

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.03.002

生物电化学耦合人工湿地去除污水厂尾水中典型药物

彭洁¹, 艾力江·努尔拉¹, 崔银仓², 何超越³, 张悦¹,
屠西凤¹, 阿布拉克·阿布都乃比¹

(1. 新疆大学生态与环境学院 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017;
2. 新疆大学 分析测试中心, 新疆 乌鲁木齐 830017; 3. 新疆应用职业技术学院 石油与
化学工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 药品及个人护理用品(PPCPs)由于在传统的污水生物处理过程中降解不充分,在污水处理厂出水中被广泛检出。为此,构建了生物电化学辅助垂直流人工湿地(E-VFCW)小试系统,并评估其对污水处理厂尾水中PPCPs的降解和转移特性。在无需投加碳源与化学药剂的条件下,E-VFCW通过生物电化学及微生物-植物的综合作用可强化对有机污染物的去除,实现了对多种药物污染物的高效降解。微生物群落分析显示,反应器中富集了长绳菌属(*Longilinea*)、水单胞菌属(*Aquimonas*)和黄杆菌属(*Flavobacterium*)等关键功能微生物和电活性微生物。该技术为低碳氮比废水中药物污染控制提供了解决方案,展示了生物电化学系统在可持续污水处理领域的应用潜力。

关键词: 人工湿地; 生物电化学; 污水处理厂尾水; 药物; 微生物群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)03-0010-08

Bioelectrochemical-Constructed Wetland for Enhanced Removal of Typical Pharmaceuticals in Tailwater from Wastewater Treatment Plant

PENG Jie¹, AILIJANG Nuerla¹, CUI Yincang², HE Chaoyue³, ZHANG Yue¹,
TU Xifeng¹, ABULAKE Abudunaibi¹

(1. Key Laboratory of Oasis Ecology <Ministry of Education>, College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Analysis and Testing Center, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 3. College of Petroleum and Chemical Engineering, Xinjiang Applied Vocational Technical College, Urumqi 830017, China)

Abstract: Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) are frequently detected in effluent of wastewater treatment plant due to their inadequate degradation during conventional biological treatment processes. In this study, a lab-scale bioelectrochemically assisted vertical flow constructed wetland (E-VFCW) system was developed to evaluate its efficacy in degrading and removing PPCPs from secondary effluent. Without the need for external carbon sources or chemical additives, the E-VFCW enhanced the removal of organic pollutants through integrated bioelectrochemical and plant-microbial interactions, achieving advanced and efficient purification of multiple pharmaceutical pollutants. Microbial community analysis revealed significant enrichment of key functional and electroactive

基金项目: 中央引导地方科技发展专项(ZYYD2023A04)

通信作者: 艾力江·努尔拉 E-mail: aljnel@xju.edu.cn

microbes, including *Longilinea*, *Aquimonas*, and *Flavobacterium*. This technology provides a promising solution for controlling pharmaceutical pollution in low C/N ratio wastewater, demonstrating the considerable potential of bioelectrochemical systems in sustainable wastewater treatment.

Keywords: constructed wetland; bioelectrochemistry; tailwater from wastewater treatment plant; pharmaceuticals; microbial community

药品及个人护理用品(PPCPs)在水环境中的持续累积与迁移转化已成为全球性环境挑战。然而,传统的污水处理厂(WWTPs)在去除药物污染物方面通常效果有限,导致未经充分处理的药物通过出水 and 剩余污泥进入环境。在这些污染物中,双氯芬酸(DCF)、布洛芬(ibu)等非甾体抗炎药及磺胺甲恶唑(SMX)、氧氟沙星(OFL)等抗生素类药物尤为典型^[1-2],诺氟沙星(NOR)、甲氧苄啶(TMP)因具有环境持久性,已成为污水处理厂出水中常见的污染物^[3-4]。这些药物在环境中的残留浓度虽仅为痕量水平,但长期残留不仅对水生生物构成毒性风险,而且显著促进了抗生素耐药细菌和抗生素耐药基因的增殖,对人类健康与生态安全构成严重威胁。因此,对WWTPs尾水进行深度处理至关重要。

