

聚苯乙烯微塑料和纳米氧化锌对锦鲤的复合生物效应

周海玲, 王 静, 艾弗逊, 王晓琳, 尹 颖*

(污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京, 210023)

摘 要: 纳米金属氧化物和微塑料均为典型的颗粒态污染物, 对水生生态系统存在安全风险, 但目前鲜有研究两者对水生生物的复合效应. 为探究聚苯乙烯微塑料(Polystyrene Microplastic, PS MPs)与纳米氧化锌(ZnO Nanoparticles, ZnO NPs)复合作用下的生物响应, 以锦鲤(*Carassius auratus*)为受试生物, 将其暴露在 ZnO NPs ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), PS MPs ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), ZnO NPs+PS MPs ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}+1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}+10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 中 14 d. 测定了两种颗粒物的水合粒径、Zeta 电位、水体 Zn^{2+} 含量、Zn 在锦鲤各组织中的富集量和肝脏氧化损伤指标. 结果显示, 与 PS MPs 复合后, ZnO NPs 在水体中的团聚性和稳定性增加, 与高浓度 PS MPs 复合后水中 Zn^{2+} 含量降低; 锦鲤各组织中 Zn 的富集量大小为: 肠>眼>鳃>肌肉>性腺>脑, 与 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PS MPs 复合降低了脑部对 Zn 的富集, 与 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PS MPs 复合提高了眼部 Zn 含量; 肝脏中超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase)活性和活性氧(Reactive Oxygen Species)水平无明显变化, 而低浓度复合组($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ZnO NPs + $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PS MPs)丙二醛(Malonaldehyde)含量显著高于其他组, 两种颗粒态污染物复合表现为毒性增强作用. 综合以上指标, PS MPs 可通过改变 ZnO NPs 的水体聚集性、稳定性与离子释放, 从而改变其在锦鲤体内的富集特性, 增强对肝脏的氧化损伤.

关键词: 聚苯乙烯微塑料, 纳米氧化锌, 锦鲤, Zn 富集, 氧化损伤

中图分类号: X53

文献标志码: A

Compound biological effects of polystyrene microplastics and ZnO nanoparticles on *Carassius auratus*

Zhou Hailing, Wang Jing, Ai Fuxun, Wang Xiaolin, Yin Ying*

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse,
School of Environment, Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

Abstract: Polystyrene microplastics (PS MPs) and ZnO nanoparticles (ZnO NPs) both are typical particulate pollutants, posing safety risks to aquatic ecosystems, but now there is little research focusing on their compound effect on aquatic organisms. To investigate biological response under co-exposure of PS MPs of different concentrations and ZnO NPs, we selected *Carassius auratus* as subject organism, which were exposed to ZnO NPs ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), PS MPs ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), ZnO NPs + PS MPs ($1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}+1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}+10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) for 14 days. The size of two particles, Zeta potential, Zn^{2+} concentration, Zn contents in tissues and oxidative indicators were determined. Results showed that the agglomeration and stability of ZnO NPs in culture water increased after co-exposed with PS MPs, which also inhibited the release of Zn^{2+} in ZnO+PS10 group. Zn contents in tissues were ordered as follows: intestine>eyes>gills> muscle>brain>gonads, and Zn content in brain of ZnO+PS1 group reduced, but that of $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PS MPs co-exposure group increased in eyes. Compared with others groups, malondialdehyde (MDA) content of ZnO+PS1 treatment in liver was significantly higher, which suggested the co-exposure of two particulate pollutants showed toxicity enhancement. In summary, PS MPs

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1800806)

收稿日期: 2023-05-12

* 通讯联系人, E-mail: yinying@nju.edu.cn

change the aggregation, stability and Zn^{2+} release of ZnO NPs in water, thereby changing its enrichment characteristics in organs of *Carassius auratus* and enhancing the oxidative damage in liver.

