

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.03.027

不同密度铜锈环棱螺对沉水植物生长和水质的影响

李 威¹, 胡淑芳¹, 陈 楠¹, 刘金福¹, 陈宇炜¹, 丁惠君², 代涛涛², 楼 倩², 钟家有²

(1. 南昌工程学院江西省退化生态系统修复与流域生态水文重点实验室, 江西 南昌 330099;

2. 江西省水利科学院江西省鄱阳湖水资源与环境重点实验室, 江西 南昌 330029)

摘要:通过试验研究不同密度铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)对苦草(*Vallisneria natans*)和金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)生长及水质的影响。试验结果表明:铜锈环棱螺的存在显著促进了沉水植物的生长,高密度组苦草和金鱼藻的相对生长率分别是对照组的2.16和1.66倍,高密度组苦草和金鱼藻的相对伸长率分别是对照组的1.18和1.25倍;铜锈环棱螺的存在对水质有一定负面影响,水体电导率随着螺密度的增加而升高,溶解氧浓度随着螺密度的增加而降低,pH值、氧化还原电位和叶绿素浓度随着螺密度的增加没有一致的规律;水体氮的去除率随螺密度的增加呈下降趋势,高密度组苦草和金鱼藻对氮的去除率相对于对照组分别下降了70.0%和64.5%,磷的去除率组间没有显著差异;铜锈环棱螺密度对水体氮浓度变化起主要作用,方差占比为64%,沉水植物不同物种对水体磷浓度变化起主要作用,方差占比为72.54%。

关键词:沉水植物;淡水螺类;铜锈环棱螺;苦草;金鱼藻;水质

中图分类号:Q178.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)03-0198-07

Effects of different densities of *Bellamya aeruginosa* on growth of submerged macrophytes and water quality //

LI Wei¹, HU Shufang¹, CHEN Nan¹, LIU Jinfu¹, CHEN Yuwei¹, DING Huijun², DAI Taotao², LOU Qian², ZHONG Jiayou² (1. Jiangxi Provincial Key Laboratory for Restoration of Degraded Ecosystems & Watershed Ecohydrology, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Water Resources and Environment of Poyang Lake, Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China)

Abstract: The effects of different densities of *Bellamya aeruginosa* on the growth of *Vallisneria natans* and *Ceratophyllum demersum* and water quality were studied through the experiment. The results showed that the presence of *Bellamya aeruginosa* significantly promoted the growth of submerged plants. The relative growth rates of *Vallisneria natans* and *Ceratophyllum demersum* in the high-density groups were 2.16 and 1.66 times of those in the control groups, respectively, and the relative elongation rates in the high-density groups were 1.18 and 1.25 times of those in the control groups, respectively. The existence of *Bellamya aeruginosa* had a certain negative impact on water quality. The water conductivity increased with the increase of snail density, and the dissolved oxygen concentration decreased with the increase of snail density. There was no consistent trend of pH value, redox potential and chlorophyll concentration with the increase of snail density. The removal rate of nitrogen in water showed a downward trend with the increase of snail density. The removal rates of nitrogen in the high-density group of *Vallisneria natans* and *Ceratophyllum demersum* decreased by 70.0% and 64.5% respectively compared with the control group. There was no significant difference in the removal rate of phosphorus between the groups. The density of *Bellamya aeruginosa* had the main effect on the variation of nitrogen concentration in water, with the proportion of variance of 64%, while the different submerged macrophytes played a major role in the change of phosphorus concentrations in water, with the variance proportion of 72.54%.

Key words: submerged macrophyte; freshwater snail; *Bellamya aeruginosa*; *Vallisneria natans*; *Ceratophyllum demersum*; water quality

基金项目: 国家自然科学基金(51869012); 江西省重点研发计划(220203BBGL7328); 江西省水利厅科技项目(201821ZDKT09, 201922ZDKT04, 202023ZDKT09, 202022YBKT17); 江西省水利科学院江西省鄱阳湖水资源与环境重点实验室开放研究基金(2020GPSYS04)

作者简介: 李威(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水生态环境保护与修复研究。E-mail: liwei@nit.edu.cn

通信作者: 钟家有(1966—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水生态环境保护与修复研究。E-mail: zjyou666@vip.163.com

