

背角无齿蚌对鸢尾-苦草组合去除氮磷效果的提升作用研究

马英姿¹, 段继成², 程俊涛³, 王飞³, 杨文¹, 王方舒¹, 董绪科⁴, 陈栋^{1,*}

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525; 2. 青岛大任水务有限公司, 青岛 266200;
3. 青岛张村河水务有限公司, 青岛 266100; 4. 鄞城县农业农村局, 菏泽 274600)

摘要:研究了滤食性底栖动物背角无齿蚌提升西伯利亚鸢尾-苦草组合去除氮磷的效果, 通过对比动植物体内和底泥中氮磷含量变化、植物根系硝化反硝化强度和微生物群落结构差异, 明确背角无齿蚌对水生植物去除水中氮磷效果的影响。结果表明, 背角无齿蚌可以强化西伯利亚鸢尾-苦草植物组合对水中氮磷的去除效果, 试验第 63 天, 与西伯利亚鸢尾-苦草组(R1 组)相比, 西伯利亚鸢尾-苦草-背角无齿蚌组(R2 组)的 TN 和 TP 去除率分别提升了 22.98% 和 28.50%, R2 组植物体内氮磷含量分别提高了 4.37% 和 5.60%, 底泥中氮磷含量分别提高了 53.03% 和 9.88%, 且 R2 组植物根系硝化与反硝化强度分别提升了 21.74% 和 17.78%。高通量测序结果显示, R2 组与脱氮除磷相关的微生物相对丰度均高于 R1 组, 与脱氮相关的微生物 *Thiobacillus*、*unclassified_k_norank_d_Bacteria* 和 *Nitrospira*, 相对丰度分别增加至 2.3%、1.7% 和 1.5%; 与除磷相关的微生物 *norank_f_Gemmatimonadaceae* 和 *Flavobacterium* 相对丰度分别增加至 3.1% 和 1.4%, 表明背角无齿蚌能够提高功能微生物丰度, 促进植物对氮磷的吸收同化。试验结果可为城市河流的污染治理与生态修复提供理论指导。

关键词:背角无齿蚌; 西伯利亚鸢尾; 苦草; 氮磷去除; 高通量测序

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 1673-4602(2025)06-0090-08

The enhancing effect of *Anodonta woodiana* in the removal of nitrogen and phosphorus by *Iris sibirica*-*Vallisneria natans* combination

MA Yingzi¹, DUAN Jicheng², CHENG Juntao³, WANG Fei³, YANG Wen¹,
WANG Fangshu¹, DONG Xuke⁴, CHEN Dong^{1,*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;
2. Qingdao Daren Water Service Co., Ltd., Qingdao 266200, China; 3. Qingdao Zhangcun River Water Service Co., Ltd., Qingdao 266100, China; 4. Juancheng County Agricultural and Rural Affairs Bureau, Heze 274600, China)

Abstract: The enhancing effect of filter-feeding benthic benthos, *Anodonta woodiana*, in the removal of nitrogen and phosphorus by *Iris sibirica*-*Vallisneria natans* combination was investigated, and its influence on the effect of aquatic plants in removing nitrogen and phosphorus from water was clarified by comparing the changes of nitrogen and phosphorus contents in plants and animals and in the substrate, the intensity of nitrification and denitrification in the plant root system, and the differences in the structure of microbial communities.

收稿日期: 2024-05-08

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2020ME225); 青岛市科技惠民专项(23-2-7-zdfn-2-nsh); 青岛西海岸新区科技惠民专项(2021-99)

作者简介: 马英姿(1998—), 女, 山东费县人。硕士, 研究方向为水生态修复。E-mail: 117780298@qq.com。

* 通信作者: 陈栋(1981—), 男, 山东宁阳人。博士, 副教授, 主要从事污水处理与资源化方面的研究。

E-mail: chendong_cau@163.com。

The results showed that *Anodonta woodiana* could strengthen the effect of the *Iris sibirica-Vallisneria natans* combination in the removal of nitrogen and phosphorus from water. On the 63rd day of the experiment, compared with the *Iris sibirica-Vallisneria natans* group (group R1), the removal rate of TN and TP in the *Iris sibirica-Vallisneria natans-Anodonta woodiana* group (group R2) was increased by 22.98% and 28.50% respectively, and the content of nitrogen and phosphorus in the plant body of the group R2 was increased by 4.37% and 5.60%, the content of nitrogen and phosphorus in the substrate increased by 53.03% and 9.88%, and the intensity of nitrification and denitrification in the root system of the plants in the group R2 increased by 21.74% and 17.78% respectively. High-throughput sequencing results showed that the relative abundance of microorganisms related to denitrification and phosphorus removal in the group R2 was higher than that in the group R1, and the relative abundance of microorganisms related to denitrification, *Thiobacillus*, *unclassified_k__norank_d__Bacteria* and *Nitrospira*, was increased to 2.3%, 1.7% and 1.5% respectively; the relative abundance of microorganisms related to phosphorus removal, *norank_f__Gemmatimonadaceae* and *Flavobacterium*, increased to 3.1% and 1.4% respectively. It was shown that *Anodonta woodiana* could increase the abundance of functional microorganisms and promote the assimilation and absorption of nitrogen and phosphorus by plants. The experimental results can provide theoretical guidance for pollution management and ecological restoration of urban rivers.

