

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

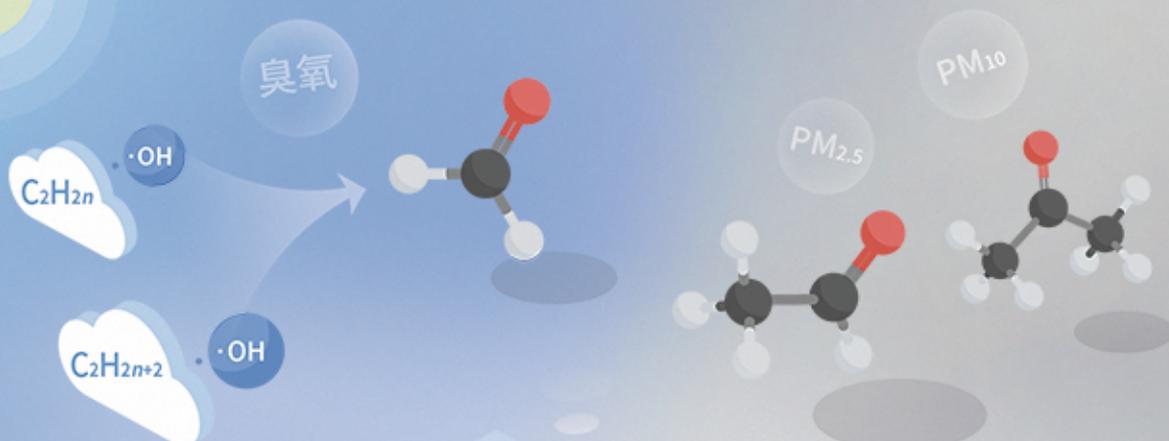
# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例  
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2021年1月

第42卷 第1期

Vol.42 No.1



目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测 ..... 顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆 (1)

基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析 ..... 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨 (9)

中原城市群典型城市秋冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及溯源 ..... 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文 (19)

沈阳市冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子污染特征及来源解析 ..... 王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀 (30)

保定地区 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素的污染特征及健康风险评价 ..... 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐 (38)

基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析: 以南京市观测为例 ..... 胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东 (45)

2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源 ..... 高璟璇, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐逸, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁 (55)

柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 ..... 刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽 (65)

天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析 ..... 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂 (75)

2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区 ..... 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李浩, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林 (88)

2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势 ..... 赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (97)

大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析 ..... 李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城 (106)

叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比 ..... 岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国 (114)

东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟 ..... 张冰, 张芊芊, 应光国 (127)

松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估 ..... 杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨 (136)

东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估 ..... 李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮 (147)

河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估 ..... 周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫 (159)

无锡-常州地下水水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估 ..... 王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波 (166)

清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估 ..... 刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛 (175)

会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险 ..... 李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹滢 (184)

三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化 ..... 陈昭宇, 李思悦 (195)

不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布 ..... 岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花 (204)

基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险 ..... 张红娜, 崔娜, 申红妙 (211)

分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制 ..... 闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜 (221)

丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素 ..... 郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进 (234)

太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应 ..... 郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆 (242)

石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量 ..... 邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王盛燕, 王子芳 (251)

前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响 ..... 陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪 (263)

浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制 ..... 陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然 (274)

填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响 ..... 刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励 (283)

FeMnNi-LDHs 对水中 As(III) 的吸附性能与机制 ..... 廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂 (293)

硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制 ..... 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌 (305)

某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征 ..... 颜亚玮, 於驰晟, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远 (315)

不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替 ..... 李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送 (323)

天然富硒土地划定的富硒阈值 ..... 王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃 (333)

融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测 ..... 高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴俊杰, 刘楚藩 (343)

南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟 ..... 戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平 (353)

闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险 ..... 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌 (359)

干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响 ..... 杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵 (368)

三元复合调理剂对土壤镉赋存形态和糙米镉累积的调控效应 ..... 蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宇, 周航, 廖柏寒 (378)

风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响 ..... 郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星 (386)

不同施肥措施对水稻土壤微生物抗性的影响 ..... 郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷 (394)

氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性 ..... 张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希 (403)

黄土丘陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征 ..... 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (411)

生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制 ..... 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺 (422)

植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响 ..... 张瑞海, 宋振, 付卫东, 鄂玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良 (433)

黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应 ..... 史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太 (443)

等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响 ..... 何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华 (450)

秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响 ..... 孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔 (459)

生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响 ..... 杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明 (467)

氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响 ..... 俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红 (477)

微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累 ..... 赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇 (485)

无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟 ..... 阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞 (492)

基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析 ..... 孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超 (501)

《环境科学》征订启事(8) 《环境科学》征稿简则(220) 信息(233, 352, 421)

# 微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累

赵佳<sup>1,2</sup>, 饶本强<sup>2\*</sup>, 郭秀梅<sup>2</sup>, 高进勇<sup>3</sup>

(1. 信阳学院教育学院, 信阳 464000; 2. 信阳师范学院生命科学学院, 信阳 464000; 3. 信阳学院理工学院, 信阳 464000)

**摘要:** 微塑料在环境中的广泛存在引起了研究者对其潜在的生物影响的关注. 为评价微塑料对水生生物的影响, 本文以模式生物斑马鱼胚胎及其幼鱼为研究对象, 探究了两种粒径不同的微塑料: 粒径 0.5  $\mu\text{m}$  的红色荧光标记聚苯乙烯微塑料(0.5RF-PM)和粒径 10  $\mu\text{m}$  的绿色荧光标记聚苯乙烯微塑料(10GF-PM)对斑马鱼胚胎发育的影响及其在出生后 5 d 的斑马鱼幼鱼肠道中的积累. 结果表明, 10GF-PM 对出生后 3 d 胚胎孵化没有影响, 0.5RF-PM 在 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时对胚胎孵化抑制率达 37%; 10GF-PM 溶液浓度为 10、100、200 和 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 出生后 5 d 幼鱼平均存活率分别为 80%、54%、44% 和 41%; 对应浓度 0.5RF-PM 暴露溶液中, 幼鱼平均存活率分别为 62%、37%、25% 和 12%. 暴露在 10、100 和 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 10GF-PM 溶液中 0.5 h, 幼鱼肠道中微塑料荧光值分别是 0.06、0.53 和 1.84, 对应浓度 0.5RF-PM 暴露溶液中, 荧光值分别是 0.63、2.32 和 3.45. 将暴露的幼鱼转移至清水中, 1 h 内可观察到微塑料通过肠道排出体外, 持续放置 24 h 后, 对应 GF-PM 暴露幼鱼肠道内微塑料荧光值分别是 0.03、0.08 和 0.56, 对应 RF-PM 暴露幼鱼肠道内微塑料荧光值分别是 0.06、0.41 和 1.56. 微塑料对斑马鱼的影响与浓度和粒径有关: 浓度越高, 胚胎孵化率和幼鱼成活率越低; 粒径越小, 越容易在胃肠道内积累.