淡水螺类属于软体动物门,腹足纲,分为前鳃亚纲和肺螺亚纲,前者一般具有厖和鳃,活动于水底,只能借助基质或水草等靠近水面,几乎不牧食沉水植物,如铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*);后者无厖和鳃,以外套膜壁上密生血脉网的假肺呼吸,借体内空气泡可以浮上水面,有些种类直接取食沉水植物叶片,如椭圆萝卜螺(*Radix swinhoei*)^[1-2]。淡水螺类广泛分布于我国的湖泊、河流、沟渠和池塘中,为底栖动物群落的重要组成部分,在我国许多水体中为优势底栖动物^[3-4]。

前鳃亚纲的铜锈环棱螺由于能够絮凝水体悬浮物,滤食水体浮游植物,刮食附着藻,并且几乎不牧食沉水植物,因此常被用来与沉水植物一起净化水体。Mo等^[5]的研究表明沉水植物苦草(*Vallisneria natans*)和铜锈环棱螺单独作用均能够降低水体总氮浓度、附着藻和底栖藻的生物量,二者结合在一起能够取得更显著的水体修复效果;郑有飞等^[6]的研究表明不同密度环棱螺(*Bellamya* sp.)处理组苦草表面附着生物的生物量明显低于无螺组,螺处理组苦草根状茎生物量均大于对照组。然而,铜锈环棱螺对水质的影响并不总是正面的,铜锈环棱螺的新陈代谢作用和对底泥生物的扰动作用能够改变水体的物理化学特性和藻类群落,如Zhu等^[7]的研究表明铜锈环棱螺的存在降低了水体的氮磷比,降低了绿藻的生物量,但是提高了蓝藻的生物量;Yang等^[8]的研究表明铜锈环棱螺的生物扰动作用显著增加了水体可溶性活性磷和不稳定磷的浓度,使泥-水界面磷通量比无螺组增加了2倍以上。此外,铜锈环棱螺对沉水植物的影响具有一定的种间差异性,Li等^[9]的研究表明铜锈环棱螺对苦草生长的促进作用大于轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)和金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)。以上研究表明,铜锈环棱螺对水生态系统的影响兼具正向和负向作用,有关椭圆萝卜螺牧食作用的研究表明,螺类的密度效应可能是驱动两种作用转化的关键因子^[10-11]。然而,有关不同密度铜锈环棱螺对水质和不同沉水植物影响的研究并不是很充分。本研究通过构建两种沉水植物与不同密度铜锈环棱螺共存的环境,旨在阐明不同密度铜锈环棱螺对沉水植物生长率和水质指标的影响,以及铜锈环棱螺对不同沉水植物影响的差异,以期联合使用沉水植物和铜锈环棱螺净化水体的生态工程提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

苦草和金鱼藻是水生态修复中常用的沉水植

物,苦草属于莲座型沉水植物,叶片和根发达,金鱼藻是无根沉水植物,能够断枝生长,二者形态差异较大^[12],因此具有典型代表性,不同密度铜锈环棱螺对二者的影响可能有较大差异。沉水植物采自赣抚平原六干渠南昌工程学院校内河段(28°41'28.14"N, 116°1'26.48"E),采集后在实验室预培养1个月,选取生长良好、无分枝的苦草和金鱼藻植株。苦草每株保留4~5个健康叶片,修剪至地上部分9.0 cm、地下部分3.0 cm作为备用苗种,其鲜重为(0.43 ± 0.05) g。金鱼藻修剪顶端12.0 cm作为苗种,鲜重为(0.45 ± 0.05) g。试验前植物苗种均用晾晒过的自来水和去离子水轻轻洗去表面泥沙和附着物。试验所用铜锈环棱螺取自鄱阳湖国家自然保护区,选择大小一致、生长良好、重量为(1.80 ± 0.20) g的个体,用软毛刷轻轻去除表面附着物,放入晾晒过的自来水中曝气暂养3 d。

试验用水取自赣抚平原六干渠南昌工程学院河段,使用浮游生物网过滤后使用,水质指标初始值:溶解氧质量浓度为8.92 mg/L,氧化还原电位为213 mV, pH值为6.95,电导率为473 μS/cm,叶绿素质量浓度为54.89 μg/L,水体可溶性总氮质量浓度为1.423 mg/L,水体可溶性总磷质量浓度为0.135 mg/L。

采用容积为5 L、高25 cm、直径为16 cm的圆形玻璃缸种植沉水植物,玻璃缸底铺设4 cm淘洗干净的细砂(粒径为1~2 mm)用以固定沉水植物,缸内添加试验用水至23 cm处。

1.2 试验设计

铜锈环棱螺设置3个密度处理组:对照组,放置0个螺;低密度组,放置4个螺,密度约为200个/m²;高密度组,放置8个螺,密度约为400个/m²。3个处理组分别种植4株苦草(约为86 g/m²)和4株金鱼藻(约为90 g/m²)。共6个处理组,每个处理组设置3个系统重复。

