

【环境与能源 / Environment and Energy】

植物耦合微生物燃料电池修复河道底泥

梁岩, 单敬福

长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

摘要: 植物型微生物燃料电池(plant microbial fuel cell, PMFC)的产电能力会影响河道底泥的修复效果, 不同植物种类对PMFC的综合性能存在显著影响, 合理选择植物是提升系统产电性能和底泥修复的关键. 采用河道底泥作为阳极底泥, 分别以野古草、菖蒲、水稻和大米草为耦合植物构建4种PMFC, 以河道污泥中生长状态最佳的菖蒲和微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)作为对照组, 通过检测输出电压、功率密度、表观内阻, 以及有机质、氨氮和全磷的去除率, 考察不同植物对PMFC产电能力和底泥修复效果的影响. 研究发现, 4种PMFC的综合性能均优于MFC组和单一植物组(菖蒲), MFC的最大输出电压和有机质去除率分别为135.14 mV和4.87%, 单一植物组(菖蒲)的有机质去除率为3.03%; 4组PMFC综合性能由好到差依次为菖蒲-PMFC、大米草-PMFC、水稻-PMFC和野古草-PMFC. 其中, 菖蒲-PMFC的产电能力最佳, 其最大输出电压、功率密度和表观内阻分别为512.50 mV、11.7 mW/m²和123.69 Ω, 对沉积物中有机质、氨氮和全磷的去除率分别达到15.91%、53.03%和12.25%. 研究结果可为河道底泥修复的研究和应用提供经验支持和数据参考.

关键词: 环境工程; 植物型微生物燃料电池; 河道底泥; 野古草; 菖蒲; 水稻; 大米草; 产电; 河道污染治理

中图分类号: X53

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2026.02155

Remediation of riverbed sediments using plant microbial fuel cells

LIANG Yan and SHAN Jingfu

School of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei Province, P. R. China

Abstract: The electricity generation capacity of plant microbial fuel cell (PMFC) plays an important role in the remediation of river sediments. Different plant species can significantly affect the overall performance of PMFC systems, and appropriate plant selection is therefore essential for improving both electricity generation and sediment remediation efficiency. In this study, riverbed sediment was used as the anodic substrate, and four PMFC systems were constructed using *Arundinella anomala*, *Acorus calamus*, *Oryza sativa*, and *Spartina anglica* as coupled plants. A conventional microbial fuel cell (MFC) and a plant-only group with *Acorus calamus*, which showed the best growth condition in the river sediment, were used as control groups. The effects of plant species on the electricity generation performance and sediment remediation efficiency of PMFCs were evaluated by measuring output voltage, power density, apparent internal resistance, and the removal rates of organic matter, ammonia nitrogen, and total phosphorus. The results showed that the overall performance of the four groups of PMFC systems was superior to that of both MFC and plant-only system. The maximum output voltage and organic matter removal rate of MFC were

Received: 2025-01-07; Accepted: 2025-06-30; Online (CNKI): 2025-12-11

Foundation: National Natural Science Foundation of China (41372125)

Corresponding author: Professor SHAN Jingfu (3872016830@qq.com)

Citation: LIANG Yan, SHAN Jingfu. Remediation of riverbed sediments using plant microbial fuel cells [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2026, 43(2): 155-161. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



<http://journal.szu.edu.cn>

135.14 mV and 4.87%, respectively, while the organic matter removal rate of the plant-only system was 3.03%. The overall performance of the four PMFC systems ranked as follows: *Acorus calamus*-PMFC > *Spartina anglica*-PMFC > *Oryza sativa*-PMFC > *Arundinella anomala*-PMFC. Among them, the *Acorus calamus*-PMFC exhibited the best electricity generation performance, with a maximum output voltage of 512.50 mV, a power density of 11.7 mW/m², and an apparent internal resistance of 123.69 Ω . The removal efficiencies of organic matter, ammonia nitrogen, and total phosphorus in the sediment reached 15.29%, 53.27%, and 12.17%, respectively. These results demonstrate that plant species significantly influence the overall performance of PMFC systems, and *Acorus calamus* is the most suitable plant for enhancing both electricity generation and sediment remediation. The research results can provide experience support and data reference for the study and application of riverbed sediment remediation.

