

城镇水系统研究与应用

王锋, 张晓宇, 陈冬冬, 等. 蚌-螺-草共生组合对富营养化城市封闭水体的净化效能[J]. 净水技术, 2025, 44(12): 138-145, 180.

WANG F, ZHANG X Y, CHEN D D, et al. Purification performance of combined symbiosis system of mussel-winkle-aquatic plant for urban closed water bodies eutrophication [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(12): 138-145, 180.

蚌-螺-草共生组合对富营养化城市封闭水体的净化效能

王 锋^{1,2}, 张晓宇², 陈冬冬², 董文艺^{2,3,4}, 于晓红¹, 王宏杰^{2,3,4,*}, 赵子龙^{2,3}, 萧迪文²

(1. 哈尔滨工业大学<深圳>经济管理学院, 广东深圳 518055; 2. 哈尔滨工业大学<深圳>土木与环境工程学院, 广东深圳

518055; 3. 哈尔滨工业大学, 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150090; 4. 哈尔滨工业大学<深圳>, 深圳市水资源利用与环境污染控制重点实验室, 广东深圳 518055)

摘要 【目的】 底栖动物(螺类、蚌类等)和沉水植物(苦草等)作为水体生态系统的重要组成部分, 在水生生态系统物质循环中处于十分重要的地位, 对污染水体具有明显的净化效应。现阶段, 利用螺类、蚌类或沉水植物的生态修复方法对污染水体氮、磷的影响已有较多研究, 但将底栖动物和沉水植物结合对城市富营养化封闭水体的研究较少。【方法】 本文采用常见的铜锈环棱螺、背角无齿蚌、矮生苦草为主要生物, 构建蚌-螺-草共生组合, 分别优化了螺、蚌、草的密度配置, 考察了蚌-螺-草共生组合抗外源污染能力及不同生物对污染物的贡献率, 并考察了长期运行效果。【结果】 在最优密度配置下($1\ 750\ \text{g}/\text{m}^3$ 背角无齿蚌+ $87.5\ \text{g}/\text{m}^3$ 铜锈环棱螺+ $3\ 000\ \text{g}/\text{m}^3$ 矮生苦草), 蚌-螺-草共生组合对污染物去除效果显著优于单独的蚌-草或螺-草组合, 运行 30 d 后蚌-螺-草共生组合对总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数及叶绿素 a 的去除率分别为 78.32%、89.08%、59.35% 及 96.34%。其中, 矮生苦草对污染物的去除贡献率最高, TN、TP、高锰酸盐指数和叶绿素 a 的去除贡献率分别达到 64.56%、83.08%、74.55% 和 85.58%。而且, 与单独的蚌-草和螺-草共生组合相比, 蚌-螺-草共生组合具有较强的抗环境胁迫能力, 可抵抗水体浑浊度及 TN、TP、高锰酸盐指数分别为(<30 NTU) 及 5、0.35、25 mg/L 的外源污染。【结论】 蚌-螺-草共生体系长期运行效果显著, 可保持稳定达到地表水 II 类水质标准。本文为科学利用蚌-螺-草共生组合进行城市富营养化封闭水体生态修复提供参考, 也为探索普适性的富营养化污染水体的生态防治措施提供理论依据。

关键词 蚌-螺-草共生 富营养化 城市封闭水体 生态修复

中图分类号: X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)12-0138-09

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.12.016

Purification Performance of Combined Symbiosis System of Mussel-Winkle-Aquatic Plant for Urban Closed Water Bodies Eutrophication

WANG Feng^{1,2}, ZHANG Xiaoyu², CHEN Dongdong², DONG Wenyi^{2,3,4}, YU Xiaohong¹, WANG Hongjie^{2,3,4,*}, ZHAO Zilong^{2,3}, XIAO Diwen²

(1. School of Economics and Management, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Shenzhen 518055, China;

2. School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Shenzhen 518055, China;

3. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

4. Shenzhen Key Laboratory of Water Resource Utilization and Environmental Pollution Control, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Shenzhen 518055, China)

[收稿日期] 2023-09-28

[基金项目] 深圳市科技计划项目(KJYY20180718094802190)

[作者简介] 王锋(1992—), 男, 研究方向为河流生态修复, 污染河道底泥处理, E-mail: 447320131@qq.com。

[通信作者] 王宏杰(1983—), 男, 副研究员, 研究方向为生活污水处理和资源化、工业废水处理和资源化、底泥处理与修复, E-mail: whj1534@qq.com。

Abstract [Objective] As an important part of water ecosystem, benthic animals (winkles, mussels, etc.) and submerged plants (bittercress, etc.) play a very important role in the material cycle of aquatic ecosystem and have obvious purification effect on polluted water bodies. At this stage, there have been many studies on the effects of winkles, mussels and submerged plants on N and P in polluted water bodies, but there are few studies on the combination of benthic animals and submerged plants in urban eutrophic closed water bodies. **[Methods]** In this paper, the mussel-winkle-aquatic plant symbiosis combination was constructed by using common winkle, mussel and dwarf bitterbrush as the main organisms, and the density configurations of winkle, mussel and aquatic plant were optimized. **[Results]** Under the optimal density configuration (1 750 g/m³ dorsal-horned toothless mussel + 87.5 g/m³ rusty ring-ribbed winkle + 3 000 g/m³ dwarf bitter aquatic plant), the mussel-winkle-aquatic plant symbiosis was significantly more effective than the mussel-aquatic plant or winkle-aquatic plant combination alone in removing pollutants, and the mussel-winkle-aquatic plant symbiosis was more effective than the mussel-aquatic plant combination alone in removing pollutants after 30 days of operation. The removal rates of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), permanganate index and chlorophyll-a were 78.32%, 89.08%, 59.35% and 96.34%, respectively. Among them, the dwarf bittercress contributed the most to the removal of pollutants, with 64.56%, 83.08%, 74.55% and 85.58% for TN, TP, permanganate index and chlorophyll-a, respectively. Moreover, compared with the mussel-aquatic plant and winkle-aquatic plant symbiosis combinations alone, the mussel-winkle-aquatic plant symbiosis combination had stronger resistance to environmental stresses and could resist exogenous pollution with turbidity, TN, TP and permanganate index less than 30 NTU, 5, 0.35 mg/L and 25 mg/L, respectively. **[Conclusion]** At the same time, the mussel-winkle-aquatic plant symbiosis system is effective in long-term operation and could maintain stable surface water quality standards up to class II. This study provides a reference for the scientific use of mussel-winkle-aquatic plant symbiosis for the ecological restoration of urban eutrophic closed water bodies, and also provides a theoretical basis for the exploration of universal ecological control measures for eutrophic polluted water bodies.