试验于2017年6月初开始,共进行15 d。试验中光照采用9 W的人工光照,光照时间为每天12 h(07:00—19:00)。试验期间每隔3 d采用便携式水质分析仪(美国哈希公司,HQ 40d)测定一次水体温度、溶解氧质量浓度、氧化还原电位、pH值和电导率;采用叶绿素分析仪(福州普贝斯智能科技有限公司,PCH-800)测定叶绿素质量浓度。

试验开始前和结束后采用HJ 636—2012《水质总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》方法测定水体总氮质量浓度和GB 11893—89《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》方法测定水体总磷质量浓度,用以计算装置氮和磷去除率,计算公式为

$$R_N = \frac{\rho_{N0} - \rho_{N1}}{\rho_{N0}} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_P = \frac{\rho_{P0} - \rho_{P1}}{\rho_{P0}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_N 、 R_P 分别为总氮、总磷的去除率; ρ_{N0} 、 ρ_{N1} 分别为水体初始氮、试验结束氮质量浓度; ρ_{P0} 、 ρ_{P1} 分别为水体初始磷、试验结束磷质量浓度。

试验结束测定每个玻璃缸苦草和金鱼藻总鲜重和株高,用以计算沉水植物相对生长率和相对伸长率,计算公式为

$$R_G = \frac{\ln W_1 / W_0}{t} \quad (3)$$

$$R_L = \frac{\ln L_1 / L_0}{t} \quad (4)$$

式中: R_G 、 R_L 分别为植物相对生长率、相对伸长率; W_0 、 W_1 分别为沉水植物初始鲜重、试验结束鲜重; L_0 、 L_1 分别为沉水植物初始株高、试验结束株高; t 为试验时间。

1.3 统计分析

试验数据采用 SPSS18.0 软件分析。水体氮、磷去除率和沉水植物相对生长率不同处理间的差异分析采用单因素方差分析进行,多重比较采用 q 检验的方法;不同因子(文中分别指沉水植物物种、铜锈环棱螺密度、交互作用和残差)对水体氮、磷去除率的影响采用多因素一般线性模型的方法分析,并采用方差分解的方法量化各因素对影响因子变异的相对贡献^[13-14],其计算公式为

$$\sigma_x = \frac{S_x}{S_{x1} + S_{x2} + S_{x1,x2} + S_C} \times 100\% \quad (5)$$

式中: σ_x 为因子 x 的方差百分比; S_x 为因子 x 的方差平方和; S_{x1} 、 S_{x2} 、 $S_{x1,x2}$ 、 S_C 分别为因子沉水植物物种、铜锈环棱螺密度、交互作用、残差的方差平方和。

2 结果与分析

2.1 水质指标

图 1 为苦草组水质随时间变化情况。试验期间水体温度为 $(27.4 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,由图 1 可见,苦草组水体溶解氧质量浓度和氧化还原电位随着铜锈环棱螺密度的增加而降低;试验结束时,溶解氧质量浓度和氧化还原电位高密度组相对于对照组分别降低了 33.0% 和 12.1%。电导率随着螺密度的增加而升高;试验结束时,电导率高密度组相对于对照组升高了 20.6%。低密度组 pH 值则要高于对照组和高密度组。

图 2 为金鱼藻组水质随时间变化情况。由图 2 可见,水体溶解氧质量浓度在前 9 d 随铜锈环棱螺密度的增加而降低,在后 6 d 低密度组溶解氧质量浓度高于对照组和高密度组。金鱼藻组水体电导率随时间的变化规律与苦草组相似,试验结束时,高密度组电导率相对于对照组升高了 22.2%。pH 值和氧化还原电位的变化则随时间有一定波动。

