

doi:10.11988/ckyyb.20250114

2026, 43(3): 63–70

湿地植物与基质组合对尾水氮磷的去除效果

李 权, 李春立

(长江生态环保集团有限公司, 武汉 430010)

摘 要:为探讨不同植物与复合基质对污水厂尾水中氮磷的去除效果,选用水菖蒲、黄花鸢尾和水葱 3 种挺水植物,结合天然锰砂、沸石和陶粒组成的复合基质,构建人工湿地系统,模拟污水厂尾水处理过程。试验结果表明,水葱和水菖蒲组合(Gp3 组)在总磷、总氮、氨氮和硝态氮的去除效果上表现最佳,总磷去除率达93.2%,总氮去除率为77.7%,氨氮去除率为91.7%,硝态氮去除率为70.6%。污染物浓度在前 30 天快速下降,之后趋于平缓。微生物群落分析显示,Gp3 组的微生物多样性最高,优势菌门为变形菌门和拟杆菌门,其中 γ -变形菌纲在反硝化过程中起关键作用。结果表明,植物组合及其根系微生物群落的协同作用对氮磷去除效果显著,锰砂作为基质材料具有潜在的应用价值。

关键词:人工湿地;植物组合;尾水;氮磷去除;微生物群落

中图分类号:X703

文献标志码:A

文章编号:1001-5485(2026)03-0063-08

Effect of Wetland Plants-Substrate Combinations on Nitrogen and Phosphorus Removal from Tail Water

LI Quan, LI Chun-li

(Yangtze Ecology and Environment Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: [Objective] This study focuses on the practical demand for advanced nitrogen and phosphorus removal from the tail water of urban wastewater treatment plants. Aiming at the problem of low carbon-to-nitrogen ratios in urban wastewater treatment that result in unsatisfactory nitrogen removal efficiency, this study investigates the effects of different combinations of emergent plants and composite substrates on nitrogen and phosphorus removal from tail water through experiments. The application potential of natural manganese sand as a substrate is evaluated, providing theoretical and practical support for the optimization of constructed wetland technology and the resource utilization of manganese ore. [Methods] Three emergent plants, *Acorus calamus* L., *Iris wilsonii* C. H. Wright, and *Scirpus validus* Vahl were selected. Three experimental groups were established based on pairwise plant combinations, including Gp1 (*Iris wilsonii* C. H. Wright + *Scirpus validus* Vahl), Gp2 (*Iris wilsonii* C. H. Wright + *Acorus calamus* L.), and Gp3 (*Scirpus validus* Vahl + *Acorus calamus* L.). A composite substrate without plants was used as the blank control group (BC). The composite substrate consisted of natural manganese sand, zeolite, and ceramic mixed at a ratio of 1 : 3 : 1. Constructed wetland systems were built using transparent polyethylene cylindrical columns with a height of 500 mm and a diameter of 160 mm to simulate the tail water treatment process of wastewater treatment plants. The experiment lasted for 70 days. During the experimental period, water quality indicators including total nitrogen, total phosphorus, ammonia nitrogen, and nitrate nitrogen were measured regularly. High-throughput sequencing was used to analyze the structure of microbial communities in plant root zones. [Results] All three plant combinations effectively removed nitrogen and phosphorus pollutants from the tail water, and the Gp3 group (*Scirpus validus* Vahl + *Acorus calamus* L.) showed the best performance. The total phosphorus removal rate reached 93.2%, the total nitrogen removal rate was 77.7%, the ammonia nitrogen removal rate was

收稿日期:2025-02-20;修回日期:2025-04-08;接受日期:2025-04-08

基金项目:长江生态环保集团有限公司员工科研资助项目(NBYG202300005)

作者简介:李 权(1994-),男,湖北鄂州人,工程师,硕士,主要从事污水生态处理及水环境保护相关研究与工程设计。E-mail:li_quan4@ctg.com.cn

91.7%, and the nitrate nitrogen removal rate was 70.6%. Pollutant concentrations in all experimental groups decreased rapidly during the first 30 days and then tended to stabilize, while the purification performance of the blank control group was significantly poorer. Microbial community analysis showed that the Gp3 group exhibited the highest microbial diversity and richness, with a Shannon index of 7.24 and unique OTUs accounting for 69.15%. The dominant phyla were Proteobacteria and Bacteroidetes, which together accounted for nearly 80%. Among them, Gammaproteobacteria played a key role in the denitrification process, and its relative abundance in the Gp3 group reached 29.2%, which was the highest among the three groups. [**Conclusion**] The synergistic effects of plant combinations and root-associated microbial communities in constructed wetlands are the key to efficient nitrogen and phosphorus removal, and the combination of *Scirpus validus* Vahl and *Acorus calamus* L. performs particularly well in advanced tail water treatment. The composite substrate containing manganese sand shows potential application value, while the specific mechanisms by which it promotes plant growth and microbial community formation still require further investigation. This study confirms the optimal purification performance of the *Scirpus validus* Vahl and *Acorus calamus* L. combination and the potential application value of manganese sand as a substrate, providing a reference for plant selection and targeted microbial cultivation in constructed wetlands for wastewater treatment plant tail water.

