doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2025.04.005

聚苯乙烯微塑料对小管福寿螺抗氧化酶活性和肠道菌群的影响

薛少帅[1],王　悦[1],井木子[1],王聪聪[2],肖溢洁[1],常婷婷[2],沈雯佳[1],李　宏[2],陈　炼[1]

(1.南京林业大学生命科学学院,江苏 南京 210037)
(2.南京师范大学生命科学学院,江苏 南京 210023)

[**摘要**]　微塑料是一种新型环境污染物,潜在危害水生生物健康. 本实验探究了不同粒径(0.5 μm 和 5 μm)及浓度(4 mg/L 和 40 mg/L)的聚苯乙烯颗粒在 96 h 暴露后对小管福寿螺(*Pomacea canaliculata*)抗氧化酶活性和肠道菌群的影响. 结果表明,微塑料处理组的小管福寿螺肝胰腺超氧化物歧化酶(SOD)活性显著降低,过氧化氢酶(CAT)活性不存在显著差异,还原型谷胱甘肽(GSH)含量均降低. 不同处理组下小管福寿螺肠道菌群的 α 多样性没有显著差异;0.5 μm,4 mg/L 组 β 多样性与其他处理组存在显著差异. 在 0.5 μm 微塑料的处理下,小管福寿螺肠道厚壁菌门(Firmicutes)相对丰度显著降低,而在 40 mg/L 两种粒径微塑料处理下乳球菌属(*Lactococcus*)相对丰度显著降低,并且存在微杆菌属(*Microbacterium*)、假单胞杆菌属(*Pseudomonas*)等致病菌的富集. 综上,不同浓度、粒径聚苯乙烯微塑料可诱导小管福寿螺氧化应激反应,虽未对小管福寿螺肠道菌群的多样性产生显著影响,但改变了肠道菌群结构,并导致多种致病菌的富集.

[**关键词**]　微塑料,小管福寿螺,抗氧化酶,肠道微生物
[**中图分类号**]Q985.1　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1001-4616(2025)04-0051-07

Effects of Polystyrene Microplastics on the Antioxidant Enzyme Activity and Intestinal Microbiota of *Pomacea canaliculata*

Xue Shaoshuai[1], Wang Yue[1], Jing Muzi[1], Wang Congcong[2], Xiao Yijie[1], Chang Tingting[2], Shen Wenjia[1], Li Hong[2], Chen Lian[1]

(1.College of Life Sciences, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)
(2.School of Life Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Microplastics, emerging as a novel environmental pollutant, pose potential health risks to aquatic organisms. This study investigated the effects of polystyrene microplastics on antioxidant enzyme activities and gut microbiota in *Pomacea canaliculata*. Experiments were conducted using polystyrene microplastics partices with diameters of 0.5 μm and 5 μm, at concentrations of 4 mg/L and 40 mg/L, over a period of 96 h. The results showed that the activity of superoxide dismutase (SOD) was significantly reduced in the microplastic treatment groups, while no significant difference was observed in catalase (CAT) activity. Additionally, the content of reduced glutathione (GSH) was decreased in the microplastic treatment groups. The α-diversity of gut microbiota in *P. canaliculata* exhibited no significant variation across treatment groups. However, β-diversity demonstrated notable differences, particularly between the 0.5 μm (4 mg/L) group and other treatment groups. Exposure to 0.5 μm microplastics at different concentrations (4 mg/L and 40 mg/L) induced a significant reduction in the relative abundance of Firmicutes in the gut. In contrast, exposure to 40 mg/L microplastics of both sizes (0.5 μm and 5 μm) led to a pronounced decrease in *Lactococcus* levels, with an enrichment of pathogenic bacteria such as *Microbacterium* and *Pseudomonas*. In conclusion, although polystyrene microplastics induced an oxidative stress response in *P. canaliculata*, they did not significantly affect the diversity of its gut microbiota. Nevertheless, these microplastics altered the microbial community structure, promoting the proliferation of various pathogenic bacteria.

Key words: microplastics, *Pomacea canaliculata*, antioxidant enzymes, gut microbiome

收稿日期:2024-12-17.
基金项目:国家自然科学基金项目(32170434)、江苏省大学生实践创新训练计划项目(202210298150Y).
通讯作者:陈炼,博士,教授,研究方向:入侵生物学. E-mail:chenlian_2004@163.com

微塑料(microplastics,MPs)是指直径小于 5 mm 的塑料颗粒,由塑料产品经过物理作用、化学作用和生物降解等碎裂分解形成[1]. 微塑料一般具有较强的耐腐蚀性、耐氧化性等特点,在自然环境中极难降解,微塑料污染已经成为全球性亟待解决的环境问题[2]. 研究表明,淡水和海洋生态系统均面临微塑料污染问题,水体和沉积物中均存在微塑料[3]. 中国的长江[4]、珠江[5]等水域存在较严重微塑料污染,而海洋中微塑料浓度最高可达到 190 万个/m^3[6]. 微塑料被水生生物摄入后,一部分通过代谢被排出体外,少量会滞留在组织内,通过抑制生长、组织损伤、氧化应激等途径对生物体产生毒害作用[7]. 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD),过氧化氢酶(catalase,CAT)是生物体抗氧化防御系统中重要的酶类,在清除活性氧方面发挥着关键作用. 还原型谷胱甘肽(glutathione,GSH)能够清除自由基,是生物体内重要的非酶性抗氧化物.

