

三角帆蚌对白洋淀底泥氮磷释放及微生物的影响探究

李乾岗, 魏 婷, 张光明*, 仙 光

中国人民大学环境学院, 北京 100872

摘要: 为了解三角帆蚌对白洋淀底泥的影响,以白洋淀淀区水和底泥为试验材料,通过室内模拟试验并结合 16S rRNA 高通量测序技术,考察了三角帆蚌的活动对底泥氮、磷释放以及微生物丰度和多样性的影响。结果表明:①三角帆蚌的生物扰动作用显著提高了底泥氮、磷的释放,上覆水中 TN、NH₃-N 和 TP 浓度分别提高了 0.18、1.1 和 1.2 倍,颗粒态 NH₃-N 和可溶性磷浓度的增加是上覆水中 NH₃-N、TP 浓度增加的主要来源。②三角帆蚌的生物扰动作用轻微提高了上覆水中 COD_{Cr} 的浓度 ($P < 0.05$),并降低了底泥中全氮、全磷的含量,将底泥中全氮、全磷的削减率分别提高了 26.0% 和 10.9%,底泥氮、磷释放规律的不同是导致全氮削减率高于全磷的主要原因。③三角帆蚌的活动可显著降低水中蓝细菌的数量,为其他微生物提供了更多生态位,从而提高了脱氮除磷功能菌丰度和微生物多样性,但是三角帆蚌对底泥中微生物丰度和多样性影响较小。研究显示,三角帆蚌能极大地促进白洋淀底泥氮、磷释放,同时降低内源污染风险,并提高上覆水脱氮除磷功能菌丰度和微生物多样性,可依据实际情况用于白洋淀湿地修复中。

关键词: 三角帆蚌; 白洋淀; 底泥释放; 微生物多样性; 生物扰动

中图分类号: X524

文章编号: 1001-6929(2020)10-2318-08

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.06.03

Effects of *Hyriopsis cumingii* on Nitrogen and Phosphorus Releases from Sediment and on Wetland Microorganisms in Baiyangdian Wetland

LI Qiangang, WEI Ting, ZHANG Guangming*, XIAN Guang

School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China

Abstract: The effects of *Hyriopsis cumingii* on Baiyangdian wetland sediment were studied using water and sediment collected from the wetland via lab simulation experiments and high-throughput sequencing of metagenomic 16S rRNA. The effects of *Hyriopsis cumingii* on N and P release, and microbial abundance and diversity of sediment were investigated. The results showed that: (1) The release of TN, NH₃-N and TP from sediment was obviously promoted by *Hyriopsis cumingii*, and the equilibrium concentrations of TN, NH₃-N and TP in the water increased by 0.18, 1.1 and 1.2 times compared with the control group. The increase of particulate NH₃-N and soluble P was the main reason for the increase of NH₃-N and TP in water. (2) *Hyriopsis cumingii* slightly increased COD_{Cr} in water ($P < 0.05$) and reduced the concentration of N and P in sediment, and the sediment N and P removal increased by 26.0% and 10.9% respectively compared with the control group. The difference in N and P removal was due to the different release patterns of N and P. (3) *Hyriopsis cumingii* greatly reduced the amount of cyanobacteria in water, therefore providing more ecological niches for other microbes, and improving the abundance and microbial diversity of denitrification and dephosphorization bacteria in water. On the other hand, *Hyriopsis cumingii* had little effect on microbial abundance and diversity in sediments. This study shows that *Hyriopsis cumingii* promotes the release of N and P from sediment and reduces the risk of endogenous pollution in the Baiyangdian wetland. The abundance and microbial diversity of water denitrifying and dephosphorizing bacteria are also increased. These findings can be applied to the restoration of the Baiyangdian wetland.

Keywords: *Hyriopsis cumingii*; Baiyangdian wetland; sediment release; microbial diversity; bioturbation

白洋淀位于雄安新区核心地带,是华北地区最大的淡水湿地,对区域生态调节与社会发展具有重要意义^[1-2]。然而,由于周边农业、养殖业的快速发展,导

致白洋淀水质长期处于富营养化状态^[3],大量氮、磷沉积在底泥中^[4],增加了白洋淀地区氮、磷内源污染的风险^[5-6]。近年来随着白洋淀流域治理稳步推进,

收稿日期: 2019-11-21 修订日期: 2020-05-28

作者简介: 李乾岗(1996-),男,山西临汾人,lqg2018@ruc.edu.cn.

* 责任作者,张光明(1973-),女,湖南永州人,教授,博士,博导,主要从事水污染控制理论与技术研究,2020017@hebut.edu.cn

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(No.2018ZX07110003)

Supported by National Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment, China (No.2018ZX07110003)

尤其是在雄安新区设立之后,水质持续改善^[2]. 2019 年 8 月采样结果表明,白洋淀大部分地区的水质达到 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》IV 类标准. 在外源污染得到有效控制、上游来水水质较好且相对稳定时,内源污染将成为水中氮、磷污染的主要来源^[7]. 上覆水理化性质、底泥性质以及对底泥扰动时间与强度都会影响底泥氮、磷释放^[8]. 在白洋淀这种底泥与水质条件相对稳定的自然水域中,底栖动物所产生的生物扰动作用成为促进底泥污染物释放的主要动力^[9]. 生物扰动作用是指底栖动物通过呼吸、捕食等生命活动,搅动周边的底泥环境,促进底泥中物质再分配的过程^[10]. 生物扰动会增加底泥与水体之间的物质通量^[11],促进底泥中氮、磷等污染物质释放到水中^[12],同时还会改变湿地中微生物群落结构,进而对湿地水质净化功能产生影响^[13]. 因此,探究底栖动物的生物扰动作用对白洋淀底泥氮、磷释放及微生物的影响,对白洋淀水质保护具有十分重要的意义.