Key words: environmental engineering; plant microbial fuel cell (PMFC); riverbed sediment; *Arundinella anomala*; *Acorus calamus*; *Oryza sativa*; *Spartina anglica*; generate electricity; river pollution control and treatment

城镇化的快速发展使部分河道成为工业、农业和生活污水排放的渠道,但是当废水中的污染物超过河道自净能力后,会通过自然沉淀和沉积逐渐形成污染底泥^[1].底泥中的污染物在水体扰动时重新悬浮,形成二次污染,甚至可能通过食物链累积,对生态系统和人类健康构成威胁.因此,河道底泥治理是水体整治工作的重要方向.

植物型微生物燃料电池(plant microbial fuel cell, PMFC)是一种新兴的生物电化学系统,它耦合了植物和微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)的电化学活性,可实现有机物的分解和能量回收.利用此技术修复河道底泥具有高效、环保、能量转换效率高和成本低等优点,是一种具有应用潜力的绿色技术.朱娟平等^[2]发现,植物可以强化沉积型微生物燃料电池(sediment microbial fuel cell, SMFC)修复河道底泥的产电过程,湿地植物-SMFC在系统运行的7个月内输出电压基本稳定在0.30~0.50 V,总磷去除率高达12.45%.从PMFC的优点和能力来看,利用PMFC无害化修复河道底泥具有可行性.目前,PMFC针对河道底泥修复的研究较少,且性能表现较差^[3],产电能力有待进一步提升.本研究以PMFC的关键影响因素——植物为单一变量,分别以野古草、菖蒲、水稻和大米草为电池植物构筑PMFC,通过检测输出电压、功率密度、表观内阻、有机质的去除效果、氨氮的去除效果和全磷的去除效果,探究4种植物对PMFC产电能力和底泥修复效果,并优选1种使PMFC综合性能最佳的植物.

1 实 验

1.1 植物与实验材料

植物:野古草(*Arundinella anomala*),禾本科

野古草属;菖蒲(*Acorus calamus*),天南星科菖蒲属;水稻(*Oryza sativa*),禾本科稻属;大米草(*Spartina anglica*),禾本科米草属.以上植株样品均先用自来水洗去根系杂质,然后用蒸馏水冲洗干净备用.

电极材料(包括阴极材料和阳极材料):碳毡,经酸处理、热处理、酸热复合处理、电化学处理及氨处理后备用^[4].

底泥:实验所用河道底泥取自近10 a形成的某黑臭河流,剔出树枝、石块及其他杂物静置12 h,待泥水分离后倒出上层液体,搅拌均匀备用.底泥的含水率(质量分数)为59.42%,有机质含量为13.15 g/kg,氨氮含量为131.50 mg/kg,全磷含量为905.50 mg/kg.

上覆水为底泥处理过程中倒出的上层液体.

产电菌:采用底泥中的土著菌作为产电菌,无另加菌种.

1.2 PMFC的构建

以20 L的塑料桶(底部直径45.00 cm)作为实验容器,下层高度9.00 cm的河道底泥为阳极区,上层高度为3.00 cm的上覆水为阴极区.阳极区下部、阴极区上部放置电极材料,阴阳两极通过导线与 $1 \times 10^3 \Omega$ 外接电阻串联,并连接数据采集器,实时采集电压.实验过程中,气温为25~35 $^{\circ}\text{C}$,平均每日光照时间为13 h.

1.3 分析方法及主要设备

1.3.1 产电能力检测

由RBH8223h型数据采集器(京瑞博华控制技术有限公司)每隔10 min自动采集和保存电压数值.当PMFC运行稳定后,采用稳态放电法检测电池的功率密度,由极化曲线直线部分线性拟合的斜率得到表观内阻.

$$P_v = \frac{U^2}{AR} \quad (1)$$

其中, P_v 为功率密度(单位: mW/m^2); U 为输出电压(单位: mV); A 为电极面积(单位: m^2); R 为外接电阻(单位: Ω).

1.3.2 底泥修复效果检测

取装置运行前、后的全部底泥混合均匀,置于室内阴凉处干燥,通过测量计算有机质^[5]、氨氮^[6]以及全磷^[7]的去除率(R_d)检测底泥修复效果,

$$R_d = \frac{w_0 - w_t}{w_0} \times 100\% \quad (2)$$

其中, w_0 为 PMFC 修复前有机质/氨氮/全磷的质量分数; w_t 为 PMFC 修复 t 时后有机质/氨氮/全磷的质量分数.

修复前后有机质、氨氮和全磷的测定方法如下:

1) 采用重铬酸钾-硫酸溶液氧化法测定有机质,将样品与重铬酸钾和硫酸混合加热,有机碳被氧化成二氧化碳,通过滴定测定氧化剂的消耗量计算有机碳的质量分数.

