

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.22.004

微生物电解池耦合厌氧消化促进产甲烷研究进展

李萌萌¹, 陈重军^{1,2}, 张群¹, 王玲³, 张海芹³

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州科技大学 天平学院, 江苏 苏州 215009; 3. 苏州天瑞环境科技有限公司, 江苏 苏州 215300)

摘要: 微生物电解池(MEC)利用微生物催化,在外加电压作用下产生甲烷,耦合厌氧消化可促进甲烷的产生。概述了微生物电解池耦合厌氧消化系统(MEC-AD)的作用机理,分析了外加电压、电极材料、温度和预处理等因素对MEC-AD产甲烷效能的影响,阐述了MEC-AD系统中主要产甲烷微生物群落分布情况,并总结分析了MEC-AD系统对餐厨垃圾、工业废水等厌氧处理促进产甲烷的应用效果。同时,认为MEC-AD产甲烷系统中电极材料的构型和经济性、底物预处理和实际应用的成本还需要进一步研究,为系统的工程化应用提供理论基础。

关键词: 微生物电解池耦合厌氧系统(MEC-AD); 甲烷; 微生物群落结构; 产甲烷菌

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)22-0022-07

Research Progress of Microbial Electrolysis Cell Coupled with Anaerobic Digestion to Promote Methane Production

LI Meng-meng¹, CHEN Chong-jun^{1,2}, ZHANG Qun¹, WANG Ling³, ZHANG Hai-qin³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Tianping College of Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. Suzhou Skyray Environment Technology Co. Ltd., Suzhou 215300, China)

Abstract: This paper discusses the mechanism of microbial electrolysis cell coupled with anaerobic digestion (MEC-AD) system, which utilize microbial catalysis to generate methane under applied voltage. It analyzes the factors influencing methane production efficiency in MEC-AD, including applied voltage, electrode material, temperature, and pretreatment. The distribution of the main methanogenic microbial communities in MEC-AD system was analyzed, and the application effect of the MEC-AD system on anaerobic treatment of food waste and industrial wastewater to promote methane production was summarized. It concluded that further research is needed on electrode material configuration and cost-effectiveness. substrate pretreatment and actual application cost to provide a solid theoretical foundation for the engineering application of the system.

Key words: microbial electrolysis cell coupled with anaerobic digestion (MEC-AD) system; methane; microbial community structure; methanogens

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508366); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20201450); 苏州市民生科技项目(SS202016); 昆山市重点研发技术项目(KSF202108)

通信作者: 陈重军 E-mail: chongjunchen@163.com

随着我国2030年碳达峰和2060年碳中和目标的制定,污水的减碳低耗处理成为行业重大需求。在污水处理中,厌氧消化(anaerobic digestion, AD)因可同时处理有机物并产生 CH_4 ,成为高浓度有机物的重要处理方式。虽然AD在降解有机物和产 CH_4 方面的应用取得了成功,然而AD仍存在系统不稳定、底物分解能力弱、沼气产量低等问题。在AD过程中,由于不能平衡产酸和产 CH_4 微生物之间的平衡而导致系统不稳定,且存在pH、温度和氨浓度等影响因素使得厌氧系统紊乱和失效^[1]。微生物电解池(microbial electrolysis cell, MEC)可通过富集水解细菌来促进胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)的分解,从而强化厌氧过程并提高 CH_4 产量。MEC与AD工艺耦合,作为新型 CH_4 提纯方法,利用微生物催化电极反应,还原 CO_2 为 CH_4 。同时,MEC-AD耦合系统可通过调整微生物群落结构来促进电子转移而提高 CH_4 产量^[2]。MEC-AD具有加速污泥有机物水解、显著提高甲烷产率并实现沼气生物品位升级等优势。

目前,研究者已对MEC-AD系统强化产 CH_4 方面进行了很多研究,尤其在寻找合适的外加电压、温度和电极材料等方面都取得了显著进展。为此,总结了MEC-AD系统强化产 CH_4 在反应机理、环境因素和实际应用方面的最新研究进展,旨在为系统的工程化应用提供理论基础。

