

人工湿地-微生物燃料电池耦合系统对农药处理效能的研究

姜松鹤, 朴文华, 金明姬
(延边大学, 延吉 133002)

摘要: 本文构建了人工湿地-微生物燃料电池耦合系统处理以阿特拉津为代表的农药, 以了解该系统的农药处理效能及处理机理. 结果显示, 该系统对阿特拉津具有较好的处理性能. 当阿特拉津浓度小于 4 mg/L 时, 系统的处理性能稳定保持在 85% 以上; 当阿特拉津浓度为 4 mg/L 时, 系统产电性能最优, 此时, 系统输出平均日电压, 最大功率密度及电流密度分别为 284.4 mV、19.64 mW/m³ 及 46.09 mA/m³. 农药对系统微生物多样性的影响显著, 而对微生物基因功能的影响不显著, 对系统菌属的影响小于电场. 系统优势菌门有变形菌门, 优势电化学活性菌门有拟杆菌门和厚壁菌门; 而降解农药优势菌门有放线菌门, 优势菌纲有 Alphaproteobacteria 与 Actinobacteria, 优势菌属有 Christensenellaceae_R-7_group.

关键词: 人工湿地-微生物燃料电池耦合系统; 农药; 处理性能; 产电性能; 微生物群落

中图分类号: TM911.45; X703 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2021.065001

Research on pesticide treatment efficiency of constructed wetland-microbial fuel cell coupling system

JIANG Song-He, PIAO Wen-Hua, JIN Ming-Ji
(Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: In this study, a constructed wetland-microbial fuel cell system was constructed to treat pesticides represented by Atrazine, and to understand the pesticide treatment efficiency and treatment mechanism of the system. The results show that the system has a good treatment performance for Atrazine. When the concentration of Atrazine is less than 4 mg/L, the treatment performance of the system remains stable above 85%. Under the condition of Atrazine concentration of 4 mg/L, the system has the best power generation performance. At this time, the average daily voltage, maximum power density and current density of the system output are 284.4 mV, 19.64 mW/m³ and 46.09 mA/m³, respectively. Pesticides have a significant impact on the microbial diversity of the system, but have no significant impact on microbial gene function, and have less impact on system bacteria than the electric field. The dominant bacteria phylum of the system includes the Proteobacteria, and the dominant electrochemically active bacteria includes the Bacteroides and Firmicutes, while the dominant bacteria phylum degrading pesticides includes the Actinobacteria, the dominant bacteria classes includes Alphaproteobacteria and

收稿日期: 2021-06-23
基金项目: 中央引导地方科技发展资金吉林省基础研究专项(202002023JC); 吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20210571KJ); 大连理工工业生态与环境工程教育部重点实验室开放基金(KLIEEE-20-06)
作者简介: 姜松鹤(1995-), 男, 朝鲜族, 硕士研究生, 研究方向为人工湿地-微生物燃料电池. E-mail: 274743879@qq.com
通讯作者: 金明姬. E-mail: jinmingji@ybu.edu.cn; 朴文华. E-mail: whpiao@ybu.edu.cn

Actinobacteria, and the dominant bacteria genus includes Christensenellaceae_R-7_group.

Keywords: Constructed wetland-microbial fuel cell; Pesticides; Treatment performance; Electricity generation performance; Microbial community

1 引言

农药能有效防治病虫害、增加粮食产量,在现代农业的发展中得到了普遍使用. 但随农田径流等汇入水体的部分农药,对周边水体造成了严重污染. 人工湿地(Constructed Wetland, CW)作为一种生态化处理技术,利用物理、化学和生物三重作用去除污染物^[1],已被广泛应用于生活污水、工业废水及农村生活污水处理^[2-4],也被公认为处理农药面源污染的最佳管理措施^[5]. 但因农药的难降解性,人工湿地对农药的处理性能还有待于进一步提高. 微生物燃料电池(Microbial Fuel Cell, MFC)是通过微生物将污染物中的化学能转化成电能,实现污染物净化与产能相结合的技术^[6]. 人工湿地表层好氧及底层厌氧,恰好满足了微生物燃料电池所需的环境^[7]. 同时,人工湿地中的大量微生物,也为微生物燃料电池提供了充足微生物来源. 2012 年, Yadav 等^[8]首次将人工湿地与微生物燃料电池进行耦合,构建人工湿地-微生物燃料电池耦合系统(Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell, CW-MFC). 目前, CW-MFC 已被广泛应用于猪场废水、染料废水及采油废水等的处理,但人们对其在农药处理方面的研究甚少^[9-11]. 因此,本文利用 CW-MFC 处理以阿特拉津为代表的农药,了解系统对农药的处理效能,并阐明其处理机理.

