

外加电压对原位缓释碳源释碳效果影响的研究

董元昊¹, 赵博玮^{1*}, 张 潇¹, 谢 飞²

(1. 太原理工大学环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600;

2. 太原科技大学环境与资源学院, 山西 太原 030024)

摘要:为改善城市污水处理厂外加碳源成本高、产泥量大等问题,利用废弃纸屑与纤维素降解菌为原料制备投加型缓释碳源,并通过控制外加电压调控碳源释放速率。研究表明,在 0.4 V 的电压下,释碳微生物的响应效果最为显著。高通量测序结果显示,外加电压能够显著抑制产酸菌活性,而促进电活性菌丰度增加,证明外加电源的方法可通过调控功能微生物的群落结构及活性来控制碳源释放情况,可为进一步优化污水处理工艺自动化控制及碳源投加方式的选择提供理论依据与技术支撑。

关键词:缓释碳源;外加电压控制;微生物群落结构变化;污水处理效率

中图分类号:X703.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S2-0166-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.031

Research on impact of applied voltage on carbon release effect of in-situ sustained-release carbon source

DONG Yuan-hao¹, ZHAO Bo-wei^{1*}, ZHANG Xiao¹, XIE Fei²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China;

2. School of Environment and Resources, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract:To address the high cost and large sludge production issues associated with the use of external carbon sources in urban sewage treatment plants, this study utilizes the discarded paper scraps and cellulose-degrading bacteria as raw materials to prepare externally-adding sustained-release carbon source. Through controlling the applied voltage, the release rate of carbon source can be regulated. Study results indicate that the carbon-releasing microorganisms exhibit the most significant response effect at a voltage of 0.4 V. It is shown by high-throughput sequencing results that the applied voltage can significantly inhibit the activity of acid-producing bacteria while promote the abundance of electroactive bacteria, demonstrating that the applied voltage method can control the release of carbon sources by regulating the community structure and activity of functional microorganisms. This study provides a theoretical basis and technical support for further optimizing the automation control of sewage treatment process and the selection of carbon source addition mode.

Key words: sustained-release carbon source; applied voltage control; changes in microbial community structure; wastewater treatment efficiency

我国城镇污水普遍具有碳氮比较低的特征,是引起污水处理厂的反硝化工艺单元碳源不足的根本原因,进而导致部分反硝化菌将自身原生质用作碳源进行内源反硝化,降低了反硝化功能细菌的数量和活性,从而降低含氮污染物的去除效率。因此,污水处理厂通常采用外加甲醇、乙酸钠等碳源的方法来维持反硝化过程正常进行^[1]。虽然,上述补碳药剂容易被反硝化菌所利用将水体中的硝酸盐还原为氮气排出,但在实际运行过程中不仅成本较高,而且会增加剩余污泥的产量,进而增加污泥处理和处

置难度,是当下污水处理厂亟需解决的主要问题之一^[2-3]。

缓释碳源法是近年来被广泛研究的一种能够提供持续、稳定碳源的技术,有助于长期稳定维持反硝化菌的功能,并且缓释碳源能够规避有机碳浓度过高而产生的生物毒性、降低碳源投加频次和难度,从而降低工艺运行成本^[4]。目前,可被利用的天然有机缓释碳源主要包括多糖类和纤维素等复杂有机物,具有环保可再生性和生物相容性较好的优势^[5]。而生活中常见的废纸主要由碳、氢、氧等元

收稿日期:2024-04-17;修回日期:2024-08-21

基金项目:山西省应用基础研究项目(202103021224099,20210302124479)

作者简介:董元昊(1997-),男,硕士生,研究方向为污水处理与废物资源化,15582390001,434376212@qq.com;赵博玮(1984-),男,博士,副教授,研究方向为污水处理与废物资源化,通讯联系人,zhaobowei@tyut.edu.cn。

素组成,其基本成分是以植物纤维为主,具备天然有机碳源的特性^[6]。基于前期研究已证明可将废弃纸张和纤维分解菌制备成为一种可持续释放碳源的新型生物缓释碳源,能够显著提升反硝化菌脱氮效率^[7],但碳源的缓释速率仍难以实现精细化控制,是制约该技术规模化推广的主要原因之一。另一方面,电化学强化技术常被用作提升微生物的活性,主要是通过影响种间以及电极之间的电子传递链来改变污染物的代谢途径^[8]。

本研究提出一种通过外加电刺激的方式来控制碳源的缓释速率,其技术原理是通过外加电极电势控制缓释碳源废料的释碳速率,以含氮污染物的去除效率为指标,实现对纤维素分解菌、反硝化菌等形成的微生物群落结构进行调控。基于此,本研究验证了外加电压对缓释碳源释碳速率控制的可行性以及外加电压对纤维素分解菌和发酵菌等微生物菌群的影响,为缓释碳源释碳速率的控制及应用提供了理论基础和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 缓释碳源的制备

