制。厌氧消化具有碳减排效应,其产氢、产甲烷过程离不开各种功能菌群的参与,未来可研究QS作用下特征菌群的演替规律,通过QS调控技术改善污泥厌氧消化技术资源与能源回收效率较低现状。

③ 探究QS技术在污泥处理过程中对 $N_2O$ 气体产生的影响。明晰污泥处理处置过程中 $N_2O$ 的产生途径,探索QS通过调控微生物进而避免 $N_2O$ 产生的方法与机理,为今后减少污泥处理处置过程中 $N_2O$ 产生与排放提供新的思路。

④ 探索QS技术提高电化学产氢效率机理。在电化学技术方面,现阶段研究的信号分子种类单一,未来应揭示更多信号分子对电活性细菌丰度与活性、电子传递作用的影响,提升MFC产氢量,更高效地回收剩余污泥的资源与能源。

⑤ 综合评估QS技术带来的环境效益、经济效益和社会效益。现今缺乏QS处理污泥的实际工程案例,缺少对运行能耗与药耗产生的影响研究,难以全面评估其经济效益,且特征信号分子的投加成本尚处高位,因此需建立全面的评价体系,进行QS对污泥处理处置运行能耗与药耗的影响监测,综合评估QS技术带来的环境效益、经济效益。

#### 参考文献:

- [1] 崔荣煜,周天水,王东田,等. 国内污泥成分特性的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2016(s2): 256-261.  
CUI Rongyu, ZHOU Tianshui, WANG Dongtian, *et al.* Research progress of composition and characteristics of

sludge in China [J]. Environmental Science & Technology, 2016(s2): 256-261 (in Chinese).

- [2] 单灵婕,王松林,孙渝波,等. 污泥处理处置现状分析与资源化利用研究[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(12): 192-194.  
SHAN Lingjie, WANG Songlin, SUN Yubo, *et al.* Analysis of sludge treatment and disposal status and study on resource utilization [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(12): 192-194 (in Chinese).
- [3] 戴晓虎,张辰,章林伟,等. 碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考[J]. 给水排水, 2021, 47(3): 1-5.  
DAI Xiaohu, ZHANG Chen, ZHANG Linwei, *et al.* Thoughts on the development direction of sludge treatment and resource recovery under the background of carbon neutrality[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(3): 1-5 (in Chinese).
- [4] BORA R R, RICHARDSON R E, YOU F. Resource recovery and waste-to-energy from wastewater sludge via thermochemical conversion technologies in support of circular economy: a comprehensive review [J]. BMC Chemical Engineering, 2020, 2(1): 8.
- [5] 秦浩然. OSA工艺污泥减量中试研究[D]. 扬州:扬州大学, 2018.  
QIN Haoran. Pilot Study on OSA Sludge Reduction Process [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018 (in Chinese).
- [6] 张彦平,呼瑞琪,李一兵,等. 高铁酸盐氧化剩余污泥溶胞减量研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(15): 59-64.  
ZHANG Yanping, HU Ruiqi, LI Yibing, *et al.* Lysis and reduction of excess sludge by ferrate oxidation [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(15): 59-64 (in Chinese).
- [7] SEMBLANTE G U, HAI F I, DIONYSIOU D D, *et al.* Holistic sludge management through ozonation: a critical review [J]. Journal of Environmental Management, 2017, 185: 79-95.
- [8] FERRER-POLONIO E, FERNANDEZ-NAVARRO J, ALONSO-MOLINA J L, *et al.* Changes in the process performance and microbial community by addition of the metabolic uncoupler 3,3',4',5'-tetrachlorosalicylanilide in sequencing batch reactors [J]. Science of the Total Environment, 2019, 694: 133726.
- [9] 王亚伟,肖庆聪,阎鸿,等. 基于微波预处理的源头污