Key words: *Anodonta woodiana*; *Iris sibirica*; *Vallisneria natans*; nitrogen and phosphorus removal; high-throughput sequencing

国家“十四五”水环境治理提出了“有河有水,有鱼有草,人水和谐”的治水目标,要求地表水好于Ⅲ类水体的比例达到 85%。氮磷是影响地表水水质的主要污染物。当前,水体中的氮磷主要依靠人工曝气、引水调水等物理方法和投加化学药剂等化学方法去除,短期内虽能取得良好的效果,但存在着成本高、周期短等缺点。与之相比,生物方法更加经济环保、自我维持能力更强,因而得到广泛应用^[1],它主要是利用适宜的水生动植物构建稳定的水生态系统,从而实现水环境保护的可持续性。

单一植物较难取得理想的氮磷去除效果,例如千屈菜对 TN 的去除率仅为 54.8%,TP 去除率低于 50%^[2]。张泽西等^[3]选取水葱、黄花鸢尾和狐尾藻等水生植物,配置成 10 种植物组合,结果表明,植物组合的净水效果均比单一植物的净水效果好,水葱+黄花鸢尾+狐尾藻组合对水中 TN 和 TP 的去除率达到 74.38%和 89.73%。朱晓瑞等^[4]研究表明,与单独种植水葱相比,种植水葱+空心菜 TN、TP 去除率分别提高了 7.70%和 10.81%。因此,利用水生植物去除氮磷等污染物的研究多聚焦于植物配置的优化。

近年来,许多研究发现底栖类水生动物在水体氮磷循环过程中扮演着重要角色。李萍等^[5]研究发现,蚌草共存能更大程度地降低水中的 TN 含量,草处理组在试验第 58 天 TN 含量降至(1.73±0.76) mg/L,蚌草共存组降至(1.54±0.45) mg/L。李雪娟等^[6]研究表明,在 TP 去除方面,螺蚌+沉水植物组的效果优于单独种植沉水植物组,轮叶黑藻+篦齿眼子菜组的 TP 去除率不足 50.00%,而螺蚌+轮叶黑藻+篦齿眼子菜组的 TP 去除率达到了 88.57%。

目前,虽然利用底栖动物与水生植物协同去除氮磷的研究较多,但对二者协同作用过程中氮磷转移途径以及微生物群落结构的变化研究仍较少。本文将背角无齿蚌投入西伯利亚鸢尾-苦草的水生植物组合中,研究三者协同去除氮磷的效果,对比动植物体内和底泥中氮磷含量变化,分析植物根系硝化反硝化强度和微生物群落结构差异,明确背角无齿蚌对水生植物去除水中氮磷效果的影响,以为水生态修复工程中氮磷去除提供理论指导。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

根据各气候分区水质净化工程常用的植物种类,选择了适宜北方气候的西伯利亚鸢尾(*Iris sibirica*)、黄菖蒲(*Iris pseudacorus*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*)3种挺水植物,苦草(*Vallisneria spiralis*)、菹草(*Potamogeton crispus*)和马来眼子菜(*Potamogeton malaiianus*)3种沉水植物,耐寒睡莲(*Nymphaea tetragona*)1种浮水植物,共计7种水生植物进行预试验。根据试验结果,经综合考虑,选取西伯利亚鸢尾-苦草组合为本次试验的水生植物。植物购自青岛市某水生植物基地,试验前对所有植物进行7d预培养,以恢复植物的根系活性。

选取常见的双壳贝类背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)、三角帆蚌(*Hyriopsis cumingii*)、河蚬(*Corbicula fluminea*)和刮食性梨形环棱螺(*Bellamya purificata*)预培养,选择成活率和滤食率较高的背角无齿蚌进行试验。背角无齿蚌购自青岛某水产中心,预培养72h,不喂食。

试验用水取自青岛市张村河上游中层水,取水时间为夏季,初始水质指标见表1。后续进水使用自来水模拟配制,同时在自来水中加入浓度为1:10的霍格兰氏营养液,以满足动植物对除氮磷元素以外其他元素的需要。

表1 水质指标

水温/℃	$\text{NH}_4^+-\text{N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{NO}_3^--\text{N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{NO}_2^--\text{N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{TP}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{COD}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	pH
25±1	4.029±0.120	1.920±0.100	0.064±0.050	0.401±0.100	50.0±1.2	6~9