基于前期研究,筛选并富集了以纤维素降解菌(*cellulose decomposing bacteria*, CDB)为主要功能菌属的混合菌液,将该菌液梯度稀释至生物量的 OD_{600} 值为1.3,并以8 000 r/min的转速离心5 min,撇去上清液^[9]。将剩余浓缩物与提前粉碎好的纸巾粉末充分混合,制备成为缓释碳源^[10]。

1.2 反应装置及运行

本研究的反应装置如图1所示,在缓释碳源内部设置金属电极,缓释碳源外部用碳布包裹,并用尼龙自锁扎束带扎紧。将包埋金属电极和包裹碳布的缓释碳源悬挂于厌氧瓶内,并通入氮气5 min 确保完全厌氧的环境。厌氧瓶顶部被双层封口膜紧封,外加电源的两根电线穿过双层封口膜,分别与缓释碳源中包埋的金属(钛片)电极和包裹缓释碳源的碳布相连接。厌氧瓶均置于 $30 \pm 1^\circ\text{C}$ 的恒温培养箱

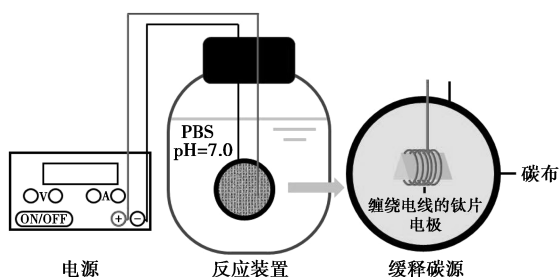


图1 反应装置示意图

中。厌氧瓶内的COD、TOC和VFA等污染物每隔1天检测一次,检测完成后将剩余的液体倒掉,并更换新的缓冲溶液(100 mL),用氮气吹扫5 min后再用双层封口膜封紧瓶口。

实验共设置9个实验组来测试不同强度和电流方向对于处理效率的影响,其中4个实验组的厌氧瓶与电源正向连接,电压分别设置为0.2、0.4、0.6 V和0.8 V,将其命名为d02、d04、d06和d08;另外4个实验组则与电源反向连接(即将碳源两极方向调转),并将其命名为d-02、d-04、d-06和d-08,同时设置无外加电压的空白对照组K。

1.3 水质指标分析与测试

TOC采用日本岛津(SHIMADZU)TOC-V CPH分析仪进行测试,COD采用连华科技有限公司的药剂及多功能水质分析仪进行比色测定。挥发性脂肪酸(VFA)的测定采用装有氢火焰离子化检测器(FID)的气相色谱仪,通过对出峰时间的积分,计算VFA的含量^[11]。

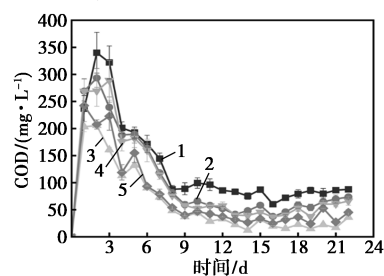
1.4 高通量检测

为研究外加电压对纸屑缓释碳源的菌群变化影响,反应结束后对每个厌氧瓶内的缓释碳源球状样品进行高通量测序,其中空白组起始和结束阶段的样品分别命名为k1和k2,其余样品编号与厌氧瓶编号相同。按指定测序区域合成特异引物338f-806r^[12]。采用Quant Fluor™-ST蓝色荧光定量系统进行检测定量,并对样本、菌群和环境因子之间进行冗余分析(RDA),区分样本后进行OTU聚类分析和物种分类学分析,基于OTU聚类分析结果进行多种多样性指数分析和群落结构的统计分析。

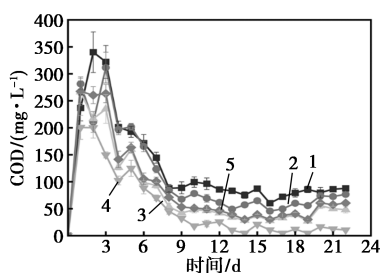
2 结果与讨论

2.1 正反电压下缓释碳源释碳情况

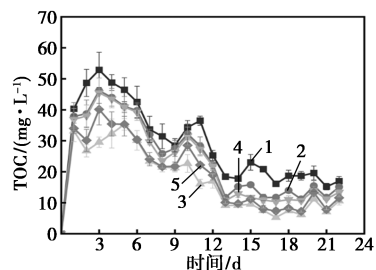
改变外加电源正负极后对缓释碳源释碳的影响如图2所示,溶液中的COD释放数据表明,无论正接还是反接电压,前3 d的释碳量有些许波动但均主要表现为抑制作用,从第3 d到7 d所有电压抑制效果均显著提升,自第8 d开始原来的COD平均释