肠道作为动物的消化、吸收和免疫器官,在阻止外源性物质入侵、维持肠道微生物稳态等方面至关重要[8]. 肠道菌群是动物肠道内栖息的微生物的总称,对宿主的生长发育、生殖代谢以及免疫调节具有重要作用[9]. 研究表明,生物体内缺少可消化微塑料的酶,微塑料会在动物肠道内累积,并影响肠道微生物菌群结构和数量[10]. 例如,经聚苯乙烯微塑料暴露,金鱼(*Carassius auratus*)出现了严重的肝脏和肠道损伤[11],氨基聚苯乙烯微塑料暴露导致斑马鱼(*Danio rerio*)幼鱼的肠道微生物多样性降低,变形菌门(Proteobacteria)丰度增加,造成斑马鱼幼鱼肠道菌群失衡,引起代谢紊乱[12].

目前,微塑料对淡水水生生物的毒理效应研究大多集中在浮游动物、鱼类、甲壳类和双壳类等[13-16]. 小管福寿螺(*Pomacea canaliculata*)是原产于南美洲亚马逊流域的大型淡水螺类,也是世界 100 种恶性外来入侵物种之一[17]. 已有研究发现小管福寿螺已在太湖湿地[18]、洱海流域湖滨带[19]等生境自然分布,在鱼塘、沟渠和水田中也有分布[20]. 本研究以小管福寿螺作为研究物种,评估聚苯乙烯微塑料暴露对其抗氧化酶活性和肠道菌群的影响. 相关研究成果可为评估微塑料对淡水腹足类的毒性效应提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料

2023 年 4 月在江苏省昆山市陆杨郊野公园(31°27′36.19″ N,120°55′39.34″E)采集小管福寿螺卵块,带回实验室后放入人工气候箱孵化,孵化条件为温度 25 ℃,光周期 12 L∶12 D,湿度 80%,光照强度 2 000 lx. 孵化的幼螺饲养 3 个月至体长 25 cm 左右,期间每天更换曝气水并投喂生菜和饲料. 选取 150 只表现正常、大小相近、螺龄相同的雄性小管福寿螺(螺长 25±1 mm)进行聚苯乙烯微塑料暴露实验. 实验动物在饲养和实验过程中人工气候箱的设置与孵化条件相同. 粒径 0.5 μm 和 5 μm 的聚苯乙烯微塑料溶液购于江苏智川科技有限公司,原始浓度均为 25 mg/mL.

1.2 实验方法

基于长江地区微塑料的环境浓度和微塑料对水生生物的研究[21],实验中微塑料浓度设为 4 mg/L 和 40 mg/L. 微塑料原始溶液使用前超声震荡仪震荡 10 min 并用去离子水稀释至目标浓度. 实验动物分成 5 组,分别为对照组(C 组)、0.5 μm,4 mg/L 微塑料组(SL 组)、0.5 μm,40 mg/L 微塑料组(SH 组)、5 μm,4 mg/L 微塑料组(BL 组)和 5 μm,40 mg/L 微塑料组(BH 组). 每组设置 3 个重复,每个重复 10 只螺,共 150 只螺. 微塑料溶液为 2 L,暴露时间为 96 h,每天更换溶液并喂食. 96 h 后,从每个组随机选择 6 只螺,共 30 只螺. 使用 75%的乙醇冲洗消毒,在无菌条件下解剖其肝胰腺和肠道,分离出肠道内容物,放入冻存管并快速置于液氮中速冻. 肝胰腺和肠道内容物样本放入-80 ℃冰箱中待测.

1.3 抗氧化酶活性和 GSH 含量测定

将肝胰腺组织质量(g)和 w=0.9%的生理盐水(mL)按 1∶9 的比例混合,4 ℃匀浆,4 000 r/min 离心 10 min,取上清液低温冷藏备用. SOD、CAT 和 GSH 试剂盒均购自南京建成生物工程研究所,测定原理及方法参照试剂盒说明书.