Key words: constructed wetlands; plant combination; tail water; nitrogen and phosphorus removal; microbial communities

0 引 言

随着我国城镇化的快速推进,城市的污水排放总量呈现持续增长态势。虽然近年来污水处理厂的数量和处理能力在大幅提升,但是从污水资源化利用的角度来看,污水厂尾水深度处理依然有着巨大的提升空间。尾水深度处理后可用于生态补水、城市绿化、工业冷却等领域,逐步实现城市水资源循环利用,对于水资源匮乏地区意义重大。但是,污水中有机碳源不足导致的碳氮比偏低在我国城市污水处理中是一个具有普遍性的问题^[1],这一特性致使污水厂脱氮处理难以达到理想效果,尾水中氮磷含量无法满足回用标准,很多污水厂在尾水排放或回用时都面临这个问题。因此,从水资源可持续利用的角度来看,污水厂尾水深度脱氮除磷具有重要的现实意义和紧迫性。

人工湿地技术在污水处理中具有能耗低、成本低、观感好等显著优势,近年来已有越来越广泛的应用^[2]。在污水厂尾水深度处理领域,该技术更拥有着巨大的应用前景。在人工湿地系统中,氮和磷的去除是通过植物、微生物和基质的协同作用而完成的^[3]。其中氮的去除主要依赖微生物的硝化-反硝化作用和植物吸收,而磷的去除则主要通过化学沉淀、基质吸附和植物吸收^[4]。不同的基质和植物组合的人工湿地在运行中,植物根系微生物种类及群落结构、活性不同,在尾水处理上的效果也不同。国

内许多学者对砾石^[5]、沸石^[6-7]、活性炭^[8]、混凝土^[9]等人工湿地填料或改性材料的氮磷去除效果进行了试验研究,发现生物炭、沸石等材料的氨氮去除率普遍优于其他试验材料。李青等^[10]、陈嗣威等^[11]、鲁翠翠等^[12]研究认为,植物及其根系微生物在氮磷去除过程中具有协同效应,同时植物生长对氮磷的吸收也是重要的水体净化机理。

天然锰砂的主要成分是锰氧化物(MnO_x),具备较大的比表面积、丰富的孔隙结构以及较强的氧化还原活性。有研究表明,锰矿石释放的锰离子被湿地植物吸收,能够促进光合作用,对湿地植物生长产生积极影响^[13]。Schmidt 等^[14]指出锰元素在植物酶催化反应中的重要性,推测锰矿中的锰可能会影响湿地植物体内相关酶的活性,进而影响植物的代谢过程。因此,将锰砂用于人工湿地基质,探究其与不同植物组合对污水厂尾水脱氮除磷的效果是值得研究的课题。本研究采用天然锰砂和沸石、陶粒组成组合基质,选择常见且适应性较强的水菖蒲(*Acorus calamus* L.)、黄花鸢尾(*Iris wilsonii* C. H. Wright)和水葱(*Scirpus validus* Vahl)作为植物组合,研究上述基质与植物组合对于模拟污水厂尾水中的总氮、总磷、氨氮的去除效果,分析植物根系微生物群落结构和试验前后基质材料表面形态变化,探讨锰砂作为人工湿地基质材料的可行性,为锰矿资源化利用、污水厂尾水人工湿地深度处理提供一定的理论参考和实践经验。

1 材料与方法

1.1 试验材料及装置

锰砂等基质材料购于武汉金瑞成科贸有限公司, 锰砂主要成分为 MnO_2 , 沸石主要成分为 SiO_2 , 陶粒主要成分为黏土, 粒径均为 4~8 mm。水菖蒲等水生植物购于本地水生植物试验基地, 培养 3 周后选取生长状况良好的植株用于试验。

模拟污水厂尾水根据前期对本地污水厂尾水中氮磷的监测结果, 采用自来水加 $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 NH_4Cl 、 KNO_3 等试剂配置而成, pH 值为 7.12 ± 0.05 , 水温为 $(23.5 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, 具体水质如表 1 所示。

表 1 试验期间进水水质

Table 1 Influent water quality during test period

水质指标浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)			
总氮	总磷	氨氮	硝态氮
13.67~15.01	0.74~0.83	4.08~5.01	8.89~9.47

人工湿地装置容器为高 500 mm、直径 160 mm 的透明聚乙烯圆管, 底层铺设高 30 mm 的粗砾石作为进水层, 中间铺设高 300 mm 完全混合后的天然锰砂、沸石和陶粒作为功能层, 上层铺设一层砾石作为固定层, 如图 1 所示。根据前期对上述材料的组合吸附试验, 本试验基质各材料质量占比为 $m_{\text{锰砂}} : m_{\text{沸石}} : m_{\text{陶粒}} = 1 : 3 : 1$ 。光源采用全光谱植物生长灯模拟自然光照。

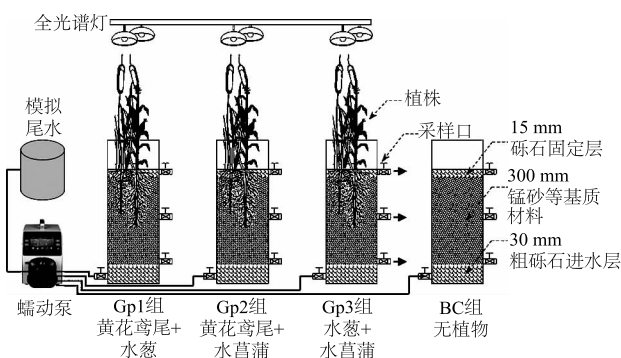


图 1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

在植物组合上, 设置了 3 个试验组和一个空白对照组, 分别为: Gp1 组, 黄花鸢尾和水葱; Gp2 组, 黄花鸢尾和水菖蒲; Gp3 组, 水葱和水菖蒲; BC 组, 即空白组, 仅含基质材料而无植物。每个试验组均设置 2 个平行样, 共计 8 个试验单元, 每个单元植株生长状况尽量保持相同, 植株的种植密度约为 $100 \text{ 株}/\text{m}^2$, 每个试验单元进水负荷为 $0.075 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 总水力停留时间为 3 d。