**关键词:** 微塑料; 斑马鱼; 胚胎; 幼鱼; 肠道

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0485-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202003199

## Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish *Danio rerio*

ZHAO Jia<sup>1,2</sup>, RAO Ben-qiang<sup>2\*</sup>, GUO Xiu-mei<sup>2</sup>, GAO Jin-yong<sup>3</sup>

(1. School of Education, Xinyang University, Xinyang 464000, China; 2. College of Life Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China; 3. School of Technology, Xinyang University, Xinyang 464000, China)

**Abstract:** Microplastics have been frequently detected in aquatic environments, and there are increasing concerns about the potential effects on aquatic organisms. In this study, the effects on hatching and the intestinal accumulation in embryos and larvae exposed to two sizes of polystyrene (PS) microplastics were evaluated. The two PS were green fluorescent polyethylene microplastics with 10  $\mu\text{m}$  size (10GF-PM) and red fluorescent polystyrene microplastics with 0.5  $\mu\text{m}$  size (0.5RF-PM). The results showed no significant difference between hatching rates compared with that of the control group of *Danio rerio* embryos after exposure for three days at 10-500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  10GF-PM, while the incubation rate was 37% at 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  0.5RF-PM. The average survival rates of five day post fertilization larvae exposed to 10, 100, 200, and 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  10GF-PM solutions were 80%, 54%, 44%, and 41%, and were 62%, 37%, 25%, and 12% in corresponding concentration of 0.5RF-PM solutions. A quantitative fluorescence analysis showed that the accumulation of 10GF-PM and 0.5RF-PM in larval intestines increased with the increase in the microplastic concentration, and the fluorescence values were 0.06, 0.53, and 1.84 and 0.63, 2.32, and 3.45 after exposure to 10, 100, and 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  10GF-PM and 0.5RF-PM solutions for 0.5 h, and were 0.03, 0.08, and 0.56 and 0.06, 0.41, and 1.56 after transferred larval to clear water for 24 h, respectively. The negative effect of microplastics on zebrafish was related to the concentration and particle size; the higher the concentration, the lower the embryo hatching rates; the smaller the particle size, the easier it was to accumulate in the intestines.

**Key words:** microplastics; zebrafish; embryos; larval; intestinal

近年来,随着塑料制品的大量生产和应用,不计其数的塑料进入到环境中,海洋、湖泊和河流等水环境及沉积物甚至在海产品中,都能检测到塑料的存在<sup>[1-5]</sup>. 环境中的塑料既有大片的碎屑,也有微米和纳米级的颗粒,最初人们更关注大块塑料对生物的影响,随着研究的深入,微塑料对海洋生物和人体健康的影响得到了研究者和政府部门的广泛关注<sup>[6-9]</sup>. 微塑料通常是指粒径在 100 nm ~ 5 mm 之间的有机合成聚合物固体颗粒,美妆产品、合成衣物、药物载体和汽车轮胎等塑料制品在进入环境中后,都能够逐渐分解为微塑料<sup>[10]</sup>. 水环境中的微塑

料不可避免地会对细菌、水生生物及动物等产生影响,现有的研究表明,微塑料可通过进食摄入方式进入到生物体内,虽然多数能够随粪便排出体外,但仍有一部分微塑料积累在鱼鳃或者内脏中,引发机体产

收稿日期: 2020-03-19; 修订日期: 2020-06-30

基金项目: 国家自然科学基金-河南联合基金项目(U1404305); 国家大学生创新训练项目(201610477009); 信阳师范学院大学生科研基金项目(2014-DXS-139); 信阳师范学院大学生科研基金项目(2017-DXS-143)

作者简介: 赵佳(1985~),女,硕士研究生,讲师,主要研究方向为环境污染对水生生物的影响, E-mail: 284598649@qq.com

\* 通信作者, E-mail: rbqxy@163.com

生氧化应激反应,甚至造成死亡<sup>[10-14]</sup>.这些微塑料还能够与环境其他污染物发生相互作用,产生复合毒性影响<sup>[15-17]</sup>,经过食物链的传递,严重威胁着人类健康<sup>[7]</sup>.

微塑料的毒性与其大小、形状和化学成分有密切关系. Lei 等<sup>[18]</sup>报道了 0.1、1.0 和 5  $\mu\text{m}$  粒径的非功能性聚苯乙烯 (PS) 微塑料对线虫的影响,结果表明暴露在 1.0  $\mu\text{m}$  PS 微塑料环境中线虫的死亡率最高,且微塑料在线虫体内积累量最高. Jeong 等<sup>[19]</sup>对轮虫的实验表明, 0.05  $\mu\text{m}$  和 0.5  $\mu\text{m}$  PS 微塑料被摄食后,对轮虫的生长发育产生诸多负面影响,包括生长速度减缓、繁殖率下降、生命周期减少和繁殖周期增加等,而粒径较大的 6  $\mu\text{m}$  非功能性 PS 微塑料被摄食后容易排除体外,不对机体产生毒性影响. 目前关于微塑料性质与其毒性关系的研究有限,需要进一步开展相关研究. 斑马鱼具有饲养方便、产卵量大、胚胎透明和易于观察等优点,是目前研究污染物毒性较好的动物模型<sup>[20,21]</sup>,大量研究以斑马鱼为模式生物,报道了化学材料和化学污染物的毒性效应<sup>[22-26]</sup>.