原始数据使用 SPSS 26.0 进行分析. 采用 Shapiro-Wilk 检验来评估数据分布的正态性,之后对数据进行方差齐性检验. 数据满足正态分布和方差齐性进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Tukey 事后检验,未满足正态分布或方差齐性则进行 Kruskal-Wallis *H* 检验和 Dunn 事后检验. 显著差异水平设置为

0.05,结果用平均值和标准差表示. 图表使用 Origin 软件绘制.

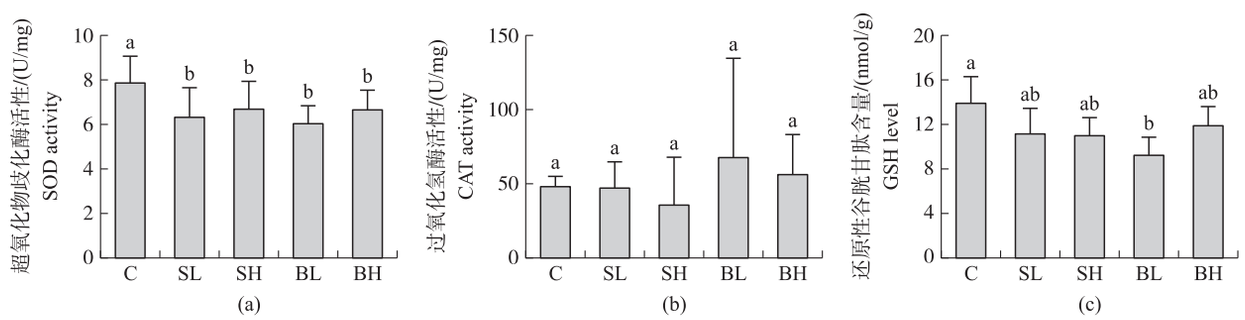
1.4 肠道微生物

采用 Omega Soil DNA Kit(Omega Bio-Tek,GA,USA)提取小管福寿螺肠道微生物总 DNA,对 16S rRNA V3-V4 区的基因序列进行扩增,引物为 341F(5′-CCTAYGGGRBGCASCAG-3′)和 806R(5′-GGACTACNNG-GGTATCTAAT-3′)[22]. PCR 产物纯化回收后利用 Illumina NovaSeq 测序平台进行高通量测序,测序由上海派森诺生物技术股份有限公司完成. 原始数据使用 QIIME2(2019.4)软件 DADA2 方法经过质控、去噪、拼接、去嵌合体得到特征序列(amplicon sequence variants,ASVs). 通过 ASVs 计算 Chao1 指数、Observed_species 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数表征微生物多样性和均匀度. 基于 Bray-Curtis 距离算法的非量度多维尺度分析(non-metric multidimensional scaling,NMDS)来表征微生物群落的差异性. 通过线性判别分析(linear discriminant analysis effect size,LEfSe)(|LDA|>3.5),寻找组间相对丰度差异显著的生物标记物.

2 结果与讨论

2.1 微塑料处理后对小管福寿螺肝胰腺抗氧化酶活性及 GSH 含量的影响

与对照组相比,4 个处理组的 SOD 活性显著降低(P<0.05),微塑料处理组之间不存在显著差异(P>0.05)(图 1a). 对照组与处理组的 CAT 活性没有显著差异(图 1b). 与对照组相比,BL 组 GSH 含量显著降低(P<0.05),其他 3 个处理组(SL、SH 和 BH 组)GSH 含量降低但无显著差异(P>0.05)(图 1c).



C:对照组;SL:0.5 μm,4 mg/L 微塑料组;SH:0.5 μm,40 mg/L 微塑料组;BL:5 μm,4 mg/L 微塑料组;BH:5 μm,40 mg/L 微塑料组;下同. 图中 a、b 表示不同微塑料处理对抗氧化酶活性变化的显著性差异.

图 1 不同微塑料处理后小管福寿螺肝胰腺抗氧化酶活性

Fig. 1 Antioxidant enzyme activities in the hepatopancreas of *Pomacea canaliculata* under different microplastic treatments

2.2 肠道微生物的组成和丰度

通过对 5 个组别 30 只小管福寿螺肠道微生物 16S rRNA 基因 V3-V4 可变区高通量测序,共获得有效序列 1 928 004 条,共得到 2 281 个 ASV. 根据物种注释结果,细菌归类为 17 个门、27 个纲、52 个目、83 个科、134 个属. 小管福寿螺肠道微生物在门水平上以变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)、厚壁菌门(Firmicutes)、梭杆菌门(Fusobacteriota)和放线菌门(Actinobacteriota)为主(图 2A). 微塑料暴露后,SH 组小管福寿螺肠道微生物中的变形菌门相对丰度显著上升(P<0.05),厚壁菌门和放线菌门相对丰度显著降低(P<0.05). BH 组小管福寿螺肠道微生物中厚壁菌门的相对丰度也显著降低(P<0.05). SL、BL、BH 组肠道菌群在门水平上未表现出明显差异. 克劳斯氏菌属(*Cloacibacterium*)、乳球菌属(*Lactococcus*)、鲸杆菌属(*Cetobacterium*)、拟杆菌属(*Bacteroides*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)、微杆菌属(*Microbacterium*)和热单胞菌属(*Thermomonas*)是小管福寿螺肠道微生物中的优势属(图 2B). SH 和 BH 组小管福寿螺肠道乳球菌属的相对丰度显著下降(P<0.05). SH 组中,不动杆菌属的相对丰度显著上升(P<0.05).