Keywords mussel-winkle-aquatic plant symbiosis eutrophication urban closed water bodies ecological remediation

城市封闭水体是指城市中的封闭、浅型水体,具有污染物来源复杂(生活污水、农业污水、工业废水等)、水环境容量小、水体流动性差且自净能力弱等特点。由于其水动力条件普遍较差,氮、磷营养盐输出慢,易在水体中积聚,且浅型水体上、下水层的光通量均可满足藻类生长的需要,使水体容易出现富营养化。为满足城市景观需求,城市污染水治理一般采用生态修复的方法。其中,采用沉水植物修复被认为是最经济、最有效的生态修复方法^[1-4],沉水植物不仅为浮游动物和其他水生动物提供了丰富的食物和栖息地,还可以吸收许多氮、磷和其他营养物质,从而降低水的养分水平^[5]。但单独以沉水植物为核心,修复体系较为单一,容易受外界影响而导致系统崩溃^[6]。因此,需要对沉水植物进行完善和优化,与其他生物相互协同,从而更好地发挥沉水植物的生态修复作用。

目前,有许多学者探索采用底栖动物进行生态修复的可行性。螺和蚌可以通过滤食或刮食的方式去除水体中或水生植物叶片上的浮游藻以及有机碎屑^[7],还可以降低水体高锰酸盐(COD_{Mn})和氮、磷含量^[8],蚌可以摄食浮游植物、有机碎屑等悬浮颗粒,

能够改善水下光照条件,提高水体透明度,在生态修复过程中发挥着重要的作用。而且,底栖动物不仅可以去除水体浮游藻类,还可以对沉水植物的生长起到一定的促进作用^[8-9]。

目前,已有相关文献^[10]研究生物最佳密度配置,或最优密度配置下对水体的生态修复效果。而本文则在最佳生物密度的基础上,探究了生态修复系统中各生物对于不同污染物的去除贡献率,并对不同生物的污染物去除贡献率进行了比较,对生态修复系统中的核心修复生物进行了分析,证明了影响该生态系统工作的核心生物及污染物的去除机制,从污染物去除机理角度进一步深入阐述该生态修复系统的有效性和工作机制。基于此,本文拟采用底栖动物(背角无齿蚌和铜锈环棱螺)+沉水植物(矮生苦草)构建蚌-螺-草共生组合,对富营养化的城市封闭水体进行修复。考察蚌-螺-草共生组合对水体的净化效果,并优化不同生物的密度配置。同时,本文探究螺-草共生组合的抗环境胁迫能力,估算各生物对污染物净化贡献率,并进行长期运行效果考察,为城市封闭水体的富营养化生态修复提供了一定程度上的理论支持。

1 材料和方法

1.1 原水和底泥的采集

原水和底泥均取自深圳大学城某水塘,取回的底泥经自然风干后粉碎,并充分混匀后待用。水塘主要水质污染物:总氮(TN)质量浓度为1.2~3.2 mg/L、总磷(TP)质量浓度为0.05~0.14 mg/L、COD_{Mn}质量浓度为11.4~14.7 mg/L、叶绿素a质量浓度为10.1~35.3 μg/L。

1.2 生物的选择

试验所选用的蚌、螺均为南方封闭水体常见水生生物,个体大小较为一致。蚌主要为背角无齿蚌,体长为(8.0±0.5)cm,质量为(75.2±3.4)g;螺主要为铜锈环棱螺,体长为(2.7±0.2)cm,质量为(3.5±0.4)g,试验前先将螺、蚌于原水中预培养一周,并进行充分曝气,使其更好地适应试验环境。试验所选用的沉水植物为南方封闭水体常见的矮生枯草,个体高度较为一致,试验前先将苦草去除烂叶、残叶后清洗干净,随后放入自来水中备用。

1.3 试验装置

本试验装置是容积为1 000 L的陶瓷缸,高为130 cm,上、下直径分别为110、90 cm。缸底部铺覆盖25 cm的底泥,上覆水深为80 cm(约600 L)(图1)。分别设计蚌-草共生组合、螺-草共生组合以及蚌-螺-草共生组合3个试验组,考察不同组合对污染物的去除效果。同时,设计不同配比的蚌-螺-草共生组合,确定生物最优投放密度(表1)。表1中各试验组的生物密度设置参考以往研究结果和前期预试验^[11]。苦草作为生态修复系统的核心修复生物,在生态修复系统中设置较大的生物量。螺蚌等底栖生物一方面可以与苦草相互协同,促进水体修复。已有学者^[12~13]证实,蚌、螺和沉水植物存在着互利关系,因此,可以采用螺、蚌与苦草形成良性生态组合系统,促进水质修复。另一方面,也会由于本身生物活动向水体中输入氮、磷及一些悬浮物,设置不同的密度配置,研究螺蚌的最适宜密度。针对最优生物投放密度,引入不同浓度的悬浮物及氮、磷营养盐,研究生态系统的抗外源污染能力,确定生态系统可容纳的外源污染范围(表2),并考察蚌-螺-草生态系统的长期运行效果。