因此,本文以模式生物斑马鱼胚胎及幼鱼为研究对象,选择两种粒径不同的 PS 微塑料:粒径 0.5  $\mu\text{m}$  的红色荧光标记微塑料 (0.5RF-PM) 和粒径 10

$\mu\text{m}$  的绿色荧光标记微塑料 (10GF-PM),统计了不同尺寸微塑料暴露环境下,斑马鱼胚胎出生后 3 d 的孵化率和生长至 5 d 的幼鱼存活率,并借助显微镜观察了暴露环境下,两种粒径微塑料在斑马鱼幼鱼体内的积累情况,以及将幼鱼转移至清水中后,两种粒径微塑料在幼鱼体内的排泄情况,并对幼鱼体内微塑料的荧光强度进行了定量分析,通过观察不同粒径的微塑料对斑马鱼胚胎孵化的影响和在斑马鱼幼鱼肠道中的积累,以期了解微塑料粒径对其生物可利用性和生物毒性的影响.

## 1 材料与方法

### 1.1 主要试剂与仪器

标准稀释水采用国标<sup>[27]</sup>方法配制. 斑马鱼胚胎整个实验过程中的实验用水均为充分氧饱和、pH 稳定在  $7.8 \pm 0.2$  和温度保持在  $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$  的标准稀释水. 微塑料购买于上海辉质生物科技有限公司 (上海), 10  $\mu\text{m}$  绿色荧光微塑料 (10GF-PM) 和 0.5  $\mu\text{m}$  红色荧光微塑料 (0.5RF-PM) 颗粒的基本性质如表 1 所示. 将微塑料溶液振荡摇匀,取 1 mL 原液 (原液浓度为  $10\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 用标准稀释水稀释,配制成  $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的微塑料贮存液待用. 贮存液避光保存在  $4^\circ\text{C}$  冰箱中.

表 1 含有荧光染料聚苯乙烯微塑料颗粒基本性质  
Table 1 Properties of fluorescent polystyrene microplastics

种类	粒径/ $\mu\text{m}$	固含量/%	表面官能团	荧光	激发/发射波长/nm
10GF-PM	10	1	-COOH	绿色	488/525
0.5RF-PM	0.5	1	-COOH	红色	535/610

本实验过程中使用到的仪器设备包括:电子天平 (Quintix124-1CN, Sartorius, 德国); 培养箱 (LRH-250F, 上海一恒科学技术有限公司); 交配盒 (上海海圣生物实验设备有限公司); U 型底 96 孔板 (Costar-3599, Corning, 美国); 高速粉碎仪 (SKSI, 上海必横生物科技有限公司); 消解仪 (EHD36, LabTech, 美国); 立式显微镜 (SZ61, Olympus, 日本), evos 显微镜 (Invitrogen<sup>TM</sup> EVOS<sup>TM</sup> FL Auto, Thermo Fisher Scientific, 美国); 酶标仪 (Varioskan Lux, Thermo Fisher Scientific, 美国).

### 1.2 斑马鱼胚胎暴露实验

成年斑马鱼购买于中国科学院水生生物研究所 (湖北武汉). 斑马鱼生长环境光照/黑暗周期为 14 h/10 h, 每日 09:00 和 15:00 喂食 2 次. 取胚胎前 1 d 的 16:00, 从鱼缸中捞取 2 条雄鱼和 1 条雌鱼放入交配盒中, 将雌、雄鱼用挡板隔开; 第 2 d 的 09:00 抽取隔板, 雌、雄鱼交配产卵; 11:00 将雌、雄鱼放回鱼缸中; 用滤网收集斑马鱼胚胎, 使用 0.05% 的亚

甲基蓝溶液冲洗胚胎, 除去粪便和死卵, 然后将胚胎转移至培养皿中, 在  $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$  培养箱中培养; 13:00 (即出生后 4 h) 在显微镜下挑选发育状态一致和健康的胚胎进行暴露实验.

将挑选出的胚胎用吸管转移至 U 型底 96 孔板中, 每个孔放 1 颗, 一行 12 个孔, 3 行为一组暴露液的 3 个平行样. 移去孔中多余的稀释水, 再加入 200  $\mu\text{L}$  标准稀释水或浓度分别为 0.1、1、10、100、200 和  $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 10GF-PM 和 0.5RF-PM 溶液. 将 96 孔板置于温度为  $(28 \pm 1)^\circ\text{C}$ , 光照/黑暗周期为 14 h/10 h 的培养箱中. 暴露 3 d 后, 统计 96 孔板中胚胎孵化率, 继续暴露至第 5 d, 统计 96 孔板中幼鱼成活率.

### 1.3 斑马鱼幼鱼实验

预实验表明斑马鱼幼鱼出生后 5 d 嘴巴发育完成, 开始进食行为, 进食 1 h 后, 开始排泄行为, 进食 2 h 后, 排泄行为基本结束. 幼鱼暴露实验条件为: 将挑选的健康胚胎放入 6 孔盘中, 每个孔 50 颗; 24

h 及 48 h 时,吸去胚胎膜,并添加标准稀释水,保证幼鱼生长环境;发育至第 5 d,将标准稀释水吸出,加入浓度分别为 10、100 和 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 10GF-PM 和 0.5RF-PM 溶液进行暴露,每组暴露液设置 3 个平行样.暴露 0.5 h 后,用 Evos 显微镜观察微塑料在幼鱼体内的存在状态,并测定微塑料荧光强度.将幼鱼转移到清水中,饲养 24 h 后,再次用 Evos 观察微塑料在幼鱼体内的存在状态,并测定微塑料荧光强度.

#### 1.4 微塑料荧光强度测定

将分别暴露 0.5 h 和 24 h 的幼鱼转移至 50 mL 离心管中后迅速加入液氮冷冻,使幼鱼停止生命活动,然后用超纯水冲洗 5 次以除去表面粘附的微塑料.将幼鱼转移至 2 mL 离心管,移去多余水分,再加入 1 mL 超纯水,进行组织匀浆.采用文献[28]中 KOH 消解法处理匀浆液,即以 KOH 为消解剂,浓度为 100  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,消解体积 40 mL,消解温度 60 $^{\circ}\text{C}$ ,消解时间 12 h.取 200  $\mu\text{L}$  消解液,用酶标仪测定荧光强度.