目前,WWTPs尾水深度处理工艺主要有臭氧/活性炭^[5]、高效沉淀池^[6]、膜分离^[7]、生物滤池^[8]、人工湿地^[9]等。人工湿地(CWs)作为城镇污水处理厂尾水深度处理的典型工艺,已被用于去除痕量有机污染物,具有运行维护成本低、处理效果稳定且具有观赏性等优势。但是,传统CWs存在占地面积大、净化能力有限、水力负荷小等问题。为提高尾水处理效果,CWs与其他处理工艺的耦合得到了重视。其中,将微生物电化学系统(BES)应用于CWs已成为尾水处理领域中的研究热点。研究发现,将CWs和BES耦合可以提高系统的稳定性和难降解有机物的去除率。Liu等^[10]构建了新型高密植无基质电解强化生物支架人工湿地,通过将BES技术引入CWs,提高了植物的活性,增加了电化学活性微生物(EAB)和抗生素降解功能菌的丰度,在4~24℃范围内对模拟低污染水中SMX的去除率达83.14%~97.13%。Zhao等^[11]构建了生物电化学耦合人工湿地(BES-CWs)系统,以强化对氯霉素(CAP)的去除,微生物群落分析表明,CAP压力和电刺激选择性能富集CAP降解功能菌,从而提高对CAP的去除率。尽管BES-CWs耦合系统可显著提

升人工湿地的尾水处理效率,但目前的研究仍主要局限于实验室模拟阶段,尚未实现规模化工程应用。因此,该技术仍需通过实验室小试进一步验证其对实际污水的处理效能及运行稳定性,以便为后续工程化提供支撑。

笔者构建了生物电化学辅助垂直流人工湿地(E-VFCW)系统,并分两个阶段进行试验,其中,第一阶段通过处理模拟废水,系统考察E-VFCW对典型非甾体抗炎药和抗生素类药物的去除效能;第二阶段基于实际WWTPs尾水,重点探究对药物的去除率、厌氧/好氧区的去除贡献、湿地植物生理生化指标对污染物去除的响应、污染物在植物组织中的迁移富集规律、微生物群落结构变化以及和污染物降解相关的菌群。

1 材料与方法

1.1 人工湿地的构建与运行

E-VFCW结构如图1所示,采用圆柱形有机玻璃制成,高为80 cm,外径为21 cm,内径为18 cm。采用垂直分区结构,自下而上依次为进水区、厌氧区、曝气区和好氧区,有效容积为10 L。

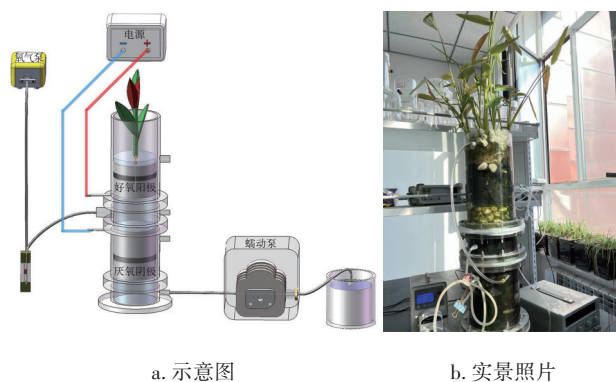


图1 E-VFCW试验装置

Fig.1 E-VFCW equipment

曝气区配置有曝气装置,为微生物提供DO。选择砾石(直径为10~12 mm)作为人工湿地基质,电极层由碳毡(高为5 mm,长为20 mm,宽为20 mm)与钛网(网目为5 mm,直径为18 mm)组成。系统厌

氧/好氧区分别通过钛片连接到外部直流电源,形成完整的闭路系统。湿地植物采用再力花,种植密度为50株/m²,并设有20 cm高的砾石以固定植物根系。装置采用连续上向流运行方式。

1.2 试验方法

采用乌鲁木齐某污水处理厂厌氧段和好氧段的活性污泥作为菌种,分别取污泥上清液对反应器厌氧/好氧区生物载体进行挂膜。系统经4个月挂膜成熟后进入正式运行阶段。试验分为两个阶段,采用连续进水的运行方式,以水力停留时间(HRT)为采样周期,定期采集系统进水、厌氧和好氧出水以监测药物浓度。

第一阶段采用模拟废水,其C:N:P=100:5:1,COD为50 mg/L,OFL、恩诺沙星(ENR)浓度为5 μg/L,IBU、DCF浓度为1 μg/L。课题组前期研究发现,采用E-VFCW处理含盐碱PPCPs废水,在HRT为48 h、施加0.9 V间歇性电刺激(24 h关、24 h开)、电极布置为厌氧阳极/好氧阴极的条件下,对各类PPCPs的去除率可提高16.04%~35.25%,具有良好的降解效果^[12]。故将第一阶段的HRT设置为48 h,在未施加电压条件下,各类型药物去除率基本稳定后施加0.9 V间歇性电刺激,考察对模拟废水中4种药物(OFL、ENR、IBU、DCF)的去除效能及厌氧/好氧区对去除污染物的贡献。

在第一阶段污染物去除率平稳后开始第二阶段试验,将装置进水调整为某污水处理厂尾水。对污水中5种典型抗生素类药物(SMX、NOR、OFL、ENR、TMP)进行定量检测,研究0.9 V电压条件下,将HRT从48 h延长到72 h后药物去除率的变化,并分析厌氧/好氧区对去除污染物的贡献。