三角帆蚌 (*Hyriopsis cumingii*) 属软体动物门、瓣鳃纲、蚌目、蚌科,是白洋淀地区代表性底栖动物^[14]. 它是一种滤食性贝类,可有效控制水体富营养化、抑制有害藻类繁殖,促进沉水植被系统构建,因而被广泛应用于湿地水体修复中^[15-17]. 廖日红等^[18]采用三角帆蚌控制水体富营养化,发现上层吊养三角帆蚌更有利于降低水体叶绿素 a 含量、提高水体透明度. 张毅敏等^[19]研究了鲌和三角帆蚌协同对富营养化水体的净化,发现藻细胞去除率可达 86.11%,对水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 TP 的去除率均在 60% 以上. 但是已有研究都忽视了三角帆蚌扰动对底泥氮、磷释放及其对微生物的影响. 因此,该研究以三角帆蚌为试验对象,以白洋淀淀区水和自然泥为试验材料,通过室内模拟试验探究三角帆蚌的生物扰动作用对底泥中氮、磷释放的影响,并结合 16S rRNA 高通量测序技术,讨论其对水和底泥中微生物群落结构和多样性的影响,以期对白洋淀湿地修复和内源污染控制技术提供依据.

1 材料与方 法

1.1 试验材料与装置

试验用三角帆蚌来自当地某养殖场,选取大小基本相同、活力较为旺盛的蚌体进行试验,蚌体质量为 (202.7 ± 13.6) g. 试验前将表面清刷干净,在暴晒处理 2 d 的自来水中驯养 1 周.

试验用水、泥来自白洋淀西区入淀区,整体水质为 GB 3838—2002 IV 类标准.

采用圆柱形有机玻璃柱(底内半径 10 cm、高 40 cm)为试验装置,底泥厚度 5 cm,液面高度 30 cm. 在

距液面 10 cm 处进行等功率曝气,保持上覆水中 DO 浓度为 4~6 mg/L,并模拟自然复氧和自然风力搅动过程.

1.2 试验方法

向上述试验装置中加入三角帆蚌一只,运行 15 d,每天固定时间在距液面 10、20 和 30 cm 处分别等量取样、混匀检测水质指标,随后补充试验用水至原高度. 进行平行试验,并设置无三角帆蚌的对照组. 检测上覆水中 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、可溶性 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、可溶性磷的浓度. 此外,对试验前后底泥中全氮、全磷含量和试验结束后水体及底泥中微生物群落进行检测.

1.3 检测和分析方法

1.3.1 水质及底泥氮、磷检测

TN 浓度采用 HJ 636—2012《水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾紫外分光光度法》测定; $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度采用 HJ 535—2009《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》测定;TP 浓度采用 GB 11893—89《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》测定; COD_{Cr} 浓度采用 HJ/T 399—2007《水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法》测定;底泥中全氮含量采用 HJ 717—2014《土壤质量全氮的测定 凯氏法》测定;底泥中全磷含量采用 HJ 632—2011《碱熔—钼锑抗分光光度法》测定.

1.3.2 微生物群落结构分析

底泥微生物样品预处理:利用注射器采集表层底泥 50 mL,3 000 r/min 离心 20 min,弃去上清液后-20 °C 保存.

上覆水微生物样品预处理:利用注射器采集距液面 10、20、30 cm 处的水样共 150 mL,过 0.22 μm 滤膜后,-20 °C 保存.

对预处理样品进行微生物群落高通量测序分析. 基于二代高通量测序,测定 16S rRNA V4 区 PCR 产物,对各样品中微生物群落结构进行分析(引物为 338F: 5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3', 806R:5'-GGACT ACHVGGGTWTCTAAT-3'). DNA 的提取、PCR、建库和测序均由北京美吉桑格生物医药科技有限公司完成,测序使用平台为 Illumina Miseq platform(Illumina, USA).

1.4 数据分析

使用 SPSS 26.0 软件进行相关性分析,以 P 值判断数据显著性,当 $P < 0.05$ 时,认为数据具有统计学意义上的显著差异性. 微生物组间差异采用费舍尔精确检验(Fisher exact test).

Shannon-Wiener 多样性指数(H')常用来估算样

本中微生物多样性, Shannon-Wiener 多样性指数越大, 表明微生物群落多样性水平越高, 其计算公式:

$$H = - \sum_{i=1}^{S_{\text{obs}}} \left(\frac{n_i}{N} \ln \frac{n_i}{N} \right) \quad (1)$$

式中, S_{obs} 为实际观测到的 OTU 数目, n_i 为第 i 个 OTU 所含的序列数, N 为所有序列数。

2 结果与讨论

2.1 上覆水中 TN 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的变化

上覆水中 TN 浓度的变化规律如图 1 所示。由图 1 可见, 0~7 d, 对照组中 TN 浓度高于试验组, 第 8 天发生改变, 这可能是由于试验前期三角帆蚌活力较低。试验结束时, 试验组 TN 浓度为对照组的 1.18 倍, 达 4.1 mg/L, 这与张毅敏等^[19-21] 研究结果类似, 表明三角帆蚌的生物扰动作用会提高底泥氮的释放速率, 增加上覆水中 TN 浓度。底栖生物的生物扰动作用会改变底泥的物理形态, 促进底泥颗粒物质的再悬浮, 从而提高底泥中污染物的释放通量^[9]。CHENG 等^[22] 研究发现, *Chironomid larvae* 和 *Limnodrilus hoffmeisteri* 的生物扰动增加了底泥的孔隙度, 提高了底泥间歇水和上覆水中 Cr 含量, 促进了底泥 Cr 的释放速率。Nizzoli 等^[23] 研究也表明, 贝类的生物扰动作用促进了底泥中氮的释放, 增加了上覆水中 TN 浓度。另外, 底栖生物活动还会提高湿地的脱氮效率。KANG 等^[24-25] 利用蚯蚓强化人工湿地, 提高了湿地的反硝化效率, 使得氮去除率增加 22.27%, 贝类活动也可将人工湿地氮处理效率提高 15.72%。由此可见, 底栖生物对水体 TN 的影响具有两面性, 不同生物的影响效果也不尽相同。在该研究中, 三角帆蚌会提高上覆水中 TN 浓度, 不利于白洋淀水体 TN 的去除。