图 3 为不同处理组水体叶绿素质量浓度随时间变化情况,由于仪器故障第 3 天的水体叶绿素质量

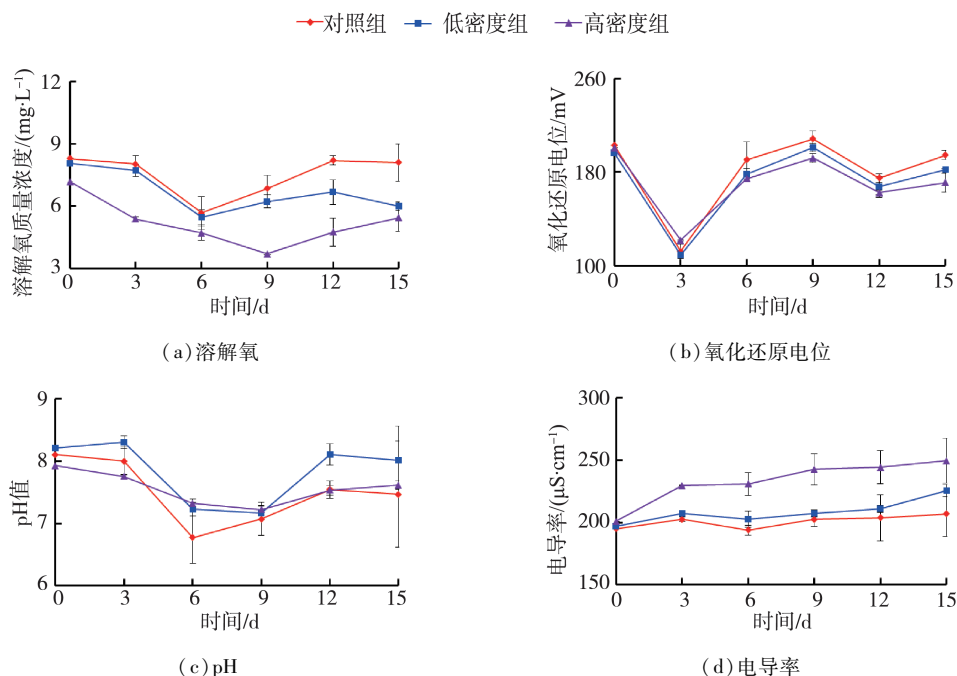


图 1 苦草组水质随时间变化

Fig. 1 Changes of water quality with time in *Vallisneria natans* group

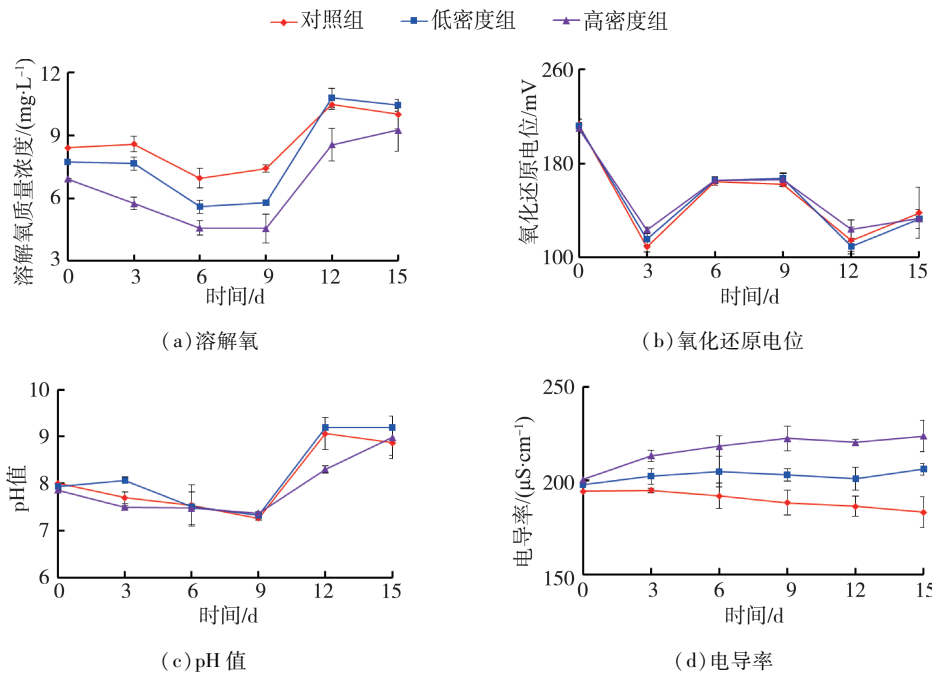


图2 金鱼藻组水质随时间变化

Fig. 2 Changes of water quality with time in *Ceratophyllum demersum* group

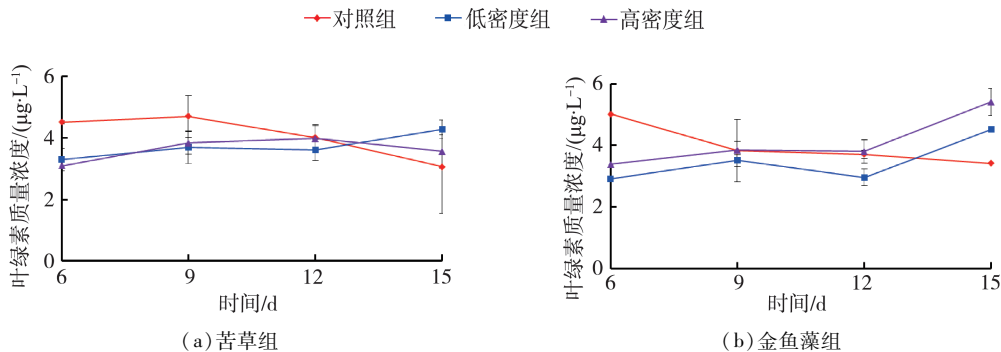


图3 不同处理组水体叶绿素浓度随时间变化

Fig. 3 Changes of chlorophyll concentration in water with time in different snail density treatments

浓度没有测定。由图3可见,苦草组水体叶绿素质量浓度是试验前期对照组最高,试验结束时低密度组最高;而金鱼藻组在试验结束时高密度组最高。

2.2 沉水植物生长和水体氮磷去除率

