

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

基于高通量测序解析碳化温度对麻秆电极微生物群落影响

吴义诚^{1,2}, 贺光华³, 郑越², 陈水亮^{2,3}, 王泽杰⁴, 赵峰^{2*}

(1. 厦门理工学院环境科学与工程学院, 厦门 361024; 2. 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021; 3. 江西师范大学化学学院, 南昌 330022; 4. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 青岛 266101)

摘要: 采用 Solixa 高通量测序技术比较了 1 000℃ 和 1 800℃ 碳化麻秆制备电极 OCP-1000 和 OCP-1800 在生物电化学系统运行过程中形成的生物膜微生物群落结构差异。测序分别获得 OCP-1000 和 OCP-1800 附着生物膜 16S rRNA 基因 V3 区优化序列 4 231 和 5 263 条, 经过 97% 相似度归并后获得 OTUs 数量分别为 1 187 和 1 338 个。α 多样性指数 (Chao、Shannon 指数) 分析表明碳化温度越低, 电极生物膜微生物多样性越丰富。电极 OCP-1000 和 OCP-1800 生物膜中优势菌群均为 Proteobacteria、Firmicutes 和 Bacteroidetes, 这 3 个门的细菌在 OCP-1000 生物膜含量分别为 66%、10% 和 9%, 但在电极 OCP-1800 生物膜中含量分别为 71%、7% 和 9%。不同碳化温度制备的麻秆电极在生物电化学系统运行过程形成的生物膜不仅存在共有细菌种类, 也含有独特菌种, 说明电极制备过程碳化温度影响电极生物膜微生物群落结构。

关键词: 麻秆; 碳化温度; 生物电化学系统; 微生物群落结构; 高通量测序

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2271-05 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.06.034

Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology

WU Yi-cheng^{1,2}, HE Guang-hua³, ZHENG Yue², CHEN Shui-liang^{2,3}, WANG Ze-jie⁴, ZHAO Feng^{2*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China; 2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 3. Department of Chemistry and Chemical Engineering, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China; 4. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China)

Abstract: Microbial diversity of anodic biofilm in bioelectrochemical systems with hemp rod carbonized at 1 000 and 1 800℃ as anode was investigated using Solexa high-throughput sequencing technology. The results showed that a total of 4 231 and 5 263 optimized 16S rRNA gene sequences were gained from the electrode biofilm on the hemp rod carbonized at 1 000 and 1 800℃, respectively. At the level of 97% similarity, 1 187 and 1 338 OTUs were obtained for electrode biofilm carbonized at 1 000 and 1 800℃, respectively. The result of α diversity analysis showed that microbial diversity increased with decreasing carbonization temperature. Dominant phylum for both biofilms were Proteobacteria, Firmicutes and Bacteroidetes, which accounted for 66%, 10% and 9%, respectively for 1 000℃, while 71%, 7% and 9%, respectively for 1 800℃. Beside the coexisting phylum, some unique species were also discovered, demonstrating that carbonization temperature did not only influence the electrode structure, but also affected the microbial community structure.

Key words: hemp rod; carbonization temperature; bioelectrochemical system; microbial community structure; high-throughput sequencing

生物电化学系统 (bioelectrochemical systems, BESs) 是一类利用微生物在电极表面促进反应物进行氧化还原反应的装置, 是微生物、反应物、电极互相作用的体系, 能实现污染物的资源化, 在能源与环境领域具有广阔的应用前景^[1,2]。电极材料直接影响 BESs 的性能和造价, 石墨棒、石墨板、碳毡、碳纸、碳布等传统的碳基材料具有稳定性强、导电率高的特点, 但是过高的成本限制了其在 BESs 领域的规模化应用和推广。

麻秆是一种常见的农作物, 其高温碳化制备的

多孔碳材料具有成本低、导电性好、可持续性和环境友好等特点^[3]。碳化温度影响基于植物制备的多孔碳材料的理化性能以及元素组成。Chen 等^[4]研究表明纤维素纸盒 800℃ 碳化制备的电极元素组成包括 C、O、Na、Mg、Al、Si、S、Ca 等, 但碳化温度