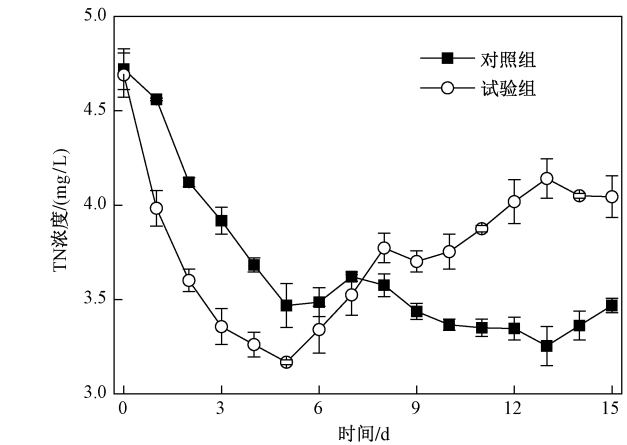
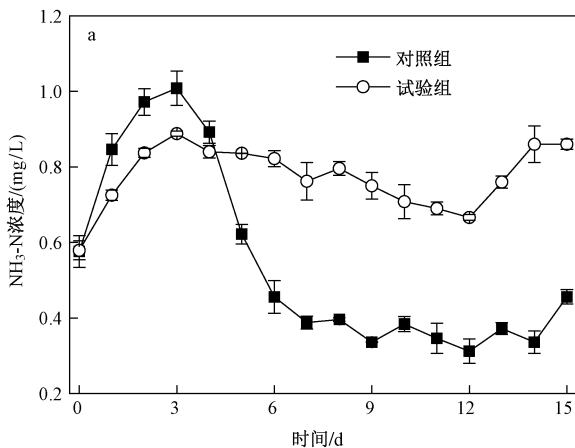


图 1 试验期内各处理组上覆水中 TN 浓度的变化

Fig.1 Change of TN in overlying water of both groups during the experiment

上覆水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度及可溶性 $\text{NH}_3\text{-N}$ 与颗粒态 $\text{NH}_3\text{-N}$ 占比的变化如图 2 所示。由图 2(a) 可见, 对照组中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在 0~3 d 上升, 3~7 d 下降, 随后维持在 0.37 mg/L 左右。试验组中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度则在 0~3 d 上升, 随后维持在 0.76 mg/L 左右, 约为对照组的 2.1 倍, 可见三角帆蚌的生物扰动作用促进了底泥中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 向上覆水扩散。由图 2(b) 可见, 第 3 天时, 对照组与试验组中颗粒态 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和可溶性 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的占比基本一致, 而第 15 天时试验组中颗粒态 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的占比明显高于对照组。同时, 二者可溶性 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度在试验后期差异不大 ($P > 0.05$), 表明三角帆蚌的生物扰动作用主要促进了底泥中颗粒态 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放, 从而提高了颗粒态 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的占比。邓可^[26] 研究发现, 底泥在贝类扰动影响下, 可溶性 $\text{NH}_3\text{-N}$ 释放量会随时间延长而逐渐降低, 与对照组没有显著差异, 与该研究结果类似。结合图 2(a) 可知, 在三角帆蚌生

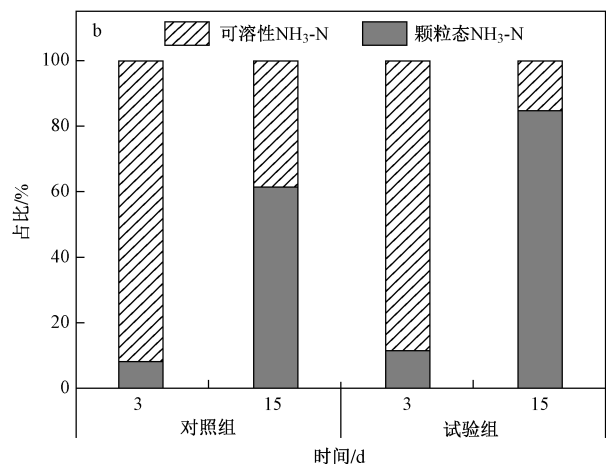


图 2 试验期内各处理组上覆水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度及存在形式的变化

Fig.2 Change of $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration and its form in overlying water of both groups during the experiment

物扰动作用的影响下,颗粒态 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度增加是上覆水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度增加的主要来源. $\text{NH}_3\text{-N}$ 是白洋淀地区底泥释放潜力较大的一种污染物^[27],但生物扰动造成的颗粒态 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度增加可能不会对水质产生较大影响. 研究^[26,28]表明,植物可以通过吸附等作用,降低上覆水中颗粒态物质浓度,从而在很大程度上降低甚至消除三角帆蚌造成的这一负面影响.