图4为不同处理组对沉水植物相对生长率、相对伸长率、水体氮去除率和水体磷去除率的影响。由图4(a)(b)可见,对照组、低密度组和高密度组均为金鱼藻组相对生长率最高,苦草组相对生长率最低,各组金鱼藻相对生长率分别是苦草的3.1、1.6和2.4倍。沉水植物相对生长率随螺密度增加呈升高趋势,高密度组的苦草组和金鱼藻组相对生长率是对照组的2.16和1.66倍。各处理组金鱼藻的相对伸长率均高于苦草,两种植物对照组和低密度螺处理组间相对伸长率没有显著差异,高密度组苦草和金鱼藻的相对伸长率显著高于对照组,其数值分别是对照组的1.18和

1.25倍。

由图4(c)(d)可见,水体氮的去除率随螺密度的增加呈下降趋势,高密度组苦草组和金鱼藻组水体氮的去除率相对于对照组分别下降了70.0%和64.5%,苦草组低密度组和对照组氮的去除率没有显著差异。金鱼藻组对水体磷的去除率要显著高于苦草组,平均值约为苦草组的1.8倍,不同密度螺组间没有显著差异。

表1为沉水植物物种、铜锈环棱螺密度及二者交互作用对水体氮磷去除率的影响。由表1可见,沉水植物物种、螺密度及二者交互作用均对水体氮去除率产生显著影响,其中螺密度的方差占比为64.42%,沉水植物物种和二者交互作用的方差占比分别为8.99%和16.74%。沉水植物物种对水体磷去除率有显著影响,方差占比为72.54%,而螺密度和二者交互作用则对水体磷去除率没有显著影响。