#### 1.5 数据分析

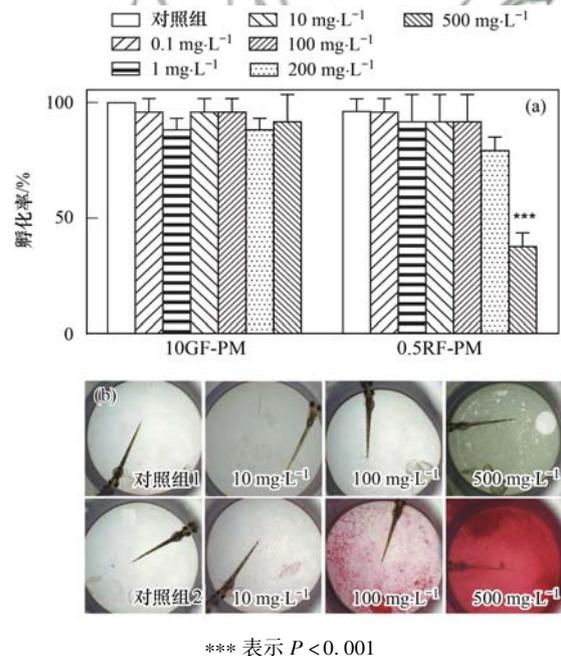
所有实验处理均设至少 3 组平行.使用 GraphPad Prism 软件进行数据分析与比较并绘图.本实验结果以平均值  $\pm$  标准差呈现,采用单因素方差分析(ANOVA)处理组之间的显著性差异, $P < 0.05$  表示处理组之间存在显著性差异.

## 2 结果与讨论

### 2.1 微塑料对斑马鱼胚胎发育的影响

本实验 0.1、1.0、10、100、200 和 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  等浓度梯度的 10GF-PM 和 0.5RF-PM 溶液.将出生后 4 h,发育阶段一致的斑马鱼胚胎暴露于不同浓度梯度的微塑料溶液中.出生后第 3 d,微塑料对胚胎的主要影响是抑制孵化,实验结果中未出现胚胎死亡或者是孵化后的胚胎有尾颈弯曲、心包囊肿等畸形症状.因此本研究将抑制胚胎孵化作为胚胎阶段微塑料暴露的敏感性测试终点,统计胚胎孵化率.结果如图 1(a) 所示.10GF-PM 溶液在 0.1 ~ 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,没有产生对胚胎孵化的抑制作用,但在 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  0.5RF-PM 暴露条件下,胚胎孵化受到显著影响,孵化率只有 37%.暴露第 3 d,对照组和 10、100 及 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  处理组胚胎典型发育状态如图 1(b) 所示,除 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  0.5RF-PM 处理组有大量胚胎未孵化,其他处理组胚胎均正常孵化,且孵化出的幼鱼在表观上无异常现象.胚胎阶段,胚胎膜允许水分子、离子及氧气等小分子通过膜孔进入膜内,同时阻止外界大颗粒污染物质进入膜内,影响胚胎

孵化<sup>[29]</sup>.本实验中,只在高浓度 0.5RF-PM 溶液中出现了孵化抑制,对于 10GF-PM,即使在高浓度条件下,也没有产生孵化抑制.这主要是因为 10GF-PM 粒径是 0.5RF-PM 的 20 倍,胚胎膜能够阻止其进入膜内,进而对胚胎孵化产生影响.另一方面,在实验过程中可以观察到,随着时间的推移,较大粒径的 10GF-PM 颗粒沉降在孔板的底部,生物可利用性降低,0.5RF-PM 的粒径在微纳米级,能够通过膜孔进入膜内,对胚胎产生影响.但实验结果表明只有在 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,才表现出对胚胎孵化的抑制性,这可能是由于 0.5RF-PM 带有亲水基团—COOH,大部分的微塑料吸附在胚胎膜的表面,并没有直接进入胚胎膜内[图 1(b)],只有在外界微塑料浓度足够高时,进入膜内的量才足以影响胚胎的孵化.另一方面,大量微塑料吸附在胚胎表面,使胚胎表面与水中氧气交换速率减慢,胚胎发育所需的氧气供应不足,最终也会导致胚胎缺氧死亡<sup>[29]</sup>.



\*\*\* 表示  $P < 0.001$

图 1 斑马鱼胚胎出生后 3 d 孵化情况

Fig. 1 Hatching rates of embryos after exposure to 10GF-PM and 0.5RF-PM solutions for three days

胚胎继续发育至第 5 d,处于幼鱼阶段,从实验结果中可以看出这一阶段微塑料对幼鱼产生的影响是导致幼鱼死亡,因此将死亡作为幼鱼在微塑料中暴露的敏感测试终点,统计幼鱼存活率.不同粒径微塑料暴露环境下幼鱼成活率如图 2 所示.从图 2(a) 中可以看出,0.1 ~ 10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  暴露条件下,10GF-PM 暴露组幼鱼成活率分别是 96%、88% 和 80%,幼鱼平均成活率随着浓度的升高而降低,但幼鱼成活率与对照组相比没有显著性差异,在统计学意义上,0.1 ~ 10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的 10GF-PM 对胚胎发育没

有影响. 100、200 和 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  暴露条件下, 幼鱼成活率分别是 54%、44% 和 41%, 显著低于对照组成活率 ( $P < 0.001$ ), 而不同暴露浓度条件下, 幼鱼成活率没有显著性差异, 幼鱼成活率与暴露浓度之间没有线性的剂量-效应关系, 说明粒径较大的微塑料能够导致幼鱼死亡, 但并不是浓度越高, 成活率越低. 以上结果表明, 10GF-PM 浓度低于 10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 不会对幼鱼生存产生影响, 而高于 100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 会导致幼鱼的死亡.

