

生物炭介导乙醇驱动碳链 延长高效产丁醇研究

王 维¹, 张艺蒙¹, 谢 艺², 陈 靖¹, 李盼禹^{1*}

(1. 四川大学化学工程学院, 四川 成都 610065; 2. 茅台学院酿酒工程学院, 贵州 仁怀 564500)

摘要:采用熔融盐辅助热解法将玉米芯转化为多孔生物炭(BC),并用于强化乙醇驱动的碳链延长产丁醇反应。研究表明,BC 显著提升丁醇合成效率,最高浓度达 72.86 mmol/L,较对照组提高 538%。BC 可调控胞外聚合物(EPS)组成与分布,促进形成生物炭-EPS-菌体三元电活性生物膜,有效介导微生物直接种间电子传递,增强体系电子传递效率。宏基因组分析显示,BC 优化了微生物群落结构与功能,利于优势功能菌富集。该生物炭可作为高效电子传递介质,强化碳链延长产丁醇,在生物能源领域具有良好应用前景。

关键词:生物炭;碳链延长;生物丁醇;胞外聚合物;电子传递

中图分类号:TQ923

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S2-0252-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.041

Research on efficient butanol production mediated by biochar in ethanol-driven carbon chain elongation

WANG Wei¹, ZHANG Yi-meng¹, XIE Yi², CHEN Jing¹, LI Pan-yu^{1*}

(1.School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2.Department of Brewing Engineering, Moutai Institute, Renhuai 564500, China)

Abstract: Corn cob was converted into porous biochar (BC) via the molten salt-assisted pyrolysis method and used to enhance the butanol production from ethanol-driven carbon chain elongation. The results showed that BC significantly improved the butanol synthesis efficiency, with the highest concentration reaching 72.86 mmol/L, which was 538% higher than that of the control group. BC could regulate the composition and distribution of extracellular polymeric substances (EPS), promoting the formation of a ternary electroactive biofilm of biochar-EPS-bacteria, effectively mediating direct interspecies electron transfer among microorganisms and enhancing the electron transfer efficiency of the system. Metagenomic analysis indicated that BC optimized the microbial community structure and function, facilitating the enrichment of dominant functional bacteria. This biochar can serve as an efficient electron transfer medium to enhance butanol production from carbon chain elongation, showing good application prospects in the field of bioenergy.

Key words: biochar; carbon chain elongation; biobutanol; extracellular polymeric substance; electron transfer

生物丁醇作为一种高能量密度的生物燃料,兼具环境友好性与燃料适配性,是传统化石燃料的理想替代物之一^[1-2],微生物厌氧发酵碳链延长(CE)反应是生产生物丁醇的重要途径^[3-4]。当乙醇、乙酸分别为电子供体与受体时,来自乙醇氧化产生的大部分乙酰辅酶 A 会进入逆 β 氧化循环,并在乙酰辅酶 A 乙酰转移酶的作用下偶联一分子乙酰辅酶 A 形成乙酰乙酰辅酶 A,随后经过一系列酶促反应生成丁酰辅酶 A。丁酰辅酶 A 可以通过丁酸分支在丁酸激酶和磷酸丁烯酰酶的催化下结合一分子乙酸生成丁酸并生成一分子新的乙酰辅酶 A,或者在乙酸辅助酶 A 转移酶与乙酸激酶的催化下产生丁酸;同时,丁酰辅酶 A 还可以在醛/醇脱氢酶与丁醇脱氢酶 A 和 B 的催化下产生丁醇^[5]。此外,丁醇还可以

通过丁酸的还原产生^[5]。然而,体系中较低的电子利用率严重制约了碳链延长反应效率,因此需要强化电子传递。

生物炭因其多孔结构、丰富的表面官能团、良好的电化学性能及生物相容性,被广泛应用于厌氧发酵体系的性能强化,还可作为微生物附着载体并介导种间电子传递^[6-7],为碳链延长产丁醇体系的优化提供了新方向。玉米芯作为农业废弃物,来源广泛、碳含量高,是制备生物炭的优质生物质原料,采用熔融盐辅助热解法可对其孔隙结构与表面特性进行定向调控,提升生物炭的功能特性。

基于此,本研究以玉米芯为原料,采用混合盐辅助高温热解法制备玉米芯基生物炭材料,系统分析其结构特征;通过构建乙醇驱动的厌氧碳链延长产

收稿日期:2026-03-19;修回日期:2026-06-22

作者简介:王维(2000-),男,硕士生,研究方向为微生物代谢和电子传递,13568455@qq.com;李盼禹(1992-),男,博士,助理研究员,研究方向为废弃资源的高效转化及碳基功能材料的开发,通讯联系人,lipanyu@scu.edu.cn。

丁醇体系,探究玉米芯基生物炭对碳链延长反应的影响;并从胞外聚合物(EPS)变化、种间电子传递机制、微生物群落结构演替等方面,揭示该生物炭介导强化乙醇驱动碳链延长反应产丁醇的内在机理,为农业废弃物基生物炭在生物丁醇制备中的应用提供理论依据与技术支持,同时实现农业废弃物的高值化利用与生物燃料生产的协同发展。