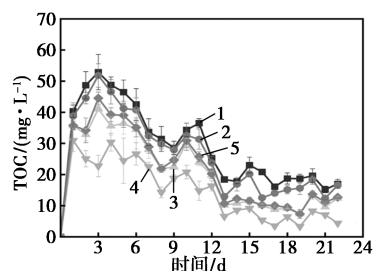
(a) 正接电压与COD的关系



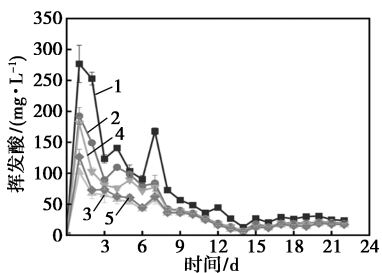
(b) 反接电压与 COD 的关系



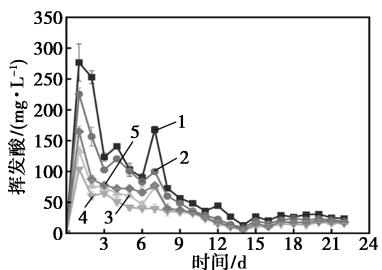
(c) 正接电压与 TOC 的关系



(d) 反接电压与 TOC 的关系



(e) 正接电压与挥发酸的关系



(f) 反接电压与挥发酸的关系

1—0 V; 2—0.2 V; 3—0.4 V; 4—0.6 V; 5—0.8 V

图 2 正反电压下缓释碳源释碳情况

放量由 101.88 mg/L 降为 66.88 mg/L, 下降幅度约为 34%。值得注意的是, 在 0.2 V 电压条件下, 7 d

之前释碳量与空白组基本一致, 7 d 之后抑制效果逐渐提升至 73.17%。正向外加电压 0.4 V 时抑制情况最为明显, 反向外加电压为 0.6 V 时抑制情况最为明显, 几乎完全抑制释碳, 表明缓释碳源微生物群落对于该强度电压较为敏感, 适合作为调控电压处理。

TOC 释放数据表明, 正接电压 0.2 V 和 0.6 V 电压下的抑制效果较为接近, 抑制效果均约为 75%, 0.4 V 和 0.8 V 电压下的抑制效果接近, 抑制效果约为 50%。反接电压下 0.6 V 电压抑制效果最为明显, 而 TOC 仅为空白组的 50%, 0.2 V 电压抑制效果不明显, 与空白组 TOC 接近, 0.4 V 和 0.8 V 电压 TOC 含量接近且均为抑制效果, 约为 75%。

纤维素的水解酸化最终产生小的挥发性脂肪酸分子。Chen 等^[13]研究了不同碳源对反硝化作用的影响, 发现 VFA 可以提高氮磷的去除效率, 因此, VFA 的产量可以反映出释碳情况。VFA 释放结果表明, 在正接电压下, 空白组 VFA 产量最高, 外接 0.4 V 电压的厌氧瓶内 VFA 产量最低, 整体 VFA 产量在 7 d 之前较高, 而 7 d 以后产量低于 50 mg/L 且各厌氧瓶差别较小。在反接电压下, 空白组 VFA 产量最高, 0.6 V 组 VFA 产量最低, 整体 VFA 产量与正接组类似, 在 7 d 之前较高而 7 d 以后产量低于 50 mg/L。综上所述, 实验数据证明了正反向电压对于释碳效率影响较小, 而 0.4 V 和 0.6 V 电压更适合用于精准调控有机碳源的释放。

2.2 微生物菌群结构分析

微生物结构变化分析见门水平下的 10 个样品丰度图 (图 3)。厚壁菌门 (*Firmicutes*)、拟杆菌门 (*Bacteroidota*)、互养菌门 (*Synergistota*)、变形菌门 (*Proteobacteria*) 在各组中占主导地位。变形菌门 (*Proteobacteria*) 和拟杆菌门 (*Bacteroidota*) 在生物降解中发挥着重要作用^[16], 它们可以降解大分子有机化合物 (如纤维素) 并参与反硝化作用^[14]。有研究表明, 厚壁菌门 (*Firmicutes*) 的大多数微生物与碳水化合物的水解和产酸的活性相关, 能够将纤维素等复杂的碳水化合物降解为乙酸和丁酸等小分子有机物^[15]。从 k1 与 k2 空白组的变化可以看出, 不外加电压时, 厚壁菌门 (*Firmicutes*) 丰度增加了 40.29%, 拟杆菌门 (*Bacteroidota*) 丰度增加了 57.44%, 互养菌门 (*Synergistota*) 时丰度减少了 23.68%, 变形菌门 (*Proteobacteria*) 丰度减少了 64.17%。外加电压时, k2 组分别与 d02 至 d-08 组对比, 外加电压分别使

