

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.07.003

强化型生态浮床净化富营养化水体的效能与机制

汪真^{1,2}, 蒋彬^{1,2}, 张澳^{1,2}

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 环境水利工程重庆市工程
实验室, 重庆 400074)

摘要: 传统生态浮床用于水体净化时,存在植物种类选择单一、填料效果不理想、去除污染物效率低以及系统稳定性差等局限。通过选择优势种浮床植物和Mg-Al改性玉米秸秆生物炭填料(新型填料MACSB)来改进传统生态浮床,以提升其对富营养化水体的修复效果。结果显示,MACSB填料提高了系统的磷利用率和抑藻能力,且对植物生长无显著影响。植物组合-MACSB填料复合强化型生态浮床表现最佳,对TN、TP、COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别达到78.41%、96.83%、72.16%和99.54%, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 积累情况也最为理想。高通量测序结果表明,引入优势种浮床植物组和MACSB填料均显著影响了水体微生物群落结构,并反映出各系统微生物群落结构的差异性。可见,通过改进生态浮床系统的设计,能够显著提升其对富营养化水体的修复效果。

关键词: 生态浮床; 富营养化水体; 改性生物炭; 抑藻能力

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)07-0017-07

Efficacy and Mechanism of Enhanced Ecological Floating Bed for Purification of Eutrophic Water Bodies

WANG Zhen^{1,2}, JIANG Bin^{1,2}, ZHANG Ao^{1,2}

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Engineering Laboratory of Environmental Hydraulic Engineering of Chongqing Municipal Development and Reform Commission, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Traditional ecological floating bed (EFB) has certain limitations when used for water purification, such as single plant species selection, unsatisfactory filling effect, low pollutant removal efficiency, and poor system stability. An enhancement of EFB was achieved by integrating dominant species and a novel Mg-Al modified corn straw biochar filler (MACSB), which significantly improved its efficacy in treating eutrophic water bodies. The MACSB filler not only improved phosphorus utilization and algae inhibition, but also did not adversely affect plant growth. The composite of plant combination and MACSB filler reached peak performance, with removal rates for TN, TP, COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ at 78.41%, 96.83%, 72.16% and 99.54%, respectively, while also achieving optimal $\text{NO}_3^-\text{-N}$ accumulation. High-throughput sequencing demonstrated that introducing dominant species and MACSB fillers markedly influenced the microbial community structure, highlighting distinct microbial profiles across different systems. Enhancements to the EFB design have significantly boosted its restoration capabilities.

Key words: ecological floating bed; eutrophic water body; modified biochar; algal inhibition ability

富营养化已成为全球普遍存在且严重的环境问题^[1]。传统的富营养化治理方法(如化学沉淀、机械疏浚和生物处理),尽管能在一定程度上缓解富营养化问题,但在效率和可持续性方面存在局限性。例如,化学沉淀方法虽然见效快,但可能带来二次污染;机械疏浚成本高且对生态环境有较大破坏;而传统生物处理方法则受限于微生物种类和环境条件,处理效果不稳定。

近年来,生态浮床(EFB)作为净化富营养化水体的一种有效方法受到了广泛关注^[2],它利用植物和微生物来吸收和分解污染物,具有成本低、环境友好等优点。然而,传统生态浮床在实际应用中也面临着植物种类选择单一、填料性能欠佳、对特定污染物去除效果不理想以及系统稳定性差等挑战。同时,生物炭在水体修复中的应用因其高吸附能力和改善水质的潜力而引起了大量关注^[3-4],但其在生态浮床系统中的具体应用和效果仍需进一步检验。

本研究旨在通过引入植物强化和填料强化两种主要改进策略来强化生态浮床系统的净化效果,为水体修复工程提供技术方案和实践指导。首先,优势植物组合的引入旨在增强生态浮床对富营养化水体中营养物质(如氮、磷)的吸收和分解能力,从而提高水质净化效果^[5-6]。其次,利用Mg-Al改性玉米秸秆生物炭(MACSB)填料的高效吸附性能,进一步增强系统对污染物的去除能力。

