

DOI: 10.20103/j.stxb.202405091043

郭丽, 邓一深, 张文馨, 张倩, 李凡一, 于政达. 底栖动物群落扰动作用对沉积物-水界面生源要素的影响. 生态学报, 2025, 45(7): 3474-3486.

Guo L, Deng Y S, Zhang W X, Zhang Q, Li F Y, Yu Z D. Effects of benthic community disturbance on biogenic elements at sediment-water interface. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3474-3486.

底栖动物群落扰动作用对沉积物-水界面生源要素的影响

郭 丽¹, 邓一深¹, 张文馨², 张 倩¹, 李凡一¹, 于政达^{1,3,*}

1 青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071

2 山东省林业科学研究院, 济南 250014

3 青岛市碳中和生态环境技术创新中心, 青岛 266071

摘要:大型底栖无脊椎动物的生物扰动作用是维持淡水生态系统物质循环稳定的关键因素之一, 当前对底栖动物群落与单一物种生物扰动作用异同的认识还十分有限。以微生物反应器培养五种典型底栖动物种群及其群落, 通过测定底栖动物生物扰动作用引起的沉积物、上覆水中营养盐($\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 DTP) 及溶解有机碳(DOC)的含量变化, 同时计算各组单位生物量引起的元素变化量, 探究单物种和生物群落扰动作用的差异以及对沉积物-水界面生源要素的影响。结果表明: 单物种扰动作用导致沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量降低($P<0.05$), 并使整个体系中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量增加($P<0.05$), 但对 DTP 无显著影响($P>0.05$); 而群落扰动作用则促进体系 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的增加($P<0.05$), 使上覆水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 向沉积物沉积, 同时引起上覆水 DTP 含量显著上升($P<0.05$)。单物种的独立扰动皆促进上覆水 DOC 含量降低($P<0.05$), 霍甫水丝蚓的生物扰动导致沉积物的 DOC 含量降低且为唯一产生影响的物种($P<0.05$), 而群落中各物种相互作用导致体系 DOC 浓度无变化($P>0.05$)。单物种/群落单位生物量对各类物质分布存在明显差异, 霍甫水丝蚓的生物扰动作用对于上覆水和沉积物中的单位生物量 C、N、P 变化影响最为显著, 但其扰动作用在群落组合中受到抑制, 表明单位生物量扰动强度较大的物种, 其扰动强度在群落中更容易受到抑制。

关键词:大型底栖无脊椎动物; 生物扰动作用; 群落; 生源要素

Effects of benthic community disturbance on biogenic elements at sediment-water interface

GUO Li¹, DENG Yishen¹, ZHANG Wenxin², ZHANG Qian¹, LI Fanyi¹, YU Zhengda^{1,3,*}

1 Qingdao University School of Environmental Science and Engineering, Qingdao 266071, China

2 Shandong Academy of Forestry, Jinan 250014, China

3 Carbon Neutrality and Eco-Environmental Technology Innovation Center of Qingdao, Qingdao 266071, China

Abstract: Bioturbation of macroinvertebrate is one of the key factors in maintaining the nutrient cycling in freshwater ecosystems. Currently, the understanding of the similarities and differences in the bioturbation effects between benthic macroinvertebrate communities and single species was still very limited. This study aims to explore the differences in bioturbation effects caused by single species and communities, as well as the effects on the distribution characteristics of the biogenic element such as organic carbon and nutrients at the sediment-water interface in freshwater systems. We selected five typical benthic species (*Unio douglasiae*, *Bellamya aeruginosa*, *Corbicula fluminea*, *Neocaridina denticulata sinensis* and *Limnodrilus hoffmeisteri*) for laboratory culture experiments. Seven microcosms were established to culture benthic

基金项目:国家自然科学基金项目(32101302); 山东省自然科学基金项目(ZR2024MC181, ZR2019BD065)

收稿日期:2024-05-09; **网络出版日期:**2025-01-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuzhengda@qdu.edu.cn

macroinvertebrate populations (signal species group) and their communities (community group). Nutrients including ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$), nitrite ($\text{NO}_2^- \text{-N}$), nitrate ($\text{NO}_3^- \text{-N}$), dissolved total phosphorus (DTP), and dissolved organic carbon (DOC) in both the sediment (upper layer and bottom layer) and overlying water, influenced by bioturbation, were measured at the beginning and seventh day. Besides, the changes of the tested variables induced by per unit biomass for each group were calculated. The results indicated that the bioturbation by single species groups led to a decrease of $\text{NH}_3\text{-N}$ in sediment ($P < 0.05$) and an increase of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ content both in sediment and overlying water ($P < 0.05$). In contrast, the bioturbation of the community group promoted an increase in $\text{NH}_3\text{-N}$ ($P < 0.05$) and induced the $\text{NO}_3^- \text{-N}$ deposition from the overlying water into the sediment. The community group significantly increased the DTP content in the overlying water ($P < 0.05$), but this phenomenon was not observed in signal species groups. The independent bioturbation of single species groups all promoted a decrease in DOC content in the overlying water ($P < 0.05$). *Limnodrilus hoffmeisteri* was the only species that resulted in a decrease in the DOC content of sediments ($P < 0.05$). In contrast, the DOC concentration within the community group remained unchanged ($P > 0.05$), due to intermediate interactions among the benthic macroinvertebrates. On a per-unit-biomass basis, the community group's effects were less pronounced than those of the single species groups. The bioturbation effect per unit biomass of *Limnodrilus hoffmeisteri* had the most significant impact on the changes in the concentrations of C, N, and P in the overlying water and sediment. However, its bioturbation effect was suppressed in the community condition, meaning that the species with a high bioturbation intensity per unit biomass were more likely to be suppressed in the community.

Key Words: benthic macroinvertebrate; bioturbation; community; biogenic elements

大型底栖无脊椎动物的生物扰动作用是上覆水与沉积物之间生源要素迁移转化的“桥梁”^[1],既是有机物迁移的主要影响因素,也是营养盐输送的主要动力来源^[2]。它们通过摄食、爬行、筑穴等行为,影响沉积物-水界面生源要素的迁移转化^[3-8],对整个淡水生态系统起到调节作用^[9-10]。

大型底栖无脊椎动物的扰动功能特征决定扰动作用的效果,而群落内的物种会因种间相互作用对生物扰动功能产生额外的影响。例如霍甫水丝蚓与河蚬的生物扰动作用对上覆水氮、磷浓度影响截然不同^[11-14],并且两物种同时存在时,河蚬会抑制霍甫水丝蚓对水体氮浓度的增加作用^[15]。自然生境中的底栖动物群落生物多样性丰富、结构差异显著,单个种群的扰动作用无法完全反映整个群落的生态功能^[16],而当前国内外缺乏系统的底栖动物群落扰动功能方面的研究,尤其是单物种和生物群落扰动的对比研究较少。

本研究以霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*)、河蚬 (*Corbicula fluminea*)、铜锈环棱螺 (*Bellamya aeruginosa*)、圆顶珠蚌 (*Unio douglasiae*) 和中华新米虾 (*Neocaridina denticulata sinensis*) 五种典型底栖动物作为研究对象,构建反应器模拟单一种群与群落微生境,研究生物扰动作用对沉积物和上覆水中生源要素迁移转化的影响。通过测定氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$)、亚硝态氮 ($\text{NO}_2^- \text{-N}$)、硝态氮 ($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、溶解性总磷 (Dissolved total phosphorus, DTP) 和溶解有机碳 (Dissolved organic carbon, DOC) 含量,分析物种组成、数量、个体生物量等因素对上述元素变化的影响,探讨物种相互作用与群落扰动功能的关联,旨在为底栖动物群落扰动作用在淡水生态系统物质循环的深入研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 反应器构建

本研究设置反应器 7 个,反应器为封底有机玻璃柱,其内径为 15 cm,高度为 45 cm。沉积物添加至反应器 10 cm 处,使用锡箔纸包覆反应器外壁,对沉积物层进行遮光处理。上覆水添加至 20 cm 处,并放置小型漂浮植物槐叶萍,模拟反应器在自然生境中的水生植物(图 1),将搭建完毕的模拟反应器静置一周,在反应器内部达到稳定后加入底栖动物。

基于 2011 年至 2023 年团队于山东省南四湖开展野外调查的观测结果^[17-18],以及近年数个室内培养实验对生物扰动基本规律的认识^[19-23]。本研究以底栖动物的基本生存模式、摄食方式、扰动功能组、死亡率等条件筛选五种典型物种开展培养实验,并综合考虑各物种的扰动特征、成体标准尺寸以及生物量等因素,以确定物种的投加量。为降低底栖动物个体差异导致的扰动偶然性,本研究对投加个体进行精确的测量和称重,选取预培养装置中活性较强、体型和体重均匀(确保个体大小、质量、活性等指标相近)的底栖动物用于反应器实验(表 1)。