厚壁菌门(*Firmicutes*)除 d-06 组减少 18.59%外,其余组丰度分别增加了 40.6%、61.96%、34.91%、35.89%、52.89%、36.82%、44.30%;外加电压对互养菌门(*Synergistota*)丰度有较大的影响,较 k2 组而言,d02 至 d-08 组的互养菌门(*Synergistota*)丰度均为减少;变形菌门(*Proteobacteria*)丰度也有较大影响,较 k2 组而言,d02 至 d-08 组的变形菌门(*Proteobacteria*)丰度均为增加;此外变化较大的还有梭杆菌门(*Fusobacteriota*),从 k1 组与 k2 组的对比可以看出,梭杆菌门(*Fusobacteriota*)经过一段时间的反应后丰度下降了 88.71%,与 k2 组相比 d02 至 d-08 组的梭杆菌门(*Fusobacteriota*)丰度在 k2 组的基础上又分别减少了 73.52%、87.71%、70.12%、70.13%、60.17%、94.28%、52.97%和 80.30%,说明外加电压后改变了梭杆菌门(*Fusobacteriota*)丰度,而梭菌具有纤维素降解能力^[16]。

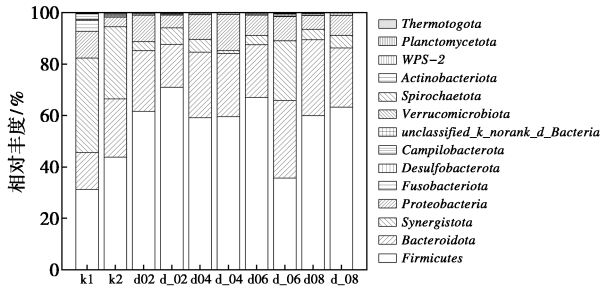
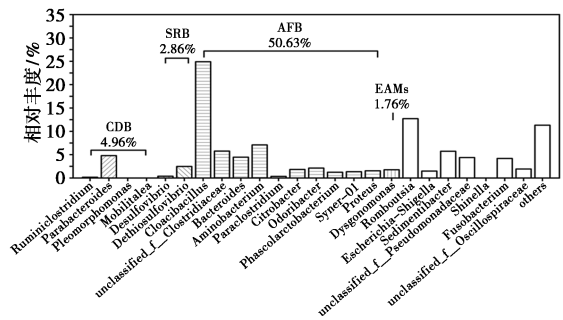


图 3 门水平下 10 个样品丰度图

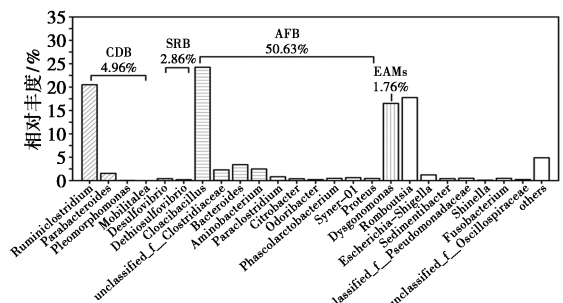
对本研究样品中检测到的菌属按照相似功能进行分类研究,CBD 组为纤维素降解菌类,将纤维素分解为小分子的单糖^[17],包括胃瘤球菌属(*Ruminiclostridium*)、狄氏副拟杆菌属(*Parabacteroides*)、*Pleomorphomonas*菌属、*Mobilitalea*菌属;SRB 组为硫酸盐还原菌类,可以还原单质硫或硫酸盐,包括 *Desulfovibrio*菌属和 *Dethiosulfovibrio*菌属^[18];AFB 为发酵产酸菌类,它们利用环境中所需的物质来发酵产酸,包括阴沟杆菌属(*Cloacibacillus*)、*unclassified_f_Clostridiaceae*菌属、拟杆菌属(*Bacteroides*)、氨基酸杆菌属(*Aminobacterium*)、梭状芽孢杆菌属(*Paraclostridium*)、考拉杆菌属(*Phascolarctobacterium*)、丙酸杆菌属(*Syner-01*)和 *Proteus*变形菌属^[19];EAMs 为电活性细菌类,拥有极强的电活性,可以产电或降解污染物,本研究的样品中检测到的 EAMs 主要为丁酸梭菌属(*Dysgonomonas*)^[20]。