1 材料与方法

1.1 菌种与原料来源

本实验所用菌种取自成都市双流区某污水处理厂厌氧池的泥水混合物,所用玉米芯收集自成都市双流区某农户。本实验用到的所有试剂均为分析纯,其中主要试剂氯化钠、氯化钾、无水乙醇、无水乙酸钠等均购自成都市科隆化学品有限公司,2-溴乙基磺酸钠(BES)购自上海阿拉丁试剂有限公司。

1.2 玉米芯基生物炭材料的制备

首先将氯化钠与氯化钾按 1:1 的摩尔比充分研磨均匀得到混合盐,接着再将玉米芯粉与混合盐按 1:6 的质量比进一步研磨得到热解前驱体,随后在马弗炉中以 10℃/min 的升温速率升温至 800℃ 下热解 120 min,制得生物炭(BC),随后分别使用 1 mol/L 的稀盐酸溶液与去离子水洗涤数次,最后于 60℃ 下真空干燥 48 h。

1.3 实验方法

首先在厌氧工作箱中将泥水混合物按体积分数 10% 的比例接种至以乙醇为电子供体,乙酸为电子受体的合成培养基中,同时添加 1 g/L 的 BES 抑制甲烷合成,在 37℃ 下静置培养 7 d,用于后续碳链延长实验。使用 120 mL 血清瓶作为反应器,加入 80 mL 灭菌的培养基(顶空体积为 40 mL),1 g/L BC 作为实验组,而不加 BC 的反应器作为对照组。按体积比 10% 的比例向反应器内接种富集得到的污泥菌种(离心后接种)。最后置于 37℃ 生化培养箱中静置培养 18 d,每组实验重复 3 次,每两天取样监测气压、pH 与组分变化。发酵实验采用合成培养基,具体成分如下:每 1 000 mL 包含 0.3 g KH_2PO_4 、0.2 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.2 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、2.0 g NH_4Cl 、0.3 g K_2HPO_4 、2.0 g Na_2CO_3 、1.0 g BES、1.0 g 酵母浸出粉(Yeast extract)、30 mmol CH_3COONa 、150 mmol $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 、5.0 mL 微量金属储备液、1.0 mL 维生素储备液、1.0 g CaCO_3 。微量金属储备液:每 1 000 mL 储备液中包含 1.5 g 氨三乙酸、1.0 g NaCl 、0.071 5 g $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.152 4 g $\text{CoCl}_2 \cdot$

$6\text{H}_2\text{O}$ 、2.48 g $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、0.1 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、0.585 4 g $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.085 3 g $\text{ZnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.005 4 g CuCl_2 、0.010 3 g AlCl_3 、0.01 g H_3BO_3 、0.01 g $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、0.03 g $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、0.003 g $\text{Na}_2\text{SeO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 。维生素储备液:每 1 000 mL 储备液包含 100 mg 维生素 B12、80 mg 对氨基苯甲酸、20 mg 烟酸、100 mg 泛酸钙、300 mg 盐酸吡喃、200 mg 硫胺素,配制好后置于 4℃ 冰箱中冷藏备用。

1.4 分析方法

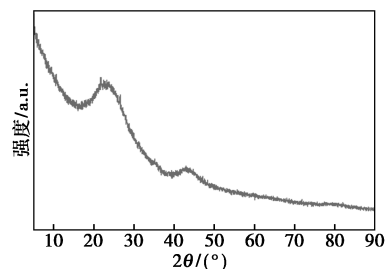
采用 X 射线衍射仪(XRD, Empyrean, Holland)对材料物相结构进行分析;采用激光共聚焦拉曼光谱仪(Raman, LabRAM soleil, Japan)表征 BC 的缺陷与石墨化程度;采用扫描电子显微镜(SEM, Apreo S, USA)分析 BC 在反应前后的微观结构与形貌,并通过能谱分析系统(EDS, Aztec X-Max80, UK)获取材料的微区元素分布信息。通过 X 射线光电子能谱仪(XPS, AXIS Supra, Japan)分析 BC 表面 C、N、O 元素的化学状态。采用傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR, Spectrum Two, L1600300, China)分析材料的表面官能团。采用全自动物理吸附仪(Micromeritics ASAP 2460, USA)分析材料的比表面积和孔径分布通过四探针电导率仪(RTS-9, China)测定材料的电导率。采用电化学工作站(CHI 660E, Chenhua, China)对发酵系统的循环伏安曲线(CV)进行测定。利用微生物细胞色素 C(Cyt-C)ELISA 试剂盒(上海抚生实业有限公司)对各体系发酵液的 Cyt-C 浓度进行测定;采用热提取法提取发酵液中的胞外聚合物(EPS);采用 BCA 法蛋白质浓度测定试剂盒(上海生工生物工程股份有限公司)对 EPS 的蛋白浓度进行测定。通过气相色谱仪(GC9720Plus, Fuli, China)分析小分子酸和醇。在发酵结束后,收集样本于 -40℃ 条件下保存,随后交由广东美格基因科技有限公司进行宏基因组测序,分析微生物群落结构和功能。