1.3 水样预处理及检测

药物检测采用固相萃取进行预处理,首先准确量取1 000 mL水样,使用0.45 μm水系滤膜对其进行过滤,以去除其中的悬浮物。随后,向水样中添加0.5 g EDTA-2Na,并利用磷酸将pH调节至3.0。固相萃取柱(SPE, Waters Oasis HLB)上样前需依次使用5 mL的甲醇、去离子水和EDTA-2Na水溶液(浓度为2.00 g/L、pH为2.0)进行润洗活化处理,当萃取柱内剩余约2 mL EDTA-2Na溶液时,将其固定在固相萃取装置上。接着使水样以不高于10 mL/min的流速缓慢通过萃取柱,待水样完全过柱后,先用5 mL去离子水对小柱进行淋洗,随后在负压下抽

干20 min,最后采用10 mL甲醇进行洗脱,并收集洗脱液。洗脱液在40℃下用氮气吹干,加入1 mL甲醇定容,涡旋混匀,用0.22 μm滤膜过滤后,放在棕色检测瓶中保存在-20℃冰箱中直至仪器分析。

第一阶段采用固相萃取-高效液相色谱技术(SPE-HPLC)检测水体中4种药物(OFL、ENR、IBU和DCF)。采用安捷伦高效液相色谱(HPLC)系统和Agilent-C18色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm)进行定量检测。检测DCF和IBU的流动相由0.01%甲酸溶液和乙腈组成(体积比为45:55),检测波长为224 nm,流速为0.6 mL/min,检测温度为30℃,进样量为20 μL。检测OFL和ENR的流动相由0.3%磷酸溶液(用三乙胺调节pH为3.0±0.1)和甲醇组成(体积比为70:30),检测波长为283 nm,流速为1.0 mL/min,检测温度为40℃,进样量为20 μL。

第二阶段采用固相萃取-高效液相色谱/质谱联用技术(SPE-HPLC/MS)检测水体中的典型药物(SMX、NOR、OFL、ENR和TMP)。采用Thermo TSQ QUANTIS液相色谱三重四极杆串联质谱仪进行定量检测,目标药物在WATERS BEH C18色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm)上进行分离,柱温为30℃,流速为0.30 mL/min,进样量为3.00 μL,流动相为0.1%甲酸水溶液和乙腈。流动相梯度洗脱程序为5%乙腈在2.0~8.5 min内升至95%,然后在9.5~10.0 min内返回到5%乙腈,并保持2.0 min。采用电喷雾离子源(ESI),在多反应监测模式下进行目标药物的质谱检测,电喷雾电压为3.5 kV(+),鞘气流速为40 Arb(arbitrary unit,表示任意单位),辅助气流速为10 Arb,离子传输管温度为325℃,脱溶剂温度为350℃。

1.4 植物指标的测定

为考察CWs中植物生理生化指标的变化,分别在试验前后收集新鲜植物,使用95%乙醇提取植物叶、茎中的叶绿素,用分光光度法测定叶绿素浓度。使用硫代巴比妥酸比色法测定丙二醛(MDA)浓度。采用超氧化物歧化酶(SOD)试剂盒检测植物SOD含量。为确定试验后湿地植物残留的药物含量,试验结束后采集植物地下(根)和地上(茎、叶)组织,根据文献[13]中的方法提取植物组织中的抗生素。将植物样品冻干并用100目筛进行筛分。称取0.2 g植物样品,放入乙腈和柠檬酸缓冲液的混合物中,然后涡旋超声,离心分离得上清液,重复上述步骤

并合并上清液,将样品进行过柱富集。从植物中提取的药物的检测方法与水样的一致。

1.5 微生物群落结构分析

在试验结束后,采集厌氧/好氧区基质填料上的生物膜污泥,去除植物根系后混合均匀。对原始污泥及厌氧/好氧区污泥进行16S rRNA高通量测序分析,使用V4-V5区通用引物515F和R907扩增提取DNA的16S rRNA基因。微生物群落采用Illumina高通量测序技术进行分析。

2 结果与讨论

2.1 对模拟废水的处理效果

第一阶段共运行42 d,其中前14 d系统未施加电压时,IBU和ENR去除率保持在100%;OFL的去除率在94.35%以上,平均去除率为98.61%;DCF的去除率在33.81%~76.42%之间,平均去除率为60.50%。在14~26 d,系统施加0.9 V电压,IBU、ENR、OFL的去除率稳定在100%;DCF的去除率呈现上升趋势,在18 d后去除率也稳定在100%。综上,施加及不施加电压时IBU、ENR始终维持优异的去除效能;施加0.9 V电刺激有利于强化OFL去除;在不施加电压的情况下,DCF平均去除率较低且波动较大,但在施加电压之后,其去除效果快速提升并达到较高水平。