空白组属水平丰度图见图 4。从图 4 可以看出,经过长时间的释碳,缓释碳源中的菌群结构发生

了较大的变化。首先,纤维素降解菌类在释碳后有显著增高,表明具有降解纤维素功能的菌属逐渐适应了缓释碳源体系,从 4.86% 上升至 22.01%,在纤维素足够多的条件下成为丰度较多的优势菌属。发酵产酸菌在释碳后显著降低,由原来的 50.63% 下降至 35.42%,说明发酵产酸菌虽然有了明显降低,但是其仍然是最为优势的菌类。另外,电活性菌丰度从 1.76% 上升至 16.51%,说明即使在没有外加电压的情况下,该体系中的电活性菌也会有明显的提升。



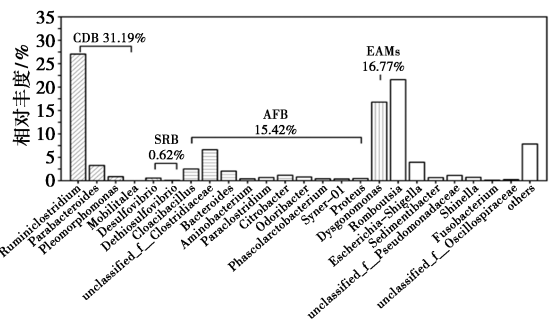
(a) 实验前



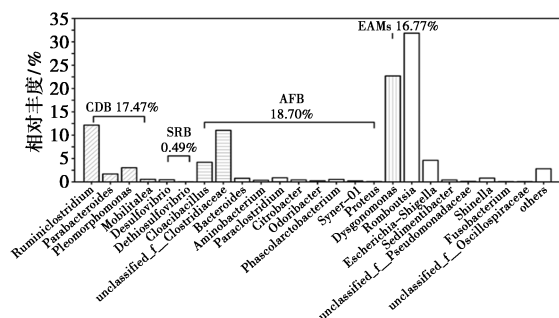
(b) 实验后

图 4 空白组属水平丰度图

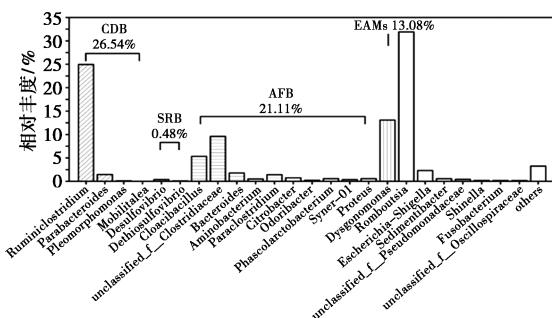
正电压下水平丰度图见图 5,将图 5 和图 4 (b)对比分析可以看出,外加电压对缓释碳源中菌属分布有明显的改变。在图 5 中除图 5 (b)电压对纤维素分解菌的丰度呈现微量的抑制作用外,其余对纤维素分解菌的丰度均呈现促进作用,发酵产酸