2 结果与讨论

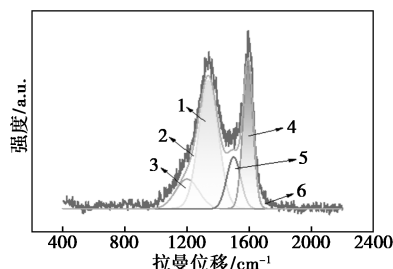
2.1 BC 的结构表征

图 1(a)为 BC 的 XRD 谱图。在 2θ 约为 23° 处存在一个宽衍射峰,对应碳的(002)晶面,43° 附近为碳(100)晶面特征峰,表明 BC 以短程有序的类石墨微晶结构为主,长程呈无序状态。拉曼光谱[图 1(b)]经分峰拟合得到 D_4 、 D_1 、 D_3 、G 4 个子峰。BC 的 I_{D1}/I_G 强度比值约为 1.7,说明材料缺陷密度高、边缘碳原子丰富。结合 XRD 结果可知,熔融盐在高

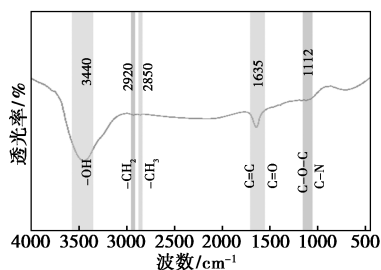
温下的化学活化作用对碳层产生了持续的蚀刻效应,在形成丰富孔隙的同时,也导致了大量边缘缺陷和空位的生成。这种“部分石墨化-高缺陷密度”的结构特征有利于提供丰富的活性位点,有利于微生物的附着。



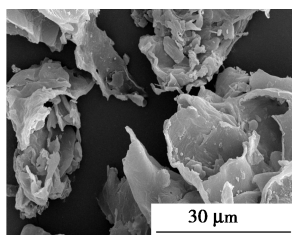
(a) BC 的 XRD 谱图

1—D₁; 2—拟合曲线; 3—D₂; 4—G; 5—D₃; 6—原始数据

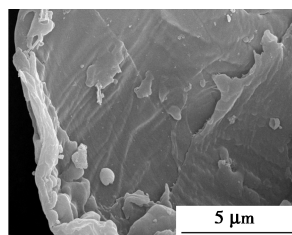
(b) BC 的拉曼谱图



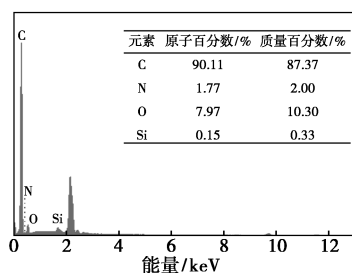
(c) BC 的红外谱图



(d) BC 的 SEM 图



(e) BC 的 SEM 图

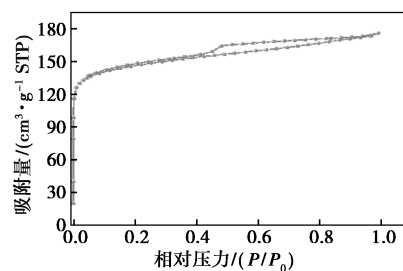
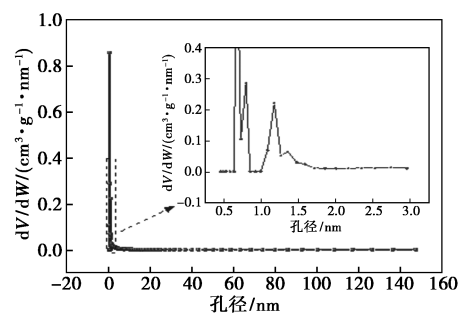


(f) BC 的 EDS 谱图

图 1 BC 的 XRD、Raman、FT-IR、SEM 与 EDS 谱图

通过 FT-IR 分析 BC 的表面官能团,结果如图 1(c) 所示。在 3440 cm^{-1} 处出现明显的 C—OH 伸缩振动,在 1635 cm^{-1} 处出现的 C=C、C=O 键的伸缩振动表明了 BC 中存在芳香结构和醌式结构,而这些基团都与电子转移有关^[8]。在 1112 cm^{-1} 处出现的强吸收峰,归属于 C—O—C 的伸缩振动。BC 主要呈现出不规则的块状结构,表面粗糙,颗粒尺寸分布较宽,且具有明显的层状剥离特征,大量不规则空洞及裂缝说明其与具备丰富的孔隙结构,存在明显褶皱与弯曲变形,有利于微生物的附着[图 1(d)、(e)]。EDS[图 1(f)]结果显示 BC 中 C 与 O 的百分含量分别为 90.11% 与 7.97%。