1 材料与方法

1.1 实验材料与装置

以玉米秸秆(CS)为原料制备Mg-Al改性玉米秸秆生物炭(MACSB),浮床植物采用再力花和风车草。实验用水采用自来水作为基底,并按比例加入重庆交通大学校内富营养化程度较高的某景观水,以补充微生物群落和藻类。分别使用 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 、无水葡萄糖调节水样的TN、TP和COD。此外,加入一定量的水溶性微量元素肥料(主要包含铁、锰、锌、铜、硼和钼等植物生长所必需的微量元素),以防止植物生长受限。微量元素用量经过严格控制,以确保不会对水质产生显著影响,避免对实验结果造成干扰。所有水箱内的水质保持一致。

玉米秸秆经去除杂质、风干、粉碎,在500℃缺氧条件下高温裂解2.5 h后冷却至25℃,制得黑色粉末状玉米秸秆生物炭(CSB);然后,采用金属盐溶液改性,主要包括盐酸活化、 MgCl_2 和 AlCl_3 混合溶液浸渍、洗涤及真空干燥,从而得到Mg-Al改性玉米秸秆生物炭(MACSB)。以制备的MACSB作为主要原料,配以标准P. O42. 5型水泥作为黏连剂,混合后手工挤压造粒,风干至质量恒定后制得MACSB填料。生物炭的改性和填料制备过程共耗时约23 d,制备量为2.3 kg。

共设置4组实验装置,分别为植物组合生态浮床系统(PEFB)、MACSB填料生态浮床系统(FEFB)、植物组合-MACSB填料复合强化型生态浮床系统(PFEFB)以及空白对照组(见图1)。浮床植物组固定在浮床结构上,然后放入装有模拟富营养化水体的水箱中。对于FEFB和PFEFB系统,各加入760 g的MACSB填料,分成4部分,每部分190 g,并用孔径为3 mm的尼龙网装载后,悬挂在浮力载体的四个角处,浸没至水深的一半。

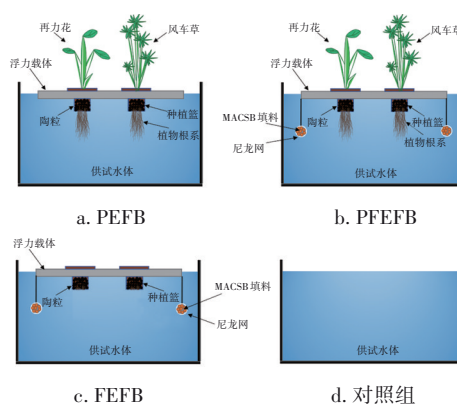


图1 实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

1.2 水质指标及植物生长情况测定

在实验过程中,需要检测的水质指标包括DO、TN、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、COD以及Chl-a,植物生长情况则包括最大株高(H_{\max})、最大根长(L_{\max})和鲜质量(M),均依照《水和废水监测分析方法》(第4版)测定。除DO和Chl-a外,所有水质指标均测量3次,每株植物的生长情况均测定3次并取均值。根

据实验前后植物相应指标测定值得到增长率。

1.3 微生物分析方法

实验结束后利用多点取样法,从各系统采集1 L水样,使用0.22 μm滤膜抽滤,并将滤膜送至上海美吉生物医药科技有限公司进行微生物测序,每个系统采集3组重复样品。提取微生物样品DNA,用515F和926R引物扩增16S rRNA基因V4-V5区,PCR反应体系为20 μL,电泳检测后进行荧光定量。对Illumina测序数据进行拼接、过滤、OTU聚类及分类学分析,从而获得其多样性和群落结构。

2 结果与分析

2.1 浮床植物生长情况

表1列出了PEFB和PFEFB系统内再力花和风

车草的生长情况。实验期间,两系统内所有再力花和风车草的存活率均为100%。由于高温天气,再力花出现部分黄叶和卷叶现象,而风车草整体生长良好,仅少数叶尖有黄叶,显示风车草对高温的耐受能力强于再力花。实验中,PFEFB系统的再力花长出新苗并快速生长,实验结束时所有风车草都长出了新根,而再力花的新根数量较少。此外,所有再力花和风车草的最大株高、最大根长和鲜质量均显著增加($P<0.05$)。由表1计算得到的各指标增长率显示,PEFB和PFEFB系统中再力花的增长率显著高于风车草,然而,对比两系统中再力花和风车草的总体生长情况,差异不明显,表明MACSB填料的加入对两种植物的生长无显著影响。

