

# 含铁沼渣基生物炭的制备及其对城镇有机固废厌氧消化性能的影响

刘梦瑶, 何 忻, 赵智强\*

(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:** 直接种间电子传递(DIET)对扩散传质依赖低,电子传递速率快,可取代间接种间电子传递,成为城镇有机固废(主要包括餐厨垃圾和剩余污泥)厌氧消化的核心机制。然而,厌氧消化后残留的副产物——沼渣,对环境危害大,一直是实现“无废城市”建设目标的挑战。本研究以含铁沼渣为原料,探究了在不同碳化温度下制备的含铁沼渣基生物炭的形貌结构特征及其对城镇有机固废厌氧消化性能的影响,旨在实现“以废治废”。研究表明,随着碳化温度的升高,含铁沼渣基生物炭的孔隙结构增多,官能团组成简化,在 800 °C 碳化条件下制备的含铁沼渣基生物炭,具有更丰富的孔隙和更高的铁含量。在厌氧消化实验中,添加 800 °C 制备的含铁沼渣基生物炭组的甲烷累积产量为 184.24 mL/g 挥发性固体(VS),比对照组(未添加含铁沼渣基生物炭)提高了 19.78%;添加 800 °C 制备的含铁沼渣基生物炭组的 VS 去除率达到 45.75%,比对照组提高了 6.73%。此外,添加 500 °C 制备的含铁沼渣基生物炭组相较于对照组,甲烷累积产量提高了 15.66%,VS 去除率提高了 5.79%,其他实验组的提升效果不显著。电化学分析结果表明,添加 800 °C 制备的含铁沼渣基生物炭组污泥具有更大的电容性和更低的电阻,表明污泥内部种间电子传递得到增强。此外,含铁沼渣基生物炭提高了 *Methanosaeta* 和 *Fastidiosipila* 的相对丰度,促进了它们之间的 DIET,进而提高了城镇有机固废厌氧消化的性能。

**关键词:** 城镇有机固废; 厌氧消化; 含铁沼渣; 生物炭; 直接种间电子传递

中图分类号: X705

文献标识码: A

## Preparation of Iron-Containing Digestate-Based Biochar and Its Impacts on Anaerobic Digestion Performance of Urban Organic Solid Waste

LIU Mengyao, HE Xin, ZHAO Zhiqiang\*

(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:** Direct interspecies electron transfer (DIET) offers a faster electron transfer rate and reduced dependence on diffusive mass transfer, potentially becoming the primary mechanism in the anaerobic digestion of urban organic solid waste, such as food waste and excess sludge. However, digestate, the byproduct of anaerobic digestion, poses environmental hazards and hinders the achievement of a waste-free city. This study investigates the morphological and structural characteristics of iron-containing digestate-based biochar (Fe-BC) produced at various carbonization temperatures, and its impact on the anaerobic digestion process of urban organic solid wastes, toward achieving "waste-to-value-added

收稿日期: 2024-11-16

修回日期: 2025-02-20

接受日期: 2025-02-24

DOI: 10.20078/j.eep.20250306

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家资助项目(2022YFA0913100); 国家自然科学基金面上资助项目(52470140); 中央高校基本科研业务费(DUT24LK005)

第一作者: 刘梦瑶(2001—), 女, 河北承德人, 硕士研究生, 主要研究方向为厌氧生物处理与资源化。E-mail: liumengyao0926@163.com

何 忻(1999—), 女, 甘肃武威人, 硕士研究生, 主要研究方向为厌氧生物处理与资源化。E-mail: hex1110@163.com

通讯作者: 赵智强(1989—), 男, 辽宁大连人, 教授, 主要研究方向为有机固废资源化。E-mail: zhiqiangzhao@dlut.edu.cn

product". The results showed that increasing the carbonization temperature led to a more developed pore structure in the Fe-BC but reduced the complexity of its functional group composition. Fe-BC prepared at 800 °C exhibited the most developed pore structure and the highest iron content, with more uniform iron distribution throughout the biochar. In anaerobic digestion experiments, the group with biochar prepared at 800 °C demonstrated a methane cumulative yield of 184.24 mL/g volatile solids (VS), a 19.78% increase compared to the control group (without biochar). The VS removal rate reached 45.75%, a 6.73% increase over the control group. The group with biochar prepared at 500 °C showed a 15.66% increase in methane cumulative yield and a 5.79% increase in VS removal rate, while the other experimental groups showed no significant improvement. The effect of Fe-BC on promoting methane production was more effective in the middle of the experiment, peaking on the ninth day. Furthermore, Fe-BC prepared at 800 °C improved both the methane content and quality of the biogas produced. Electrochemical analysis indicated that the sludge in the Fe-BC group prepared at 800 °C exhibited greater capacitance and lower electrical resistance, suggesting enhanced interspecies electron transfer, microbial electron exchange, and electrical conductivity. Additionally, Fe-BC increased the relative abundance of *Methanosaeta* and *Fastidiosipila*. In conclusion, Fe-BC derived from digestate possesses a pore structure, with Fe-BC prepared at 800 °C exhibiting the most developed porosity. The addition of Fe-BC prepared at 800 °C most effectively promoted the anaerobic digestion of urban organic solid waste. Moreover, Fe-BC enriched specific microorganisms, thereby promoting DIET and enhancing the anaerobic digestion of urban organic solid waste.

