

# 人工湿地 - 微生物燃料电池系统应用的发展与展望

张凤娇, 刀昶智, 陈 明, 李瑞玲, 郭代福, 赵 斌\*

玉溪师范学院, 化学生物与环境学院, 云南 玉溪  
Email: \*zhaobin@yxnu.edu.cn

收稿日期: 2020年10月16日; 录用日期: 2020年11月6日; 发布日期: 2020年11月13日

## 摘 要

人工湿地 - 微生物燃料电池系统是一种新型低成本高效益、可持续、环境友好型的污水处理工艺, 把人工湿地与微生物燃料电池进行可容性结合以达到高效处理污水的目的。然而, 目前国内外对CW-MFC的研究还处于起步阶段。本文对照了近些年人工湿地 - 微生物燃料电池系统的研究, 通过对比电极材料、湿地植物、微生物等指标对CW-MFC系统的影响综述了国内外人工湿地 - 微生物燃料电池系统现阶段的研究状况。最后提出了人工湿地 - 微生物燃料电池系统待解决的主要问题。

## 关键词

微生物燃料电池, 人工湿地, 电化学, 回收, 水处理, 产电

# Development and Prospect of Application of Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell System

Fengjiao Zhang, Changzhi Dao, Ming Chen, Ruiling Li, Daifu Guo, Bin Zhao\*

College of Chemical Biology and Environment, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan  
Email: \*zhaobin@yxnu.edu.cn

Received: Oct. 16<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 6<sup>th</sup>, 2020; published: Nov. 13<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Constructed wetland-microbial fuel cell system is a new low-cost, high-benefit, sustainable and environment-friendly sewage treatment process, which combines constructed wetland with mi-

\*通讯作者。

文章引用: 张凤娇, 刀昶智, 陈明, 李瑞玲, 郭代福, 赵斌. 人工湿地 - 微生物燃料电池系统应用的发展与展望[J]. 世界生态学, 2020, 9(4): 324-329. DOI: 10.12677/ije.2020.94041

crobial fuel cell to achieve the purpose of high efficiency sewage treatment. However, at present, the research on CW-MFC at home and abroad is still in its infancy. In this paper, the research of constructed wetland-microbial fuel cell system in recent years was compared, and the research status of constructed wetland-microbial fuel cell system at home and abroad was reviewed by comparing the effects of electrode materials, wetland plants and microorganisms on CW-MFC system. Finally, the main problems to be solved in constructed wetland-microbial fuel cell system are put forward.

## Keywords

Microbial Fuel Cell, Constructed Wetland, Electrochemistry, Recovery, Water Treatment, Electricity Production

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

微生物燃料电池(Microbial Fuel Cell, MFC)是运用微生物有催化活性的这一特点把污水中有机物和无机物的化学能转化为电能的一种新型污水处理工艺。微生物燃料电池具有可持续产生电能、不产生热损耗、不产生二次污染等优点,被广泛应用于发电及污水处理方面。随着MFC技术的发展,越来越多研究人员将其他技术与MFC技术耦合,如表1所示。

**Table 1.** The development and application of common MFC coupling technology

**表 1.** 常见 MFC 耦合技术的发展与应用

技术	作用	应用	优势	劣势
沉积物型 MFC (SMFC) [1]	以地杆菌	有机物丰富的浅海、河流、浅湖泊或者其他大型人造污水反应装置	结构简单、运行方便不需维护利用、底泥持续产电	为降低 SMFC 的内阻大多数建立在海洋环境,河流环境较少
植物型 MFC (PMFC) [2]	绿藻、蓝藻等浮游植物、水稻、凤眼莲等水生植物	处理污染物效果显著,可以通过微生物产生电能	成本低、运行周期长、具备自我修复能力、以自然微生物为催化剂、美学价值	产电量低、底物利用率低、内阻较大
人工湿地 MFC (CW-MFC)	湿地植物、基质、微生物	染料废水、养猪废水、人工废水、抗生素废水、农药废水等	同步处理污水与产能	电阻大、实践应用难

人工湿地(Constructed Wetland, CW)是一种仿自然湿地,利用湿地植物、基质、微生物代谢活动等的协同作用可控的处理污水的人工建造系统[3]。人工湿地具有可控、成本低、外部能源需求少等优点,在20世纪90年代欧美很多发达国家在各个领域运用了该技术。但单纯的人工湿地处理污水效率不高,近年来,人们致力于将人工湿地与其他技术相结合,寻找并研究一种高效低成本污水处理技术。