有研究指出,BES能够完全去除废水中包括药物在内的有机物,适用于氟喹诺酮类药物的完全矿化^[14];电刺激能显著提升DCF去除率,电压从0增加到0.9 V时,去除率从52.74%提升至71.03%^[12]。在适当的电压下,功能微生物将富集在电极表面,以促进药物的去除。电化学氧化过程可通过阳极上的电子转移或者生成羟基自由基,将难降解有机物转化为小分子可生物降解有机物,或者完全矿化为二氧化碳和水等。

在26~42 d,监测好氧区、厌氧区出水中的药物浓度,考察两者对4种药物的去除贡献。结果表明,IBU、OFL、ENR基本在厌氧区被完全去除,DCF在厌氧区 and 好氧区的去除率分别为66.36%、33.64%。可见,厌氧区在去除目标污染物方面发挥了关键作用,这可能是由于污泥吸附速率较快,而污泥吸附能力主要取决于有机污染物的疏水性。DCF是一种疏水性氯化衍生物,辛醇-水分配系数为4.51,在中性条件下DCF难以吸附到污泥中,不易发生生物

降解。BES利用电极作为电子受体或供体来强化微生物反应,兼具生物降解与电化学氧化还原两种工艺的的优点,实现电子在固体电极和细胞间的传递,从而提高了系统的处理效果。Qiu等^[15]使用改性阳极构建微生物燃料电池,促进了电活性菌和DCF降解菌的富集,增强了DCF降解性能。Xue等^[16]研究发现,DCF在A²/O-MBR工艺中的去除效果不佳,其污泥吸附性能有限,生物降解是决定速率的关键步骤。同时,对于大多数目标化合物来说,提高DO水平可以提高生物降解速率,原因是氧气可能直接参与反应或调节酶的活性,故有氧条件可能是促进整体降解的关键。

综上所述,E-VFCW对目标污染物的去除率处于较高水平,污染物的降解转化主要在厌氧区进行,好氧区的高溶解氧环境具有降解PPCPs的潜力,可以有效提高系统对模拟废水中污染物的去除效率及稳定性。相较于传统的CWs工艺,BES-CWs对高毒性、难降解的药物残留物具有更佳的去效能,可为新污染物防控提供有力支持。研究中生物膜污泥的驯化时间较长,污染物有机负荷较低,有利于药物的降解,难以综合体现电刺激强化优势,未来可用于水产养殖、工业废水等高负荷尾水中难降解污染物的去除,进一步探讨BES-CWs的处理效能及其应用范围。

2.2 对实际废水的处理效果

在施加电压条件下,考察E-VFCW对实际废水中典型药物的去除效果,结果如图2所示。在前14 d系统HRT为48 h。在0~10 d SMX去除率波动较大,范围为78.65%~98.80%。在10~14 d内各抗生素去除率均趋于平稳,该阶段SMX、NOR、OFL、ENR、TMP的平均去除率分别为83.70%、95.87%、97.99%、93.21%、94.28%。随后将系统HRT延长为72 h,SMX、NOR、OFL、ENR、TMP的平均去除率分别为92.38%、96.18%、98.54%、96.28%、96.37%,相较前一阶段,去除率分别提高了8.68个百分点、0.31个百分点、0.55个百分点、3.07个百分点、2.09个百分点。磺胺类抗生素(SAs)的辛醇-水分配系数约为0.31~1.63,具有高水溶性,在污水处理过程中的吸附作用较弱,主要通过生物降解去除。而喹诺酮类抗生素(QNs)的辛醇-水分配系数只有-1.03~0.30,主要通过吸附到活性污泥上实现去除而不是生物降解。QNs的去除效果更好,这是

因为QN_s的分配系数低于SAs,能够更好地通过吸附富集的途径得以去除。Deng等^[17]研究发现,TMP的去除率明显高于SAs,与本研究结果一致。刘佳等^[18]在HRT为1~4 d的条件下,研究了CW_s对ENR、SMX和氟甲砒霉素的去除效果,结果发现延长HRT可显著提高对抗生素的去除率。这是因为延长HRT为电化学氧化和微生物降解提供了更充分的时间,故可以显著提高反应器的去除效率。HRT是湿地运行的关键参数,其变化会显著改变微生物与污染物的接触时长。当HRT不足时,系统难以维持必要的生物量,导致处理效果波动且运行稳定性下降;反之,若HRT过长,则会造成处理能力闲置,导致运行成本增加和资源浪费。