收稿日期: 2015-12-06; 修订日期: 2016-01-19

基金项目: 福建省中青年教师教育科研项目 (JA15372); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51208490)

作者简介: 吴义诚 (1984 ~), 男, 博士, 主要研究方向为研究方向为水污染治理, E-mail: ycwu@xmut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: fzhao@iue.ac.cn

升高到1 800℃,其主要元素仅为C、O、Al、Si、Ca等,且随着温度的升高,获得的碳化材料石墨化程度也越高. 张文标等^[5]发现碳化温度影响竹炭的比表面积,碳化温度为600~800℃时,随着温度升高,竹炭比表面积逐渐增大,但碳化温度升高至1 000℃,竹炭的比表面积却迅速减少. 江兰兰等^[6]采用金属-有机骨架结构制备多孔碳材料时发现随着碳化温度升高,多孔碳材料的比表面积先增大后减小,而孔容则不断增大. 电极材料结构差异在一定程度上影响 BESs 中营养物质的传递,进而影响微生物在电极表面的生长. Chen 等^[7]研究表明 BESs 领域应用碳化植物制备的电极之所以能够获得较大电流密度,在一定程度上取决于电极表面微生物种类,而不仅仅与电极材料物理性状有关.

电极作为电化学活性微生物生长和电子转移场所,电极的材料结构能够直接影响产电微生物的富集进而影响 BESs 的性能^[8]. 产电微生物是 BESs 的核心,也是其功能实现的关键,比较不同碳化温度制备的麻秆生物电极在 BESs 运行过程中电极生物膜微生物群落结构差异,有助于加深碳化温度对基于麻秆制备的电极电化学性能影响机制认识. 高通量测序技术无需采用微生物分离培养等传统、繁琐的微生物群落分析技术,且具有较高的测序深度,可以较全面地反映样品微生物群落结构^[9]. 因此,本研究采用 Solexa 高通量测序技术分析1 000℃和1 800℃碳化麻秆制备的电极 OCP-1000 和 OCP-1800 在 BESs 运行过程形成的生物膜微生物群落结构差异,有助于全面深入地了解碳化温度对基于麻秆制备的电极电化学性能影响机制认识.

1 材料与方法

1.1 电极材料制备与表征

麻秆干燥后置于碳化炉,氮气保护下以10℃·min⁻¹的升温速率至100℃,保温30 min;以5℃·min⁻¹的速率分别升到1 000℃和1 800℃,保温1 h;自然降温至室温即制得电极材料 OPC-1000 和 OPC-1800.

电极生物膜50 mmol·L⁻¹磷酸盐缓冲溶液(pH 7.08)洗涤后,加入2.5%(体积比)戊二醛4℃固定12 h;依次用40%、60%、80%、90%和100%的乙醇脱水,每个浓度脱水10 min,室温条件下自然晾干待观察.

1.2 BESs 结构、启动及运行

实验采用的三电极体系由100 mL广口瓶制

成,以石墨板为对电极,分别以碳化麻秆 OPC-1000 和 OPC-1800 为工作电极,Ag/AgCl 电极为参比电极,广口瓶用橡胶塞密封以保证体系厌氧,对电极和工作电极用钛丝引出,与参比电极一起固定于橡胶塞.

三电极体系接种污泥采自厦门集美污水厂,接种量为6.0 g,加入人工废水^[10],电池测试系统(Maccor,美国)设置三电极体系电位为0.2 V(vs. Ag/AgCl). 输出电流降低至0.1 mA·cm⁻²时,更换人工废水,依此步骤,直到获得稳定输出平台电流即为启动成功.

1.3 Solexa 高通量测序

1.3.1 电极生物膜 DNA 提取

待电池启动后,取出工作电极,磷酸钠盐缓冲液(50 mmol·L⁻¹, pH 7.0)洗涤后采用环境样品总DNA提取试剂盒(百泰克,北京)提取生物膜基因组DNA.

1.3.2 PCR 扩增

以提取的生物膜总DNA为模板进行PCR扩增,引物为27F和533R,其中引物533R作为测序端,其5'添加标签序列^[11]. PCR扩增程序为:95℃,预变性5 min;95℃ 40 s,55℃ 30 s,72℃ 30 s,25个循环;72℃,5 min;4℃保存.