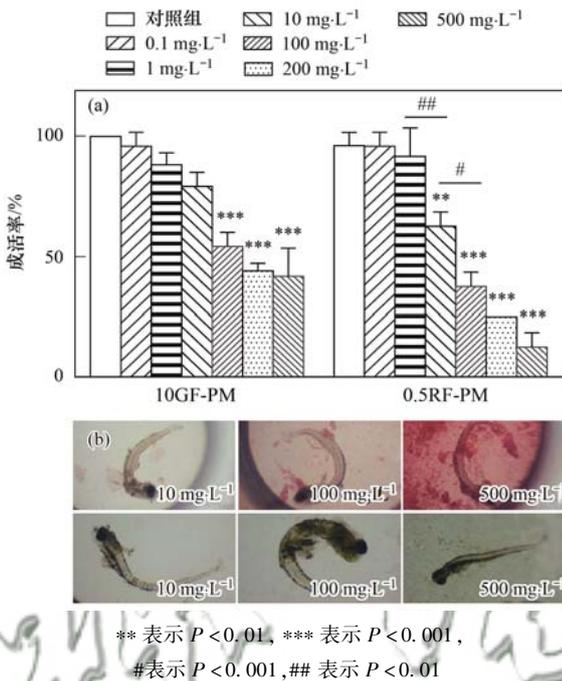


图2 斑马鱼胚胎出生后 5 d 幼鱼存活状态

Fig. 2 Survival rates of larvae after exposed to 10GF-PM and 0.5RF-PM solutions for five days

0.1 ~ 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  0.5RF-PM 暴露组幼鱼成活率分别是 96%、92%、62%、37%、25% 和 12%, 0.1 和 1  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  暴露组幼鱼成活率与对照组相比, 无显著性差异. 随着暴露浓度的进一步提高, 幼鱼成活率逐渐下降, 显著低于对照组幼鱼成活率 ( $P < 0.01$ ), 暴露组 (1、10 和 100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 之间幼鱼成活率也存在显著性差异, 说明幼鱼在微纳米粒径微塑料中, 对微塑料的浓度更加敏感, 浓度增加会引起更高比例的死亡. 与 10GF-PM 相比, 0.5RF-PM 对幼鱼产生效应的浓度更低, 这也间接说明了小粒径微塑料对生物产生的影响更大. 斑马鱼胚胎发育到第 5 d, 嘴部器官已经发育完全, 可以进食, 产生了与胚胎阶段不同的暴露方式<sup>[30]</sup>, 即由胚胎阶段的接触暴露为主转变为幼鱼阶段的进食暴露为主. 因此, 斑马鱼幼鱼 5 d 的毒性暴露结果与 3 d 的暴露结果不同. 生物通过进食方式摄入微塑料后, 微塑料进入胃肠道, 再通过消化、吸收最终排出体外<sup>[13]</sup>. 10GF-PM 组暴露毒

性低于 0.5RF-PM 组暴露毒性, 可能是因为粒径较大的 10GF-PM 生物可利用性低. 因此进一步探究了微塑料在斑马鱼幼鱼体内的存在状态.

## 2.2 微塑料在斑马鱼幼鱼体内的存在状态

发育 5 d 的幼鱼进食 0.5 h 后, 用显微镜观察了微塑料在幼鱼体内的存在, 如图 3 所示. 图 3(a1) 和 3(b1) 表示使用单色相机采集的图像, 图 3(a2) 和 3(b2) 表示在保持样本位置不变条件下, 使用彩色相机采集的图像; 若斑马鱼体内不含荧光物质, 在彩色相机模式下, 采集到的照片为黑色 (对照组). 图 3(a1) 和图 3(a2) 为 10GF-PM 暴露组, 图 3(b1) 和图 3(b2) 为 0.5RF-PM 暴露组. 斑马鱼能够通过鱼鳃呼吸和进食两种方式摄入微塑料, 通过鱼鳃摄入的微塑料能够在腮中积累并可能对鳃细胞造成 DNA 损伤. 从图 3 中可以看出, 微塑料主要集中在幼鱼肠道系统中, 在鳃部没有明显的荧光, 这也与文献<sup>[18]</sup>的报道一致. 有研究表明, 纳米级的 PS 容易积累在幼鱼鳃部, 对于亚微米级和微米级的 PS 不会在鱼鳃中累积<sup>[31]</sup>, 这与本实验的结果相一致, 亚微米级的 0.5RF-PM 及微米级的 10GF-PM 主要通过摄食行为进入了幼鱼肠道系统. 微塑料为 10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 0.5RF-PM 暴露组可以观察到荧光, 10GF-PM 组观察不到荧光; 微塑料浓度分别为 100  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和 500  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 随着微塑料浓度的增加, 幼鱼体内荧光强度增加; 对比相同暴露浓度的 0.5RF-PM 和 10GF-PM, 0.5RF-PM 暴露组荧光强度高于 10GF-PM 暴露组. 以上观察到的结果与荧光测定结果一致 (图 4). 当微塑料进入幼鱼体内, 幼鱼会产生氧化应激反应, 进而产生组织损伤, 影响组织功能, 最终导致死亡<sup>[13,32]</sup>. 浓度相同、粒径不同的荧光微塑料进入幼鱼体内后, 在幼鱼的体内观察到了不同强度

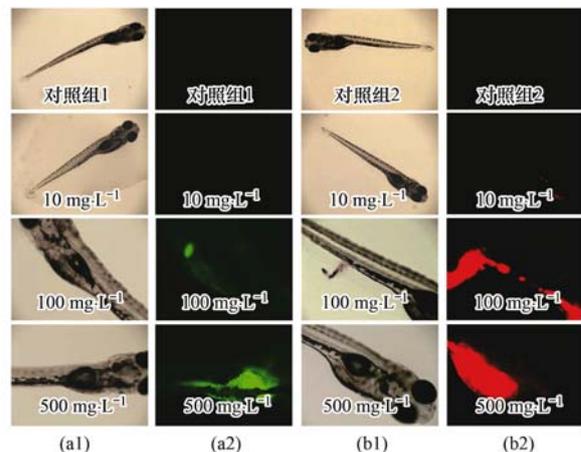


图3 出生后 5 d 的斑马鱼幼鱼暴露于微塑料溶液中 0.5 h 后, 微塑料在幼鱼肠道内的积累情况

Fig. 3 Microplastic accumulation in the intestines of five day post fertilization larvae after exposure for 0.5 h

的荧光,说明微塑料在幼鱼体内存在的浓度不同. 分析胚胎暴露 5 d 幼鱼死亡率结果与幼鱼体内荧光强度结果,可以推测,相同浓度条件下,粒径较小的微塑料比粒径较大的微塑料在体内的含量高,即粒径较小的微塑料的生物可利用性高,因此小粒径的微塑料会产生比大粒径更高的生物毒性,这也与已有研究报道的结果一致<sup>[19,20,33]</sup>. 清水实验则进一步证明了粒径大小影响微塑料的生物可利用性.