1.2 水质指标检测与分析

试验装置自 2024 年 5 月开始运行, 持续 70 d,

其间共采样 26 次, 每次采集水样 100 mL, 用纯水补充蒸发等消耗的水量, 以保证各单元中水量稳定。检测采集水样中总氮、总磷、氨氮等水质指标, 其中总氮采用碱性过硫酸钾-紫外分光光度计法测定, 总磷采用钼酸铵分光光度法测定, 氨氮采用纳氏试剂光度法测定, 硝态氮采用紫外分光光度法测定。

1.3 微生物样本采集与检测

全部水样采集完成后, 将每单元植株根部截取合适长度放入无菌管中, 冷冻干燥后, 转移至 -80°C 冰箱保存。

高通量测序服务委托广东美格基因科技有限公司完成, 其主要利用方舟 DC306-03 磁珠法土壤 DNA 提取试剂盒 (ALFA-SEQ Magnetic Soil DNA Kit) 提取植物根系样品中的微生物 DNA, 再利用 Nanodrop One (Thermo Fisher Scientific, MA, USA) 检测 DNA 的纯度和浓度, 使用 Illumina 平台或高通量测序平台 MGI 平台对构建的扩增子文库进行 PE250 测序。

1.4 数据统计及分析

采用 Microsoft Excel (版本号 2501 Build 16.0.18429.20132) 对试验数据进行记录, 数据分析和绘图使用的软件是 Origin 2019 (版本号 9.8.0.200), 统计分析均使用 SPSS 22.0 版软件进行, 当显著性水平 $P < 0.05$ 时认为差异性显著。

2 结果与分析

2.1 水质指标的变化

试验结果表明, 3 个植物组合的试验组对于模拟污水厂尾水中的氮磷均有明显的净化能力。在总氮、硝态氮指标上, Gp3 组 (水葱和水菖蒲) 显现出了更好的净化效果; 在总磷、氨氮指标上, 3 个试验组净化效果接近, 差异不显著。无植物空白组对于总磷、总氮、硝态氮无明显净化效果, 对于氨氮则显示出有一定净化效果。

在总磷的净化效果上, 无植物的空白组总磷浓度稍有降低, 而 3 个有植物组合试验组的净化效果则较为理想, 如图 2(a) 所示。其中 Gp3 组 (水葱和水菖蒲) 在后期展现的净化效果稍好于其它两组, 但这种优势并不显著。最后一次取样的检测数据显示, 各组的出水中总磷浓度均下降至 0.12 mg/L 以下。3 个试验组总磷的去除率为 Gp3 组 (93.2%) > Gp1 组 (87.7%) > Gp2 组 (86.6%)。从污染物的去除速率来看, 初期污染物浓度下降较快, 第 10 天的样本中, Gp1 组—Gp3 组的污染物去除率分别为 29.1%、22.9%、39.3%; 第 20 天, 去除率分别达到 68.4%、56.8%、

66.5%;约在第 30 天后,污染物浓度下降速率趋于平缓。

从总氮指标上看,无植物空白组出水中总氮浓度较初期并无明显变化,3 个有植物组合的试验组对于总氮有明显的净化效果,且有一定的差异,如图 2(b)所示。从最后一次采样的结果来看,总氮净化效果最好的是 Gp3 组(水葱+水菖蒲),其出水中总氮浓度下降至 3.35 mg/L;总氮的去除率从高到低依次为 Gp3 组(77.7%)>Gp1 组(70.1%)>Gp2 组(66.1%)。污染物去除速度在试验初期较快,第 10 天样本中,Gp1 组—Gp3 组的污染物去除率分别为 34.7%、37.0%、34.0%;此后 Gp1 组和 Gp2 组的净化速度趋于放缓,而 Gp3 组在第 30 天左右净化速度才趋于平缓;第 35 天样本中,3 个组的污染物去除率分别为 53.4%、51.0%、68.1%,Gp3 组已显示出明显优势。

从氨氮的净化结果来看,空白组中的湿地基质材料对氨氮有一定净化效果,出水的氨氮浓度有明显下降,3 个有植物组合的试验组对于氨氮的净化效果较好,如图 2(c)所示。其中 Gp3 组(水葱和水菖蒲)的净化效果稍好于其它两组。最后一次取样的检测数据显示,各组的出水中氨氮浓度均下降至 0.65 mg/L 以下。3 个试验组氨氮的去除率由高到低分别为 Gp3 组(91.7%)>Gp1 组(88.0%)>Gp2 组(84.7%)。采样结果显示,氨氮浓度在试验初期下降较快,第 20 天的样本中,Gp1 组—Gp3 组的污染物去除率分别为 74.6%、78.3%、85.4%,此后各组的污染物浓度下降速率趋于平缓。

从硝态氮的净化效果看,无植物空白组无效果,3 个有植物组合的试验组对于硝态氮有明显的净化效果,水葱和水菖蒲组合的 Gp3 组效果要优于另两组,如图 2(d)所示。从最后一次采样的结果来看,硝态氮去除率从高到低依次为 Gp3 组(70.6%)>Gp2 组(59.4%)>Gp1 组(59.1%)。污染物浓度在试验运行初期下降较快,Gp3 组尤其如此,在第 30 天左右净化速度趋于平缓。