2 材料与方法

2.1 实验装置

实验装置由塑料桶制作而成,有效容积 37 L,如图 1 所示. 装置内从下至上依次填充 2 cm 高的砾石(粒径 12~20 mm)、25 cm 高的火山石(粒径 6~12 mm)及 5 cm 高的沙土混合物(混合比为 1:4),装置表面均匀种植菖蒲. 装置上下水平布设石墨电极板,单片电极板面积与装置横断面面积比为 0.33,电极板间距为 21 cm,电极板通过导线与 1 000 Ω 外接电阻相连构成闭合电路. 系统采用垂直流进水方式,由上方进水,下方出水,实验中水面控制在基质上方 3 cm 处.

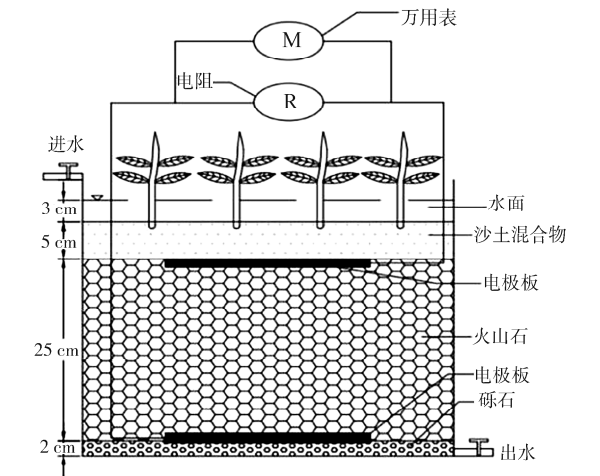


图 1 实验装置
Fig. 1 Experimental installation

2.2 实验设计

本文以进水阿特拉津浓度为变量,分析农药对 CW-MFC 处理性能、产电性能、基质酶活性及微生物群落结构的影响,从而了解系统对农药的处理效能,并阐明系统处理机理.

实验采用模拟废水,废水以阿特拉津为目标农药,葡萄糖、硝酸钾(KNO₃)、氯化铵(NH₄Cl)及磷酸氢二钾(K₂HPO₄)为碳源、氮源及磷源,外加微量元素配制. 废水初始 COD、TN 及 TP 浓度分别为 256.0、7.3 及 2.44 mg/L. 进水阿特拉津浓度分别设置 2、4 和 8 mg/L 三个浓度梯度,分别标记为 CW-MFC(L)、CW-MFC(M)和 CW-MFC(H).

2.3 装置运行

实验用接种污泥取自城市污水处理厂,取回污泥用模拟废水驯化 2 w,后与培养好的菖蒲一同移入装置,装置启动前 2 w 为稳定期. 实验采用序批式运行模式,处理量为 17 L, HRT 为 8 d,装置共运行 40 d.

2.4 分析指标及方法

本研究所测一般水质指标有 COD、TN 及 TP,分别采用重铬酸钾法、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法及过硫酸钾消解钼酸铵紫外分光光度法进行分析^[12],而阿特拉津的测定采用气象色谱法. 整个实验过程中每天测系统电压,实验初期(第一周期)与实验末期(第五周期)采用梯度改

变外电阻方法测系统极化曲线和功率密度曲线。

此外, 取实验初期与末期土样测基质中的脲酶活性(UE)、碱性磷酸酶活性(ALP)及过氧化氢酶活性(CAT), 分别采用靛蓝比色法、磷酸苯二钠比色法和高锰酸钾滴定法进行分析^[13]。实验末期取阳极附近土样, 利用高通量测序方法分析系统微生物群落。

3 结果与讨论

3.1 处理性能

图 2 为不同阿特拉津浓度下系统对 3 个实验组的阿特拉津处理结果。从图 2 可以看出, 阿特拉津的去除率依次为 86.8%、86.9%和 78.7%, 说明系统对阿特拉津具有较好的处理性能。当阿特拉津浓度小于 4 mg/L 时, 系统对阿特拉津的处理性能稳定保持在 85%以上; 但此后随阿特拉津浓度的增加, 系统的处理性能下降。在系统中, 农药的去除主要包括植物吸收、微生物降解、基质吸附及电化学作用等。而随农药浓度增加, 微生物活性受到抑制, 且在高浓度条件下基质吸附点位受到限制, 故系统处理性能下降。