Key words: polystyrene microplastic, ZnO nanoparticles, *Carassius auratus*, Zn accumulation, oxidative damage

颗粒态污染物由于独特的性质被广泛应用于生产生活,但在生产运输及使用中难以避免进入环境并产生生态效应,在环境中常常通过吸附、络合等途径与其他污染物相互作用,最终毒性表现出协同或拮抗作用。例如微塑料(MPs)可通过吸附作用减少纳米铜及 Cu^{2+} 的毒害作用,降低对中华骨条藻(*Skeletonema costatum*)的毒性^[1],但同时也可与纳米金表现出协同作用,增强对大型蚤(*Daphnia magna*)的生殖毒性并诱导子代死亡^[2]。

纳米氧化锌(ZnO NPs)作为一种常见的颗粒态污染物,凭借其优良性质被广泛应用,同时对生态系统及其中的生物产生作用^[3]。研究表明,ZnO NPs 可对生物造成氧化损伤^[4],还具有胚胎毒性和神经毒性^[5]等。Kaya et al^[6]报道了 ZnO NPs 对尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的不同器官都造成了一定程度的氧化损伤,且粒径为 10~30 nm 的 ZnO NPs 毒性强于粒径为 100 nm 的 ZnO NPs。刘倩等^[7]研究 ZnO NPs 对 *D. magna* 的效应时发现 ZnO NPs 可以黏附在 *D. magna* 肠道和体表,从而对其产生个体及行为毒性。

MPs 因其粒径小,比表面积大,所以具有较强的吸附能力,可以吸附环境中的重金属^[8]及各种污染物^[9],并作为载体改变它们在生物体内的积累情况和生物毒性,最终产生的毒性表现为协同、相加和拮抗作用^[10-11]。MPs 可改变贻贝(*Perna viridis*)对全氟辛酸磺酸类物质的氧化应激响应,使内脏中 MDA 含量升高^[12]。粒径为 50 nm 的聚苯乙烯 MPs (Polystyrene Microplastic, PS MPs)和菲共暴露对 *D. magna* 的毒性具有相加效应^[11],在 14 d 的培养过程中 PS MPs 显著增加了生物体内的菲累积。目前对于 MPs 与其他污染物的复合效应,研究对象多为有机污染物和重金属,而与纳米金属氧化物的复合影响研究较少,两种典型的颗粒态污染物是否会在水生生态系统中不稳定或易沉降,从而改变污染物的生态效应,现阶段鲜见报道。

本实验通过不同浓度 PS MPs 与 ZnO NPs 的共暴露实验,研究两者在水环境中的赋存状态及其对锦鲤的生物效应,为 MPs 和纳米金属氧化物对水生态环境的影响及机制研究提供更多的理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料与试剂 ZnO NPs(上海麦克林生化科技有限公司,中国)粒径为 (30 ± 10) nm,纯度 99.9%。苯乙烯(上海凌峰化学试剂有限公司,中国)使用前先经减压蒸馏纯化处理去除所含阻燃剂。锦鲤(*Carassius auratus*)购于南京市夫子庙花鸟市场。

PS MPs 的制备:采用分散聚合的方式制备实验所用 PS MPs^[13],向 140 mL 纯水中充入 N_2 10 min 后,保持 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 滴加苯乙烯,在室温下搅拌分散 10 min。再加入 10 mL 已通 N_2 5 min 的过硫酸钾溶液($23 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$),调节 N_2 流速至平衡系统匀速冒泡。之后使用油浴锅(98-3 型,予华仪器有限公司,中国)在 78°C 条件下加热 1~2 h,继续反应 24 h。反应过程中持续通入 N_2 防止产物发生氧化,连续合成 24 h 后取出产物洗涤纯化。

1.2 实验设计 随机选取生长状态一致的健康锦鲤分别暴露于设置的浓度条件下(表 1),每组八条鱼,每缸中共 30 L 暴露液。经 10 d 适应阶段及驯养阶段,前 3 d 为适应阶段,不喂食不换水,后续 7 d 为驯养阶段,间隔一天换水喂食,之后开始暴露实验。本研究采取静态暴露,按照对应浓度分别称取 PS MPs 和 ZnO NPs 粉末加入到 100 mL 超纯水中,超声分散 10 min 后转移到鱼缸中。暴露实验持续两周,其间采用半换水法。