**Keywords:** Municipal organic solid waste; Anaerobic digestion; Iron-containing digestate; Biochar; Direct interspecific electron transfer

## 0 引 言

我国城镇产生的有机固废数量庞大,以餐厨垃圾与剩余污泥为主。据预测,至 2025 年,餐厨垃圾的年产量有望超过 17 000 万 t,剩余污泥的年产量也将达到 9 000 万 t<sup>[1]</sup>。当前,城市区域处理有机固体废弃物主要通过焚烧和填埋,但该过程会释放污染物、增加碳排放,极易导致污染的广泛散布,尤其在秋冬季节,甚至可能加重雾霾的形成。这不仅严重影响生态环境质量,更与生态文明建设、节能降碳以及减少温室气体排放等政策要求相悖,不利于可持续发展目标的实现。

厌氧消化因能耗低、产沼气等优势,被认为是一种可持续技术<sup>[2]</sup>,可用于城镇有机固废的资源化处理,同时减少温室气体排放<sup>[3]</sup>。该技术的核心原理是电子通过甲酸或 H<sub>2</sub> 等载体,在互养菌群之间进行传递的间接种间电子传递(Mediated Interspecies Electron Transfer, MIET)<sup>[4]</sup>。然而,MIET 依赖电子载体进行电子传递,对扩散传质依赖高,扩散速率相对较慢,且易受电子载体的浓度影响,使得在处理城镇有机固废时容易被抑制<sup>[5]</sup>。2010 年, Lovley 团队提出了电子能够利用微生物自身导电

结构进行传输的直接种间电子传递(Direct Interspecies Electron Transfer, DIET),与 MIET 相比,DIET 扩散传质依赖低、电子传递速率快,被认为是 MIET 的潜在替代<sup>[6]</sup>。但该过程存在参与 DIET 的电活性细菌种类稀缺、DIET 可利用的电子供体少、电子传递效率低等问题。

针对上述问题,研究表明导体材料(活性炭、生物炭、碳布、赤铁矿 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、磁铁矿 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、石墨)可以充当 DIET 的电子传输通道,提高厌氧消化性能<sup>[7]</sup>。与其他材料相比,生物炭因来源丰富、经济实惠、对环境无害等优点,被认为是更适合构建 DIET 的导体材料<sup>[8-10]</sup>。此外,Fe(III)能够诱发异化铁还原,富集电活性细菌,增强厌氧消化过程中电活性细菌与产甲烷菌之间的 DIET 的能力,提高甲烷的产量<sup>[11-12]</sup>。

基于上述研究,研究者将生物炭和 Fe(III)同时添加到有机固体废弃物的厌氧消化中<sup>[13-14]</sup>。研究发现,以含铁污泥为原料的生物炭被添加到厌氧消化器中时,可以参与 DIET 建立并加强微生物之间的共养关系,从而促进甲烷的产生<sup>[15]</sup>。JIN 等<sup>[16]</sup>以含铁发酵污泥渣为原料制备的生物炭,在废弃活性污泥的厌氧消化中表现出良好的性能,甲烷

产量提高了 23.4%，并且提高了污泥的电活性微生物丰富度，推测可能建立 DIET。WANG 等<sup>[17]</sup>将以含铁芬顿污泥为原料，制备新型含磁铁矿的生物炭并将其补充到厌氧消化系统时，甲烷的产生显著增强。

然而，厌氧消化的残余物沼渣，若处理不当，仍然有可能成为污染环境的源头，故对其进行资源化利用显得尤为重要<sup>[18]</sup>。目前，将沼渣作为原料回收制成新的生物炭，再用于厌氧消化的这种方式，无需在生物炭中外加铁，不仅实现了城镇有机固废的资源化，也促进了餐厨废弃物和剩余污泥的减量化处理。LIU 等<sup>[19]</sup>在污泥和食物残渣的厌氧消化中添加沼渣生物炭，促进了甲烷的产生，并且发现了微生物 *Methanobacterium*、*Clostridia*、*Methanobrevibacter* 的丰度较高，增强了微生物的 DIET。WANG 等<sup>[20]</sup>研究了沼渣生物炭经过 FeO 改性后，对食物残渣厌氧处理的影响。研究发现，FeO 改性沼渣生物炭显著提高了甲烷产率，*Clostridium* 和 *Methanosarcina* 被选择性富集，有助于改善以 DIET 机制为基础的甲烷生产性能。尽管当下已有许多关于沼渣生物炭促进厌氧消化的研究，但尚缺少实际城镇有机固废产生的沼渣转化为含铁沼渣生物炭，并将其用于治理原始城镇有机固废的可持续性研究。

因此，本研究以实际城镇有机固废厌氧消化产生的含铁沼渣为原始材料，制备了不同碳化温度(300、400、500、600、700、800 °C)下的含铁沼渣基生物炭；探究了以实际城镇有机固废为底物的厌氧消化实验，通过分析系统产甲烷性能和微生物群落特征，研究了不同碳化温度的含铁沼渣

基生物炭对该系统厌氧消化性能的影响。以期为含铁沼渣基生物炭改善城镇有机固废厌氧消化，实现“以废治废”提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验所用含铁沼渣、引种污泥和底物均来源于大连夏家河污泥处理厂。含铁沼渣是该污泥处理厂污泥经厌氧消化处理后的副产物。引种污泥采集于该污泥处理厂的厌氧消化罐，采集后过筛(20 目)并置于冰箱冷藏保存(4 °C)。底物在该污泥处理厂的精调池中采集，包含剩余污泥和提油后的餐厨垃圾，采集后过筛(20 目)置于冰箱冷藏保存(4 °C)。底物的初始特征见表 1。

表 1 底物的初始特征

Table 1 Initial characteristics of the substrate	
指标	初始值
总悬浮固体 TS/%	7.24 ± 0.32
挥发性悬浮固体 VS/%	5.76 ± 0.07
化学需氧量 COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	88 586.67 ± 4 006.01

### 1.2 含铁沼渣基生物炭的制备

将沼渣放在 -80 °C 的冰箱中冷冻 48 h 后放入冷冻干燥机中，干燥后粉碎过筛(100 目)，获得沼渣粉末。然后将沼渣粉末置于高温管式炉中，在 Ar 保护下，以 5 °C/min 的速率升温，分别升温至 300、400、500、600、700 和 800 °C，恒温碳化 120 min 后，在 Ar 氛围下降低到环境温度，收集放于干燥皿中，得到含铁沼渣基生物炭(Fe-BC)(图 1)。