试验底泥取自青岛市张村河上游河段,初始氮磷含量分别为(1550±45.6)和(1563±81.1)mg/kg。

1.2 试验方法

选择生长状态良好且茎粗、根长相近的西伯利亚鸢尾植株3棵,苦草植株15棵,分别修剪至株高30和10cm,鲜重为(10.7±0.2)和(6.1±0.3)g,植入长方体透明亚克力水缸(尺寸约为35cm×25cm×23cm)中作为R1组,水缸内试验底泥约5kg,试验用水约11L。R2组中除西伯利亚鸢尾和苦草2种水生植物外,引入6只生命状态活跃、体长4cm、体重(36.0±0.3)g的背角无齿蚌,其他条件与R1组保持一致。

在水缸两端开孔用于进出水,模拟动态河流,水力停留时间为2d,试验共进行63d,采取自然光照,温度为(25±1)℃。前3d每天取样,之后隔天取样,以对比2组试验中氮磷的浓度变化。

试验完成后,分别采集R1和R2组植株根际1cm范围内的底泥各2g。将同组的样品置于无菌烧杯中充分混匀,每组设置5个生物学重复。混合后的样品分装至无菌密封袋,随后转移至-80℃超低温冰箱保存,直至DNA提取。

为了准确测定植物根际硝化强度,设置2组试验。①分别将R1和R2植株根系周围的底泥充分混匀,准确称取10g混合样品置于250mL锥形瓶内。向瓶内注入100mL NH_4^+-N 培养液(质量浓度为25mg/L),瓶口用脱脂棉和纱布密封,在恒定的20℃温度和140r/min的转速下,对样品进行振荡培养,持续时间为24h。通过比较培养前后 NO_3^--N 含量的差异,计算得出植物根际硝化作用强度。②取1个锥形瓶,加入100mL NO_3^--N 培养液,采用橡皮塞和保鲜膜双重密封,并用黑色遮光袋包裹。将样品置于20℃恒温条件下培养24h。培养完成后,过滤收集上清液,测定其中 NO_3^--N 浓度。通过比较培养前后 NO_3^--N 含量的差异,计算得出植物根际反硝化作用强度。

1.3 主要指标测定及分析

TN质量浓度采用碱性过硫酸钾法测定; NH_4^+-N 采用纳氏试剂分光光度法测定; NO_3^--N 、 NO_2^--N 采用紫外分光光度法测定;TP质量浓度采用钼酸铵分光光度法测定;pH和溶解氧(DO)采用WTW-Multi3620IDS便携式多参数测定仪测定。

微生物群落结构多样性分析采用16S rRNA测序,使用Illumina MiSeq平台进行高通量测序(上海美吉科技股份有限公司),并采用Mothur(V.1.31.2)和QIIME(V.1.8.0)等软件进行微生物群落结构多样性分析,PCR扩增引物名称为338F_806R,F端序列为5'-CCTACGGGNGGCWGCAG-3',R端序列为5'-

GACTACHVGGGTATCTAATCC-3'。

硝化反硝化强度计算公式如下:

$$\omega = (c_1 - c_2) \times (v_1 + v_2) \times k / (t \times m) \quad (1)$$

式中: ω 为单位质量的底泥样品在单位时间内所产生的 NO_3^- -N, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{h})$; c_1 为初始时溶液中 NO_3^- -N 的含量, mg/L ; c_2 为培养 24 h 后溶液中 NO_3^- -N 的含量, mg/L ; v_1 和 v_2 分别为培养液和底泥样品中水分的体积, L ; k 为水分系数; t 为培养时间, h ; m 为样品质量, kg 。

植株体内的 TN 和 TP 采用 H_2SO_4 - H_2O_2 的消解方法测定;底泥中的 TN 和 TP 分别采用半微量凯氏法和 HClO_4 - H_2SO_4 消煮钼锑抗比色法测定。

2 结果与讨论

2.1 协同去除氮效果

水体中 N 浓度与去除率的变化如图 1 所示。

由图 1(a)可知,第 63 天,R1 组中 TN 的质量浓度为 $(1.8 \pm 0.021) \text{ mg}/\text{L}$,去除率为 70.05%;R2 组为 $(0.4 \pm 0.063) \text{ mg}/\text{L}$,去除率达到 93.03%,比 R1 高出 22.98%,表明添加背角无齿蚌可以提高西伯利亚鸢尾-苦草植物组的 TN 去除率。

由图 1(b)可知,第 63 天,R1 组和 R2 组的 NH_4^+ -N 去除率分别为 52.14% 和 62.94%,R2 略高于 R1。但 R1 组的 NH_4^+ -N 浓度整体呈下降趋势,R2 组浓度则先上升后下降。有研究表明底栖动物通过排泄可直接影响水体中氮的形态^[7],背角无齿蚌在试验初期代谢活动较为活跃, NH_4^+ -N 浓度的上升可能与其排泄有关,随着其逐渐适应新环境,生命活动趋于稳定,水中 NH_4^+ -N 的减少量开始超过释放量,从而导致其浓度降低。因此,尽管背角无齿蚌在短期内可能导致水中 NH_4^+ -N 浓度的上升,但从长期来看,它能够提升西伯利亚鸢尾-苦草组合对 NH_4^+ -N 的去除率。