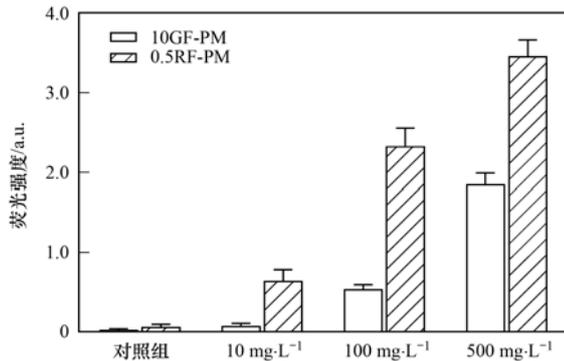


图4 出生后 5 d 的斑马鱼幼鱼暴露于微塑料溶液中 0.5 h 后,幼鱼体内微塑料荧光强度值

Fig. 4 Quantitative fluorescence analysis of microplastics of five day post fertilization larvae after exposure for 0.5 h

### 2.3 微塑料在斑马鱼幼鱼体内的排泄

将暴露组幼鱼转移到清水中,可以看到(图 5),在清水中生活 24 h 后,幼鱼体内大部分微塑料能够排出体外,但仍然有少量存留在体内. 对于暴露在初始浓度为  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  微塑料中的幼鱼,已经在显微镜下观察不到荧光存在(图 5 中未显示),体内荧光值与对照组相比没有显著性差异(图 6). 暴露在初始浓度为  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  微塑料中的幼鱼,在显微镜下只能观察到红色荧光,说明幼鱼体内含有红色荧光微塑料,绿色荧光微塑料几乎能够完全排出体外. 暴露在  $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  微塑料中的幼鱼,显微镜下可以观察到红色荧光和绿色荧光,荧光检测显示红色荧光和绿色荧光强度分别是 1.55 和 0.56. 以上实验结果表明,粒径为  $10 \mu\text{m}$  的 10GF-PM 被幼鱼进食后,

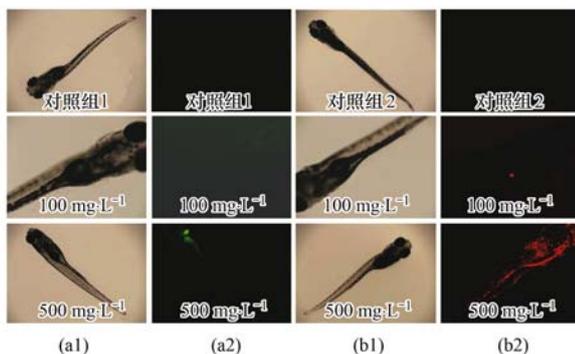


图5 转移至清水中 24 h 后,幼鱼肠道内微塑料积累情况

Fig. 5 Microplastic accumulation in the intestines of five day post fertilization larvae after living in clean water for 24 h

在一定浓度下能够排出体外,随着进入体内微塑料浓度的升高,10GF-PM 在幼鱼体内积累,导致幼鱼死亡(图 2). 粒径为  $0.5 \mu\text{m}$  的 0.5RF-PM 被幼鱼进食后,被排出体外的微塑料较少,导致在体内的积累量增加,暴露浓度越高,幼鱼体内的积累量越大(图 6),幼鱼的死亡率越高. 这与文献报道的粒径较大的微塑料比粒径较小的微塑料的毒性高的结论相同<sup>[18,19,34]</sup>.

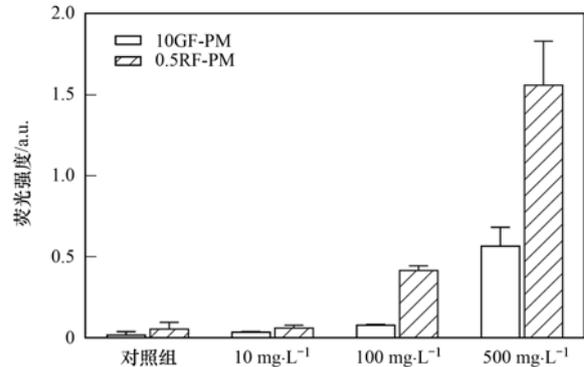


图6 转移至清水中 24 h 后,幼鱼体内微塑料荧光强度值  
Fig. 6 Quantitative fluorescence analysis of microplastics of five day post fertilization larvae after living in clean water for 24 h

图 7 显示了 0.5RF-PM 排出幼鱼体外的动态过程,其中编号 1~12 为进食 2 h 后每隔 30 s 在显微镜下拍摄的图片,白色圆圈显示 0.5RF-PM 从产生到排出体外的过程. 从图中可以看出,被幼鱼吞食的微塑料,源源不断的经过肠道被排出体外,在 5 min 的时间内,有大量的 0.5RF-PM 积聚在幼鱼泄殖腔附近(图 7 中编号 12),即进入到体外环境中. 微塑料对幼鱼的生物可利用性较低,但一旦被利用,就会对幼鱼生存产生威胁.

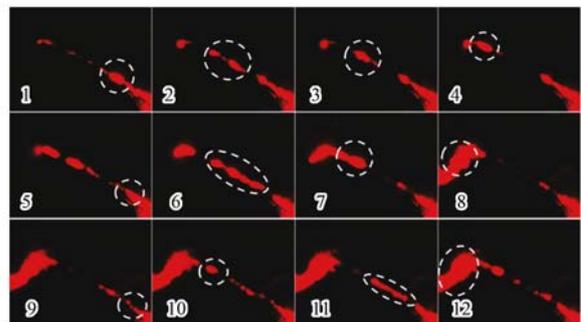


图7 0.5RF-PM 排出幼鱼体外的动态过程

Fig. 7 Dynamic process of expelling 0.5RF-PM in larvae

### 3 结论

(1) 微塑料对斑马鱼胚胎和幼鱼的毒性与微塑料的浓度和粒径相关. 低浓度条件下,微塑料对胚胎发育没有影响,高浓度条件下,小粒径微塑料表现出对胚胎的毒性作用.

