

同步糖化强化餐厨垃圾乙醇发酵与污泥共消化性能研究

王立朋, 张耀斌, 金 珍*

(大连理工大学 环境学院 工业生态与环境工程教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 剩余污泥与餐厨垃圾的厌氧共消化可有效调节碳氮比并提升系统稳定性, 但餐厨垃圾中复杂有机组分的水解速率常成为性能提升的限速步骤。餐厨垃圾富含糖类, 具备发酵产乙醇的潜力, 而乙醇氧化释放的能量有利于驱动 CO_2 还原产甲烷, 进而强化基于直接种间电子传递(DIET)的厌氧消化过程。针对目前餐厨垃圾乙醇型发酵预处理产率不高的问题, 本文采用同步糖化法强化餐厨垃圾的乙醇化预处理, 并研究其对后续污泥共消化性能的提升效应。结果表明, 在糖化酶投加量 50 U/mL、酵母菌接种比 2%、预处理温度 30 °C 及时间 21 h 的最优条件下, 餐厨垃圾乙醇浓度最高可达 41.1 g/L(约占其 COD 的 27.2%)。以此预处理产物作为共消化底物, 其实验组的甲烷产量较未经预处理的对照组提升了 17.2%, 挥发性固体(VS)去除率提高 3.2%。电化学测试显示, 实验组污泥的电容显著提高且内阻降低; 微生物测序分析证实, *Methanothrix* 和 *Methanosarcina* 等参与 DIET 过程的关键菌属得到有效富集。研究证明, 同步糖化法可显著改善餐厨垃圾乙醇发酵性能, 通过强化 DIET 机制促进有机废弃物的资源化回收与减量化处理, 为酶制剂与功能微生物在厌氧消化中的应用提供了理论参考。

关键词: 餐厨垃圾; 乙醇型发酵预处理; 直接种间电子传递; 糖化酶; 厌氧消化; 剩余污泥; 酵母菌

中图分类号: X705

文献标识码: A

Enhanced Ethanol Fermentation of Food Waste by Simultaneous Saccharification and Its Performance in Anaerobic Co-Digestion with Sludge

WANG Lipeng, ZHANG Yaobin, JIN Zhen*

(Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering, Ministry of Education, School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Food waste (FW) and waste activated sludge (WAS) are major components of municipal organic solid waste and are produced in large quantities annually. Anaerobic co-digestion of FW and WAS is a promising strategy to balance the carbon-to-nitrogen (C/N) ratio and improve the overall operational stability of anaerobic systems. However, the hydrolysis of complex organic components in FW often becomes the rate-limiting step for enhancing system performance. FW contains abundant carbohydrates that can be fermented by yeast to produce ethanol. Compared with the oxidation of other common volatile fatty acids (VFAs), ethanol oxidation releases more energy, which favors the reduction of carbon dioxide to methane and thereby promotes direct interspecies electron transfer (DIET)-based

收稿日期: 2026-01-29

修回日期: 2026-03-19

接受日期: 2026-03-24

DOI: 10.20078/j.eep.20260401

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52500153); 辽宁省揭榜挂帅资助项目(2023JH1/10400005)

第一作者: 王立朋(2000—), 男, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为有机固废乙醇发酵与厌氧消化处理。

E-mail: 15831215630@mail.dlut.edu.cn

*通讯作者: 金 珍(1994—), 女, 吉林和龙人, 博士后, 主要研究方向为有机固体废物厌氧/好氧生物处理与资源化。

E-mail: jinzhen@dlut.edu.cn

anaerobic digestion. Yeast inoculation is a commonly used method for in situ ethanol production. However, yeast can only utilize reducing sugars, whereas carbohydrates in FW primarily exist as polysaccharides, such as starch and cellulose, limiting their effective utilization by yeast. To address the low ethanol yield during fermentation pretreatment of FW, this study employed simultaneous saccharification and fermentation to enhance ethanol production and investigated its effects on subsequent anaerobic co-digestion with WAS. The results showed that under optimal conditions (saccharifying enzyme dosage of 50 U/mL, yeast inoculation ratio of 2%, pretreatment temperature of 30 °C, and pretreatment time of 21 h), the ethanol concentration reached 41.1 g/L, accounting for approximately 27.2% of the chemical oxygen demand (COD) of FW. When the pretreated product was used as the substrate for co-digestion, the methane yield increased by 17.2% compared with the control (without pretreatment), while the volatile solids (VS) removal rate improved by 3.2%. Electrochemical analysis showed that ethanol-type fermentation pretreatment increased sludge capacitance and decreased internal resistance, indicating enhanced electrochemical activity and improved charge-discharge capability. Moreover, microbial community analysis revealed that DIET-associated microorganisms, including *Methanothrix* and *Methanosarcina*, were enriched. Economic analysis estimated that treating 1.0 t of FW and 3.7 t of WAS could generate an economic benefit of approximately 35.7 CNY. This study demonstrates that simultaneous saccharification and fermentation effectively enhances ethanol production from FW and promotes energy recovery and organic waste reduction via the DIET mechanism, providing a theoretical basis for the application of enzymes and functional microorganisms in anaerobic digestion.

Keywords: Food waste; Ethanol-type fermentation pretreatment; Direct interspecies electron transfer (DIET); Glucoamylase; Anaerobic digestion ; Waste activated sludge; Yeast

0 引 言

餐厨垃圾和剩余污泥是城市有机固体废弃物的重要组成部分,年产量较大^[1]。厌氧消化是实现城市有机固体废弃物资源化的有效方法之一,可将这些有机物转化为沼气等可再生能源进行回收^[2],同时产生的沼渣可用于堆肥^[3]。餐厨垃圾中的有机质主要以淀粉、油脂、食物纤维等有机碳为主,在厌氧消化系统内易发生酸性物质积累,从而抑制厌氧产甲烷^[4]。与此不同,尽管剩余污泥中有机质也较为丰富,但其细胞壁结构稳定,较难直接被微生物利用,且剩余污泥中的蛋白质被分解后形成的游离氨易对产甲烷过程产生氨抑制^[5]。为解决二者单独消化时易酸化和氨氮积累的问题,餐厨垃圾和剩余污泥的共消化在工程实践中被广泛应用,以平衡碳氮比或有机酸/氨氮浓度,维持系统的稳定运行^[6],但共消化仍难以从根本上提升消化系统的产甲烷效率。