1.3.3 PCR 产物定量及微乳液 PCR

PCR产物纯化后采用QuantiFluor™-ST蓝色荧光定量系统(Promega)定量后,按比例混合进行微乳液PCR,获得的PCR产物上机测序.

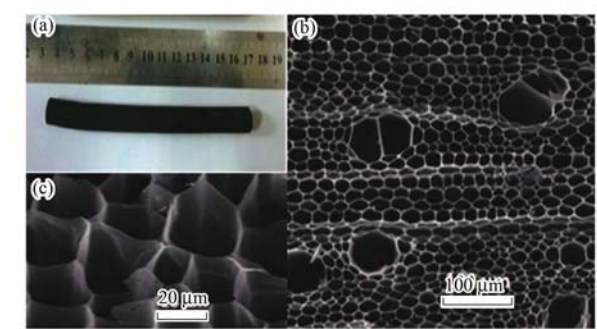
1.3.4 序列分析

使用QIIME 1.5.0软件去除包括质量低于25、模糊碱基数大于0以及长度短于200 bp的序列;将相似度在97%以上的序列划分到一个OTU,使用Shannon、Chao1等指数表征各样品群落多样性;主要OTU序列上传至GenBank数据库,登录号为KU373084-KU373116.

2 结果与讨论

2.1 麻秆碳化电极的表征

麻秆表皮去纤维高温碳化后呈黑色[如图1(a)],扫描电镜照片显示麻秆经高温碳化获得的碳材料具有多层次的大孔结构,其横截面存在不同孔径大小的孔隙,小孔直径约为25 μm,大孔直径约为60 μm,分布有序,孔隙相互之间连通,这种多孔的碳材料非常适合产电微生物的生长和附着.



(a) 碳化后的麻秆电极; (b) 电极横截面; (c) 横截面的局部放大

图1 碳化麻秆制备电极及其电镜图

Fig. 1 Scanning electron microscopy images of hemp rod through carbonation

表1 Solexa 高通量测序及多样性统计

Table 1 Solexa high-through sequencing and diversity statistics

样品	原始序列数	有效序列数	3% distance			
			OTUs	Chao 指数	Shannon 指数	Coverage 指数
OCP-1000	4 623	4 231	1 187	5 271	6. 57	0. 80
OCP-1800	5 712	5 263	1 338	5 701	7. 02	0. 83

2. 2. 2 细菌多样性评价

电极 OCP-1000 和 OCP-1800 生物膜微生物群落多样性指数如表 1 所示,从中可知,虽然本次测序 Coverage 指数没有达到理想的满库容,但测序结果能够大致描述电极生物膜菌落构成,从整体水平反映出电极 OCP-1800 和 OCP-1000 生物膜菌落结构差异. OCP-1800 电极生物膜 Chao 指数和 Shannon 指数均大于 OCP-1000 电极生物膜,说明 OCP-1800 电极生物膜菌群的丰富度和多样性较高.

2. 3 菌群分类学和群落结构分析

电极 OCP-1000 和 OCP-1800 生物膜菌群在门分类水平上统计结果如图 2 所示. 结果表明两电极生物膜菌落组成表现出了较高的多样性,在 OCP-1000 电极生物膜中,相对含量超过 1% 的门有 6 个,而在电极 OCP-1800 生物膜相对含量超过 1% 的门

2. 2 高通量测序分析细菌群落多样性

2. 2. 1 测序质量评价

采用高通量测序技术对电极 OCP-1000 和 OCP-1800 生物膜细菌 16S rRNA 基因 V3 区序列分析,结果如表 1 所示. 从中可知,电极 OCP-1000 生物膜共获得4 623条原始序列,优化序列4 231条,测序覆盖深度为 0. 80, 97% 相似度聚类分析产生 OTUs 1187 个; 电极 OCP-1800 生物膜菌群共获得原始 5712 条,优化后序列5 263条,测序覆盖深度为 0. 83, 经过 97% 相似度聚类分析产生 OTUs 1 338 个. 高通量测序获得的微生物群落信息远高于传统 DGGE 和克隆文库等分析方法^[12, 13].