如图 1(c)所示,2 组试验 NO_3^- -N 浓度呈现下降趋势,第 63 天 R1 组 NO_3^- -N 质量浓度为 $(0.4 \pm 0.034) \text{ mg}/\text{L}$,去除率为 87.9%;R2 组在第 31 天 NO_3^- -N 基本得到去除。

2.2 协同去除磷效果

水体中 TP 浓度和去除率变化如图 2 所示。

由图 2 可知,第 63 天,R1 组 TP 浓度降至 $(0.147 \pm 0.007) \text{ mg}/\text{L}$,去除率为 26.5%;R2 组 TP 质量浓度降至 $(0.09 \pm 0.008) \text{ mg}/\text{L}$,去除率为 55%,比 R1 组去除率高出

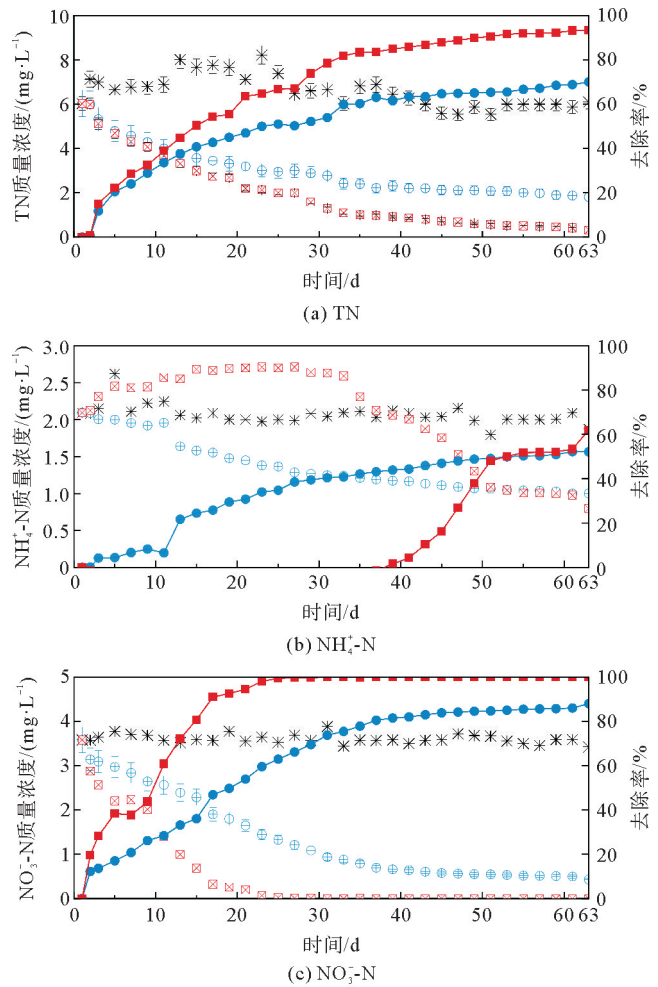


图 1 水体中 N 浓度和去除率变化

* 进水; ⊕ R1 浓度; ⊠ R2 浓度; ● R1 去除率; ■ R2 去除率

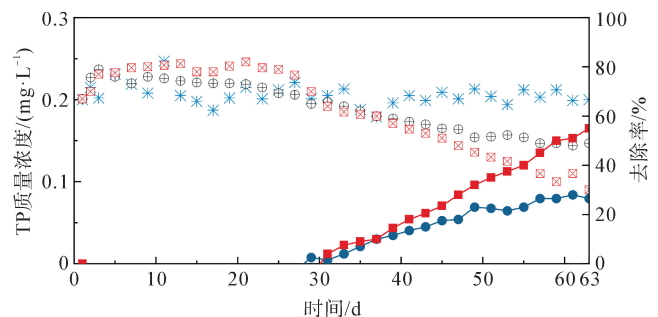


图 2 水体中 TP 浓度和去除率变化

* 进水; ⊕ R1 浓度; ⊠ R2 浓度; ● R1 去除率; ■ R2 去除率

28.5%。但在前35 d, R1组和R2组去除效果均不明显,这是因为背角无齿蚌刚进入新环境时,在泥水界面层的活动较为活跃,从而扰动了基质内的磷,使其向水中释放^[8]。随着背角无齿蚌逐渐适应环境,其活动强度减弱,水体中的磷可能通过沉降吸附和微生物作用被有效转移。可见,引入背角无齿蚌对西伯利亚鸢尾-苦草组合去除TP也有一定作用。

2.3 动植物体内和底泥中氮磷含量变化

试验第63天, R1组和R2组中各受试植物皆表现出良好的生长趋势,西伯利亚鸢尾和苦草湿重增加了20.03~111.08 g;背角无齿蚌生命状态良好,未出现死亡现象。各样品中氮磷含量的变化如图3所示。