2) 通过氯化钾溶液提取-分光光度法测定氨氮的含量.首先采用氯化钾溶液提取水样中的氨氮,然后通过特定的化学反应使氨氮与试剂反应生成有色化合物,最后用分光光度计测定吸光度,计算氨氮的质量分数.

3) 采用碱溶-钼锑抗分光光度法测定底泥中的全磷.先用碱性溶液溶解样品,然后通过钼锑抗试剂与溶解出的磷反应生成蓝色络合物,最后通过分光光度计测定其吸光度,计算磷的质量分数.

2 结果与分析

根据 PMFC 提供的积水环境,所选择植物的根系应具备耐水淹和耐厌氧的特性.湿地沼泽植物具有此种生态适应性,适合在湿润环境中生长,这些湿生植物主要集中在禾本科、莎草科、天南星科、杨柳科、鸢尾科、杉科、蓼科和睡莲科等^[8].不同的植物生态适应性、生长速度、生物量、根系形态、光合效率、抗逆性以及经济价值均有差异,因此,筛选易获得、易繁殖、生长快、抗逆性强、经济价值高且能高效协同 MFC 产电的植物是 PMFC 研究的重点^[9].本研究选择野古草、菖蒲、水稻和大米草作为电池植物构建 4 组 PMFC,分别命名为野古草-PMFC、菖蒲-PMFC、水稻-PMFC 和大米草-

PMFC.

2.1 产电能力分析

监测 4 种 PMFC 和 MFC 共 5 组电池的输出电压,电压-时间曲线如图 1.

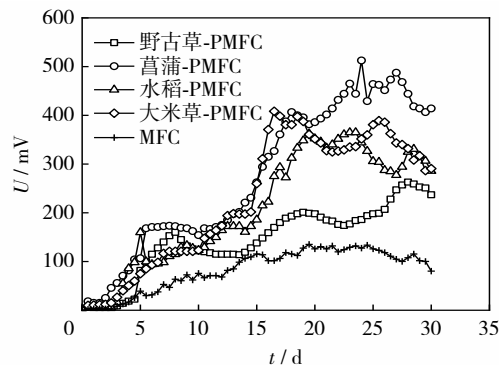


图1 四种PMFC和MFC输出电压曲线

Fig. 1 Output voltage curves for *Miscanthus sinensis*-PMFC (squares), *Acorus calamus*-PMFC (circles), *Oryza sativa*-PMFC (triangles), *Spartina anglica*-PMFC (rhombuses), and MFC (reticles).

由图 1 可知, PMFC 和 MFC 电池系统启动后, MFC 经过 4.0 d 的产电延滞期后, 输出电压开始缓慢增长, 期间最大输出电压达到 135.14 mV; PMFC 的输出电压远大于 MFC 的输出电压, 这主要是因为植物根系分泌物可以作为产电微生物的电子供体, 促进产电微生物的代谢活动, 增加电子的产生和传递, 而且植物根系分泌物为产电微生物提供营养, 产电微生物的代谢活动又可以促进植物的生长, 这种协同作用可以提高整个系统的代谢效率, 进而提高电池的输出电压^[10]. 构建的野古草-PMFC、菖蒲-PMFC、水稻-PMFC 和大米草-PMFC 的初始电压分别为 6.67、18.33、6.64 和 10.00 mV; 菖蒲-PMFC 的产电延滞期最短, 在电池运行 1.5 d 后, 输出电压明显增长. 所构建 4 组 PMFC 的输出电压在 6.0~20.0 d 均呈缓慢上升趋势; 在 20.0~25.0 d 基本保持稳定; 25.0~30.0 d 开始持续下降. 这是因为随着产电菌的繁殖, 在阳极表面形成了 1 层生物膜, 生物膜的成熟和产电菌数量的增加使电子在生物膜表面积累, 系统的输出电压升高; 当生物膜达到一定厚度和成熟度时, 产电菌的繁殖速度和代谢活动趋于稳定, 系统的输出电压保持相对稳定的水平; 随着时间的推移, 底泥中有机质含量降低, 产电菌面临营养不足, 无法维持正常的代谢活动, 产电效率下降^[11-13]. PMFC 运行期间, 最大输出电压依次为菖蒲-PMFC (512.50 mV)、大