有 7 个. 两电极生物膜菌落在门分类水平最明显差异在于 Proteobacteria、Firmicutes 和 Bacteroidetes 在各自群落中所占比例的不同,这 3 个门的细菌总和分别占总序列数的 85% (OCP-1000) 和 87% (OCP-1800). 其中 Proteobacteria 在各两个样品中含量最为丰富,在 OCP-1000 和 OCP-1800 电极生物膜的含量分别为 66% 和 71%. 目前绝大多数已知产电菌 (如 *Geobacter* 和 *Shewanella* 等) 和所有产电光合细菌都属于 Proteobacteria,说明 BESs 运行过程中电极对电化学活性细菌具有一定的择选性富集. Bacteroidetes 是样品中含量第二多的门,在电极 OCP-1000 生物膜中含量为 10%,在 OCP-1800 电极生物膜中含量较低(7%). Firmicutes 在 OCP-1000 和 OCP-1800 电极生物膜中含量都为 9%.

电极生物膜细菌在纲分类水平含量差异如图 3

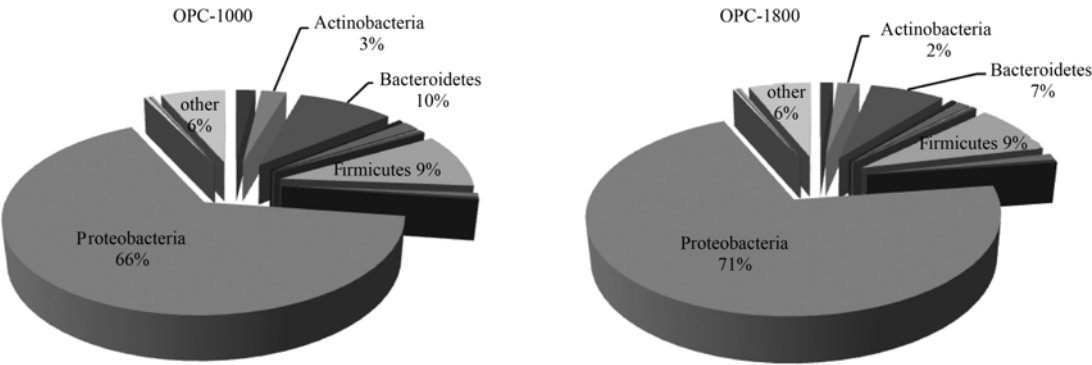


图2 电极 OCP-1000 和 OCP-1800 生物膜细菌在门分类水平组成

Fig. 2 Distribution of bacterial communities on electrodes OCP-1000 and OCP-1800 at the level of phylum

所示. 电极生物膜所含细菌主要分布于 α -、 β -、 γ -、 δ -Proteobacteria 以及 Bacteroidia 等纲. β -Proteobacteria 在 OCP-1000 电极生物膜中含量为 10.5%,略高于 OCP-1800 电极生物膜的 8.7%,目前该纲已知的电化学活性菌只有 *Comamonas denitrificans*^[14] 和 *Rhodoferrax ferrireducens*^[15]. 而 δ -Proteobacteria 在电极 OCP-1000 和 OCP-1800 生物膜中含量都非常高,分别为 49.8% 和 42.8%,已知的产电菌如 *Desulfuromonas*^[16]、*Desulfovibrio*^[17]、*Geobacter*^[18]、*Geopsychrobacter*^[19] 等都属于 δ -Proteobacteria,在 BESs 运行过程中,麻秆碳化电极可能对产电微生物具有定向富集性能.

