

徐超,刘云根,杨思林,等.光催化/生物转盘对人工湿地微生物及酶的影响[J].环境科学与技术,2025,48(1):92-100. Xu Chao, Liu Yungen, Yang Silin, et al. Effect of photocatalytic/biological turntable on microorganisms and enzymes in constructed wetlands[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(1): 92-100.

光催化/生物转盘对人工湿地微生物及酶的影响

徐超¹, 刘云根^{2*}, 杨思林², 郭凤倩¹,
赵兴杰², 殷发金², 文明发³

(1. 西南林业大学生态与环境学院(湿地学院), 云南 昆明 650224;
2. 云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室, 云南 昆明 650224;
3. 云南德源绿创环保科技有限公司, 云南 文山 663099)

摘要:为提高垂直流人工湿地对农村生活污水的净化效率,该研究构建了生物膜耦合光催化强化垂直流人工湿地(BP-VFCW)及生物膜耦合生物转盘强化垂直流人工湿地(BRC-VFCW),以生物膜耦合垂直流人工湿地(B-VFCW)作为对照,探究对污水中总磷(TP)、氨氮(NH₄⁺-N)、化学需氧量(COD)的去除效果,对基质酶(磷酸酶(NEP)、脲酶(UA)、脱氢酶(DHA))、植物抗氧化酶系统(超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT))及丙二醛(MDA)含量和微生物群落的影响。结果表明:(1)在相同的水力停留时间下,对污水中TP、NH₄⁺-N、COD的去除效率为BRC-VFCW>BP-VFCW>B-VFCW, BP-VFCW分别提高了30.42、12.86、11.44个百分点, BRC-VFCW提高了58.36、17.00、15.80个百分点。(2)不同深度基质酶含量大小为:0~30 cm>30~60 cm>60~90 cm, NEP、UA、DHA含量大小均表现为BRC-VFCW>BP-VFCW>B-VFCW,说明生物转盘和光催化的加入可以提高垂直流人工湿地的基质酶活性。(3)B-VFCW、BP-VFCW和BRC-VFCW 3个装置中CAT、SOD、POD的活性及MDA含量差异较小,表明在垂直流人工湿地加入光催化和生物转盘后,对湿地植物(茭草)生长没有影响。(4)BP-VFCW和BRC-VFCW都提高了绿弯菌门和酸杆菌门的相对丰度,但是BP-VFCW中变形菌门减少,可见光催化影响人工湿地中变形菌门生长。该研究可为污水治理技术的改进提供新的思路。

关键词:光催化; 生物转盘; 垂直流人工湿地; 基质酶; 抗氧化酶; 微生物

中图分类号:X703 文献标志码:A doi:10.19672/j.cnki.1003-6504.1343.24.338 文章编号:1003-6504(2025)01-0092-09

Effect of Photocatalytic/Biological Turntable on Microorganisms and Enzymes in Constructed Wetlands

XU Chao¹, LIU Yungen^{2*}, YANG Silin², GUO Fengqian¹,
ZHAO Xingjie², YIN Fajin², WEN Mingfa³

(1. College of Ecology & Environment(College of Wetlands), Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;
2. Key Laboratory of Ecological Environment Evolution and Pollution Control in Mountainous & Rural Areas of Yunnan Province, Kunming 650224, China;
3. Yunnan Deyuan Lyuchuang Environmental Protection Technology Co., Wenshan 663099, China)

Abstract: In order to improve the purification efficiency of vertical flow constructed wetland on rural domestic sewage, biofilm-coupled photocatalytic reinforced vertical flow constructed wetland (BP-VFCW) and biofilm-coupled bio-turntable reinforced vertical flow constructed wetland (BRC-VFCW) were constructed, using a biofilm-coupled vertical flow constructed wetland (B-VFCW) as a control, the removal effect of total phosphorus (TP), ammonia nitrogen NH₄⁺-N and chemical oxygen demand COD in sewage was explored, to evaluate the effects on matriceases (phosphatase (NEP), urease (UA), dehydrogenase (DHA)), plant antioxidant enzyme system (superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT)), and MDA content and microbial community. The results show that under the same hydraulic residence time, the removal efficiency of TP, NH₄⁺-N, COD, BRC-VFCW > BP-VFCW > B-VFCW, BP-VFCW increased by 30.42, 12.86, 11.44 percentage point, BRC-VFCW by 58.36, 17.00 and 15.80 percentage point, respectively. The matrix enzyme content of different

depths is: 0~30 cm > 30~60 cm > 60~90 cm, NEP, UA and DHA content are BRC-VFCW > BP-VFCW > B-VFCW, indicating that the addition of biological turntable and photocatalysis can improve the matrix enzyme activity of vertical flow constructed wetland. The differences in the activity of CAT, SOD, POD and MDA content in B-VFCW, BP-VFCW and BRC-VFCW are relatively small, indicating that there was no effect on the growth of wetland plants (*Zizania latifoli*) after the addition of photocatalysis and biological rotary tables in the vertical flow constructed wetland. BP-VFCW and BRC-VFCW increased the relative abundance of Chloroflexi and Acidobacteria, but BP-VFCW reduced Proteobacteria, and visible photocatalysis affects Proteobacteria growth in constructed wetlands. This study can provide a new idea for the improvement of sewage treatment technology.