2.3 肠道微生物的 α 和 β 多样性

同对照组相比,微塑料处理组中小管福寿螺肠道微生物的 Chao 1、Observed_speices、Shannon 和 Simpson 指数均没有显著变化(P>0.05)(图 3). 基于 NMDS 分析结果发现,SH 组肠道微生物 β 多样性与其他处理组存在显著差异(P<0.05,Stress=0.10)(图 4).

LEfSe(|LDA|>3.5)分析显示,放线菌门(Actinobacteriota)、放线菌纲(Actinobacteria)、微球菌目

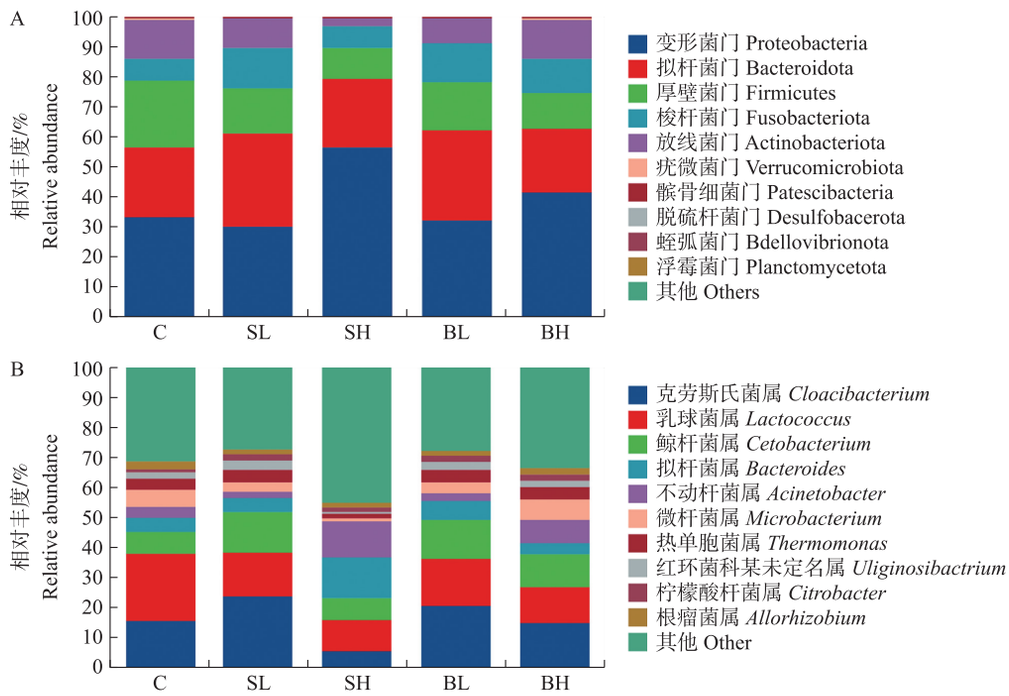


图 2　小管福寿螺肠道微生物中门(A)和属(B)水平物种组成的相对丰度

Fig. 2　Relative abundance of gut microbiota of *Pomacea canaliculata* (A) at the phylum level, (B) at the genus level