1.2 实验设置

实验设空白对照组和生物组,生物组分为单物种组(河蚬(*Corbicula fluminea*)、霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)、圆顶珠蚌(*Unio douglasiae*)、中华新米虾(*Neocaridina denticulata sinensis*))和生物群落组(全部物种),空白对照组内仅有槐叶萍。实验开始前(0 d),先测定一次未投加槐叶萍和底栖动物的反应器内上覆水与沉积物的各项指标($\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DTP 和 DOC)作为背景值。随后将预培养装置中活性较强、体型和体重均匀的中华新米虾、圆顶珠蚌、河蚬、铜锈环棱螺、霍甫水丝蚓以及槐叶萍转移至相应反应器(置于 25 °C 温室,实验期间内不投放食物)内培养 7 d,分别于 0、7 d 采集并测定上述相同的指标。

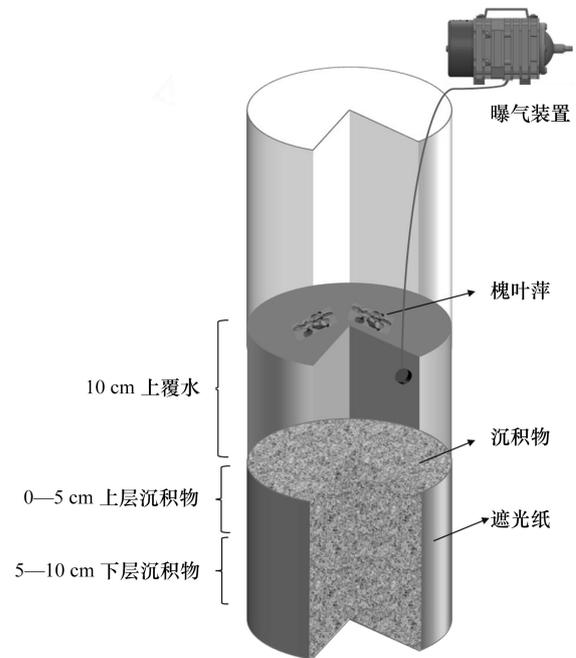


图 1 模拟反应器示意图

Fig.1 Schematic diagram of column chamber for experiment

表 1 模拟反应器信息表

Table 1 Basic information for the establishment of the column chamber

设置内容 Set content	添加量 Recruitment	备注信息 Note information
圆顶珠蚌 <i>Unio douglasiae</i>	1 只/10.9 g	向下运输者,大型滤食者,壳长 4.5—5.0 cm、壳宽 2.0—2.5 cm
铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	10 只/48.0 g	生物扩散者,中型刮食者,壳长 3.0—3.5 cm、壳宽 1.7—2.0 cm
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	3 只/2.4 g	向下运输者,小型滤食者,壳长 1.0—1.5 cm、壳宽 1.0—1.2 cm
中华新米虾 <i>Neocaridina denticulata sinensis</i>	15 只/4.5 g	再生者,小型集食者,体长 2.0—2.5 cm
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	300 只/1.0 g	隧道扩散者,微型集食者,体长 2.5—4.0 cm、体宽 0.07—0.08 cm
生物群落 Biocoenosis	29 只/66.8 g	生物群落的底栖动物生物量为单物种的叠加,在配置水中进行一周预培养。
槐叶萍 <i>Salvinia</i>	2.8 g	水生植物,正式实验前置于配置水中进行培养
沉积物 Sediment	10.0 cm	原位分层采集,带回实验室后于阴凉处风干,用 2 mm 筛网过滤且充分混匀,实验时沉积物分层填充:上层为 0—5.0 cm,下层为 5.0—10.0 cm
上覆水 Overlying water	10.0 cm	实验室配置 ^[20]

圆顶珠蚌以下简称珠蚌,铜锈环棱螺以下简称环棱螺,中华新米虾以下简称新米虾,霍甫水丝蚓以下简称水丝蚓

1.3 样品分析方法

DOC、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 DTP 含量分别通过比色法、靛酚蓝比色法、紫外分光光度法、比色法以及过硫酸盐消化法测定^[24-25]。

1.4 数据处理与分析

各元素的变化量为各组与对照组的差值,改变量倍数为各元素的变化量与对照组元素含量的比值。本研究考虑到每个反应器物种的个体数量、体型有较大的差异,因此计算了各物种单位生物量引起的元素变化量,

单位生物量引起的元素变化量为元素变化量与生物量的比值,通过均一化的手段更加直观的反映各物种与群落的功能。

所有数据统计分析基于用 SPSS 21.0 进行,相关图表使用 Origin 2022 完成。使用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验各实验组之间的显著性。

2 结果

2.1 底栖动物扰动下单元素浓度变化

2.1.1 DIN 各组分浓度的变化

相较于初始值,对照组上覆水和沉积物的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量显著升高($P<0.05$)。群落、河蚬、水丝蚓的沉积物-水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量相对趋势与对照组一致,新米虾、珠蚌和环棱螺与对照组不同。

群落组和环棱螺组上覆水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度($(10.10\pm 2.14)\text{mg/L}$ 与 $(11.02\pm 0.77)\text{mg/L}$)较对照组($(3.98\pm 0.81)\text{mg/L}$)显著增加($P<0.05$),且环棱螺组增加了 1.77 倍;其余单物种组较对照组无显著差异($P>0.05$)。生物组的上层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量较对照组($(178.07\pm 8.16)\text{mg/kg}$)均具有显著差异($P<0.05$),且群落组和单物种组之间也均有显著差异($P<0.05$);单物种组的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量显著降低($P<0.05$),如新米虾组($(43.38\pm 3.96)\text{mg/kg}$)较对照组减少了 0.76 倍,而群落组的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量($(241.19\pm 52.54)\text{mg/kg}$)显著增加($P<0.05$)。群落组下层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量($(142.91\pm 3.75)\text{mg/kg}$)较对照组($(43.38\pm 3.96)\text{mg/kg}$)显著增加($P<0.05$),水丝蚓组($(37.43\pm 10.67)\text{mg/kg}$)则显著降低($P<0.05$);其余生物组较对照组无显著差异($P>0.05$,图 2)。

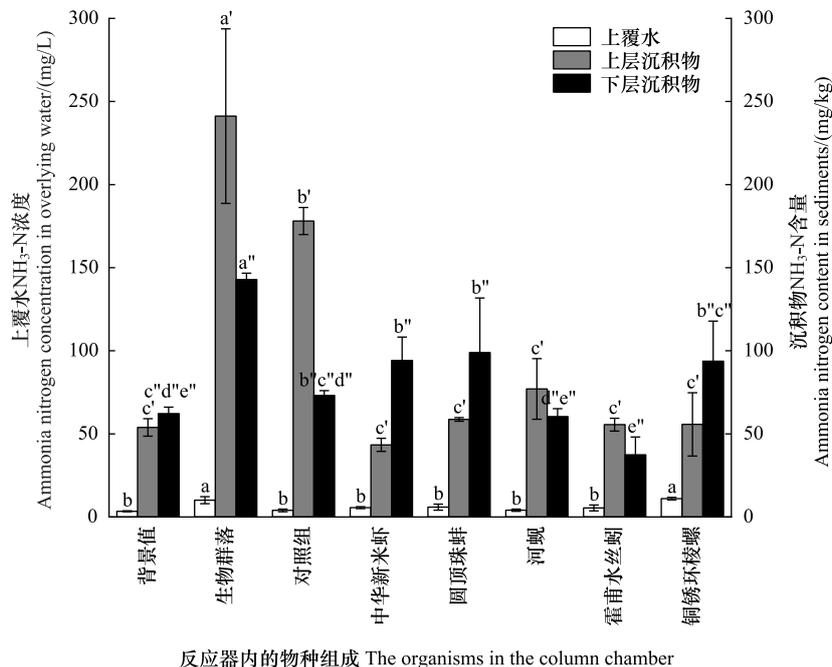


图 2 反应器内上覆水和沉积物中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度变化量

Fig.2 The $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in overlying water and sediments of each group after 7 days

柱状图上方字母为差异性标记

相较于初始值,对照组上覆水和沉积物的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量均显著性降低($P<0.05$)。仅河蚬组的沉积物-水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量相对趋势和对照组不一致,其余组均与对照组一致。