餐厨垃圾与剩余污泥的共厌氧消化系统中,乙醇能够促进厌氧消化过程中的微生物间的直接种间电子传递(DIET)^[7],从而提高厌氧消化的产

甲烷效率。这是因为与厌氧消化中常见的其他挥发性脂肪酸(VFA)相比,乙醇氧化释放的能量较高,有利于驱动电子外移并促进还原二氧化碳生成甲烷^[8]。因此,以含乙醇的有机固体废弃物为进料,不仅可以提升厌氧产气效率,还能够富集参与电子传递的电活性微生物^[9]。然而,若直接向处理系统添加乙醇,将提高运行成本。

在预处理阶段对富含糖类的餐厨垃圾进行乙醇型发酵预处理,可在改善厌氧消化性能的同时降低运行成本。投加酵母菌是实现乙醇原位生成的常见方法^[10]。酿酒酵母菌只能利用还原糖^[11],而餐厨垃圾中的糖类以淀粉、纤维素等多糖形式存在,导致酵母菌难以充分利用其中的糖类物质^[12]。相比之下,使用糖化酶、纤维素酶等工业酶可将餐厨垃圾中的多糖分解为酵母菌可直接利用的还原糖^[13],从而提高乙醇产量。然而,酶制剂的类型与其投加量仍有待进一步系统研究。

目前,已有许多有关餐厨垃圾乙醇型发酵预处理对强化厌氧消化的研究^[14-16]。然而,以糖化酶与酿酒酵母菌同步糖化—乙醇预发酵后的餐厨垃圾作为乙醇源,用以强化剩余污泥厌氧消化的

相关研究尚未见报道,且餐厨垃圾乙醇型发酵预处理的关键工艺参数仍有待深入优化。因此,本研究针对酿酒酵母菌发酵餐厨垃圾的预处理条件,以及发酵后的餐厨垃圾与剩余污泥的共消化性能开展系统探究。通过实验优化乙醇型发酵预处理过程中酶制剂的类型及投加量、酵母菌的投加量、预处理温度和时间,以获得最高的乙醇产量;在此基础上,对乙醇型发酵预处理后的餐厨垃圾与剩余污泥进行共消化,验证其对厌氧消化过程的强化效果。本研究首次针对经过同步糖化乙醇预发酵处理的餐厨垃圾与剩余污泥的厌氧共消化效果展开研究,可为糖化酶与酿酒酵母菌在城镇有机固体废弃物厌氧消化领域的工程化应用提供参考。

1 实验方法与材料

1.1 实验材料

剩余污泥取自大连某污泥处理厂,引种污泥取自某牛粪厌氧消化反应罐,餐厨垃圾取自大连理工大学食堂。餐厨垃圾经人工分拣,剔除骨头、塑料和一次性筷子等杂物后,进行粉碎、过筛处理。挥发性固体(VS)、总固体(TS)、总化学需氧量(TCOD)等参数列于表1。剩余污泥、引种污泥和餐厨垃圾在使用前均于4℃条件下保存。糖化酶购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司,酶活为100 000 U/mL。淀粉酶、纤维素酶均购自上海麦克林生化科技有限公司,其酶活分别为100 000 U/g、50 000 U/g。酵母菌为安琪高活性干酵母,购自安琪酵母股份有限公司。将干酵母接种到250 mL锥形瓶中的100 mL培养基(将5 g葡萄糖溶于100 mL超纯水中,121℃灭菌20 min冷却至室温)中,接种量为5%(w/v,以培养基体积计),以恢复其活性,随后在30℃、150 r/min的好氧条件下活化2 h后备用。活化后的酵母菌悬浮液经121℃

表1 引种污泥、餐厨垃圾、剩余污泥理化性质

Table 1 Physicochemical properties of inoculum sludge, food waste, and waste activated sludge

参数	引种污泥	餐厨垃圾	剩余污泥
pH	7.7 ± 0.1	4.9 ± 0.1	7.4 ± 0.1
TS(g·kg ⁻¹)	20.1 ± 0.1	184.1 ± 2.3	150.4 ± 1.4
VS(g·kg ⁻¹)	12.3 ± 0.1	169.3 ± 3.5	97.1 ± 1.0
VS/TS	0.61	0.92	0.65
TCOD(g·kg ⁻¹)	22.1 ± 1.0	315.3 ± 3.5	75.3 ± 1.3

灭菌20 min处理,用于制备灭活酵母菌液。

1.2 实验设置

1.2.1 优化酶类型的选择实验

该实验在有效体积为100 mL的厌氧反应器中进行。实验共设置5组(H1~H5),每组设3个平行反应器。首先,向每个反应器中加入80 mL餐厨垃圾,其中H1组加入5%(v/v)的灭活酵母菌液(菌液121℃灭菌20 min后摇匀),H2组加入5%的活化酵母菌液,H3组加入100 U/mL(0.08 g)的淀粉酶和5%的活化酵母菌液,H4组加入100 U/mL(0.16 g)的纤维素酶和5%的活化酵母菌液,H5组加入100 U/mL(0.08 mL)的糖化酶和5%的活化酵母菌液。将5组反应器放置在37℃、100 r/min条件下进行乙醇型发酵预处理,预处理时间为24 h。

1.2.2 优化糖化酶投加量实验

酶的投加量实验分为5组(N1~N5),每组设置3个平行反应器。首先向每个反应器中加入80 mL的餐厨垃圾,其中,N1组加入5%(v/v)的活化酵母菌液,N2组加入25 U/mL(0.02 mL)的糖化酶和5%的活化酵母菌液,N3组加入50 U/mL(0.04 mL)的糖化酶和5%的活化酵母菌液,N4组加入75 U/mL(0.06 mL)的糖化酶和5%的活化酵母菌液,N5组加入100 U/mL(0.08 mL)的糖化酶和5%的活化酵母菌液。将5组反应器放置在37℃、100 r/min条件下进行乙醇型发酵预处理,预处理时间为24 h。

1.2.3 乙醇型发酵预处理餐厨垃圾实验

乙醇型发酵预处理餐厨垃圾实验分为两个阶段。第一阶段用于优化酵母菌液接种量和预处理温度。向有效体积为100 mL的厌氧反应器中加入80 mL餐厨垃圾和40 μL(50 U/mL)糖化酶酶液,随后分别加入0%、1%、2%、5%和10%(v/v)的活化酵母菌液。为保证各反应器中营养物质投加量一致,分别补充加入10%、9%、8%、5%和0(v/v)的灭活酵母菌液。各反应器分别置于30、37和45℃条件下进行预处理,以确定最佳酵母菌接种比例和预处理温度。