1 MEC-AD耦合系统的反应机理

MEC-AD耦合系统指在外界提供电压的条件下,具有电化学活性的微生物将有机物转化为 CO_2 、 H^+ 和电子,电池内产生的 H^+ 通过质子交换膜从阳极室到阴极室,而电子通过外电路到达阴极与 H^+ 发生还原反应形成闭合回路^[3]。其中质子通过电解液到达阴极与电子结合产生 H_2 ,产甲烷菌则利用阴极的电子和产生的 H_2 将 CO_2 还原为 CH_4 。传统AD的产 CH_4 过程通常会受到限制,其大部分 CH_4 通过乙酸发酵和氢营养型产甲烷菌产生,而氢营养型产甲烷菌生长缓慢,需要较长的消化时间。由于MEC阴极和阳极分别产生了 H_2 和 O_2 ,可促进阴极捕捉和还原 CO_2 ,从而使AD系统中产生额外的 CH_4 ,且外加电场也可以间接提高 CH_4 产率,促进MEC-AD系统比传统AD系统有更好的 CH_4 产率^[4]。该系统的反应机理^[5]见图1。

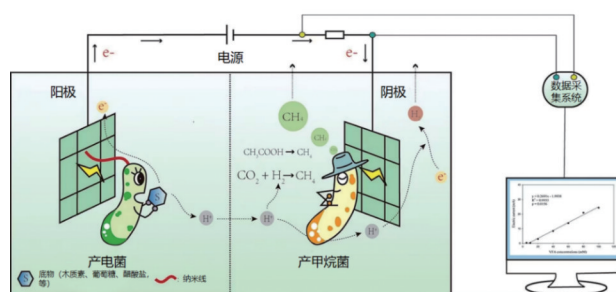


图1 MEC-AD反应机理

Fig.1 Reaction mechanism of MEC-AD system

2 MEC-AD耦合系统的影响因素

运行中影响MEC-AD耦合系统产 CH_4 效率的因素很多,目前主要集中在外加电压、电极材料、温度、预处理等方面。

2.1 外加电压调控

外加电压是影响MEC-AD耦合系统产 CH_4 性能的重要因素。在耦合系统中,阳极微生物得到电子被还原,外加电路提供的电流使电子迁移的速度增大,阴极得到电子的速率加快,促进了反应的进程。同时电场的存在改变了微生物的新陈代谢,驯化功能微生物优势种群提高了微生物活性,促进了污染物的降解。

刘洪周等^[6]利用400 mL的MEC-AD反应器进行试验,发现改变系统电压可调节MEC-AD耦合系统 CH_4 的净生成速率,其中0.6 V扰动时 CH_4 产量最大为 $(0.52 \pm 0.05) \text{ mmol}/(\text{L} \cdot \text{h})$,相对于对照组1.0 V的 $(0.29 \pm 0.01) \text{ mmol}/(\text{L} \cdot \text{h})$ 和1.4 V的 $(0.40 \pm 0.03) \text{ mmol}/(\text{L} \cdot \text{h})$, CH_4 的净生产速率分别提高了77%和32%。Wang等^[7]发现,当外加电压为0.8 V时, CH_4 产量达到最高(157.0 mL/gVSS),分别是0.6 V和0 V时的1.5倍和9.5倍,表明在0.8 V外加电压下阴极处的 CO_2 减少,从而使 CH_4 产量增加。不同电压下,底物为难降解物质时 CH_4 最大产率也会有所不同。Gao等^[8]通过小试考察了MEC-AD系统(反应器容积500 mL)降解喹啉产 CH_4 的可行性,发现系统的最佳外加电压为1.0 V, CH_4 产率在144 h时达到最大值(85.7 mg/L)。较高的外加电压会形成生物膜,增强微生物活性,从而提升系统的 CH_4 产率。然而,当外加电压过高时,也会对 CH_4 产量产生抑制作用。Ding等^[9]小试(反应器有效容积400 mL)发现,当外加电压为0.8 V时, CH_4 产量达到最高值(62.8 mL),而外加电压分别升高到1.0 V和