群落组、单物种组和对照组上覆水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量两两之间存在显著差异($P<0.05$),群落组($(33\pm 0.21)\text{mg/L}$)较对照组($(2.77\pm 0.06)\text{mg/L}$)显著降低,而各单物种组较对照组显著升高。河蚬($(97.00\pm 33.55)\text{mg/kg}$)

和水丝蚓 (106.00 ± 12.29) mg/kg) 上层沉积物 NO_3^- -N 含量较对照组无显著差异 ($P > 0.05$), 其余生物组较对照组 (94.50 ± 3.97) mg/kg) 显著增加 ($P < 0.05$), 其中珠蚌组增加了 0.9 倍; 新米虾 (153.67 ± 7.29) mg/kg)、环棱螺 (155.83 ± 3.06) mg/kg) 与群落组 (142.50 ± 6.76) mg/kg) 无显著差异 ($P > 0.05$)。下层沉积物 NO_3^- -N 含量, 仅河蚬组 (102.17 ± 5.48) mg/kg) 和对照组 (79.17 ± 7.29) mg/kg) 之间有显著差异 ($P < 0.05$), NO_3^- -N 含量增加了 0.29 倍; 群落组、其余单物种组与对照组之间无显著差异 ($P > 0.05$, 图 3)。

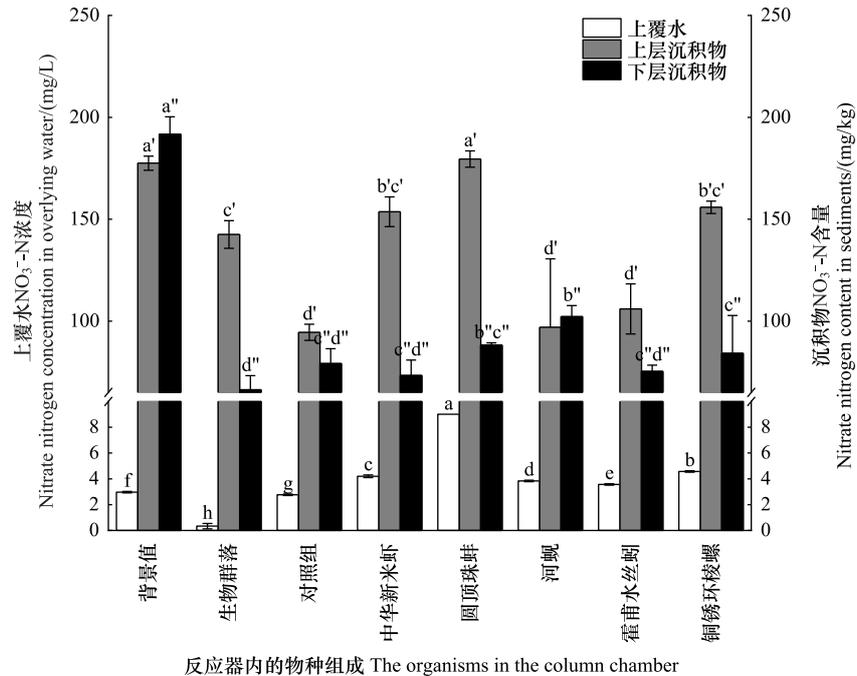


图 3 反应器内上覆水和沉积物中的 NO_3^- -N 浓度变化量

Fig.3 The NO_3^- -N concentration in overlying water and sediments of each group after 7 days

柱状图上方字母为差异性标记

相较于初始值, 对照组 (0.11 ± 0.00) mg/L) 上覆水 NO_2^- -N 浓度无显著变化 ($P > 0.05$)。河蚬组 NO_2^- -N 浓度 (0.12 ± 0.01) mg/L) 较对照组无显著差异 ($P > 0.05$), 群落组和其他单物种组较对照组显著增加 ($P < 0.05$), 其中群落组增加了 11.30 倍; 群落组 (1.35 ± 0.08) mg/L) 和珠蚌组 (1.14 ± 0.03) mg/L)、环棱螺组 (1.23 ± 0.02) mg/L) 之间无显著差异 ($P > 0.05$, 图 4)。

2.1.2 DTP 的迁移

较初始值, 对照组上覆水 DTP 含量显著升高 ($P < 0.05$), 沉积物则无显著变化 ($P > 0.05$)。新米虾、水丝蚓和环棱螺的沉积物-水 DTP 含量相对趋势与对照组一致, 群落、珠蚌、河蚬与对照组不同。

群落组上覆水中 DTP 浓度 (2.40 ± 0.30) mg/L) 较对照组 (0.96 ± 0.52) mg/L) 显著升高 ($P < 0.05$), 增加了 1.49 倍, 单物种组较对照组均无显著差异 ($P > 0.05$)。群落组上层沉积物 DTP 含量较对照组无显著差异 ($P > 0.05$), 新米虾组 (79.73 ± 8.16) mg/kg) 和环棱螺组 (73.25 ± 7.49) mg/kg) 较对照组 (95.94 ± 11.03) mg/kg) 显著降低 ($P < 0.05$), 其余单物种组则无显著变化 ($P > 0.05$)。群落组 (92.16 ± 1.62) mg/kg) 和珠蚌组 (90.00 ± 1.87) mg/kg) 下层沉积物 DTP 含量较对照组 (111.60 ± 10.63) mg/L) 显著降低 ($P < 0.05$), 其余单物种组较对照组无显著差异 ($P > 0.05$, 图 5)。

2.1.3 沉积物-水界面 DOC 含量的变化

相较于初始值, 对照组上覆水和沉积物 DOC 含量均无显著变化 ($P > 0.05$)。新米虾、环棱螺的沉积物-水 DOC 含量相对趋势与对照组不同, 其余组与对照组相同。

群落组 (26.54 ± 1.85 mg/L) 上覆水 DOC 浓度较对照组 (23.64 ± 2.22 mg/L) 无显著差异 ($P > 0.05$), 单物种组较对照组、群落组均有显著差异 ($P < 0.05$), 单物种组使 DOC 浓度降低, 其中水丝蚓组 (7.46 ± 2.68 mg/L) 降低了 0.68 倍。生物组上层沉积物 DOC 含量较对照组 (98.50 ± 14.81 mg/kg) 均无显著差异 ($P > 0.05$), 群落组 (106.36 ± 4.94 mg/kg) 和环棱螺组 (86.31 ± 12.49 mg/kg) 之间有显著差异 ($P < 0.05$)。水丝蚓组 (71.96 ± 13.01 mg/kg) 下层沉积物 DOC 含量较对照组 (88.48 ± 10.56 mg/kg) 显著降低 ($P < 0.05$), 其余组较对照组无显著差异 ($P > 0.05$, 图 6)。

2.2 各物种及群落单位生物量的扰动强度

水丝蚓的单位生物量扰动作用引起上覆水和沉积物中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量变化最显著, 分别为 (1.47 ± 2.52) $\text{mg L}^{-1} \text{g}^{-1}$ (上覆水)、(-122.51 ± 7.35) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ (上层沉积物) 和 (-35.72 ± 8.48) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ (下层沉积物)。上覆水中其余生物组的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 单位生物量变化量 (绝对值) 均低于 $1 \text{ mg L}^{-1} \text{g}^{-1}$, 河蚬的生物扰动作用强度最低, 仅为 (0.03 ± 0.20) $\text{mg L}^{-1} \text{g}^{-1}$ 。上层沉积物中仅群落组的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 单位生物量含量变化为正值 (0.95 ± 0.72) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ 。