图 2(a) 所示的 N₂ 吸附-脱附等温线呈现 I 型与 IV 型混合特征,计算得到比表面积约为 $455.9\text{ m}^2/\text{g}$,总孔容为 $0.22\text{ cm}^3/\text{g}$ 。孔径分布[图 2(b)]显示,BC 具有典型的分级孔结构,其中微孔对孔容贡献更显著。

(a) N₂ 吸附-脱附等温线

(b) 孔径分布

图 2 BC 的等温吸附线和与孔径分布

如图 3(a) 所示,XPS 全谱扫描结果显示 BC 的组成元素主要为 C、N、O。其中,C 1s[图 3(b)]可分为 5 个峰,分别对应石墨 C—C、C—N、C—O、C=O 及 π - π 键,不仅印证了材料的石墨微晶结构,还证实了 BC 中存在共轭芳香体系。O 1s[图 3(c)]被分解为 4 个峰,分别对应 C=O、C—OH、C—O—以及 O=C—OH,含氧官能团可以增强表面亲水性,促进菌体的吸附。XPS N 1s 谱[图 3(d)]中吡啶氮(399.2 eV)和石墨氮(401.3 eV)的存在,表明 C—N 键以芳香杂环形式存在于碳骨架中。

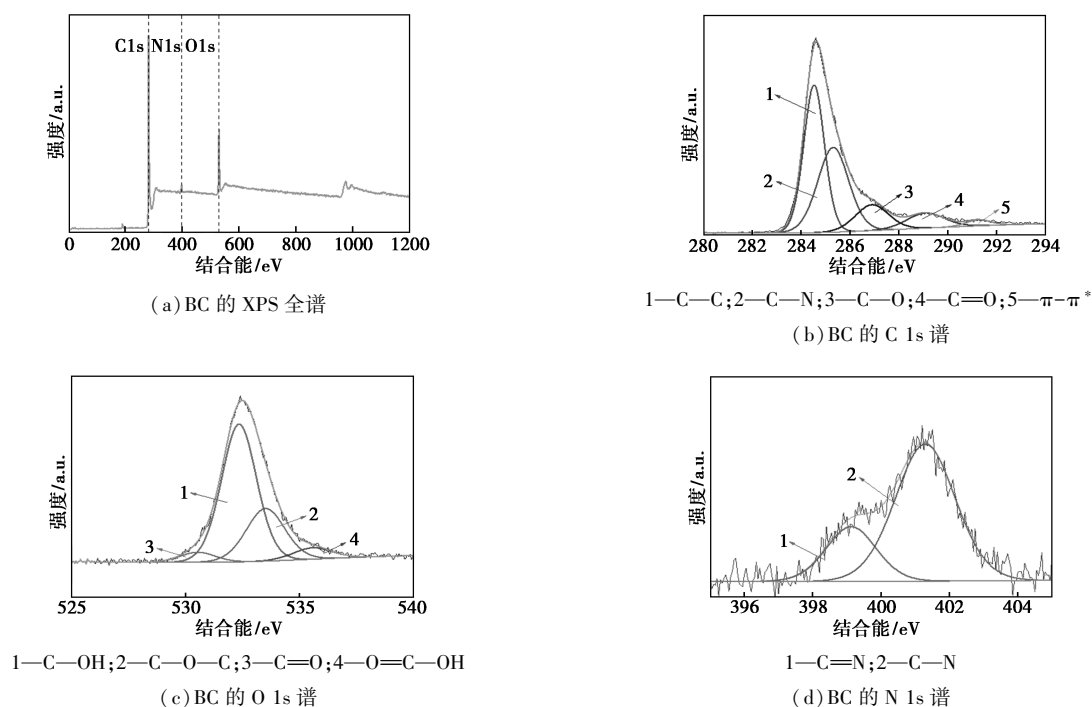


图3 生物炭的X射线光电子能谱图

四探针测试结果显示, BC 的电导率为 9.32 mS/cm, 高于之前的相关报道[9-10], 较高的电导率可以强化微生物的电子转移能力^[10]。

2.2 BC 对碳链延长产丁醇效率的影响

发酵过程中, 乙醇和乙酸在前 4 天被快速利用[图 4(a)、(d)], 实验组与对照组的乙醇利用率分别达到了 92% 与 85.3%, 乙酸利用率均超过 80%。

同时, 丁酸[图 4(e)]快速积累, 表明碳链生物延长反应活性较高。为了避免因电子供体乙醇不足而滞后发酵进程第 4 天结束时向各反应器中补加了乙醇。在第 4~8 天内乙醇和乙酸浓度均在小范围内波动推测此时系统正处于高乙醇环境的适应阶段^[11]。从第 8 天起, 乙醇开始被消耗, 乙酸开始积累, 且实验组的乙醇消耗量与乙酸积累量明显高于