1.3 样品采集 暴露结束后捞出锦鲤,用超纯水冲洗干净皮肤,称重后迅速解剖,剪下左侧鱼肉,取出肝脏称重后制成肝脏匀浆,经低速离心后取上清液用于测定。之后依次取出性腺、肠道、鳃、眼、脑并称量,置于 -20°C 冰箱中冷冻保存备用。

表1 各处理组污染物浓度

Table 1 The materials and contents of each group

组别	ZnO NPs ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	PS MPs ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
CK	0	0
ZnO	1	0
PS 1	0	1
PS 10	0	10
ZnO+PS1	1	1
ZnO+PS10	1	10

1.4 分析方法 PS MPs与ZnO NPs的形貌表征:分别取少量两种固体粉末在透射电子显微镜(TEM, JEM-2100, JEOL Ltd., 日本)下采集图像,使用Nano Measure 1.2软件统计两种颗粒污染物粒径。

水体粒径及Zeta电位的测量:准确称量适量PS MPs与ZnO NPs粉末,加入100 mL超纯水中,超声分散10 min后,再稀释至所需浓度(表1),并使用纳米粒度及Zeta电位分析仪(Zetasizer Nano ZS, 英国马尔文公司,英国)测定两种污染物水合粒径及体系Zeta电位^[14]。

水中 Zn^{2+} 释放量的测定:取水样加入硝酸酸化,在4℃条件下3500 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心10 min,取上清液过0.22 μm 有机微孔滤膜,利用ICP-MS(NexION 300X, Perkinelmer, USA)测定水体中溶解锌的浓度^[15]。

组织中Zn富集量的检测:组织对Zn的富集量按照刘林^[16]的方法进行测定。样品经解冻、干燥、称重后,加入5 mL浓硝酸预消解12 h,控制温度为90℃消解1 h,在120℃条件下继续消解至溶液剩余1 mL。加入5 mL浓硝酸和1 mL高氯酸,消解至无白烟,再加入10 mL硝酸(2%),转移至25 mL容量瓶中,用硝酸(2%)定容。混匀后过0.22 μm 有机微孔滤膜,取5 mL消解液用ICP-MS测定Zn含量(dw, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

肝脏组织氧化损伤指标的测定:蛋白的测定采用考马斯亮蓝法,以小牛血清蛋白为标准,加入考马斯亮蓝显色剂混匀,反应2 min后使用紫外-分光光度计在595 nm处测定吸光度,计算蛋白含量。超氧化物酶活性(SOD)、丙二醛含量(MDA)及活性氧水平(ROS)分析试剂盒均购自南京建

成生物工程研究所,将制备的匀浆液按照试剂盒说明书操作步骤进行测定。

1.5 数据处理 实验结果用平均值 \pm 标准差(mean \pm SD)表示,使用SPSS 21.0软件进行数据统计分析,并采用单变量方差分析和协方差分析(One Way ANOVA)确定处理组间差异的统计学意义,以 $p<0.05$ 来表示显著性差异。

2 结果

2.1 TEM表征 图1为透射电镜(Transmission Electron microscope, TEM)下PS MPs与ZnO NPs的形貌图,可以看出,PS MPs呈规则球状,外表光滑,粒径约为430 nm;ZnO NPs多为不规则的块状和颗粒状,粒径分布为 23.17 ± 14.72 nm ($n=400$),颗粒大小差异较大,有明显团聚。

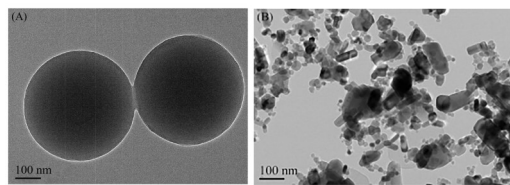
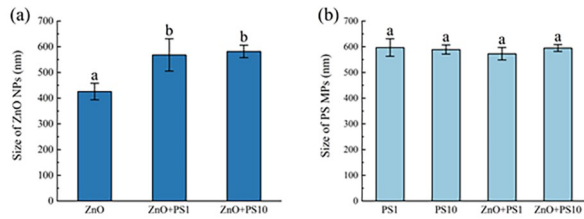