Key words: photocatalysis; biological turntable; vertical flow constructed wetland; matrix enzymes; antioxidant enzymes, microorganisms

垂直潜流人工湿地(vertical flow constructed wetland, VFCW)由于占地面积小和去除污染物高效等特点,近年来在污水处理中得到了广泛应用^[1,2]。其主要通过湿地植物的吸收富集、基质吸附和过滤,以及微生物的硝化和反硝化等一系列连续过程,实现污水中氮、磷、有机物等污染物的高效去除^[3-5]。湿地植物通过其根系和叶片直接吸附水中的污染物,也可以间接地为微生物提供养分,促进其生长^[6,7]。人工湿地中基质酶是污水净化过程中的关键,例如,脲酶和磷酸酶能显著促进水中氮、磷的转化和分解,脱氢酶在有机质脱氢反应中起到传递氢的作用,能够加速污染物的去除^[8]。

目前,为了提高人工湿地水质净化效率,学者们将一些现有污水处理技术结合到人工湿地系统中,例如微生物燃料电池技术^[9]、微电场技术^[10]及其他技术等^[10,11]。光催化氧化技术最早由 Fujishima 等^[12]提出,在一定的光照(太阳光、紫外光等)条件下,通过催化剂的作用,电子被激发进入导带,半导体光催化材料产生的电子空穴对与吸附在催化剂表面的溶解氧和水等物质发生反应,产生的羟基自由基可将水中污染物降解成二氧化碳、水或其他无机物^[13]。郑淑君等^[14]通过构建光催化耦合垂直流人工湿地系统,探究其对低污染水中污染物的去除效果,结果表明光催化耦合垂直流人工湿地系统比单一垂直流人工湿地去除率提高了 17.73%。Li 等^[15]研究表明,光催化人工湿地组合法相比单一的人工湿地对废水中的 COD 的去除效果提升了 36%,且对植物的生长不会产生抑制作用。目前,生物转盘是一种低能耗且能提供丰富氧环境的生物污水处理技术,它具有运行简单及处理高效等特点,比较适用于农村生活污水的治理^[16]。彭丽萍等^[17]构建了生物转盘耦合垂直流人工湿地系统,相对于单一的垂直流人工湿地对污染物去除效果,COD、NH₄⁺-N、TP 分别提高了 12.32、25.51、49.34 个百分点。李发站等^[18]以调节池为 A 段、生物转盘为 O 段组成 A/O 工艺处理生活污水,COD、NH₄⁺-N、TN 的去除率分别能达到 85%、90% 和 60%,出水水质满足《农村生活污水

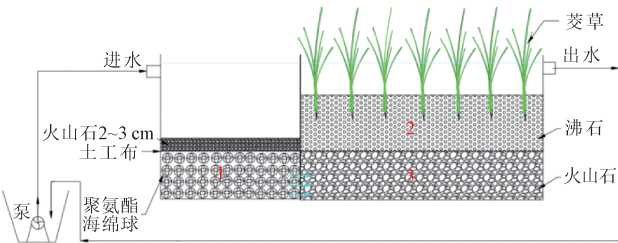
处理设施水污染物排放标准》一级 A 排放标准。

上述表明,光催化和生物转盘耦合到人工湿地中不仅可以提高净化效率,还不会影响湿地植物的生长。但是这 2 项技术对人工湿地中基质、植物及微生物三者的影响研究较少。该研究以本课题组自主研发的生物膜耦合垂直流人工湿地为基础,采用光催化和生物转盘技术,构建新型的强化型人工湿地,关注 2 种强化型垂直流人工湿地对水体中污染物的去除效率,以及加入光催化和生物转盘后基质酶、植物的抗氧化物酶及微生物群落变化,以期为人工湿地耦合技术提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 垂直流人工湿地的构建

本研究共设计 3 套装置(图 1~3):生物膜耦合垂直流人工湿地(biofilm coupled vertical flow constructed wetland, B-VFCW)、生物膜耦合光催化强化垂直流人工湿地(biofilm coupled photocatalysis enhanced vertical flow constructed wetland, BP-VFCW)和生物膜耦合生物转盘强化垂直流人工湿地(biofilm coupled bio-rotary enhanced vertical flow constructed wetland, BRC-VFCW)。3 套装置材质均为不锈钢,尺寸为 2 m×1 m×1 m,底部开孔连通。前端(尺寸 0.7 m×1 m×1 m)以直径 10 cm 的聚氨酯海绵生物膜球为填料,填充至 80 cm;后端为垂直流人工湿地单元(尺寸 1.3 m×1 m×1 m),基质填料从上至下为沸石(粒径 1 cm)、火山石(3~4 cm),填料间用土工布相隔,并种植生长正常、株型大小基本一致的挺水植物茭草(*Zizania latifolia*),密度为 10 株/m²。B-VFCW 前端不加任何措施,BP-VFCW 前端放入紫外灯 15 盏(5 盏×3 行),波长 365 nm,功率 20 W。BRC-VFCW 前端嵌入生物转盘(直径 80 cm,厚度 30 cm),盘片浸没率为 40%,转速为 30 r/min。装置放置于西南林业大学校内,以污水厂调节池中的生活污水作为实验研究原水(进水),其水质参数如表 1。



注：1、2、3为微生物采样点。

图1 生物膜耦合垂直流人工湿地
Fig.1 The biofilm coupled vertical flow constructed wetland

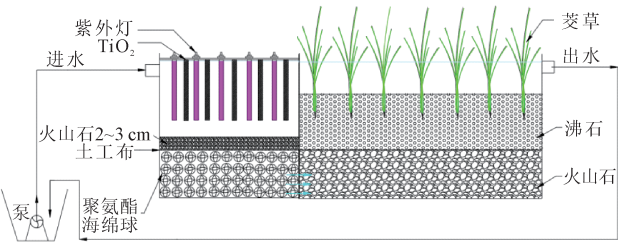


图2 生物膜耦合光催化强化垂直流人工湿地
Fig.2 The biofilm coupled photocatalysis enhanced vertical flow constructed wetland

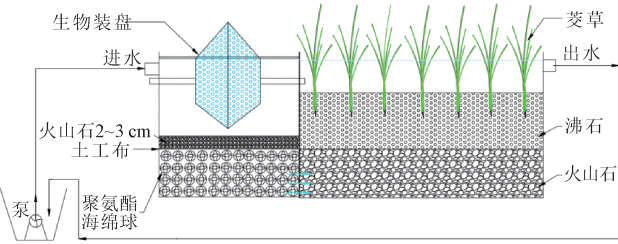


图3 生物膜耦合生物转盘强化垂直流人工湿地
Fig.3 The biofilm coupled bio-rotary enhanced vertical flow constructed wetland