- 泥减量研究[J]. 中国给水排水, 2013, 29(15): 19-23.
- WANG Yawei, XIAO Qingcong, YAN Hong, *et al.* Source sludge reduction by conventional activated sludge process combined with microwave pretreatment [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(15): 19-23 (in Chinese).
- [10] JIANG L, SHEN Q S, ZHANG Q, *et al.* Microwave-alkali treatment with water elutriation to enhance waste activated sludge solubilization for carbon sources and nutrients recovery [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 421: 129727.
- [11] CHEN J X, LI J, ZHANG X L, *et al.* Pretreatments for enhancing sewage sludge reduction and reuse in lipid production [J]. Biotechnology for Biofuels, 2020, 13(1): 204.
- [12] LIANG J J, LI B, ZHU L, *et al.* Hydrothermal treatment and biorefinery of sewage sludge for waste reduction and production of fungal hyphae fibers and volatile fatty acids [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 289: 125715.
- [13] 孙飞, 徐兴. 热水解工艺强化低有机质污泥厌氧消化产气率的中试研究[J]. 生物化工, 2021, 7(3): 105-107.
- SUN Fei, XU Xing. Pilot study on the enhancement of digestion effect of excess activated sludge pretreated by thermal hydrolysis process [J]. Biological Chemical Engineering, 2021, 7(3): 105-107 (in Chinese).
- [14] HE Z Q, HAN W, ZHOU X, *et al.* Effect of on-site sludge reduction and wastewater treatment based on electrochemical-A/O combined process [J]. Water, 2021, 13(7): 941.
- [15] XIAO Y Y, YAOHARI H, ZHOU Z B, *et al.* Autoinducer-2-mediated quorum sensing partially regulates the toxic shock response of anaerobic digestion [J]. Water Research, 2019, 158: 94-105.
- [16] 张玉鹏. UASB中微生物群体行为及AHLs介导的感应调节机制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- ZHANG Yupeng. Microbial Social Behavior and Regulation Mechanisms Mediated by AHLs in a UASB [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese).
- [17] DU Q, MU Q H, WU G X. Metagenomic and bioanalytical insights into quorum sensing of methanogens in anaerobic digestion systems with or without the addition of conductive filter [J]. Science of the Total Environment, 2021, 763: 144509.
- [18] MA H J, MA S J, LUO W Q, *et al.* Long-term exogenous addition of synthetic acyl homoserine lactone enhanced the anaerobic granulation process [J]. Science of the Total Environment, 2019, 696: 133809.
- [19] LI J L, LIU F Q, LI J Z, *et al.* Regulation of endogenous acyl homoserine lactones by microbial density to enhance syntrophism of acetogens and methanogens in anaerobic digestion [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 378: 122233.
- [20] NGUYEN P D T, MUSTAPHA N A, KADOKAMI K, *et al.* Quorum sensing between Gram-negative bacteria responsible for methane production in a complex waste sewage sludge consortium [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103(3): 1485-1495.
- [21] CAI W W, ZHANG Z J, REN G, *et al.* Quorum sensing alters the microbial community of electrode-respiring bacteria and hydrogen scavengers toward improving hydrogen yield in microbial electrolysis cells [J]. Applied Energy, 2016, 183: 1133-1141.
- [22] CHEN S S, JING X Y, TANG J H, *et al.* Quorum sensing signals enhance the electrochemical activity and energy recovery of mixed-culture electroactive biofilms [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2017, 97: 369-376.
- [23] LIU Z H, ZHOU A J, WANG S F, *et al.* Quorum sensing shaped microbial consortia and enhanced hydrogen recovery from waste activated sludge electro-fermentation on basis of free nitrous acid treatment [J]. Science of the Total Environment, 2021, 766: 144348.

作者简介: 桑稳姣(1974—), 女, 湖北公安人, 工学博士, 副教授, 主要从事水污染控制和污泥减量领域的教学和研究工作。

E-mail: whlgdxswj@126.com

收稿日期: 2021-11-12

修回日期: 2022-03-17

(编辑: 丁彩娟)