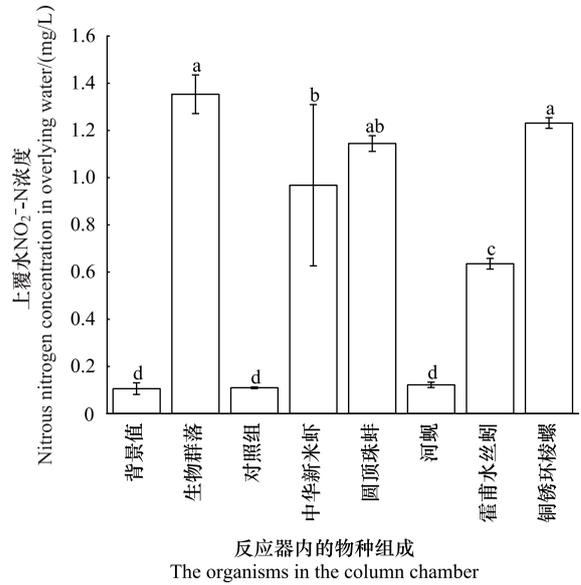


图 4 反应器内上覆水中的 NO₂-N 浓度变化量

Fig. 4 The NO₂-N concentration in overlying water of each group after 7 days

柱状图上方字母为差异性标记

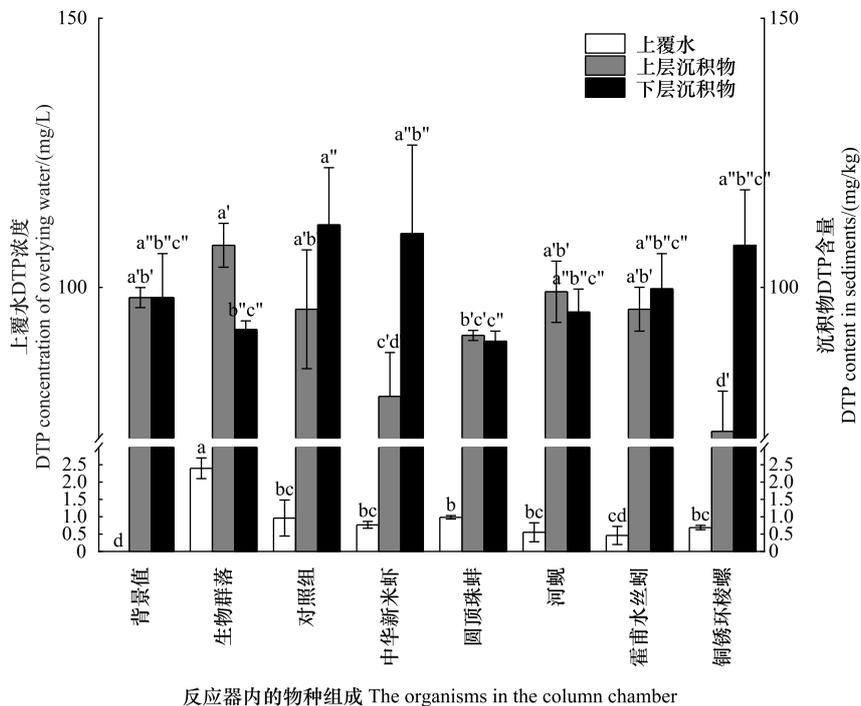
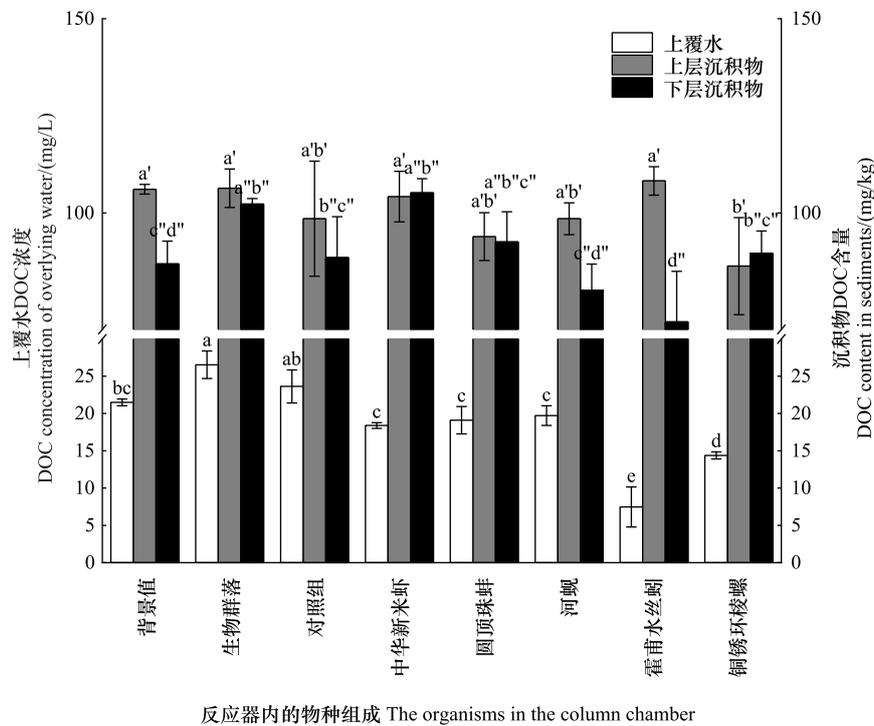


图 5 反应器内上覆水和沉积物中的溶解性总磷 (DTP) 浓度变化量

Fig. 5 The Dissolved total phosphorus (DTP) concentration in overlying water and sediments of each group after 7 days

柱状图上方字母为差异性标记

$\text{NO}_3\text{-N}$ 单位生物量变化量 (绝对值), 水丝蚓在上覆水 (0.8 ± 0) $\text{mg L}^{-1} \text{g}^{-1}$ 、上层沉积物 (106 ± 12.29) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$)



反应器内上覆水和沉积物中的溶解有机碳(DOC)浓度变化量

Fig.6 The Dissolved organic carbon (DOC) concentration in overlying water and sediments of each group after 7 days
柱状图上方字母为差异性标记

中均是最大的,群落组在上覆水(-0.04 ± 0) $\text{mg L}^{-1} \text{g}^{-1}$ 、上层沉积物(0.72 ± 0.12) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ 中均是最小的,下层沉积物中河蚬的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 单位生物量变化量(9.5 ± 0.83) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ 最大,环棱螺(0.10 ± 0.26) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ 最小。 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 单位生物量变化量(绝对值),水丝蚓(0.53 ± 0.02) $\text{mg L}^{-1} \text{g}^{-1}$ 是变化最大的一组,河蚬(0.01 ± 0.01) $\text{mg L}^{-1} \text{g}^{-1}$ 的变化量最小。

DTP 单位生物量变化量(绝对值),水丝蚓在上覆水(-0.50 ± 0.44) $\text{mg L}^{-1} \text{g}^{-1}$ 和上层沉积物(-11.89 ± 5.21) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ 中均是变化最大的一组,新米虾是上层沉积物中(-3.60 ± 4.25) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ 变化最大的,珠蚌(0 ± 0.05) $\text{mg L}^{-1} \text{g}^{-1}$ 、水丝蚓(0 ± 14.04) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ 、环棱螺(-0.08 ± 0.29) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ 分别是上覆水、上层沉积物、下层沉积物 DTP 单位生物量变化量最小的。

DOC 单位生物量变化量(绝对值),水丝蚓在上覆水(-16.18 ± 4.80) $\text{mg L}^{-1} \text{g}^{-1}$ 、上层沉积物(-11.16 ± 19.69) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ 、下层沉积物(18.92 ± 26.07) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ 中均是最大的,群落组(0.04 ± 0.05) $\text{mg L}^{-1} \text{g}^{-1}$ 、河蚬(0 ± 5.22) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ 、环棱螺(-0.03 ± 0.38) $\text{mg kg}^{-1} \text{g}^{-1}$ 分别是上覆水、上层沉积物、下层沉积物 DOC 单位生物量变化量最小的(图7)。

$\text{NH}_3 \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 DOC 单位生物量变化量(绝对值),水丝蚓在上覆水和沉积物中均为变化最显著的一组; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 单位生物量变化量(绝对值),上覆水和上层沉积物中水丝蚓为变化最显著的,下层沉积物中河蚬是最显著的;DTP 单位生物量变化量(绝对值),上覆水和下层沉积物中水丝蚓为变化最显著的,上层沉积物中新米虾为最显著的。