在属分类水平上菌群结构分析如表 2 所示,两电极生物膜中含量大于 0.5% 的属共有 15 个(表 2),这些属的细菌在 OCP-1000 和 OCP-1800 电极生物膜含量分别为 38.79% 和 45.00%,两种碳化温度下制备电极其生物膜内菌群包含相似种类构成,但各个菌属的含量差异较大,如地杆菌 *Geobacter* 在 OCP-1800 电极生物膜中含量为 35.88% 远大于 OCP-1000 的 19.91%. *Geobacter* 属的很多细菌可以产电,是一类重要的产电菌,包括 *Geobacter sulfurreducens*^[20]、*Geobacter metallireducens*^[16] 等,其中 *G. sulfurreducens* 基因组测序已经完成,是目前了

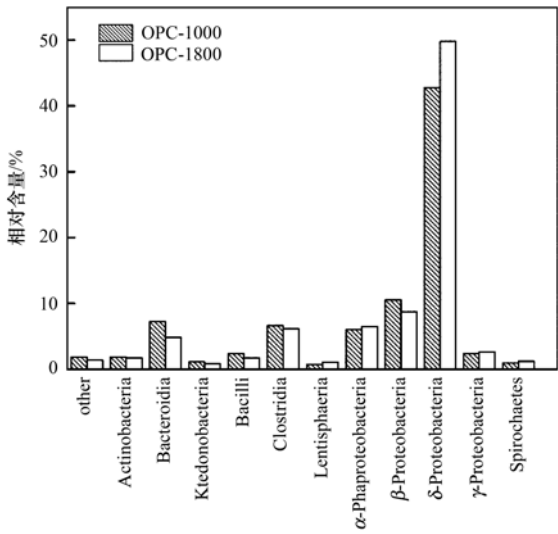


图 3 电极 OCP-1000 和 OCP-1800 生物膜细菌在纲分类水平含量

Fig. 3 Distribution of bacterial communities on electrodes OCP-1000 and OCP-1800 at the level of class

解最清楚的产电菌,在微生物燃料电池运行过程中,其库仑效率甚至能达到 99%,产电是获取能量的主要途径^[21]. 麻秆在两种温度下碳化获得的电极生物膜中产电微生物 *Geobacter* 含量的差异,可能与碳化温度的升高改变了碳化电极结构和性能,进而影响了电极对细菌的选择性富集有关.

表 2 生物膜细菌在目、科和属分类水平上菌群统计

Table 2 Distribution of bacterial communities in biofilms at the level of order, family and genus

目	科	属	相对丰度/%	
			OCP-1000	OCP-1800
Desulfuromonadales	Geobacteraceae	<i>Geobacter</i>	19.91	35.88
Sphingobacteriales	Sphingobacteriaceae	<i>Pedobacter</i>	4.97	0.7
Rhodocyclales	Rhodocyclaceae	<i>Azoarcus</i>	2.63	0.98
Burkholderiales	Comamonadaceae	<i>Acidovorax</i>	1.70	1.80
Rhodospirillales	Rhodospirillaceae	<i>Azospirillum</i>	1.68	1.18
Victivallales	Victivallaceae	<i>Victivallis</i>	1.62	0.63
Burkholderiales	Comamonadaceae	<i>Delftia</i>	1.06	0.38
Sphaerochaetales	Sphaerochaetaceae	<i>Sphaerochaeta</i>	1.04	0.45
Bacteroidales	Porphyromonadaceae	<i>Dysgonomonas</i>	2.92	4.01
Campylobacteriales	Campylobacteraceae	<i>Arcobacter</i>	0.89	0.98
Burkholderiales	Comamonadaceae	<i>Hydrogenophaga</i>	0.85	0.43
Bacillales	Bacillaceae	<i>Bacillus</i>	0.64	0.65
Rhizobiales	Rhizobiaceae	<i>Rhizobium</i>	0.60	0.15
Sphingobacteriales	Sphingobacteriaceae	<i>Sphingobacteriales</i>	1.26	1.00
Rhodospirillales	Rhodospirillaceae	<i>Magnetospirillum</i>	0.45	0.98

3 结论

(1)Chao1 和 Shannon 指数表明 OCP-1800 电极生物膜内菌群的丰度和多样性均高于 OCP-1000 电极生物膜.