图1 PS MPs (A)与ZnO NPs (B)的TEM图像

Fig. 1 TEM images of PS MPs (A) and ZnO NPs (B)

2.2 水合粒径 颗粒态污染物在水体中通常表现出较强的团聚性,影响其生物可利用性。实验中ZnO NPs的水合粒径为(425.8 ± 32.08) nm,在水中发生明显聚集,在与PS MPs复合后,粒径分别增大至(568.0 ± 62.99) nm和(581.8 ± 24.42) nm ($p<0.05$),PS MPs的浓度对ZnO NPs的水合粒径无影响。PS MPs在水中同样也发生聚集,但浓度与复合对其粒径无显著影响。加入ZnO NPs后,1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的PS MPs粒径分别为(572.7 ± 24.39) nm与(594.8 ± 13.28) nm,组间不存在显著差异。如图2所示。

2.3 Zeta电位 Zeta电位可反映胶体分散体系的稳定性,影响颗粒物的聚集与离子释放。一般认为Zeta电位在-30~30 mV时物质处于不稳定的状态,小于-30 mV或者大于30 mV时,体系具有良好的稳定性和分散性^[17]。单一ZnO NPs的Zeta电位约为-14 mV,而单一PS MPs的Zeta电位接近-30 mV(图3),PS MPs在水中介稳性高



$n=8$, 不同字母表示显著差异, $p<0.05$, 下同

图 2 PS MPs 与 ZnO NPs 水体粒径

Fig. 2 Particle size of PS MPs and ZnO NPs in water

于 ZnO NPs. 与 ZnO NPs 相比, ZnO NPs 与 PS MPs 复合后 Zeta 电位绝对值显著增大 ($p<0.05$), 在水中稳定性增强. $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PS MPs 复合组的 Zeta 电位绝对值低于 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PS MPs 复合组, 表明浓度会影响复合体系的稳定性.

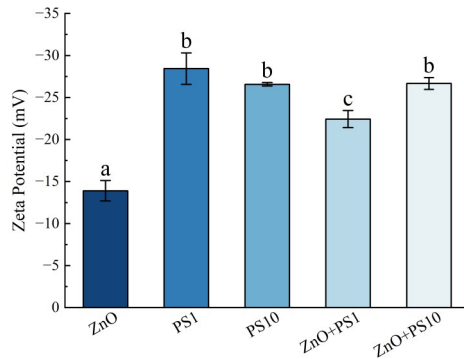


图 3 不同组别水体的 Zeta 电位

Fig. 3 Zeta potential of different groups

2.4 水体中 Zn^{2+} 的含量 金属离子的释放是纳米金属颗粒造成水生生物毒性的主要原因^[18]. 实验中未添加 ZnO NPs 的三组水体中锌含量极低, 单一 ZnO NPs 组、 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PS MPs 复合组以及 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PS MPs 复合组的 Zn^{2+} 溶出率分别为 64.6%, 62.9%, 58.5% (图 4), $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PS MPs 复合组水体中 Zn^{2+} 含量显著低于前两组 (p

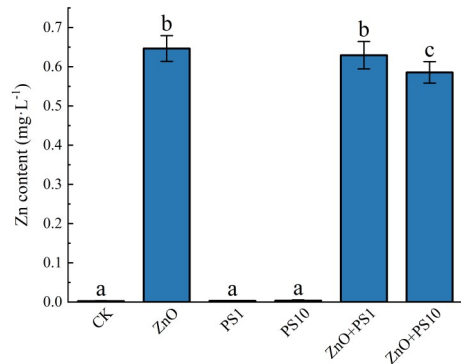


图 4 养殖水体中 Zn^{2+} 的释放量

Fig. 4 Release of Zn^{2+} in aquaculture water of different groups

<0.05), 表明 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PS MPs 复合可减少 ZnO NPs 中 Zn^{2+} 的释放, 从而可能降低其带来的毒性效应.