3 讨论

3.1 生物扰动条件下单元素的迁移转化

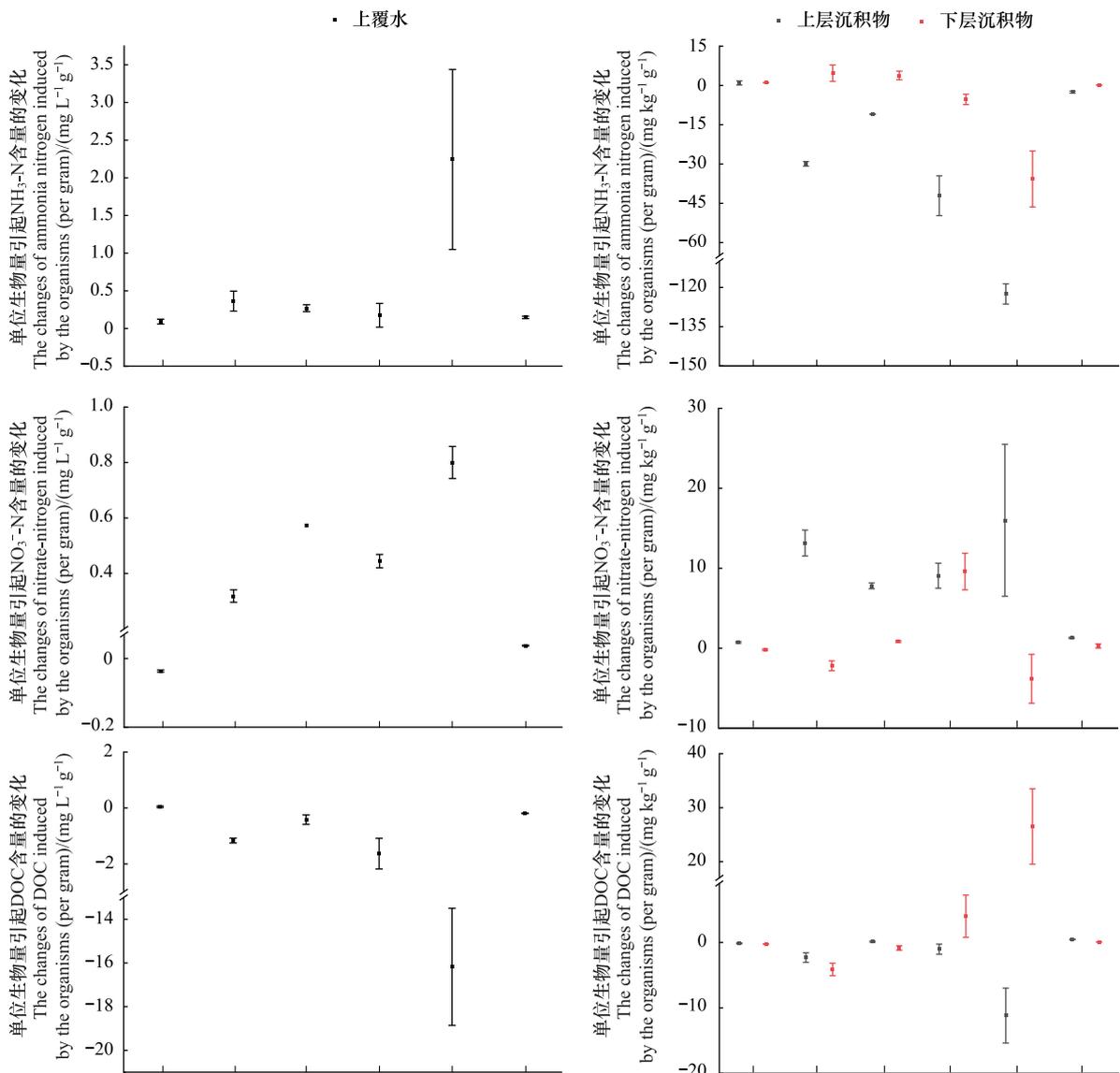
3.1.1 沉积物 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_3 \text{-N}$ 的释放

对照组元素浓度的变化表明无生物扰动下自然迁移和微生物作用的结果。对照组较初始值,上覆水中的

NO_3^- -N 被槐叶萍吸收导致浓度降低, NH_3 -N、 NO_2^- -N 浓度无变化, 沉积物中反硝化作用和底栖动物的排氮作用^[26-27] 导致 NH_3 -N 含量增加 NO_3^- -N 含量降低。无生物扰动下体系内的 NO_3^- -N 含量减少、 NO_2^- -N 浓度无变化以及 NH_3 -N 含量增加, 减少的 NO_3^- -N 一部分被槐叶萍吸收, 一部分转化为 NH_3 -N。群落、河蚬、水丝蚓的扰动促进沉积物-水中 NH_3 -N 的微生物作用, 新米虾、珠蚌和环棱螺的扰动抑制沉积物-水中 NH_3 -N 的微生物作用。仅河蚬扰动抑制微生物对沉积物-水中 NO_3^- -N 含量的影响, 其余组均促进。

水丝蚓的掘穴行为能够增加沉积物与上覆水的接触面积, 沉积物内 O_2 浓度的升高为氨氧化细菌提供更佳的生态位^[28], 导致硝化作用的速率增加, 且水丝蚓排泄物中 NO_3^- -N 所占比例较其他底栖动物高^[29], 引起 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 由沉积物向上覆水释放且 NH_3 -N 含量降低的现象^[30-32]。新米虾的生物扰动作用表现与水丝蚓相似, 同样能够引发 NO_3^- -N 向上覆水释放的现象, 但由于其生命活动仅在表层沉积物和上覆水界面中进行, 使得下层沉积物的 NH_3 -N 和 NO_3^- -N 含量无变化。

河蚬和珠蚌为双壳滤食动物会大量消耗水中氧气, 从而减弱硝化作用^[30,33], 其生物扰动行为仅在表层沉积物和上覆水界面中进行, 扰动导致沉积物的 NH_3 -N 含量降低和上覆水 NO_3^- -N 含量增加。环棱螺的生物扰动与河蚬、珠蚌相似, 生物扰动强度小(单位生物量扰动变化小), 对沉积物内的硝化、反硝化作用影响小, 排泄产生的 NO_3^- -N、 NH_3 -N 由沉积物释放, 促进氮元素向上覆水释放。环棱螺为生物扩散者, 在沉积物表面进行



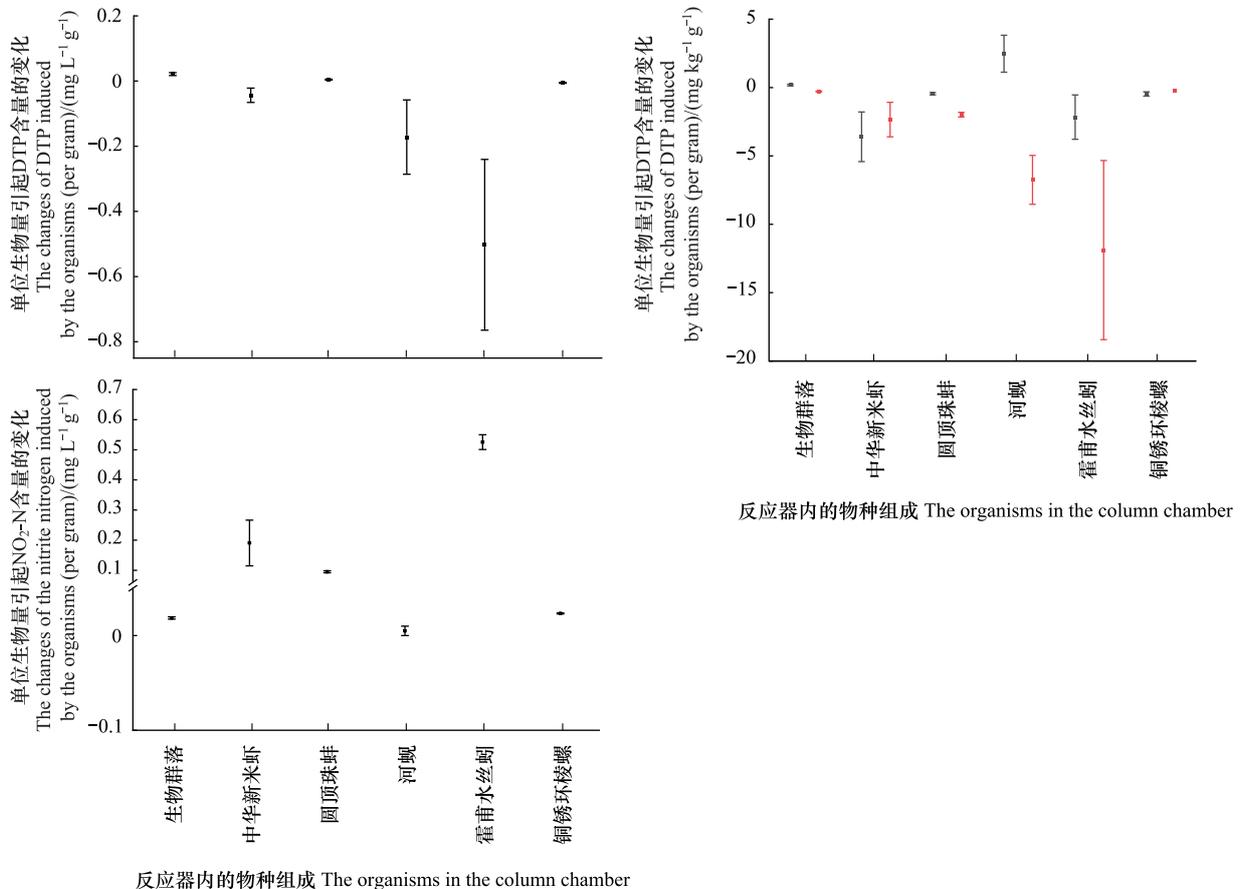


图7 单位生物量引起生源要素含量的变化

Fig.7 The changes of the biogenic elements induced by the organisms (per gram)