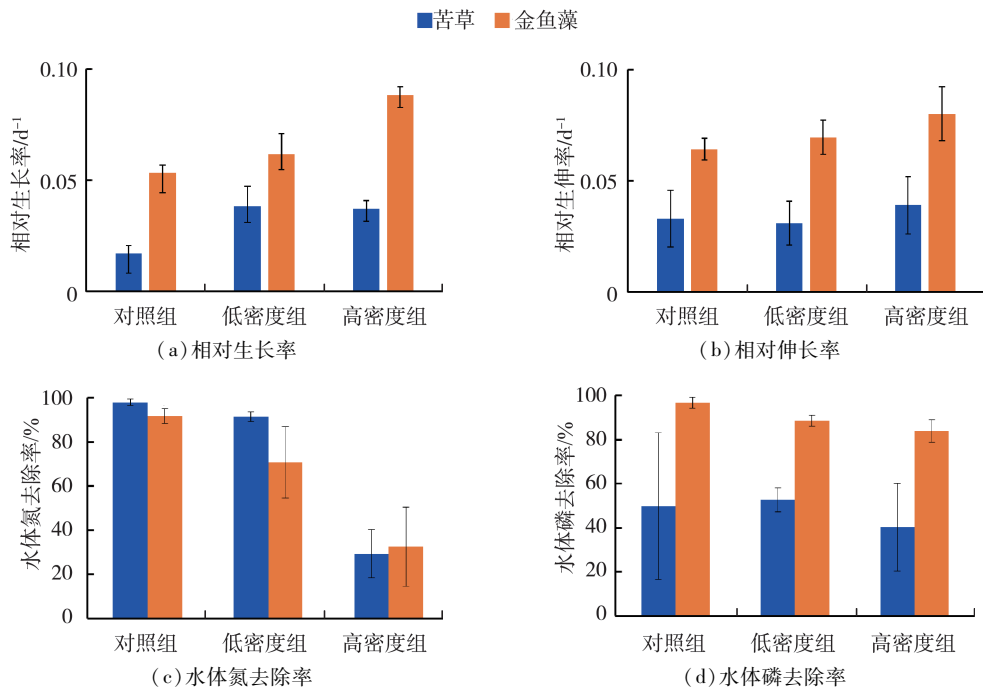


图4 不同处理组对沉水植物相对生长率、相对伸长率、水体氮去除率和水体磷去除率的影响

Fig.4 Effects of different treatments on relative growth rates and relative elongation rates of submerged macrophytes and removal rates of nitrogen and phosphorus in water

表1 沉水植物物种、铜锈环棱螺密度及二者交互作用对水体氮磷去除率的影响

Table 1 Effects of macrophyte species, snail density and their interaction on nitrogen and phosphorus removal rates in water

因子	氮去除率			磷去除率		
	方差平方和	方差百分比/%	差异显著性	方差平方和	方差百分比/%	差异显著性
沉水植物物种	1519.3	8.99	0.006	8541.4	72.54	0
铜锈环棱螺密度	10889.0	64.42	0	306.6	2.6	0.434
交互作用	2829.0	16.74	0.002	141.6	1.2	0.933
残差	1666.3	9.86		2785.2	23.65	

3 讨论

沉水植物作为水生态系统的初级生产力,对于水体氮磷具有很强的吸收去除作用^[15-16],金树权等^[17]的研究表明,苦草和金鱼藻对水体总氮的去除率分别为72.0%和79.3%,对水体总磷的去除率分别为58.5%和67.7%。而铜锈环棱螺作为水生动物,其新陈代谢作用则向水体释放氮磷,李宽意等^[18]的研究表明,环棱螺的氨氮和磷酸盐释放率分别为0.51 mg/(g·d)和18.42 μg/(g·d),因此可以推测铜锈环棱螺的存在可能会降低沉水植物对水体氮磷的去除率,本研究结果验证了这一推测,并且进一步表明铜锈环棱螺密度与沉水植物物种两因素对水体氮和磷去除率的影响有较大差异。不同密度

铜锈环棱螺对水体氮浓度变化起主要作用,方差占比为64.42%,而不同沉水植物物种虽然也显著影响水体氮浓度,但方差占比为8.99%,二者的交互作用对水体氮浓度变化的方差占比则为16.74%。而对于水体磷浓度的变化,不同沉水植物物种起主要作用,方差占比为72.54%,铜锈环棱螺及二者交互作用对水体磷的变化没有显著影响。本研究表明铜锈环棱螺的存在显著提高了沉水植物苦草和金鱼藻的相对生长率,这与李宽意等^[18]和何虎等^[19]的研究结果一致。这可能是因为铜锈环棱螺能够刮食沉水植物表面的附着藻类和滤食水体浮游藻类从而提高沉水植物竞争能力,并且螺的新陈代谢作用也提高了水体氮磷浓度。

综上所述,铜锈环棱螺一方面通过新陈代谢作用降低了水体氮磷的去除率,另一方面通过与沉水植物的“互利作用”提高了沉水植物的相对生长率和相对伸长率。根据本研所得结果,对于苦草,低密度组与对照组水体氮的去除率没有显著差异,这可能是因为低密度组苦草和铜锈环棱螺的多重作用使水体氮的去除率达到了一定的平衡,而高密度组氮的去除率显著低于低密度组和对照组,可能是因为高密度组螺的新陈代谢释放的氮磷占了较大比例。对于金鱼藻,高密度组、低密度组和对照组水体氮的去除率各组间均有显著差异,表明铜锈环棱螺的新陈代谢作用可能对金鱼藻的影响要大于对苦草的影响,这在相关研究^[9]中也得到证实。

此外,本研究还表明铜锈环棱螺对水体氮浓度的影响要大于对磷浓度的影响,水体氮磷比随铜锈环棱螺密度的增加而升高,这与 Zhu 等^[7]的研究结果相反,这可能是水体的初始条件或底质条件不同导致的^[20],水体初始氮磷比对于浮游藻类的生长有很大影响,铜锈环棱螺是底栖动物,会对底质有一定程度的扰动,进而影响底质营养盐的释放速率^[20-21]。相关研究表明,螺类新陈代谢氮的释放速率要远大于磷的释放速率^[18,22-23],Pinowska^[23]的研究表明 25℃ 时螺类氨氮的释放速率是磷释放速率的 6.7 倍。