2.5 Zn 在锦鲤各组织中的分布 金属氧化物颗粒及其溶解释放出的金属离子可通过多种途径蓄积在靶器官中, 并对生物产生毒性. Zn 在锦鲤各器官中含量排序为: 肠 > 眼 > 鳃 > 肉 > 性腺 > 脑 (表 2). 相较于 ZnO NPs 单一胁迫, 复合胁迫对肠道、鱼肉、鳃和性腺中 Zn 含量并无显著作用; 在眼部, PS MPs 的添加与浓度均可影响 Zn 的富集, ZnO NPs 单一胁迫下 Zn 含量为 $(426.1 \pm 95.4) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ PS MPs 复合后 Zn 含量显著增大 ($(555.8 \pm 154.2) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 高浓度 PS MPs ($10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 可促进眼中 Zn 的富集; 与眼部不同的是, 在富集量最低的脑中, 低浓度 PS MPs ($1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 复合后可抑制脑中 Zn 的转运与富集 ($p<0.05$), 而高浓度则无显著影响.

2.6 肝脏组织的氧化损伤指标 污染物对生物的毒性通常包括氧化损伤作用, 具体表现为相关

表 2 锦鲤各器官 Zn 的富集量 (单位: $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Tab.2 Zn accumulation in different organs of *Carassius auratus* (unit: $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

器官	CK	ZnO	ZnO+PS1	ZnO+PS10
肠	1046±491.0	1804±975.0	1856±840.0	1312±578.4
眼	376.3±92.07	426.1±95.42	550.0±132.9	555.8±154.2
鳃	331.5±116.6	312.3±64.70	350.0±87.50	348.6±118.4
鱼肉	56.58±16.38	71.57±14.14	97.45±42.33	73.86±15.01
性腺	116.6±104.6	52.61±11.76	61.68±29.75	59.59±26.91
脑	20.27±9.330	48.71±4.889	35.73±6.679	44.81±8.872

生物标志物含量产生变化. 由图5可知, 相较空白组, 各组SOD活性和ROS均未产生显著差异; ZnO NPs和PS MPs单一胁迫均未影响肝脏细胞MDA含量, 但 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PS MPs复合后MDA含量显著升高($p < 0.05$), 而 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PS MPs复合并无显著作用, 说明两种污染物复合暴露可造成锦鲤膜脂过氧化损伤, PS MPs浓度的差异会影响该作用.

3 讨论

ZnO NPs粒径为 $(30 \pm 10) \text{ nm}$, 水溶液中粒径可增大至 439.8 nm , 在水体中具有很强的团聚性, 之前也有报道^[19]. 而当其与PS MPs复合后, 粒径进一步增大, 这可能与PS MPs较强的吸附性有关. 由于PS MPs具有较强吸附颗粒态金属污染物的特性^[8], 它与ZnO NPs复合后可在表面吸附更多的ZnO NPs, 使得ZnO NPs水合粒径由于被吸附聚集而增大. Tong et al^[20]在 $0.1 \mu\text{m}$ PS MPs对ZnO NPs在水中溶解释放的影响研究中也出现类似的现象, PS MPs与ZnO NPs在光照条件下发生明显团聚现象, 表现为更容易发生聚集沉淀. Li et al^[21]的研究也报道PS MPs可作为纳米银的载体, 吸附水体中的纳米银颗粒.

纳米金属氧化物的离子释放被认为是致毒的重要原因^[22], 而MPs的作用可影响 Zn^{2+} 的溶解与释放. 相较于ZnO NPs单一胁迫和 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PS MPs复合组, 与 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PS MPs复合后养殖水中 Zn^{2+} 的含量显著下降. 研究报道MPs可通过物理吸附等作用吸附金属离子, 从而降低它们在溶液中的丰度^[23]. 同时随着与PS MPs的复合与浓度增大, 体系的稳定性增强, 可能减少ZnO NPs的溶解与释放.

Zn作为体内的微量元素, 生物各组织Zn富集量维持在一定水平. 在本研究中ZnO NPs和PS MPs的单一与复合暴露并未造成肠道、鳃和鱼肉中Zn含量显著增加, 只有脑部例外. 对于鱼类来说, 口腔摄入是颗粒态污染物进入体内重要方式之一^[24], 肠道则是纳米颗粒在水生动物体内富集的主要器官^[25]. 而PS MPs的复合与浓度对肠道中Zn的富集无明显影响, 这或许与ZnO NPs强烈的聚集性相关. ZnO NPs在水中发生明显聚集, 而与微塑料复合后粒径进一步增大, 从而影响肠道的吸收和富集.