2.2 上覆水中磷浓度的变化

图 3 为试验期内上覆水中 TP 和可溶性磷浓度的变化情况. 各处理组均达到了底泥与上覆水之间磷的释放吸附平衡,试验组 TP 平衡浓度约为对照组的 2.2 倍,表明三角帆蚌的生物扰动作用能极大地促进底泥磷的释放. TP 与可溶性磷的浓度变化规律一致,表明上覆水中可溶性磷浓度增加是 TP 浓度增加的主要来源. 在 Nizzoli 等^[23]和 ZHANG 等^[29]研究中,均发现贝类底栖生物能够极大地促进底泥中磷的释放,与该研究结果一致. 白洋淀湿地中,三角帆蚌能够促进可溶性磷释放,客观上会提高水体中生物可利用磷的含量,增加植物对营养盐的吸收,促进植物生长^[30]. KANG 等^[24-25]研究发现,贝类和蚯蚓的生物扰动提高了湿地水体中可生物利用磷的浓度,促使香蒲叶绿素含量提高了 23.5%,植株高度增加了 29.1%. 但需要注意的是,由三角帆蚌引起的可溶性磷浓度增加会对水质产生负面影响. 研究^[31-33]表明,底泥吸附是湿地去除磷的最主要方式,占湿地除磷总量的 36%~50%,植物和微生物等生物作用对水体除磷的效果相对较小. 因此,在利用三角帆蚌等底栖动物进行湿地修复时,应当充分考虑生物扰动所带来的负面影响,将其生物量控制在合理范围内.

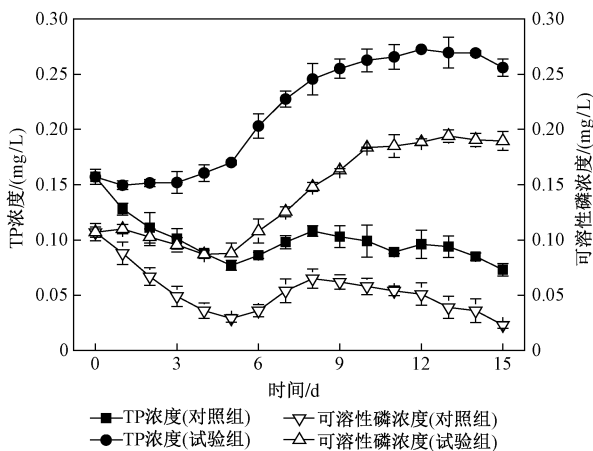


图 3 试验期内各处理组上覆水中 TP 与可溶性磷浓度的变化

Fig.3 Change of TP and soluble P in overlying water of both groups during the experiment

2.3 底泥中全氮、全磷含量的变化

图 4 为试验前后底泥中全氮、全磷含量的变化情况. 试验组底泥中全氮、全磷含量均低于对照组,表明三角帆蚌的生物扰动会降低底泥中全氮、全磷的含量,这与李俊伟等^[21]的研究结果一致. 试验组底泥中全氮、全磷的削减率分别比对照组提高了 26.0%和 10.9%,表明三角帆蚌对底泥全氮的削减更加明显. 生物扰动会促进底泥中污染物向水中的释放,从而降低污染物在底泥中的过量积累^[28],但扰动作用对底泥中氮、磷释放的影响存在差异^[34]. 张强等^[35]研究发现,扰动作用对底泥中氮的释放促进作用更强,对磷释放的影响则相对较弱,与该研究结果一致. 也有研究^[25,32]表明,底栖生物的活动可以降低底泥中 DO 浓度,其粪便也可以为反硝化提供优质碳源,从而提高底泥脱氮效率. 该研究中三角帆蚌的生物扰动作用促使上覆水中 COD_{Cr} 浓度从 27.59 mg/L 升至 32.87 mg/L,有助于反硝化的进行. 因此,三角帆蚌活动可提高微生物的脱氮效率,是底泥中全氮削减效率高于全磷的另一原因.

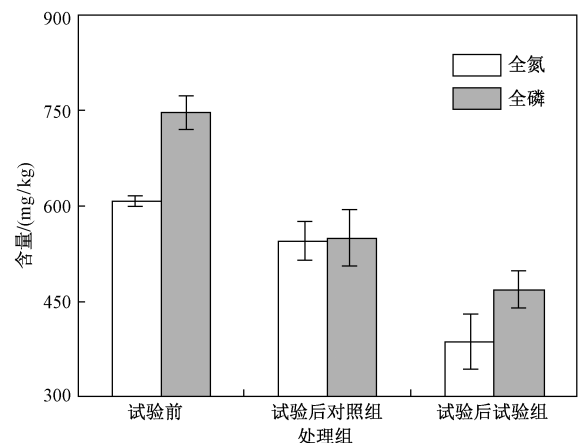


图 4 试验前后各处理组底泥中全氮、全磷含量的变化

Fig.4 Change of total nitrogen and total phosphorus in sediments of each treatment group before and after the test

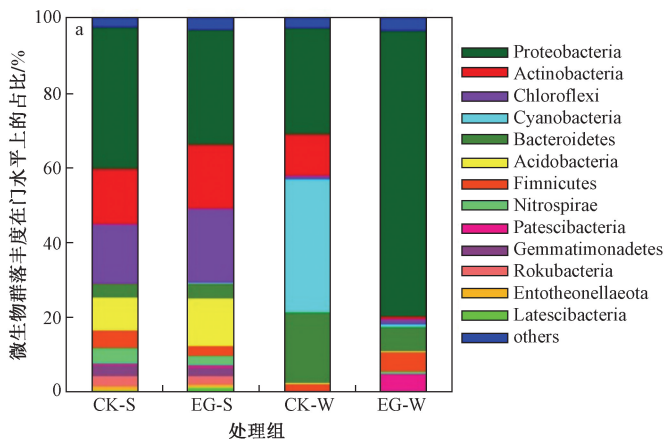
三角帆蚌减少了沉积物中氮、磷污染物含量,表现出了较好的沉积物生物修复潜力. 沉积物生物修复不同于传统的修复技术,能最大限度地保护湿地原生基底,不会造成大的生态风险^[36-37]. 该研究中三角帆蚌提高了底泥中全氮、全磷削减率,为白洋淀底泥污染的生物修复提供了新的思路. 此外,结合图 1~3 可知,三角帆蚌的生物扰动作用促使底泥中相当一部分氮、磷释放到了上覆水中,但还有一部分氮、磷可以通过三角帆蚌自身的吸附作用以及微生物活动从系统中去除^[19,38],具体的污染物去向有待进一步的试验探索.