第二阶段用于探究预处理时间对乙醇型发酵预处理效果的影响。实验分为4组(F1~F4),每组设置3个平行反应器。其中,F1组为未加入糖化酶、加入2%灭活酵母菌液组;F2组为加入40 μL糖化酶并加入灭活酵母菌液组;F3组为未加入糖化酶、加入2%活化酵母菌液组;F4组为加入糖化酶并加入活化酵母菌液组。在预处理开始前,各反应器经氮气曝气20 min以去除氧气,随后置

于 30 ℃、100 r/min 恒温培养箱中。

1.2.4 预处理餐厨垃圾与剩余污泥共厌氧消化实验

餐厨垃圾与剩余污泥的共厌氧消化序批式实验在有效体积为 500 mL 的厌氧反应器中进行。每个反应器中加入 30 mL 餐厨垃圾和 110 mL 剩余污泥(剩余污泥与超纯水以 1.0 : 1.5(v/v)比例混合)作为底物,随后加入 210 mL 引种污泥。实验共设置 2 组,每组设 3 个平行的厌氧反应器。对照组(R1)的底物为经灭活酵母菌预处理的餐厨垃圾(2% 灭活酵母菌液、30 ℃ 温度下预处理 21 h)和剩余污泥;实验组(R2)的底物为经过乙醇型发酵预处理(50 U/mL 糖化酶、2% 活化酵母菌液、30 ℃ 温度下预处理 21 h)的餐厨垃圾和剩余污泥。实验开始前,使用氮气曝气 20 min 去除反应器中的氧气,之后放置在温度为 37 ℃、100 r/min 条件下的恒温培养箱中进行厌氧消化实验。

1.3 分析方法

根据标准方法测定 TS、VS 和 COD。乙醇及 VFA 通过气相色谱仪(GC-7900, 氢火焰检测器, 岛津)和火焰离子化检测器, 氮气(99%, 纯度)为载气。甲烷含量则通过另一台气相色谱仪(GC7900, GC-8A/热导检测器, 中国天美)测定。碳流平恒分析参照文献中方法进行^[17]。通过电化学工作站(振华, CHI1030C, 中国)测定实验组和对照组共厌氧消化反应器中污泥样品的循环伏安曲线(CV)与电化学阻抗(EIS)。

电化学表征在三电极电解池中进行, 其中工作电极、对电极和参比电极分别为玻碳电极(0.04 cm²)、铂片电极(1 cm²)和氯化银参比电极。电解液为磷酸缓冲溶液(PBS)(用于 CV 测试)和铁氰化钾溶液(用于 EIS 测试)。CV 测试中, 初始电位设置为-0.8 V 至 0.8 V, 扫描速率为 10、20、50、100、140、180 和 200 mV/s。EIS 测试中, 开始频率为 10 000 Hz, 结束频率为 1 Hz, 交流扰动电压幅值为 10 mV (Root Mean Square, RMS), 电压范围为-0.6 V 至 0.6 V。

实验结束后, 采用 16S rRNA 高通量测序对微生物群落结构进行分析。首先, 使用 E.Z.N.A[™] Mag-Bind Soil DNA Kit 试剂盒提取样品中的 DNA, 之后进行两轮 PCR 扩增(聚合酶链式反应), 第二轮扩增引入 Illumina 桥式 PCR 兼容引物。细菌选择 V3~V4 区域进行扩增, 引物为 Bar-PCR primer F 和 Primer R; 古菌选择 V3~V4 区域进行扩增, 引物为 Bar-PCR primer F 和 Primer R。扩增后, 通过

2% 琼脂糖凝胶电泳检测文库大小, 并使用 Qubit3.0 荧光定量仪进行文库浓度测定。之后通过 RDP classifier 比对 Silva 数据库进行分类。

2 结果与讨论

2.1 酶制剂的类型对乙醇型发酵预处理的影响

餐厨垃圾中含有丰富的淀粉和纤维素等糖类物质, 酵母菌难以直接利用这些多糖产乙醇。投加淀粉酶、纤维素酶或糖化酶可以将淀粉和纤维素分解为还原糖, 从而为酵母菌提供可利用底物。

如图 1(a)所示, 加入活化酿酒酵母后, 餐厨垃圾中乙醇浓度有所提高, 从 H1(只加入灭活酵母)的 2 834.8 mg/L 提高到了 H2(加入活化酵母菌)的 14 188.7 mg/L, 乙醇产量提高了 400.5%。这表明在餐厨垃圾中加入活化的酿酒酵母菌能够有效提高餐厨垃圾中的乙醇产量。同时加入不同类型的酶制剂可以进一步提高乙醇产量。加入淀粉酶的 H3、纤维素酶的 H4 和糖化酶的 H5 组的乙醇浓度分别为 22 027.0、17 170.0、34 162.1 mg/L。按照 1 g 乙醇相当于 2.09 g COD 计算, 同时投加酿酒酵母菌和糖化酶的 H5 组的乙醇浓度达到了 71 398.8 mg COD/L, 相当于餐厨垃圾 COD 的 22.6%。

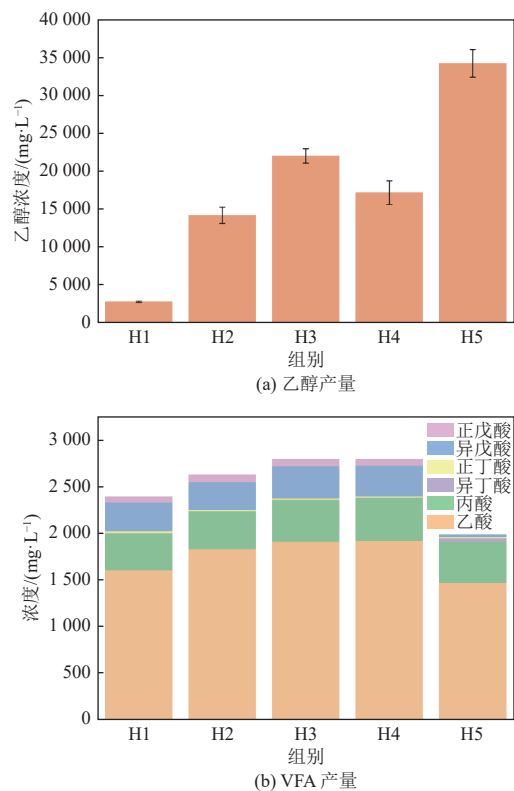


图 1 投加酶制剂类型对乙醇型发酵预处理的影响

Fig. 1 Effect of enzyme types on ethanol-type fermentation pretreatment

相较于仅投加酵母菌的 H2(无酶)组, H3、H4、H5 组分别提高了 55.2%、21.0%、140.8%。在相同酶投加量下, 糖化酶的效果明显优于淀粉酶和纤维素酶。这可能与食堂餐厨垃圾中米饭、面条等淀粉类糖类的含量高于蔬菜等纤维素类糖类含量有关^[18]。此外, 虽然糖化酶和淀粉酶的可利用底物都是淀粉, 但淀粉酶主要将淀粉分解为糊精、低聚糖和少量葡萄糖, 而糖化酶几乎将淀粉全部分解为葡萄糖^[19], 因此糖化酶能够为酵母菌提供更多直接可利用的底物, 从而提高乙醇产量。