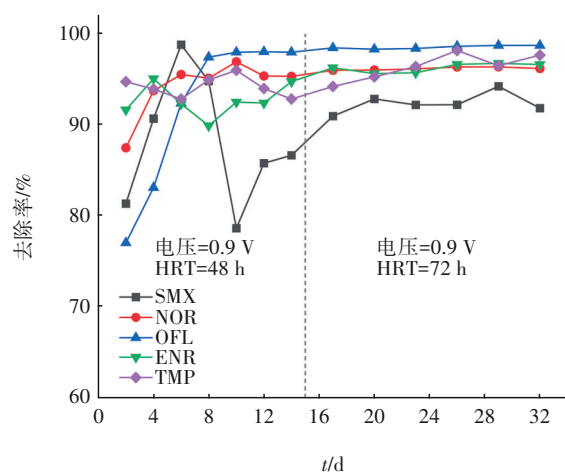


图2 不同HRT下耦合工艺对实际尾水中药物的去除效果

Fig.2 Removal of pharmaceuticals in real tailwater by coupled process at different HRTs

在32~44 d,对比好氧段和厌氧段对尾水中5种典型药物的去除贡献,结果表明,SMX、NOR、OFL、ENR、TMP在厌氧区的平均去除率分别为80.84%、88.90%、89.40%、92.44%、93.78%,在好氧区的平均去除率依次为7.27%、5.31%、2.60%、0.21%、0.40%,即目标污染物主要在厌氧区被降解。

此外,不同种类的抗生素在CW_s中的去除效果不同,这种去除差异是理化性质、湿地设计、微生物功能及环境条件共同作用的结果。实际应用中需根据目标抗生素的特性(如疏水性、稳定性)选择湿地类型、基质和运行参数,必要时可结合活性炭吸附等工艺强化处理效果。E-VFCW系统在去除抗生素方面展现出相对优异的效能,但其运行稳定性易受环境因子(如温度、pH、水力负荷等)波动的影响,

系统抗冲击负荷能力仍需进一步提升。

2.3 植物的富集转移作用

在系统稳定运行期间,植物的地上及地下部分生物量均有增加,植物吸收的污染物可以作为其生长代谢的碳源和营养物质,发达的根系为微生物的吸附和代谢提供了适宜的生存生境,并有蜗牛等无脊椎动物生长,说明尾水对E-VFCW系统中植物的胁迫强度较弱。植物在去除抗生素方面起着至关重要的作用,抗生素可通过细胞膜的脂质双分子层扩散并进入细胞液,从而转移到根、叶和芽中,在植物组织中积累。测定显示,再力花地上和地下部分的NOR、OFL、ENR含量分别为8.62、1.44、1.53 μg/kg和11.07、13.13、8.94 μg/kg;地上部分的TMP含量为0.37 μg/kg,在地下部分未检出;而SMX在地上和地下部分均未检出。NOR、OFL、ENR在再力花中的转运系数($TF=C_{\text{茎叶}}/C_{\text{根}}$)分别为0.78、0.11、0.17,在根部的药物残留总量大于茎叶部。系统对TMP的去除率越高,其在植物中的含量则越低,植物根系附近具有丰富的微生物群落从而具有更强的降解能力,植物根系受到的抗生素胁迫作用更小,植物根系产生降解或转化TMP的酶,从而降低其在植物地下部分的含量。SMX在植物中未检出,可能是植物对SMX的吸收能力有限或吸收后高效代谢降解所致。综上所述,再力花具备从环境水体中蓄积抗生素的能力,因而通过食物链产生的暴露风险仍不可忽视。

叶绿素是植物合成有机物和促进自身生长的重要色素,在光合作用中起接收、转换能量的作用。试验后期叶片叶绿素含量为1.46 mg/g,较试验前上升24.02%,这是因为生长期的叶片处于光合作用的活跃阶段;因试验后植物茎部组织孔隙度增加,叶绿素含量呈现负相关,故有所下降(试验前后的含量分别为0.39、0.12 mg/g)。

MDA含量可以反映植物遭受逆境伤害的程度,植物器官衰老或在逆境下遭受伤害,往往发生膜脂过氧化作用,MDA是膜脂过氧化的最终分解产物。SOD广泛存在于生物体中,是生物体中一种重要的抗氧化酶类,几乎参与了生物体中所有的对抗各种环境胁迫的生理生化反应。测定显示,叶、茎、根等部位的MDA和SOD含量变化不同,其敏感性存在显著差异。试验前后再力花叶、茎、根部分的MDA含量分别为0.026、0.037、0.050 μmol/g和0.006 6、