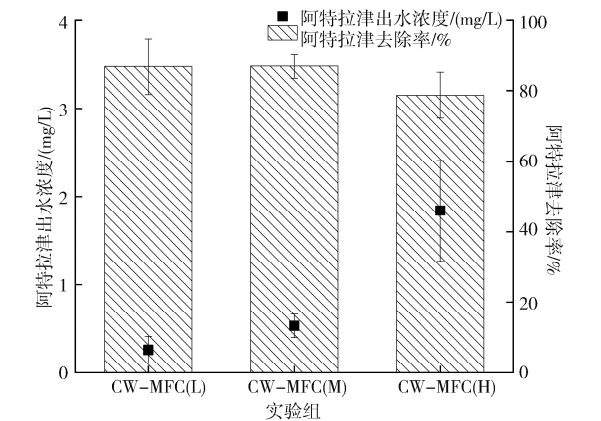


图 2 不同阿特拉津浓度下阿特拉津处理特性
Fig. 2 Treatment characteristics of atrazine in different atrazine concentrations

图 3 为不同阿特拉津浓度下系统对 3 个实验组的 COD、TN 和 TP 处理特性。其中, COD 平均去除率依次为 54.3%、46.8%和 39.5%; TN 平均去除率分别为 53.2%、48.3%和 39.7%; TP 平均去除率依次为 68.0%、65.0%与 64.4%。COD、TN 和 TP 处理性能在低浓度条件下最优。而随阿特拉津浓度的增加, 处理性能下降。但其下降趋势 COD 与 TN 显著, TP 不显著, 即农药对系统 COD 与 TN 处理性能影响显著, 而对 TP 处理性

能影响不显著。

系统中 COD 和 TN 的去除主要依靠微生物降解^[14-16], 而农药抑制系统内微生物活性, 使其处理性能下降; 且农药浓度越高, 抑制作用越强, 这与涂立俊^[17]及范闯^[18]的研究结果一致。而系统中 TP 去除主要以基质的除磷作用为主, 故农药浓度对 TP 处理性能无显著影响, 而随系统的运行基质吸附点位受到限制, 故实验后期 TP 处理性能有所下降, 这与 Lew 等^[19]的研究结果一致。

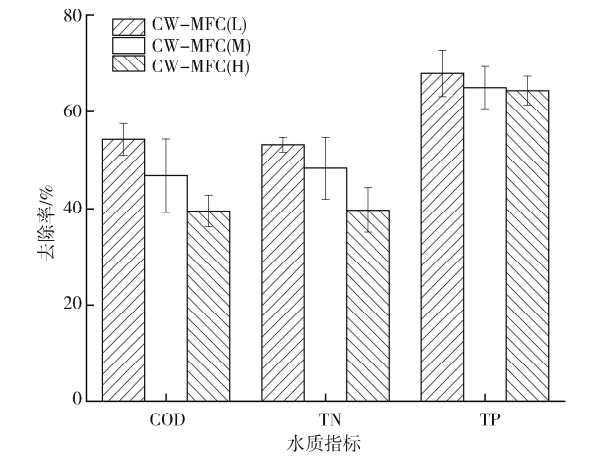


图 3 不同阿特拉津浓度下系统的处理特性
Fig. 3 Treatment characteristics of the system in different atrazine concentrations

3.2 产电性能

从图 4 可以看出, 整个实验过程中, CW-MFC(L)实验组日电压实验初期与中期波动较大, 而后期呈稳定下降的趋势, CW-MFC(M)与 CW-MFC(H)实验组日电压呈整体上升趋势, 但 CW-MFC(M)实验组波动小, CW-MFC(H)实验组波动相对较大。CW-MFC(L)、CW-MFC(M)与 CW-MFC(H)实验组, 平均日电压分别为 284.0、284.4 和 211.1 mV, 即阿特拉津浓度小于 4 mg/L 时系统产电性能相对稳定, 但此后随阿特拉津浓度的增加产电性能下降, 这与 Sun 等^[20]的结果相同。高浓度农药抑制系统产电微生物活性, 导致其产电性能下降。

由图 5 可见, CW-MFC(L)、CW-MFC(M)与 CW-MFC(H)实验组, 实验初期系统最大功率密度分别为 6.96、3.74 和 0.20 mW/m³, 实验末期系统最大功率密度分别为 6.85、19.64 和 8.86 mW/m³。随着实验的进行, 系统对农药抗性较强, 且降解农药的部分产电微生物在竞争中获得优势^[21], 故实验末期 CW-MFC(M)与 CW-MFC(H)实验组的产电性能显著提高。而低浓度农药

对系统内微生物影响不显著, 整个实验过程产电性能相对稳定. 对比 3 个实验组, 实验初期 CW-MFC(L)实验组的产电性能最优. 但随系统的运行, CW-MFC(M)实验组的产电性能增加显著, 到实验末期时, 其产电性能最优, 功率密度与电流密度达到 19.64 mW/m^3 与 46.09 mA/m^3 .