从图 1(b)可以看出, 经过乙醇型发酵预处理后, 除投加糖化酶的 H5 组 VFA 降低之外, 其余组的 VFA 浓度均有所增加。H5 组 VFA 浓度下降可能是由于餐厨垃圾中的淀粉几乎完全转化为乙醇, 而在其他反应器中, 淀粉则被部分转化为 VFA^[20]。H5 组的 VFA 总量相较于 H1 组降低了 16.8%, 总量约下降 400.3 mg/L, 远低于乙醇的增加量。由此可见, 糖化酶在餐厨垃圾乙醇型发酵预处理中对乙醇产量的提升效果优于淀粉酶和纤维素酶。因此, 在后续实验中选用糖化酶作为餐厨垃圾的预处理酶。

2.2 糖化酶的投加量对乙醇型发酵预处理的影响

糖化酶的投加量是餐厨垃圾同步糖化乙醇型发酵预处理的重要参数。如图 2(a)所示, 不同糖化酶投加量下的乙醇浓度分别为 N1(0 U/L 糖化酶) 7 094.4 mg/L、N2(25 U/mL 糖化酶) 19 485.7 mg/L、N3(50 U/mL 糖化酶) 34 084.1 mg/L、N4(75 U/mL 糖化酶) 32 105.0 mg/L、N5(100 U/mL 糖化酶) 34 172.1 mg/L。与未添加糖化酶的 N1 相比, N2 与 N3 的乙醇浓度分别提高了 176.4% 和 380.4%, 而 N4 和 N5 的乙醇浓度与 N3 组相比未发生明显变化。这表明 50 U/mL 的糖化酶在 24 h 内即可将餐厨中的淀粉几乎完全分解为还原糖。从图 2(b)可以看出, N1、N2、N3、N4 和 N5 的 VFA 浓度分别为 2 617.5、2 144.1、2 008.5、2 088.7 和 1 981.3 mg/L。随着糖化酶投加量的增加, 餐厨垃圾中 VFA 的浓度均不同程度降低, 而 N3、N4、N5 3 组之间的 VFA 总量差异不大。综上所述, 餐厨垃圾同步糖化乙醇化的糖化酶最佳投加量为 50 U/mL。

2.3 酵母菌接种量、预处理温度和时间对乙醇型发酵预处理的影响

如图 3(a)所示, 当乙醇型发酵预处理温度为 30 °C 时, 乙醇产量达到最高; 37 °C 时次之, 45 °C 时最低。以酵母菌接种比 1% 为例, 30 °C 条件下

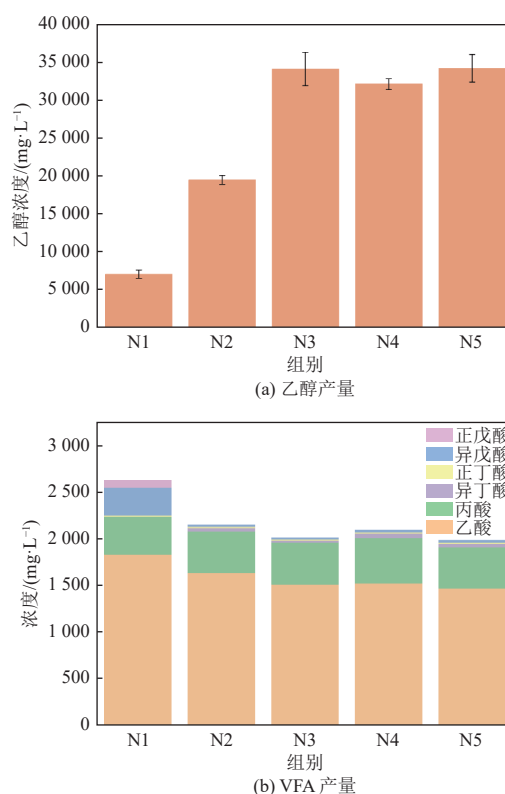
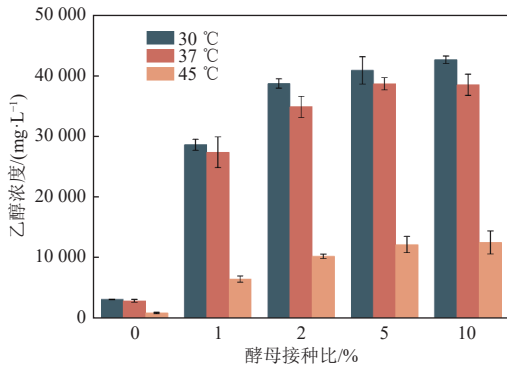


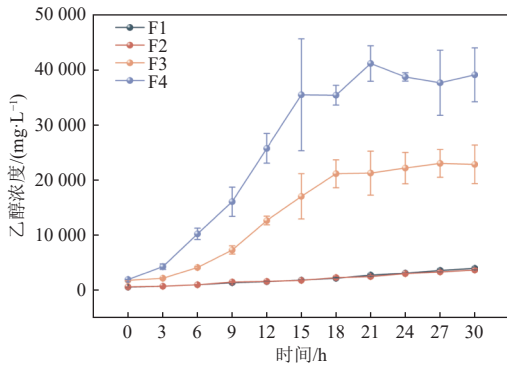
图 2 糖化酶的投加量对乙醇型发酵预处理的影响
Fig. 2 Effect of glucoamylase dosage on ethanol-type fermentation pretreatment