表 1 实验进水水质

Table 1 Experimental feed water quality

水质指标	进水浓度/(mg·L ⁻¹)
COD	169.17~180.08
NH ₄ ⁺ -N	63.18~68.35
TP	6.10~6.20

1.2 启动与运行

采用循环式进水方式,进水负荷为 1.2 m³/(m²·d), 3 d(72 h)作为一个处理周期,每周处理水量 1 000 L,每隔 24 h 取一次样,共取样 3 次,取样时间固定为每天早上 09:00。实验测定前试运行 30 d,稳定运行状态后,进行取样分析。

1.3 样品分析

1.3.1 水样分析

稳定运行 30 d 后,加入原水进行实验,进水口、出水口设置取样点,水质分析主要采用标准分析方法^[9]:TP 采用钼酸铵分光光度法;NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法;COD 采用重铬酸钾微波消解法。

1.3.2 细菌群落分析

在实验末期进行微生物采样,设置 3 个微生物采样点(图 1):1 为前段生物膜填料混合样,2 为后端湿地沸石,3 为后端湿地火山石。将以上采集的样品置

于密封袋中带回实验室处理。分别在密封袋中取出 50 g 样品混匀后放入灭菌的锥形瓶中,加入没过样品的去离子水,通过超声清洗 5 min 后,收集到灭菌的离心管中,再将其放入离心机中离心 6 min 后倒掉上清液,取其沉淀保存于-80 ℃低温环境下,送至上海凌恩生物科技有限公司进行高通量测序分析。

1.3.3 基质酶分析

在实验末期进行基质采样,用五点取样法采集湿地中 0~30、30~60、60~90 cm 的基质,每层采集 5 个样混合为一个样。脱氢酶(DHA)、脲酶(UA)和磷酸酶(NEP)活性分别采用 TTC-比色法、苯酚钠比色法和磷酸苯二钠比色法测定^[20,21]。

1.3.4 植物抗氧化酶分析

在实验末期对植物采样,采用五点取样法对湿地植物进行采取,每个装置采集 5 株植物,用北京生物试剂盒对过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性及丙二醛(MDA)含量进行测定。

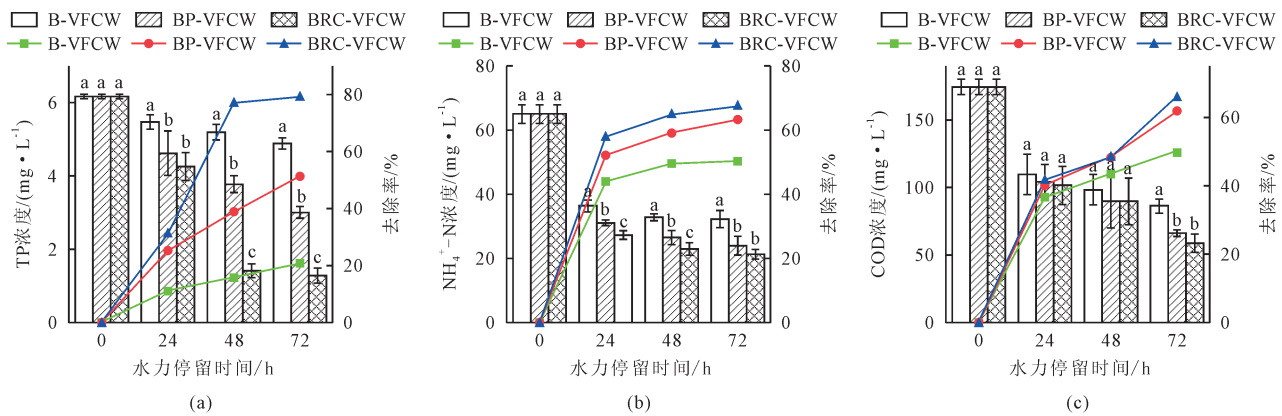
1.4 数据分析与制图

数据采用 Excel 2018 和 SPSS 22.0 软件进行分析,采用 Origin 2022 软件进行图形绘制,细菌群落结构的组成使用凌波微课平台出图。

2 结果与讨论

2.1 不同装置对污染物的去除效果

3 个装置对污染物的去除效果如图 4 所示。在相同的进水浓度下,对 TP、NH₄⁺-N、COD 的去除效果依次为:72 h>48 h>24 h,3 个装置 TP、NH₄⁺-N 浓度随着水力停留时间增加显著降低(P<0.05)。3 个装置对 TP 的去除效果在水力停留时间为 24 h 时分别为 11.24%、25.19%、30.96%,已经达到 72 h 时去除率的 1/2,在 48 h 时增加到 15.81%、38.75%、77.10%。B-VFCW 和 BP-VFCW 在 0~24 h 时对污染物去除效果较为明显,24 h 之后去除率缓慢上升,BRC-VFCW 在 24~48 h 区间去除效率最高,48~72 h 去除率变化不大,因此为了节约成本,处理污水时,BP-VFCW 水力停留时间为 24 h,BRC-VFCW 水力停留时间为 48 h 较佳。对 NH₄⁺-N 的去除效果在水力停留时间为 24 h 时分别为 44.12%、52.25%、58.04%,已经达到 72 h 时去除率的 80% 以上,24 h 之后去除率缓慢上升,BP-VFCW 和 BRC-VFCW 水力停留时间为 24 h 较佳。对 COD 的去除效果在水力停留时间为 24 h 时分别为 36.95%、40.13%、41.57%,已达最佳去除率的 60%,24 h 之后去除率缓慢上升。BRC-VFCW 和 BP-VFCW 在 0~24 h 时对污染物去除效果最明显,因此 BP-VFCW 和



注：图中不同小写字母表示在显著性水平为0.05差异显著，反之则差异不显著。下同。

图4 不同水力停留时间对污染物的去除效果
Fig.4 The removal efficiency of pollutants by different hydraulic retention times