4 结 语

本文研究了不同密度铜锈环棱螺对苦草和金鱼藻生长及水质的影响,结果表明不同密度铜锈环棱螺与沉水植物共存对水体溶解氧、pH 值、氧化还原电位、电导率和叶绿素质量浓度均有一定影响。铜锈环棱螺的存在降低了水体氮磷的去除率,铜锈环棱螺不同密度对水体氮浓度变化起主要作用,方差占比为 64%,不同沉水植物物种对水体磷浓度起主要作用,方差占比为 72.54%,铜锈环棱螺促进了沉水植物的生长,不同密度铜锈环棱螺对金鱼藻的促进作用要大于苦草。

参考文献:

[1] GU Q H, HUSEMANN M, DING B Q, et al. Population genetic structure of *Bellamya aeruginosa* (Mollusca: Gastropoda: Viviparidae) in China: weak divergence across large geographic distances [J]. Ecology & Evolution, 2015, 5(21): 4906-4919.

[2] 李永科. 沉水植物与牧食性螺类的关系研究[D]. 武汉:武汉大学, 2004.

[3] CAI Yongjiu, XUE Qingju, XU Jun, et al. Widespread natural intraspecific variation in tissue stoichiometry of two freshwater molluscs: effect of nutrient enrichment [J]. Ecological Indicators, 2016, 66: 583-591.

[4] LI D, ERICKSON R A, TANG S, et al. Structure and spatial patterns of macrobenthic community in Tai Lake, a large shallow lake, China [J]. Ecological Indicators, 2016, 61: 179-187.

[5] MO Shuqing, ZHANG Xiufeng, TANG Yali. Effects of snails, submerged plants and their coexistence on eutrophication in aquatic ecosystems [J]. Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems, 2017, 418: 44.

[6] 郑有飞, 文明章, 李宽意, 等. 太湖环棱螺牧食活动对苦草生长的影响[J]. 环境科学研究, 2008, 21(4): 94-98. (ZHENG Youfei, WEN Mingzhang, LI Kuanyi, et al. Effects of *Bellamya* sp. on the growth of *Vallisneria*

natans in Lake Taihu [J]. Research of Environmental Sciences, 2008, 21(4): 94-98. (in Chinese))

[7] ZHU Jinyong, LU Kaihong, LIU Xiasong. Can the freshwater snail *Bellamya aeruginosa* (Mollusca) affect phytoplankton community and water quality? [J]. Hydrobiologia, 2013, 707: 147-157.

[8] YANG Yanqing, ZHANG Jianyun, LIU Ling, et al. Experimental study on phosphorus release from sediment with fresh-water snail (*Bellamya aeruginosa*) bioturbation in eutrophic lakes [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20: 2526-2536.

[9] LI Wei, FU Hui, LI Yujie, et al. Effects of nutrient enrichment and *Bellamya aeruginosa* (Reeve) presence on three submerged macrophytes [J]. Hydrobiologia, 2019, 833(1): 95-105.

[10] ZHI Yongwei, LIU Yang, LI Wei, et al. Responses of four submerged macrophytes to freshwater snail density (*Radix swinhoei*) under clear-water conditions: a mesocosm study [J]. Ecology and Evolution, 2020, 10(14): 7644-7653.

[11] YANG Liu, HE Hu, GUAN Baohua, et al. Mesocosm experiment reveals a strong positive effect of snail presence on macrophyte growth, resulting from control of epiphyton and nuisance filamentous algae: implications for shallow lake management [J]. Science of the Total Environment, 2020, 705: 135958.

[12] LI Wei, ZHOU Jihai, DING Huijun, et al. Low-dose biochar added to sediment improves water quality and promotes the growth of submerged macrophytes [J]. Science of the Total Environment, 2020, 742: 140602.

[13] GÜSEWELL S, KOERSELMAN W. Variation in nitrogen and phosphorus concentrations of wetland plants [J]. Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics, 2002, 5: 37-61.

[14] LI Wei, CAO Te, NI Leyi, et al. Effects of water depth on carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of five submersed macrophytes in an in situ experiment [J]. Ecological Engineering, 2013, 61: 358-365.