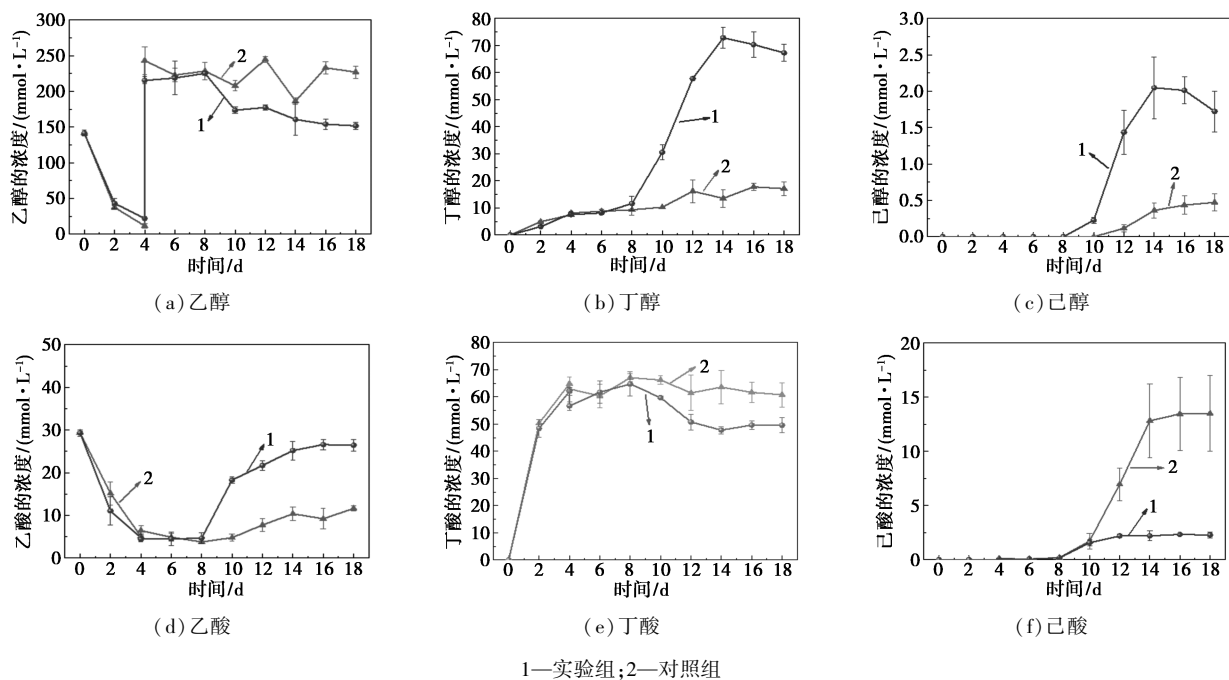


图4 反应体系底物与主要产物的浓度变化曲线

对照组,说明 BC 促进了乙醇驱动的代谢过程。第 8 天之前,实验组与对照组的丁酸和丁醇的产量与生成速率几乎一致[图 4(b)、(e)];但在第 8 天后,实验组的丁酸浓度快速下降,而丁醇浓度急剧上升,在第 14 天达到了 72.86 mmol/L,比对照组提高了 538%。与此同时,实验组的己醇生成量明显高于对照组[图 4(c)],而己酸浓度则远低于后者[图 4(f)],说明 BC 具有特异性强化碳链延长产醇的功能。

2.3 BC 对种间电子传递的影响

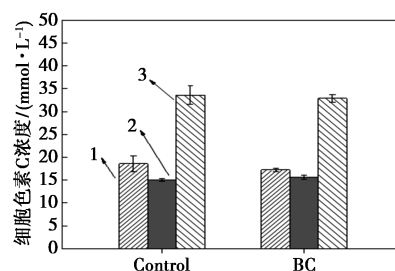
EPS 是决定生物膜物理化学性质的基本组成部分,有助于生物膜的形成与防护^[12],其主要成分是多糖和蛋白质,根据物理状态差异被分为可溶性聚合物(S-EPS)与结合性聚合物(B-EPS),结合性聚合物又可分为松散结合性聚合物(L-EPS)与紧密结合性聚合物(T-EPS)^[13-14]。EPS 不仅形成有助于细胞附着的结构基质,还能通过其氧化还原活性官能团参与电子转移^[15]。如表 1 所示,BC 的引入会增加体系内可溶性碳水化合物的释放,而可溶性蛋白质的释放量则与对照组相当。实验组 S-EPS、T-EPS 浓度相较于对照组分别提升了 37.2%与 270.6%,而 L-EPS 则相对下降 29.8%,说明 BC 对可溶性多糖的影响主要体现在 T-EPS 方面。对于胞外蛋白而言,实验组与对照组的差异体现在 L-EPS 与 T-EPS 上:实验组中 T-EPS 胞外蛋白含量为 42.61 mg/L,相较于对照组提升了 16.3%,而 L-EPS 的含量则降低了 11.1%,且二者升高与降低的绝对量几乎相等,说明 BC 减缓了 T-EPS 中蛋白质的降解,以往的研究有类似的现象^[16],而较高浓度的 T-EPS 更有利于实现微生物进行胞外电子传递^[17]。