BRC-VFCW 水力停留时间为 24 h 较佳。综上所述，去除率随着水力停留时间增加而提高，但是其增加趋势会逐渐变缓。这是由于湿地中 TP、 NH_4^+-N 、COD 的去除主要靠基质的吸附、植物的吸收及微生物的降解，当水力停留时间为 24 h 时，湿地中基质的吸附位点较多，此时基质可以大幅度吸附 TP 和 COD，微生物的硝化、反硝化作用开始降解 NH_4^+-N 。但是由于基质的比表面积有限，随水力停留时间的增加基质的吸附容量达到饱和，水体环境也逐渐呈现缺氧状态，不利于硝化和反硝化作用的发生，从而导致去除率变缓^[22]。

在相同的水力停留时间下，对污染物的去除效率均为 $\text{BRC-VFCW} > \text{BP-VFCW} > \text{B-VFCW}$ 。其中，对 TP 的净化效果尤为明显，B-VFCW 对 TP 的去除效率只有 20.85%，而 BP-VFCW 对 TP 的去除效率为 51.27%，提高了 30.42 个百分点，BRC-VFCW 提高了 58.36 个百分点。研究表明在相同的水力停留时间下，对污染物的去除效果 $\text{BP-VFCW} > \text{B-VFCW}$ ，与前人研究结果一致^[14,22]。对 TP、 NH_4^+-N 、COD 的去除效果，相对于 CK (B-VFCW) 来说，BP-VFCW 分别提高了 30.42、12.86、11.44 个百分点。已有研究表明光催化在降解

氨氮废水过程中，会生成羟基自由基促进氧化还原反应进程，反应的产物是小分子物质且无毒无害^[23]。BRC-VFCW 对污染物的去除效果最好，相对于 B-VFCW，对 TP、 NH_4^+-N 、COD 的去除效果分别提高了 58.36、17.00、15.80 个百分点，对于 BP-VFCW，BRC-VFCW 分别提高了 27.94、4.15、4.36 个百分点。垂直流人工湿地中加入生物转盘比光催化对水质净化效果略好，原因可能是生物转盘属于生物措施，不会对人工湿地中的基质及微生物造成负面影响。研究表明生物转盘可以提高对污染物的去除效果，本研究结果与彭丽萍等^[17]研究结果相同。张尊举等^[24]结合生物转盘与生物滤池工艺特点构建出填料生物转盘，该装置可提高对污水的净化效率。

2.2 不同装置对湿地系统的酶促效应

2.2.1 湿地基质中酶活性促进效应

基质酶活性与污染物去除效率有关(图 5)，NEP 能够将水中有有机磷化合物水解，可作为湿地磷去除效果的评价指标；UA 是一种酰胺酶，能够将尿素水解生成氨和二氧化碳，可作为湿地氮去除效果评价指标；DHA 能够促进有机物质的脱氢，主要参与有机物的好氧降解，DHA 活性能够表示微生物氧化降解有

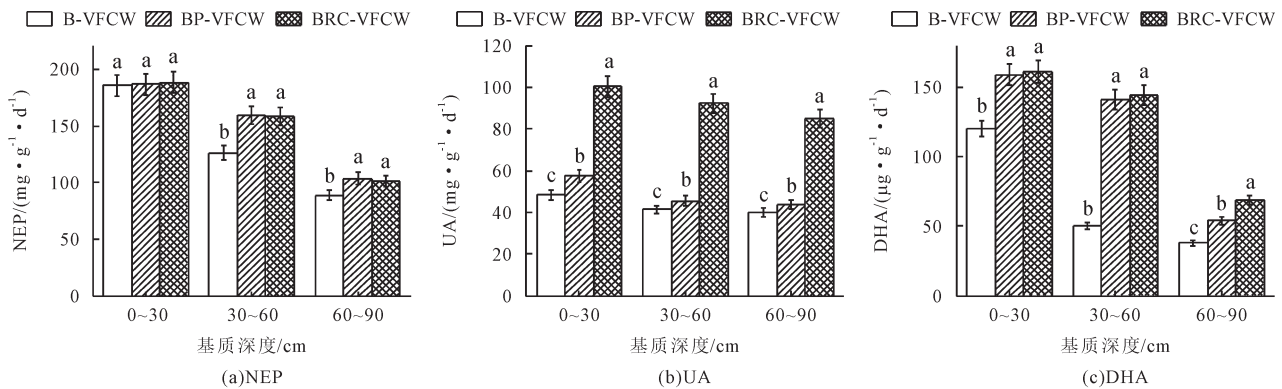


图5 基质酶活性变化
Fig.5 Changes in matrix enzyme activity

机物的能力^[21]。从图5可以看出,NEP、UA、DHA这3种酶都随基质深度的增加而降低,规律表现如下:0~30 cm>30~60 cm>60~90 cm,这与其他学者研究结果相同,基质酶活性随着深度的加深而降低^[25-27],表明装置对污水的净化主要集中在湿地的上层(0~30 cm)。由于湿地植物茭草的大量生长,密度得到改善从而提升自身光合作用,增加了上层区域的溶解氧含量,进而提高了基质酶活性。张宝军等^[28]研究发现上层酶活性值显著高于其他2层的酶活性,再次表明上层基质酶在污染物的去除中发挥着重要作用。3种酶活性基本均表现为BP-VFCW、BRC-VFCW显著高于B-VFCW ($P<0.05$),其中,BRC-VFCW中UA含量远远大于BP-VFCW及B-VFCW,这可能与BRC-VFCW对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 高效去除有关,同时为湿地中的微生物及植物提供足够的氮源。生物转盘和光催化的加入可提高垂直流人工湿地中的基质酶活性。

2.2.2 湿地植物的酶促效应

植物在人工湿地中可间接促进微生物的活动,在微生物的帮助下,分泌物中的胞外酶能够分解有机污染物,从而促进人工湿地污染物的去除。植物中SOD、POD和CAT是3个最主要的保护酶,在外界环境胁迫下,植物启动抗氧化防御系统以保护细胞正常