米草-PMFC (408.33 mV)、水稻-PMFC (365.16 mV) 和野古草-PMFC (263.67 mV)。这与植物的根系结构和代谢活动有关, 其中, 菖蒲的根系最为发达, 所以菖蒲-PMFC 的产电能力最优。

为考察 5 组电池 (4 组 PMFC 和 1 组 MFC) 的产电能力及表观内阻的大小, 于产电稳定期采用稳态放电法测定其功率密度曲线 (图 2) 和极化曲线 (图 3)。由图 2 可知, 野古草-PMFC、菖蒲-PMFC、水稻-PMFC、大米草-PMFC 和 MFC 在电流分别为 0.62、2.26、0.94、2.15 和 0.31 mA 时, 功率密度分别达到各自的最大值 1.78、11.70、2.71、9.62 和 0.89 mW/m^2 。图 3 是 4 组 PMFC 和 MFC 的极化曲线, 即不同电流下的电压表现。由图 3 可知, PMFC 和 MFC 的输出电压随着电流的增大而减小。极化曲线变化趋势和功率密度曲线变化趋势一致, 表观内阻是由极化曲线线性拟合得到的。野古草-PMFC、菖蒲-PMFC、水稻-PMFC、大米草-PMFC 和 MFC 的表观内阻分别为 248.39、123.69、170.92、136.54 和 296.82 Ω 。MFC 的功率密度小于 PMFC 的, 但表观内阻大于 PMFC 的, 再次证明 PMFC 的产电性能优于 MFC 的。

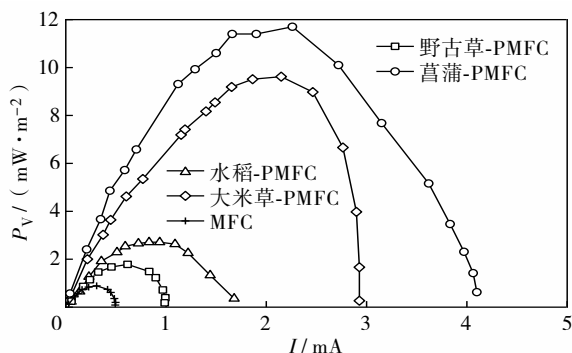


图 2 四种 PMFC 和 MFC 输出的电压曲线

Fig. 2 Power density curves for *Miscanthus sinensis*-PMFC (squares), *Acorus calamus*-PMFC (circles), *Oryza sativa*-PMFC (triangles), *Spartina anglica*-PMFC (rhombuses), and MFC (reticles).

2.2 底泥修复效果分析

为研究分析 PMFC 对河道底泥的修复效果, 取电池运行后阳极表面 1 cm 以内的底泥进行有机质、氨氮和全磷的测定分析。

2.2.1 有机质的测定分析

4 组 PMFC 和对照组的有机质质量分数及有机质去除率如图 4。由图 4 可知, 原底泥的有机质质量分数为 1.32%, 经电池处理后, 野古草-PMFC、

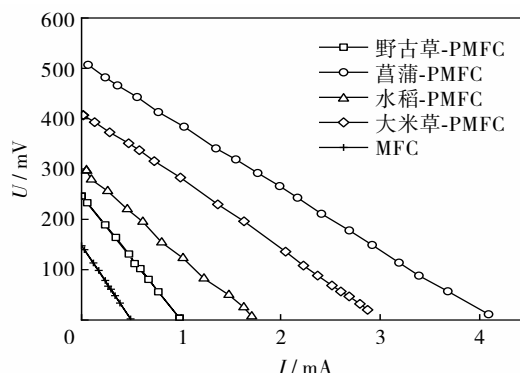


图 3 四种 PMFC 和 MFC 的极化曲线

Fig. 3 Polarization curves for *Miscanthus sinensis*-PMFC (squares), *Acorus calamus*-PMFC (circles), *Oryza sativa*-PMFC (triangles), *Spartina anglica*-PMFC (rhombuses), and MFC (reticle).