2.2 微生物群落结构分析

2.2.1 微生物群落多样性分析

根据样品的高通量测序结果进行种下单元(Operational Taxonomic Units, OTU)划分,Gp1 组—Gp3 三个试验组样品的测试覆盖率均高于 98%,可认为测序结果能较好地反映本试验样本中微生物的结构状况。3 个试验组中微生物多样性指数和丰富度指数如表 2 所示。

试验结果表明,Gp1 组、Gp2 组和 Gp3 组 3 个试验组的微生物群落多样性表现出了一定的差异:

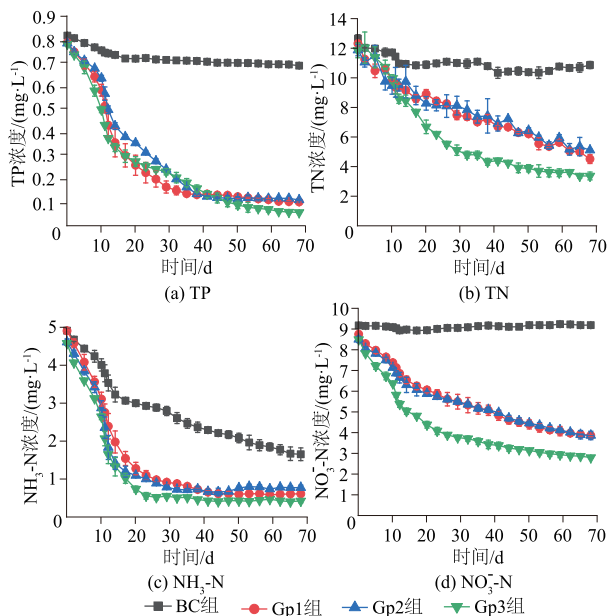


图 2 各试验组对模拟尾水中氮磷的净化效果

Fig.2 Removal of nitrogen and phosphorus in simulated tail water by each experimental group

表 2 各试验组微生物多样性统计

Table 2 Statistics of microbial diversity in each experimental group

试验 编号	多样性指数		丰富度指数		覆盖率/%
	Shannon-2	Simpson	Ace	Chao1	
Gp1 组	6.92	0.006 26	1 731.42	1 764.06	98.5
Gp2 组	6.33	0.006 83	1 543.21	1 585.63	98.3
Gp3 组	7.24	0.004 75	1 945.52	1 983.13	98.3

(1)在多样性方面,水葱和水菖蒲组合的 Gp3 组的 Shannon 指数为 7.24,高于 Gp1 组(黄花鸢尾+水葱)的 6.92 和 Gp2 组(黄花鸢尾+水菖蒲)的 6.33; Simpson 指数上,Gp1 组、Gp2 组和 Gp3 组 3 个组的数值分别为 0.006 26、0.006 83、0.004 75。因此可以判定,水葱和水菖蒲组合的 Gp3 组微生物群落多样性最高,物种分布更为均匀;黄花鸢尾和水菖蒲组合的 Gp2 组生物多样性相对较低。

(2)在丰富度指数方面,Ace 指数和 Chao1 指数均显示水葱和水菖蒲组合的 Gp3 组的微生物群落丰富度最高(Ace 指数 1 945.52, Chao1 指数 1 983.13),其次是黄花鸢尾+水葱组合的 Gp1 组(Ace 指数 1 731.42, Chao1 指数 1 764.06),黄花鸢尾和水菖蒲组的 Gp2 组丰富度相对最低(Ace 指数 1 543.21, Chao1 指数 1 585.63)。这表明 Gp3 组的微生物群落中物种的数量最多,而 Gp2 组的物种数量相对较少。

2.2.2 微生物群落组成分析

Gp1 组、Gp2 组和 Gp3 组 3 个试验组的 OTUs 韦恩图如图 3 所示。3 个组共有的 OTUs 为 262,分

别占 Gp1 组(黄花鸢尾+水葱)的22.30%、Gp2 组(黄花鸢尾+水菖蒲)的31.76%,和 Gp3 组(水葱+水菖蒲)的20.52%,显示出各试验单元水体中微生物在结构上的相似性并不明显。3 个试验组均有各组独特 OTUs, Gp3 组独有的 OTUs 为 883, 占其总数的 69.15%, 其细菌种类多于 Gp1 组和 Gp2 组。

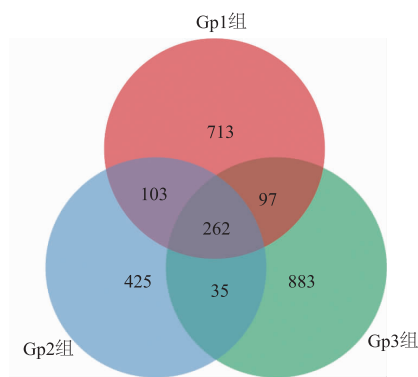


图3 各试验组的 OTUs 韦恩图

Fig.3 Venn diagram of OTUs for each experimental group

各试验组的门水平分类和纲水平分类如图 4 所示,微生物检测丰度占比 $\geq 1\%$ 的菌门或菌纲被视为主要成分而列出, $<1\%$ 的归为“其他”类。图 4(a)是门水平分析,可以看出本试验中的优势菌门主要包括: *Proteobacteria* (变形菌门)、*Bacteroidetes* (拟杆菌门)、*Nitrospirae* (硝化螺旋菌门)、*Planctomycetes* (浮霉菌门)和 *Verrucomicrobia* (疣微菌门),这 5 个门菌种的丰度之和占比在 Gp1 组、Gp2 组、Gp3 组 3 个试验组达到或接近 80%。其中 *Proteobacteria* (变形菌门)是最主要的菌门,在 Gp1 组、Gp2 组、Gp3 组 3 个试验组的相对丰度分别达到了34.4%、37.6%、32.3%。