1.4 检测方法

试验中常规水质指标检测分析方法主要参考

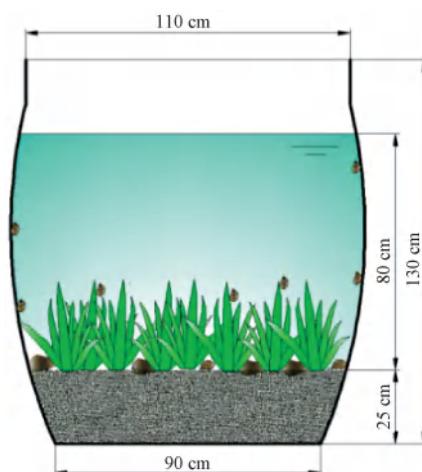


图1 蚌-螺-草共生组合装置示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Mussel-Winkle-Aquatic Plant Symbiosis System Set-up

表1 各试验组的生物密度

Tab. 1 Biodensity of Each Experimental Group

组别	苦草/ (g·m ⁻³)	背角无齿蚌/ (g·m ⁻³)	铜锈环棱螺/ (g·m ⁻³)
空白	0	0	0
蚌-草	3 000	2 000	0
螺-草	3 000	0	700.0
蚌-螺-草	3 000	2 000	700.0
蚌-螺-草 1	3 000	1 750	87.5
蚌-螺-草 2	3 000	250	612.5
蚌-螺-草 3	3 000	1 500	525.0
蚌-螺-草 4	3 000	2 000	700.0

表2 不同程度外源污染胁迫水质初始污染物浓度

Tab. 2 Initial Indices of Water Quality under Varying Degrees of External Pollution Stress

水质指标	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)	COD _{Mn} /(mg·L ⁻¹)
对照组	1.35	0.05	11.6
低污染组	3.12	0.19	17.1
中污染组	4.93	0.35	21.9
高污染组	6.76	0.51	26.2

《水和废水监测分析方法》(第四版),其中,TN的检测方法为碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,TP的检测方法为钼酸铵分光光度法,COD_{Mn}的检测方法为酸性高锰酸盐法,叶绿素a的检测方法为丙酮萃取分光光度法。

1.5 各生物对污染物净化贡献率估算方法

为探究蚌-螺-草共生组合对污染物的去除率

效果,即预估各生物对于水体 TN、TP、COD_{Mn} 以及叶绿素 a 的去除率,现进行如下计算,如式(1)~式(6)。假设在蚌-草、螺-草以及蚌-螺-草共生组合中,各生物的去除效果彼此独立。

$$R'_{\text{苦草}} = R_{\text{蚌-螺-草}} - (R_{\text{蚌-草}} + R_{\text{螺-草}}) \quad (1)$$

$$R'_{\text{蚌}} = R_{\text{蚌-草}} - R_{\text{苦草}} \quad (2)$$

$$R'_{\text{螺}} = R_{\text{螺-草}} - R_{\text{苦草}} \quad (3)$$

$$R_{\text{苦草}} = R'_{\text{苦草}} / R_{\text{蚌-螺-草}} \quad (4)$$

$$R_{\text{蚌}} = R'_{\text{蚌}} / R_{\text{蚌-螺-草}} \quad (5)$$

$$R_{\text{螺}} = R'_{\text{螺}} / R_{\text{蚌-螺-草}} \quad (6)$$

其中: $R'_{\text{苦草}}$ ——单一苦草对于水体污染物的去除率;

$R'_{\text{蚌}}$ ——单一背角无齿蚌对于水体污染物的去除率;

$R'_{\text{螺}}$ ——单一铜锈环棱螺对于水体污染物的去除率;

$R_{\text{蚌-螺-草}}$ ——蚌-螺-草共生组合对于水体污染物的去除率;

$R_{\text{蚌-草}}$ ——蚌-草共生组合对于水体污染物的去除率;

$R_{\text{螺-草}}$ ——螺-草共生组合对于水体污染

物的去除率;

$R_{\text{苦草}}$ ——蚌-螺-草共生组合中苦草对于水体污染物的去除率;

$R_{\text{蚌}}$ ——蚌-螺-草共生组合中背角无齿蚌对于水体污染物的去除率;

$R_{\text{螺}}$ ——蚌-螺-草共生组合中铜锈环棱螺对于水体污染物的去除率。

2 结果与讨论

2.1 蚌-螺-草共生组合的净化效果

不同蚌-螺-草共生组合对城市富营养化封闭水体中 TN、TP、COD_{Mn} 及叶绿素 a 的净化效果,如图 2 所示。与单独的螺-草和蚌-草组合相比,蚌-螺-草共生组合对水体 TN、TP、COD_{Mn} 以及叶绿素 a 均有较好的去除效果。在不同的共生组合中,水体 TN、TP、COD_{Mn} 以及叶绿素 a 均在 0~5 d 内显著下降,而在 5~30 d 下降速度减缓并逐渐保持稳定,运行 30 d 后蚌-螺-草共生组合水体 TN、TP、COD_{Mn} 以及叶绿素 a 的去除率分别为 78.32%、89.08%、59.35%、96.34%,分别比蚌-草组合高 11.18%、5.75%、6.07%、4.55%,比螺-草组合高 16.58%、9.32%、9.04%、9.34%。由此可知,蚌-螺-草共生