在脑部, 相较于单一胁迫组, ZnO NPs与 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PS MPs复合后Zn含量下降, 而与 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PS MPs复合则无差异, 较低浓度的PS MPs可减少Zn在脑中的富集. 由于血脑屏障的存在, 较大的颗粒态纳米金属氧化物无法进入脑中, 离子态是金属进入脑中的主要形式^[26]. $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PS MPs复合组体系Zeta电位绝对值更小, ZnO NPs稳定性差, Zn^{2+} 溶出率更高, 从而提高脑中Zn的含量. 但也有研究发现浓度为 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的ZnO NPs与PS MPs复合后对脑中Zn的富集并无显著影响^[27], 可能是由于颗粒物粒径与浓度的差异使得复合后并未能改变水体 Zn^{2+} 含量与脑对Zn的吸收富集.

SOD可通过清除生物体内超氧阴离子而保护机体免受氧化损伤^[28], 是生物体内抗氧化系统重要酶系之一. 实验中锦鲤暴露于污染物两周后, 各组肝脏中SOD含量十分接近, 污染物的浓度和复合对肝脏SOD活性无明显影响. 同样在Meng et al^[29]的研究中, $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ZnO NPs胁迫下, PS MPs的粒径大小与污染物的复合对SOD活性也未产生显著影响. 本实验ZnO NPs浓度为

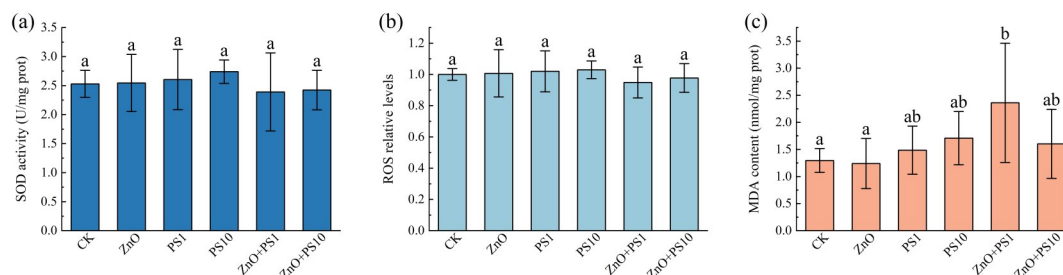


图5 肝脏组织中的氧化应激: (a) SOD; (b) ROS; (c) MDA

Fig. 5 Oxidative stress indicators in liver: (a) SOD, (b) ROS, (c) MDA

1 mg·L⁻¹,可能未达到产生显著影响的阈值^[30].

MDA 是膜脂过氧化损伤的产物,机体遭受氧化胁迫时往往会大量累积. 本研究中除了 ZnO NPs 与 1 mg·L⁻¹ PS MPs 复合后肝脏细胞氧化损伤加剧,其余各组均无显著效应,表明较低浓度的 PS MPs 与 ZnO NPs 复合暴露可造成氧化损伤. 另外与通常认知不同的是,低浓度复合组 MDA 含量增大,却未观察到生物体内的强氧化剂 ROS 含量发生明显变化,推测这可能是锦鲤体内的抗氧化酶作用以消除 ROS 产生的氧化损伤,使得产生的 ROS 很快被生物体清除.

4 结论

ZnO NPs 在水体中与 PS MPs 复合后,两者的相互作用可增强 ZnO NPs 团聚性,使团聚体粒径增大,体系稳定性提高,且高浓度(10 mg·L⁻¹) PS MPs 复合可能通过吸附作用降低了水体中游离 Zn²⁺ 的含量. 在复合实验中,PS MPs 的浓度对不同组织的 Zn 富集表现出不同的效应,高浓度复合促进了 Zn 在眼部的富集,而低浓度复合减少了脑部 Zn 的富集,PS MPs 可通过影响 ZnO NPs 在体系中的稳定性及 Zn²⁺ 溶出改变组织对 Zn 的富集;两者在低浓度下的复合增加了对肝脏的膜脂过氧化损伤,提高了生物毒性.