(2) 随着胚胎发育成幼鱼,微塑料暴露途径由

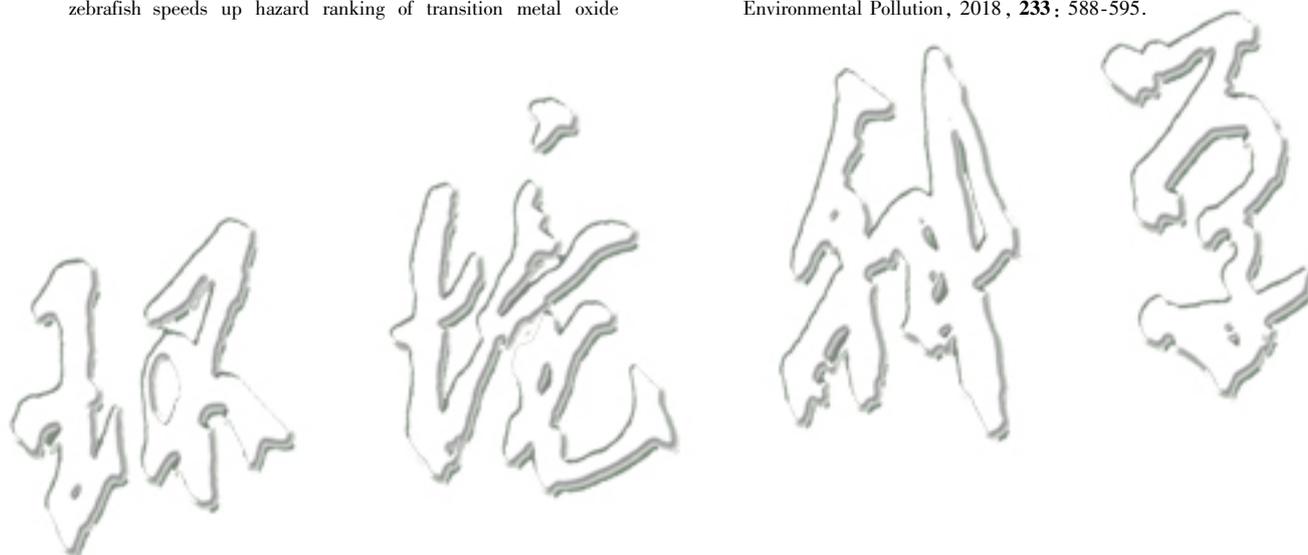
接触暴露为主变成进食暴露为主,两种粒径的微塑料均表现出对幼鱼的致死作用,小粒径微塑料对幼鱼的毒性作用强于大粒径微塑料,生物可利用性更高。

(3)将暴露后的幼鱼转移到清水中,暴露浓度低、粒径大的微塑料更容易全部排泄出体外,粒径小、浓度高的微塑料溶液在幼鱼肠道内产生积累。因此,改善水质环境,能够降低微塑料在水生生物体内的积累,降低微塑料的生态风险。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, *et al.* Lost at sea: Where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, **304**(5672): 838.
- [ 2 ] Zhang W W, Zhang S F, Wang J Y, *et al.* Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 541-548.
- [ 3 ] Zhao S Y, Zhu L X, Wang T, *et al.* Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: First observations on occurrence, distribution [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **86**(1-2): 562-568.
- [ 4 ] Su L, Xue Y G, Li L Y, *et al.* Microplastics in Taihu Lake, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 711-719.
- [ 5 ] Su L, Deng H, Li B W, *et al.* The occurrence of microplastic in specific organs in commercially caught fishes from coast and estuary area of east China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, **365**: 716-724.
- [ 6 ] Rist S, Carney B, Hartmann N B, *et al.* A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **626**: 720-726.
- [ 7 ] Barboza L G A, Dick V A, Lavorante B R B O, *et al.* Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **133**: 336-348.
- [ 8 ] Bouwmeester H, Hollman P C H, Peters R J B. Potential health impact of environmentally released micro-and nanoplastics in the human food production chain: Experiences from nanotoxicology [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(15): 8932-8947.
- [ 9 ] Guzzetti E, Sureda A, Tejada S, *et al.* Microplastic in marine organism: Environmental and toxicological effects [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2018, **64**: 164-171.
- [ 10 ] Wright S L, Thompson R C, Galloway T S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **178**: 483-492.
- [ 11 ] Yu P, Liu Z Q, Wu D L, *et al.* Accumulation of polystyrene microplastics in juvenile *Eriocheir sinensis* and oxidative stress effects in the liver[J]. *Aquatic Toxicology*, 2018, **200**: 28-36.
- [ 12 ] Jin Y X, Lu L, Tu W Q, *et al.* Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 308-317.
- [ 13 ] Jin Y X, Xia J Z, Pan Z H, *et al.* Polystyrene microplastics induce microbiota dysbiosis and inflammation in the gut of adult zebrafish[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **235**: 322-329.
- [ 14 ] 廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 等. 微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4661-4667.
- Liao Y C, Nazygul · Jahitbek, Li M, *et al.* Effects of microplastics on the growth, physiology, and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4661-4667.
- [ 15 ] Besseling E, Wegner A, Foekema E M, *et al.* Effects of microplastic on fitness and PCB bioaccumulation by the lugworm *Arenicola marina* (L.) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(1): 593-600.
- [ 16 ] 徐鹏程, 郭健, 马东, 等. 新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1329-1337.
- Xu P C, Guo J, Ma D, *et al.* Sorption of polybrominated diphenyl ethers by virgin and aged microplastics [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1329-1337.
- [ 17 ] 黄福义, 杨凯, 张子兴, 等. 微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2234-2239.
- Huang F Y, Yang K, Zhang Z X, *et al.* Effects of microplastics on antibiotic resistance genes in estuarine sediments [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2234-2239.
- [ 18 ] Lei L L, Wu S Y, Lu S B, *et al.* Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans* [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **619-620**: 1-8.
- [ 19 ] Jeong C B, Won E J, Kang H M, *et al.* Microplastic size-dependent toxicity, oxidative stress induction, and p-JNK and p-p38 activation in the monogonont rotifer (*Brachionus koreanus*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(16): 8849-8857.
- [ 20 ] Lin S J, Zhao Y, Ji Z X, *et al.* Zebrafish high-throughput screening to study the impact of dissolvable metal oxide nanoparticles on the hatching enzyme, ZHE1 [J]. *Small*, 2013, **9**(9-10): 1776-1785.
- [ 21 ] Lin S J, Zhao Y, Nel A E, *et al.* Zebrafish: An in vivo model for nano EHS studies [J]. *Small*, 2013, **9**(9-10): 1608-1618.
- [ 22 ] 叶露, 吴玲玲, 蒋雨希, 等. PFOS/PFOA 对斑马鱼 (*Danio rerio*) 胚胎致毒效应研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1727-1732.
- Ye L, Wu L L, Jiang Y X, *et al.* Toxicological study of PFOS/PFOA to zebrafish (*Danio rerio*) embryos [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(6): 1727-1732.
- [ 23 ] 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 [J]. *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<sub>2</sub> and ZnO on zebrafish [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(5): 1320-1327.
- [ 24 ] 杜青平, 彭润, 刘伍香, 等. 四溴双酚 A 对斑马鱼胚胎体内外发育的毒性效应 [J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(3): 739-744.
- Du Q P, Peng R, Liu W X, *et al.* Toxic effects of TBBPA on *in vivo* and *in vitro* developments in the zebrafish (*Danio rerio*) embryos [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(3): 739-744.
- [ 25 ] 陈幕飞, 黄承志, 蒲德永, 等. CdSe/ZnS 量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 719-726.
- Chen M F, Huang C Z, Pu D Y, *et al.* Toxic effects of CdSe/ZnS QDs to zebrafish embryos [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(2): 719-726.
- [ 26 ] 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 [J]. *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 [J]. *China*