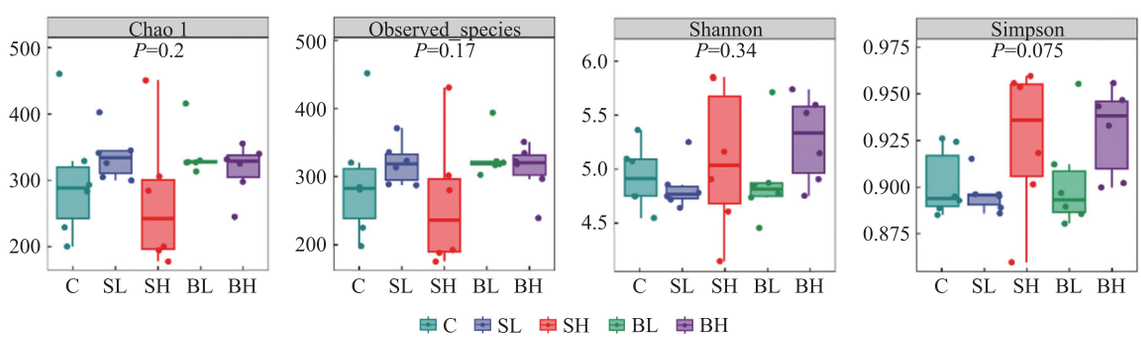


图 3　小管福寿螺肠道微生物的 α 多样性指数

Fig. 3　α diversity index of gut microbiota in *Pomacea canaliculata*

(Micrococcales)、黄单胞菌目(Xanthomonadales)、放线菌目(Corynebacteriales)、红杆菌目(Rhodobacterales)、微球菌科(Microbacteriaceae)、黄单胞菌科(Xanthomonadaceae)、红杆菌科(Rhodobacteraceae)、诺卡氏菌科(Nocardiaceae)、分枝杆菌科(Mycobacteriaceae)、微杆菌属(*Microbacterium*)、热单胞菌属(*Thermomonas*)、分枝杆菌属(*Mycobacterium*)、红细菌属(*Rhodobacter*)、红球菌属(*Rhodococcus*)在 BH 组显著富集. 肠杆菌目(Enterobacterales)、氨基酸球菌目(Acidaminococcales)、肠杆菌科(Enterobacteriaceae)、假单胞菌科(Pseudomonadaceae)、希瓦氏菌科(Shewanellaceae)、鞘脂杆菌科(Sphingobacteriaceae)、劳氏菌属(*Raoultella*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、希瓦氏菌属(*Shewanella*)在 SH 组显著富集. 硝化螺旋菌门(Nitrospirota)、硝化螺旋菌纲(Nitrospiria)、硝化螺旋菌目(Nitrospirales)、红螺菌科(Rhodocyclaceae)、克劳斯氏菌属(*Cloacibacterium*)、*Uliginosibacterium* 属、硝化螺旋菌属(*Nitrospira*)在 SL 组显

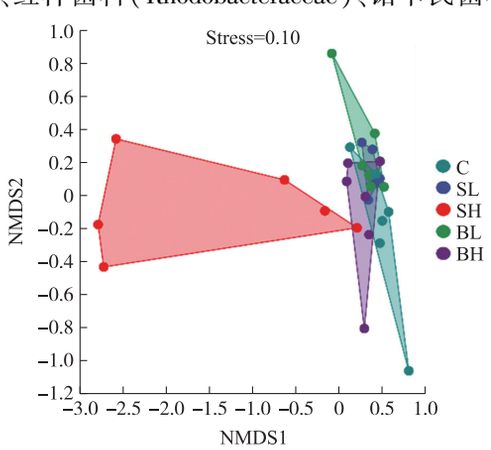


图 4　小管福寿螺肠道菌群 NMDS 分析

Fig. 4　NMDS analysis of gut microbiota in *Pomacea canaliculata*

著富集. 申氏杆菌属(*Shinella*)和 *Micropruina* 属在 C 组显著富集(图 5).