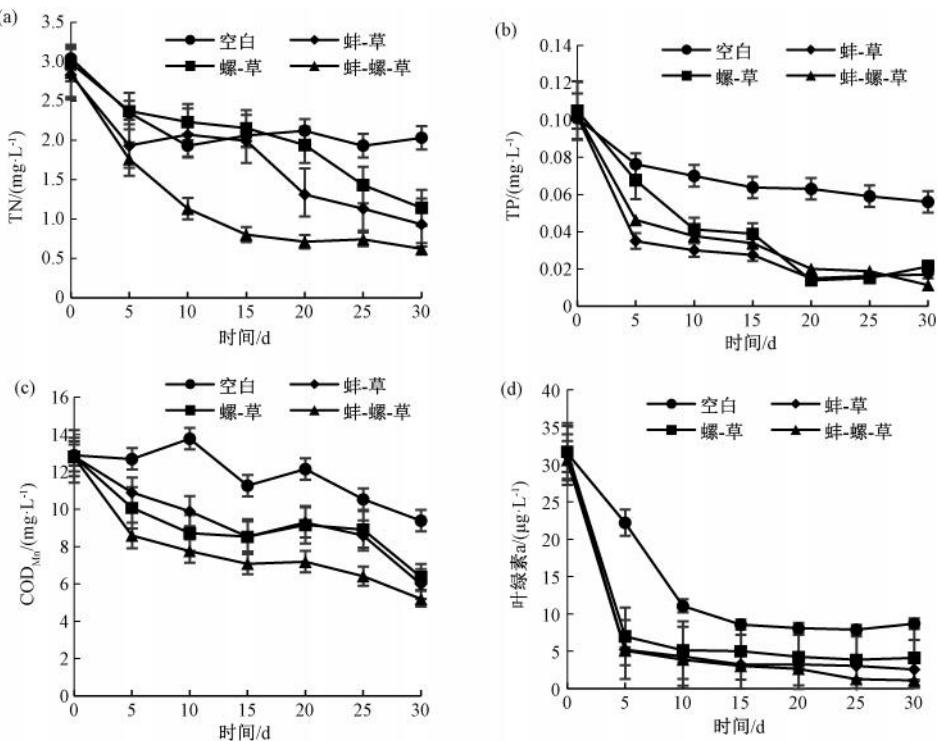


图 2 污染物去除效果

Fig. 2 Effect of Pollutants Removal

组合对水中 TN、TP、COD_{Mn} 以及叶绿素 a 的去除效果均优于蚌-草或螺-草共生组合。因此, 针对城市富营养化封闭水体, 蚌-螺-草共生组合可以发挥出更好的作用。这主要是因为底栖动物和沉水植物之间存在良好的相互作用关系^[14], 它们组合可以发挥更佳的水质净化能力。Ali 等^[15]指出, 水下大型植物可以为底栖动物提供了庇护所、繁殖区和提供食物的场所; 另外, 底栖动物也会将营养物质转移到水体中, 供水下大型植物吸收^[16]。因此, 蚌-螺-草共生组合对城市富营养化封闭水体修复具有一定的可行性。

2.2 蚌-螺-草共生组合密度配置优化

蚌-螺-草共生组合中不同的蚌、螺、草密度配置对城市富营养化封闭水体中 TN、TP、COD_{Mn} 及叶绿素 a 的净化效果, 如图 3 所示。在不同密度的蚌-螺-草共生组合中, 水体 TN、TP、COD_{Mn} 及叶绿素 a 均在 0~5 d 内显著下降, 而在 5~40 d 下降速度减缓并逐渐保持稳定, 第 40 d 蚌-螺-草共生组合 A 对水体 TN、TP、COD_{Mn}、叶绿素 a 的去除率分别为 77.85%、90.48%、64.03%、98.29%; 螺-蚌-草系统 B 的去除率分别为 73.33%、86.65%、62.94%、

98.22%; 螺-蚌-草系统 C 的去除率分别为 77.00%、85.29%、48.33%、98.76%; 螺-蚌-草系统 D 的去除率分别为 74.56%、85.44%、51.53%、97.89%。由上述结果可知, 蚌-螺-草共生组合 1 对水体 TN、TP 和 COD_{Mn} 的去除效果均优于其他密度组合, 对于水体叶绿素 a 的去除效果虽略低于蚌-螺-草共生组合 3, 但仍高于蚌-螺-草共生组合 2 和 4。因此, 经过综合比对, 蚌-螺-草共生组合 1 为 4 种组合工艺中的最优组合。其中, 蚌占比较高的共生组合对于水体 TN 及 COD_{Mn} 的去除效果更好, 可见蚌对水体 TN 及 COD_{Mn} 具有更好的净化效果。对于水体 TP 及叶绿素 a, 螺和蚌的去除作用类似, 均能实现对于 TP 和叶绿素 a 的高效去除。因此, 在蚌-螺-草共生组合中, 要尽可能地提高蚌的占比, 以达到更好的去除效果。Vanni 等^[17]指出, 许多动物底栖动物为生态系统提供必要的服务, 促进氮、磷等营养物质的运输和转化。Canuel 等^[18]也发现底栖生态系统在有机质和营养物质的储存和循环中起着重要的作用。在本试验中, 考虑根据蚌-螺-草共生组合 1 的密度配比(1 750 g/m³ 背角无齿蚌+87.5 g/m³ 铜锈环棱螺+3 000 g/m³ 矮生苦草)对城市富