随机扰动且扰动深度较浅,河蚬、珠蚌为向下运输者,其潜居深度多为 1—5 cm^[34],因此环棱螺与河蚬、珠蚌的扰动皆在表层沉积物,下层沉积物无扰动作用影响^[35—36]。

各单物种的体系 NO₃⁻-N 含量呈增加的状态,群落中各物种对于 NO₃⁻-N、NH₃-N 的扰动存在拮抗作用,扰动相互抑制,群落组合扰动则表现为促进沉积物 NO₃⁻-N、NH₃-N 沉积。底栖动物的排氮作用^[27—28]导致沉积物 NH₃-N 含量增加,生物量最大的群落组排氮作用释放的 NH₃-N 一部分向上覆水迁移,从而群落组上覆水和沉积物中的 NH₃-N 含量均增大。群落组多物种的扰动使得沉积物的孔隙率增大^[37],溶解氧浓度升高,而水丝蚓头部钻入沉积物摄食,延缓水丝蚓停留在水中部分的尾部摆动^[38],同时群落个体增加后,水丝蚓对外部扰动更加敏感,进而降低了其活动强度导致生物扰动受到抑制。沉积物和上覆水中 NH₃-N 含量显著性升高;溶解氧浓度升高同时会促进沉积物中的反硝化作用抑制硝化作用,从而促进排氮作用产生的大量 NH₃-N 转化为 NO₃⁻-N。群落组沉积物中 NH₃-N、NO₃⁻-N 的产生和沉积强度大于释放强度所以表现为沉积,此外物种组合抑制单物种对于 NO₂⁻-N 的扰动,降低硝化作用速率,使得群落组上覆水 NO₂⁻-N 的积累与珠蚌、环棱螺无显著性差异 ($P>0.05$),且低于单物种积累总量。

3.1.2 沉积物 DTP 的释放

无生物扰动下体系的 DTP 含量呈增加的状态。新米虾、水丝蚓、环棱螺扰动促进微生物对沉积物-水中 DTP 含量的作用,群落、珠蚌、河蚬扰动则抑制微生物作用。不同强度和类型的生物扰动对磷循环的影响不同^[39],因此不同底栖动物对不同土层中 DTP 含量的影响存在差异性且无明显规律。珠蚌和河蚬为双壳滤食动物会大量消耗水中溶解氧^[30,33],导致新米虾和环棱螺的活动减弱,生物扰动受到抑制,且珠蚌位于竞争优

势位生物扰动强度大,珠蚌的扰动主导群落组沉积物 DTP 的释放。新米虾、水丝蚓、环棱螺促进微生物的作用,珠蚌、河蚬抑制微生物的作用,而群落组微生物的作用由珠蚌、河蚬主导并抑制新米虾、水丝蚓、环棱螺的作用。

底栖动物对有机物的分解会消耗底层水中的溶解氧,导致沉积物向上覆水释放磷^[40-41],而扰动功能不同的底栖动物扰动行为和耗氧率均不同,造成了不同底栖动物对沉积物释放 DTP 的影响强度不同,因此生物扰动在沉积物的内部磷循环中发挥着重要作用^[42]。群落中珠蚌、新米虾和环棱螺协同促进沉积物向上覆水释放 DTP,使得群落组扰动作用对 DTP 的影响比单物种更加强烈,促进沉积物向上覆水释放 DTP 强度更大。自然状态下磷在泥水两相间的迁移转化是双向的,而底栖动物可以通过爬行、摄食、廊道建设等行为提高沉积物中颗粒的运输和溶解氧的含量^[43],从而促进泥相磷向水相的释放,而底栖动物群落组由于生物多样性产生了更强的扰动作用,促使更多磷向上覆水中释放。

3.1.3 上覆水 DOC 的释放

DOC 含量的影响因素主要为底栖动物的生物扰动、上覆水-沉积物之间自然迁移转化、沉积物中微生物的降解特性^[44]、不同形式碳之间的转化。底栖动物的生物扰动作用会影响上覆水-沉积物、沉积物之间 DOC 的迁移,首先底栖动物的生命活动会促进沉积物中的 DOC 向上覆水迁移,其次底栖动物未消化的食物排出体外和粪便堆积于沉积物中,增加沉积物中 DOC 的含量;上覆水和沉积物之间存在着元素的自然迁移过程,在无任何其他外界因素干扰的情况下也会发生元素的迁移转化;沉积物中的 DOC 具有良好的微生物降解特性^[44],微生物生命活动会消耗有机碳产生无机碳即降低沉积物中的 DOC 含量,沉积物微生物种类和数量^[45]对 DOC 的动态变化具有极为重要的作用;水体和沉积物中碳主要以颗粒有机碳、溶解有机碳、颗粒无机碳和溶解无机碳四种形式存在^[46],四种形式之间会相互转化,造成上覆水和沉积物中的 DOC 含量的变化。

较高的水温会促进水体和沉积物中的微生物活性^[47-48],使底栖动物摄食及新陈代谢产物、浮游植物(槐叶萍)生长过程中的分泌物及浮游植物残体等得到有效分解并产生 DOC,而 DOC 消耗主要通过细菌生产及其对腐殖碳的矿化作用,研究表明,天然水域有时高达 86.5% 的初级生产量被细菌所消耗并投入再循环^[49-50]。底栖动物对微生物活性具有影响作用,新米虾、环棱螺的扰动抑制微生物的生命活动,水丝蚓、河蚬、珠蚌则促进,群落组中水丝蚓、河蚬、珠蚌相互协同并抑制米虾、环棱螺对微生物的影响。实验期间内对照组上覆水和沉积物的 DOC 含量未发生变化,各种影响因素对于 DOC 的作用持平。

水丝蚓的生物扰动作用在垂直方向上对沉积物产生影响,使沉积物移动扩散并改变结构,增大沉积物与上覆水的接触面积,促进两者之间溶解有机碳迁移交换^[51],掘穴行为产生的通道促进上覆水中的 DOC 迁移至沉积物中,造成上覆水中的 DOC 含量降低,沉积物中 DOC 含量和溶解氧浓度升高^[52],沉积物中微生物的降解、不同形式碳之间的转化造成 DOC 含量降低。珠蚌、河蚬、环棱螺和新米虾的生物扰动作用对于沉积物-水中 DOC 含量的影响作用相同。珠蚌和河蚬为滤食者取食上覆水中的有机物颗粒,环棱螺为刮食者取食表层沉积物中的有机物,新米虾是自由移动型底栖动物^[48],能够在水底爬行或在水层游泳,影响着上覆水中的 DOC 含量。四种底栖动物于沉积物中建设洞穴,且洞穴开口大深度浅^[53],扩大表层沉积物与上覆水的接触面积,同时未消化的食物排出体外和粪便堆积于沉积物中,从而促进 DOC 由上覆水向沉积物释放^[36,54],同时沉积物中的微生物降解和元素转化降低沉积物中的 DOC 含量,最终沉积物中的 DOC 含量无变化。

物种组合抑制单物种对有机物的分解作用,各单物种组的上覆水 DOC 含量均降低,群落组内物种相互抑制导致上覆水和沉积物 DOC 浓度无变化。单物种的独立扰动皆促进上覆水向沉积物释放 DOC,主要有两个方面的原因,首先底栖动物从沉积物中摄取有机物以维持自身生命活动,使得沉积物中有机质和 DOC 减少;其次底栖动物未消化的食物排出体外和粪便堆积于沉积物中,促进有机质、DOC 从水体向沉积物转移^[36,55]。群落组合扰动对上层沉积物 DOC 的含量变化的影响为环棱螺以外的四种底栖动物主导,而水丝蚓是对 DOC 含量单位生物量扰动强度最大的物种,多种底栖动物扰动增加孔隙率,增大溶解氧浓度,从而延缓水丝蚓停留在水中部分的尾部摆动^[38],同时群落个体增加后,水丝蚓对外部扰动更加敏感,进而降低了其活动强度导致