参考文献

- [1] Zhu X, Zhao W, Chen X, et al. Growth inhibition of the microalgae *Skeletonema costatum* under copper nanoparticles with microplastic exposure. *Marine Environmental Research*, 2020(158): 105005.
- [2] Pacheco A, Martins A, Guilhermino L. Toxicological interactions induced by chronic exposure to gold nanoparticles and microplastics mixtures in *Daphnia magna*. *Science of The Total Environment*, 2018 (628–629): 474–483.
- [3] 朱跃骅,张剑,钱云霞. 纳米氧化锌对美国红鱼肝细胞的毒性效应及机制. *生态毒理学报*, 2020, 15(4): 224–232. (Zhu Y H, Zhang J, Qian Y X. Toxic effect and mechanism of nano-ZnO in hepatocytes of *Sciaenops ocellatus*. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, 15(4): 224–232.)
- [4] 田文静,白伟,赵春禄,等. 纳米 ZnO 对斑马鱼胚胎抗氧化酶系统的影响. *中国环境科学*, 2010, 30(5): 705–709. (Tian W J, Bai W, Zhao C L, et al. Effects of ZnO nanoparticles on antioxidant enzyme system of zebrafish embryos. *China Environmental Science*, 2010, 30(5): 705–709.)
- [5] 牛照地,杨惠芳. 金属及金属氧化物纳米颗粒致海马神经元毒性的研究进展. *环境与健康杂志*, 2012, 29(7): 669–671. (Niu Z D, Yang H F. Research advance on toxicity of metal and nanoparticles of metal oxide to Hippocampal Neurons. *Journal of Environment and Health*, 2012, 29(7): 669–671.)
- [6] Kaya H, Aydın F, Gürkan M, et al. Effects of zinc oxide nanoparticles on bioaccumulation and oxidative stress in different organs of tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2015, 40(3): 936–947.
- [7] 刘倩,杜青平,刘涛,等. 纳米氧化锌致大型溞的毒性效应特征. *环境科学学报*, 2019, 39(4): 1332–1339. (Liu Q, Du Q P, Liu T, et al. Study on the toxicity effects of nanometer zinc oxide on *Daphnia magna*. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(4): 1332–1339.)
- [8] Zhang W, Song K, Ding R, et al. Role of polystyrene microplastics in sunlight-mediated transformation of silver in aquatic environments: Mechanisms, kinetics and toxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 2021 (419): 126429.
- [9] Wu P, Cai Z, Jin H, et al. Adsorption mechanisms of five bisphenol analogues on PVC microplastics. *Science of The Total Environment*, 2019(650): 671–678.
- [10] Chen Q, Yin D, Jia Y, et al. Enhanced uptake of BPA in the presence of nanoplastics can lead to neurotoxic effects in adult zebrafish. *Science of the Total Environment*, 2017(609): 1312–1321.
- [11] Ma Y, Huang A, Cao S, et al. Effects of nanoplastics and microplastics on toxicity, bioaccumulation, and environmental fate of phenanthrene in fresh water. *Environmental Pollution*, 2016(219): 166–173.
- [12] 徐澎,Junaid M,刘燕,等. 微塑料和全氟辛酸磺酸类物质共暴露对翡翠贻贝滤食率和抗氧化系统的影响. *北京大学学报(自然科学版)*, 2021, 57(5): 894–902. (Xu P, Junaid M, Liu Y, et al. Effects of microplastics and PFOS co-exposure on the filtration rate and antioxidant system of *Perna viridis*. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*,