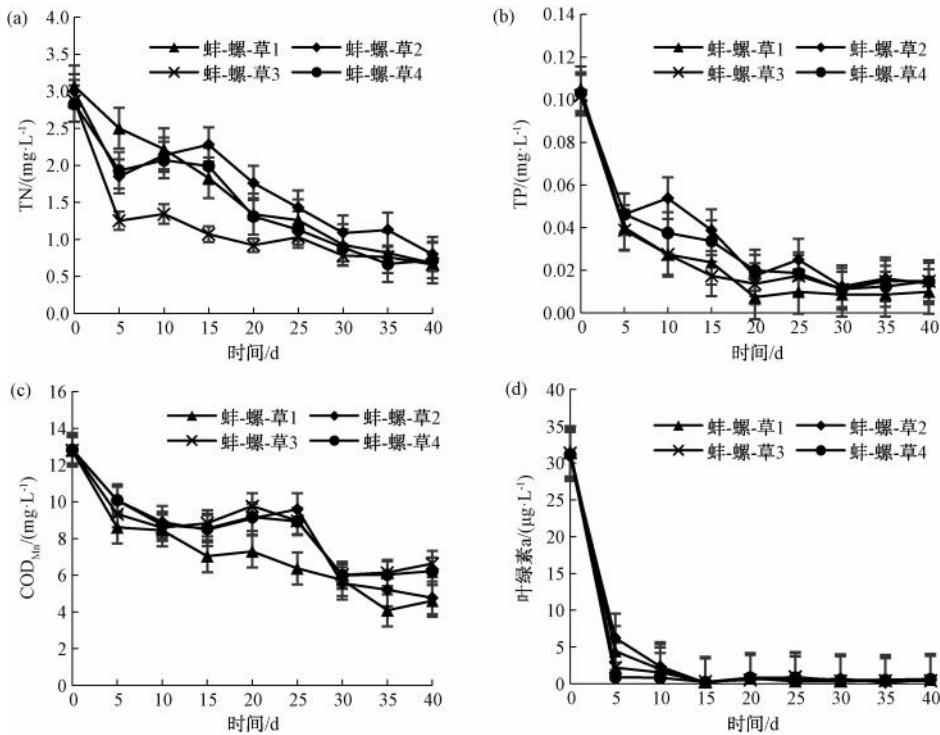


图 3 污染物去除效果

Fig. 3 Effect of Pollutants Removal

营养化封闭水体进行生态修复。

2.3 蚌-螺-草共生组合中各生物对污染物净化贡献率估算

蚌-螺-草共生组合中各生物对 TN、TP、COD_{Mn} 以及叶绿素 a 的去除贡献率估算,如图 4 所示。依据上述 2.1 节研究可计算出蚌-草、蚌-螺-草、螺-草组合对 TN、TP、COD_{Mn} 以及叶绿素 a 的去除率,基于此,根据式(1)~式(6)可进一步估算出-螺-草共生组合中,各生物对污染物净化贡献率。蚌、螺、草对 TN 的去除贡献率分别为 21.17%、14.27%、64.56%;对 TP 的去除贡献率分别为 10.47%、6.43%、83.08%;对 COD_{Mn} 的去除贡献率分别为 15.24%、10.21%、74.55%;对叶绿素 a 的去除贡献率分别为 9.70%、4.72%、85.58%。由此可知,蚌-螺-草共生组合对

TN、TP、COD_{Mn} 以及叶绿素 a 的去除贡献率排序为:苦草>背角无齿蚌>铜锈环棱螺,表明在此系统中苦草对污染物的净化发挥了主要作用,这与大多数学者研究相一致。Chao 等^[19]研究发现,将沉水大型植物引入富营养化水体,可以有效吸收氮、磷和其他营养物质,降低水体富营养化水平,从而改善水质。沉水大型植物还可以吸附沉降水中的悬浮颗粒,提高水体透明度。同时,研究表明,蚌、螺可以与沉水植物实现互利共生,进一步提高了生态系统的修复效果。Yeon 等^[20]研究表明,蚌类对沉水植物生长的促进作用,螺和草之间也存在一定的互利关系。因此,可以推断本研究中的蚌-螺-草共生组合,各生物之间具有一定的协同、互利、共生的作用关系,从而强化了污染水体的水质净化效果。

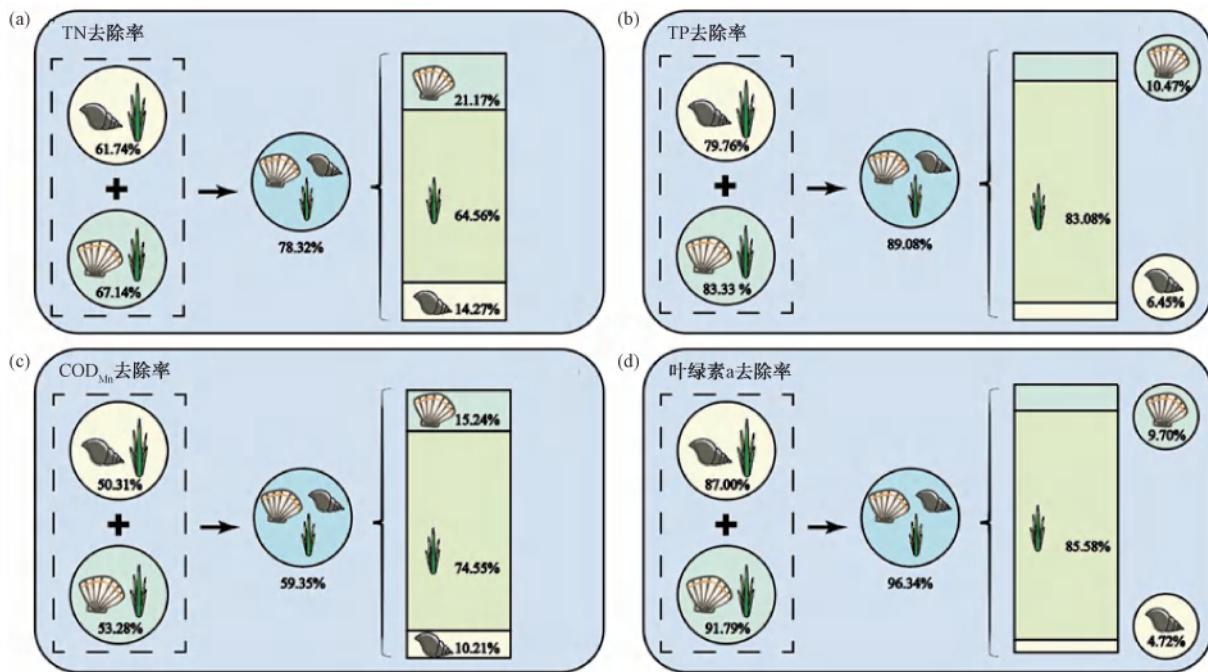


图 4 水体(a)TN;(b)TP;(c)COD_{Mn};(d)叶绿素 a 的去除效果
Fig. 4 Removal Efficiency of (a) TN; (b) TP; (c) COD_{Mn}; and (d) Chlorophyll-a