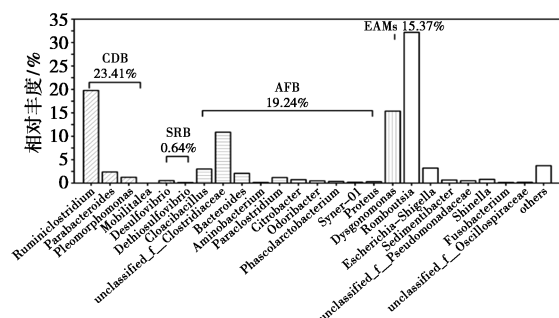
(a) 0.2 V



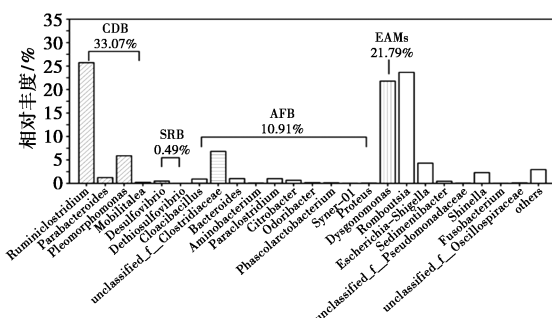
(b) 0.4 V



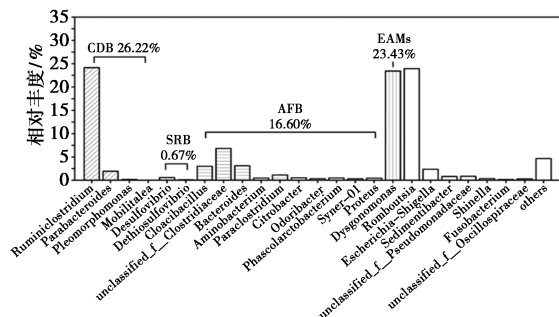
(a) 0.2 V



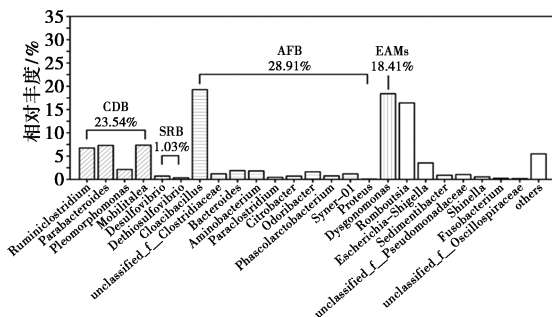
(c) 0.6 V



(b) 0.4 V



(d) 0.8 V

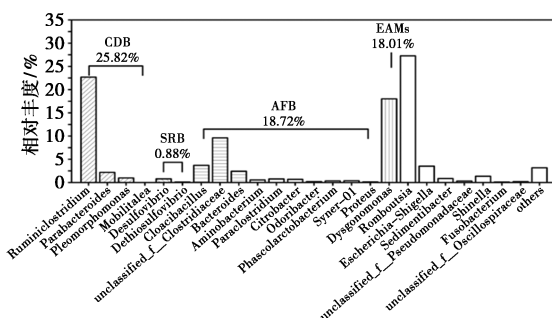


(c) 0.6 V

图 5 正电压下水平丰度图

菌类与空白组相比,丰度均极大地减少,表明外加电压后导致产酸菌丰度大幅度下降。另外,在低电压时电活性菌增量并不明显,随着电压增大电活性菌逐渐成为优势菌属。

图 6 中反接电压对纤维素分解菌类均表现为略微的促进作用,但对发酵产酸菌类而言仍然有极大的抑制作用,在反接电压时,纤维素分解菌的丰度少量增加,说明小电压对纤维素分解菌分解纤维素有一定的促进作用。0.6 V 电压下的释碳情况最差,抑制效果最明显,由图 6 可知,在 0.6 V 电压下的发酵产酸菌类明显高于其他电压下的丰度,说明发酵产酸菌类的丰度直接影响到了最终释碳量的多少,且呈反比关系,发酵产酸菌类越多释放至环境中的碳源越少。负电压下电活性菌丰度增长明显不如正电压下的丰度增长,甚至在低电压下电活性菌丰度出现减少的情况。



(d) 0.8 V

图 6 负电压下水平丰度图

2.3 电压控制碳源缓释速率机理分析

电压影响微生物对碳源的利用和转化等代谢活动。适当的电场刺激促进了微生物的生长和代谢,同空白组对比,电场对消耗有机碳源的促进作用更显著,因此,碳源的消耗速率大于释放速率,施加电压后抑制了碳的释放。然而,如果电压过高或作用时间过长,可能会对部分微生物造成损伤或使菌群

中消耗碳源的速度高于释碳速度,导致碳源释放速率降低。

外加电压对原位缓释碳源释碳机理分析如图 7 所示。

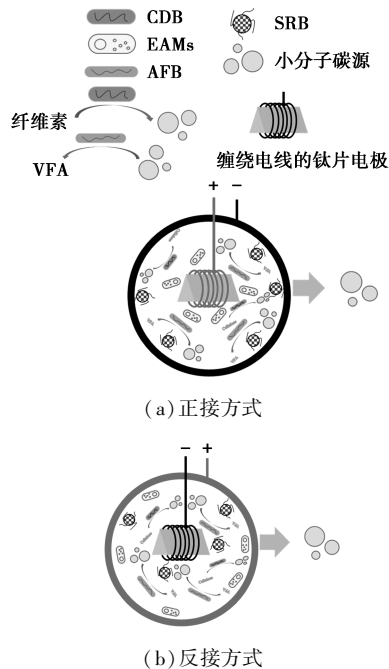


图 7 电压控制碳源缓释速率机理

根据高通量测序结果揭示微生物群落结构,缓释碳源中主要由 CDB、AFB、EAMs 三大功能菌属来影响释碳效果,CDB 通过分解纤维素来产生小分子的碳源,一部分用来供给其他菌属碳源,一部分释放至缓冲溶液中。AFB 和 EAMs 消耗体系中的有机碳小分子,而有电压时 AFB 丰度会明显下降,EAMs 丰度会有明显的提升。在正接电压情况下,随着电压的不断增大,菌群结构也逐渐发生变化,在 0.2 V 电压时,缓释碳源由 CDB 主导,该组的释碳量是各电压组中最大的。当电压升高至 0.4 V 左右时的电压对纤维素分解菌丰度无明显影响,而此时体系 EAMs 丰度大量增加且尚存在适量的 AFB,使得消耗碳源的速度高于释碳速度,导致碳源释放速率降低。0.6 V 和 0.8 V 电压时虽然外加电压使得纤维素分解菌丰度有少量提升,但对 AFB 和 EAMs 的丰度影响较大,使得缓释碳源的释碳量较 0.4 V 有些许增加,但明显少于 0.2 V,因此缓释碳源释碳效果在 0.2 V 时释碳效果最好,0.4 V 时释碳效果最差。