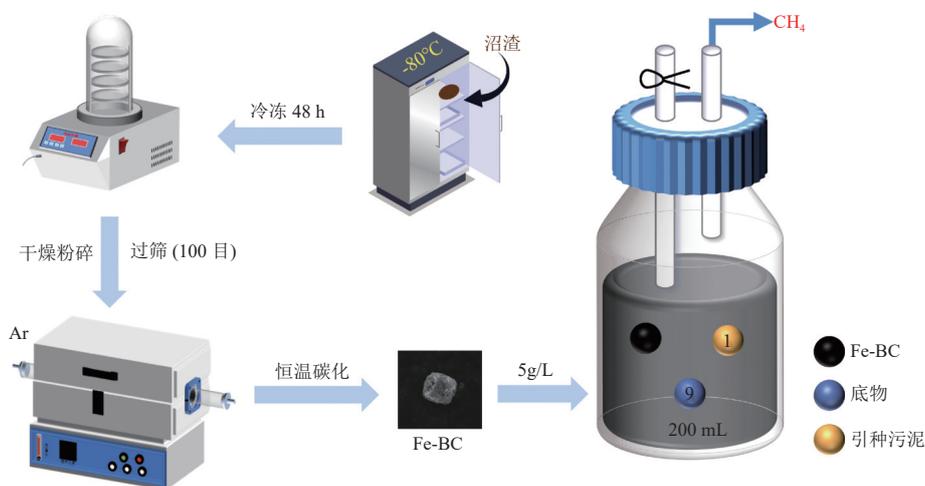


图 1 Fe-BC 的制备及实验装置图

Fig. 1 Preparation of Fe-BC and experimental setup

### 1.3 实验设置

实验采用批试模式。以 250 mL 的丝口瓶作为反应装置,瓶口设计为双通道,一端连接气体收集袋,另一端作为取样通道,用于每日取样分析。每个厌氧装置中添加底物及引种污泥 200 mL(底物与引种污泥的质量比为 9 : 1),实验共 7 个处理组,其中 6 个为实验组,分别添加 300、400、500、600、700 和 800 °C 下制成的 Fe-BC, Fe-BC 的添加量均为 5 g/L,设 1 个未添加 Fe-BC 的处理组为对照组,每组设 3 个平行组,将发酵物充分混合后装瓶,通 5 min N<sub>2</sub> 达到无氧条件后即刻密封瓶口,然后把装置放入 37 °C 的恒温房中,进行厌氧消化实验(图 1)。

### 1.4 分析方法

实验采用 105 °C 烘干重量法(鼓风干燥箱 DHG-9145 A)分析污泥的 TS, 600 °C 灼烧减量法(马弗炉 DGG-9050B)分析污泥的 VS, 气相色谱法(气相色谱仪 GC-8A/热导检测器)分析气体组成, 16S rRNA 对厌氧消化体系中的污泥进行微生物高通量测序。

通过扫描电子显微镜(S-4800)分析 Fe-BC 的形貌特征;通过 X 射线衍射仪(SmartLab(9))、傅里叶红外光谱仪(Nicolet 6700)、X 射线光电子能谱分析仪(K-Alpha+)分析材料的结构特征;通过电化学工作站(CHI 660D)测试厌氧消化后污泥的电化学阻抗谱和循环伏安曲线。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Fe-BC 特性表征

#### 2.1.1 形貌特征

通过扫描电子显微镜(SEM)对沼渣以及不同温度下制成的 Fe-BC 进行表征分析(图 2)。沼渣呈现不规则的块状,结构致密未发现孔隙。随碳化温度的升高,Fe-BC 的形状逐渐规则化,并出现孔隙结构,孔隙结构随温度的升高而增加。800 °C 下制备的 Fe-BC 孔隙最多,其丰富的孔隙结构使得材料的吸附能力得到提高,提供大量微生物附着位点。

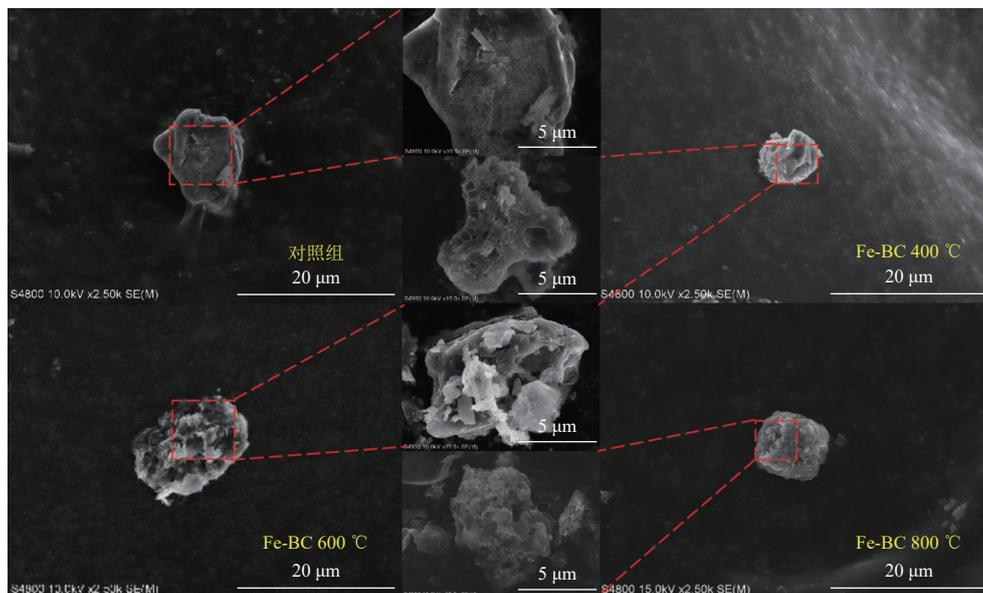


图 2 沼渣及 Fe-BC 的 SEM 图

Fig. 2 SEM image of the digestate and Fe-BC

#### 2.1.2 物相组成

为研究 Fe-BC 的晶体结构及物相组成,对其进行 X 射线衍射分析(XRD)(图 3)。对比发现,6 种碳化温度下的衍射图谱没有明显差异。通过对比 PDF#26-1863、PDF#42-1560 卡片,发现 Fe-BC 与其相符,均为 C、H、O、N、Fe 元素的化合物。同时,在  $2\theta=19.8^\circ$ 、 $26.6^\circ$ 、 $50.2^\circ$  处存在的衍射峰,符合 SiO<sub>2</sub> 的 PDF#87-2096 卡片,对应其(100)、

(101)、(003)晶面,Fe-BC 产生 SiO<sub>2</sub> 的衍射峰,可能是由于沼渣中含有 Si, Si 在热解过程中不易分解,最终保留在生物炭中,也可能是材料退火煅烧时石英管被腐蚀,使得 Si 掺杂入材料<sup>[21]</sup>。