表 1 EPS 中可溶性多糖与可溶性蛋白含量对照表

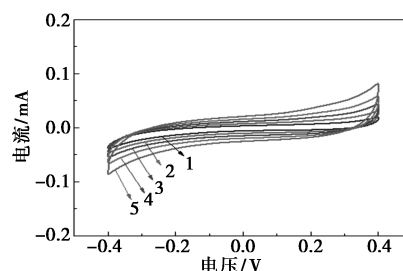
	碳水化合物/(mg·L ⁻¹)			蛋白质/(mg·L ⁻¹)		
	S-EPS	L-EPS	T-EPS	S-EPS	L-EPS	T-EPS
对照组	3.92±0.44	1.24±0.07	0.51±0.22	132.51±9.99	48.06±3.58	36.64±2.39
实验组	5.38±0.29	0.87±0.15	1.89±0.15	133.84±20.79	42.71±0.34	42.61±3.65

为了进一步讨论 BC 对微生物种间电子传递的影响机制,分别对发酵体系 Cyt-C 含量和氧化还原特性进行了分析。Cyt-C 是存在于细胞膜及细胞周质中的一种氧化还原介质,可以促进微生物进行胞外电子传递^[18-19]。如图 5(a)所示,添加 BC 并未对 Cyt-C 总含量产生显著影响,故本体系中 BC 强化电

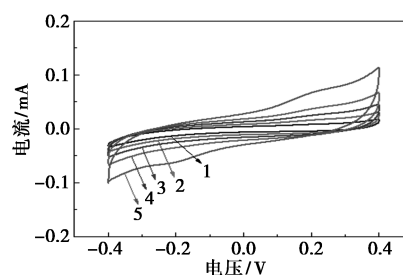
子传递的原因可能并不是促进微生物本身分泌 Cyt-C,而是微生物细胞附着在 BC 表面从而促进直接种间电子传递^[10,20]。对发酵系统进行电化学分析,结果显示:与对照组[图 5(b)]不同,实验组[图 5(c)]的 CV 曲线则出现了一对氧化还原峰,且电流响应值更大,说明 BC 提升了体系的氧化还原能力,具有更强的电子传递能力。



1—胞内 Cyt-C 浓度;2—胞外 Cyt-C 浓度;3—Cyt-C 总浓度
(a) 发酵系统中的 Cyt-C 浓度



1—20 mV/s;2—40 mV/s;3—60 mV/s;4—80 mV/s;5—100 mV/s
(b) Control 组



1—20 mV/s;2—40 mV/s;3—60 mV/s;4—80 mV/s;5—100 mV/s
(c) BC 组

图 5 系统的 Cyt-C 浓度与 CV 曲线

通过 SEM 对反应后的 BC 的表面形貌进行观察,结果表明 BC 在反应后仍保留了完整的骨架结构[图 6(a)],证明了 BC 具有良好的机械稳定与化学惰性;但表面变得更加粗糙与不规则,孔隙结构部分被填充,大量絮状物覆盖在生物炭表面,这是微生物在 BC 上定殖、代谢的直接证据。同时观察到微生物被包埋在褶皱层中[图 6(b)],表明褶皱处可能是微生物的优先结合位点。边缘处的丝状物质则代表着胞外聚合物(EPS)的痕迹,生物炭-EPS-菌体三元界面的出现意味着电活性生物膜结构的形

成,有利于促进微生物进行直接种间电子传递。

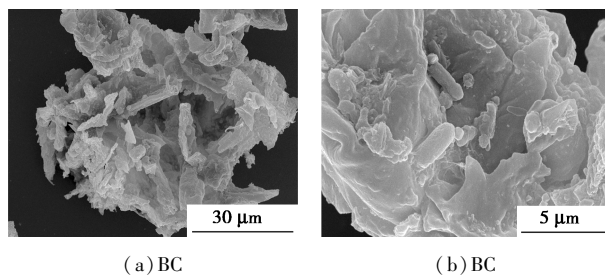
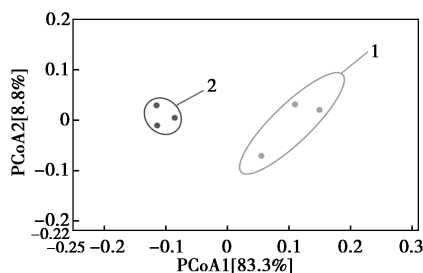