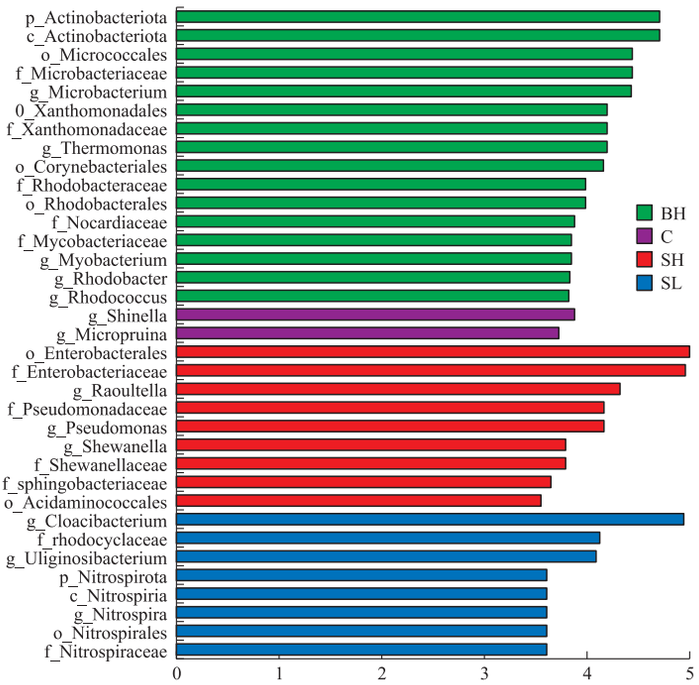


图 5　小管福寿螺肠道菌群 LEfSe 分析

Fig. 5　LEfSe analysis of gut microbiota of *Pomacea canaliculata*

2.4　讨论

生物体在受到外界环境污染物或病原体侵害时,会产生大量活性氧引起细胞和组织坏死凋亡,打破抗氧化酶活性和活性氧物质之间的动态平衡,引起氧化应激,改变抗氧化酶的活性[23]. SOD 负责将体内的超氧化物转化为过氧化氢,再由 CAT 将过氧化氢分解为 CO_2 和 H_2O[24]. 本研究中,小管福寿螺经不同浓度和粒径微塑料暴露 96 h 后,SOD 活性均显著降低,CAT 活性并没有显著差异,说明微塑料暴露引起小管福寿螺氧化应激,但可能由于暴露时间较短,没有表现出微塑料浓度和剂量效应. 在微塑料处理中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)SOD 活性的研究中,28 d 时微塑料高浓度组与对照组的差异比低浓度组更为显著[25],100 nm 微塑料和 10 μm 微塑料处理铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)时,在暴露第 6 d 和第 12 d,均表现出纳米级别的微塑料对 SOD 活性影响更高[26]. GSH 是一类重要的可清除氧自由基的非酶类抗氧化物,微塑料暴露引起氧化应激,产生过多的氧化物质,消耗 GSH 清除氧化物造成 GSH 含量降低,但处理组之间没有显著差异,说明不同微塑料环境的毒性在早期可能并没有显著差异[27].

肠道微生物在宿主能量代谢、营养物质吸收、免疫调节等方面发挥至关重要的作用,其组成与功能受宿主周围环境的影响而做出适应性变化[28]. 研究发现,微塑料对生物肠道菌群的影响大小可能存在性别差异,与雌性相比,微塑料对雄性水生动物肠道微生物群丰富度的负面影响更小[29]. 在本研究中,暴露在不同浓度不同粒径聚苯乙烯微塑料下,雄性小管福寿螺的 α 多样性未发生显著改变. 此外,本实验使用微塑料微球也可能导致这一结果. 有研究表明微塑料形状可能与肠道微生物的改变有相关影响. 例如,斑马鱼摄入微塑料纤维后肠道菌群的多样性和丰富度显著变化,但摄入微塑料微球后并没有显著改变[30].

肠道菌群失调,特别是有害菌的比例增高会对宿主健康产生不利影响[31]. LEfSe 差异分析显示,微塑料处理组中多种有害菌的相对丰度较高. 例如,微杆菌属在宿主免疫力低下时,会引起细菌性肝脓肿以及肺出血等感染症状[32]. 宿主免疫功能低下时分枝杆菌属和红球菌属易引起肺炎或肝炎,严重可导致呼吸衰竭[33-34]. 假单胞杆菌属引起肺炎和败血症[35]. 这些致病菌丰度的增加,表明摄入微塑料后导致小管福寿螺免疫力降低. 微塑料暴露下小管福寿螺肠道菌群在门和属水平上均发生了变化. 经 40 mg/L 的 5 μm 和 0.5 μm 聚苯乙烯微塑料暴露后,小管福寿螺拟杆菌门的相对丰度均下降. 拟杆菌门与生物体的能量代谢、糖代谢和脂质代谢密切相关,拟杆菌的丰度也与体重直接相关[36]. 拟杆菌门同时参与胆汁酸和类固醇代谢等调节肠道健康[37]. 经 40 mg/L,0.5 μm 聚苯乙烯微塑料暴露后,还存在变形菌门相对丰度显著上

升,放线菌门相对丰度下降的现象. 变形菌门包含大肠杆菌、幽门螺杆菌、沙门氏菌、弧菌等许多致病菌,被证实是多种动物肠道失调的潜在标志,尤其在发生肠道炎症和高血糖时,变形菌门往往是优势菌门[29]. 放线菌门可以降解蛋白质和淀粉等化合物,产生多种抗生素、维生素酶,并抑制致病菌的活性[38].

经 40 mg/L 的 5 μm 和 0.5 μm 聚苯乙烯微塑料暴露后,乳球菌属的丰度显著降低. 研究发现,聚苯乙烯微塑料处理下,鲤鱼(*Cyprinus carpio*)肠道菌群乳球菌属中的 *Lactococcus garvieae* 丰度降低,该菌在增加体重、提高抗氧化能力上具有重要作用[39]. 乳球菌属中的乳酸乳球菌亚种可以定植在肠道内,通过产生乳酸抑制有害菌的生长来维持肠道微生态平衡[40]. 经 40 mg/L 的 5 μm 聚苯乙烯微塑料暴露后,不动杆菌属丰度显著提高. 研究表明,不动杆菌属对肠道内的微塑料也具有吸附降解作用. 例如,蛤蜊(*Perineresis vancaurica*)排泄的聚苯乙烯碎片可被不动杆菌消化和降解[41]. 不动杆菌对聚乙烯等塑料均具有降解作用[42]. 推测较高浓度或粒径的环境微塑料浓度促进了不动杆菌属的繁殖.