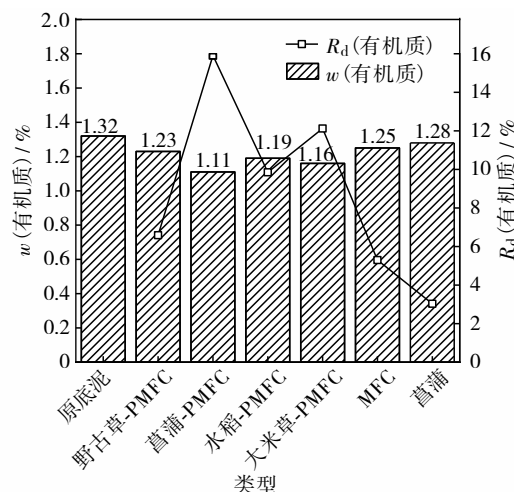


图 4 有机质含量及有机质去除率对比

Fig. 4 Comparison of organic matter content and removal rate. The column chart represents the organic matter content, and the line chart represents the organic matter removal rate.

菖蒲-PMFC、水稻-PMFC、大米草-PMFC、MFC 和单植物组 (菖蒲) 的有机质质量分数分别为 1.23%、1.11%、1.19%、1.16%、1.25% 和 1.28%, 对应有机质去除率分别为 6.59%、15.91%、9.85%、12.12%、5.30% 和 3.03%。其中, 菖蒲-PMFC 的有机质去除率最高, 大米草-PMFC 次之, 与电池产电能力分析种得到的结果一致。这是因为在 PMFC 和 MFC 的阳极表面, 产电微生物会聚集并形成 1 层生物膜, 这层生物膜降解底泥中的有机质可产生大量电子, 然后传递给阳极, 这意味着底泥中有机质的减少与电流输出的增加成正比^[14-15]。

2.2.2 氨氮的测定分析

4 组 PMFC 和对照组的氨氮含量及氨氮去除率

如图5所示. 由图5可知, 4种PMFC的氨氮去除率均高于40.00%), MFC次之(氨氮去除率为25.00%), 单一植物组(菖蒲)最差(氨氮去除率仅为9.85%). 底泥的氨氮去除方式^[16-20]主要包括: ①植物直接吸收底泥中的氨氮, 将其转化为植物生长所需的营养物质; ②由于氨氮在底泥中具有一定的溶解度和扩散能力, 可以通过底泥孔隙水向上释放到水体中, 这在一定程度上可以减少底泥中的氨氮浓度; ③在MFC和PMFC中, 氨氮可作为阳极的电子供体, 被氧化为硝酸盐氮和亚硝酸盐氮. 所以PMFC组、MFC组和植物组底泥中氨氮含量均有所降低, 其中, PMFC组的氨氮去除效果比MFC更好, 植物组仅依靠根系吸收, 去除氨氮, 效果最差. PMFC组中, 不同电池植物构筑的电池氨氮去除效果不同, 菖蒲-PMFC的氨氮去除率最高. 这是因为不同植物通过产生不同的根系分泌物种类、数量, 影响根际微生物的组成和活性, 进而影响氨氮的去除效率; 而且植物根系的形态、密度和泌氧能力等特性可以影响根际环境, 进而影响微生物的代谢活动和氨氮的去除^[17]. 此外, 不同植物对环境条件的适应性不同, 这可能会影响它们在PMFC系统中的生长状况和对氨氮去除的贡献^[21].

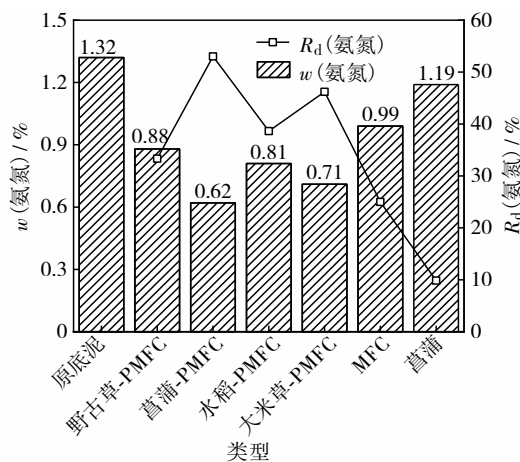


图5 氨氮质量分数及氨氮去除率对比

Fig. 5 Comparison of ammonia nitrogen content and removal rate. The columns represent the ammonia nitrogen content, and the line shows the ammonia nitrogen removal rate.