乙醇产量为 28 626.1 mg/L, 分别比 37 °C 提高 1.1%, 比 45 °C 时提高 441.5%。这是因为酵母菌的最合适生长温度为 25~30 °C, 较高温度(38~45 °C)会导致酵母菌的活性下降并降低酶活性^[21]。在不同接种比条件下, 乙醇浓度随着接种比的增加而提高。30 °C 条件下, 酵母菌接种比为 1%、2%、5%、10% 时, 对应乙醇产量分别为 28 626.1、38 692.0、40 852.4、42 604.2 mg/L。相较于酵母菌接种比 1%, 接种比 2% 时乙醇产量提高了 35.2%, 而接种比 5% 和 10% 相较于 2% 分别仅提高 5.6% 和 10.1%。由此可推测, 最佳酵母菌接种比为 2%。

如图 3(b)所示, 在乙醇型发酵预处理结束时, 加入糖化酶和酵母菌组的乙醇产量达到 39 076.1 mg/L, 相较于仅加入酵母菌组的 22 860.1 mg/L 提高 70.9%, 而对照组和仅加入糖化酶组的乙醇产量均低于 4 100.0 mg/L。在加入糖化酶和酵母菌组中, 预处理时间为 21 h 时乙醇浓度达到最高值 41 109.5 mg/L, 在随后 9 h 的预处理过程中保持在 37 628.0~39 076.1 mg/L。相比之下, 仅加入酵母菌组则在 27 h 达到最高乙醇浓度, 此时加入糖化酶和酵母菌组的乙醇产量仍比仅加入酵母菌组高 63.3%。据此, 最优的预处理条件: 糖化酶投加



(a) 接种比与温度对乙醇产量的影响



(b) 乙醇产量时间曲线

图 3 酵母菌接种量、预处理温度和时长对乙醇型发酵预处理的影响

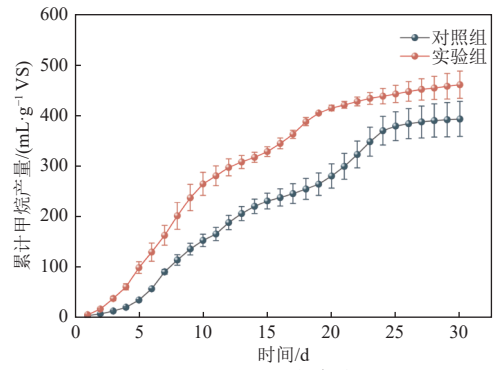
Fig. 3 Effects of yeast inoculum size, pretreatment temperature, and duration on ethanol-type fermentation pretreatment

量 50 U/mL, 预处理温度 30 °C、酵母菌液接种比 2%、预处理时间 21 h。在此条件下, 餐厨垃圾的乙醇浓度达到 41 109.5 mg/L, 相当于 85 918.9 mg COD/L, 约占餐厨垃圾总 COD 的 27.2%。

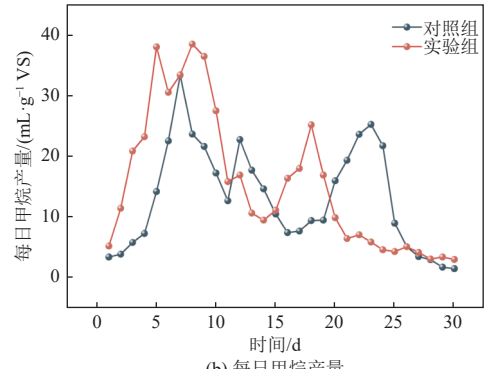
2.4 乙醇型发酵预处理对厌氧消化的影响

2.4.1 乙醇型发酵预处理对共厌氧消化性能的影响

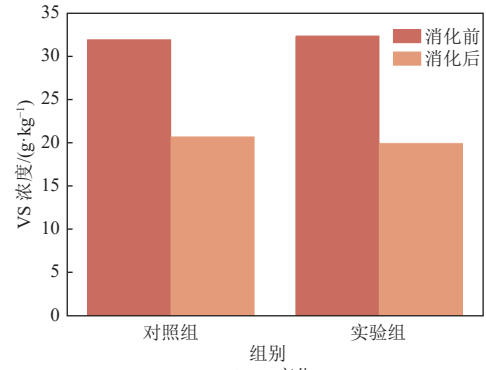
如图 4(a) 所示, 在序批式厌氧消化实验开始的前 10 天, 实验组 R2 的每日甲烷产量明显高于对照组 R1。实验组厌氧消化的启动速率明显快于对照组。这可能是由于乙醇分子结构简单, 厌氧代谢路径更短, 能够直接为产甲烷菌提供能量, 从而具有更高的代谢效率。经过 30 d 的厌氧消化, 实验组的甲烷产量相较于对照组提高 17.2%。实验组甲烷产量的提高可归因于乙醇促进易生物降解有机质向甲烷的转化^[22-23]。此外, 乙醇的高能量密度也可能使实验组具有更高的甲烷产率。从图 4(b) 可以看出, 实验组和对照组的甲烷产量分别在厌氧消化开始第 21 天和第 26 天趋于平稳, 这也说明乙醇提高了厌氧消化的产气速率。



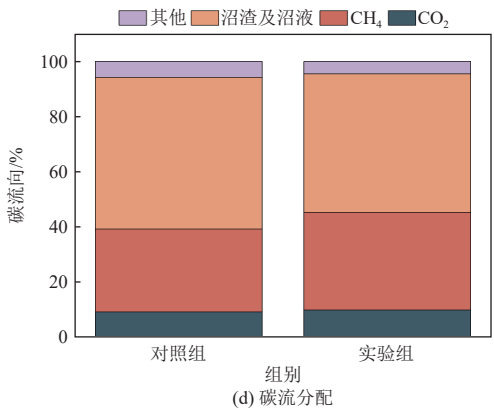
(a) 累计甲烷产量



(b) 每日甲烷产量



(c) VS 变化



(d) 碳流分配

图 4 甲烷产量、VS 变化及碳流平衡分析

Fig. 4 Methane yield, VS reduction, and carbon mass balance analysis

除甲烷产量得到提升之外, 实验组的 VS 去除率也有所提高。从图 4(c) 计算得出实验组和对照

组的 VS 去除率分别为 38.2% 和 35.0%，实验组相较于对照组提高了 3.2%。该结果与文献中报道的连续运行反应器运行 20 d 时，乙醇型发酵预处理强化餐厨垃圾与剩余污泥共消化所带来的 VS 去除率提升(1.9%)相类似^[24]。这表明，在厌氧消化体系内乙醇的存在能够促进污泥的减量化。