其对 DOC 含量降低的作用受到抑制,而河蚬和珠蚌处于相同生态位会存在竞争关系从而相互抑制。相较于单物种生物扰动,群落组的组合扰动机制更为复杂,底栖动物的组合扰动并不是单物种扰动的简单叠加,而是存在着复杂的促进与抑制机制,如群落中河蚬生物扰动对水丝蚓生物扰动效应存在抑制作用^[15]。

3.2 群落和单物种的相对关系及扰动强度

水丝蚓对于上覆水和沉积物中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 DOC 单位生物量含量变化影响最大,且对于上覆水中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 DTP、上层沉积物中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、下层沉积物中的 DTP 水丝蚓的扰动强度均是最大的;河蚬、新米虾分别是下层沉积物中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、上层沉积物中 DTP 扰动强度最大的物种。因此,水丝蚓的单位生物量扰动为实验组中强度最大的一组。下层沉积物中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DTP 和 DOC 单位生物量含量变化,环棱螺的生物扰动强度最小,由此得知环棱螺的扰动深度浅,仅对表层沉积物产生扰动作用,对于下层沉积物几乎无影响。

单物种扰动作用导致沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量降低,并使整个体系中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量增加($P<0.05$),而群落扰动作用则促进体系 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的增加($P<0.05$),使上覆水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 向沉积物沉积,群落扰动效果不是简单的单物种扰动叠加。物种组合对上覆水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的积累小于单物种总量,且能减弱单物种的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 累积作用,相对降低上覆水的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度。单物种扰动均导致上层沉积物的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量降低,而群落在不同物种的组合作用下各物种的扰动相互抑制,并表现出与单物种相反的作用,导致群落组上层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量升高。群落的生物组合抑制下层沉积物中水丝蚓的扰动作用,多物种扰动下沉积物孔隙率增大,溶解氧浓度相对增高,延缓水丝蚓停留在水中部分的尾部摆动^[38],同时群落个体增加后,水丝蚓对外部扰动更加敏感,进而降低了其活动强度导致生物扰动受到抑制,因此群落 $\text{NH}_3\text{-N}$ 沉积强度更大。由单位生物量扰动引起的元素变化量可知,水丝蚓为优势种,河蚬和新米虾次之,群落组合中水丝蚓的扰动对下层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的释放作用受到抑制,本研究猜测单位生物量扰动强度大的物种在群落中更容易受到抑制;而单位生物量环棱螺对下层沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的沉积作用强度最小,在组合中扰动没有变化,本研究猜测单位生物量扰动强度小的物种生态影响偏低。

单物种促进上覆水和沉积物 $\text{NO}_3\text{-N}$ 积累,而群落扰动则促进上覆水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 释放至沉积物中埋藏,不同物种对上覆水的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 积累作用相互抑制,导致上覆水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 释放至沉积物并埋藏,降低水中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度。上覆水和沉积物中的群落扰动的强度最小,物种间的拮抗作用使得物种组合的扰动强度减小,从而导致群落对于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的扰动强度低于单物种。单物种扰动增加上覆水 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度,均表现为上覆水 $\text{NO}_2\text{-N}$ 积累,群落的物种组合内各物种相互竞争,对 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的作用相互抑制,导致上覆水 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的积累作用减弱。

单物种的生物扰动效果为体系 DTP 含量降低,物种组合使得底栖动物的扰动受到促进或抑制,导致群落扰动效果为沉积物释放磷至上覆水并积累。珠蚌和河蚬为双壳滤食动物,大量消耗水中溶解氧^[30,33],导致新米虾和环棱螺的活动减弱,珠蚌扰动增强,从而促进群落组更大量的 DTP 的释放。单物种的独立扰动效果为上覆水 DOC 降低,群落中各物种相互作用导致上覆水和沉积物 DOC 浓度无变化,说明物种组合抑制单物种对有机物的分解作用。

综上,单物种的扰动对于沉积物-水体系元素的迁移转化的影响显著,然而当物种以群落的形式存在于生态体系中时,单一物种的扰动强度会受到一定程度的抑制。

4 结论

群落扰动和独立扰动存在差异,组合扰动并不是单物种生物扰动的简单叠加,各物种间存在复杂的拮抗与协同机制;单物种扰动作用导致沉积物 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量降低,并使整个体系中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量增加,而群落扰动作用则促进体系 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的增加,使上覆水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 向沉积物沉积。群落扰动作用比单物种扰动更为显著;单物种的独立扰动对于上覆水中的 DTP 浓度不会产生显著性影响($P>0.05$),而生物群落的组合扰动使得上覆水中 DTP 的浓度显著增加。物种组合抑制单物种对有机物的分解作用;单物种的独立扰动皆促进上覆水 DOC 含量降低,而群落中各物种相互作用导致上覆水和沉积物 DOC 浓度无变化。霍甫水丝蚓的生物扰动作用对

于上覆水和沉积物中的单位生物量 C、N、P 变化影响最大,扰动效果最为显著,为扰动优势种,同时水丝蚓在群落组合中受到抑制,本研究猜测单位生物量扰动强度大的物种在群落中更容易受到抑制,单位生物量扰动强度小的物种生态影响偏低。单物种的扰动对于沉积物-水体系元素的迁移转化的影响显著,然而当物种以群落的形式存在于生态体系中时,单一物种的扰动强度会受到一定程度的抑制,因此生物多样性丰富的群落对维持淡水生态系统的元素平衡具有潜在的贡献。

5 展望

底栖动物的生物扰动作用对沉积物-水界的营养盐及溶解有机碳的迁移转化具有重要作用,但本研究未能解释在群落定向去除或添加特定的功能物种,群落的功能(如运移功能)是否会发生定向的改变。因此,在未来需要进一步完善实验研究体系,基于群落结构、功能特征、环境因素与生物地球化学循环深度探究调控底栖动物群落生态功能的关键因素,从而揭示底栖动物群落扰动作用对沉积物-水界面元素生源要素的影响机制。

参考文献(References):

- [1] Wang F Y, Tessier A, Hare L. Oxygen measurements in the burrows of freshwater insects. *Freshwater Biology*, 2001, 46(3): 317-327.
- [2] 聂小保, 吴淑娟, 吴方同, 孙士权, 蒋昌波, 谭万春, 万俊力. 颤蚓生物扰动对沉积物氮释放的影响. *环境科学学报*, 2011, 31(1): 107-113.
- [3] Kim P J, Lee J H, Huh I A, Kong D. Development of benthic macroinvertebrates sediment index (BSI) for bioassessment of freshwater sediment. *International Journal of Sediment Research*, 2019, 34(4): 368-378.
- [4] Gallepp G W. Chironomid influence on phosphorus release in sediment-water microcosms. *Ecology*, 1979, 60(3): 547-556.
- [5] 韦建福, 敬凯, 王延辉, 孙红英. 南溪河大型底栖无脊椎动物群落结构及其季节变化. *水生态学杂志*, 2022, 43(4): 30-38.
- [6] Covich A P, Palmer M A, Crowl T A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling. *BioScience*, 1999, 49(2): 119-127.
- [7] Vanni M J. Nutrient cycling by animals in freshwater ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33: 341-370.
- [8] 张雷燕, 安浩, 关保华, 程寒飞, 詹茂华. 贡湖湾大型底栖动物碳、氮稳定同位素的空间分布特征. *环境科学与技术*, 2017, 40(7): 67-71.
- [9] Lohrer A M, Thrush S F, Gibbs M M. Bioturbators enhance ecosystem function through complex biogeochemical interactions. *Nature*, 2004, 431(7012): 1092-1095.
- [10] Lindegaard C. The role of Zoobenthos in energy flow in two shallow lakes. *Hydrobiologia*, 1994, 275(1): 313-322.
- [11] 吴方同, 陈锦秀, 闫艳红, 胡旭跃, 谭万春. 水丝蚓生物扰动对东洞庭湖沉积物氮释放的影响. *湖泊科学*, 2011, 23(5): 731-737.
- [12] 吴方同, 闫艳红, 孙士权, 谭万春. 水丝蚓生物扰动对沉积物磷释放的影响. *环境工程学报*, 2011, 5(5): 1071-1076.
- [13] Zhang X F, Liu Z W, Jeppesen E, Taylor W D. Effects of deposit-feeding tubificid worms and filter-feeding bivalves on benthic-pelagic coupling: implications for the restoration of eutrophic shallow lakes. *Water Research*, 2014, 50: 135-146.
- [14] Welker M, Walz N. Can mussels control the plankton in rivers?: a planktological approach applying a Lagrangian sampling strategy. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(5): 753-762.
- [15] 靳辉, 罗旭光, 谷娇, 宁晓雨, 蔡永久, 何虎, 于谨磊, 杨桂军, 李宽意. 河蚶 (*Corbicula fluminea*) 对霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 生物扰动的抑制效应. *湖泊科学*, 2016, 28(6): 1348-1353.
- [16] 郭颖, 谢慧君, 张建. 不同类型底栖动物对表面流人工湿地系统水质净化的影响. *水生生物学报*, 2022, 46(10): 1501-1509.
- [17] Yu Z D, Wang H, Miao M S, Kong Q, Quan Q, Wang R Q, Liu J. Long-term monitoring of community succession in impoundment lake: responses of macroinvertebrate to south-to-north water diversion project. *Ecological Indicators*, 2020, 118: 106734.
- [18] 郝梓然, 于丽华, 孔范龙, 张倩, 李凡一, 于政达. 河湖交汇区底栖动物群落特征及生态健康评价——以南四湖为例. *生态学杂志*, 2023, 42(5): 1132-1141.
- [19] Nie L K, Li Y, Hou Y C, Di L Y, Xi M, Yu Z D. Dynamics of organic carbon under bioturbation by mud crabs (*Macrophthalmus japonicus*) and clamworms (*Perinereis aiuhitensis*) in an estuary ecosystem. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2021, 534: 151474.
- [20] Fu L T, Xi M, Nicholas R, Wang Z, Wang X, Kong F L, Yu Z D. Behaviors and biochemical responses of macroinvertebrate *Corbicula fluminea* to polystyrene microplastics. *Science of the Total Environment*, 2022, 813: 152617.
- [21] Wang Z, Kong F L, Fu L T, Li Y, Li M H, Yu Z D. Responses of Asian clams (*Corbicula fluminea*) to low concentration cadmium stress: whether the depuration phase restores physiological characteristics. *Environmental Pollution*, 2021, 284: 117182.
- [22] Fu X Z, Yu Z D, Kong F L, Duan P P, Li F Y, Zhang L Z, Liu Z Y, Cui Y Q. Application of an integrated loach-plant-substrate-microbes non-aerated saturated vertical flow constructed wetlands: mechanisms of pollutants removal and greenhouse gases reduction. *Bioresource Technology*, 2023, 368: 128337.
- [23] Xi M, Zhang Q, Nie L K, Xiong T Q, Yu Z D. Quantitative comparison of clamworm (*Perinereis aiuhitensis*) and crab (*Macrophthalmus japonicus*)