通过傅里叶变换红外吸收光谱(FTIR)分析材料表面的官能团(图 4),图中位于 3 441、2 922、1 695、1 658、1 433、1 026、536 cm<sup>-1</sup> 的吸收峰是由于 N—H/O—H、C—H、C=C、C=O、C—H、

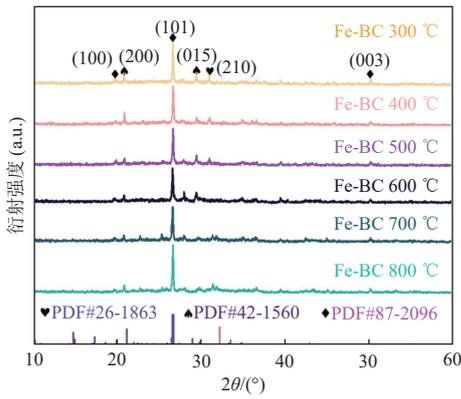


图3 Fe-BC 的 XRD 图

Fig. 3 XRD image of Fe-BC

C—C/C—O、Fe—O 键的拉伸振动产生的。由图可知,随着煅烧温度的提高,官能团 N—H/O—H、C—H 和 C=O 的振动峰逐渐消失,C—C/C—O 和 Fe—O 的振动峰有所减小,C=C 的振动峰增大,这是因为高温导致有机物分解和挥发,并且促进碳化反应的进行,使部分含氧官能团减少或转化成更加稳定的碳结构。沼渣生物炭中存在的 Fe—O 可以提高生物炭吸附电子的能力,促进厌氧消化<sup>[22]</sup>。

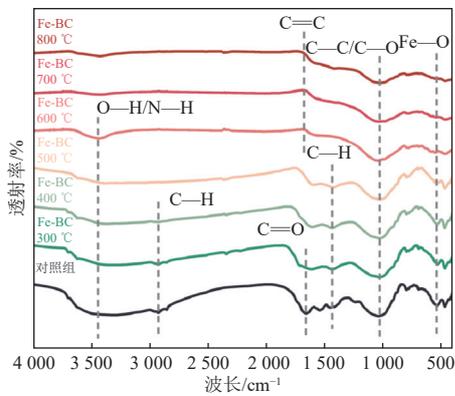


图4 沼渣及 Fe-BC 的 FTIR 图

Fig. 4 FTIR image of the digestate and Fe-BC

为进一步了解材料结构类型和表面元素性质,分析了沼渣及 Fe-BC 的 X 射线光电子能谱 (XPS)。从沼渣及 Fe-BC 的 Fe 2p 精细谱图 (图 5) 中可以发现,沼渣 711.35 eV 和 724.51 eV 的 2 个自旋轨道分别为 Fe 2p<sub>3/2</sub> 轨道和 Fe 2p<sub>1/2</sub> 轨道,并伴有 2 个位于 713.53 eV 和 727.29 eV 的 Fe<sup>2+</sup> 卫星峰;图中在结合能为 711.31 eV 和 724.69 eV 出现 Fe<sup>3+</sup> 的峰,在结合能为 709.60 eV 和 723.11 eV 出现 Fe<sup>2+</sup> 的峰,说明沼渣表面的 Fe 以混合价态存在<sup>[23-24]</sup>。在 Fe-BC 的 Fe 2p 精细谱图中,碳化温度为 400 °C 时,存在 Fe<sup>3+</sup> 和 Fe<sup>2+</sup> 的峰,并伴随 Fe<sup>3+</sup> 和

Fe<sup>2+</sup> 卫星峰,随碳化温度的升高,Fe<sup>2+</sup> 的峰强度逐渐减小至消失,Fe<sup>3+</sup> 的峰强度逐渐增加,说明较高的温度有助于氧化,使 Fe<sup>2+</sup> 转化为 Fe<sup>3+</sup>;同时,碳化温度越高,卫星峰越少,证明在较高的碳化温度下,Fe 以一种简单的形式存在,并且在生物炭中的分布更加均匀。

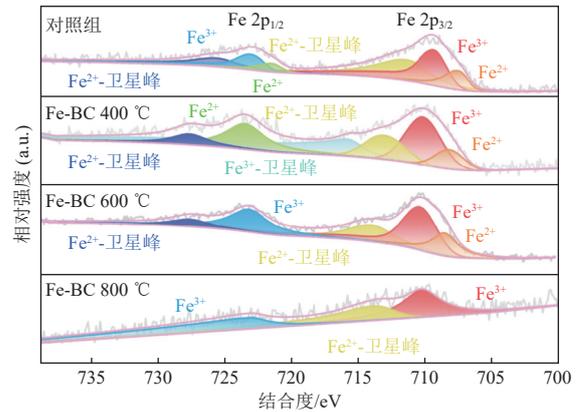


图5 沼渣及 Fe-BC 的 XPS 图

Fig. 5 XPS image of the digestate and Fe-BC

结合能量色散 X 射线能谱 (EDS) 分析沼渣和 Fe-BC 的元素组成及含量 (图 6),发现碳化后 Fe 元素含量的占比均高于沼渣,并且在碳化温度为 400~800 °C 时的 Fe-BC,Fe 含量由 12.93% 提高到 35.84%,Fe 能够改善生物炭的导电性和活性位点<sup>[25]</sup>,提高吸附性能,故 800 °C 制成的 Fe-BC 反应活性更高。

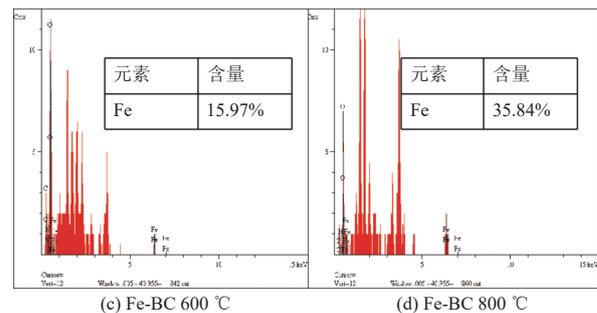
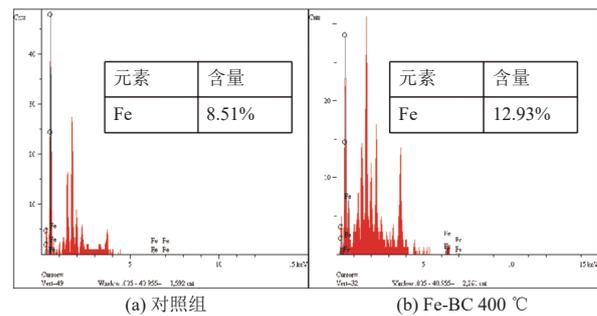