的代谢活动,例如持续的低温或高温,在高紫外辐射条件下,植物的清除能力会减弱,而累积过量的活性氧也会对植物的防御系统造成损伤,从而使膜脂过氧化^[29]。不同装置中湿地植物CAT、SOD、POD活性及MDA含量如图6所示。从图6(a)可知CAT活性大小为B-VFCW>BP-VFCW>BRC-VFCW,且存在显著差异($P<0.05$)。SOD能催化植物体内的超氧阴离子自由基($\text{O}_2^{\cdot-}$),发生歧化反应生成 H_2O_2 和 O_2 ,POD能催化 H_2O_2 分解其他底物,从而清除代谢过程产生的活性氧^[29]。从图6(b)可知,SOD活性与对照相比(B-VFCW),BP-VFCW和BRC-VFCW使植物叶片SOD活性降低。从图6(c)可知,POD活性活性大小为B-VFCW>BP-VFCW>BRC-VFCW。植物在胁迫环境下容易发生膜脂过氧化作用,其中MDA含量可以反映出细胞膜脂过氧化的程度以及对逆境条件的耐受能力的大小^[30]。从图6(d)可知,向垂直流人工湿地加入光催化和生物转盘后,湿地植物茭草的MDA含量下降。综上所述,相对于B-VFCW,BP-VFCW和BRC-VFCW中CAT、SOD、POD的活性及MDA的含量差异较小,表明在垂直流人工湿地加入光催化和生物转盘后,不会对湿地植物造成胁迫,影响湿地植物生长。

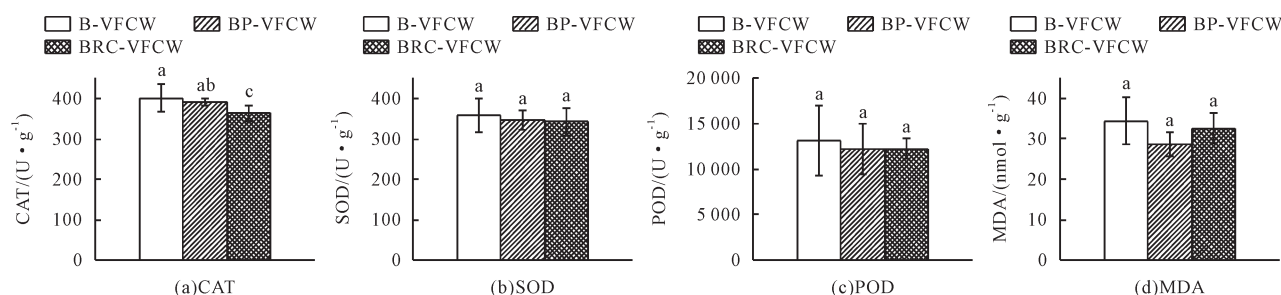


图6 不同装置CAT、SOD、POD活性及MDA含量
Fig.6 Activities of CAT, SOD, POD and MDA content in different devices

2.3 不同装置对湿地微生物的影响

由图7(a)可知,B-VFCW中优势菌门为变形菌门(Proteobacteria, 42.54%)、绿弯菌门(Chloroflexi, 19.54%)、拟杆菌门(Bacteroidota, 16.57%)、热脱硫杆菌门(Desulfobacterota, 6.27%)、酸杆菌门(Acidobacteriota, 2.60%)、放线菌门(Actinobacteriota, 2.67%)、厚壁菌门(Firmicutes, 2.62%)、酸杆菌门(Patescibacteria, 1.24%)、SAR324 clade(1.11%)、硝化螺旋菌门(Nitrospirota, 0.89%)。相对于B-VFCW,BP-VFCW中拟杆菌门和绿弯菌门分别增加了3.85%、11.50%,与田庆文等^[31]研究结果一致。拟杆菌门是专性厌氧细菌,其大多数菌种属于常见的反硝化细菌,有助于含氮物质的利用及大分子物质水解等^[32]。绿弯菌门是不产氧光合细菌,可促进有机物的降解^[33]。由图7(b)可知,

BP-VFCW还增加了纤绳菌属(*Leptolinea*, 4.78%)、长绳菌属(*Longilinea*, 2.12%)、厌氧绳菌属(*Anaerolinea*, 1.92%)及新鞘氨醇菌属(*Novosphingobium*, 0.46%)。长绳菌属和厌氧绳菌属都能够代谢多种碳水化合物,将大分子物质转化为小分子物质,为其他微生物提供营养物质,从而增强系统的脱氮效果^[34]。*Novosphingobium*属于 α -变形菌纲,可以参与氨的代谢,对污染物氨氮的去除起着重要作用^[35]。由图7(c)可知,BP-VFCW中Blastocatellales、Blastocatellaceae、Blastocatellia、奇异球菌门(Deinococcota)、异常球菌纲(Deinococci)、异常球菌目(Deinococcales)的丰度显著高于B-VFCW和BRC-VFCW,可见光催化加入到垂直流人工湿地中可显著增加Blastocatellales和Deinococcota两大细菌群落。Palau等^[36]采用光催

化-生物过滤集成技术对甲苯进行去除,发现微生物分布均匀,且增加了微生物量。Dong等^[37]构建了以B/Bi₃O₄Cl为光催化剂的ICPB反应器,该反应器在降解CIP的过程中使微生物的多样性得到了增加。相比于B-VFCW,BP-VFCW具有更高的碳、氮、磷去除率,这可能是由于光催化的加入改变了湿地中的微生物群落结构,增加了参与脱氮与去除有机物过程的微生物丰度。Liu等^[38]利用石墨烯光催化探究对星云湖微生物群落的影响,研究发现石墨烯光催化不仅可以影响环境条件,还可以改变微生物群落结构和功能途径。

相对于B-VFCW,BRC-VFCW提高了绿弯菌门、酸杆菌门、骸骨细菌门及硝化螺旋菌门的相对丰度。酸杆菌门和绿弯菌门是基质中的优势菌群,且加快了有机物的降解速率^[39]。同时,骸骨细菌门可参与