0.007 5、0.001 0 $\mu\text{mol/g}$, SOD 含量分别为 214.29、249.68、268.75 $\mu\text{mol/g}$ 和 171.51、82.56、178.66 $\mu\text{mol/g}$, 即 MDA、SOD 含量均显著下降。沈根祥等^[19]的研究显示,适宜的电压能够强化植物和微生物修复污染物的能力,且微生物共存可增强植物在外源胁迫下的耐受性。植物根系的分泌物可以作为 E-VFCW 底物,为电化学功能菌群提供电子供体,同时也可作为细菌共代谢降解抗生素补充碳源。

综上所述,在微生物-植物协同作用及低电压刺激下,湿地植物(再力花)在尾水胁迫环境中展现出良好的适应性。试验在室内环境(温度为 15~25 $^{\circ}\text{C}$)下进行,受季节和温度影响较小,可能无法完全反映实际工程应用中季节性温度波动对系统性能的影响。因此,后续可重点研究在低温等极端条件下,运行参数的优化调控及生物电化学活性的维持策略,以进一步提升 E-VFCW 系统在实际工程应用中的环境适应性。

2.4 微生物群落丰度变化

为探究湿地净化效果与微生物群落的关系,分别对系统中厌氧/好氧区污泥进行微生物群落结构和多样性分析。系统的微生物多样性指数见表 1。相较于接种污泥,运行后 Richness 指数增加,说明其微生物群落丰富度有所提高; Shannon 指数升高、Simpson 指数降低,说明微生物群落多样性有所提高。因此,生物电化学耦合系统不仅增强了微生物去除污染物的能力,而且调整了 CWs 中的微生物群落结构,提高了微生物群落的丰富度及多样性。

表 1 微生物 α 多样性指数

Tab.1 Microbial alpha diversity index

样品	Richness	Shannon	Simpson
原始好氧污泥(R0.Ae)	659	1.26	0.221 0
好氧污泥(Rcap.Ae)	3 860	2.98	0.003 6
原始厌氧污泥(R0.An)	1 306	1.70	0.085 2
厌氧污泥(Rcap.An)	3 599	2.86	0.006 4

原始污泥及厌氧/好氧区污泥在门水平上的微生物群落分布如图 3 所示。相对丰度排前 7 的优势菌门为假单胞菌门(Pseudomonadota)、拟杆菌门(Bacteroidota)、浮霉菌门(Planctomycetota)、绿弯菌门(Chloroflexota)、热脱硫杆菌门(Thermodesulfobacteriota)、芽孢杆菌门(Bacillota)、酸杆菌门(Acidobacteriota),在厌氧区的相对丰度分别为 37.42%、16.78%、9.31%、8.46%、1.90%、1.26%、1.13%,在好氧区的

相对丰度分别为 44.82%、27.04%、6.47%、1.36%、0.09%、0.94%、3.69%。假单胞菌门、拟杆菌门、浮霉菌门和绿弯菌门是人工湿地处理系统中常见的优势菌门,具有去除氮、磷和水解大分子有机物的功能,与 Tian 等^[20]的研究结果一致。以往研究表明,拟杆菌门是具有代表性的 EAB,含有丰富的抗生素抗性基因,且能够降解 SAs^[21]。