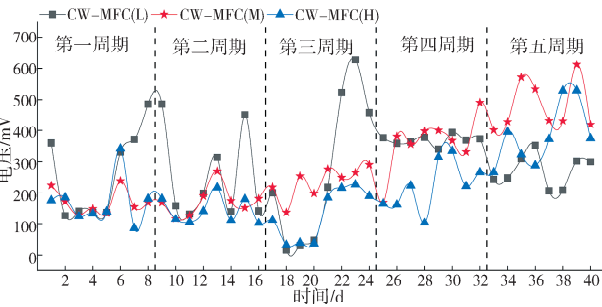


图 4 不同阿特拉津浓度下的日电压
Fig. 4 Daily voltages in different atrazine concentrations

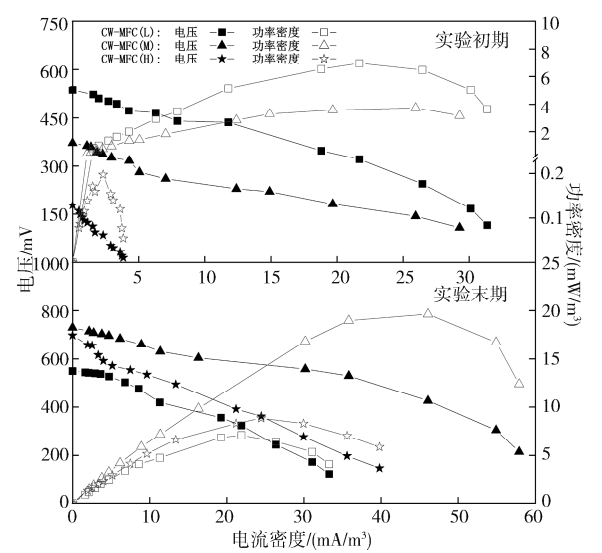


图 5 不同阿特拉津浓度下的极化曲线和功率密度曲线
Fig. 5 Polarization curves and power density curves in different atrazine concentrations

3.3 基质酶活性

农药对酶活性影响因素有很多, 通过直接或间接作用影响酶活性, 导致其活性增加、减少或无

影响^[22]. 据研究, UE、ALP 与氮、磷循环密切相关, 而 CAT 是一种氧化还原酶, 在消除细胞呼吸产生的过氧化氢过程中起重要作用, 能够在一定程度上反应微生物的生长健康状况^[23-24]. 从图 6 可见, 与系统初始酶活性相比, UE 在 CW-MFC(L)与 CW-MFC(M)实验组增加, 而在 CW-MFC(H)实验组下降, ALP 与 CAT 在所有实验组均下降. 但农药对 UE 与 ALP 的活性影响较小, 而对 CAT 活性的抑制作用显著, 且浓度越高, 影响越大, 这与马吉平等^[25]的研究结果一致.

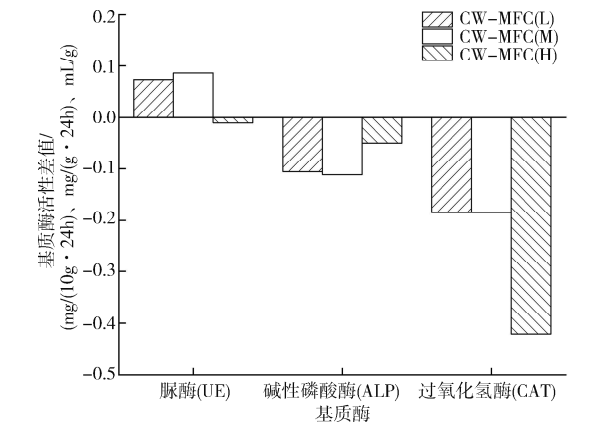


图 6 不同阿特拉津进水浓度条件下基质酶活性变化
Fig. 6 Changes of enzyme activity in different influent atrazine concentrations

3.4 微生物群落

3.4.1 微生物多样性 OTUs、Chao1、Observed species、Shannon 和 Simpsom 等均可表征微生物多样性^[26-27], 指数越高则多样性越丰富. 如表 1 所示, CW-MFC(L)实验组微生物群落多样性最丰富, 而受农药抑制作用影响, 随阿特拉津浓度的增加多样性下降. 由图 7 可见, CW-MFC(L)、CW-MFC(M)和 CW-MFC(H)实验组共有 OTUs 数为 1 084, 占各实验组总 OTUs 数的 16%、19% 和 17%, OTUs 相似性较低, 农药对系统微生物多样性影响显著. 其中, CW-MFC(L)与 CW-MFC(H)实验组共有 OTUs 数为 610, 相对最多, 微生物相似性较高.