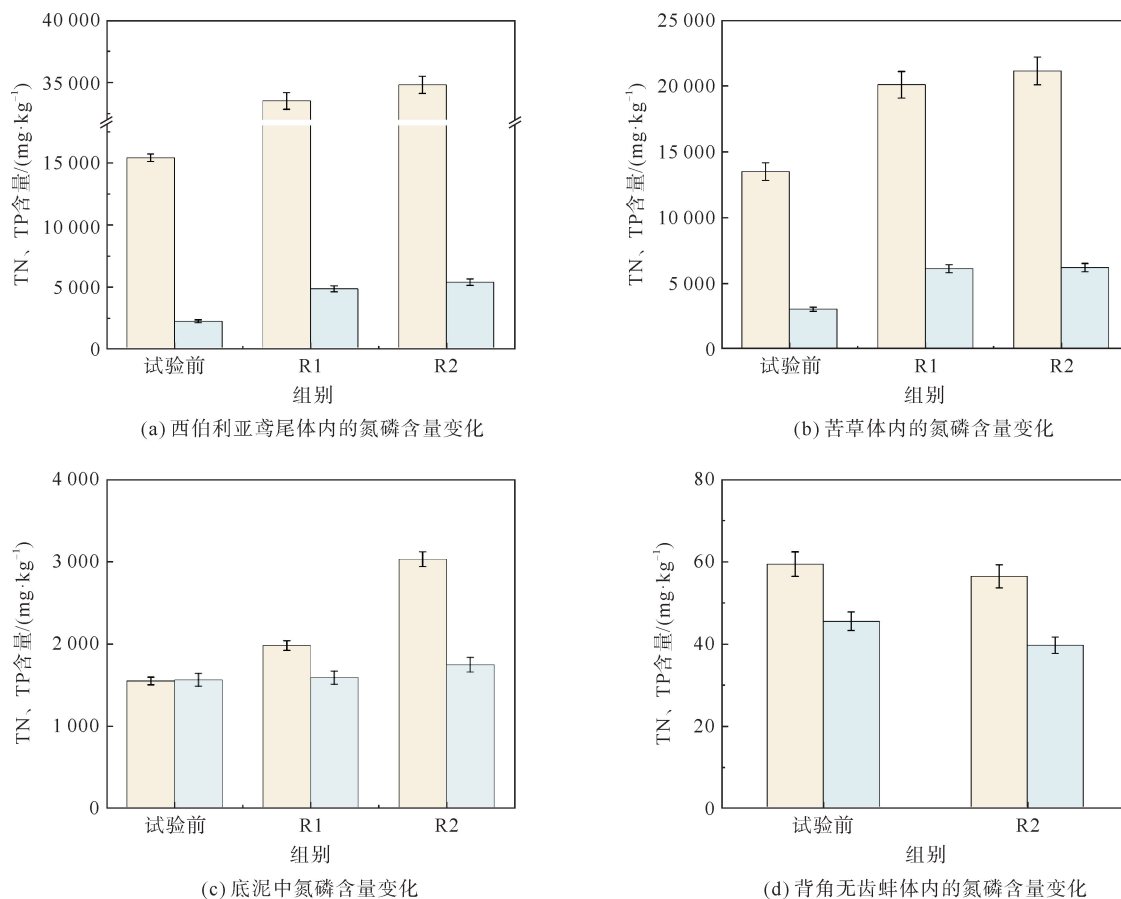


图3 各样品中氮磷含量变化

■ TN; ■ TP

由图3(a)可知,西伯利亚鸢尾植株体内初始TN含量为 $(15\,390 \pm 769.50)$ mg/kg,试验后R1组和R2组分别增加至 $(33\,510 \pm 570.50)$ 和 $(34\,800 \pm 694.50)$ mg/kg;TP含量也由试验前的 $(2\,230 \pm 118.35)$ mg/kg分别增加至 $(4\,842 \pm 222.90)$ 和 $(5\,376 \pm 206.92)$ mg/kg。

由图3(b)可知,苦草植株体内的TN含量由 $(13\,490 \pm 8.50)$ mg/kg分别增加至 $(20\,090 \pm 4.36)$ 和 $(21\,140 \pm 8.00)$ mg/kg;TP含量由 $(3\,039 \pm 125.76)$ mg/kg分别增加至 $(6\,115 \pm 233.10)$ 和 $(6\,195 \pm 121.46)$ mg/kg。这是由于水生植物通过同化作用吸收了水体和底泥中铵态氮和硝态氮,在谷氨酰胺合成酶和谷氨酸合成酶作用下转化为有机氮^[9],这一结果同时也证实了西伯利亚鸢尾和苦草具有良好的氮磷吸收能力。相较R1组,R2组2种水生植物体内TN、TP的含量分别提高了4.37%和5.60%,可能是背角无齿蚌代谢活动的产物有利于西伯利亚鸢尾和苦草的生长,加快了2种水生植物对氮磷的吸收利用。