图 4(b)是菌属的纲水平分析,各试验组微生物共同的优势纲属包括: *Gammaproteobacteria* (γ -变形

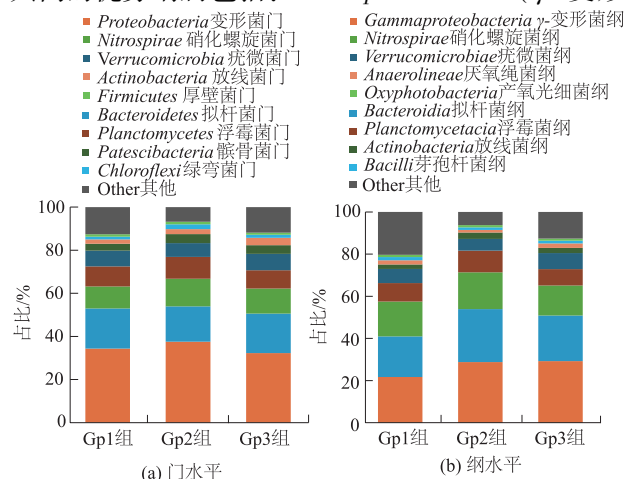


图4 各试验组细菌群落在门水平与纲水平上的构成

Fig.4 Bacterial community composition at phylum and class levels in each experimental group

菌纲)、*Bacteroidia* (拟杆菌纲)、*Nitrospirae* (硝化螺旋菌纲)、*Planctomycetacia* (浮霉菌纲)、*Verrucomicrobiae* (疣微菌纲),这 5 个纲的菌种丰度之和占比在 Gp1 组、Gp2 组、Gp3 组 3 个试验组达到或接近 80%。其中 *Gammaproteobacteria* (γ -变形菌纲)是最主要的菌纲,在 Gp1 组、Gp2 组、Gp3 组 3 个试验组的相对丰度分别达到了21.7%、28.8%、29.2%;其次 *Bacteroidia* (拟杆菌纲)的占比也较高,在 3 个试验组的相对丰度分别达到了19.3%、25.1%、21.7%。

3 讨论

3.1 植物组合对尾水中氮磷的净化效能

植物可以吸收污水中的氨氮、硝态氮和磷酸盐用于自身生长。挺水植物因其较大的生物量、较高的氮、磷积累量使其对水体中氮、磷元素吸收能力更好。氮磷等元素进入植物体内后被降解、转化成为植物生物量^[15]。水菖蒲、黄花鸢尾和水葱是比较常见的挺水植物,用于净化污水时,这些植物对氮和磷的去除效率会因多种因素影响而有所不同。比如有学者研究发现,水菖蒲、黄菖蒲等湿地植物对总磷的去除率均可达 80%以上^[16];水葱、菖蒲、香蒲在水体中总氮、总磷的净化上,都有比较理想的效果^[17-18]。本研究中,仅有复合基质的 BC 组作为对照,在氮磷去除率上相对较低,其主要原因是试验中选用的基质材料粒径偏大。相关研究显示,沸石、陶粒等材质,较小粒度的试验组有更高的磷去除率^[19-20],其原因是粒度的减小有利于提高基质本身的比表面积和磷的扩散速率。

不同植物净化尾水效能的差异,一方面在于不同植物本身的吸收能力具有差异性,另一方面是不同植物的根系结构不同,同一植物不同生长时期的根系发展水平也不同,导致其净化能力不同^[21]。在本研究中,黄花鸢尾、水菖蒲、水葱两两组合的 3 个试验组在净化模拟污水厂尾水中的氮磷上,都有比较理想的效能。其中水葱和水菖蒲组合的 Gp3 组在总氮、硝态氮的净化上呈现了比其他两组更显著的优势,净化率分别达到了77.7%和70.6%。从处理效果总体看,上述植物组合总磷的净化率最高,可达 93.2%;总氮和硝态氮的净化率为77.7%和70.6%。从污染物清除速率上看,前 30 天的速率明显更快,后期由于水中氮磷浓度的降低,植物吸收的能效降低,污染物基本呈现了稳定低浓度的态势。有学者研究指出,水生植物混种可造成植物的竞争性生长,其根系比单品类种植时更发达^[22-23]。黄花鸢尾对

氮磷的吸收能力强,在其生长季可积累大量营养盐,水葱的根系发达,对重金属如 Cd、Pb,以及水中磷的富集能力更为显著;水菖蒲的根系泌氧能力强,可支持硝化细菌将 NH_4^+ 转化为 NO_3^- ,后续反硝化生成 N_2 [24]。