表 1 微生物多样性
Tab. 1 Microbial diversity

样品	序列数	OTUs	Shannon	Simpson	Chao1	Observed_species	覆盖率
CW-MFC(L)	97 474	6 796	11.07	0.997	6 857.57	6 739.8	0.99
CW-MFC(M)	91 833	5 551	9.91	0.989	5 586.46	5 514.8	0.99
CW-MFC(H)	90 165	6 371	11.19	0.998	6 399.12	6 352.1	0.99

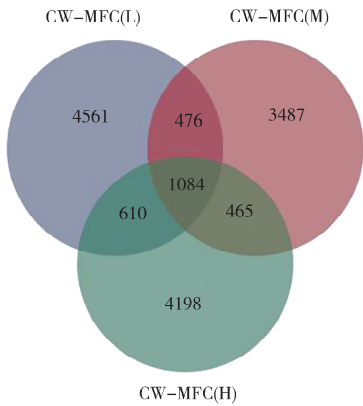


图 7 OTUs 韦恩图
Fig. 7 OTUs Wayne diagram

3.4.2 微生物群落结构 门、纲、属微生物分类水平上的丰度见图 8~图 10. 门水平上, 变形菌门 (Proteobacteria) 丰度在各实验组均大于 42% 最高, 为系统优势菌门. 据调查, 变形菌门包含许多有机物和无机物代谢相关微生物^[28], 对系统去污产电性能有显著影响. 但随阿特拉津浓度的增加, 其丰度下降, 这也是导致系统处理性能随农药浓度的增加下降的原因之一. 纲水平上, 属变形菌门的 Gammaproteobacteria 丰度在各实验组最高, 为系统优势菌纲.

本研究 CW-MFC(M) 实验组产电性能最优. CW-MFC(M) 实验组门水平上, 拟杆菌门 (Bacteroidetes) 与厚壁菌门 (Firmicutes) 丰度显著高于其他实验组; 纲水平上, Chlorobia 丰度显著高于其他实验组; 属水平上, 属 Chlorobia 纲的 Chlorobaculum 丰度显著高于其他实验组. 由此推测上述菌门、菌纲及菌属, 为系统重要电化学活性菌门、菌纲及菌属.

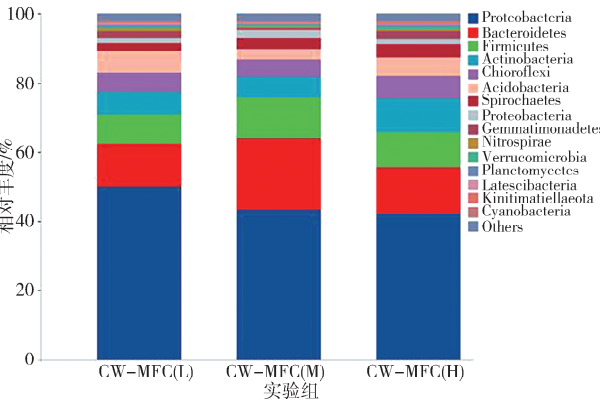


图 8 门水平微生物群落结构
Fig. 8 Microbial community structure at phylum level

有研究表明, 在适当浓度下, 农药对微生物

群落中部分细菌有促生效应, 可提高其相对丰度^[29-30]. CW-MFC(L) 实验组门水平上, 放线菌门 (Actinobacteria) 丰度显著高于其他实验组; 纲水平上, 属放线菌门的 Actinobacteria, 以及属变形菌门的 Alphaproteobacteria 丰度显著高于其他实验组; 属水平上, Christensenellaceae_R-7_group 丰度随进水阿特拉津浓度的增加上升. 由此推测上述菌门、菌属及菌纲, 为系统农药降解适宜优势菌门、菌纲及菌属.