2.2.3 全磷的测定分析

4组PMFC和对照组的全磷质量分数及全磷去除率如图6. 由图6可知, PMFC在全磷去除方面同样表现优异, 原底泥的全磷质量分数为9.06%, 经过PMFC处理后, 野古草-PMFC、菖蒲-PMFC、水稻-PMFC和大米草-PMFC全磷的质量分数分别降至

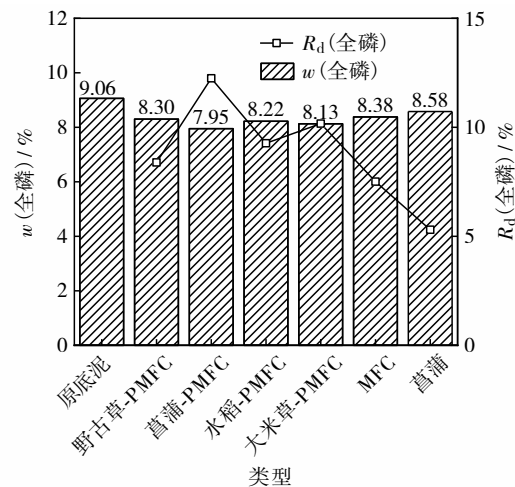


图6 全磷质量分数及全磷去除率对比

Fig. 6 Comparison of total phosphorus content and total phosphorus removal rate. The columns represent the total phosphorus content, while the line shows the total phosphorus removal rate.

8.30%、7.95%、8.22%和8.13%, 对应的全磷去除率分别为8.39%、12.25%、9.27%和10.17%. 其中, 4组PMFC的全磷去除效果均优于MFC和植物组, 其中, 菖蒲-PMFC的全磷去除率分别是MFC和单一植物组的1.63倍和2.31倍. 造成这种差异的原因可能有: ①植物可以直接吸收磷作为生长所需的营养物质, 从而减少底泥中的磷质量分数; ②植物根系分泌的有机酸和酶可以促进底泥中磷的溶解, 从而增加可利用性, 并向上覆水释放; ③在PMFC系统中, 植物和产电微生物的协同作用是磷去除的关键, 植物的根系分泌物可以为产电微生物提供碳源和生长条件, 而产电微生物的代谢活动又可以促进植物对磷的吸收和转化^[21-22]. 这种协同作用有助于提高系统的净化效果, 特别是菖蒲-PMFC, 由于菖蒲的特殊生理特性, 其根系分泌物种类和数量可能更有利于产电微生物的生长和代谢, 进而提高了对全磷的去除效果. PMFC的阳极材料也可能对全磷的去除起到了关键作用, 阳极材料在电池中不仅作为电子受体, 还可能作为磷的吸附剂. 当底泥中的磷离子通过扩散或对流作用迁移到阳极附近时, 会被阳极材料吸附, 从而减少底泥中的磷质量分数. 此外, 与氨氮类似, 底泥的矿化作用以及阳极对有机质的降解, 使得底泥中的有机磷转化为磷酸盐, 不仅向上覆水释放, 还在底泥中的积累. 与此同时, 电极的存在提升了阳极周围的氧化还原电位, 有效抑制了底泥中磷酸盐向孔隙水

的释放,从而促进了磷的稳定化过程^[23-25].因此,PMFC组和MFC组的全磷去除效果明显优于单一植物组(菖蒲)的全磷去除效果.

3 结 论

通过构建4种PMFC(野古草-PMFC、菖蒲-PMFC、水稻-PMFC和大米草-PMFC),并以MFC和菖蒲作为对照组,分析PMFC系统、MFC和单一植物组(菖蒲)的输出电压、功率密度、表观内阻及底泥中的有机质、氨氮和全磷的去除效果,以此探究植物对PMFC的产电能力及底泥修复效果的影响,得到以下结论:

1)从产电能力来看,野古草、菖蒲、水稻和大米草皆可用来构建PMFC,且能够提高产电能力.其中,菖蒲-PMFC的产电能力最优,最大输出电压为512.50 mV,最大功率密度为11.7 mW/m²,分别是MFC的3.79倍和13.12倍,且其表观内阻最小为123.69 Ω,较MFC减小了173.13 Ω.

2)从底泥修复效果来看,野古草-PMFC、菖蒲-PMFC、水稻-PMFC、大米草-PMFC、MFC和单一植物组(菖蒲)的有机质去除率、氨氮去除率和全磷去除率方面均存在差异.4组PMFC对底泥修复效果从好到差依次是菖蒲-PMFC、大米草-PMFC、水稻-PMFC和野古草-PMFC.菖蒲-PMFC的修复效果最佳,有机质去除率高达15.91%,而单一植物组(菖蒲)的有机质去除率仅为3.03%.