由图3(c)可知,R1组底泥中的TN含量由试验前的 $(1\,550 \pm 21.76)$ mg/kg增加至 $(1\,980 \pm 59.01)$ mg/kg,这主要是水体中的氮经过自然沉降,转移至底泥中;R2组底泥中的TN含量由试验前的 $(1\,550 \pm 21.76)$ mg/kg增加至 $(3\,030 \pm 86.46)$ mg/kg,相较于R1组高出53.03%,表明背角无齿蚌可能促进了水

中的氮向底泥中转移。R1 组底泥中的 TP 含量由试验前的(1 563±65.58) mg/kg 增加至(1 589±77.42) mg/kg,R2 组底泥中的 TP 含量由试验前的(1 563±65.58) mg/kg 增加至(1 746±87.06) mg/kg,比 R1 组高出 9.88%,表明背角无齿蚌可能对底泥中磷的沉降吸附有一定的影响。这是由于底栖动物在泥水界面层的生命活动会调节沉积物—水体的物质和能量交换,影响污染物归趋。

由图 3(d)可知,因为试验期间并没有对背角无齿蚌进行喂食,其体内的 TN、TP 含量分别降低了(581.6±1.21)和(279±1.17) mg/kg,证明背角无齿蚌可能向外释放了体内的氮磷。NOGARO 等^[10]在试验中也观察到,除滤食外,双壳贝类的呼吸、分泌、排泄等生理活动会增加水中营养盐浓度,这也可能是试验前 35 d $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 升高的原因。

2.4 根系微生物硝化反硝化强度

对 R1 组和 R2 组根系微生物进行硝化反硝化强度计算,结果显示,R1 组硝化强度为(0.69±0.003) mg/(kg·h),R2 组硝化强度为(0.84±0.022) mg/(kg·h),R2 组比 R1 组提高了 21.74%;R1 组反硝化强度为(55.58±1.702) mg/(kg·h),R2 组反硝化强度为(65.46±2.721) mg/(kg·h),比 R1 组提高了 17.78%,表明在西伯利亚鸢尾-苦草组中添加背角无齿蚌会促进水生植物根系硝化反应和反硝化反应。BETINA 等^[11]在研究中发现,底栖动物缢蛭能够改变微生物群落结构和组成,提高硝化菌数量,增加酶的活性,进而影响污染物的去除。

2.5 根系微生物群落结构变化

对 R1 组和 R2 组植株根际沉积物样品进行微生物群落分析,通过 16S rRNA 基因高通量测序共获得优化序列 173 734 条,优化序列碱基数为 72 187 075,平均序列长度为 415 bp。如表 2 所示,2 组样品的 Coverage 指数均超过 99%,表明测序获得的数据较为完整,能够有效反映样品中微生物群落的真实组成。Alpha 多样性分析中,在群落丰富度方面,采用 Ace 指数进行评估,结果显示 R2 组(999.086)高于 R1 组(977.087),表明引入背角无齿蚌的 R2 组具有更高的微生物丰富度;在群落多样性方面,通过 Simpson 指数分析发现,R2 组(0.006)的指数值低于 R1 组(0.009),说明 R2 组的群落多样性相对更大,物种更丰富。

表 2 微生物群落 Alpha 多样性指数

组别	Ace	Shannon	Simpson	Coverage
R1	977.087	5.451	0.009	0.998
R2	999.086	5.719	0.006	0.999