在反接电压的情况下,各组的 EAMs 在 CDB、AFB 和 EAMs 三组中的丰度较正接电压时丰度均明显减少,分析原因为正接电压下电极板为正极,碳布作为负极,使电活性菌趋向于缓释碳源内部的电极

移动,不易流失,而反接电压下电极作为负极,碳布作为正极,使电活性菌趋向于缓释碳源外部的碳布移动,导致部分电活性菌离开了缓释碳源体系中,因而产生上述趋势。

3 结论

在外加电压控制条件过程中,对缓释碳源施加具有抑制效果的电压在 0.4 V 附近,正向的电压具有更强的抑制效果。外加电压可以有效控制缓释碳源的释碳速率,为污水处理中碳源控制提供了新的方法。电压通过影响微生物的代谢活性和菌群结构来控制碳源的释放,为进一步优化污水处理工艺提供了理论基础。碳释放行为显示出均衡的抑制释放,可以将外加电压作为开关手段匹配现有工艺,为污水厂碳源的投加实现自动化控制提供理论依据。

参考文献

- [1] Fu X R, Hou R R, Yang P, *et al.* Application of external carbon source in heterotrophic denitrification of domestic sewage: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 817: 153061.
- [2] Cgerchi C, Onnis-Hayden A, Ei-Shawabkeh I, *et al.* Implication of using different carbon sources for denitrification in wastewater treatments [J]. *Water Environment Research*, 2009, 81(8): 788-799.
- [3] 汤梦涵, 刘霄, 谭欣. 外加碳源强化人工湿地脱氮研究进展 [J]. *环境生态学*, 2023, 5(7): 107-114.
- [4] 肖艳. 缓释碳源促进生物反硝化脱氮技术研究进展 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(3): 760-768.
- [5] 张旭, 刘佳, 许兵. 缓释碳源材料及其在低碳氮比废水处理中的应用 [J]. *工业用水与废水*, 2021, 52(2): 1-5.
- [6] Glińska K, Stüber F, Fabregat A, *et al.* Moving municipal WWTP towards circular economy: Cellulose recovery from primary sludge with ionic liquid [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020, 154: 104626.
- [7] Cui Y, Zhao B W, Xie F, *et al.* Study on the preparation and feasibility of a novel adding-type biological slow-release carbon source [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 316: 115236.
- [8] Yang E, Omar M H, Park S G, *et al.* A review on self-sustainable microbial electrolysis cells for electro-biohydrogen production via coupling with carbon-neutral renewable energy technologies [J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320(B): 124363.
- [9] Cui Y, Zhao B W, Zhang X, *et al.* Denitrification performance and in-situ fermentation mechanism of the wastepaper-flora slow-release carbon source [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 380: 129074.
- [10] Annamalai N, Sivakumar N, Fernandez-Castane A, *et al.* Production of microbial lipids utilizing volatile fatty acids derived from wastepaper: A biorefinery approach for biodiesel production [J]. *Fuel*, 2020, 276: 118087.

(下转第 176 页)