图 6 反应后 BC 的 SEM 图片

2.4 BC 对微生物群落结构和功能的影响

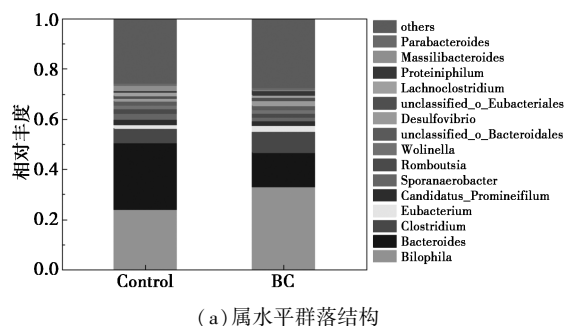
采用主坐标分析 (PCoA) 来评估微生物群落的差异和相似性。结果显示 2 组微生物群落结构存在显著差异 (图 7), BC 改变了系统中微生物的群落结构和功能。



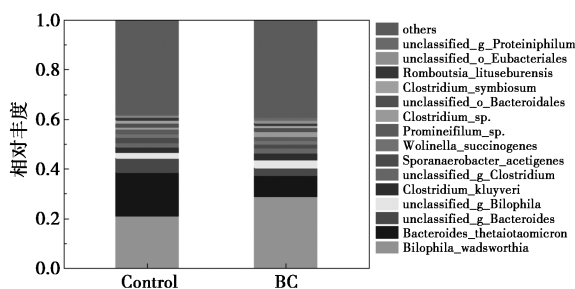
1—实验组;2—对照组

图 7 基于 Bray-Curtis 距离的主坐标分析 (PCoA) 图

如图 8 所示,两组样品的核心优势菌属均为 *Bilophila* 属与 *Bacteroides* 属,且前 4 的菌属总相对



(a) 属水平群落结构



(b) 种水平群落结构

图 8 微生物属水平与种水平的群落结构

丰度均达到了 57% 以上,其中 *Bilophila_wadsworthia* 为最具代表性的优势菌种且 BC 可以进一步促进该类菌的富集。

Bilophila_wadsworthia 是一种革兰氏阴性亚硫酸盐还原菌^[21-22],尽管它被报道可以利用牛磺酸、氢气、乳酸、丙酮酸等多种电子供体进行代谢活动^[23-24],但本研究结果表明其在碳链延长体系中扮演了关键的乙醇氧化驱动者角色。有研究^[25]证实该菌可以利用乙醇为电子供体进行生命代谢活动,将乙醇氧化为乙酸并释放还原力。BC 促进了乙醇消耗和丁醇合成的结果,推断 *Bilophila_wadsworthia* 通过与 BC 协同,将乙醇氧化产生的电子定向调控至还原型产物,最终强化了丁醇的生成。同时, *Bilophila_wadsworthia* 的硫代谢功能可能维持了体系氧化还原平衡,为碳链延长反应提供了稳定环境。实验结果还显示 BC 上调了 *Clostridium* 菌属的相对丰度,这也与之前的研究相吻合^[26]。此外, BC 下调了 *Bacteroides* 菌属的相对丰度,其中优势菌株 *Bacteroides_thetaiotaomicron* 的相对丰度显著减少,有研究提到该菌株可以降解多糖类物质^[27],这可能是对照组中胞外多糖的含量低于实验组的重要原因。

3 结论

本研究以玉米芯为生物质原料,采用熔融盐法制备功能性多孔生物炭,探究了该生物炭介导强化乙醇驱动碳链延长反应产丁醇的效果及内在机理。

(1) 生物炭的添加显著提升了乙醇驱动碳链延长产丁醇的效率。发酵第 14 天实验组丁醇浓度达 72.86 mmol/L,较对照组提升 538%。

(2) 生物炭通过提升 EPS 中碳水化合物含量与促进微生物分泌 T-EPS,同时延缓其降解为 S-EPS,实现对 EPS 的组成与分布的显著调控。高浓度 T-EPS 为胞外电子传递提供了结构基质与氧化还原活性介质,构建了有利于电子传递的 EPS 微环境。