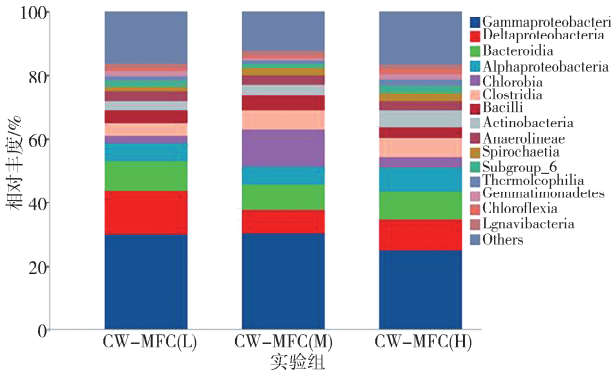


图 9 纲水平微生物群落结构
Fig. 9 Microbial community structure at class level

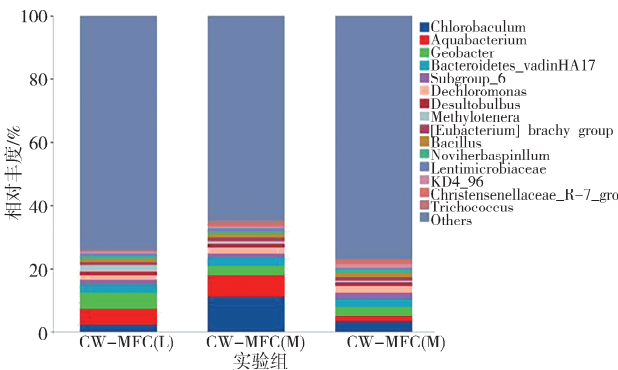


图 10 属水平微生物群落结构
Fig. 10 Microbial community structure at genus level

根据各实验组属水平的相对丰度, 选取丰度前 30 菌属进行聚类分析结果, 见图 11. 其中 CW-MFC(M) 实验组产电性能最优. 受产电性能影响, CW-MFC(M) 实验组菌属单独聚为一类. CW-MFC(L) 和 CW-MFC(H) 实验组聚为一类, 即农药浓度对系统菌属的影响较小. 由此可知, 电场对系统菌属的影响大于农药.

所有菌属可分为 4 大组, 记为: A、B、C 和 D. 4 组菌属在各实验组的丰度差异显著. A 组菌属丰度在 CW-MFC(M) 实验组最高, 即电场有利于此类菌属的生长; C 组菌属丰度在 CW-MFC(L) 和 CW-MFC(H) 实验组较高, 即此类菌属不受农药

浓度影响;B 组菌属丰度在 CW-MFC(L)实验组最高,D 组菌属丰度在 CW-MFC(H)实验组,即此类菌属受农药影响显著,而其中 D 组菌属有利于在高浓度农药环境下生长.

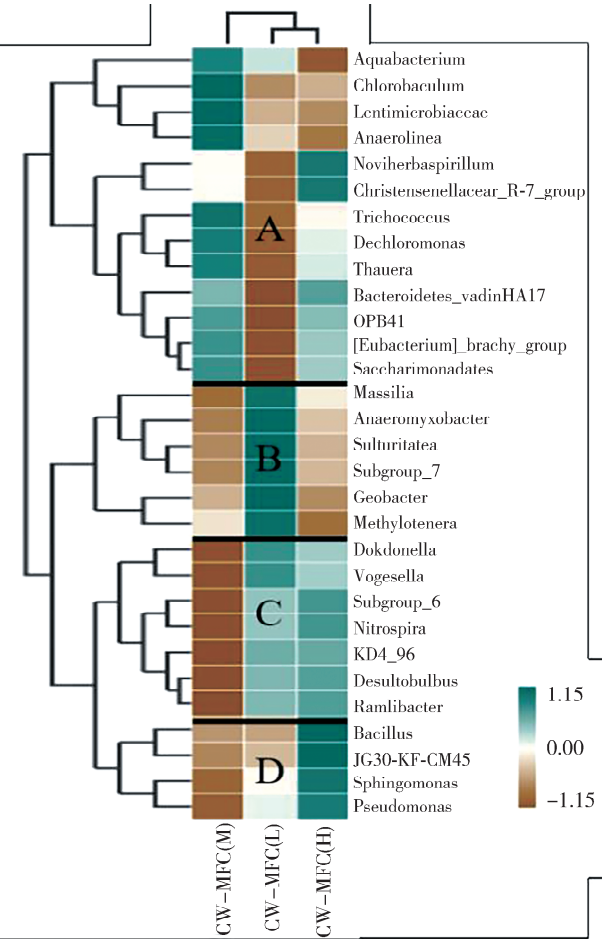


图 11 属水平微生物群落结构聚类分析图
Fig. 11 Cluster analysis of microbial community structure at genus level

3.4.3 微生物群落基因功能 为了解 CW-MFC 内微生物群落结构功能特征,本文运用 PICRUST2 分析方法对系统微生物群落功能进行预测,其结果见图 12. 六大类代谢通路中,CW-MFC 微生物功能主要以代谢为主,其丰度在各实验组均大于 80%. 六大类代谢通路包含 36 个子功能,其中氨基酸代谢、碳水化合物代谢、辅助因子和维生素的代谢、萜类化合物和聚酮类化合物的代谢,以及其他氨基酸代谢等功能相对丰度较高.实验组间微生物群落功能丰度差异小于 1%,即农药对基因功能影响不显著,微生物能够适应环境维持其功能,这与 Gao 等^[31]和 Yang 等^[32]的研究结果一致.