3.2 植物组合及其微生物群落结构的特点

本研究中,3 个试验组共有的 OTUs 数目为 262,仅占各组 OTUs 总数的 22.30% (Gp1 组,黄花鸢尾+水葱)、31.76% (Gp2 组,黄花鸢尾+水菖蒲)、20.52% (Gp3 组,水葱+水菖蒲),各组中微生物在结构上的相似性并不明显,这与一些学者的研究结论相同 [10,25-26]。陈嗣威等 [11] 研究了西伯利亚鸢尾、石菖蒲等植物组合在净化污水厂尾水中的微生物群落特征,发现各植物根际微生物的种类和数量随植物的不同而存在明显差异。菖蒲的根系具有强泌氧能力,其根系分泌过氧化物酶和脱氢酶,在根际形成好氧-厌氧交替微环境,促进硝化细菌和反硝化细菌的协同作用,有助于降解有机污染物 [27],而水葱具有更为发达的须根结构,富集营养盐的能力更强 [28]。这些因素导致不同植物组合构成的微生物生境具有一定差异性,最终使得各组不同微生物占比出现了分异。

在门分类水平上,各个样品门丰度中占比最高的是 *Proteobacteria* (变形菌门),在微生物净化功能上具有一定的优势,这与很多关于人工湿地系统和城市污水处理系统中的活细菌群落研究的结论是相同的 [10-12,29-32]。变形菌门类微生物主要分为亚硝化细菌、硝化细菌以及具有反硝化功能的细菌,大多数具备脱氮性能的细菌也都属于变形菌门类 [33-34],它们在除氮除磷方面起着至关重要的作用。各样品中 *Bacteroidetes* (拟杆菌门) 的丰度占比位居第二。拟杆菌门属于厌氧杆菌,是自然界细菌中较大的一个门类,常见的包含黄杆菌纲、拟杆菌纲、鞘脂杆菌纲三大类别 [34]。拟杆菌门微生物为化能异养细菌,其与有机物降解联系紧密,一些反硝化细菌以及大多数固氮细菌也隶属于拟杆菌门微生物,这类微生物具备脱氮功能。在纲分类水平上, γ -变形菌纲是在反硝化作用中起到关键作用的菌纲。本研究中,水葱和水菖蒲组成的 Gp3 组的 γ -变形菌纲相对丰度是 3 个试验组中最高的,为 29.2%,其对氮磷的处理效果也是最好的。

4 结 论

(1) 本研究显示,人工湿地使用水菖蒲、黄花鸢

尾、水葱植物组合可以有效净化污水厂尾水中的氮、磷等营养元素;水葱和水菖蒲的组合在总磷、总氮、氨氮、硝态氮净化上优于其他植物组合,该试验组总磷的去除率为 93.2%,总氮去除率为 77.7%,氨氮去除率为 91.7%,硝态氮去除率为 70.6%;污染物净化速率上,在 0~30 d 各污染物浓度均呈现快速下降的趋势,其中总磷和氨氮最为显著,约在 30 d 后各指标浓度下降速率趋于平缓。

(2) 不同植物组合形成的根系微生物群落有较明显差异,3 个试验组共有的 OTUs 数目为 262,仅占各组 OTUs 总数的 22.30%、31.76% 和 20.52%;优势菌门是 *Proteobacteria* (变形菌门)、*Bacteroidetes* (拟杆菌门)、*Nitrospirae* (硝化螺旋菌门)、*Planctomycetes* (浮霉菌门) 和 *Verrucomicrobia* (疣微菌门),变形菌门和拟杆菌门的高占比是保证脱氮效率的重要因素; γ -变形菌纲是在反硝化作用中的关键菌纲,水葱和水菖蒲组的 γ -变形菌纲丰度为 29.2%,为 3 个试验组中最高。

(3) 植物的生长吸收是污水中氮磷得以去除的重要因素,含锰砂的复合基质是否促进了植物的生长,是否有益于植物根系发展及微生物群落的形成,因条件限制本阶段研究尚未进一步论证,是本课题未来的延伸方向。

本研究聚焦于污水厂尾水的深度处理问题,在复合基质基础上选育出了 3 种挺水植物,并以模拟污水厂尾水作为研究对象,针对其中氮磷的净化成效展开了试验,分析了植物根系的微生物群落特征。研究所取得的成果,一方面期望能够为污水厂尾水人工湿地处理流程里至关重要的植物筛选环节,以及后续的菌种定向培育等关键步骤提供一定的参考范例,另一方面也希望为尾水深度脱氮除磷方向的相关研究提供一些经验。

参考文献 (References):

- [1] 黄荣敏,黄钰铃,曾月,等. 长江大保护试点城市某污水处理厂尾水湿地净化效果研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2024, 22(2): 169-178, 194. (HUANG Rong-min, HUANG Yu-ling, ZENG Yue, et al. Decontamination Effect of Tail Water Wetland Accompanying the Sewage Treatment Plant: A Case in the Area of the Yangtze River Grand Protection [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(2): 169-178, 194. (in Chinese))
- [2] 闫春浩,陈启斌,王朝旭,等. 城镇污水处理厂尾水人工湿地研究现状及展望[J]. 应用化工, 2023, 52(11): 3175-3178, 3188. (YAN Chun-hao, CHEN Qi-bin, WANG Zhao-