[15] 王琦, 刘高慧, 肖能文, 等. 不同生物联合对滇池草海水质的净化作用[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 89-97. (WANG Qi, LIU Gaohui, XIAO Nengwen, et al. Purification effect of combination of different organisms on water quality of Caohai of Dianchi Lake [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 89-97. (in Chinese))

[16] 田琦, 王沛芳, 欧阳萍, 等. 5 种沉水植物对富营养化水体的净化能力研究[J]. 水资源保护, 2009, 25(1): 14-17. (TIAN Qi, WANG Peifang, OUYANG Ping, et al. Purification of eutrophic water with five submerged hydrophytes [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(1): 14-17. (in Chinese))

- [17] 金树权,周金波,包薇红,等. 5种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 156-161. (JIN Shuquan, ZHOU Jinbo, BAO Weihong, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of five submerged macrophytes [J]. Environmental Science, 2017, 38(1): 156-161. (in Chinese))
- [18] 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. (LI Kuanyi, WEN Mingzhang, YANG Hongwei, et al. Mutualistic relationship between freshwater snails and aquatic macrophytes [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5427-5432. (in Chinese))
- [19] 何虎,何宇虹,姬娅婵,等. 蓝藻堆积和螺类牧食对苦草生长的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5562-5567. (HE Hu, HE Yuhong, JI Yachan, et al. Effects of cyanobacterial accumulation and snail grazing on the growth of *Vallisneria spiralis* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5562-5567. (in Chinese))
- [20] ZHENG Zhongming, LYU Jing, LU Kaihong, et al. The impact of snail (*Bellamya aeruginosa*) bioturbation on sediment characteristics and organic carbon fluxes in an eutrophic pond [J]. Clean-Soil Air Water, 2011, 39: 566-571.
- [21] 吕敬,郑忠明,陆开宏,等. 铜锈环棱螺生物扰动对“蓝藻水华”水体底泥及其间隙水中碳、氮、磷含量的影响[J]. 生态科学, 2010, 29(6): 538-542. (LYU Jing, ZHENG Zhongming, LU Kaihong, et al. Effects of bioturbation by freshwater snail, *Bellamya aeruginosa*, on the contents of C, N and P in sediment and pore water in blue-green algal bloom waters [J]. Ecological Science, 2010, 29(6): 538-542. (in Chinese))
- [22] UNDERWOOD G J C. Growth enhancement of the macrophyte *Ceratophyllum demersum* in the presence of the snail *Planorbis planorbis*: the effect of grazing and chemical conditioning [J]. Freshwater Biology, 1991, 26: 325-334.
- [23] PINOWSKA A. Effects of snail grazing and nutrient release on growth of the macrophytes *Ceratophyllum demersum* and *Elodea canadensis* and the filamentous green alga *Cladophora* sp. [J]. Hydrobiologia, 2002, 479: 83-94.

(收稿日期:2021-03-19 编辑:王芳)

(上接第 173 页)

- [18] 胡良宇,戎贵文,汪星,等. 初期弃流后板房屋面雨水污染物质量浓度衰减规律[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 102-107. (HU Liangyu, RONG Guiwen, WANG Xing, et al. Attenuation rule of rainwater pollutant concentration on slab roof after split-flow of first flush runoff[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 102-107. (in Chinese))
- [19] 肖存艳,傅春,詹健. 基于 SWMM 的中尺度雨水系统构建下的水质水量模拟[J]. 水利水电技术, 2018, 49(3): 17-25. (XIAO Cunyan, FU Chun, ZHAN Jian. SWMM-based simulation on water quality and water quantity for construction of mesoscale rainwater system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(3): 17-25. (in Chinese))
- [20] 宋奔奔,高成,寇传和,等. 基于 SWMM 的生物滞留池布置水文时空效应[J]. 水资源保护, 2017, 33(3): 25-30. (SONG Benben, GAO Cheng, KOU Chuanhe, et al. Spatial and temporal hydrological responses of arrangement of bioretention cell based on SWMM[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3): 25-30. (in Chinese))
- [21] FARRENY R, GABARRELL X, RIERADEVALL J. Cost-efficiency of rainwater harvesting strategies in dense Mediterranean neighbourhoods [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2011, 55(7): 686-694.
- [22] LI Y, HUANG J J, HU M, et al. Design of low impact development in the urban context considering hydrological performance and life-cycle cost[J]. Journal of Flood Risk Management, 2020, 13(3): e12625.
- [23] PERI G, TRAVERSO M, FINKBEINER M, et al. The cost of green roofs disposal in a life cycle perspective: covering the gap[J]. Energy, 2012, 48(1): 406-414.
- [24] SHAFIQUE M, AZAM A, RAFIQ M, et al. An overview of life cycle assessment of green roofs[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 250: 119471.

(收稿日期:2021-02-11 编辑:熊水斌)