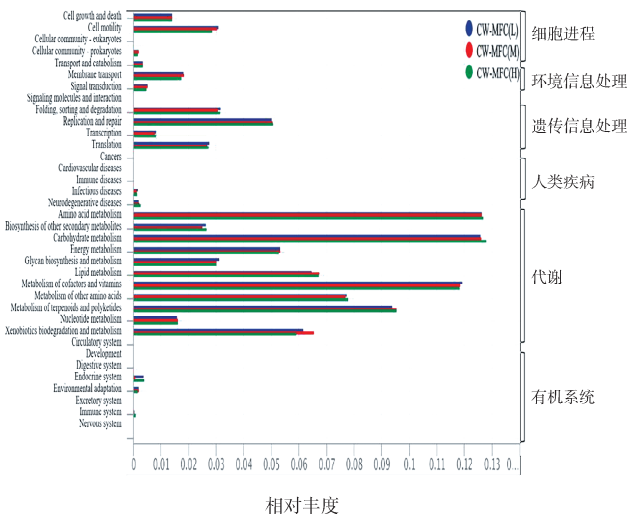


图 12 基于 KEGG 的二级功能丰度
Fig. 12 Secondary functional abundance based on KEGG

4 结 论

CW-MFC 耦合系统对阿特拉津具有较好的处理性能,阿特拉津浓度小于 4 mg/L 时,系统处理性能稳定的保持在 85% 以上,但随阿特拉津浓度的增加,系统处理性能下降. 农药对系统 COD 与 TN 处理性能影响显著,对 TP 处理性能影响不显著;对脲酶与碱性磷酸酶活性影响不显著,对过氧化氢酶活性受影响显著,且浓度越高,其影响越大. 阿特拉津浓度为 4 mg/L 时,系统产电性能最优,此时系统输出平均日电压,最大功率密度及电流密度分别为 284. 4 mV、19. 64 mW/m² 及 46. 09 mA/m².

CW-MFC 耦合系统微生物多样性受农药影响显著,而电场对系统菌属的影响大于农药的影响. 系统微生物功能主要以代谢为主,农药对微生物基因功能影响不显著. 系统优势菌门与菌纲为变形菌门与所属 Gammaproteobacteria;优势电化学活性菌门为拟杆菌门与厚壁菌门,菌纲与菌属为 Chlorobia 与所属 Chlorobaculum;适合降解农药的优势菌门与菌纲为放线菌门与所属 Actinobacteria,以及 Alphaproteobacteria,菌属为 Christensenellaceae_R-7_group.

参考文献:

[1] Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience [J]. Environ Sci Technol, 2011, 45: 61.
[2] Coleman J, Hench K, Garbutt K, et al. Treatment of domestic wastewater by three plant species in