- xu, *et al.* Advances and Prospect in the Studies on Constructed Wetlands (CWs) for Treatment of Terminal Effluent of Wastewater Treatment Plants (WWTPS) [J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52 (11): 3175–3178, 3188. (in Chinese))
- [3] 尹楚杰, 吕源财, 潘文斌. 人工湿地填料在废水中脱氮除磷的应用研究进展[J]. *现代化工*, 2021, 41(7): 68–71. (YIN Chu-jie, LÜ Yuan-cai, PAN Wen-bin. Research Progress on Application of Constructed Wetland Fillers in Removing Nitrogen and Phosphorus from Wastewater [J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(7): 68–71. (in Chinese))
- [4] 赵东源, 张 生, 赵胜男, 等. 基于除磷效果的人工湿地基质组合筛选及影响因素的动力学分析[J]. *环境污染与防治*, 2018, 40(10): 1085–1089, 1094. (ZHAO Dong-yuan, ZHANG Sheng, ZHAO Sheng-nan, *et al.* Screening of Construct Wetland Matrix Combinations Base on Phosphorus Removal Efficiency and Kinetics Analysis of Different Effect Factors [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2018, 40(10): 1085–1089, 1094. (in Chinese))
- [5] 汪文飞, 王若凡, 王煜钧, 等. 潜流湿地填料比选及对氨氮的去除效应研究[J]. *环境污染与防治*, 2020, 42(7): 864–868, 873. (WANG Wen-fei, WANG Ruofan, WANG Yu-jun, *et al.* Study on Comparison and Selection of Subsurface Flow Wetland Filler and Its Removal Effect on Ammonia Nitrogen [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2020, 42(7): 864–868, 873. (in Chinese))
- [6] 陈永裕, 李赫龙, 卢 斌, 等. 沸石人工湿地填料对氨氮的去除效果[J]. *河北环境工程学院学报*, 2020, 30(1): 77–81. (CHEN Yong-yu, LI He-long, LU Bin, *et al.* Removal Effect of Zeolite Constructed Wetland Filler on Ammonia Nitrogen [J]. *Journal of Hebei University of Environmental Engineering*, 2020, 30(1): 77–81. (in Chinese))
- [7] 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 等. 铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果[J]. *环境科学*, 2021(6): 2875–2884. (ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, *et al.* Wastewater Treatment Effect of Iron-carbon Micro-electrolysis and Zeolite Combined Constructed Wetland [J]. *Environmental Science*, 2021(6): 2875–2884. (in Chinese))
- [8] 白少元, 徐嫚嫚, 钱朝文, 等. 碳质填料的导电特征及其对人工湿地净化效能的提升[J]. *环境工程学报*, 2021(5): 1773–1782. (BAI Shao-yuan, XU Man-man, QIAN Chao-wen, *et al.* Conductive Characteristics of Carbonaceous Filler and Its Improvement on Purification Efficiency of Constructed Wetland [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2021(5): 1773–1782. (in Chinese))
- [9] 卢少勇, 万正芬, 李锋民, 等. 29 种湿地填料对氨氮的吸附解吸性能比较[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(8): 1187–1194. (LU Shao-yong, WAN Zheng-fen, LI Feng-min, *et al.* Ammonia Nitrogen Adsorption and Desorption Characteristics of Twenty-nine Kinds of Constructed Wetland Substrates [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(8): 1187–1194. (in Chinese))
- [10] 李 青, 张琼华, 周卫东, 等. 人工湿地净化污水处理厂低浓度尾水的效果[J]. *水生生物学报*, 2022(10): 1456–1465. (LI Qing, ZHANG Qiong-hua, ZHOU Wei-dong, *et al.* Effect of Constructed Wetland on Purifying Low Concentration Tail Water of Sewage Treatment Plant [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022(10): 1456–1465. (in Chinese))
- [11] 陈嗣威, 郑海粟, 张晟曼, 等. 不同植物组合对模拟污水厂尾水的净化效果及对根系微生物群落的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2022(2): 387–393. (CHEN Si-wei, ZHENG Hai-su, ZHANG Sheng-man, *et al.* Purification Effect of Different Plant Combinations on Tail Water of Simulated Sewage Plant and Its Influence on Root Microbial Community [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022(2): 387–393. (in Chinese))
- [12] 鲁翠翠, 蔡文倩, 张翠霞, 等. 植物与微生物协同净化黑臭水体的脱氮性能[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(12): 78–88. (LU Cui-cui, CAI Wen-qian, ZHANG Cui-xia, *et al.* Nitrogen Removal Performance of Black and Odorous Water Purification by Plants and Microorganisms [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45(12): 78–88. (in Chinese))
- [13] XIANG J, CHEN J, BAGAS L, *et al.* Southern China's Manganese Resource Assessment: An Overview of Resource Status, Mineral System, and Prediction Model [J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 116: 103261.
- [14] SCHMIDT S B, HUSTED S. The Biochemical Properties of Manganese in Plants [J]. *Plants*, 2019, 8(10): 381.
- [15] 龚 深, 巢传鑫, 邹冬生, 等. 人工湿地中植物对污染物去除机理研究进展[J]. *湿地科学*, 2023(6): 927–935. (GONG Shen, CHAO Chuan-xin, ZOU Dong-sheng, *et al.* Research Progress on Removal Mechanism of Pollutants by Plants in Constructed Wetlands [J]. *Wetland Science*, 2023(6): 927–935. (in Chinese))
- [16] 孙丰霞, 刘文蓉, 彭 辉, 等. 八种湿地植物对净化生活污水的影响[J]. *吉林农业科技学院学报*, 2024, 33(2): 1–5. (SUN Feng-xia, LIU Wen-rong, PENG Hui, *et al.* Effects of Eight Wetland Plants on Purification of Domestic Sewage [J]. *Journal of Jilin Agricultural Science and Technology University*, 2024, 33(2): 1–5. (in Chinese))
- [17] 刘文杰, 许兴原, 何 欢, 等. 4 种湿地植物对人工湿地净化生活污水的影响比较[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(11): 6313–6319. (LIU Wen-jie, XU Xing-yuan, HE Huan, *et al.* Comparison of Treatment Performances of Simulated Urban Sewage in Constructed Wetlands Planted with Four Types of Wetland Plant [J]. *Chinese*

- Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(11): 6313-6319. (in Chinese))
- [18] 苏 北, 徐德福, 魏驰原, 等. 不同人工湿地系统中植物的生长特征及净化能力差异[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2015, 7(3): 247-253. (SU Bei, XU De-fu, WEI Chi-yuan, *et al.* Plant Growth Characteristics and Purification Capacity in Different Constructed Wetland System[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2015, 7(3): 247-253. (in Chinese))
- [19] 赵桂瑜. 人工湿地除磷基质筛选及其吸附机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (ZHAO Gui-yu. Screening and Adsorption Mechanisms on Substrates for Phosphorus Removal in Constructed Wetlands[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [20] 赵发敏. 人工湿地填料基质去除氨氮和磷最优配比及影响因素研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011. (ZHAO Fa-min. The Study of Optimizing Substrate Gradation and Effect Factors for Constructed Wetland Removal of Ammonia Nitrogen and Phosphorus[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011. (in Chinese))
- [21] ZHANG Y, LV T, PEDRO N, CARVALHO P N, *et al.* Removal of the Pharmaceuticals Ibuprofen and Iohexol by Four Wetland Plant Species in Hydroponic Culture: Plant Uptake and Microbial Degradation [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23: 2890-2898.
- [22] 曾小梅, 刘 鹏, 张晓斌. 水生观赏植物对城市污水的修复研究[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 349-353. (ZENG Xiao-mei, LIU Peng, ZHANG Xiao-bin. Phytoremediation of Urban Wastewater by Ornamental Hydrophytes[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5): 349-353. (in Chinese))
- [23] 刘 敏, 吴铁明, 刘 茜, 等. 3 种水生植物的不同组合对富营养水体的净化效果研究[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(7): 155-160. (LIU Min, WU Tie-ming, LIU Han, *et al.* Study on Purification of Eutrophic Water by Different Combinations of Three Aquatic Plants[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(7): 155-160. (in Chinese))
- [24] MENDES L R D, TONDERSKI K, IVERSEN B V, *et al.* Phosphorus Retention in Surface-flow Constructed Wetlands Targeting Agricultural Drainage Water[J]. Ecological Engineering, 2018, 120: 94-103.
- [25] 朱 琳. 生物炭介导的人工湿地强化生活污水净磷效能与机理研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022. (ZHU Lin. Removal Mechanism of Phosphorus from Sewage by Constructed Wetland Mediated by Biochar[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022. (in Chinese))
- [26] 郭 佳. 新型轻质填料人工湿地处理生活污水试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2022. (GUO Jia. Experimental Study on Treatment of Domestic Sewage in Constructed Wetland with New Lightweight Substrate[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022. (in Chinese))
- [27] STOTTMEISTER U, WIEBNER A, KUSCHK P, *et al.* Effects of Plants and Microorganisms in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment[J]. Biotechnology Advances, 2003, 22(1/2): 93-117.
- [28] CHOI H, GERONIMO F K, JEON M, *et al.* Evaluation of Bacterial Community in Constructed Wetlands Treating Different Sources of Wastewater[J]. Ecological Engineering, 2022, 182: 106703.
- [29] 李娟红, 管福征, 陈长秋, 等. 复合型人工湿地对污水厂尾水处理效能及微生物群落研究[J]. 水处理技术, 2022, 48(10): 104-109. (LI Juan-hong, GUAN Fu-zheng, CHEN Chang-qiu, *et al.* Evaluation of the Performance and Microbial Communities by a Hybrid Constructed Wetland System for Treating Wastewater Treatment Plant Tail-water[J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(10): 104-109. (in Chinese))
- [30] 刘 姣. 不同湿地植物及其组合对生活污水的脱氮除磷效果研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2021. (LIU Jiao. Research on the Effect of Different Wetland Plants and Their Combinations on Denitrification and Phosphorus Removal from Domestic Sewage[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2021. (in Chinese))
- [31] 敬双怡, 李 岩, 于玲红, 等. SMBBR 工艺处理生活污水脱氮效能及其微生物多样性[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(1): 206-214. (JING Shuang-yi, LI Yan, YU Ling-hong, *et al.* Denitrification Efficiency of the Special Moving-bed Biofilm Reactor (SMBBR) Process for Domestic Sewage Treatment and Its Microbial Diversity[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2019, 25(1): 206-214. (in Chinese))
- [32] 战 楠, 黄炳彬, 赵立新. 水位调控人工湿地净化效果及微生物群落变化分析[J]. 北京水务, 2019(6): 25-30. (ZHAN Nan, HUANG Bing-bin, ZHAO Li-xin. Analysis on Purification Effect and Microbial Community Change of Artificial Wetland Regulated by Water Level[J]. Beijing Water, 2019(6): 25-30. (in Chinese))
- [33] 赵诗惠, 吕 亮, 蒋志云, 等. ABR-MBR 组合工艺短程硝化过程的微生物种群[J]. 中国环境科学, 2018, 38(2): 566-573. (ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, JIANG Zhi-yun, *et al.* Analysis of Microbial Population of Shortcut Nitrification in ABR-MBR Process[J]. China Environmental Science, 2018, 38(2): 566-573. (in Chinese))
- [34] TEBO B M, BARGAR J R, CLEMENT B G, *et al.* Biogenic Manganese Oxides: Properties and Mechanisms of Formation[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2004, 32: 287-328.