研究表明,在以河道底泥为阳极底泥的前提下,植物与MFC耦合构成PMFC可大幅度提升MFC的综合性功能,而且电池植物对PMFC的综合性能具有重大影响.在野古草、菖蒲、水稻和大米草中,菖蒲与MFC耦合的综合性能最佳.后续研究可以菖蒲作为电池植物继续深化性能提升研究,以期早日实现PMFC在环境污染领域的现场应用.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41372125)

作者简介:梁岩(3863081270@qq.com),长江大学硕士研究生.研究方向:生态修复.

引文:梁岩,单敬福.植物耦合微生物燃料电池修复河道底泥[J].深圳大学学报理工版,2026,43(2):155-161.

参考文献 / References:

[1] JAISWAL D, PANDEY J. Human-driven changes in sediment-water interactions may increase the degradation of ecosystem functioning in the Ganga River [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126261.

[2] 朱娟平,王健,张太平,等.湿地植物-沉积物微生物燃料电池产电及河流底泥修复[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(6): 3891-3898.
ZHU Juanping, WANG Jian, ZHANG Taiping, et al. Electricity generation and the river sediment remediation based on wetland plant-sediment microbial fuel cell systems [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(6): 3891-3898. (in Chinese)

[3] 潘晶,范琳琳,王诗尧,等.水生植物-沉积物微生物燃料电池研究进展[J]. *沈阳师范大学学报自然科学版*, 2023, 41(4): 378-384.
PAN Jing, FAN Linlin, WANG Shiyao, et al. Research progress on aquatic plant-sediment microbial fuel cells [J]. *Journal of Shenyang Normal University Natural Science Edition*, 2023, 41(4): 378-384. (in Chinese)

[4] 霍庆城.氧化石墨烯/导电聚合物复合阳极的制备及在MFC中的应用[D].天津:天津大学,2016.
HUO Qingcheng. Preparation and application of graphene oxide/conductive polymer composite anode for MFC [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)

[5] 中华人民共和国农业部.土壤检测第6部分:土壤有机质的测定:NY/T 1121.6—2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Soil testing. Part 6: method for determination of soil organic matter: NY/T 1121.6—2006 [S]. Beijing: China Standards Press, 2006. (in Chinese)

[6] 中华人民共和国环境保护部.土壤 氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的测定 氯化钾溶液提取-分光光度法:HJ 634—2012[S].北京:中国环境科学出版社,2012.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Soil-determination of ammonium, nitrite and nitrate by extraction with potassium chloride solution-spectrophotometric methods: HJ 634—2012 [S]. Beijing: China Environmental Press, 2012. (in Chinese)

[7] 中华人民共和国环境保护部.土壤 总磷的测定 碱熔—钼锑抗分光光度法:HJ 632—2011[S].北京:中国环境科学出版社,2011.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Soil-determination of total phosphorus by alkali fusion: Mo-Sb anti spectrophotometric method: HJ 632—2011 [S]. Beijing: China Environmental Press, 2011. (in Chinese)

[8] 徐勤明,刘兴剑,任全进.太湖地区常见湿地植物种类及应用探讨[J]. *北方园艺*, 2011(17): 125-127.
XU Qinming, LIU Xingjian, REN Quanjin. Category and application of common wetland plants in Taihu area [J]. *Northern Horticulture*, 2011 (17): 125-127. (in Chinese)

[9] 王金堂,李健平,邵子桦,等.生物聚合物对甲烷水合物动力学抑制作用研究[J]. *非常规油气*, 2024, 11(1): 136-142.