2.4 水体与底泥中微生物群落的变化

表1列举了不同处理组水体与底泥中微生物在门水平上的相对丰度. 结合图5(a)可知,三角帆蚌将水中蓝细菌的丰度降低了34.86%,表明三角帆蚌对蓝细菌有强大的滤食作用. 在三角帆蚌的影响下,水中变形菌门的丰度剧增,高出对照组47.98%,但三角帆蚌对底泥中微生物丰度影响较小.

结合图5(a)和表1可知,水体中存在变形菌门、放线菌门、绿弯菌门等多种微生物,其中以变形菌门为优势菌,这与试验用水为自然湖水有关^[39-41]. 变形菌门是自然水体中存在最为广泛的微生物类群,主要由 α 纲、 β 纲和 γ 纲组成,包含了水体脱氮除磷的多种功能菌群^[42],能够去除水中多种污染物质. 微生物对环境变化十分敏感,水体中蓝细菌丰度下降,氮、磷含量上升,为变形菌门微生物提供了足够的生长空间和丰富的养分,促使其含量剧增. 放线菌门微生物可以分泌多种酶或抗生素,有利于植物病虫害的生物防治^[43]. 绿弯菌门微生物是活性污泥中微生物成分之一,可以进行光合作用但不产生氧气,与拟杆菌门微生物一起降解有机物^[44]. 拟杆菌门微生物能促进水体中多种有机物的降解,是污水处理中主要的有机物降解微生物类群,尤其对蛋白质的转化效果较好^[45]. 酸杆菌门微生物是一类嗜酸菌,主要存在于土壤中,在该研究中水体呈弱碱性,因此酸杆菌门微生物数量很少^[46]. 厚壁菌门微生物在反硝化过程中起到重要作用,并且厚壁菌门中的芽胞杆菌属(*Bacillus*)微生物是一类溶磷能力较强的磷细菌,可以促进湿地中磷向可溶性磷转化^[47-48]. 硝化螺旋菌门中的硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)是一类重要的硝化细菌,参与氮循环过程,可将 NO_2^- -N氧化成 NO_3^- -N^[49].

该研究中,各处理组上覆水中变形菌门的主要类



注: CK-S、CK-W、EG-S、EG-W 分别表示对照组底泥、对照组水体、试验组底泥、试验组水体.

图5 各处理组水体与底泥中微生物群落的变化

Fig.5 Change of microbial communities in water and sediment of each treatment group

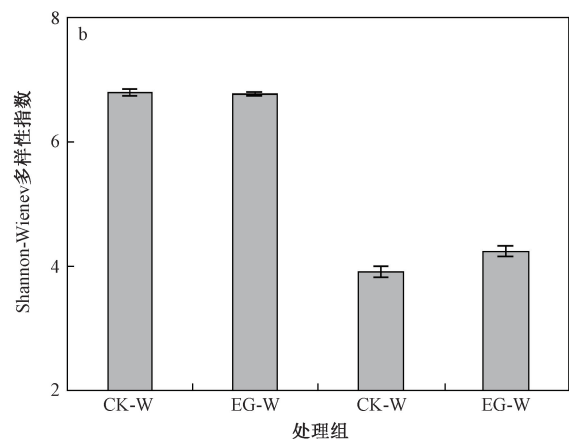
群均为 γ -变形菌纲(γ -Proteobacteria)和 α -变形菌纲

表1 各处理组水体与底泥中微生物群落门水平上的相对丰度统计结果

Table 1 Statistical results of microbial relative abundance in water and sediments of different groups at phylum level

微生物群落	水体			底泥		
	相对丰度/%		P	相对丰度/%		P
	对照组	试验组		对照组	试验组	
Proteobacteria	37.96	30.66	0.000	28.23	76.21	0.000
Actinobacteria	14.89	17.21	0.000	11.06	0.75	0.000
Chloroflexi	15.74	19.88	0.000	1.08	1.28	0.012
Cyanobacteria	0.08	0.08	1.000	35.58	0.72	0.000
Bacteroidetes	3.60	3.91	0.084	19.11	6.45	0.000
Acidobacteria	8.94	12.86	0.000	0.29	0.36	0.127
Firmicutes	4.81	2.68	0.000	1.60	5.30	0.000
Nitrospirae	3.82	2.44	0.000	0.04	0.39	0.000
Patescibacteria	0.60	0.53	0.323	0.43	5.04	0.000
Gemmatimonadetes	3.04	2.32	0.000	0.05	0.00	0.000
Rokubacteria	2.80	2.36	0.003	0.01	0.01	0.454
Entothaeonellaeota	1.05	1.05	1.000	0.01	0.00	0.125
Latescibacteria	0.47	1.03	0.000	0.00	0.26	0.000
Others	0.02	0.03		0.03	0.03	

(α -Proteobacteria). 这两个纲包含了多种硝化功能菌,能够促进水体硝化进程^[44,50]. 在三角帆蚌的影响下,水体中的变形菌门丰度大幅增加,硝化功能菌群数量也相应地增加,加之水体始终处于富氧状态,促进了 NH_4^+ -N向 NO_2^- -N和 NO_3^- -N的转化,从而导致试验组水中可溶性 NH_3 -N浓度偏低. 同时,试验组中硝化螺旋菌门微生物的小幅增加也促进了硝化过程. 而富氧环境则会抑制水中反硝化菌活性,导致试验组水体中TN浓度偏高. 另外, γ -变形菌纲假单胞菌属(*Pseudomonas*)微生物和厚壁菌门芽胞杆菌属微生物是溶磷能力较强的两类磷细菌^[49]. 在三角帆蚌影响



下,水中变形菌门丰度(47.98%)剧增,厚壁菌门丰度(3.70%)小幅增加,进而增加了溶磷细菌数量,促进了水中有机磷向可溶性磷的转化.拟杆菌门和绿弯菌门是促进湿地中有机污染物分解的重要微生物类群^[44],拟杆菌门和绿弯菌门微生物总体丰度降低,可能是水体中 COD_{Cr} 浓度升高的原因之一.