2.4 蚌-螺-草共生组合抗外源污染能力

蚌-螺-草共生组合抵抗不同程度外源污染能力,如图 5 所示。由图 5 可知,对照组、低污染组、中污染组以及高污染组的 TN、TP、COD_{Mn} 以及叶绿素 a 均在 0~8 d 内大幅下降,在 8~40 d 内仍保持缓慢下降趋势并逐渐趋于稳定。净化 40 d 后,对照组、低污染组、中污染组、高污染组 TN 质量浓度分别为 0.42、0.41、0.49、0.59 mg/L;TP 质量浓度分别为

0.012、0.018、0.019、0.023 mg/L; COD_{Mn} 质量浓度分别为 4.20、4.44、4.98、5.99 mg/L; 叶绿素 a 质量浓度分别为 0.38、0.89、0.77、0.52 μg/L。在进行抵抗外源污染试验时,前 8 d 获得了较大幅度的去除效果,后期逐渐变平缓的原因可能在于投加氮、磷后,植物获得了充足的营养物质,初期代谢活动旺盛,吸收大量氮、磷^[21],而后期植物代谢活动逐渐平稳,使得水体氮、磷含量也逐渐稳定。其中,对照组、

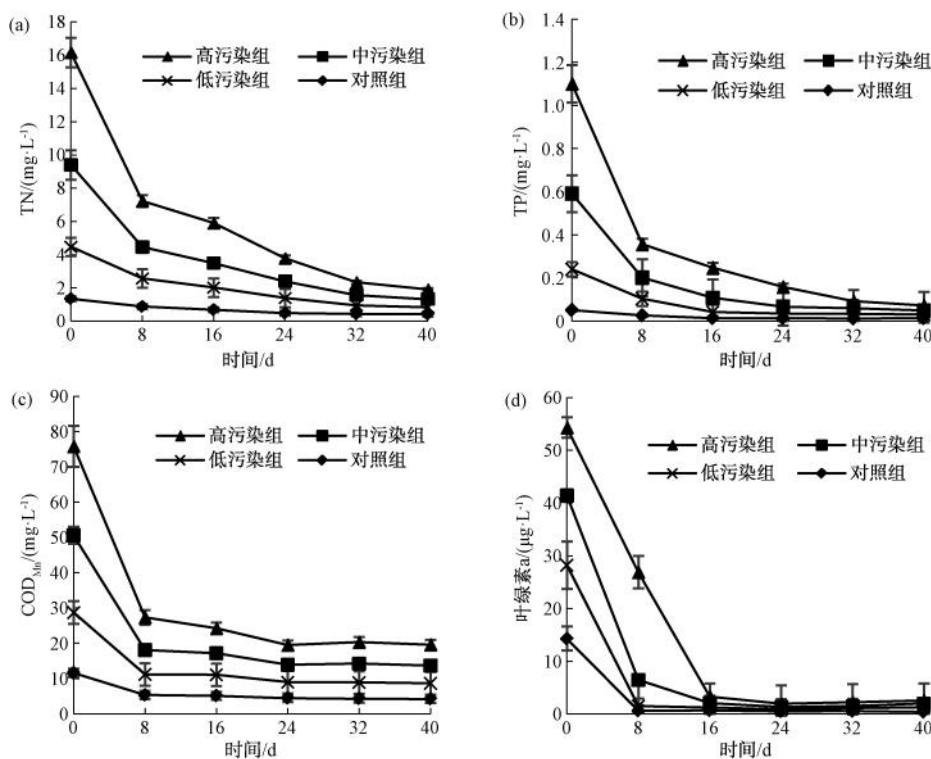


图 5 抗外源污染能力:(a)TN;(b)TP;(c)COD_{Mn};(d)叶绿素 a

Fig. 5 Capacity of Resisting External Pollution: (a) TN; (b) TP; (c) COD_{Mn}; (d) Chlorophyll-a

低、中污染组的水质可以在 40 d 后达到Ⅱ类地表水水质,而高污染组的水体在 40 d 时只达到Ⅲ类地表水水质,说明蚌-螺-草共生组合可抵抗水体 TN、TP、COD_{Mn} 污染水平分别约为 5、0.35、25 mg/L, 40 d 后可恢复至与未受外源污染胁迫的水质接近的水平。李萍^[22]研究了滤食性贝类和苦草共存体系对水体污染物的降解能力,发现相比对照组,蚌草组合的 TN 含量降低了 28%, TP 含量降低了 30%以上,而在本研究中,高污染组的 TN、TP 含量在 40 d 时分别降低了 91.27%、95.50%, 中污染组的 TN、TP 含量在 40 d 时分别降低了 90.01%、94.57%, 低污染组的 TN、TP 含量在 40 d 时分别降低了 86.85%、90.53%, 均显著高于已有蚌草组合,说明本研究的蚌-螺-草体系具有更好的抗外源污染能力。

2.5 蚌-螺-草共生组合长期运行效果

蚌-螺-草共生组合的长期运行效果,如图 6 所示。蚌-螺-草共生组合的水体 TN、TP、COD_{Mn} 以及叶绿素 a 均在 0~15 d 内大幅下降,在 15~90 d 内仍保持缓慢下降趋势并逐渐趋于稳定。在运行 90 d 后,蚌-螺-草共生组合的出水 TN、TP、COD_{Mn} 质量浓度可分别达到 0.32、0.013、4.02 mg/L, 出水叶绿