表1 PEFB与PFEFB的植物生长情况

Tab.1 Growth conditions of plants in PEFB and PFEFB systems

项目		再力花			风车草		
		H_{max}/cm	L_{max}/cm	M/g	H_{max}/cm	L_{max}/cm	M/g
PEFB	实验前	48.60+47.40	20.00+20.00	40.80+37.40	43.50+45.60	20.00+20.00	36.50+37.80
	实验后	79.60+77.50	29.80+28.60	51.40+47.50	70.00+66.00	25.60+24.30	45.10+44.60
PFEFB	实验前	51.60+48.80	20.00+20.00	41.40+39.60	45.00+44.30	20.00+20.00	37.00+35.60
	实验后	82.30+84.50	30.10+29.50	54.30+55.90	75.00+67.40	27.60+24.90	46.00+44.70

注：有植物系统种植再力花和风车草各2株，“+”前后为其对应指标值。

2.2 各系统水质因子变化情况

2.2.1 DO

水体DO与植物生长和微生物代谢活性密切相关,是水生生态平衡的重要指标。经测定,各系统初始DO浓度为5.65~6.89 mg/L;PEFB和对照组在前10 d内迅速下降,分别在10~18 d和10~16 d内保持平衡;FEFB和PFEFB在0~8 d下降,并在10~16 d内保持平衡。PEFB、FEFB、PFEFB和对照组的最低值分别出现在第18天、第16天、第14天和第12天,分别为1.28、0.59、0.30和1.32 mg/L。随后,PEFB系统在18~36 d迅速回升,并在实验结束时达到6.97 mg/L。FEFB、PFEFB系统和对照组在16~20 d迅速上升,随后缓慢回升,实验结束时分别为7.51、6.35和8.30 mg/L。

2.2.2 TN

各系统TN浓度及其平均去除率随时间的变化见图2。相关性分析表明,4个系统的TN浓度均呈显著线性下降(r 分别为-0.973、-0.941、-0.962、-0.891, $P<0.05$)。初始TN浓度为8.47~8.63 mg/L,实验结束时下降至1.83~4.36 mg/L。在0~4 d,

FEFB和PFEFB系统对TN的去除效果最佳。第16天时,PEFB系统的TN去除率最高,达53.67%。28 d后PFEFB系统表现最佳,去除率为73.45%。实验结束时,PFEFB、PEFB、FEFB、对照组的TN去除率依次为78.41%、69.79%、56.31%、48.72%,表明优势植物和改性生物炭填料能增强对氮的去除能力,从而提高了整体净化效率。