图6 沼渣及 Fe-BC 的 EDS 图

Fig. 6 EDS image of the digestate and Fe-BC

基于以上表征结果,认为碳化温度为 800 °C 制得的 Fe-BC 具有更多的孔隙结构、更简单的官能团组成、更高的 Fe 含量,并且 Fe 更均匀地分布在生物炭中;拥有更好的吸附能力,促进微生物的附着生长,促使后续反应的发生。

## 2.2 Fe-BC 对城镇污泥厌氧消化性能的影响

### 2.2.1 系统产甲烷性能分析

根据各实验组甲烷累积产量的结果(图 7(a))可以发现,与对照组相比,添加 Fe-BC 的实验组在第 14 天的甲烷累积产量均超过对照组,这可能是添加的 Fe-BC 中 Fe(III)加速了厌氧消化有机物的

的分解和甲烷的生成。其中,添加 800 °C 制备的 Fe-BC 组的 14 天甲烷累积产量为 184.24 mL/g VS,相比于对照组(153.81 mL/g VS)甲烷累积产量提高了 19.78%,可能是 800 °C 制备的 Fe-BC 结构更加稳定、铁含量更高、孔隙更丰富,利于微生物的附着和代谢,使其甲烷累积产量升高。添加 500 °C 制备的 Fe-BC 组的甲烷累积产量提高了 15.66%,其余组甲烷累积产量均只提高 5% 左右。实验初期,各实验组甲烷累积产量增加速率逐渐变快,实验 6~10 天甲烷累积产量增加速率较快,实验后期甲烷累积产量趋于平缓,增加速率迅速降低。

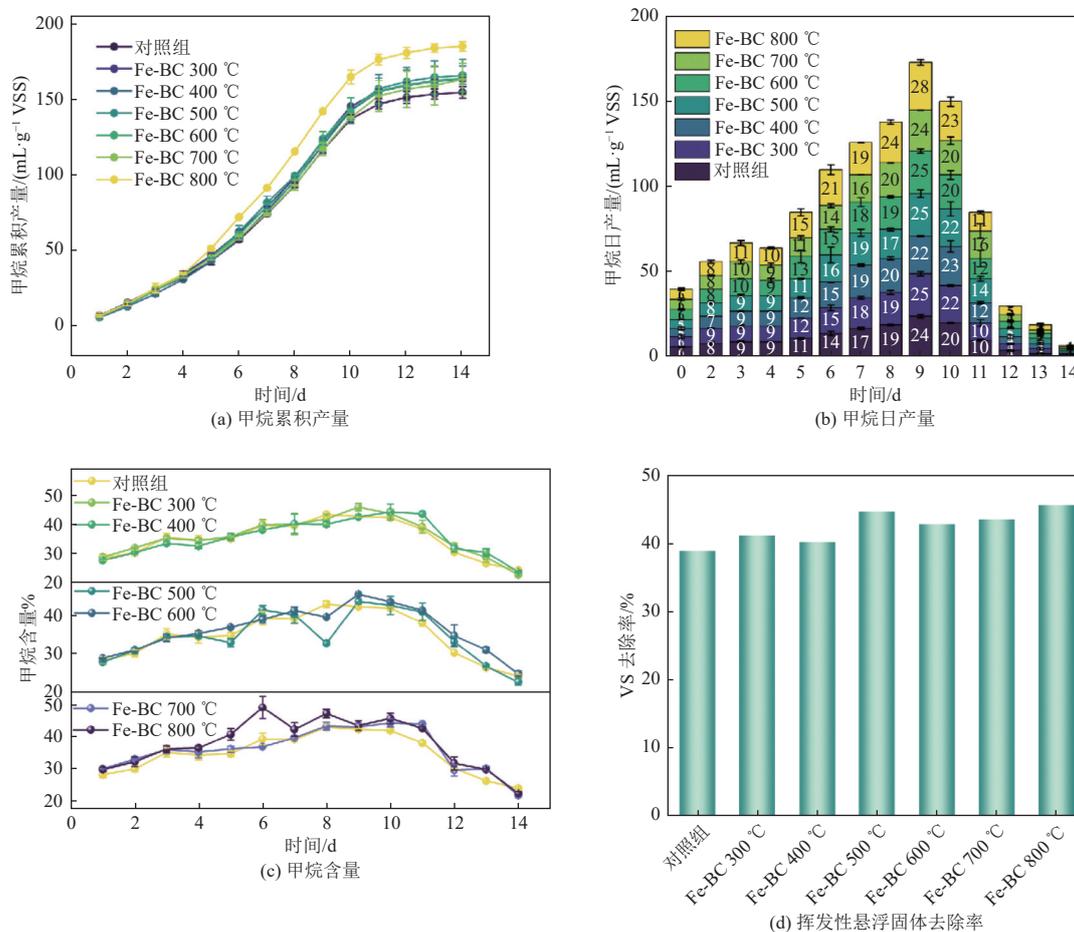


图 7 (a) 甲烷累积产量、(b) 甲烷日产量、(c) 甲烷含量、(d) 挥发性悬浮固体去除率

Fig. 7 (a) Overall methane production, (b) daily methane production, (c) methane content, and (d) VS removal rate

结合各实验组甲烷日产量的情况(图 7(b))可以看出,前 4 天各实验组的甲烷日产量均较低,且相差不大;在实验第 5~10 天,添加 800 °C 制备的 Fe-BC 组的甲烷日产量高于其他实验组;在实验第 9 天,所有实验组均达到甲烷日产量最高值,添加 800 °C 制备的 Fe-BC 组比对照组的甲烷日产量提高了 9.61%;第 10 天后,各实验组甲烷日产量迅速下降。