(2) 麻秆不同碳化温度下制备的电极在 BESs 运行过程中形成的生物膜在细菌构成和含量方面具有一定的差异性. δ -Proteobacteria 在电极 OCP-1000 和 OCP-1800 生物膜中含量都非常高,但是 δ -Proteobacteria 中的地杆菌 *Geobacter* 在两电极生物膜

含量差别较大。

参考文献:

- [1] Logan B E, Rabaey K. Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies [J]. *Science*, 2012, **337**(6095): 686-690.
- [2] Rabaey K, Rodríguez J, Blackall L L, *et al.* Microbial ecology meets electrochemistry: electricity-driven and driving communities[J]. *The ISME Journal*, 2007, **1**(1): 9-18.
- [3] Chen S L, He G H, Hu X W, *et al.* A Three-dimensionally ordered macroporous carbon derived From a natural resource as anode for microbial bioelectrochemical systems [J]. *Chemosuschem*, 2012, **5**(6): 1059-1063.
- [4] Chen S L, He G H, Liu Q, *et al.* Layered corrugated electrode macrostructures boost microbial bioelectrocatalysis[J]. *Energy & Environmental Science*, 2012, **5**(12): 9769-9772.
- [5] 张文标, 钱新标, 马灵飞. 不同碳化温度的竹炭对重金属离子的吸附性能[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2009, **33**(6): 20-24.
- [6] 江兰兰, 王先友, 张小艳, 等. 由 MOF-5 制备的活性多孔碳及其超级电容特性[J]. *电源技术*, 2014, **38**(8): 1497-1500, 1503.
- [7] Chen S L, Liu Q, He G H, *et al.* Reticulated carbon foam derived from a sponge-like natural product as a high-performance anode in microbial fuel cells[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, **22**(35): 18609-18613.
- [8] Sun Y M, Wei J C, Liang P, *et al.* Electricity generation and microbial community changes in microbial fuel cells packed with different anodic materials [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(23): 10886-10891.
- [9] Ansorge W J. Next-generation DNA sequencing techniques[J]. *New Biotechnology*, 2009, **25**(4): 195-203.
- [10] Wang Z J, Zheng Y, Xiao Y, *et al.* Analysis of oxygen reduction and microbial community of air-diffusion biocathode in microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **144**: 74-79.
- [11] Tedersoo N, Nilsson R H, Abarenkov K, *et al.* 454 Pyrosequencing and Sanger sequencing of tropical mycorrhizal fungi provide similar results but reveal substantial methodological biases[J]. *New Phytologist*, 2010, **188**(1): 291-301.
- [12] 吴义诚, 邓欢, 肖勇, 等. DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2328-2333.
- [13] 李辉, 方正. 驯化期外电路对微生物燃料电池的影响[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, **41**(11): 32-36.
- [14] Xing D F, Cheng S A, Logan B E, *et al.* Isolation of the exoelectrogenic denitrifying bacterium *Comamonas denitrificans* based on dilution to extinction[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, **85**(5): 1575-1587.
- [15] Chaudhuri S K, Lovley D R. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells [J]. *Nature Biotechnology*, 2003, **21**(10): 1229-1232.
- [16] Bond D R, Holmes D E, Tender L M, *et al.* Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments[J]. *Science*, 2002, **295**(5554): 483-485.
- [17] Zhao F, Rahunen N, Varcoe J R, *et al.* Activated carbon cloth as anode for sulfate removal in a microbial fuel cell [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(13): 4971-4976.
- [18] Lovley D R, Giovannoni S J, White D C, *et al.* *Geobacter metallireducens* gen. nov. sp. nov., a microorganism capable of coupling the complete oxidation of organic compounds to the reduction of iron and other metals[J]. *Archives of Microbiology*, 1993, **159**(4): 336-344.
- [19] Holmes D E, Nicoll J S, Bond D R, *et al.* Potential role of a novel psychrotolerant member of the family *Geobacteraceae*, *Geopsychrobacter electrodiphilus* gen. nov., sp. nov., in electricity production by a marine sediment fuel cell[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, **70**(10): 6023-6030.
- [20] Bond D R, Lovley D R. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(3): 1548-1555.
- [21] Methé B A, Nelson K E, Eisen J A, *et al.* Genome of *Geobacter sulfurreducens*; metal reduction in subsurface environments[J]. *Science*, 2003, **302**(5652): 1967-1969.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行