在厌氧消化过程中，底物中的有机碳能够以沼气的形式被回收，而其余碳则被转化到沼渣和沼液中。如图 4(d) 可知，在整个厌氧消化进程中，实验组中有更多的有机碳转化为甲烷，实验组和对照组以甲烷形式回收的有机碳的比例分别为 35.2% 和 30.4%；实验组和对照组二氧化碳转化率分别为 9.8% 和 9.1%。甲烷和二氧化碳的转化率的提高可能是由于实验组中乙醇的存在促进了 DIET 互养代谢过程，促进了难水解底物的分解^[25]。

2.4.2 电化学分析

种间电子传递过程伴随电荷的储存与转移，而电容是表征体系储存电荷能力的关键参数。电容可通过循环伏安曲线进行评估，其大小可以反映污泥的充放电能力。循环伏安曲线如图 5 所示，在扫描速率为 50 mV/s 时，对照组和实验组污泥的电容分别为 8.2×10^{-6} F、 1.3×10^{-5} F。经过乙醇型发酵预处理的实验组样品的电容比未经乙醇

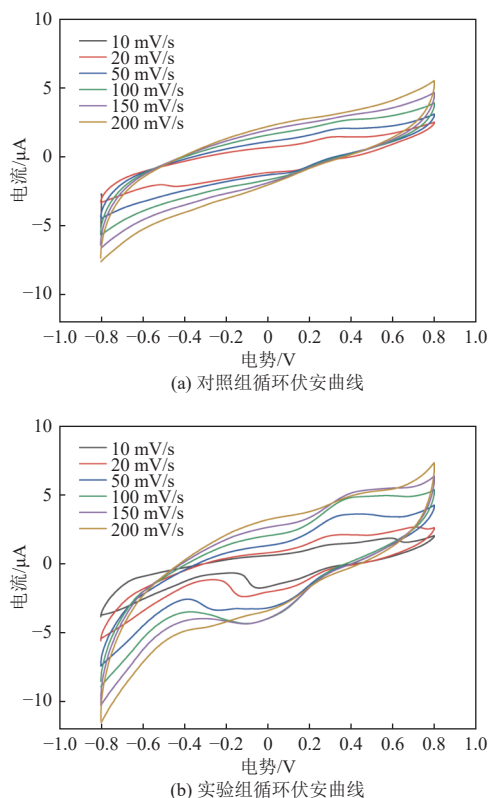


图 5 循环伏安曲线

Fig. 5 Cyclic voltammetry curves

型发酵预处理的对照组高 58.9%。这表明，底物中的乙醇能够增强污泥的电化学活性，使污泥具有更强的充放电能力。

污泥的阻抗数据可通过 EIS 测试获得，EIS 测试的 Nyquist 曲线通常由高频的半圆和低频斜线组成。Nyquist 曲线中半圆与水平轴的左交点对应溶液内阻(R_s)，半圆的直径对应电荷转移阻抗(R_{ct})。从图 6 中可观察到，实验组在高频区的半圆半径明显小于对照组^[26]。这表明乙醇的存在降低了污泥的电荷转移阻抗，污泥的电化学活性增强，这也与循环伏安曲线的结果一致。

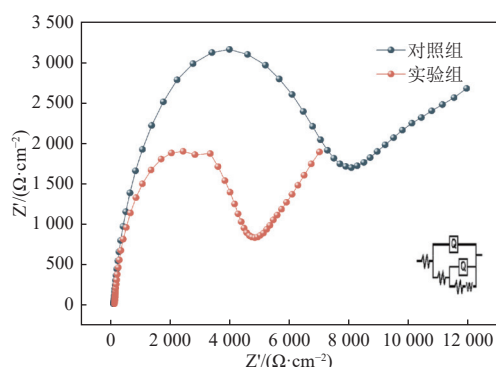


图 6 电化学阻抗图

Fig. 6 Electrochemical impedance spectroscopy

2.4.3 微生物群落结构分析

厌氧消化结束后对两组反应器(R1、R2)的污泥进行微生物群落结构分析。如图 7(a) 所示。在 2 组反应器中，*Methanosarcina* 均为主要产甲烷菌，在实验组和对照组相对丰度分别为 41.6% 和 39.1%。*Methanosarcina* 代谢途径多样，是同时具备 DIET 和种间氢气传递(IHT)能力的产甲烷菌，两种途径均可将二氧化碳还原为甲烷^[27]。此外，实验组中富集了 *Methanotherix*，其在实验组和对照组的相对丰度分别为 35.7% 和 24.4%，该菌属能够通过 DIET 直接接收电子，将二氧化碳还原为甲烷^[28]。在经乙醇型发酵预处理的实验组中，底物中乙醇的存在，可能是富集 *Methanotherix* 和 *Methanosarcina* 的重要原因。

细菌群落结构中相对丰度较高的微生物是 *Longilinea* 和 *Cloacimonadaceae W5(W5)*。*Longilinea* 在对照组中的丰度为 28.1%，在实验组中的丰度为 20.9%(图 7(b))。*Longilinea* 可在厌氧体系中通过加工和互养代谢将复杂有机物分解为氨基酸、单糖等小分子有机物^[29]。对照组中 *Longilinea* 相对丰度较高可能与未经过预处理的底物中复

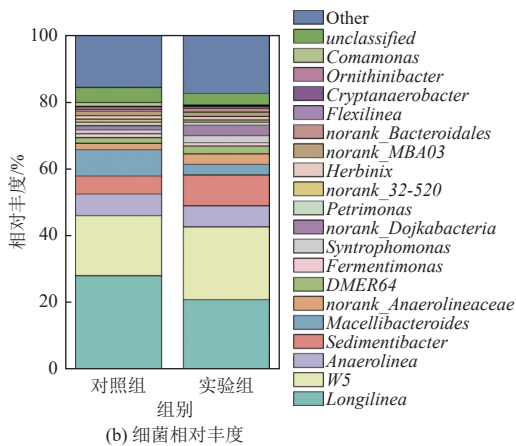
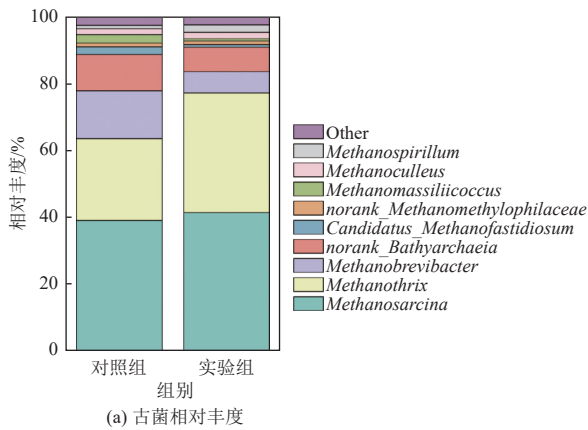