3 结论

本研究探究了环境相关浓度聚苯乙烯微塑料对小管福寿螺抗氧化酶活性以及肠道微生物的影响. 结果表明,不同浓度和粒径微塑料短期暴露处理对小管福寿螺造成氧化损伤,降低了 SOD 活性和 GSH 的含量,但对 CAT 活性没有产生显著影响,需进行长期实验进一步评估微塑料的生物毒性. 微塑料对小管福寿螺肠道菌群的多样性和均匀度没有发生显著变化,但改变了肠道菌群的结构,并出现假单胞杆菌等多种致病菌的富集.

[参考文献]

[1] ANTHONY L. The plastic in microplastics:A review[J]. Marine pollution bulletin,2017,119(1):12-22.

[2] 陈旭楷,赵绮婷,王燕芳,等. 微塑料对水体污染物的吸附行为研究进展[J]. 科技创新导报,2020,17(1):133-135.

[3] WAGNER M,SCHERER C,ALVARZE-MUNOZ D,et al. Microplastics in freshwater ecosystems:what we know and what we need to know[J]. Environmental sciences Europe,2014,26(1):12.

[4] ZHAO S Y,WANG T,ZHU L X,et al. Analysis of suspended microplastics in the Changjiang Estuary:Implications for riverine plastic load to the ocean[J]. Water research,2021,195:116987.

[5] MAI L,YOU S N,HE H,et al. Riverine microplastic pollution in the pearl river delta,China:Are modeled estimates accurate?[J]. Environmental science & technology,2019,53(20):11810-11817.

[6] KANE I A,CLARE M A,MIRAMONTES E,et al. Seafloor microplastic hotspots controlled by deep-sea circulation[J]. Science,2020,368(6495):1140-1145.

[7] XING Y F,ZHU X Y,DUAN Y F,et al. Toxic effects of nitrite and microplastics stress on histology,oxidative stress,and metabolic function in the gills of Pacific white shrimp,*Litopenaeus vannamei*[J]. Marine pollution bulletin,2023,187:114531.

[8] HONDA K,LITTMAN D R. The microbiota in adaptive immune homeostasis and disease[J]. Nature,2016,535(7610):75-84.

[9] HOU K J,WU Z X,CHEN X Y,et al. Microbiota in health and diseases[J]. Signal transduction and targeted therapy,2022,7(1):135.

[10] QIAO R X,SHENG C,LU Y F,et al. Microplastics induce intestinal inflammation,oxidative stress,and disorders of metabolome and microbiome in zebrafish[J]. Science of the total environment,2019,662:246-253.

[11] JABEEN K,LI B,CHEN Q,et al. Effects of virgin microplastics on goldfish(*Carassius auratus*)[J]. Chemosphere,2018,213:323-332.

[12] 闫振华,张燕,包旭辉,等. 不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应[J]. 环境科学,2024,45(3):1859-1868.

[13] COLE M,LINDEQUE P,FILEMAN E,et al. Microplastic ingestion by zooplankton[J]. Environmental science & technology,2013,47(12):6646-6655.

[14] CHEN Q Q,LACKMANN C,WANG W Y,et al. Microplastics lead to hyperactive swimming behavior in adult zebrafish[J]. Aquatic toxicology,2020,224:105521.

[15] DEY T K,UDDIN M E,JAMAL M. Detection and removal of microplastics in wastewater:evolution and impact[J]. Environmental science and pollution research,2021,28(14):16925-16947.

[16] WANG C L,HOU M M,SHANG K Y,et al. Microplastics(Polystyrene)exposure induces metabolic changes in the liver of rare minnow(*Gobiocypris rarus*)[J]. Molecules,2022,27(3):584.