- Environmental Science, 2010, **30**(5): 705-709.
- [27] GB/T 13267-1991, 水质 物质对淡水鱼(斑马鱼)急性毒性测定方法[S].  
GB/T 13267-1991, Water quality-Determination of the acute toxicity of substances to a freshwater fish (*Brachydanio rerio* Hamilton-Buchanan)[S].
- [28] 邹亚丹, 徐擎擎, 张芻, 等. 6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 496-503.  
Zou Y D, Xu Q Q, Zhang G, *et al.* Influence of six digestion methods on the determination of polystyrene microplastics in organisms using the fluorescence intensity [J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 496-503.
- [29] Chen Y M, Ren C X, Ouyang S H, *et al.* Mitigation in multiple effects of graphene oxide toxicity in zebrafish embryogenesis driven by humic acid[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(16): 10147-10154.
- [30] Lin S J, Zhao Y, Xia T, *et al.* High content screening in zebrafish speeds up hazard ranking of transition metal oxide nanoparticles[J]. ACS Nano, 2011, **5**(9): 7284-7295.
- [31] 蔡亚云, 赵佳玥, 李文锋, 等. 不同粒径塑料微颗粒在斑马鱼腮组织中的积累及其对蒽毒性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2017, **23**(6): 1154-1158.  
Cai Y Y, Zhao J Y, Li W F, *et al.* Retention of polystyrene particles of different sizes in zebrafish gills and their effect on toxicity of anthracene to gill cells[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2017, **23**(6): 1154-1158.
- [32] Lu Y F, Zhang Y, Deng Y F, *et al.* Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(7): 4054-4060.
- [33] Chen Q Q, Gundlach M, Yang S Y, *et al.* Quantitative investigation of the mechanisms of microplastics and nanoplastics toward zebrafish larvae locomotor activity [J]. Science of the Total Environment, 2017, **584-585**: 1022-1031.
- [34] Lo H K A, Chan K Y K. Negative effects of microplastic exposure on growth and development of *Crepidula onyx* [J]. Environmental Pollution, 2018, **233**: 588-595.



## CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System .....	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i> ( 1 )
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model .....	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> ( 9 )
Characteristics and Sources of PM <sub>2.5</sub> Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter .....	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i> ( 19 )
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM <sub>2.5</sub> in Winter in Shenyang .....	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i> ( 30 )
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> Collected in Baoding .....	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> ( 38 )
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing .....	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i> ( 45 )
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019 .....	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i> ( 55 )
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou .....	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i> ( 65 )
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer .....	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i> ( 75 )
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017 .....	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i> ( 88 )
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019 .....	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i> ( 97 )
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise .....	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i> ( 106 )
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves .....	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i> ( 114 )
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed .....	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo ( 127 )
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River .....	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i> ( 136 )
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China .....	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i> ( 147 )
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province .....	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i> ( 159 )
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou .....	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i> ( 166 )
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River .....	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i> ( 175 )
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China .....	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i> ( 184 )
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue ( 195 )
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland .....	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i> ( 204 )
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir .....	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao ( 211 )
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir .....	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 221 )
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir .....	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i> ( 234 )
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake .....	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i> ( 242 )
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed .....	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> ( 251 )
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems .....	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i> ( 263 )
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff .....	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i> ( 274 )
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland .....	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i> ( 283 )
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs .....	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> ( 293 )
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments .....	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 305 )
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants .....	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i> ( 315 )
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion .....	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i> ( 323 )
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land .....	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i> ( 333 )
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors .....	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i> ( 343 )
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China .....	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i> ( 353 )
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province .....	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i> ( 359 )
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation .....	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i> ( 368 )
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice .....	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> ( 378 )
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains .....	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i> ( 386 )
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms .....	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i> ( 394 )
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang .....	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i> ( 403 )
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China .....	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i> ( 411 )
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism .....	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i> ( 422 )
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i> .....	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i> ( 433 )
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer .....	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i> ( 443 )
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen .....	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i> ( 450 )
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils .....	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i> ( 459 )
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation .....	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i> ( 467 )
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application .....	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i> ( 477 )
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i> .....	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i> ( 485 )
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data .....	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i> ( 492 )
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale .....	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i> ( 501 )