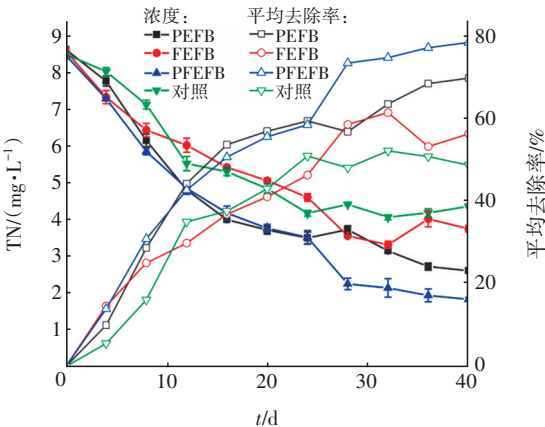


图2 各系统TN浓度及其平均去除率变化

Fig.2 Changes in TN concentration and average removal rate in each system

2.2.3 TP

各系统TP浓度及其平均去除率随时间的变化见图3。相关性分析表明,PEFB、FEFB、PFEFB及对照组的TP浓度与实验时间呈显著负相关(r 分别为 -0.967 、 -0.964 、 -0.991 、 -0.941 , $P < 0.05$),即TP浓度随时间显著下降。起初各系统TP浓度为 $1.51 \sim 1.55 \text{ mg/L}$,实验结束时降低至 $0.048 \sim 1.21 \text{ mg/L}$ 。在 $0 \sim 12 \text{ d}$ 对照组的TP浓度缓慢下降,12~16 d略有回升,之后持续下降,去除率为 21.40% 。在 $0 \sim 16 \text{ d}$,PEFB系统的TP浓度下降趋势与对照相似,但降幅更大,至第12天时去除率为 21.10% ;在 $16 \sim 32 \text{ d}$,TP浓度持续下降,实验结束时去除率为 43.83% 。在 $0 \sim 8 \text{ d}$,FEFB和PFEFB系统的TP浓度迅速下降,第8天时去除率分别为 66.73% 和 70.90% ;在 $8 \sim 32 \text{ d}$ 降幅趋缓,至第32天时去除率分别达到 95.35% 和 96.43% ;32 d后趋于平衡,实验结束时去除率分别为 93.93% 和 96.83% 。PFEFB系统对TP的去除效果最好,这可能归因于优势植物和MACSB填料的共同作用。

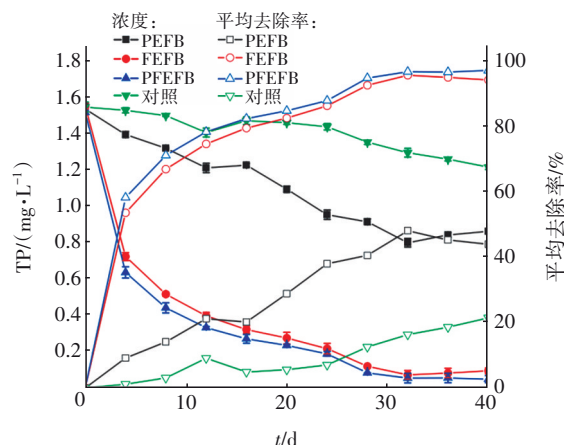


图3 各系统TP浓度及其平均去除率变化

Fig.3 Changes in TP concentration and average removal rate in each system

2.2.4 NH_4^+-N

各系统 NH_4^+-N 浓度及其平均去除率随时间的变化见图4。 NH_4^+-N 初始浓度为 $6.98 \sim 7.30 \text{ mg/L}$,实验结束时降至 $0.009 \sim 0.032 \text{ mg/L}$ ($P < 0.05$),平均去除率均超过 99.5% 。在 $0 \sim 20 \text{ d}$,PEFB系统和对照组的 NH_4^+-N 浓度迅速下降,去除率接近 100% ,随后略有回升但变化较小。对照组 NH_4^+-N 浓度的下降主要通过微生物的硝化反应实现。FEFB和PFEFB系统对 NH_4^+-N 的去除速率更快,第12天就分别达

到 80.74% 和 79.14% ,高于PEFB和对照组的 49.07% 和 68.62% 。不同系统的净化效果存在差异,可能与种植优势植物和投加改性生物炭有关。

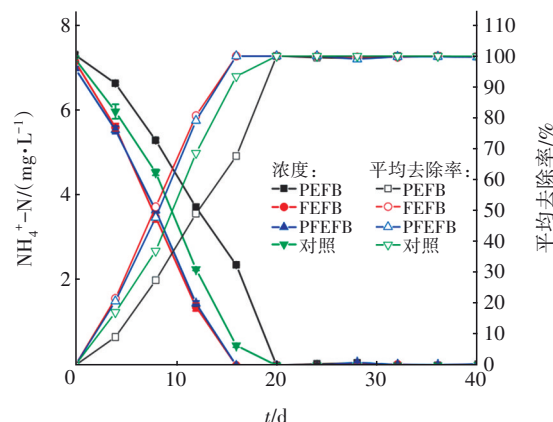


图4 各系统 NH_4^+-N 浓度及其平均去除率变化

Fig.4 Changes in NH_4^+-N concentration and average removal rate in each system

2.2.5 NO_3^--N

各系统 NO_3^--N 浓度及其平均去除率随时间的变化见图5。相关性分析表明, NO_3^--N 含量随时间呈显著线性增长(r 分别为 0.900 、 0.943 、 0.932 、 0.855 , $P < 0.05$)。 NO_3^--N 初始浓度为 $0.58 \sim 0.68 \text{ mg/L}$,实验结束时PFEFB、PEFB、FEFB、对照组的浓度分别为 1.17 、 2.09 、 2.17 、 3.09 mg/L 。