2.0 V时, CH_4 产率逐渐降低, 分别下降到42.1和39.5 mL。

间歇供电可以实现电能输入最小化, 节约供电成本。研究发现, 周期性断开电压可以显著降低系统的内阻, 从而增加阳极生物膜电活性细菌物种的比例, 改善系统的长期性能。Zakaria等^[10]发现在供电模式分别为24 h/d和18 h/d的条件下, 在96 h的批次周期结束时, 总 CH_4 产生量分别为 $(429.0 \pm 13.7) \text{ L/m}^3$ 和 $(433.0 \pm 7.9) \text{ L/m}^3$, 与24 h/d的供电模式相比, 18 h/d模式的 CH_4 产量未受影响, 但间歇供电模式可大幅度降低供电成本。

2.2 电极材料筛选

MEC-AD系统的电极选择直接决定了系统中电化学反应的类型和速率, 并影响功能微生物的代谢, 进而直接影响 CH_4 产率。目前, 碳基材料具有高孔隙率、粗糙度和亲水性, 可提供高生物相容性, 从而增强生物量的保留率, 故常被用作电极。

研究发现, 零价铁可作为电子供体降低氧化还原电位, 为产甲烷菌创造有利环境。曲艺源等^[11]将铁-碳(R1)与碳-碳(R2)分别作为MEC-AD系统的电极, 发现R1系统 CH_4 产量最高, 达到90~120 mL/gVSS是R2系统的1.91倍。不锈钢具有高耐用性且成本较低, 是用作生物阴极的良好材料。Liu等^[12]分别使用不锈钢毡和碳毡作阴极, 阳极使用钛线, 研究发现不锈钢毡系统的 CH_4 产量是碳毡系统的53倍。

MEC-AD系统中用作生物电极的大多数材料提供了较高的表面积, 增大了电极上生物质的保留量。Wang等^[13]采用堆叠泡沫镍板强化阴极面积, 设置了12个有效容积为1 L的反应器, 运行65 d后发现堆叠了4片镍板的系统最大累计 CH_4 产量达到2 042 mL, 分别是1片、8片和12片镍板的1.07倍、1.08倍和1.19倍, 分析认为镍板的堆叠促进了功能微生物的聚集, 从而强化了 CH_4 的产生。

电极在反应系统内的位置也会影响系统产 CH_4 的效率。Sangeetha等^[14]使用碳刷和镍网作为阳极和阴极, 电极分别放置在系统顶部和底部, 阳极放在阴极的上方和下方, 结果表明电极置于系统的底部和阴极在阳极的下方效果最好, 其MEC-AD系统 CH_4 产率最高达到275.8 mL/gCOD, 其次为电极在反应器底部、阳极在阴极上方的反应器, 其 CH_4 产率最高为194.6 mL/gCOD。这是因为当电极位于系统

底部时, 有利于利用电子和氢气充分还原 CO_2 , 而底部生物膜群落产生的 CO_2 则促进了上层微生物的利用, 从而产生 CH_4 。

2.3 温度调控

在MEC-AD系统中, 合适的温度对 CH_4 的产率也至关重要。温度会影响电流密度、沼气产量和有机物的去除, 而电流密度会影响电化学活性细菌(electrochemically active bacteria, EAB)的活性。在一定温度范围内, EAB活性随着温度的增加而逐渐增强。Ahn等^[15]研究了不同温度(30、35和40 °C)条件下MEC-AD系统的产 CH_4 效果, 其中35 °C时 CH_4 产量达到最大 $[(139.2 \pm 11.2) \text{ L/kgVSS}]$, 分别比30 °C $[(136.6 \pm 10.9) \text{ L/kgVSS}]$ 和40 °C $[(107.7 \pm 10.3) \text{ L/kgVSS}]$ 高出30%和13%。Hassanein等^[16]研究了MEC-AD系统厌氧处理牛粪的产能, 在单室MEC运行的第20天, 将其置于10 L的AD反应器中, 运行11 d后MEC-AD系统在35 °C下运行产生了23.6 L的 CH_4 , 温度高于35 °C时阳极表面的电流密度受到抑制, EAB活性降低。