如图 5(b) 所示,三角帆蚌提高了水体微生物多样性,对照组与试验组的 Shannon-Wiener 指数分别为 3.9 和 4.2,但其对底泥中的微生物多样性影响甚微 ($P>0.05$). Papaspyrou 等^[51] 研究发现,底栖生物 *Nereis diversicolor* 和 *Nereis virens* 的活动使得洞穴中细菌多样性较周边底泥分别高出 1.8 和 2.3 倍.这表明不同底栖生物对微生物多样性的影响具有差异性.该研究中,三角帆蚌通过其强大的滤食作用,极大地减少了水体中蓝细菌数量,增加了其他微生物的生态位,从而显著提高了水体中微生物的多样性和功能菌群的丰度.蓝细菌是造成水体富营养化的主要微生物^[52],三角帆蚌能高效去除蓝细菌,有效控制藻类过度繁殖,提高水中脱氮除磷功能菌群丰度,表明其适合修复富营养化风险较大的水体.

3 结论

a) 三角帆蚌的生物扰动作用明显,上覆水中 TN、NH₃-N 和 TP 的浓度分别提高了 0.18、1.1 和 1.2 倍,其扰动主要通过增加颗粒态 NH₃-N 和可溶性磷的浓度来增加上覆水中 NH₃-N 和 TP 的浓度.

b) 三角帆蚌的活动显著降低底泥中全氮、全磷的含量,且对全氮的削减率(26.0%)高于全磷(10.9%).底泥中氮、磷释放规律的不同是导致全氮削减率高于全磷的主要原因.

c) 三角帆蚌的滤食作用极大地降低了水中蓝细菌的丰度,促进了水中变形菌门丰度的增加.三角帆蚌提高了水体中脱氮除磷功能菌丰度和微生物多样性,降低了水体中有机物降解微生物的丰度,但其对底泥中微生物的丰度和多样性影响很小.

参考文献 (References):

[1] 贾艳乐,贾飞虎,马慧杰,等.白洋淀上覆水氮磷浓度对沉积物氮磷释放的影响[J].中国环境管理干部学院学报,2019,29(3):89-93.
JIA Yanle, JIA Feihu, MA Huijie, et al. Influences of nutrient concentration of overlying water in Baiyangdian Lake on nitrogen release from sediment [J]. Journal of Environmental Management College of China, 2019, 29(3): 89-93.

[2] HAN Quan, TONG Runze, SUN Wenchao, et al. Anthropogenic influences on the water quality of the Baiyangdian Lake in North China over the last decade [J]. Science of the Total Environment,

2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134929.

[3] 阳小兰,张茹春,毛欣,等.白洋淀水体氮磷时空分布与富营养化分析[J].江苏农业科学,2018,46(24):370-373.
YANG Xiaolan, ZHANG Ruchun, MAO Xin, et al. Spatial and temporal distribution and eutrophication analysis of nitrogen and phosphorus in Baiyangdian Lake [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(24): 370-373.

[4] TANG Caihong, YI Yujun, YANG Zhifeng, et al. Planktonic indicators of trophic states for a shallow lake (Baiyangdian Lake, China) [J]. Limnologia, 2019. doi: 10.1016/j.limno.2019.12572.

[5] 蒋小欣,阮晓红,邢雅因,等.城市重污染河道上覆水氮营养盐浓度及 DO 水平对底质氮释放的影响[J].环境科学,2007,28(1):87-91.
JIANG Xiaoxin, RUAN Xiaohong, XING Yanan, et al. Effects of nutrient concentration and DO status of heavily polluted urban stream water on nitrogen release from sediment [J]. Environmental Science, 2007, 28(1): 87-91.

[6] ZHANG Chao, SHAN Baoqing, ZHAO Yu, et al. Spatial distribution, fractionation, toxicity and risk assessment of surface sediments from the Baiyangdian Lake in northern China [J]. Ecological Indicators, 2018, 90: 633-642.

[7] WAUER G, GONSIORCZYK T, KRETSCHMER K, et al. Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release [J]. Water Research, 2005, 39(2/3): 494-500.

[8] 刘伟,周斌,王丕波,等.沉积物再悬浮氮磷释放的机制与影响因素[J].科学技术与工程,2020,20(4):1311-1318.
LIU Wei, ZHOU Bin, WANG Pibo, et al. Mechanism and influencing factors of nitrogen and phosphorus release via sediment re-suspension [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(4): 1311-1318.

[9] TIAN Shengyan, TONG Yifan, HOU Ying. The effect of bioturbation by polychaete *Perinereis aibuhitensis* on release and distribution of buried hydrocarbon pollutants in coastal muddy sediment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110487.

[10] KNOX A S, PALLER M H. Effect of bioturbation on contaminated sediment deposited over remediated sediment [J]. Science of the Total Environment, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136537.

[11] SHEN Hui, THRUSH S F, WAN Xihe, et al. Optimization of hard clams, polychaetes, physical disturbance and denitrifying bacteria of removing nutrients in marine sediment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 110(1): 86-92.

[12] CHENG Haomiao, HUA Zulin. Distribution, release and removal behaviors of tetrabromobisphenol A in water-sediment systems under prolonged hydrodynamic disturbances [J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 402-410.