图 7 微生物群落分析

Fig. 7 Microbial community analysis

杂有机物含量较高有关。实验组中富集的 *Cloacimonadaceae* W5(W5) 是一种丙酸氧化互养代谢菌, 能与产甲烷菌建立互养代谢关系, 参与厌氧消化过程中丙酸的分解, 从而促进厌氧消化过程的稳定进行^[30]。此外, 实验组中富集了可能参与 DIET 的电活性微生物。例如, *Sedimentibacter* 可与多种产甲烷古菌建立 DIET 途径^[31], 该菌在实验组和对照组中的相对丰度分别为 9.2% 和 5.4%。*norank_Anaerolineaceae* 是厌氧消化体系中参与 DIET 的核心菌群, 其丝状聚集体可与产甲烷古菌 *Methanosaeta* 属建立 DIET 途径^[32]。*norank_Anaerolineaceae* 在实验组和对照组中的相对丰度分别为 3.1% 和 1.9%。因此, 同步糖化强化餐厨垃圾乙醇发酵与污泥共消化可能有利于电活性微生物的富集。

2.5 经济性分析

本研究采用同步糖化乙醇型发酵对餐厨垃圾进行预处理, 以提高乙醇产量, 进而增强城镇有机固体废弃物的厌氧消化产甲烷性能。在实验操作中, 主要运行成本来自酵母菌、糖化酶和葡萄糖的

购买。酵母菌、糖化酶和葡萄糖的价格分别为 23.0、9.0 和 2.5 元/kg。预处理 1 t 餐厨垃圾所需用量为 1.0 kg 酵母菌、0.5 kg 糖化酶和 1.0 kg 葡萄糖, 若不考虑能耗、人工、设备折旧、搅拌与加热成本等因素, 预处理总成本约为 30 元。经初步估算采用该方法处理 1 t 餐厨垃圾和 3.7 t 剩余污泥, 可使甲烷产量提升约 19.8 m³, 对应经济收益约为 35.7 元。酵母菌液是同步糖化乙醇发酵预处理成本的主要组成部分, 而酵母菌液可通过多级培养获得, 进而降低运行成本, 提高经济可行性。然而, 该技术能否应用于实际工程需进一步优化。

3 结 论

本研究以餐厨垃圾与剩余污泥的厌氧共消化体系为研究对象, 采用糖化酶与酿酒酵母菌对餐厨垃圾进行同步糖化乙醇型发酵预处理的方法提高预处理的乙醇产量, 并探究该方法对厌氧消化性能的影响, 得到如下结论。

(1) 乙醇型发酵预处理中, 糖化酶投加量 50 U/mL、酵母菌接种比 2%、预处理温度 30 ℃, 预处理时间为 21 h, 可得到最高的乙醇产量。此时, 餐厨垃圾乙醇浓度最高可达 41.1 g/L(约占其 COD 的 27.2%)。

(2) 同步糖化乙醇型发酵预处理可有效提高厌氧消化性能, 餐厨垃圾经同步糖化乙醇型发酵预处理实验组的甲烷产量相较于对照组提高了 17.2%, VS 去除率提高 3.2%。在实验组中, 底物中有更多的有机碳以沼气的形式被回收。

(3) 电化学与微生物群落分析数据表明, 实验组的污泥电化学活性增强, *Methanotherix*、*Methanosarcina*、*Cloacimonadaceae* W5 等参与 DIET 的关键菌属得到富集。本研究初步证实了餐厨垃圾作为乙醇源对厌氧消化体系的 DIET 强化机制, 但乙醇作为电子供体的直接贡献与微生物代谢刺激的具体分配比例仍需深挖。

(4) 实验室阶段的结果表明, 同步糖化乙醇型发酵预处理餐厨垃圾可以有效提高厌氧消化的甲烷产率和 VS 去除率。结合现有实验数据可以推断, 乙醇强化厌氧消化体系的 DIET 过程是厌氧消化性能增强的重要原因。

参考文献 (References) :

[1] CAO Linlin, LIAO Liming, SU Chengyuan, et al.