MEC-AD系统通常在嗜热条件下进行反应, 然而为保持这一温度需要大量能量, 成本较高。研究^[17]发现, 在环境温度下运行系统无需加热, 从而能够减少能量输入并降低建设成本, 且 CH_4 产率最大能达到25.6 mL/d。Moreno等^[18]使用总容积为3 L的反应器处理实际生活污水, 系统在 $(21 \pm 2) ^\circ\text{C}$ 的条件下运行8 d后, CH_4 总量累计达到了 $(178 \pm 5) \text{ mL}$ 。因此, MEC-AD系统在环境温度下也能较好地进行反应。

2.4 预处理强化

在厌氧处理中, 复杂有机物一般通过水解生成简单有机物, 水解反应通常是AD影响复杂生物物质水解速率的限速步骤。通过碱预处理、类Fenton法、超声等预处理方式, 可以提高生物物质的水解效率, 从而提升MEC-AD系统的性能。

碱预处理可使污泥混合液的pH为碱性, 从而破坏污泥絮体结构或细胞壁, 致使有机物释放。Xu等^[19]在700 mL的MFC-AD反应器中研究了碱预处理对污泥产 CH_4 性能的影响, 发现碱预处理后系统 CH_4 峰值达到160.4 mL/gVS, 比未经过预处理的系统(109.4 mL/gVS)提升46.6%。在碱预处理的基础上, Xu等^[20]研究了磷酸盐缓冲溶液(PBS)对MEC-AD系统(反应器容积为700 mL)产 CH_4 的影响, 运行

30 d后,投加PBS的系统其 CH_4 产量累计达到 $(1\,211 \pm 23)$ mL,比未投加PBS的系统提高了44.6%。可以看出,PBS的投加促进了有机物向混合液的释放,提高了 CH_4 的产量。相较于其他预处理方法,碱预处理操作简单,且处理效果较好,但由于处理过程加入了强碱,破壁后污泥的pH仍较高,若直接回流至曝气池,将会影响后续的生物降解过程。

采用类Fenton法处理剩余污泥,破解污泥絮体并破坏微生物细胞壁,促使细胞中可溶性有机物的释放,同时将聚合大分子物质转化为易被微生物降解吸收的小分子物质。Yang等^[21]研究发现,添加类Fenton试剂预处理后,MEC-AD系统的 CH_4 产量比未添加时提高了70%。添加类Fenton试剂能有效提高 CH_4 产量,但该方法处理成本较高,目前尚停留在实验室阶段。

超声波预处理是利用超声波在液相中产生空化作用破解污泥絮体、菌胶团和细胞体,溶出大量有机物质。Bao等^[22]采用超声-碱、高温耦合微曝气(high temperature micro-aeration, TM)作为预处理方法,发现经过超声-碱预处理后MEC-AD系统的 CH_4 产率是未经预处理的3倍。超声波预处理具有高效、低能耗、无二次污染等特点,虽然目前主要集中在实验室研究,但仍具有广阔的应用前景。

2.5 其他影响因素

除了外加电压、温度调控、电极材料筛选和预处理强化外,pH优化、导电材料加入等也会影响MEC-AD系统的 CH_4 产量。

在MEC-AD系统中主要由产甲烷菌产生 CH_4 ,但产甲烷菌对生存环境十分敏感,pH对产甲烷菌的活性影响较大。高pH(>9.0)环境或低pH(<5.0)环境对产甲烷菌具有毒性作用,从而抑制 CH_4 的产生。已有研究表明,产甲烷菌的最适pH为6.5~7.5^[23]。Guo等^[24]观察发现,随着挥发性脂肪酸转换速度的加快,pH从6.6升高到7.1,批式试验的 CH_4 产量最大达到163 mL。产甲烷菌对pH的变化很敏感,将pH保持在有利范围内可促进产甲烷菌的生长,从而促进 CH_4 的产生。Zhao等^[25]研究发现,当pH分别为7.0~7.2和6.7时,批式试验中MEC-AD系统最大 CH_4 产量分别达到 (920.0 ± 28.0) mL和 $(2\,623.6 \pm 84.2)$ mL,表明MEC-AD可通过酸化来提高 CH_4 的产量,其原因是氢营养型甲烷菌活性得到增强,从而促进了 CH_4 的生成。