[13] XU Defu, LI Yingxue, HOWARD A, et al. Effect of earthworm *Eiseniafetida* and wetland plants on nitrification and denitrification potentials in vertical flow constructed wetland [J]. Chemosphere, 2013, 92(2): 201-206.

[14] 林振涛,刘月英.白洋淀的蚌类[J].动物学报,1963(2):243-254.

- LIN Zhentao, LIU Yueying. Unionidae (mollusca) of Baiyangdian, Hopei Province, China [J]. *Current Zoology*, 1963(2): 243-254.
- [15] HE Hu, LIU Xubo, LIU Xiaoling, *et al.* Effects of cyanobacterial blooms on submerged macrophytes alleviated by the native Chinese bivalve *Hyriopsis cumingii*: a mesocosm experiment study [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 71: 363-367.
- [16] 杜佳沐, 张饮江, 张磊, 等. 鱼贝植物组合对上海白莲泾生态修复效应研究 [J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(5): 6-11.
DU Jiamu, ZHANG Yinjiang, ZHANG Lei, *et al.* Effect of ecological restoration by combined system of plants, fishes and shellfishes in Shanghai Bailianjing River [J]. *Environmental Science & Technology (China)*, 2010, 33(5): 6-11.
- [17] 刘旭博, 李柯, 周德勇, 等. 三角帆蚌对蓝藻的滤食作用及其对沉水植物生长的影响 [J]. *水生生态学杂志*, 2011, 32(2): 17-24.
LIU Xubo, LI Ke, ZHOU Deyong, *et al.* The effect of filter-feeding of cyanobacterial bloom by *Hyriopsis cumingii* on the growth of submerged plants [J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(2): 17-24.
- [18] 廖日红, 胡秀琳, 吴晓辉, 等. 三角帆蚌对北京富营养化河湖水体的滤水效率和放养方式研究 [J]. *环境工程学报*, 2012, 6(5): 1425-1429.
LIAO Rihong, HU Xiulin, WU Xiaohui, *et al.* Study on *Hyriopsis cumingii*'s filtration rates and stocking mode in eutrophic water of Beijing [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(5): 1425-1429.
- [19] 张毅敏, 周创, 高月香, 等. 不同水动力条件下鲃、三角帆蚌的组合对富营养化水体的净化作用 [J]. *环境工程学报*, 2015, 9(3): 1109-1116.
ZHANG Yimin, ZHOU Chuang, GAO Yuexiang, *et al.* Purification effect on eutrophic water body with combination of Xenocyprinae and *Hyriopsis cumingii* under different hydrodynamic conditions [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(3): 1109-1116.
- [20] 李乾岗, 张光明, 仙光, 等. 湿地动物的水环境治理功能研究进展 [J]. *环境工程*, 2019, 37(S1): 247-251.
LI Qiangang, ZHANG Guangming, Xian Guang, *et al.* Research progress on the water environment treatment function of wetland animals [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(S1): 247-251.
- [21] 李俊伟, 胡瑞萍, 郭永坚, 等. 光裸方格星虫生物扰动对沉积物氮磷物质释放的影响 [J]. *生态科学*, 2019, 38(5): 8-14.
LI Junwei, HU Ruiping, GUO Yongjian, *et al.* Effects of the bioturbation activity of *Sipunculus nudus* on nitrogen and phosphorus release from sediments [J]. *Ecological Science*, 2019, 38(5): 8-14.
- [22] CHENG Dandong, SONG Jinxi, ZHAO Xiaotian, *et al.* Effects of chironomid larvae and *Limnodrilus hoffmeisteri* bioturbation on the distribution and flux of chromium at the sediment-water interface [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 245: 151-159.
- [23] NIZZOLI D, WELSH D, VIAROLI P. Seasonal nitrogen and phosphorus dynamics during benthic clam and suspended mussel cultivation [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62: 1276-1287.
- [24] KANG Yan, ZHANG Jian, XIE Huijun, *et al.* Enhanced nutrient removal and mechanisms study in benthic fauna added surface-flow constructed wetlands: the role of *Tubifex tubifex* [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 224: 157-165.
- [25] KANG Yan, XIE Huijun, ZHANG Jian, *et al.* Intensified nutrients removal in constructed wetlands by integrated *Tubifex tubifex* and mussels: performance and mechanisms [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 162: 446-453.
- [26] 邓可. 我国典型近岸海域沉积物-水界面营养盐交换通量及生物扰动的影响 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [27] ZHU Yaoyao, JIN Xin, TANG Wenzhong, *et al.* Comprehensive analysis of nitrogen distributions and ammonia nitrogen release fluxes in the sediments of Baiyangdian Lake, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 76: 319-328.
- [28] 潘福霞, 来晓双, 李欣, 等. 不同湿地植物脱氮效果与根际土壤微生物群落功能多样性特征分析 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(6): 1497-1503.
PAN Fuxia, LAI Xiaoshuang, LI Xin, *et al.* Nitrogen removal efficiencies and rhizosphere soil microbial community functional diversities of different plants in constructed wetlands [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(6): 1497-1503.
- [29] ZHANG Lei, SHEN Qiushi, HU Haiyan, *et al.* Impacts of *Corbicula fluminea* on oxygen uptake and nutrient fluxes across the sediment-water interface [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 220(1/2/3/4): 399-411.
- [30] 卢艳敏, 张靖天, 张新波, 等. 巢湖沉积物中有机磷的生物可利用性研究 [J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(2): 197-204.
LU Yanmin, ZHANG Jingtian, ZHANG Xinbo, *et al.* Bioavailability of organic phosphorus in Lake Chaohu sediments [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(2): 197-204.
- [31] TANG Xianqiang, WU Min, LI Rui. Distribution, sedimentation, and bioavailability of particulate phosphorus in the mainstream of the Three Gorges Reservoir [J]. *Water Research*, 2018, 140: 44-55.
- [32] JI Mingde, HU Zhen, HOU Chenglin, *et al.* New insights for enhancing the performance of constructed wetlands at low temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2020. doi: 10.1016/j.biortech.2019.122722.
- [33] WANG Mo, ZHANG Dongqing, DONG Jianwen, *et al.* Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate: a review [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 57(7): 293-311.
- [34] 范成新. 湖泊沉积物-水界面研究进展与展望 [J]. *湖泊科学*, 2019, 31(5): 1191-1218.
FAN Chengxin. Advances and prospect in sediment-water interface of lakes: a review [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(5): 1191-1218.
- [35] 张强, 曹秀芹, 胡明, 等. 扰动对城市河道底泥污染物释放影响 [J]. *环境工程*, 2019, 37(9): 40-44.
ZHANG Qiang, CAO Xiuqing, HU Ming, *et al.* Research on effects of perturbation on release of pollutants from sediments [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(9): 40-44.
- [36] 姜霞, 王书航, 张晴波, 等. 污染底泥环保疏浚工程的理念·应用条件·关键问题 [J]. *环境科学研究*, 2017, 30(10): 1497-1504.
JIANG Xia, WANG Shuhang, ZHANG Qingbo, *et al.* Analysis of