N、S和Fe等循环,为污染物的去除提供了通道^[40]。硝化螺旋菌门属于亚硝酸盐氧化细菌,可将亚硝酸盐氧化成硝酸盐,对水中N的去除具有重要作用^[41]。由图7(b)可知,BRC-VFCW还提高了*Leptolinea*(0.54%)、*Longilinea*(0.64%)、丛毛单胞菌属(*Comamonas*,4.61%)、玫瑰单胞菌属(*Roseomonas*,0.66%)。*Comamonas*属于变形菌门,与反硝化作用有关。*Roseomonas*属于γ-变形菌纲,在硝化作用中起主要作用。图7(c)显示BRC-VFCW中纤细菌门(*Gracilibacteria*)、脱硫球茎菌属(*Desulfobulbus*)、脱硫棒菌科(*Desulfobulbaceae*)的丰度显著高于B-VFCW和BP-VFCW。生物转盘的加入显著增加了*Gracilibacteria*和*Desulfobulbaceae*两大细菌群落的丰富度。植物、基质和微生物共同担负着污染物的去除功能,构成了复杂的微生物群落结构,保障了系统良好的处理性能。

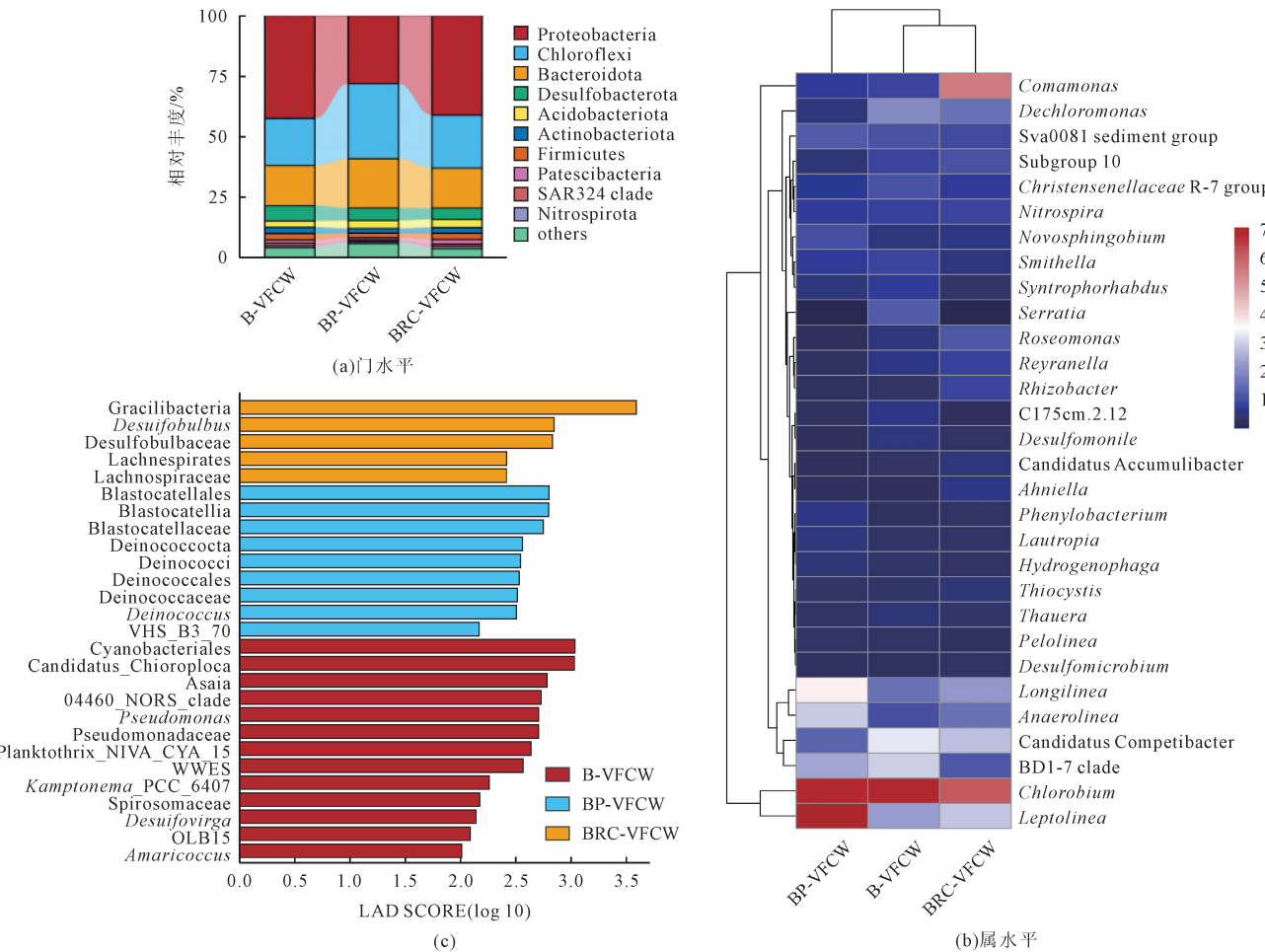


图7 不同装置门和属水平细菌群落相对丰度及差异分析
Fig.7 Relative abundance and divergence of bacterial communities at phylum and genus levels in different devices

3 结论

(1)在相同的水力停留时间下,实验装置对TP、NH₄⁺-N、COD的去除效率为BRC-VFCW>BP-VFCW>

B-VFCW,相对于B-VFCW,BP-VFCW分别提高了30.42、12.86、11.44个百分点,BRC-VFCW分别提高了58.36、17.00、15.80个百分点,光催化和生物转盘耦合垂直流人工湿地都可提高对污水的处理效果。

(2)通过湿地中的基质酶对比发现,不同深度基质酶含量大小为:0~30 cm>30~60 cm>60~90 cm,上层由于接触空气,增加了水中的溶解氧,植物的大量生长也促进了上层基质酶活性。NEP、UA、DHA含量大小均表现为BRC-VFCW>BP-VFCW>B-VFCW,表明生物转盘和光催化的加入对垂直流人工湿地的基质酶活性无影响,甚至还能提高基质酶活性。