导电材料可以促进直接种间电子转移(direct interspecies electron transfer, DIET)并提高 CH_4 产量。Joicy等^[26]考察了粉末活性炭作为导电材料促进 CH_4 产生的效果,结果发现添加活性炭的系统其 CH_4 产量是未添加活性炭的2.1倍。Qin等^[27]研究发现,添加了磁铁矿的MEC-AD系统 CH_4 产量为5.4 mL/gVS,比未添加的高9.4%。将磁铁矿添加到MEC-AD系统中,为电活性微生物创造了良好的导电环境,增大了其丰度并增强了其活性,从而促进了 CH_4 的产生。

3 MEC-AD耦合系统功能微生物的变化

MEC-AD系统中的微生物群落种类丰富,系统中既有传统AD系统拥有的功能厌氧微生物,也存在电化学强化功能微生物,形成了复杂的协同耦合系统。

研究表明,MEC-AD系统中的地杆菌能够增大电流密度并显著降低系统电阻,而且与产甲烷菌之间能够实现直接电子转移(direct electron transfer, DET),使得更多的电子通过DET途径促进 CH_4 的生成。Wang等^[7]研究发现,MEC-AD系统阳极生物膜中地杆菌的占比为3.3%。为了增强DET,磁铁矿已被用于直接促进从合成细菌到产甲烷菌的电子转移。Qin等^[27]研究发现,添加磁铁矿的MEC-AD系统中阳极生物膜上的地杆菌占比为6.9%。

MEC-AD系统的阴极以氢营养型产甲烷菌为主。Cai等^[28]通过qPCR测序,发现MEC-AD系统阴极生物膜中产甲烷菌占比为91.08%,其中氢营养型产甲烷菌占64.41%。Huang等^[29]利用MEC-AD系统处理黑水时发现甲烷八叠球菌在阴极的相对丰度增加到40.1%,由于甲烷八叠球菌通过导电材料或不溶性电子进行种间电子转移,接收来自某些电活性细菌的电子,从而促进 CH_4 的生成。Lee等^[30]研究发现,MEC-AD系统中梭状芽孢杆菌和拟杆菌的数量分别增加了92%和32%,使得 CH_4 产量增加70%。

4 MEC-AD耦合系统的应用

MEC-AD耦合系统因其具有协同微生物和电化学反应作用,在餐厨垃圾、难降解工业废水等领域的厌氧强化产 CH_4 方面得到广泛应用。

餐厨垃圾易腐烂并滋生细菌,但富含可降解有机物,可用来产生清洁能源和其他增值产品。

MEC-AD系统可高效回收餐厨垃圾中的生物能源,通过EAB、发酵细菌和古菌等将有机物中的化学能转化为电能,可有效促进餐厨垃圾厌氧产 CH_4 ,从而使其价值化。Choi等^[31]利用MEC-AD系统处理餐厨垃圾, CH_4 的最大产量达到 $(324.3 \pm 8.6) \text{ mL/gCOD}$ 。Park等^[32]研究发现,通过MEC-AD系统可促进高浓度餐厨垃圾的 CH_4 生成速率,MEC-AD系统通过增加外电细菌和乙酸发酵型产甲烷菌共同作用,使得 CH_4 产量稳定在 $(17.0 \pm 1.6) \text{ L/d}$ 。Zhi等^[33]研究发现,将餐厨垃圾和污泥进行共发酵,平均 CH_4 产量为 13.6 mL/L 。餐厨垃圾与废弃污泥的共发酵能够抵消废弃污泥的低生物降解性,利用MEC-AD系统能够促进有机物转化,有利于 CH_4 的产生。部分MEC-AD系统处理餐厨垃圾的应用效果见表1^[31-32,34-38]。