为了更好地了解微生物的结构和组成,进一步分析了主要微生物在门水平和属水平上的分布及其相对丰度,如图 4 所示。

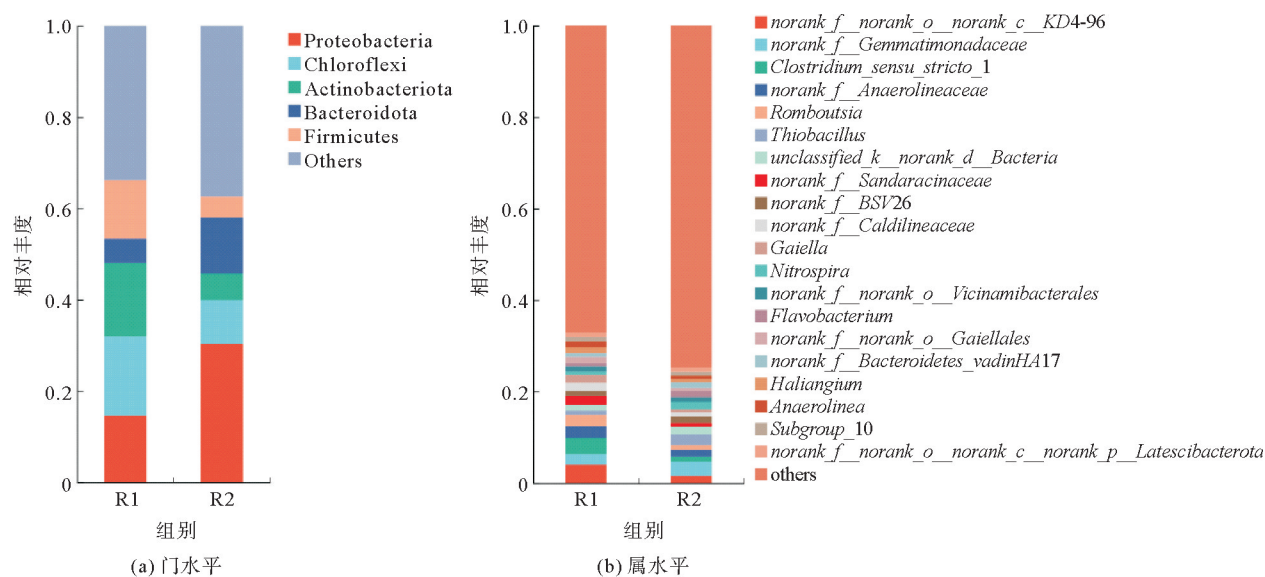


图 4 微生物群落结构在门水平和属水平上的组成变化情况

由图4(a)可知,在2组微生物样品中,变形菌门(Proteobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、放线菌门(Actinobacteriota)、拟杆菌门(Bacteroidota)和厚壁菌门(Firmicutes)是相对丰度最高的5类,其中,变形菌门和拟杆菌门含有大量与脱氮除磷有关的微生物^[12]。大多数脱氮细菌隶属于变形菌门,在反硝化中起着主导作用^[13],与R1组相比,R2组的变形菌门相对丰度提高了15.7%。拟杆菌门同样也可以促进反硝化反应^[14],在R2中的相对丰度提高了7.1%。因此R2组反硝化反应进行较快,促进了硝态氮的降解。

对R1、R2 2组样品在属水平上进行微生物分析,结果如图4(b)所示,R1组相对丰度最大的菌属为 *norank_f_norank_o_norank_c_KD4-96*(4.0%)、*Clostridium_sensu_stricto_1*(3.0%)、*norank_f_Anaerolineaceae*(2.5%)、*Romboutsia*(2.4%)和 *norank_f_Gemmatimonadaceae*(2.0%),R2组相对丰度最大的菌属为 *norank_f_Gemmatimonadaceae*(3.1%)、*Thiobacillus*(2.3%)、*unclassified_k_norank_d_Bacteria*(1.7%)、*Nitrospira*(1.5%)和 *Flavobacterium*(1.4%)。其中 *Nitrospira*(硝化螺旋菌属)是常见的硝化菌属^[15],*Thiobacillus*(硫杆菌属)是典型的植物根系反硝化菌属^[16],它们在R2组的相对丰度均高于R1,这也解释了章节2.4中R2组硝化强度和反硝化强度提高的原因。*unclassified_k_norank_d_Bacteria*(未分类属的反硝化细菌)相对丰度增大,进一步证明了背角无齿蚌能够提高底泥中硝化细菌和反硝化细菌的丰度,从而提高西伯利亚鸢尾-苦草组合的脱氮效果。

与除磷相关的微生物为 *Flavobacterium*(黄杆菌属)和 *norank_f_Gemmatimonadaceae*(未分类属的芽单胞菌属)^[17]。R2组样品中常见的反硝化除磷菌属 *Flavobacterium* 相对丰度增加至1.4%,*norank_f_Gemmatimonadaceae* 作为聚磷酸盐积累生物,相对丰度也比R1组中高出1.1%。

3 结论

1) 背角无齿蚌可以强化西伯利亚鸢尾-苦草组合对水中氮磷的去除作用,添加背角无齿蚌使TN、TP去除率分别提升了22.98%和28.50%,同时,2种水生植物体内的TN、TP含量提高了4.37%和5.60%,底泥中的TN、TP含量提高了53.03%和9.88%。

2) 添加背角无齿蚌后,植物根系硝化强度和反硝化强度分别提升了21.74%和17.78%;与脱氮相关的微生物 *Thiobacillus*、*unclassified_k_norank_d_Bacteria* 和 *Nitrospira*,相对丰度分别增加至2.3%、1.7%和1.5%;除磷相关微生物 *norank_f_Gemmatimonadaceae* 和 *Flavobacterium* 相对丰度分别增加至3.1%和1.4%。

参考文献(References):