(3)湿地植物(茭草)的抗氧化酶系统及MDA含量是植物应对外界胁迫所作出反应的直接结果,相对于CK(B-VFCW),BP-VFCW和BRC-VFCW都降低了CAT、SOD、POD的活性及MDA的含量,在垂直流人工湿地加入光催化和生物转盘后,没有影响湿地植物(茭草)生长。

(4)B-VFCW、BP-VFCW和BRC-VFCW中优势门排名前3的为变形菌门、绿弯菌门、拟杆菌门。BP-VFCW和BRC-VFCW都提高了绿弯菌门、酸杆菌门的相对丰度,但是BP-VFCW中变形菌门相对减少,可见光催化影响变形菌门生长,光催化和生物转盘的加入改变了细菌群落结构。

[参考文献]

- [1] 汤显强,黄岁樑. 人工湿地去污机理及其国内外应用现状[J]. 水处理技术, 2007,33(2):9-13.
Tang Xianqiang, Huang Suiliang. Mechanisms of pollutant removal in constructed wetlands and their applications both at home and abroad[J]. Technology of Water Treatment, 2007,33(2):9-13.
- [2] 李长虹,李伟斯,徐斌,等. 不同类型人工湿地处理富营养化水体的试验研究[J]. 西南农业学报, 2018,31(12):2697-2703.
Li Changhong, Li Weisi, Xu Bin, et al. Pilot-scale comparison research of different constructed wetland types to eutrophicated water[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018,31(12):2697-2703.
- [3] Xu S H, Zhou S C, Xing L Q, et al. Fate of organic micropollutants and their biological effects in a drinking water source treated by a field-scale constructed wetland[J]. Science of the Total Environment, 2019,682:756-764.
- [4] Flores L, García J, Pena R, et al. Constructed wetlands for winery wastewater treatment; a comparative Life Cycle Assessment[J]. Science of the Total Environment, 2019,659: 1567-1576.
- [5] 成水平,王月圆,吴娟. 人工湿地研究现状与展望[J]. 湖泊科学, 2019,31(6):1489-1498.
Cheng Shuiping, Wang Yueyuan, Wu Juan. Advances and prospect in the studies on constructed wetlands[J]. Journal of Lake Sciences, 2019,31(6):1489-1498.
- [6] Brix H. Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance[J]. Springer Netherlands, 1993.
- [7] Fan J L, Liang S, Zhang B, et al. Enhanced organics and nitrogen removal in batch-operated vertical flow constructed wetlands by combination of intermittent aeration and step feeding strategy[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2013,20(4):2448-2455.
- [8] 吴俊泽,王艳艳,李悦悦,等. 海水人工湿地系统脱氮效果与基质酶活性的相关性[J]. 海洋科学, 2019,43(5):36-44.
Wu Junze, Wang Yanyan, Li Yueyue, et al. Enzyme activity in constructed marine wetlands[J]. Marine Sciences, 2019,43(5):36-44.
- [9] Tao M N, Kong Y, Jing Z Q, et al. Denitrification performance, bioelectricity generation and microbial response in microbial fuel cell-constructed wetland treating carbon constraint wastewater[J]. Bioresource Technology, 2022, 363: 127902.
- [10] Si Z H, Wang Y H, Song X S, et al. Mechanism and performance of trace metal removal by continuous-flow constructed wetlands coupled with a micro-electric field[J]. Water Research, 2019,164:114937.
- [11] Wang G L, Yu G L, Chi T Y, et al. Insights into the enhanced effect of biochar on cadmium removal in vertical flow constructed wetlands[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 443:130148.
- [12] Fujishima A, Honda K. Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode[J]. Nature, 1972,238(5358):37-38.
- [13] 李俊生,徐嘉伦,王学峰,等. 光催化氧化技术处理氨氮废水的研究进展[J]. 应用化工, 2022,51(7):2154-2159.
Li Junsheng, Xu Jialun, Wang Xuefeng, et al. Research progress in the treatment of ammonia nitrogen wastewater by photocatalytic oxidation[J]. Applied Chemical Industry, 2022,51(7):2154-2159.
- [14] 郑淑君,王铁运,王妍,等. 光催化技术对垂直流人工湿地低污染水的净化效果[J]. 福建农林大学学报:自然科学版, 2023,52(2):265-271.
Zheng Shujun, Wang Tieyun, Wang Yan, et al. Purification effect of photocatalytic technology on low-polluted water in vertical flow constructed wetland[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2023,52(2):265-271.
- [15] Li D D, Chen F Z, Han J Q. A study of the treatment of high-salt chromium-containing wastewater by the photocatalysis-constructed wetland combination method[J]. Water Science and Technology, 2019,80(10):1956-1966.
- [16] Waqas S, Harun N Y, Sambudi N S, et al. SVM and ANN

modelling approach for the optimization of membrane permeability of a membrane rotating biological contactor for wastewater treatment[J]. *Membranes*, 2022,12(9):821.

[17] 彭丽萍,刘云根,杨思林,等. 生物转盘耦合垂直流人工湿地对生活污水的净化效果及其微生物群落结构特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2024,40(8):1091-1101.

Peng Liping, Liu Yungen, Yang Silin, et al. Purification effect of bio-rotary coupled vertical flow constructed wetland on domestic wastewater and characteristics of microbial community structure[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024,40(8):1091-1101.

[18] 李发站,冯尧元,高晓杰,等. 一体化生物转盘处理生活污水[J]. *水处理技术*, 2023,49(5):114-119.

Li Fazhan, Feng Yaoyuan, Gao Xiaojie, et al. Integrated biological rotary table for domestic sewage treatment[J]. *Technology of Water Treatment*, 2023,49(5):114-119.

[19] 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.

[20] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986.

Guan Songyin. *Soil Enzyme and Its Research Method*[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.

[21] 陈鸣,闫春妮,王瑶瑶,等. 潮汐流人工湿地除污效果和基质酶活性[J]. *江苏农业学报*, 2021,37(4):919-928.