人工湿地-微生物燃料电池(Constructed wetland-Microbial fuel cell, CW-MFC)系统有机的结合了人工湿地技术和微生物燃料电池技术,是一种新型处理污水的技术。该系统人工湿地的下部厌氧环境以及上部的好氧环境刚好满足了构建微生物燃料电池阳极室和阴极室构建的条件。综合了人工湿地与微生物

燃料电池的优势,实现了同步处理污水与产能,系统的投建费用和运维成本较低,同时对能源的消耗和需求相对较少。CW-MFC 系统示意图如图 1 所示。CW-MFC 系统处理主要污染物的性能见表 2。

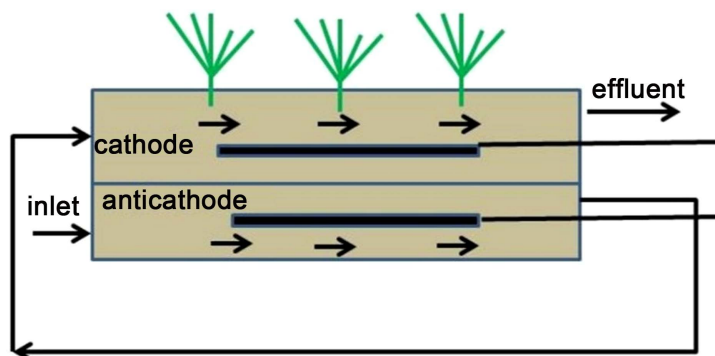


Figure 1. CW-MFC system process diagram [4]

图 1. CW-MFC 系统工艺图[4]

Table 2. Summary of the performance of CW-MFC system in treating main pollutants [5]

表 2. CW-MFC 系统处理主要污染物的性能一览表[5]

污染物类型	去除机理	去除效率	应用前景
氮磷营养盐	将预处理过的天然生物质和木质纤维素作为碳源促进系统的脱氮除磷[5]	生物质碳源的加入可提高脱氮的效果	由于目前对废水的处理存在高能耗的问题, CW-MFC 技术可净化污水的同时减少污染
重金属	重金属中含有化学能, 可以将其中的化学能转化为电能, 同时除去[6]	在重金属的转化途径中, 阳极发生有机质降解产生的电子传递到阴极, 由金属离子作为最终的电子受体可减少其在上覆水中的含量, SMFC 中重金属质量平衡证明了其转化的各种途径	随着我国工业的迅速发展, 金属冶炼、电镀、石油工业、农业生产等行业会排放出大量的重金属, 用 MFC 技术可以解决处理含重金属污水能耗过高问题
高浓度有机废水(偶氮染料)	将葡萄糖作为对照组, 并梧桐浸泡液作为偶氮染料(X-3B)共基质, 实现其脱色[7]	当梧桐浸泡液的浓度为 130 mg/l 时, 脱色效果最好	人工湿地微生物燃料电池技术作为一种新型污水处理技术可以有效处理高浓度有机废水
新型污染物(抗生素、抗性基因)	填料的吸附作用、微生物降解作用、光解作用、水解作用	进水抗生素的浓度越高, 系统填料中抗生素的吸附量越大, 且耐药菌的驯化程度越高, 对抗生素的去除能力表现为 CW(H) CW(M) CW(L), CW-MFC(H) CW-MFC(M) CW-MFC(L)。进水抗生素浓度越高。	由于我国抗生素滥用现象严重, 该系统可有效去除抗生素及产能, 具有可观的应用前景

## 2. CW-MFC 系统国内外研究现状

### 2.1. 国外研究现状

印度的 Yadav 等最早对 CW-MFC 进行了报道, 他们将石墨电极加入到了垂直流 CW 中, 研究其污水处理效果和产电能力。美国科学家 Bruce Logan, 在研究 MFC 的发展与应用领域做出了重大贡献, 首次将污水处理与 MFC 技术耦合并应用。1964 年, Berk 等构建了第一个微藻 MFC, 在厌氧条件下引用 *Rhodospirillum rubrum* (红螺菌属) 作为阳极藻类, 在光照条件下培养附着于多孔铂电极上的 blue-green marine algae (蓝藻) [8]。此外, 国内外许多学者针对阴极的种群进行了深入研究, Reguera G [1] 等利用 *Leptothrix discophora* 作为 MFC 阴极的生物催化剂, 在  $Mn^{2+}/MnO_2$  相互转化的协助下, 显著提高了污染物去除效率。