[17] YANG Q Q,LIU S W,HE C,et al. Distribution and the origin of invasive apple snails,*Pomacea canaliculata* and *P. maculata* (Gastropoda:Ampullariidae) in China[J]. Scientific reports,2018,8(1):1185.
[18] 楼晓明,江水恒,刘锦,等. 西湖流域福寿螺产卵偏好调查及插竿诱集产卵试验[J]. 湖北植保,2021,6:38-42.
[19] 邓晓玲,刘德清,郭学飞,等. 洱海流域湖泊湖滨带福寿螺时空分布[J]. 生态毒理学报,2018,13(4):134-142.
[20] 罗渡,牟希东,宋红梅,等. 不同生境福寿螺(*Pomacea canaliculata*)的营养成分及其利用价值[J]. 生态学杂志,2012,31(8):2004-2010.
[21] LI C R,BUSQUETS R,CAMPOS L C. Assessment of microplastics in freshwater systems:A review[J]. Science of the total environment,2020,707:135578.
[22] WANG X,SUN G,FENG T,et al. Sodium oligomannate therapeutically remodels gut microbiota and suppresses gut bacterial amino acids-shaped neuroinflammation to inhibit Alzheimer's disease progression[J]. Cell research,2019,29(10):787-803.
[23] 王志刚,胡影,崔竞文. 邻苯二甲酸二甲酯对典型细菌生长和氧化应激酶系的影响[J]. 生态毒理学报,2015,10(3):297-303.
[24] VERLWCAR X N,JENA K B,CHAINY G N. Biochemical markers of oxidative stress in *Perna viridis* exposed to mercury and temperature[J]. Chemico-biological interactions,2007,167(3):219-226.
[25] 阚可聪,孟爽,张鸣,等. 微塑料对中华绒螯蟹抗氧化酶系统的影响[J]. 生态与农村环境学报,2022,38(2):244-250.
[26] 张明,金熠杰,张驰,等. 微塑料暴露对铜锈环棱螺抗氧化酶活性及肠道微生物组成的影响[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版),2024,23(6):565-571.
[27] SOLOMANDO A, CAPÓ X, ALOMAR et al. Long-term exposure to microplastics induces oxidative stress and a pro-inflammatory response in the gut of *Sparus aurata* Linnaeus,1758[J]. Environmental pollution,2020,266(1):115295.
[28] YING M X, YU Q, ZHENG B, et al. Cultured *Cordyceps sinensis* polysaccharides attenuate cyclophosphamide-induced intestinal barrier injury in mice[J]. Journal of functional foods,2019,62:103523.
[29] SHI Z J,YAO F C,LIU Z Q,et al. Microplastics predominantly affect gut microbiota by altering community structure rather than richness and diversity:A meta-analysis of aquatic animals[J]. Environmental pollution,2024,360:124369.
[30] QIAO R X,DENG Y F,ZHANG S H,et al. Accumulation of different shapes of microplastics initiates intestinal injury and gut microbiota dysbiosis in the gut of zebrafish[J]. Chemosphere,2019,236:124334.
[31] JAMI E,ISRAEL A,KOTSER A,et al. Exploring the bovine bacterial community from birth to adulthood[J]. The ISME journal,2013,7(6):1069-1079.
[32] IOANNOU A,XENOPHONTOS E, KARATSI A,et al. Insidious manifestation of pyogenic liver abscess caused by *Streptococcus intermedius* and *Micrococcus luteus*:a case report[J]. Oxford medical case reports,2016,2016(1):1-3.
[33] GONZALEZ-SANTIAGO T M,DRAGEL A. Nontuberculous Mycobacteria:skin and soft tissue infections[J]. Dermatologic clinics,2015,33(3):563-577.
[34] RAMANAN P,DEZIEL P J,RAZONABLE R R. *Rhodococcus globerulus* bacteremia in an allogeneic hematopoietic stem cell transplant recipient:report of the first transplant case and review of the literature[J]. Transplant infectious disease,2014,16(3):484-489.
[35] RAMIREZ-ESTRADA S, BORGATTA B, RELLO J. *Pseudomonas aeruginosa* ventilator-associated pneumonia management [J]. Infection and drug resistance,2016,9:7-18.
[36] PASTER B J,DEWHIST F E,OLSEN I,et al. Phylogeny of *Bacteroides*, *Prevotella*, and *Porphyromonas* spp. and related bacteria[J]. Journal of bacteriology,1994,176(3):725-732.
[37] LARSEN N,VOGENSEN F K,van den BERG F W,et al. Gut microbiota inhuman adults with type 2 diabetes differs from non-diabetic adults[J]. PLoS one,2010,5:e9085.
[38] KESARCODI-WATSON A, KASPAR H, LATEGAN M J, et al. Probiotics in aquaculture: The need, principles and mechanisms of action and screening processes[J]. Aquaculture,2008,274(1):1-14.
[39] WANG F H, ZHANG Q R, CUI J, et al. Polystyrene microplasitcs induce endoplasmic reticulum stress, apoptosis and inflammation by disrupting the gut microbiota in carp intestines[J]. Environmental pollution,2023,323:121233.
[40] ROY K, ANBA J, CORTHIER G, et al. Metabolic adaptation of *Lactococcus lactis* in the digestive tract: The example of response to lactose[J]. Journal of molecular microbiology and biotechnology,2008,14(1/3):137-144.
[41] ZHAO S F,LIU R J,LV S W,et al. Polystyrene-degrading bacteria in the gut microbiome of marine benthic polychaetes support enhanced digestion of plastic fragments[J]. Communications earth & environment,2024,5:162.
[42] TANG K H D,HADIBARATA T. The application of bioremediation in wastewater treatment plants for microplastics removal:a practical perspective[J]. Bioprocess and biosystems engineering,2022,45(11):1865-1878.

[责任编辑:黄　敏]