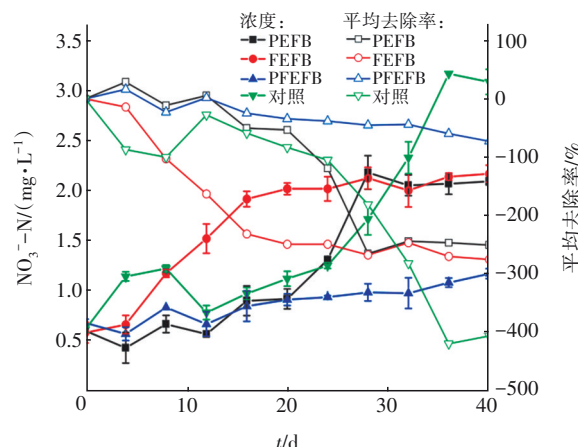


图5 各系统 NO_3^--N 浓度及其平均去除率变化

Fig.5 Changes in NO_3^--N concentration and average removal rate in each system

在 $0 \sim 16 \text{ d}$,FEFB系统的 NO_3^--N 先迅速上升至 1.91 mg/L ,随后增幅减缓,至第28天时稳定在 2.12 mg/L 。在 $0 \sim 8 \text{ d}$,对照组的 NO_3^--N 从 0.61 mg/L 升至 1.22 mg/L ,8~12 d降至 0.78 mg/L ,之后逐渐增至

3.17 mg/L并稳定。在0~20 d,PEFB系统 NO_3^- -N缓慢增长至0.91 mg/L,20~28 d增至2.18 mg/L后稳定。PFEFB系统的 NO_3^- -N积累最少,初始为0.66 mg/L,实验结束时为1.17 mg/L,可能是由于植物吸收和MACSB填料的吸附作用。 NO_3^- -N的积累主要源于氨氮的好氧硝化转化,所有系统的氨氮在0~20 d内已经基本完全去除,随后 NO_3^- -N增加可能是因为部分氨氮经不完全的硝化反应致使一部分亚硝态氮积累,在20 d后系统DO浓度回升再经硝化细菌氧化为 NO_3^- -N。

2.2.6 COD

各系统COD浓度及其去除率随时间的变化见图6。4个系统的COD浓度随时间呈显著下降趋势(r 分别为-0.982、-0.977、-0.980、-0.961, $P < 0.05$)。初始COD为59.27~63.93 mg/L,实验结束时降至16.50~33.85 mg/L,去除效果依次为PFEFB(72.16%)、PEFB(63.21%)、FEFB(51.54%)、对照(45.34%)。在前24 d对照组COD稳步下降,去除率达到32.83%,在24~28 d略有回升,28~32 d再次下降并保持稳定。在0~12 d,FEFB系统的去除效果与对照组接近,16~32 d去除效果更好,表明MACSB填料对去除有机物有改善作用。PEFB和PFEFB系统的COD浓度迅速下降并持续至实验结束,效果优于FEFB和对照组,PFEFB效果尤佳,可能归因于植物、填料、微生物的协同作用。

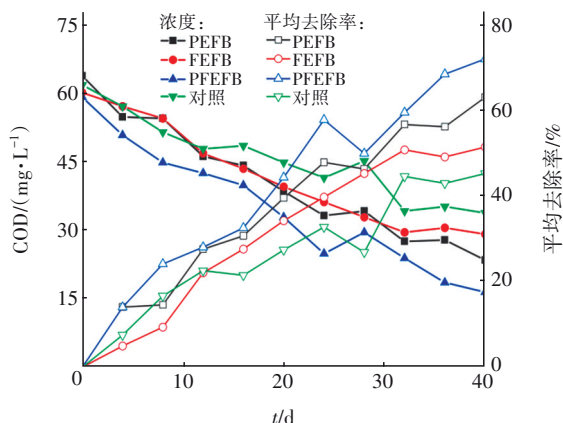


图6 各系统COD浓度及其平均去除率变化

Fig.6 Changes in COD concentration and average removal rate in each system

2.2.7 Chl-a

在初期各系统的Chl-a浓度介于1.40~4.19 $\mu\text{g/L}$ 之间。对照组的Chl-a浓度迅速增长并在第24天达到峰值76.73 $\mu\text{g/L}$,随后保持在较高水平(75.33