- constructed wetlands [J]. *Water Air Soil Poll*, 2001, 128: 283.
- [3] 曹优明,戴涛. 菖蒲人工湿地对煤矿废水中镉的处理研究[J]. *工业水处理*, 2012, 32: 43.
- [4] 朱泽民. 生态沟+厌氧+人工湿地用于农业面源污染综合治理[J]. *中国给水排水*, 2019, 35: 96.
- [5] 陈沛君,王团团,杨扬. 人工湿地去除非持久性农药研究进展[J]. *湿地科学*, 2014, 12: 796.
- [6] 刘睿. 微生物燃料电池应用于 A^2/O 工艺处理生活污水的研究[D]. 北京:北京化工大学, 2016.
- [7] Stottmeister U, Wießner A, Kusch P, *et al.* Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment [J]. *Biotechnol Adv*, 2003, 22: 93.
- [8] Yadav A K, Dash P, Mohanty A. Performance assessment of innovative constructed wetland- microbial fuel cell for electricity production and dye removal [J]. *Ecol Eng*, 2012, 47: 126.
- [9] 程思超,方舟,李薛晓,等. 共基质对人工湿地型微生物电池脱色染料并产电的影响[J]. *水处理技术*, 2016, 42: 44.
- [10] 付煜. 升流式人工湿地耦合微生物燃料电池处理猪场沼液效果及产电性能研究[D]. 南昌:南昌大学, 2018.
- [11] 武振兴. CW与MFC耦合降解采油污水的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2017.
- [12] 国家环境保护总局,《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [13] Wu J, Feng Y, Dai Y, *et al.* Biological mechanisms associated with triazophos (TAP) removal by horizontal subsurface flow constructed wetlands (HSF-CW) [J]. *Sci Total Environ*, 2016, 553: 13.
- [14] Saeed T, Sun G Z. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media [J]. *J Environ Manage*, 2012, 112: 429.
- [15] Oon Y L, Ong S A, Ho L N, *et al.* Synergistic effect of up-flow constructed wetland and microbial fuel cell for simultaneous wastewater treatment and energy recovery [J]. *Bioresource Technol*, 2016, 203: 190.
- [16] Huang J, Wang S H, Yan L, *et al.* Intensity of nitrification and denitrification in subsurface- flow constructed wetlands [J]. *Environmental Science*, 2007, 28: 1965.
- [17] 涂立俊. 铁碳微电解耦合人工湿地系统对百菌清和毒死蜱的去除研究[D]. 桂林:广西师范大学, 2018.
- [18] 范闯. 铝污泥人工湿地结合微生物燃料电池去除农药废水[D]. 西安:长安大学, 2017.
- [19] Lew S, Lew M, Szarek J, *et al.* Seasonal patterns of the bacterioplankton community composition in a lake threatened by a pesticide disposal site [J]. *Environ Sci Pollut R*, 2011, 18: 376.
- [20] Sun J, Hu Y Y, Bi Z, *et al.* Simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation using a microfiltration membrane air-cathode single-chamber microbial fuel cell [J]. *Bioresource Technol*, 2009, 100: 3185.
- [21] Lin Z, Zhen Z, Wu Z H, *et al.* The impact on the soil microbial community and enzyme activity of two earthworm species during the bioremediation of pentachlorophenol-contaminated soils [J]. *J Hazard Mater*, 2016, 301: 35.
- [22] 万盼,黄小辉,熊兴政,等. 农药施用浓度对油桐幼苗生长及土壤酶活性、有效养分含量的影响[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2018, 42: 73.
- [23] Raiesi F, Salek-Gilani S. The potential activity of soil extracellular enzymes as an indicator for ecological restoration of rangeland soils after agricultural abandonment [J]. *Appl Soil Ecol*, 2018, 126: 140.
- [24] Beers Jr R F, Sizer I W. A spectrophotometric method for measuring the breakdown of hydrogen peroxide by catalase [J]. *J Biol Chem*, 1952, 195: 133.
- [25] 马吉平,陈庆隆,王洪秀,等. 除草剂氯嘧磺隆对6种土壤酶活性影响研究[J]. *江西农业学报*, 2014 (6): 29.
- [26] Ebrahimi S, Gabus S, Rohrbach-Brandt E, *et al.* Performance and microbial community composition dynamics of aerobic granular sludge from sequencing batch bubble column reactors operated at 20 °C, 30 °C, and 35 °C [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2010, 87: 1555.
- [27] Sträuber H, Lucas R, Kleinstaub S. Metabolic and microbial community dynamics during the anaerobic digestion of maize silage in a two-phase process [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2016, 100: 479.
- [28] Tong H, Liu C, Li F, *et al.* The key microorganisms for anaerobic degradation of pentachlorophenol in paddy soil as revealed by stable isotope probing [J]. *J Hazard Mater*, 2015, 298: 252.
- [29] 滕春红,陶波. 氯嘧磺隆对土壤微生物类群及土壤

呼吸强度[J]. 土壤通报, 2008, 39: 384.

[30] 史婕, 申鸿, 王兵, 等. 紫色土中联苯菊酯残留对土著微生物的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27: 312.

[31] Gao J, Liu G, Li H,*et al.* Predictive functional profiling using marker gene sequences and community diversity analyses of microbes in full-scale anaerobic sludge digesters [J]. Bioprocess Biosystems Eng, 2016, 39: 1115.

[32] Yang Y, Yu K, Xia Y,*et al.* Metagenomic analysis of sludge from full -scale anaerobic digesters operated in municipal wastewater treatment plants [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2014, 98: 5709.

引用本文格式:

中 文: 姜松鹤, 朴文华, 金明姬. 人工湿地-微生物燃料电池耦合系统对农药处理效能的研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2021, 58: 065001.

英 文: Jiang S H, Piao W H, Jin M J. Research on pesticide treatment efficiency of constructed wetland-microbial fuel cell coupling system [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2021, 58: 065001.