- 2021,57(5):894—902.)
- [13] Jiang W, Chen X, Niu Y, et al. Spherical polystyrene-supported nano- Fe_3O_4 of high capacity and low-field separation for arsenate removal from water. *Journal of Hazardous Materials*, 2012(243):319—325.
- [14] Fatehah M O, Aziz H A, Stoll S. Stability of ZnO nanoparticles in solution. influence of pH, dissolution, aggregation and disaggregation effects. *Journal of Colloid Science and Biotechnology*, 2014, 3(1): 75—84.
- [15] Souza I C, Duarte I D, Pimentel N Q, et al. Matching metal pollution with bioavailability, bioaccumulation and biomarkers response in fish (*Centropomus parallelus*) resident in neotropical estuaries. *Environmental Pollution*, 2013(180):136—144.
- [16] 刘林. 纳米氧化锌的环境行为及水生生物毒性研究. 硕士学位论文. 南京:南京大学, 2014. (Liu L. Behavior and toxicity of zinc oxide nanoparticles in aquatic environment. Master Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 2014.)
- [17] Angel B M, Vallotton P, Apte S C. On the mechanism of nanoparticulate CeO_2 toxicity to freshwater algae. *Aquatic Toxicology*, 2015(168): 90—97.
- [18] Chen X, O'Halloran J, Jansen M A K. The toxicity of zinc oxide nanoparticles to *Lemna minor* (L.) is predominantly caused by dissolved Zn. *Aquatic Toxicology*, 2016(174):46—53.
- [19] Gunasekaran D, Chandrasekaran N, Jenkins D, et al. Plain polystyrene microplastics reduce the toxic effects of ZnO particles on marine microalgae *Dunaliella salina*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(5):104250.
- [20] Tong L, Song K, Wang Y, et al. Zinc oxide nanoparticles dissolution and toxicity enhancement by polystyrene microplastics under sunlight irradiation. *Chemosphere*, 2022(299):134421.
- [21] Li P, Zou X, Wang X, et al. A preliminary study of the interactions between microplastics and citrate-coated silver nanoparticles in aquatic environments. *Journal of Hazardous Materials*, 2020(385):121601.
- [22] Wong S W Y, Leung P T Y, Djurišić A B, et al. Toxicities of nano zinc oxide to five marine organisms: influences of aggregate size and ion solubility. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2010, 396(2):609—618.
- [23] 王燕. 微塑料与重金属(Cd、Pb、Zn)对海水青鳞复合毒性研究. 硕士学位论文. 重庆:中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2020. (Wang Y. Combined toxic effect of microplastics and heavy metals (Cd, Pb, Zn) on marine medaka. Master Dissertation. Chongqing: Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, 2020.)
- [24] Ory N C, Gallardo C, Lenz M, et al. Capture, swallowing, and egestion of microplastics by a planktivorous juvenile fish. *Environmental Pollution*, 2018(240):566—573.
- [25] Osborne O J, Lin S, Chang C H, et al. Organ-specific and size-dependent Ag nanoparticle toxicity in gills and intestines of adult zebrafish. *ACS Nano*, 2015, 9 (10):9573—9584.
- [26] Zhao J, Wang Z, Liu X, et al. Distribution of CuO nanoparticles in juvenile carp (*Cyprinus carpio*) and their potential toxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 2011(197):304—310.
- [27] Estrela F N, Batista Guimaraes A T, Silva F G, et al. Effects of polystyrene nanoplastics on *Ctenopharyngodon idella* (*grass carp*) after individual and combined exposure with zinc oxide nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, 2021(403):123879.
- [28] 熊道文, 方涛, 陈旭东, 等. 纳米材料对斑马鱼的氧化损伤及应激效应研究. *环境科学*, 2010, 31(5): 1320—1327. (Xiong D W, Fang T, Chen X D, et al. Oxidative stress effects and damage of nanoscale TiO_2 and ZnO on zebrafish. *Environmental Science*, 2010, 31(5):1320—1327.)
- [29] 孟玉芳, 顾睿敏, 谢琪婷, 等. 聚苯乙烯微塑料促进纳米氧化锌对大型蚤的毒性效应与生物积累. *湘潭大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(2):1—11. (Meng Y F, Gu R M, Xie Q T, et al. Promoting effect of polystyrene microplastics on the toxicity and accumulation of nano-ZnO in *Daphnia magna*. *Journal of Xiangtan University(Natural Science Edition)*, 2022, 44(2):1—11.)
- [30] Wang T, Long X, Cheng Y, et al. The potential toxicity of copper nanoparticles and copper sulphate on juvenile *Epinephelus coioides*. *Aquatic Toxicology*, 2014(152):96—104.

(责任编辑 杨贞)