## 2.2. 国内研究现状

目前国内主要运用 CW-MFC 处理染料废水、养猪废水、人工废水、抗生素废水、农药废水等的处理。谢婷玉[5]通过构建铝污泥 CW-MFC 系统, 模拟处理废水和罗丹明 B, 实验结果表明铝污泥 CW-MFC 系统中 COD、罗丹明 B 染料、氨氮等污染物的初期去除率均在 70%以上。杨可昀[9]研究运用 CW-MFC 系统对抗生素的去除效能, 实验组建了 8 组 CW 和 CW-MFC 系统, 通过长期实验比较测定发现 CW-MFC 系统比 CW 对抗生素的净化效果更好, 湿地下部的微生物量差距不多, 但由于 CW-MFC 系统中耐药菌会迁向阴极、阳极具有电化学反应等因素使得 CW-MFC 系统更胜一筹。CW-MFC 系统比 CW 系统具有更好的抗生素净化效果。CW-MFC 两极的抗生素吸附量是 CW 的 4~5 倍, 两者下部微生物量相差不大, 但 CW-MFC 系统的耐药菌会逐渐向阴极迁移, 阴极微生物量要远大于 CW 系统顶部填料中的微生物量, 且抗性基因更高。其次, 在 CW-MFC 阳极中, 由于电化学反应使得被耐药菌降解为简单有机物的抗生素得到深度降解, 最终完全被降解。最后, CW-MFC 能够影响内部微生物的细胞膜结构和酶的活性而促进其对有机物的降解。张[10]以葡萄糖为底物, 研究不同 COD 浓度对 CW-MFC 系统性能的影响。结果表明 CW-MFC 系统性能最佳时 COD 浓度为 350 mg/L 且对其去除率高达 95.7%。

## 3. CW-MFC 的性能影响因素

### 3.1. 电极材料

选择合适的电极材料对 CW-MFC 性能具有重大影响。常用的有石墨、活性炭等具有价格便宜、简单易得、比表面积大等优势的电极材料, 但这些电极相对价格高昂的金属材料导电性较差, 所以现在很多研究致力于寻找价格合理且导电性良好的电极材料。Liu [11]用不锈钢丝网、不锈钢丝网加碳布和不锈钢丝网加颗粒活性炭阴极三种不同电极材料布置与 CW-MFC 系统阴极中, 以此研究阴极材料对 CW-MFC 系统的影响, 研究发现最大功率密度 55.05 mW/m<sup>2</sup> 出现在阴极材料为不锈钢丝网加颗粒活性炭时。

### 3.2. 电极间距

CW-MFC 阴极与阳极的间距大小会影响到系统的内阻和电势。程[12]研究了不同电极间距对 COD 的去除效率, 发现间距在 19.8 cm 时 COD 去除率最高, 如表 3 电极间距影响 COD 去除率所示。当间距越大, 阳极的厌氧环境越严格, 越有利于产电菌的生长, 促进有机物的降解。

**Table 3.** The electrode spacing affects the COD removal rate  
**表 3.** 电极间距影响 COD 去除率

间距(cm)	COD 去除率(%)
6.6	79.83
13.2	86.80
19.8	88.03

### 3.3. 湿地植物

在 CW-MFC 系统中湿地植物以水中氮、磷作为生长直接营养物质, 同时具有吸附重金属、降解抗生素等优点, 在有基质填料的湿地中还发挥着改善水利停留时间(HRT)的功能, 形成植物 - 微生物 - 电极复合生物阴极。湿地植物通过光合作将 CO<sub>2</sub> 转化为碳源并释放出 O<sub>2</sub>, 为系统提供额外碳源。MFC 系统内阻大是亟待解决的问题, 有相关研究表明, 湿地植物对降低内阻有所贡献, 2013 年 Fang [13]在实验研究中发现