素 a 为 0.42 μg/L, 水质由地表水 V 类水平提升至Ⅱ类,并保持相对稳定,表明蚌-螺-草共生组合的长期运行效果较好。选择蚌-螺-草生物进行水体的生态修复,可以克服单一物种净化作用不稳定,季节性变化明显的缺点,发挥多种生物之间的协同功能,提高对水体中污染物的净化能力,实现优势互补,保证生态系统的长期稳定^[23]。苦草能够通过其根系和叶片直接吸收水体中的氮、磷等营养盐,降低水体中的 TN 和 TP 含量。同时,苦草通过光合作用产生氧气,增加水体中的溶解氧含量,促进有机物质的矿化分解,降低水体 COD_{Mn}。此外,苦草作为沉水植物,能够遮挡阳光,减少藻类(尤其是产生叶绿素 a 的藻类)的光合作用面积和光照强度,分泌化感物质,抑制藻类的过度繁殖,降低水体中叶绿素 a 含量。螺、蚌等底栖动物能够滤食水体中的藻类、悬浮颗粒物以及有机碎屑,这些物质中富含氮、磷等营养盐,从而直接减少了水体中的氮、磷含量和叶绿素 a 含量。此外,底栖动物及其附着的微生物共同促进了水体中有机物质的分解和矿化作用,进而降低了水体的 COD_{Mn} 浓度。

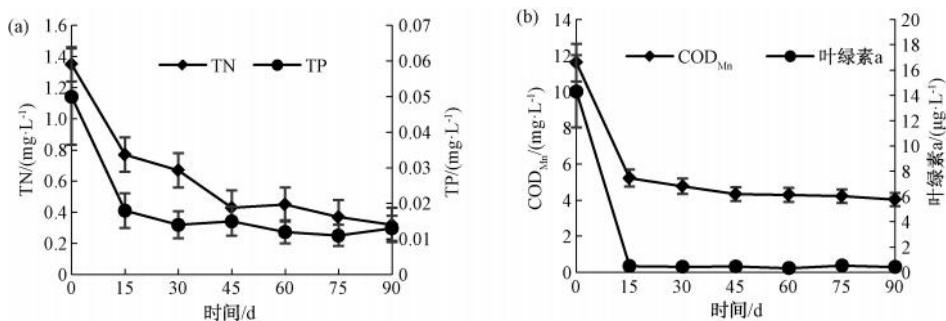


图 6 长期运行效果

Fig. 6 Long Term Operational Effects

3 结论

本研究构建了蚌-螺-草共生组合净化富营养化城市封闭水体,确定了各生物的最优配置。同时,考察了螺-草共生组合的抗环境胁迫能力,估算了各生物对污染物净化贡献率,并进行长期运行效果考察。得到以下主要结论。

(1) 蚌-螺-草共生组合相比于蚌-草共生组合和螺-草共生组合对于水质有更好的净化效果,其最优配置为 1750 g/m^3 背角无齿蚌+ 87.5 g/m^3 铜锈环棱螺+ 3000 g/m^3 矮生苦草。

(2) 蚌-螺-草共生组合中,矮生苦草对污染物的去除贡献率最高,TN、TP、COD_{Mn}、叶绿素a的去除贡献率分别达到64.56%、83.08%、74.55%、85.58%。

(3) 蚌-螺-草共生组合具有一定的抗环境胁迫能力,可抵抗水体浑浊度及TN、TP、COD_{Mn}分别不超过30 NTU及 $5.0, 35, 25 \text{ mg/L}$ 的外源污染。

(4) 蚌-螺-草共生组合的长期运行效果较好,可以使出水达到地表水Ⅱ类标准并保持相对稳定。

参考文献

- [1] BAKKER E S, DONK E V, DECLERCK S A J, et al. Effect of macrophyte community composition and nutrient enrichment on plant biomass and algal blooms [J]. Basic and Applied Ecology, 2010, 11(5): 432–439.
- [2] HILT S, GROSS E M, HUPFER M, et al. Restoration of submerged vegetation in shallow eutrophic lakes – A guideline and state of the art in Germany [J]. Limnologica, 2006, 36(3): 155–171.
- [3] JIN S Q, IBRAHIM M, MUHAMMAD S, et al. Light intensity effects on the growth and biomass production of submerged macrophytes in different water strata [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(18): 351–362.
- [4] ZHOU Y W, ZHOU X, HAN R, et al. Reproduction capacity of *Potamogeton crispus* fragments and its role in water purification and algae inhibition in eutrophic lakes [J]. Science of the Total Environment, 2017, 580: 1421–1433. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.12.108.
- [5] BLINDOW I, HARGEBY A, HILT S. Facilitation of clear-water conditions in shallow lakes by macrophytes: differences between charophyte and angiosperm dominance [J]. Hydrobiologia, 2013, 737(1): 99–110.
- [6] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究 [J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1229–1243.
- [7] QIN B Q. Shallow lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(5): 1229–1243.
- [8] COELHO J P, LILLEBØ A I, CRESPO D, et al. Effect of the alien invasive bivalve *Corbicula fluminea* on the nutrient dynamics under climate change scenarios [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2018, 204: 273–282.
- [9] ZUO S, FANG Z, ZHOU S, et al. Benthic fauna promote algicidal effect of allelopathic macrophytes on *Microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2016, 35(3): 646–654.
- [10] 李宽意, 文明章, 杨宏伟, 等. “螺-草”的互利关系 [J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5427–5432.
- [11] LI K Y, WEN M Z, YANG H W, et al. Mutualistic relationship between freshwater snails and aquatic macrophytes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5427–5432.
- [12] 宋洪星, 李彦辰, 赵子龙, 等. 南方封闭水体蚌螺草系统水体修复研究 [J]. 2023, 46(s2): 88–95.
- [13] SONG H X, LI Y C, ZHAO Z L, et al. Restoration of mussel-snail-plant system in closed water body in southern China [J]. 2023, 46(s2): 88–95.
- [14] 陈冬冬. 南方封闭水体蚌螺草系统构建及生态修复研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [15] CHEN D D. Construction of mussel-snail-plant system for ecological restoration of closed water body in southern China [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