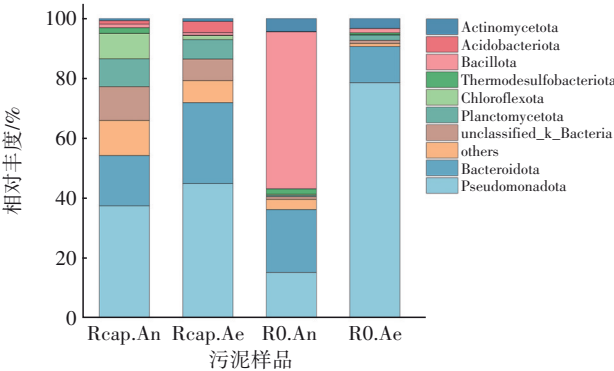


图 3 门水平下微生物的相对丰度

Fig.3 Relative abundance of microorganisms at phylum level

反应器厌氧/好氧区污泥在属水平上相对丰度>2%的微生物群落分布如图 4 所示。

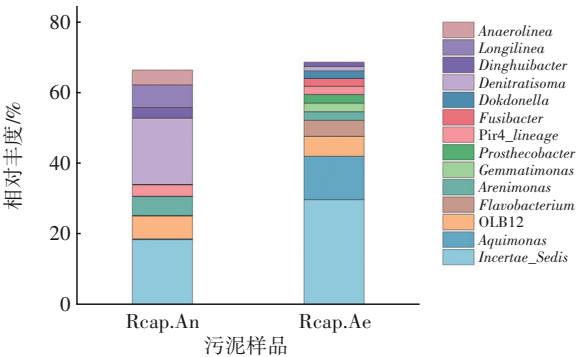


图 4 属水平下微生物的相对丰度

Fig.4 Relative abundance of microorganisms at genus level

厌氧区的优势菌属是 Denitratisoma(18.65%)、OLB12(6.47%)、长绳菌属(Longilinea, 6.39%)、砂单胞菌属(Arenimonas, 5.33%)、厌氧绳菌属(Anaerolinea, 4.18%)。长绳菌属作为 EAB,能够进行胞外电子转移,加速了厌氧系统中的直接种间电子转移过程,从而提高了生物电子传递效率^[22]。厌氧绳菌属可以在砾石生物膜中显著富集,也存在于污水处理厂活性污泥中,可以形成附着在固体表面的鞘状结构,有利于它们在缓慢移动或低营养的水中生

长,并促进其他微生物的附着和增殖^[23]。好氧区的优势菌属是水单胞菌属(*Aquimonas*, 12.20%)、OLB12(5.58%)、黄杆菌属(*Flavobacterium*, 4.56%)。据报道,水单胞菌属可以降解各种类型的抗菌药物^[24],同时它也是一种与发电相关的EAB,可催化脱氯过程以提高含氯化化合物的还原性,其在好氧区的富集可能是促进DCF去除的主要原因。并且,研究发现黄杆菌属对ENR具有较高的抗性和降解能力,是去除QNs的关键菌属^[25]。

试验结果表明,长绳菌属、水单胞菌属和黄杆菌属在电子传递和生物降解中起着重要作用,可能主导着典型药物的降解。微生物电化学技术通过EAB介导的种间电子传递机制,可促进微生物群落间的共代谢作用。EAB与专性降解菌的协同作用,可提升难降解有机污染物的降解效率,同时降低其残留物的生态毒性。这一过程体现了电化学-微生物耦合系统在环境污染物治理中的独特优势。

3 结论

① 在低碳氮比(C/N为1:2)的进水条件下,当HRT为72 h时,E-VFCW系统可以有效去除污水处理厂尾水中的药物,对SAs、QNs及TMP等药物的平均去除率均超过90%。

② BES选择性富集了系统阴极/阳极区的功能菌群及电化学活性菌群,提高了微生物的丰富度和多样性,提升了系统的处理效能和环境可持续性。

③ E-VFCW实现了污水处理厂尾水的深度净化,提供了一种无需外加化学药剂和有机碳源的绿色解决方案,有助于缓解传统污水处理与温室气体排放之间的矛盾。

参考文献:

- [1] LONAPPAN L, BRAR S K, DAS R K, et al. Diclofenac and its transformation products: environmental occurrence and toxicity—a review [J]. Environment International, 2016, 96: 127–138.
- [2] SRAIN H S, BEAZLEY K F, WALKER T R. Pharmaceuticals and personal care products and their sublethal and lethal effects in aquatic organisms [J]. Environmental Reviews, 2021, 29(2): 142–181.
- [3] LIU Q, LI M, LIU X, et al. Removal of sulfamethoxazole and trimethoprim from reclaimed water and the biodegradation mechanism[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2018, 12(6): 1–8.
- [4] GUO X M, LU X M, JIA J W, et al. Comprehensive assessment of 45 antibiotics in ten urban wastewater treatment plants in Northeastern China: terminal treatment is not a reliable guard [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025, 489: 137755.
- [5] CHUANG Y H, SZCZUKA A, SHABANI F, et al. Pilot-scale comparison of microfiltration/reverse osmosis and ozone/biological activated carbon with UV/hydrogen peroxide or UV/free chlorine AOP treatment for controlling disinfection byproducts during wastewater reuse [J]. Water Research, 2019, 152: 215–225.
- [6] 包鹏, 庞洪涛, 曹效鑫, 等. 高效沉淀池在市政污水深度处理中的应用研究进展[J]. 中国给水排水, 2023, 39(22): 13–20.
- BAO P, PANG H T, CAO X X, et al. Research and application progress of high-performance sedimentation tank in domestic sewage advanced treatment [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39 (22) : 13–20 (in Chinese).
- [7] 宋磊. 污水处理厂高标准提标改造设计: 以安徽某污水处理厂为例[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 115–119.
- SONG L. Design of higher standard upgrading and reconstruction project—a WWTP case in Anhui [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6): 115–119 (in Chinese).
- [8] 许铮, 王彦飞, 李思敏, 等. 生物砂滤池深度处理污水厂尾水的研究现状及展望[J]. 工业用水与废水, 2023, 54(2): 10–13.
- XU Z, WANG Y F, LI S M, et al. Research status and prospect of biological sand filter for advanced treatment of tail water from sewage treatment plant [J]. Industrial Water & Wastewater, 2023, 54(2): 10–13 (in Chinese).
- [9] 岳冬梅, 赵东华, 吴耀, 等. 我国尾水湿地的应用现状分析[J]. 中国给水排水, 2024, 40(8): 22–27.
- YUE D M, ZHAO D H, WU Y, et al. Constructed wetlands for treatment of effluent from wastewater treatment plants in China [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(8): 22–27 (in Chinese).
- [10] LIU X, XU J, LIU Y, et al. Stable and efficient sulfamethoxazole and phosphorus removal by an electrolysis-integrated bio-rack constructed wetland system [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 425: 130582.
- [11] ZHAO Q, HU Z, ZHANG J, et al. Determination of the fate of antibiotic resistance genes and the response