种植植物时 CW-MFC 系统中内阻为 217.70  $\Omega$ ，而未种植植物时为 272.90  $\Omega$ 。同时，植物根系具有发达的通气组织，既可以为系统提供所需有机物，2013 年 Liu [11] 选用空心菜作为湿地植物种植在 CW-MFC 系统中，并将植物根系引入到系统阳极区，发现内阻从 256.00  $\Omega$  降至 156.00  $\Omega$ ，在有机物负荷低时植物根际效应产物能补充阳极产电所需有机物，当有机物负荷高时，根系泌氧为阴极还原反应提供  $O_2$ 。

#### 4. CW-MFC 系统待解决的问题及展望

CW-MFC 系统由于同时具备高效处理污水与产电的优势，受到越来越多人的关注。然而由于该项技术处于起步阶段，系统在实际推广应用中存在很大的发展空间，需要更深入的探索研究。亟待解决的主要问题及展望如下：

1) CW-MFC 仍处于实验室研究阶段，处理能力还达不到工程实践应用的阶段。

2) CW-MFC 耦合系统属于共基质，系统中多种微生物协同作用有利于难降解有机物的降解，而且共基质中酶系统发达，诱导产生所需降解酶可大大缩短有机物的降解时间。在方舟[7]得出投加共基质可以使偶氮染料活性艳红 X-3B 去除率从 23.00% 上升到 80.00%~90.00%。共基质的投加对产电性能有无影响等问题需有更深入研究。

3) CW-MFC 系统的阴极可能由于表面积小、生物量低等原因导致反应速率慢，对系统初步降解的毒性更强的中间产物难以得到深度降解，应增加阴极面积、增加阴极生物量等方法来提高阴极性能。

4) CW-MFC 系统体积增大会导致内阻过大、功率密度过低等问题限制了其长效稳定运行。

#### 基金项目

大学生创新创业训练计划项目(2019B22, 2019B48, 2019B60)。

#### 参考文献

- [1] Xu, P., Xiao, E.R., Wu, J.M., *et al.* (2019) Enhanced Nitrate Reduction in Water by a Combined Bio-Electrochemical System of Microbial Fuel Cells and Submerged Aquatic Plant *Ceratophyllum demersum*. *Journal of Environmental Sciences*, **78**, 338-351. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.11.013>
- [2] 许鹏, 许丹, 张义, 等. 植物型微生物燃料电池研究进展[J]. 工业安全与环保, 2014, 40(9): 33-35, 54.
- [3] Said, N.S.M., Abdullah, S.R.S., Ismail, N.I., *et al.* (2020) Phytoremediation of Real Coffee Industry Effluent through a Continuous Two-Stage Constructed Wetland System. *Environmental Technology & Innovation*, **17**, 100-502. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100502>
- [4] 王丽, 李雪, 王琳, 王恒超. 湿地型生物燃料电池(CW-MFC)研究进展[J]. 环境工程, 2018, 36, 238(4): 77-82.
- [5] 谢婷玉. 以生物质为碳源的人工湿地型微生物燃料电池脱氮研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2018.
- [6] 印霞斐. 微生物燃料电池产电性能及处理含铜重金属废水的研究[D]: [硕士学位论文]. 常州: 江苏理工学院, 2015.
- [7] 方舟. 人工湿地微生物燃料电池同步降解偶氮染料与产电的特性及机理[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
- [8] Berk, R.S. and Canfield, J.H. (1964) Bioelectrochemical Energy Conversion. *Applied and Environmental Microbiology*, **12**, 10-12. <https://doi.org/10.1128/AEM.12.1.10-12.1964>
- [9] 杨可昀. 人工湿地耦合微生物燃料电池产电及去除抗生素的效能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2016.
- [10] 张晓威. CW-MFC 性能的影响因素及其对苯酚的去除研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [11] Liu, S.T., Song, H.L., Wei, S.Z., *et al.* (2014) Bio-Cathode Materials Evaluation and Configuration Optimization for Power Output of Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland—Microbial Fuel Cell Systems. *Bioresour Tech*, **166**, 575-583. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.104>
- [12] 程思超. 人工湿地型微生物燃料电池对难降解有机物的去除特性研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学,

2016.

- [13] Fang, Z., Song, H.L., Cang, N., *et al.* (2013) Performance of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland System for Decolorization of Azo Dye and Bioelectricity Generation. *Bioresource Technology*, **144**, 165-171.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.073>