(下转第 180 页)

- 2019, 45(5): 90–93.
- LI W M, BAI Y G, ZHOU J, et al. Selection and design of catalytic ozonation in wastewater advanced treatment of industrial park [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(5): 90–93.
- [5] 赵红兵, 余琴芳, 许江军, 等. 臭氧高级氧化对某工业园区污水处理厂生化出水处理试验[J]. 净水技术, 2022, 41(6): 96–102.
- ZHAO H B, YU Q F, XU J J, et al. Experiment of ozone advanced oxidation process for biochemical effluent treatment of a WWTP in an industrial park [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(6): 96–102.
- [6] 戴红, 王飞, 秦川, 等. 青神县工业开发区污水处理厂设计与调试运行[J]. 工业水处理, 2023, 43(2): 172–177.
- DAI H, WANG F, QIN C, et al. Design and commissioning operation of WWTP in industrial development zone of Qingshen [J]. Industrial Water Treatment, 2023, 43(2): 172–177.
- [7] 周华, 夏海波, 张和英. 水解酸化-MBR-臭氧工艺在印染废水处理中的应用[J]. 给水排水, 2021, 57(9): 81–84.
- ZHOU H, XIA H B, ZHANG H Y. Treatment of dyeing wastewater by combination of hydrolysis acidification-MBR-O₃
- [8] 尚文. 潜流湿地与表面流湿地处理工业尾水的工程实践与对比研究[J]. 给水排水, 2023, 59(s1): 238–244.
- SHANG W. Engineering practice and comparative study of subsurface flow wetland and surface flow wetland in treating industrial WWTP tailwater [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(s1): 238–244.
- [9] 陈功. 组合表面流湿地处理化工区污水厂尾水的工艺设计[J]. 工业水处理, 2022, 42(5): 169–175.
- CHEN G. Process design of combined surface flow wetland to treat tail water from wastewater treatment plant in chemical industry park [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(5): 169–175.
- [10] 曹明利, 崔康平, 许为义, 等. 人工快渗/复合人工湿地工艺处理园区污水厂尾水[J]. 中国给水排水, 2012, 28(19): 12–14.
- CAO M L, CUI K P, XU W Y, et al. Constructed rapid infiltration/hybrid constructed wetland for advanced treatment of tail water from chemical wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(19): 12–14.

(上接第 145 页)

- [12] 苑博. 两种沉水植物与铜锈环棱螺及其组合对水体净化的效果 [D]. 保定: 河北大学, 2020.
- YUAN B. Effect of two species of submerged plants and *Bellamya aeruginosa* and their combination on water purification [D]. Baoding: Hebei University, 2020.
- [13] GAO H L, QIAN X, WU H, et al. Combined effects of submerged macrophytes and aquatic animals on the restoration of a eutrophic water body-A case Study of Gonghu Bay, Lake Taihu [J]. Ecological Engineering, 2017, 102: 15–23. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.01.013.
- [14] THOMAS J D. Mutualistic interactions in freshwater modular systems with molluscan components [J]. Advances in Ecological Research, 1990, 20: 125–178. DOI: 10.1016/S0065-2504(08)60054-9.
- [15] ALI M M, MAGEED A A, HEIKAL M. Importance of aquatic macrophyte for invertebrate diversity in large subtropical reservoir [J]. Limnologica, 2007, 37(2): 155–169.
- [16] PRATHER C M, PELINI S L, LAWS A, et al. Invertebrates, ecosystem services and climate change [J]. Biological Reviews, 2013, 88(2): 327–348.
- [17] VANNI M J. Nutrient cycling by animals in freshwater ecosystems [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2002, 33(1): 341–370.
- [18] CANUEL E A, SPIVAK A C, WATERSON E J, et al. Biodiversity and food web structure influence short-term accumulation of sediment organic matter in an experimental sea-aquatic plant system [J]. Limnology and Oceanography, 2007, 52(2): 590–602.
- [19] CHAO C X, WANG L G, LI Y, et al. Response of sediment and water microbial communities to submerged vegetation restoration in a shallow eutrophic lake [J]. Science of the Total Environment, 2021, 801: 149701. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149701.
- [20] YEON T S, TAN S Y, LI Z, et al. Ecological interaction between submerged macrophytes and zoobenthos [J]. Journal of Earth Sciences & Environmental Studies, 2017, 2(2): 173–182.
- [21] SETUBAL R B, RICCARDI. Long-term effects of fish biomanipulation and macrophyte management on zooplankton functional diversity and production in a temperate shallow lake limnology [J]. Limnology, 2020, 21(3): 305–317.
- [22] 李萍. 滤食性贝类、沉水植物及其共存对水体富营养化的影响 [D]. 广州: 暨南大学, 2016.
- LI P. Effects of filter-feeding mussel, submerged macrophyte and their coexistence on eutrophication [D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.
- [23] 李欢, 吴蔚, 罗芳丽, 等. 4 种挺水植物、4 种沉水植物及其组合群落去除模拟富营养化水体中总氮和总磷的作用比较 [J]. 湿地科学, 2016, 14(2): 163–172.
- LI H, WU W, LUO F L, et al. The comparison of removal effect of total nitrogen and total phosphorus in simulated eutrophic water among 4 kinds of emergent plants, 4 kinds of submerged plants and their mixed communities [J]. Wetland Science, 2016, 14(2): 163–172.