$\mu\text{g/L}$)。PEFB和FEFB系统的Chl-a浓度增幅较缓,分别在第24天和第28天达到峰值41.85和30.69 $\mu\text{g/L}$,之后FEFB系统缓慢下降,PEFB系统则趋于平衡,结束时分别为36.27、20.93 $\mu\text{g/L}$ 。在整个实验期间PFEFB系统水体保持清澈,无明显藻类积累,Chl-a浓度在第24天达到峰值18.14 $\mu\text{g/L}$ 后基本不再变化。浮床植物与藻类竞争营养和阳光,根系分泌物还对藻类有化感作用,从而抑制了藻类生长;MACSB填料则可能通过吸附水中磷元素和 NH_4^+ -N,改变水体微区的理化性质,进一步抑制藻类生长。

2.3 各系统微生物群落结构差异分析

2.3.1 Venn图分析

Venn图用于统计各系统共有或独有的物种数目,直观展示了微生物物种组成的相似性和重叠情况。PEFB、FEFB、PFEFB和对照组的OTU数分别为1579、513、914、734个,总计3740个,其中共有OTU数为210个,占总数的10.08%,表明4个系统的微生物群落组成存在显著差异。

2.3.2 门水平微生物群落结构差异分析

对各系统在门水平上微生物群落结构的分析结果显示,变形菌门(*Proteobacteria*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)、拟杆菌门(*Bacteroidota*)、疣微菌门(*Verrucomicrobiae*)和放线菌门(*Actinobacteriota*)是相对丰度最高的5个门,占比均超过80%。其中,变形菌门占比最高,在PEFB、FEFB、PFEFB、对照组中的占比分别为43.22%、63.78%、41.79%、55.94%;厚壁菌门在4个系统中的占比分别为13.63%、12.65%、34.02%和3.01%;拟杆菌门在FEFB和对照组中的相对丰度相近,分别为15.13%和16.81%,而在PEFB和PFEFB中分别为12.11%和7.93%;疣微菌门在4个系统中的相对丰度排序为PFEFB(7.2%)>PEFB(6.46%)>FEFB(4.31%)>对照组(3.08%);放线菌门在PEFB和对照组中的占比分别为12.07%和6.28%,而在FEFB和PFEFB中均低于1%。由此可见,各系统门类微生物的差异较大,浮床植物和MACSB填料对不同门的微生物具有一定的抑制或促进作用。

2.3.3 纲水平微生物群落结构差异分析

图7显示了各系统在纲水平上的微生物群落结构。 γ -变形菌纲(*Gammaproteobacteria*)、 α -变形菌纲(*Alphaproteobacteria*)、芽孢杆菌纲(*Bacilli*)、拟杆

菌纲(*Bacteroidia*)、疣微菌纲(*Verrucomicrobiae*)和放线菌纲(*Actinobacteria*)是主要的6个纲,其占比均超过80%。拟杆菌纲、疣微菌纲和放线菌纲的分布与其相应门的分布情况相似。 γ -变形菌纲和 α -变形菌纲是变形菌门中的主要成员。 α -变形菌纲在4个系统中的相对丰度较为一致,占比约为18.47%~26.76%。与变形菌门在各系统内的结构类似,MACSB填料促进了 γ -变形菌纲的生长,而浮床植物则有抑制作用。芽孢杆菌纲在PFEFB系统中占比最高,达33.83%,远高于PEFB、FEFB和对照的13.47%、12.62%和2.99%。芽孢杆菌纲所属部分细菌,如芽孢杆菌属具有好氧反硝化功能,这解释了PFEFB系统中虽 NO_3^- -N积累最少但氮去除效果最佳的现象,尽管水体DO未达到厌氧反硝化条件。