- Metagenomic analysis revealed the microbiota and metabolic function during co-composting of food waste and residual sludge for nitrogen and phosphorus transformation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 773: 145561.
- [2] 张辰, 段妮娜, 赵水钎, 等. 双碳目标下城市多源污泥处理处置技术选择与发展趋势 [J]. *环境工程*, 2025, 43(7): 1–9.
ZHANG Chen, DUAN Nina, ZHAO Shuiqian, et al. Technology selection and development trends for urban multi-source sludge treatment under Dual Carbon goals[J]. *Environmental Engineering*, 2025, 43(7): 1–9.
- [3] HE Jing, ZHU Nengmin, XU Yansheng, et al. The microbial mechanisms of enhanced humification by inoculation with *Phanerochaete chrysosporium* and *Trichoderma longibrachiatum* during biogas residues composting[J]. *Biore-source Technology*, 2022, 351: 126973.
- [4] HUA Dongliang, YUAN Shuai, ZHAO Yuxiao, et al. Effects of different acidification-resisting strategies on anaerobic digestion of kitchen waste: Methanogenic properties and microbial community shift[J]. *BioResources*, 2024, 19(2): 2480–2502.
- [5] YANG J, ZHANG J, DU X, et al. Ammonia inhibition in anaerobic digestion of organic waste: A review[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2025, 22(5): 3927–3942.
- [6] 王昱琛, 宿程远, 丁凤秀, 等. 厌氧共消化低碳处理餐厨垃圾与剩余污泥的现状与展望 [J]. *广西师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 40(5): 406–417.
WANG Yuchen, SU Chengyuan, DING Fengxiu, et al. Current situation and prospect of low carbon treatment of food waste and excess sludge by anaerobic co-digestion[J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 40(5): 406–417.
- [7] 王宁, 李美, 李媛, 等. 乙醇发酵预处理耦合生物炭强化城镇有机固废厌氧产甲烷 [J]. *能源环境保护*, 2024, 38(5): 166–174.
WANG Ning, LI Mei, LI Yuan, et al. Enhancing methane production during anaerobic digestion of municipal organic solid wastes by ethanol-type fermentation pretreatment coupled with biochar addition[J]. *Energy Environmental Protection*, 2024, 38(5): 166–174.
- [8] ZHAO Zhiqiang, LI Yang, HE Jingyi, et al. Establishing direct interspecies electron transfer during laboratory-scale anaerobic digestion of waste activated sludge via biological ethanol-type fermentation pretreatment[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(10): 13066–13077.
- [9] ZHOU Lang, LU Bing, MO Li, et al. Ethanol-coupled bioelectrochemical anaerobic digestion system promotes electron mutualistic of electroactive bacteria to enhance propionate degradation and methanogenesis[J]. *Fuel*, 2024, 373: 132387.
- [10] 王铭, 全文洁, 尚洪磊, 等. 餐厨垃圾接种酵母菌固态厌氧发酵产乙醇的可行性研究 [J]. *环境科学研究*, 2022, 35(12): 2830–2835.
WANG Ming, QUAN Wenjie, SHANG Honglei, et al. Feasibility study of solid anaerobic fermentation of food waste inoculation with yeast[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(12): 2830–2835.
- [11] STEWART G G, RUSSELL I. Biochemistry and genetics of carbohydrate utilization by industrial yeast strains[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1987, 59(11): 1493–1500.
- [12] DEN HAAN R, ROSE S H, CRIPWELL R A, et al. Heterologous production of cellulose- and starch-degrading hydrolases to expand *Saccharomyces cerevisiae* substrate utilization: Lessons learnt[J]. *Biotechnology Advances*, 2021, 53: 107859.
- [13] 胡盼盼, 肖梦瑶, 王娜, 等. 多酶协同预处理厨余垃圾技术优化 [J]. *化工进展*, 2025, 44(2): 1138–1146.
HU Panpan, XIAO Mengyao, WANG Na, et al. Optimization of multi-enzyme collaborative pretreatment of kitchen waste[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025, 44(2): 1138–1146.
- [14] GE Lei, YIN Fei, WANG Mingwei, et al. Revealing impact of yeast-lactic acid bacteria cooperation in liquefaction pretreatment on enhancing anaerobic digestion performance of food waste[J]. *Bioresource Technology*, 2025, 429: 132484.
- [15] ZHANG Shuang, REN Yuanyuan, ZHAO Pan, et al. Ethanol-type anaerobic digestion enhanced methanogenic performance by stimulating direct interspecies electron transfer and interspecies hydrogen transfer[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 410: 131280.
- [16] YU Qing, YANG Yafei, WANG Mingwei, et al. Enhancing anaerobic digestion of kitchen wastes via combining ethanol-type fermentation with magnetite: Potential for stimulating secretion of extracellular polymeric substances[J]. *Waste Management*, 2021, 127: 10–17.
- [17] ZHU Lirong, WU Baocun, LIU Yongli, et al. Strategy to enhance semi-continuous anaerobic digestion of food waste by combined use of calcium peroxide and magnetite[J]. *Water Research*, 2022, 221: 118801.
- [18] 邱卫华, 修涵, 赵芸卿, 等. 不同物质组成餐厨垃圾的多酶协同酶解研究 [J]. *环境工程*, 2023, 41(S1): 383–387+424.
- [19] VAN DER MAAREL M J E C, VAN DER VEEN B, UITDEHAAG J C M, et al. Properties and applications of starch-converting enzymes of the α -amylase family[J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, 94(2): 137–155.
- [20] FENG Siran, NGO H H, GUO Wenshan, et al. Volatile fatty acids production from waste streams by anaerobic digestion: A critical review of the roles and application of enzymes[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 359: 127420.
- [21] SALVADÓ Z, ARROYO LÓPEZ F N, GUILLAMÓN J M, et al. Temperature adaptation markedly determines

- evolution within the genus *Saccharomyces*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, 77(7): 2292–2302.
- [22] 陈思宇. 酵母预发酵结合导体材料促进餐厨垃圾厌氧消化产甲烷[D]. 雅安: 四川农业大学, 2024: 24–32.
CHEN Siyu. Yeast pre-fermentation combined with conductive materials promotes anaerobic digestion of food waste to produce methane[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2024: 24–32.
- [23] WANG Zhenru, LI Yuan, AO Zhipeng, et al. Boosting conversion of waste activated sludge to methane during anaerobic digestion via facilitating direct interspecies electron transfer with glycerol[J]. *Renewable Energy*, 2024, 233: 121176.
- [24] 朱亚辉. 乙醇型发酵-生物炭强化餐厨垃圾和剩余污泥厌氧消化产甲烷[D]. 大连: 大连理工大学, 2024: 64–71.
ZHU Yahui. Enhancing methane production during anaerobic digestion of food waste and waste activated sludge via ethanol-type fermentation and biochar addition[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024: 64–71.
- [25] 赵子证. 乙醇刺激直接种间电子传递强化抗生素的厌氧降解[J]. *中国给水排水*, 2025, 41(23): 112–117.
ZHAO Zizheng. Ethanol stimulation of direct interspecies electron transfer enhancing anaerobic degradation of antibiotics[J]. *China Water & Wastewater*, 2025, 41(23): 112–117.
- [26] 樊立萍, 冯万雪. PDA-MnO₂ 改性阳极提高植物微生物燃料电池土壤修复和发电性能[J]. *应用化工*, 2025, 54(3): 651–655.
FAN Liping, FENG Wanxue. Enhances soil remediation and power generation performance of PMFC by PDA-MnO₂ modified anode[J]. *Applied Chemical Industry*, 2025, 54(3): 651–655.
- [27] JIN Hongyu, YANG Lei, REN Yongxiang, et al. Insights into the roles and mechanisms of a green-prepared magnetic biochar in anaerobic digestion of waste activated sludge[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 896: 165170.
- [28] LIU Changhao, WANG Jin, MA Ding, et al. Integrating DNA-SIP and metagenomics to reveal potential mechanisms of iron oxide on microbial communities and metabolic processes in methanogenic system[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2025, 80: 109135.
- [29] CHEN Le, LI Yuehan, ZHANG Panyue, et al. Quorum sensing in anaerobic wastewater treatment: Potential microbiological mechanisms and enhancement strategies[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499: 156150.
- [30] DYKSMA S, GALLERT C. Candidatus Syntrophosphaera thermopropionivorans: A novel player in syntrophic propionate oxidation during anaerobic digestion[J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2019, 11(4): 558–570.
- [31] ZHAO Qing, YUAN Hairong, WANG Heran, et al. Enhancing biomethane production from corn stover via anaerobic digestion incorporated with microbial electrolysis cell[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2025, 83(7): 98–110.
- [32] MA Haitong, WU Ming, LIU Hui, et al. Study on enhancing sludge methanogenesis by adding acetylene black and effect on the characteristics & microbial community of anaerobic granular sludge[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(40): 23086–23095.