通过对比甲烷含量的结果(图 7(c))可知,各实验组甲烷含量均在 30%~50%,随实验时间的增加,甲烷的含量呈现先升后降的趋势,各实验组结果相近,只有添加 800 °C 制备的 Fe-BC 组每天的甲烷含量均高于对照组。

以上结果表明实验添加 Fe-BC 可以提高厌氧消化中甲烷的产量,并且在实验中期对产甲烷促进效果较好,第 9 天促进效果最好;800 °C 制备的

Fe-BC 对促进厌氧消化产甲烷的性能最好, 而且可以提高系统产生的气体中甲烷的含量。

### 2.2.2 有机物去除效果分析

利用 VS 的去除效果(图 7(d))衡量有机物在厌氧消化中的分解水平。由图可知, 厌氧消化可以显著降低 VS 含量, 有助于城镇污泥的减量化处理。添加 800 °C 制备的 Fe-BC 组的 VS 去除率(45.75%)比对照组(39.02%)提高了 6.73%。添加 500 °C 制备的 Fe-BC 组的 VS 去除率(44.81%)比对照组提高了 5.79%, 其他实验组的提升效果不明显。根据现有研究, 以城镇有机固废为底物进行厌氧消化时, 其 VS 的去除率通常为 30%~40%, 本研究 VS 去除率得到了提升, 可能是因为 Fe-BC 较大的比表面积和丰富的孔隙结构, 有助于吸附有机固废中的有机物, 增加有机物与微生物的接触面积, 促进 VS 的降解, 说明 Fe-BC 能够提高城镇污泥中有机物的分解, 实现城镇污泥的减量化处理。

### 2.3 微生物群落分析

通过比较属水平上各实验组的微生物群落组成发现在细菌群落中(图 8(a)), 优势菌为 *Fastidiosipila* 和 *norank\_Anaerolineaceae*, 并且 *Christensenellaceae\_R-7\_group*、*norank\_ST-12K33*、*Sedimentibacter* 和 *Syntrophomonas* 的相对丰度接近。在添加 800 °C 和 500 °C 制备的 Fe-BC 组中, *Fastidiosipila* 的相对丰度高于其他实验组, 与对照组相比, 分别提高 19.17% 和 18.84%。已有研究表明, *Fastidiosipila*、*Syntrophomonas* 和 *Christensenellaceae\_R-7\_group* 能够在厌氧消化中将复杂的有机物转化为简单的挥发性脂肪酸<sup>[26-27]</sup>, 并且可以与产甲烷菌协同作用, 促进 DIET 产甲烷。*norank\_Anaerolineaceae* 可以通过生物炭富集<sup>[28]</sup>, 与产甲烷菌进行种间电子传递<sup>[29]</sup>。同时, *pilA* 基因在 *norank\_Anaerolineaceae* 中显著的转录活性是促进 DIET 纳米导线形成的关键。此外, 多项研究表明 *Syntrophomonas* 可以与产甲烷菌建立 DIET。

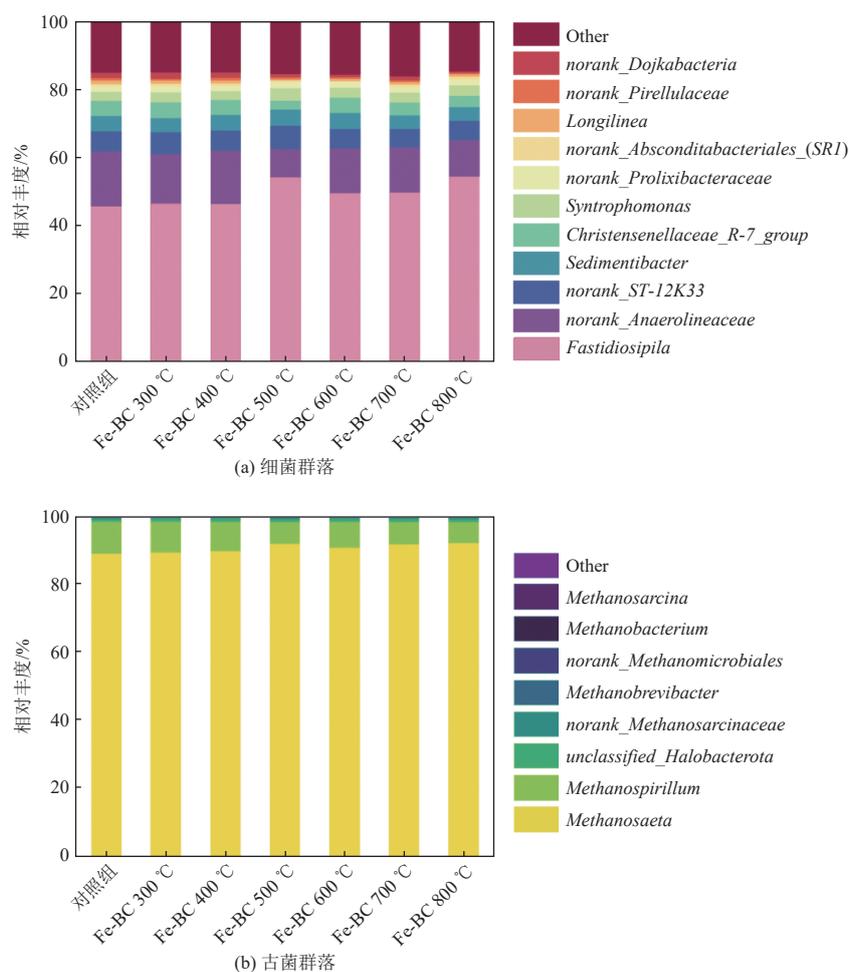


图 8 (a) 细菌群落和 (b) 古菌群落的相对丰度

Fig. 8 (a) Relative abundance of bacterial communities and (b) archaeal communities

在古菌群落中(图 8(b)), 实验组与对照组的优势菌群一致, 主要是 *Methanosaeta* 和 *Methanospirillum*, 占比超过 97%。其中, *Methanosaeta* 的相对丰度最高。已有研究证明, *Methanosaeta* 可以直接接受来自电活性细菌的电子产甲烷<sup>[30]</sup>, 并且通过 Fe-BC 在 *Methanosaeta* 和 *Syntrophomonas* 之间建立 DIET<sup>[16]</sup>。也有研究证明 *Methanosaeta* 具有将 CO<sub>2</sub> 还原为 CH<sub>4</sub> 所需酶的完整基因, 通过 DIET 接受电子将 CO<sub>2</sub> 还原为 CH<sub>4</sub><sup>[31-33]</sup>。同时, *Methanospirillum* 具备 DIET 的能力, 可以直接与其他微生物交换电子, 促进厌氧消化产生 CH<sub>4</sub><sup>[34]</sup>。