表1 MEC-AD系统在厌氧强化餐厨垃圾的应用

Tab.1 Application of MEC-AD system in anaerobic enhancement of food waste treatment

阳极材料	阴极材料	温度/ $^{\circ}\text{C}$	外加电压/V	甲烷产量/ $(\text{mLCH}_4 \cdot \text{g}^{-1}\text{COD})$
碳纳米管、膨胀石墨	碳纳米管	35	1.1	324.3 ± 8.6
镀镍石墨碳	镀铁石墨碳	35	0.3	330.0 ± 20.0
Ag/AgCl参比电极	Ag/AgCl参比电极	37	0.5	364.9
碳刷	活性炭	35	1.2	4 760.0
镍涂层石墨碳	镍、铁涂层石墨碳	35	0.3	360.0 ± 30.0
石墨板	不锈钢	35	0.9	590.0
石墨	不锈钢	35	2.25	363.0 ± 12.0

许多行业(如造纸、食品和制药)的有机废水常含有微生物难降解或者转化的物质,如常见的硫酸盐(SO_4^{2-})。硫酸盐在传统厌氧环境中转化较为困难,但由于MEC-AD可同时产生 H_2 和碱(OH^-),可用于处理高强度硫酸盐废水。Yuan等^[39]采用MEC-AD系统处理高浓度硫酸盐有机废水,系统的 CH_4 最大累积产量为 $(0.91 \pm 0.13) \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。由于硫酸盐还原菌产生的 H_2S 可转化为 HS^- ,减弱了 H_2S 对 CH_4 生成的抑制作用,并提升MEC-AD的 CH_4 产量。研究发现,采用MEC-AD处理富含硫酸盐废水时,当施加电流为 1.5 mA 时微生物进入快速生长阶段,从而有效促进了 CH_4 的产生,硫酸盐去除率也达到了 70.6% ^[40]。

5 结论与展望

MEC-AD耦合系统可通过电化学和微生物双重作用强化厌氧过程的 CH_4 生成,在污染物处理及能源开发方面具有广阔的前景。为了进一步提升微生物电解池耦合厌氧消化系统产 CH_4 的效能,未来可从以下几方面开展研究:①选择高效、廉价的电极,以降低成本;②提高对高浓度难降解废水的处理能力;③降低外界环境对微生物电解池耦合厌氧消化系统的不良影响,实现高效产 CH_4 。

参考文献:

- [1] CHEN Y, CHENG J J, CREAMER K S. Inhibition of anaerobic digestion process: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(10): 4044-4064.
- [2] YU Z, LIU W Z, SHI Y J, *et al.* Microbial electrolysis enhanced bioconversion of waste sludge lysate for hydrogen production compared with anaerobic digestion [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 767: 144344.
- [3] JEREMIASSE A W, HAMELERS H V M, BUISMAN C J N. Microbial electrolysis cell with a microbial biocathode [J]. *Bioelectrochemistry*, 2010, 78(1): 39-43.
- [4] LIU W Z, CAI W W, GUO Z C, *et al.* Microbial electrolysis contribution to anaerobic digestion of waste activated sludge, leading to accelerated methane production [J]. *Renewable Energy*, 2016, 91: 334-339.
- [5] YU Z, LENG X, ZHAO S, *et al.* A review on the applications of microbial electrolysis cells in anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 255: 340-348.
- [6] 刘洪周, 杨思霞, 王楠, 等. 微生物电解池耦合厌氧消化过程中产甲烷代谢通量与微生物的关系 [J]. *生物工程学报*, 2022, 38(5): 1889-1902.
LIU Hongzhou, YANG Sixia, WANG Nan, *et al.* The relationship between methane production metabolic flux and microorganisms in a microbial electrolytic coupled anaerobic digestion [J]. *Chinese Journal of Biological Engineering*, 2022, 38(5): 1889-1902 (in Chinese).
- [7] WANG X T, ZHAO L, CHEN C, *et al.* Microbial electrolysis cells (MEC) accelerated methane production from the enhanced hydrolysis and acidogenesis of raw waste activated sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 413: 127472.
- [8] GAO Y J, KONG X, ZHOU A J, *et al.* Enhanced