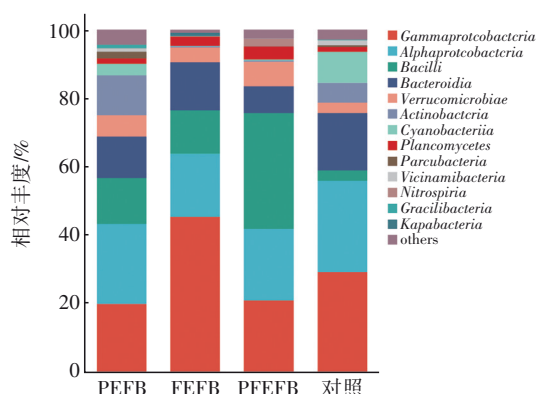


图7 各系统纲水平上的微生物群落结构

Fig.7 Microbial community structure at the class level in each system

2.3.4 属水平微生物群落结构差异分析

对各系统属水平上的微生物群落结构分析显示,主要菌属包括芽孢杆菌属(*Bacillus*)、多核杆菌属(*Polynucleobacter*)、norank_f__*Sphingomonadaceae*属、甲基娇养杆菌属(*Methylobacter*)、红杆菌属(*Rhodobacter*)、沙壤土杆菌属(*Ramlibacter*)、*Terrimicrobium*属、沉积物杆状菌属(*Sediminibacterium*)、鞘氨醇杆状菌属(*Sphingobium*)、新鞘脂菌属(*Novosphingobium*)、*Panacagrimonas*属和*Lacunisphaera*属。芽孢杆菌属在所有系统中相对丰度最高,且PFEFB显著高于FEFB和PEFB,已有研究证明其在污水处理中的多功能属性^[7],包括碳降解、磷分解及异养硝化,促进了其在各系统中的高丰度分布。此外,norank_f__*Sphingomonadaceae*属、甲基娇养杆菌

属和*Terrimicrobium*属在PFEFB中的相对丰度较高,而norank_f__*Sphingomonadaceae*属和甲基娇养杆菌属在PEFB中的相对丰度要略低于对照,这说明优势植物组一定程度上限制了两种菌属的生长,而MACSB填料有促进作用,可能是由于其丰富的孔隙结构。有研究表明,*Terrimicrobium*属在脱氮单元中以高丰度形式存在,因而其与氮去除和碳降解相关^[8];Kalyuzhnaya等人^[9]的研究表明,绝大部分甲基娇养杆菌属细菌能在好氧条件下实现反硝化功能。PFEFB中高丰度的脱氮和有机物降解菌属与其高TN、COD去除效果相符,表明植物和MACSB填料的引入有助于提升生态浮床系统的净化效能。

2.4 与部分现有生态浮床技术的对比分析

采用不同填料强化生态浮床的研究表明,立体弹性填料具有较好的挂膜效果,有助于微生物附着和生长,但是对高磷浓度水体的净化效果有限,TP去除率仅为69.3%^[10]。而MACSB填料经挂膜后,具有更加丰富的微生物种类和数量,引入的优势植物和MACSB填料显著提升了TP去除率,达到了96.83%。对于其他水质指标的去除效果,优势植物组合-MACSB填料强化型生态浮床略有提升。采用不同增氧强化生态浮床的研究表明^[11],优化增氧条件可显著提高生态浮床的净化效率,有利于好氧微生物的生长和繁殖,但存在运行成本较高等问题。而本研究的高通量测序结果显示,MACSB填料对微生物群落结构有显著影响,进一步增强了生态浮床的净化效果。因此,未来可以结合现有技术进行深入研究 and 优化。综上所述,采用优势浮床植物和MACSB填料的强化型生态浮床在提升水体净化效率方面具有显著优势,但在实际应用中也需要考虑其局限性并进行针对性的设计和调整。

3 结论

① 在PEFB和PFEFB系统中植物生长状况良好。MACSB填料对植物生长无明显影响,且有助于提升生态浮床系统的抑藻能力。在实验结束时,PFEFB系统对TP、COD和TN的去除率分别达到了96.83%、72.16%和78.41%,且系统内 NO_3^- -N的积累情况最为理想;4个系统对 NH_4^+ -N的去除率均超过99.5%。表明引入优势种浮床植物和MACSB填料显著增强了系统对氮、磷和有机物的去除效果。