通过分析细菌和古菌的丰度, 认为 Fe-BC 能够改善微生物群落结构, 在厌氧消化体系中, Fe-BC 可以富集 *Fastidiosipila*、*norank\_Anaerolineaceae*、*Methanospirillum*、*Methanosaeta* 和 *Syntrophomonas* 等微生物建立 DIET, 促进甲烷的产生, 提高系统

厌氧消化处理城镇污泥的性能。

## 2.4 电化学性能分析

利用电化学工作站对厌氧消化后的污泥进行循环伏安曲线(CV)测试, 并通过循环伏安曲线分析污泥的电容性能(图 9(a))。从图中可以观察到, 添加 Fe-BC 的各组污泥 CV 曲线的形状相差不大, 没有非常明显的氧化还原峰, 但其循环伏安曲线围成的面积均大于对照组污泥循环伏安曲线围成的面积, 并且添加 800 °C 制备的 Fe-BC 组污泥的循环伏安曲线围成的面积最大。据了解, 循环伏安曲线围成的面积越大, 表示所测的电容越高。由此可知, 添加 800 °C 制备的 Fe-BC 组污泥具有更大的电容性, 可以促进污泥内部电子的传递, 增强微生物之间电子的交换, 从而提高厌氧消化的效率。

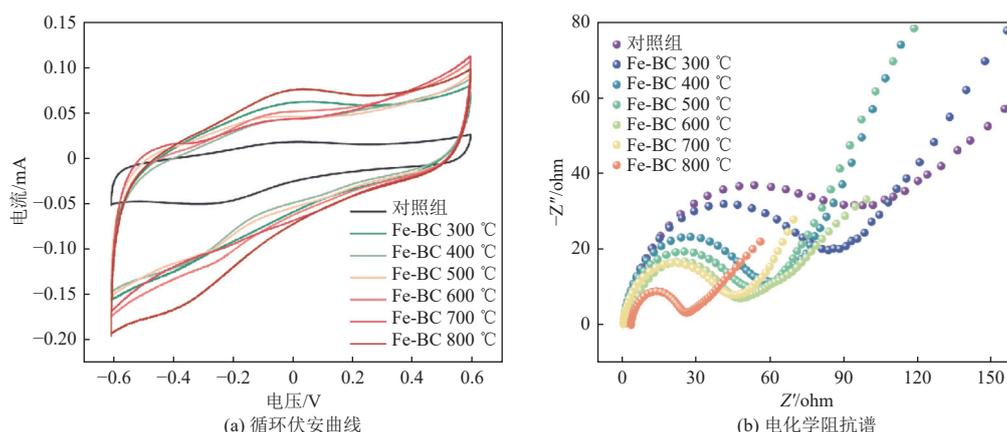


图 9 沼渣及 Fe-BC 的循环伏安曲线图和电化学阻抗谱

Fig. 9 CV and EIS of digestate and Fe-BC

通过对厌氧消化后的污泥进行电化学阻抗谱(EIS)测试(图 9(b)), 可以发现, 在高频区, 添加 Fe-BC 组污泥的半圆直径均小于对照组污泥的半圆直径; 在低频区, 添加 Fe-BC 组污泥的斜率均大于对照组污泥的斜率, 并且添加 800 °C 制备的 Fe-BC 组污泥的半圆直径最小, 斜率较高。这表明添加 800 °C 制备的 Fe-BC 组污泥具有更低的电荷迁移电阻和传质阻力, 能够促进污泥内部电子的转移和运输, 增强导电性。

## 3 结论

本研究以实际城镇有机固废厌氧消化产生的含铁沼渣为原料, 探究了在不同碳化温度下制备的含铁沼渣基生物炭的形貌结构特征及其对城镇有机固废厌氧消化性能的影响。具体结论如下:

(1) 含铁沼渣经过煅烧后得到的 Fe-BC 出现孔隙结构, 800 °C 下制备的 Fe-BC 孔隙最多, 铁含量最高; (2) 添加 800 °C 制备的 Fe-BC 对城镇有机固废厌氧消化性能的促进效果最好, 其甲烷累积产量为 184.24 mL/gVS, 比对照组(未添加含铁沼渣基生物炭)提高了 19.78%; VS 去除率为 45.75%, 比对照组提高了 6.73%; (3) Fe-BC 可以富集 *Fastidiosipila*、*norank\_Anaerolineaceae*、*Methanospirillum* 和 *Methanosaeta* 等微生物, 促进 DIET 的建立和甲烷的产生, 提高了城镇有机固废厌氧消化的性能。