- WANG Jintang, LI Jianping, SHAO Zihua, et al. Study on the kinetic inhibition of methane hydrate by biopolymers [J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2024, 11(1): 136-142. (in Chinese)
- [10] 周文佳, 王成俊, 崔凯, 等. 致密油藏化能自养微生物生长规律及其氧化活性研究[J]. *非常规油气*, 2024, 11(3): 99-106.
- ZHOU Wenjia, WANG Chengjun, CUI Kai, et al. Study on the growth pattern and oxidation activity of chemolithoautotrophic microorganisms in tight oil reservoirs [J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2024, 11(3): 99-106. (in Chinese)
- [11] 刘方志, 曹胜江, 李一未, 等. 湿CO₂环境中316不锈钢腐蚀行为研究[J]. *非常规油气*, 2024, 11(5): 132-140.
- LIU Fangzhi, CAO Shengjiang, LI Yiwei, et al. Study on the corrosion behavior of 316 stainless steel in wet CO₂ environment [J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2024, 11(5): 132-140. (in Chinese)
- [12] NARAYANA PRASAD P, KALLA S. Plant-microbial fuel cells: a bibliometric analysis [J]. *Process Biochemistry*, 2021, 111, Part 1: 250-260.
- [13] WU Qing, JIAO Shipu, MA Mengxing, et al. Microbial fuel cell system: a promising technology for pollutant removal and environmental remediation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(7): 6749-6764.
- [14] 蒋进元, 张月, 何绪文, 等. 微生物燃料电池工作原理及产电性能提升策略[J]. *环境工程技术学报*, 2024, 14(2): 699-709.
- JIANG Jinyuan, ZHANG Yue, HE Xuwen, et al. Working principle of microbial fuel cell and strategies for enhancing power generation performance [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14(2): 699-709. (in Chinese)
- [15] KABUTEY F T, ZHAO Qingliang, WEI Liangliang, et al. An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): configurations and applications [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 110: 402-414.
- [16] 陈怡秀, 王伟, 梁全胜, 等. 陕北油田全生命周期温室气体排放测算方法研究[J]. *非常规油气*, 2023, 10(5): 113-120.
- CHEN Yixiu, WANG Wei, LIANG Quansheng, et al. Research on the calculation method of greenhouse gas emissions in the whole life cycle of oil fields in northern Shaanxi [J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2023, 10(5): 113-120. (in Chinese)
- [17] 刘慎坦, 王祚. 生态型微生物燃料电池同步脱氮产电效能[J]. *环境工程*, 2023, 41(12): 116-122, 149.
- LIU Shentan, WANG Zuo. An eco-type microbial fuel cell for simultaneous electricity generation and nitrogen removal [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(12): 116-122, 149. (in Chinese)
- [18] 张淑侠, 王丹丹, 董晨曦, 等. 水基钻井液的环境影响特性及对麦草生长的影响[J]. *非常规油气*, 2025, 12(4): 109-116.
- Zhang Shuxia, Wang Dandan, Dong Chenxi, et al. Environmental impact characteristics of water-based drilling fluid and its effect on wheat straw growth [J]. *Unconventional Oil and Gas*, 2025, 12(4): 109-116. (in Chinese)
- [19] 秦歌, 陈婧, 余仁栋, 等. 人工湿地-微生物燃料电池对高碳氮废水的强化净化和产电研究[J]. *湿地科学与管理*, 2021, 17(4): 12-17.
- QIN Ge, CHEN Jing, YU Rendong, et al. Enhanced nitrogen removal and electricity generation efficiency by constructed wetland - microbial fuel cell [J]. *Wetland Science & Management*, 2021, 17(4): 12-17. (in Chinese)
- [20] 夏函青, 伍永钢, 江文亭, 等. 人工湿地-微生物燃料电池系统的发展及展望[J]. *化工进展*, 2019, 38(12): 5548-5556.
- XIA Hanqing, WU Yonggang, JIANG Wenting, et al. Review on development and prospect of constructed wetland coupled with microbial fuel cell [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(12): 5548-5556. (in Chinese)
- [21] ZHANG Liangjing, LÜ Peng, WANG Yu, et al. Response of different plants to ecological floating bed-microbial fuel cells: decontamination and power generation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 458: 142474.
- [22] 陈重军, 潘钰伟, 谢嘉玮, 等. 河流污染底泥原位覆盖材料及其应用研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 100-109.
- CHEN Chongjun, PAN Yuwei, XIE Jiawei, et al. Research progress of in situ covering materials for river polluted sediment and their applications [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(1): 100-109.
- [23] LI Qingman, ZHANG Wen, WANG Xingxiang, et al. Phosphorus in interstitial water induced by redox potential in sediment of Dianchi Lake, China [J]. *Pedosphere*, 2007, 17(6): 739-746.
- [24] 黄廷林, 周瑞媛, 夏超, 等. 氧化还原电位及微生物对水库底泥释磷的影响[J]. *环境化学*, 2014(6): 930-936.
- HUANG Tinglin, ZHOU Ruiyuan, XIA Chao, et al. Effects of oxidation-reduction potential and microorganism on the release of phosphorus from sediments [J]. *Environmental Chemistry*, 2014(6): 930-936. (in Chinese)
- [25] CHRISTOPHORIDIS C, FYTIANOS K. Conditions affecting the release of phosphorus from surface lake sediments [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1181-1192.

【中文责编: 晨兮; 英文责编: 新谷】