- of $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 91(1): 159–164.
- [8] 赵彩燕, 陈威, 李泽宇, 等. 六水氯化镁脱水蓄热过程的数值模拟[J]. *低温与超导*, 2022, 50(1): 62–69.
- [9] Gasia J, Gutierrez A, Peiró G, *et al.* Thermal performance evaluation of bischofite at pilot plant scale [J]. *Applied Energy*, 2015, 155: 826–833.
- [10] Ling Z, Liu J, Wang Q, *et al.* $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ eutectic/ SiO_2 composite phase change material with improved thermal reliability and enhanced thermal conductivity [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 172: 195–201.
- [11] Sum W, Huang R, Ling Z, *et al.* Two types of composite phase change panels containing a ternary hydrated salt mixture for use in building envelope and ventilation system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 177: 306–314.
- [12] Kenisarin M, Mahkamov K. Salt hydrates as latent heat storage materials: Thermophysical properties and costs [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, 145: 255–286.
- [13] Lane G A. Low temperature heat storage with phase change materials [J]. *International Journal of Ambient Energy*, 1980, 1(3): 155–168.
- [14] Xinxing Z, Yuan Z, Xiang L, *et al.* Research progress of calcium chloride hexahydrate phase change material [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7(1): 40.
- [15] Veerakumar C, Sreekumar A. Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications—A review [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 67: 271–289.
- [16] Zhang P, Xiao X, Ma Z. A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement [J]. *Applied Energy*, 2016, 165: 472–510.
- [17] Assarsson G O. Equilibria in aqueous systems containing K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and Cl^- . III. The ternary system CaCl_2 - MgCl_2 - H_2O [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1950, 72(4): 1442–1444.
- [18] El-Sebaï A A, Al-Heniti S, Al-Agel F, *et al.* One thousand thermal cycles of magnesium chloride hexahydrate as a promising PCM for indoor solar cooking [J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(4): 1771–1777.
- [19] Tyagi V V, Buddhi D. Thermal cycle testing of calcium chloride hexahydrate as a possible PCM for latent heat storage [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92(8): 891–899.
- [20] Li G, Zhang B, Li X, *et al.* The preparation, characterization and modification of a new phase change material: $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ - $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ eutectic hydrate salt [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 126: 51–55.
- [21] Zhang Y, Zhang X. Thermal properties of a new type of calcium chloride hexahydrate-magnesium chloride hexahydrate/expanded graphite composite phase change material and its application in photovoltaic heat dissipation [J]. *Solar Energy*, 2020, 204: 683–695.
- [22] Wang X, Dennis M, Hou L. Clathrate hydrate technology for cold storage in air conditioning systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 36: 34–51.
- [23] 高才, 周国燕, 胥义华, 等. 乙二醇和丙三醇水溶液冻结特性的研究 [J]. *物理化学学报*, 2004, 20(2): 123–128.
- [24] Lane G A. Phase change materials for energy storage nucleation to prevent supercooling [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1992, 27(2): 135–160.
- [25] 韩兴超, 章学来, 华维三, 等. 成核剂对相变材料 $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 储热特性的影响 [J]. *化工进展*, 2018, 37(7): 2727–2733.
- [26] 曹士博, 罗孝学, 韩晓春, 等. 新型有机-无机复合相变蓄冷材料的制备及性能研究 [J]. *化工新型材料*, 2023, 51(5): 68–72.
- [27] Weck P F, Kim E. Solar energy storage in phase change materials: First-principles thermodynamic modeling of magnesium chloride hydrates [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2014, 118(9): 4618–4625. ■

(上接第 171 页)

- [11] Zhou A J, Du J W, Varrone C, *et al.* VFAs bioproduction from waste activated sludge by coupling pretreatments with *Agaricus bisporus* substrates conditioning [J]. *Process Biochemistry*, 2014, 49(2): 283–289.
- [12] Liu Z H, Zhou A J, Liu H Y, *et al.* Extracellular polymeric substance decomposition linked to hydrogen recovery from waste activated sludge: Role of peracetic acid and free nitrous acid co-pretreatment in a prefermentation-bioelectrolysis cascading system [J]. *Water Research*, 2020, 176 (prepublish): 115724.
- [13] Chen H B, Wang D B, Li X M, *et al.* Enhancement of post-anoxic denitrification for biological nutrient removal: Effect of different carbon sources [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(8): 5887–5894.
- [14] Gong S H, Donde O O, Cai Q J, *et al.* Improved lakeshore sediment microenvironment and enhanced denitrification efficiency by natural solid carbon sources [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2022, 37(6): 823–832.
- [15] Ma H, Zhang B, Hu Y, *et al.* Correlation analysis of intestinal redox state with the gut microbiota reveals the positive intervention of tea polyphenols on hyperlipidemia in high fat diet fed mice [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(26): 7325–7335.
- [16] Li H, Song W L, Cheng J, *et al.* Effects of harvest month on biochemical composition of alligator weed for biohydrogen and biomethane cogeneration: Identifying critical variations in microbial communities [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(7): 4161–4173.
- [17] Ma X Y, Li S P, Tong X X, *et al.* An overview on the current status and future prospects in *Aspergillus* cellulase production [J]. *Environmental Research*, 2024, 244: 117866.
- [18] Wang Q, Zhou X B, Su H, *et al.* Accelerated sulfate reducing bacteria corrosion of X80 pipeline steel welded joints under organic carbon source starvation [J]. *Materials Degradation*, 2022, 6(1): 82.
- [19] 姚创, 刘晖, 罗晓栋, 等. 华南地区低有机质污泥碱性厌氧产酸 (VFAs) 性能机理与菌群分析 [J]. *化工学报*, 2016, 67(4): 1565–1571.
- [20] 陈立香, 李祎頔, 田晓春, 等. 革兰氏阳性电活性菌的电子传递及其应用 [J]. *化学进展*, 2020, 32(10): 1557–1563. ■