## 参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] YAO Bing, LIU Min, TANG Taotao, et al. Enhancement of anaerobic digestion of ciprofloxacin wastewater by nano zero-valent iron immobilized onto biochar[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 385: 129462.
- [3] BAI Sai, TANG Yuchao, GENG Mengqi, et al. Self-enhancement of bioenergy recovery from anaerobically digesting WAS with novel iron-based metal-organic framework assistance: Insights into electron transfer and metabolic pathways[J]. *Environmental Research*, 2024, 263: 120167.
- [4] WANG Wei, LEE D J. Direct interspecies electron transfer mechanism in enhanced methanogenesis: A mini-review[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 330: 124980.
- [5] STORCK T, VIRDIS B, BATSTONE D J. Modelling extracellular limitations for mediated versus direct interspecies electron transfer[J]. *The ISME Journal*, 2016, 10(3): 621-631.
- [6] WANG Tao, ZHANG Dong, DAI Lingling, et al. Magnetite triggering enhanced direct interspecies electron transfer: A scavenger for the blockage of electron transfer in anaerobic digestion of high-solids sewage sludge[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(12): 7160-7169.
- [7] JIANG Qin, CHEN Yongdong, YU Shangke, et al. Effects of citrus peel biochar on anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge and its direct interspecies electron transfer pathway study[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 398: 125643.
- [8] WANG Gaojun, LI Qian, GAO Xin, et al. Sawdust-derived biochar much mitigates VFAs accumulation and improves microbial activities to enhance methane production in thermophilic anaerobic digestion[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019, 7(2): 2141-2150.
- [9] LUO Chenghao, LYU Fan, SHAO Liming, et al. Application of eco-compatible biochar in anaerobic digestion to relieve acid stress and promote the selective colonization of functional microbes[J]. *Water Research*, 2015, 68: 710-718.
- [10] BU Jie, HU Binbin, WU Haizhen, et al. Improved methane production with redox-active/conductive biochar amendment by establishing spatial ecological niche and mediating electron transfer[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 351: 127072.
- [11] CAI Yafan, JANKE L, ZHENG Zehui, et al. Enhancing anaerobic digestion of chicken manure leachate: Effects of trace elements supplementation on methane production[J]. *Bioresource Technology Reports*, 2021, 14: 100662.
- [12] KONG Xin, WEI Yonghong, XU Shuang, et al. Inhibiting excessive acidification using zero-valent iron in anaerobic digestion of food waste at high organic load rates[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 211: 65-71.
- [13] YUAN Tugui, SHI Xiaoyu, SUN Ran, et al. Simultaneous addition of biochar and zero-valent iron to improve food waste anaerobic digestion[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123627.
- [14] LU Wenxu, DENG Guanyong, CHENG Xiaoge, et al. Effects of iron-loaded biochar on the anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge and elucidating the mechanism thereof[J]. *Sustainability*, 2022, 14(15): 9442.
- [15] LIU Xiang, MENG Qingting, WU Fengjie, et al. Enhanced biogas production in anaerobic digestion of sludge medicated by biochar prepared from excess sludge: Role of persistent free radicals and electron mediators[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 347: 126422.
- [16] JIN Hongyu, HE Zhangwei, REN Yongxiang, et al. Revealing the roles of biochar derived from iron-rich fermented sludge residue in anaerobic digestion[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 481: 148376.
- [17] WANG Mingwei, ZHAO Zhiqiang, ZHANG Yaobin. Magnetite-contained biochar derived from Fenton sludge modulated electron transfer of microorganisms in anaerobic digestion[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123972.
- [18] FUCHS W, DROSG B. Assessment of the state of the art of technologies for the processing of digestate residue from anaerobic digesters[J]. *Water Science and Technology*, 2013, 67(9): 1984-1993.
- [19] LIU Hongbo, WANG Xingkang, FANG Yueying, et al. Enhancing thermophilic anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste with biogas residue biochar[J]. *Renewable Energy*, 2022, 188: 465-475.
- [20] WANG Yifan, MU Lan, CHEN Chen, et al. Preparation of iron oxide-modified digestate biochar and effect on anaerobic digestion of kitchen waste[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 398: 130515.
- [21] HAO Yi, GAO Yuan, GAO Luyao, et al. Amphiphilic core-shell magnetic adsorbents for efficient removal and detection of phthalate esters[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 423: 129817.
- [22] YUAN Jinhua, XU Renkou, ZHANG Hong. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3488-3497.
- [23] HAN Junxing, BAO Hongliang, WANG Jianqiang, et al. 3D N-doped ordered mesoporous carbon supported single-atom Fe-N-C catalysts with superior performance for oxygen reduction reaction and zinc-air battery[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, 280: 119411.
- [24] LIU Maosong, WANG Lijuan, ZHANG Long, et al. *In-situ* silica xerogel assisted facile synthesis of Fe-N-C catalysts with dense Fe-N<sub>x</sub> active sites for efficient oxygen reduc-

- tion[J]. *Small*, 2022, 18(7): e2104934.
- [25] 杨紫薇, 岳正波, 鲍福星, 等. 基于沼渣的生物炭负载零价铁强化牛粪厌氧产甲烷研究 [J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 46(11): 1516-1523.  
YANG Ziwei, YUE Zhengbo, BAO Fuxing, et al. Zero-valent iron modified biochar based on biogas residue enhances anaerobic digestion of cow manure[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2023, 46(11): 1516-1523.
- [26] XU Runze, FANG Shiyu, ZHANG Le, et al. Distribution patterns of functional microbial community in anaerobic digesters under different operational circumstances: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 341: 125823.
- [27] FALSEN E, COLLINS M D, WELINDER OLSSON C, et al. *Fastidiosipila sanguinis* gen. nov., sp. nov., a new Gram-positive, coccus-shaped organism from human blood[J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2005, 55(2): 853-858.
- [28] YANG Libin, SI Buchun, ZHANG Yuanhui, et al. Continuous treatment of hydrothermal liquefaction wastewater in an anaerobic biofilm reactor: Potential role of granular activated carbon[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276: 122836.
- [29] MUMME J, SROCKE F, HEEG K, et al. Use of biochars in anaerobic digestion[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 164: 189-197.
- [30] JIN Hongyu, HE Zhangwei, REN Yongxiang, et al. Role and significance of water and acid washing on biochar for regulating methane production from waste activated sludge[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 817: 152950.
- [31] 蒋海明, 王路路, 李侠. 微生物种间直接电子传递方式耦合产甲烷研究进展 [J]. *高校化学工程学报*, 2019, 33(6): 1303-1313.  
JIANG Haiming, WANG Lulu, LI Xia. Advances in co-culture stoichiometrically producing methane *via* direct interspecies electron transfer within microbes[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2019, 33(6): 1303-1313.
- [32] CARR S A, SCHUBOTZ F, DUNBAR R B, et al. Acetoclastic *Methanosaeta* are dominant methanogens in organic-rich Antarctic marine sediments[J]. *The ISME Journal*, 2018, 12(2): 330-342.
- [33] YANG Peixian, TAN G Y A, ASLAM M, et al. Metatranscriptomic evidence for classical and RuBisCO-mediated CO<sub>2</sub> reduction to methane facilitated by direct interspecies electron transfer in a methanogenic system[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 4116.
- [34] VALENTIN M T, LUO Gang, ZHANG Shicheng, et al. Direct interspecies electron transfer mechanisms of a biochar-amended anaerobic digestion: A review[J]. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 2023, 16(1): 146.