- degradation of quinoline by coupling microbial electrolysis cell with anaerobic digestion simultaneous [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 306: 123077.
- [9] DING A Q, YANG Y, SUN G D, *et al.* Impact of applied voltage on methane generation and microbial activities in an anaerobic microbial electrolysis cell (MEC)[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 283: 260–265.
- [10] ZAKARIA B S, DHAR B R. An intermittent power supply scheme to minimize electrical energy input in a microbial electrolysis cell assisted anaerobic digester [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 319: 124109.
- [11] 曲艺源, 张景新, 何义亮. 铁电极辅助餐厨垃圾高温厌氧消化及微生物耐盐机理研究 [J]. *化工进展*, 2022, 41(4): 2060–2067.
- QU Yiyuan, ZHANG Jingxin, HE Yiliang. Iron electrode-assisted thermophilic anaerobic digestion of kitchen waste and microbial salt tolerance mechanism [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41(4): 2060–2067 (in Chinese).
- [12] LIU D D, ZHENG T Y, BUISMAN C, *et al.* Heat-treated stainless steel felt as a new cathode material in a methane-producing bioelectrochemical system [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(12): 11346–11353.
- [13] WANG L, YANG C X, SANGEETHA T, *et al.* Methane production in a bioelectrochemistry integrated anaerobic reactor with layered nickel foam electrodes [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 313: 123657.
- [14] SANGEETHA T, GUO Z C, LIU W Z, *et al.* Energy recovery evaluation in an up flow microbial electrolysis coupled anaerobic digestion (ME-AD) reactor: role of electrode positions and hydraulic retention times [J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 1214–1224.
- [15] AHN Y, IM S, CHUNG J W. Optimizing the operating temperature for microbial electrolysis cell treating sewage sludge [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(45): 27784–27791.
- [16] HASSANEIN A, WITARSA F, LANSING S, *et al.* Bioelectrochemical enhancement of hydrogen and methane production in a combined anaerobic digester (AD) and microbial electrolysis cell (MEC) from dairy manure [J]. *Sustainability*, 2020, 12(20): 8491.
- [17] ASZTALOS J R, KIM Y. Enhanced digestion of waste activated sludge using microbial electrolysis cells at ambient temperature [J]. *Water Research*, 2015, 87: 503–512.
- [18] MORENO R, SAN-MARTÍN M I, ESCAPA A, *et al.* Domestic wastewater treatment in parallel with methane production in a microbial electrolysis cell [J]. *Renewable Energy*, 2016, 93: 442–448.
- [19] XU X J, WANG W Q, CHEN C, *et al.* Bioelectrochemical system for the enhancement of methane production by anaerobic digestion of alkaline pretreated sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 304: 123000.
- [20] XU X J, WANG W Q, CHEN C, *et al.* The effect of PBS on methane production in combined MEC-AD system fed with alkaline pretreated sewage sludge [J]. *Renewable Energy*, 2020, 152: 229–236.
- [21] YANG C X, WANG L, ZHONG Y J, *et al.* Efficient methane production from waste activated sludge and Fenton-like pretreated rice straw in an integrated bioelectrochemical system [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 152411.
- [22] BAO H X, YANG H, ZHANG H, *et al.* Improving methane productivity of waste activated sludge by ultrasound and alkali pretreatment in microbial electrolysis cell and anaerobic digestion coupled system [J]. *Environmental Research*, 2020, 180: 108863.
- [23] VAVILIN V A, QU X, MAZÉAS L, *et al.* Methanosarcina as the dominant acetoclastic methanogens during mesophilic anaerobic digestion of putrescible waste [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2008, 94(4): 593–605.
- [24] GUO X, LIU J, XIAO B. Bioelectrochemical enhancement of hydrogen and methane production from the anaerobic digestion of sewage sludge in single-chamber membrane-free microbial electrolysis cells [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(3): 1342–1347.
- [25] ZHAO L, WANG X T, CHEN K Y, *et al.* The underlying mechanism of enhanced methane production using microbial electrolysis cell assisted anaerobic digestion (MEC-AD) of proteins [J]. *Water Research*, 2021, 201: 117325.
- [26] JOICY A, SEO H, LEE M E, *et al.* Influence of applied voltage and conductive material in DIET promotion for methane generation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(18): 10228–10238.
- [27] QIN X, LU X Q, CAI T, *et al.* Magnetite-enhanced