- [1] 田军,张春敏,金竹静,等.城市河道生态整治技术研究进展[J].环境科学导刊,2017,36(3):38-41.
TIAN Jun,ZHANG Chunmin,JIN Zhujing,et al. Advance of urban river ecological remediation technology[J]. Environmental Science Survey,2017,36(3):38-41.
- [2] 杨洪云,王永刚,李焕利,等.两种浮床植物对水体中氮磷吸收能力及其水质净化效果[J].净水技术,2017,36(3):63-67.
YANG Hongyun,WANG Yonggang,LI Huanli,et al. Absorption capacity of two kinds of floating bed plants for nitrogen and phosphorus removal in waterbody and the purification effect on water quality[J]. Water Purification Technology,2017,36(3):63-67.
- [3] 张泽西,刘佳凯,张振明,等.种植不同植物及其组合的人工浮岛对水中氮、磷的去除效果比较[J].湿地科学,2018,16(2):273-278.
ZHANG Zexi,LIU Jiakai,ZHANG Zhenming,et al. Comparison of removal efficiency of nitrogen and phosphorus by artificial floating islands with different plants[J]. Wetland Science,2018,16(2):273-278.
- [4] 朱晓瑞,张春雪,郑向群,等.天津地区生态沟渠不同植物配置对氮磷去除效果研究[J].环境污染与防治,2020,42(2):170-175.
ZHU Xiaorui,ZHANG Chunxue,ZHENG Xiangqun,et al. Study on nitrogen and phosphorus purification effect of different plant configurations in ecological ditch in Tianjin area[J]. Environmental Pollution & Control,2020,42(2):170-175.
- [5] 李萍,张修峰,莫树青.背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)、苦草(*Vallisneria natans*)及其共存对水质的影响[J].生态学杂志,2016,35(6):1589-1594.
LI Ping,ZHANG Xiufeng,MO Shuqing. Effects of mussel (*Anodonta woodiana*), submerged macrophyte (*Vallisneria natans*) and

- their coexistence on water quality[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(6): 1589-1594.
- [6] 李雪娟, 和树庄, 常学秀, 等. 螺蚌和沉水植物搭配对微污染水体的净化作用[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 95-102.
LI Xuejuan, HE Shuzhuang, CHANG Xuexiu, et al. Role of snails, mussels and submerged plants in purifying micro-polluted water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(1): 95-102.
- [7] ZHU S, SAUCIER B, DURFEY J, et al. Waste excretion characteristics of Manila clams (*Tapes philippinarum*) under different temperature conditions[J]. Aquacultural Engineering, 1999, 20(4): 231-244.
- [8] REGAN N, BETINA L, ZHENG Z M, et al. Effects of *Bellamya aeruginosa* and *Corbicula fluminea* bioturbation on the vertical distribution of phosphorus forms in aquatic sediments: A laboratory study[J]. Journal of Soils & Sediments, 2023, 24(2): 1019-1029.
- [9] 耿超. 湿地植物对沉积物磷迁移转化的影响研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2017.
GENG Chao. The effect of wetland plants on migration and transformation of phosphorus in sediments[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2017.
- [10] NOGARO G, MERMILLOD B F, FRANCOIS C, et al. Invertebrate bioturbation can reduce the clogging of sediment: An experimental study using infiltration sediment columns[J]. Freshwater Biology, 2006, 51(8): 1458-1473.
- [11] BETINA L, YANG W, ZHENG Y Q, et al. Bioturbation by the razor clam (*Sinonovacula constricta*) on the microbial community and enzymatic activities in the sediment of an ecological aquaculture wastewater treatment system[J]. Science of The Total Environment, 643: 1098-1107.
- [12] ZHANG Y R, ZHANG W J, WANG H T, et al. N, P and C removal simultaneously and microbial population numbers in a cyclic activated sludge system treating village and township domestic wastewater by altering the cycle times[J]. Water Science and Technology, 2023, 88(9), 2271-2283.
- [13] 景琪, 袁佳佳, 袁辉洲, 等. 植物-SBR 复合系统对邻苯二甲酸二正辛酯的去除作用与微生物菌群结构研究[J]. 给水排水, 2023, 59(S1): 72-80.
JING Qi, YUAN Jiajia, YUAN Huizhou, et al. Removal effect of Di-n-octyl phthalate in Vegetation-Sequencing Batch Reactor and its microbial community structure[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(S1): 72-80.
- [14] 赵伟华, 白萌, 马旭蛟, 等. 净化槽不同填料生物膜在低温下的脱氮性能与种群结构[J]. 水处理技术, 2023, 49(1): 108-112.
ZHAO Weihua, BAI Meng, MA Xujiao, et al. Nitrogen removal performance and microbial structure of different fillers biofilm in johkasou under low temperature[J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(1): 108-112.
- [15] 邱超超. 青岛市李村河再生水补水河段微生物群落多样性研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2023.
QIU Chaochao. Study on microbial community diversity in the reclaimed water reclaimed water section of Licun River in Qingdao[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2023.
- [16] 贺赞, 李雪梅, 李宏权, 等. 再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征[J]. 环境科学, 2024, 45(5): 2707-2714.
HE Yun, LI Xuemei, LI Hongquan, et al. Characteristics of epiphytic bacterial community on submerged macrophytes in water environment supplemented with reclaimed water[J]. Environmental Science, 2024, 45(5): 2707-2714.
- [17] ZHAO W H, BI X J, BAI M, et al. Research advances of ammonia oxidation microorganisms in wastewater: Metabolic characteristics, microbial community, influencing factors and process applications[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2023, 46(5): 621-633.

(责任编辑 赵金环; 英文校审 程文华)