- burrowing effects on nitrogen and phosphorus dynamics at the sediment-water interface. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159559.
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [25] 钱君龙, 张连弟, 乐美麟. 过硫酸盐消化法测定土壤全氮全磷. *土壤*, 1990, 22(5): 258-262.
- [26] Hammen C S. Aminotransferase activities and amino acid excretion of bivalve mollusks and brachiopods. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 1968, 26(2): 697-705.
- [27] 姚思鹏, 李柯, 周德勇, 刘旭博, 刘正文. 霍甫水丝蚓对太湖梅梁湾沉积物影响-水界面无机氮、磷交换. *环境科学与技术*, 2011, 34(1): 100-104.
- [28] 郭亮, 姚思鹏, 邢鹏. 霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 扰动对表层沉积物细菌群落结构和多样性的影响. *农业环境科学学报*, 2011, 30(5): 973-978.
- [29] 薛庆举, 蔡永久, 龚志军. 不同温度条件下霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) 的氮磷排泄. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(6): 1089-1095.
- [30] Hedman J E, Gunnarsson J S, Samuelsson G, Gilbert F. Particle reworking and solute transport by the sediment-living polychaetes *Marenzelleria neglecta* and *Hediste diversicolor*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2011, 407(2): 294-301.
- [31] 房岩, 孙刚, 刘倩. 水丝蚓对稻田上覆水氮素浓度的影响. *广东农业科学*, 2011, 38(18): 42-43.
- [32] 孙培荣, 李大鹏, 徐楚天, 陈姝彤, 汤尧禹. 水丝蚓粪对沉积物微环境及氮磷吸附特性的影响. *环境工程*, 2023, 41(8): 8-17.
- [33] Dupont E, Gilbert F, Poggiale J C, Dedieu K, Rabouille C, Stora G. Benthic macrofauna and sediment reworking quantification in contrasted environments in the Thau Lagoon. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 72(3): 522-533.
- [34] 黎跃成. 中国药用动物原色图鉴. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.
- [35] 范成新, 杨龙元, 张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析. *湖泊科学*, 2000, 12(4): 359-366.
- [36] 吕敬, 郑忠明, 陆开宏, 孙思志. 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. *生态科学*, 2010, 29(06): 538-542.
- [37] 白秀玲, 周云凯, 张雷. 水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响. *生态学报*, 2012, 32(17): 5581-5588.
- [38] 王元元, 宋进喜, 蒋卫程, 程丹东, 薛健. 摇蚊幼虫与霍甫水丝蚓扰动对河流沉积物中氮、磷、氧释放的影响. *环境科学学报*, 2015, 35(8): 2504-2511.
- [39] Tarhan L G, Zhao M Y, Planavsky N J. Bioturbation feedbacks on the phosphorus cycle. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 566: 116961.
- [40] Orihel D M, Schindler D W, Ballard N C, Graham M D, O'Connell D W, Wilson L R, Vinebrooke R D. The “nutrient pump:” Iron-poor sediments fuel low nitrogen-to-phosphorus ratios and cyanobacterial blooms in polymictic lakes. *Limnology and Oceanography*, 2015, 60(3): 856-871.
- [41] Tong Y D, Xu X W, Qi M, Sun J J, Zhang Y Y, Zhang W, Wang M Z, Wang X J, Zhang Y. Lake warming intensifies the seasonal pattern of internal nutrient cycling in the eutrophic lake and potential impacts on algal blooms. *Water Research*, 2021, 188: 116570.
- [42] Kristensen E, Penha-Lopes G, Delefosse M, Valdemarsen T, Quintana C O, Banta G T. What is bioturbation? The need for a precise definition for fauna in aquatic sciences. *Marine Ecology Progress Series*, 2012, 446: 285-302.
- [43] Welsh D T. It's a dirty job but someone has to do it: the role of marine benthic macrofauna in organic matter turnover and nutrient recycling to the water column. *Chemistry and Ecology*, 2003, 19(5): 321-342.
- [44] 张翰林, 赵峥, 陆贻通, 曹林奎. 稻田土壤溶液中溶解性有机氮、碳的空间分布及其微生物降解特性. *环境污染与防治*, 2014, 36(10): 7-12.
- [45] 刘微, 王树涛. 土壤中溶解性有机物及其影响因素研究进展. *土壤通报*, 2011, 42(4): 997-1002.
- [46] 孔凡亭. 大沽河溶解性有机碳时空分布特征和通量研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2014.
- [47] 赵光辉, 杨平, 唐晨, 韩智献, 全川. 闽江河口养虾塘水体可溶性有机碳、营养盐和叶绿素 a 浓度变化特征. *南方水产科学*, 2020, 16(3): 70-78.
- [48] 杨平, 谭立山, 金宝石, 全川. 九龙江河口区养虾塘水体营养盐与叶绿素 a 含量的变化特征及影响因素. *湿地科学*, 2017, 15(6): 794-801.
- [49] Hagström, Azam F, Andersson A, Wikner J, Rassoulzadegan F. Microbial loop in an oligotrophic pelagic marine ecosystem: possible roles of cyanobacteria and nanoflagellates in the organic fluxes. *Marine Ecology Progress Series*, 1988, 49: 171-178.
- [50] 赵卫红, 杨登峰, 王江涛. 中国对虾养殖系统中溶解有机碳和胶体有机碳的动态变化. *海洋环境科学*, 2004, 23(3): 16-20.
- [51] 孙刚, 房岩, 韩德复, 吕明. 水丝蚓对水田沉积物颗粒垂直分布的生物扰动作用. *长春师范学院学报: 自然科学版*, 2008, 27(4): 59-61.
- [52] 毛欢. 水丝蚓扰动对沉积物结构和溶质运移的影响研究[D]. 西北大学, 2022.
- [53] 孙刚, 房岩. 底栖动物的生物扰动效应. 北京: 科学出版社, 2013.
- [54] 钟大森. 两种配养动物的扰动作用对沉积物-水界面营养盐迁移转化的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [55] 吴桂汉, 陈品健, 江瑞胜. 滤食性贝类在对虾综合养殖生态系统中的作用. *台湾海峡*, 2001, (4): 447-452.