(3) 生物炭通过形成生物炭-EPS-菌体三元电活性生物膜结构,提升体系的氧化还原能力与胞外电子传递速率介导强化碳链延长产丁醇反应。

(4) 生物炭通过促进 *Bacteroides* 菌属向 *Bilophila* 菌属、*Clostridium* 菌属的演变,调控反应体系的微生物群落功能。

参考文献

- [1] No S Y. Application of biobutanol in advanced CI engines-A review

- [J].Fuel,2016,183:641-658.
- [2] Pugazhendhi A, Mathimani T, Varjani S, *et al.* Biobutanol as a promising liquid fuel for the future-recent updates and perspectives [J].Fuel,2019,253:637-646.
- [3] Sheng Y C, Wu J W, Zhao L, *et al.* Optimization of culture conditions for enhanced butanol production by a high butanol tolerant *Clostridium beijerinckii* F-6[J].Energy Procedia,2019,158:471-476.
- [4] Li X, Shi Z P, Li Z G. Increasing butanol/acetone ratio and solvent productivity in ABE fermentation by consecutively feeding butyrate to weaken metabolic strength of butyrate loop [J].Bioprocess and Biosystems Engineering,2014,37(8):1609-1616.
- [5] Dürre P. Butanol formation from gaseous substrates [J].FEMS Microbiology Letters,2016,363(6):fnw070.
- [6] Liu Y H, He P J, Shao L M, *et al.* Significant enhancement by biochar of caproate production via chain elongation [J].Water Research,2017,119:150-159.
- [7] Ghysels S, Buffel S, Rabaey K, *et al.* Biochar and activated carbon enhance ethanol conversion and selectivity to caproic acid by *Clostridium kluyveri* [J].Bioresource Technology,2021,319:124236.
- [8] Van der Zee F P, Bisschops I A E, Lettinga G, *et al.* Activated activated carbon as an electron acceptor and redox mediator during the anaerobic biotransformation of azo dyes [J].Environmental Science & Technology,2003,37(2):402-408.
- [9] Wu Y, Zhu Z Z, Sun P L, *et al.* Enhanced short-chain fatty acids production from food waste with magnetic biochar via anaerobic fermentation: Linking interfacial, extracellular, and intracellular electron transfer [J].Chemical Engineering Journal,2024,488:150853.
- [10] Chen S S, Rotaru A E, Shrestha P M, *et al.* Promoting interspecies electron transfer with biochar [J].Scientific Reports,2014,4(1):5019.
- [11] Battista F, Zeni A, Andreolli M, *et al.* Treatment of food processing wastes for the production of medium chain fatty acids via chain elongation [J].Environmental Technology & Innovation,2024,33:103453.
- [12] Flemming H C, Wingender J, Szewzyk U, *et al.* Biofilms: An emergent form of bacterial life [J].Nature Reviews Microbiology,2016,14(9):563-575.
- [13] Wang B B, Chang Q, Peng D C, *et al.* A new classification paradigm of extracellular polymeric substances (EPS) in activated sludge: Separation and characterization of exopolymers between floc level and microcolony level [J].Water Research,2014,64:53-60.
- [14] Liu X R, Xu Q X, Wang D B, *et al.* Revealing the underlying mechanisms of how initial pH affects waste activated sludge solubilization and dewaterability in freezing and thawing process [J].ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2018,6(11):15822-15831.
- [15] Li W L, Lu Y, Ho J C S, *et al.* Surface-layer protein is a public-good matrix exopolymer for microbial community organisation in environmental anammox biofilms [J].The ISME Journal,2023,17(6):803-812.
- [16] Liu H Y, Xu Y, Li L, *et al.* A novel green composite conductive material enhancing anaerobic digestion of waste activated sludge via improving electron transfer and metabolic activity [J].Water Research,2022,220:118687.
- [17] Yang Z, Sun T R, Kappler A, *et al.* Biochar facilitates ferrihydrite reduction by *Shewanella oneidensis* MR-1 through stimulating the secretion of extracellular polymeric substances [J].Science of the Total Environment,2022,848:157560.
- [18] Wan R, Chen Y G, Zheng X, *et al.* Effect of CO₂ on microbial denitrification via inhibiting electron transport and consumption [J].Environmental Science & Technology,2016,50(18):9915-9922.
- [19] Liu T, Yan Z Y, Wu L J, *et al.* Enhancing anaerobic treatment of crotonaldehyde manufacture wastewater through anaerobic granular sludge supplemented with activated carbon: Performance, microbial activity and microbial metabolic function [J].Process Safety and Environmental Protection,2025,204:108052.
- [20] Rotaru A E, Shrestha P M, Liu F H, *et al.* Direct interspecies electron transfer between *Geobacter metallireducens* and *Methanosarcina barkeri* [J].Applied and Environmental Microbiology,2014,80(15):4599-4605.
- [21] Bernard D, Verschraegen G, Claeys G, *et al.* *Bilophila wadsworthia* bacteremia in a patient with gangrenous appendicitis [J].Clinical Infectious Diseases,1994,18(6):1023-1024.
- [22] Kasten M J, Rosenblatt J E, Gustafson D R. *Bilophila wadsworthia* bacteremia in two patients with hepatic abscesses [J].Journal of Clinical Microbiology,1992,30(9):2502-2503.
- [23] Laue H, Denger K, Cook A M. Taurine reduction in anaerobic respiration of *Bilophila wadsworthia* RZATAU [J].Applied and Environmental Microbiology,1997,63(5):2016-2021.
- [24] da Silva S M, Venceslau S S, Fernandes C L V, *et al.* Hydrogen as an energy source for the human pathogen *Bilophila wadsworthia* [J].Antonie van Leeuwenhoek,2008,93(4):381-390.
- [25] Sayavedra L, Yasir M, Goldson A, *et al.* Bacterial microcompartments and energy metabolism drive gut colonization by *Bilophila wadsworthia* [J].Nature Communications,2025,16(1):5049.
- [26] Luo C H, Lü F, Shao L M, *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.
- [27] Ndeh D, Rogowski A, Cartmell A, *et al.* Complex pectin metabolism by gut bacteria reveals novel catalytic functions [J].Nature,2017,544(7648):65-70. ■