- mechanism of plants during enhanced antibiotic degradation in a bioelectrochemical-constructed wetland system [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 451: 131207.
- [12] CHEN H, AILIJIAN N, CUI Y, et al. Enhanced removal of PPCPs and antibiotic resistance genes in saline wastewater using a bioelectrochemical-constructed wetland system [J]. *Environmental Research*, 2024, 260: 119794.
- [13] CHEN J, HE L X, CHENG Y X, et al. Trace analysis of 28 antibiotics in plant tissues (root, stem, leaf and seed) by optimized QuEChERS pretreatment with UHPLC-MS/MS detection [J]. *Journal of Chromatography B*, 2020, 1161: 122450.
- [14] ORIMOLADE B O, OLADIPO A O, IDRIS A O, et al. Advancements in electrochemical technologies for the removal of fluoroquinolone antibiotics in wastewater: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 881: 163522.
- [15] QIU B, HU Y, LIANG C, et al. Enhanced degradation of diclofenac with Ru/Fe modified anode microbial fuel cell: kinetics, pathways and mechanisms [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 300: 122703.
- [16] XUE W, WU C, XIAO K, et al. Elimination and fate of selected micro-organic pollutants in a full-scale anaerobic/anoxic/aerobic process combined with membrane bioreactor for municipal wastewater reclamation [J]. *Water Research*, 2010, 44(20): 5999-6010.
- [17] DENG Y Y, ZOU M Y, LIU W, et al. Antibiotic removal and microbial response mechanism in constructed wetlands treating aquaculture wastewater containing veterinary drugs [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 394: 136271.
- [18] 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 等. 人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 [J]. *环境科学*, 2016, 37(9): 3430-3437.
- LIU J, YI N K, XIONG Y J, et al. Effect of constructed wetland configuration on the removal of nitrogen pollutants and antibiotics in aquaculture wastewater [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(9): 3430-3437 (in Chinese).
- [19] 沈根祥, 周海花, 罗启仕, 等. 直流电场对根际土壤微生物群落的影响及其机理 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(3): 920-925.
- SHEN G X, ZHOU H H, LOU Q S, et al. Effect of direct current electric field on inter-root soil microbial community and its mechanism [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 920-925 (in Chinese).
- [20] TIAN Z, PALOMO A, ZHANG H, et al. Minimum influent concentrations of oxytetracycline, streptomycin and spiramycin in selecting antibiotic resistance in biofilm type wastewater treatment systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 720: 137531.
- [21] ZHANG J, YUE Z, ZHOU Z, et al. Key microbial clusters and environmental factors affecting the removal of antibiotics in an engineered anaerobic digestion system [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 348: 126770.
- [22] HUANG W, ZHOU J, HU Q, et al. Improved methanogenesis in anaerobic wastewater treatment by magnetite@polyaniline ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$) composites [J]. *Chemosphere*, 2022, 296: 133953.
- [23] WANG Y, LIU X, HUANG C, et al. Antibiotic resistance genes and virulence factors in the plastsphere in wastewater treatment plant effluent: health risk quantification and driving mechanism interpretation [J]. *Water Research*, 2025, 271: 122896.
- [24] GUO N, ZHANG H, WANG L, et al. Metagenomic insights into the influence of pH on antibiotic removal and antibiotic resistance during nitrification: regulations on functional genus and genes [J]. *Environmental Research*, 2024, 261: 119689.
- [25] ABUDUREHEMAN M, AILIJIAN N, MAMAT A, et al. Enhanced biodegradation of fluoroquinolones and the changes of bacterial communities and antibiotic-resistant genes under intermittent electrical stimulation [J]. *Environmental Research*, 2023, 219: 115127.
-
- 作者简介:** 彭洁(1996—), 女, 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要研究方向为人工湿地处理技术及抗生素类污染物去除。
- E-mail:** 107552305082@stu.xju.edu.cn
- 收稿日期:** 2025-07-20
- 修回日期:** 2025-08-12

(编辑: 李德强)