- concepts, conditions and critical problems in environmental dredging[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(10): 1497-1504.
- [37] SHEN Hui, THRUSH S F, WANG Xihe, *et al.* Optimization of hard clams, polychaetes, physical disturbance and denitrifying bacteria of removing nutrients in marine sediment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 110(1): 86-92.
- [38] PARK W H, POLPRASERT C. Roles of oyster shells in an integrated constructed wetland system designed for P removal[J]. *Ecological Engineering*, 2008, 34: 50-56.
- [39] ZHANG Lei, FANG Wangkai, LI Xingchen, *et al.* Linking bacterial community shifts with changes in the dissolved organic matter pool in a eutrophic lake [J]. *Science of the Total Environment*, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137387.
- [40] UNG P, PENG C, YUK S, *et al.* Dynamics of bacterial community in Tonle Sap Lake, a large tropical flood-pulse system in southeast Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 664: 414-423.
- [41] SONG Wenjuan, QI Ran, ZHAO Li, *et al.* Bacterial community rather than metals shaping metal resistance genes in water, sediment and biofilm in lakes from arid northwestern China [J]. *Environmental Pollution*, 2019. doi: 10.1016/j.envpol.2019.113041.
- [42] 冯国禄, 罗金飞, 廖永岩, 等. 不同盐度循环养殖水体微生物群落特征[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(8): 1838-1847.
FENG Guolu, LUO Jinfei, LIAO Yongyan, *et al.* Microbial community characteristics in recirculating aquaculture waters at different salinity levels [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(8): 1838-1847.
- [43] 习慧君, 臧睿, 刘闯, 等. 河南黄河湿地放线菌多样性及植物病害生防放线菌的筛选[J]. *微生物学报*, 2019, 59(4): 642-656.
XI Huijun, ZANG Rui, LIU Chuang, *et al.* Diversity of actinobacteria in Henan Yellow River wetland and screening of cultivable actinobacteria with biological control on plant disease [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2019, 59(4): 642-656.
- [44] 姜磊, 涂月, 侯英卓, 等. 植被恢复的岩溶湿地沉积物细菌群落结构和多样性分析[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(1): 200-209.
JIANG Lei, TU Yue, HOU Yingzhuo, *et al.* Bacterial community structure and diversity of sediments in a karst vegetation restoration wetland [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(1): 200-209.
- [45] CHEN Yi, WEN Yue, TANG Zhiru, *et al.* Effects of plant biomass on bacterial community structure in constructed wetlands used for tertiary wastewater treatment [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 84: 38-45.
- [46] LU Mei, REN Yulian, WANG Shaojun, *et al.* Contribution of soil variables to bacterial community composition following land use change in Napahai Plateau wetlands [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 77-84.
- [47] LI Xi, LI Yuyuan, LV Diangqing, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal performance and bacterial communities in a multi-stage surface flow constructed wetland treating rural domestic sewage [J]. *Science of the Total Environment*, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136235.
- [48] 任嘉红, 刘辉, 吴晓蕙, 等. 南方红豆杉根际溶无机磷细菌的筛选、鉴定及其促生效果[J]. *微生物学报*, 2012, 52(3): 295-303.
REN Jiahong, LIU Hui, WU Xiaohui, *et al.* Screening, identification, and promoting effect of phosphate-solubilizing bacteria in rhizosphere of *Taxus chinensis* var. *mairei* [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2012, 52(3): 295-303.
- [49] LU Sidan, SUN Yujiao, LU Baiyu, *et al.* Change of abundance and correlation of *Nitrospira inopinata*-like comammox and populations in nitrogen cycle during different seasons [J]. *Chemosphere*, 2020. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125098.
- [50] 黄媛. 杭州西溪湿地沉积物细菌多样性及高效异养硝化菌的筛选与鉴定[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2016.
- [51] PAPANASTASIOU S, GREGERSEN T, KRISTENSEN E, *et al.* Microbial reaction rates and bacterial communities in sediment surrounding burrows of two nereidid polychaetes (*Nereis diversicolor* and *N. virens*) [J]. *Marine Biology*, 2006, 148: 541-550.
- [52] AI Y, LEE S, LEE J. Drinking water treatment residuals from cyanobacteria bloom-affected areas: investigation of potential impact on agricultural land application [J]. *Science of the Total Environment*, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135756.

(责任编辑:张蕊)