- bioelectrochemical stimulation for biodegradation and biomethane production of waste activated sludge [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 789: 147859.
- [28] CAI W W, LIU W Z, YANG C X, *et al.* Biocathodic methanogenic community in an integrated anaerobic digestion and microbial electrolysis system for enhancement of methane production from waste sludge [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2016, 4(9): 4913–4921.
- [29] HUANG Q, LIU Y, DHAR B R. Pushing the organic loading rate in electrochemically assisted anaerobic digestion of blackwater at ambient temperature: insights into microbial community dynamics [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 781: 146694.
- [30] LEE B, PARK J G, SHIN W B, *et al.* Microbial communities change in an anaerobic digestion after application of microbial electrolysis cells [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 234: 273–280.
- [31] CHOI J M, LEE C Y. Bioelectrochemical enhancement of methane production in anaerobic digestion of food waste [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(4): 2081–2090.
- [32] PARK J, LEE B, TIAN D J, *et al.* Bioelectrochemical enhancement of methane production from highly concentrated food waste in a combined anaerobic digester and microbial electrolysis cell [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 226–233.
- [33] ZHI Z X, PAN Y, LU X Q, *et al.* Electrically regulating co-fermentation of sewage sludge and food waste towards promoting biomethane production and mass reduction [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 279: 218–227.
- [34] YAHYA M, HERRMANN C, ISMAILI S, *et al.* Development and optimization of an innovative three-stage bioprocess for converting food wastes to hydrogen and methane [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2021, 170: 107992.
- [35] QUASHIE F K, FENG K, FANG A R, *et al.* Efficiency and key functional genera responsible for simultaneous methanation and bioelectricity generation within a continuous stirred microbial electrolysis cell (CSMEC) treating food waste [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 757: 143746.
- [36] PARK J G, LEE B, KWON H J, *et al.* Contribution analysis of methane production from food waste in bulk solution and on bio-electrode in a bio-electrochemical anaerobic digestion reactor [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 670: 741–751.
- [37] HASSANEIN A, WITARSA F, GUO X H, *et al.* Next generation digestion: complementing anaerobic digestion (AD) with a novel microbial electrolysis cell (MEC) design [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(48): 28681–28689.
- [38] HARB M, ERMER N, BOUNEHME S C, *et al.* Increased applied voltage in the presence of GAC enhances microbial activity and methane production during anaerobic digestion of food waste [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2020, 6(3): 737–746.
- [39] YUAN Y, CHENG H Y, CHEN F, *et al.* Enhanced methane production by alleviating sulfide inhibition with a microbial electrolysis coupled anaerobic digestion reactor [J]. *Environment International*, 2020, 136: 105503.
- [40] WANG K, SHENG Y X, CAO H B, *et al.* Impact of applied current on sulfate-rich wastewater treatment and microbial biodiversity in the cathode chamber of microbial electrolysis cell (MEC) reactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 307: 150–158.
-
- 作者简介:李萌萌(1999–),女,江西九江人,硕士研究生,主要研究方向为环境污染控制理论与技术。
- E-mail:leemm9810@163.com
- 收稿日期:2022-05-10
- 修回日期:2022-05-18

(编辑:丁彩娟)