② 4个系统的微生物群落结构差异明显。变

形菌门、厚壁菌门、拟杆菌门、疣微菌门和放线菌门为主要门类,其占比超过80%。各系统间在门、纲、属水平微生物种类存在显著差异,两种改良措施对微生物有促进或抑制作用。此外,各系统内存在着丰富的与氮元素迁移、磷分解以及有机物降解有关的菌属,其中PFEFB系统内存在的高丰度多功能菌属,如芽孢杆菌属与其高TN、COD去除效果相符,表明引入优势植物和MACSB填料有助于提高生态浮床系统的水体净化效果。

参考文献:

- [1] GARCIA J. Ecological engineering practice as a global strategy to prevent eutrophication and microalgae blooms [J]. *Ecological Engineering*, 2021, 161:106152.
- [2] LIU J, WANG F, LIU W, *et al.* Nutrient removal by up-scaling a hybrid floating treatment bed (HFTB) using plant and periphyton: from laboratory tank to polluted river [J]. *Bioresource Technology*, 2016, 207: 142–149.
- [3] ABHISHEK K, SHRIVASTAVA A, VIMAL V, *et al.* Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: a state-of-the-art review [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 853: 158562.
- [4] MASUD M A A, ANNAMALAI S, SHIN W S. Remediation of ciprofloxacin in soil using peroxymonosulfate activated by ball-milled seaweed kelp biochar: performance, mechanism, and phytotoxicity [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 465: 142908.
- [5] ZHANG C B, LIU W L, PAN X C, *et al.* Comparison of effects of plant and biofilm bacterial community parameters on removal performances of pollutants in floating island systems [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 73: 58–63.
- [6] 魏海杉, 王怡, 王文怀, 等. 浮床植物收割策略及资源化制取生物炭吸附重金属[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(5): 17–23.
- WEI Haishan, WANG Yi, WANG Wenhui, *et al.* Harvesting strategy of ecological floating bed plants and its utilization to prepare biochar for heavy metals adsorption [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(5): 17–23 (in Chinese).
- [7] 胡怡杉, 孙宝盛, 王盛勇. MBR和CAS工艺污泥在贫营养培养条件下的微生物群落结构研究[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(9): 1900–1907.
- HU Yishan, SUN Baosheng, WANG Shengyong. Study on microbial community structure of sludge in MBR and CAS processes under oligotrophic culture conditions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9): 1900–1907 (in Chinese).
- [8] 张婷月. 好氧反硝化菌的筛选及其固定化强化农村生活污水脱氮研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- ZHANG Tingyue. Screening of Aerobic Denitrifying Bacteria and Its Immobilization for Enhanced Nitrogen Removal from Rural Domestic Wastewater [D]. Shanghai: East China Normal University, 2020 (in Chinese).
- [9] KALYUZHNAVA M G, MARTENS-HABBENA W, WANG T, *et al.* Methylophilaceae link methanol oxidation to denitrification in freshwater lake sediment as suggested by stable isotope probing and pure culture analysis [J]. *Environmental Microbiology Reports*, 2009, 1(5): 385–392.
- [10] 张玲玲, 刘立早, 张玉平. 不同填料强化生态浮床对淡水养殖水体的净化效果[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(9): 18–22.
- ZHANG Lingling, LIU Lizao, ZHANG Yuping. Purification effect of floating treatment wetlands enhanced with different biofilm carriers on aquaculture water [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(9): 18–22 (in Chinese).
- [11] 张玲玲, 刘立早, 张玉平, 等. 不同增氧条件下强化生态浮床净化养殖水体的效果[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(17): 69–74.
- ZHANG Lingling, LIU Lizao, ZHANG Yuping, *et al.* Effects of different aeration conditions on the purification of aquaculture water by enhanced floating treatment wetlands [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(17): 69–74 (in Chinese).

作者简介:汪真(2000–),女,安徽芜湖人,硕士研究生,主要从事水污染控制研究。

E-mail:wangzhen_17@163.com

收稿日期:2024-06-21

修回日期:2024-07-05

(编辑:李德强)