Chen Ming, Yan Chunni, Wang Yaoyao, et al. Decontamination effect and substrate enzyme activities of tidal flow constructed wetland[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021,37(4):919-928.

[22] 熊烈鈔,马荣,刘云根,等. 磁场/光催化强化人工湿地净化生活污水的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2024,24(3):1301-1311.

Xiong Liechao, Ma Rong, Liu Yungen, et al. Experimental study on purification of domestic sewage by magnetic field/photocatalytic enhanced constructed wetlands[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024,24(3):1301-1311.

[23] 刘凯. 改性二氧化钛的制备及其光催化降解氨氮研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2022.

Liu Kai. Preparation of Modified Titanium Dioxide and Its Photocatalytic Degradation of Ammonia Nitrogen[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.

[24] 张尊举,董亚荣,王滕,等. 填料生物转盘对农村家庭生活污水的处理[J]. *水处理技术*, 2020,46(2):120-123.

Zhang Zunju, Dong Yarong, Wang Meng, et al. Treatment of rural domestic sewage by packing rotating biological contactor[J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(2): 120-123.

[25] 万忠梅,宋长春. 小叶章湿地土壤酶活性分布特征及其与活性有机碳表征指标的关系[J]. *湿地科学*, 2008,6(2):249-257.

Wan Zhongmei, Song Changchun. Vertical dynamics of soil enzyme activities and its relationship with active organic carbon indicators in *Calamagrostis angustifolia* wetland[J]. *Wetland Science*, 2008,6(2):249-257.

[26] Kong L, Wang Y B, Zhao L N, et al. Enzyme and root activities in surface-flow constructed wetlands[J]. *Chemosphere*, 2009,76(5):601-608.

[27] 聂大刚,王亮,尹澄清,等. 白洋淀湿地土壤酶活性空间分布与污染物关系研究[J]. *湿地科学*, 2008,6(2):204-211.

Nie Dagang, Wang Liang, Yin Chengqing, et al. Spatial distribution of soil enzyme activities and the relationship with pollutants in wetlands of Baiyangdian[J]. *Wetland Science*, 2008,6(2):204-211.

[28] 张宝军,白晓龙,何康林,等. 生物转盘土壤微生物及酶活性的分布状况[J]. *环境科学与技术*, 2007,30(9):26-27.

Zhang Baojun, Bai Xiaolong, He Kanglin, et al. Distribution status of soil microbes and enzyme activity in bio-salver[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007,30(9):26-27.

[29] 吴银娟,徐德福,管益东,等. 蚯蚓对人工湿地植物抗氧化酶活性的影响[J]. *环境科学与技术*, 2014,37(8):151-155.

Wu Yinjuan, Xu Defu, Guan Yidong, et al. Influence of earthworms on anti-oxidative enzyme activity of wetland plants in constructed wetland[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014,37(8):151-155.

[30] 郝建军,康宗利,于洋. 植物生理学实验技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.

Hao Jianjun, Kang Zongli, Yu Yang. *Experimental Technology of Plant Physiology*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.

[31] 田庆文,朱亚玮,房桂干,等. 光催化氧化-生物降解直接耦合处理桉木化机浆废水的研究[J]. *中国造纸*, 2023,42(8):114-121.

Tian Qingwen, Zhu Yawei, Fang Guigan, et al. Study on the treatment of *Eucalyptus* chemi-mechanical pulp wastewater by intimately coupled photocatalysis oxidation and biodegradation[J]. *China Pulp & Paper*, 2023,42(8):114-121.

[32] Hou L G, Li J, Liu Y. Microbial communities variation analysis of denitrifying bacteria immobilized particles[J]. *Process Biochemistry*, 2019,87:151-156.

[33] 李梦琪. 磁场强化人工湿地系统处理生活污水的效能与机制研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022.

Li Mengqi. Study on the Efficiency and Mechanism of Magnetic Field Enhanced Constructed Wetland System for Domestic Sewage Treatment[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022.

[34] 乔海兵,赵耀,赵德江,等. 活性砂反硝化滤罐深度脱氮潜能

中试研究[J]. 给水排水, 2023,59(2):23-29.

Qiao Haibing, Zhao Yao, Zhao Dejiang, et al. Pilot study on deep denitrification potential of active sand denitrifying filter tank[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(2): 23-29.

[35] 姚美辰,段亮,张恒亮,等. 辽河保护区人工湿地微生物群落结构及分布规律[J]. 环境工程技术学报, 2019,9(3):233-238.

Yao Meichen, Duan Liang, Zhang Hengliang, et al. Microbial community structure and distribution of constructed wetlands in Liaohe Conservation Area[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019,9(3):233-238.

[36] Palau J, Penya-Roja J M, Gabaldón C, et al. Effect of pre-treatments based on UV photocatalysis and photo-oxidation on toluene biofiltration performance[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2012,87(1):65-72.

[37] Dong Y L, Xu D Y, Zhang J, et al. Enhanced antibiotic wastewater degradation by intimately coupled B-Bi₂O₃Cl photocatalysis and biodegradation reactor: elucidating degradation principle systematically[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023,445:130364.

[38] Liu Q, Zhang H C, Chang F Q, et al. The effect of graphene photocatalysis on microbial communities in Lake Xingyun, southwestern China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022,29(32):48851-48868.

[39] Lin Y T, Lin Y F, Tsai I J, et al. Structure and diversity of soil bacterial communities in offshore islands[J]. Scientific Reports, 2019,9(1):4689.

[40] Tyagi I, Tyagi K, Chandra K, et al. Characterization of bacterial diversity in wastewater of Indian paper industries with special reference to water quality[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19(5): 3669-3684.

[41] 凌宇,赵远哲,王海燕,等. HRT 对 A/O-BF 处理低碳氮比农村生活污水脱氮的影响[J]. 环境科学研究, 2021,34(4): 927-935.

Ling Yu, Zhao Yuanzhe, Wang Haiyan, et al. Effects of on the nitrogen removal of A/O-BF for the treatment of rural domestic sewage with low C/N ratio[J]. Research of Environmental Sciences, 2021,34(4):927-935.