

知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铨, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期

Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析 刘春景, 吕建斌, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳(3375)

基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏(3386)

基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰(3396)

厦门港大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价 肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平(3404)

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征 张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁敏, 侯思宇(3416)

晋中盆地主要城市冬季 PM_{2.5} 传输特征分析 王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣(3423)

鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳锋(3439)

济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP 王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋(3451)

长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析 罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧(3463)

2019 年 7 月石家庄市 O₃ 生成敏感性控制策略解析 朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇(3473)

华北平原 AOD 时空演化与影响因素 郭霖, 孟飞, 马明亮(3483)

基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系 郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康(3494)

基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威(3508)

近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析 陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏(3523)

高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素 杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强(3532)

三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性 纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽(3543)

典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析 倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康(3552)

骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕(3562)

千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军(3575)

泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征 张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮(3587)

降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕(3597)

典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价 储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏(3608)

筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响 王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜(3623)

天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识 刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德(3635)

地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪(3645)

北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵(3656)

微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响 胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明(3664)

不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响 任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟(3672)

微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd²⁺ 吸附机制 马文艳, 裴刚刚, 高歌, 孙约兵(3682)

不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素 连神海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水(3692)

Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能 印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨祺, 何世颖, 薛利红(3699)

一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析 李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送(3708)

丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性 高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程丽阳, 彭永臻(3718)

2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 徐勇, 郑志威, 郭振东, 窦世卿, 黄雯婷(3730)

近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估 陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明(3741)

土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇(3752)

长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价 张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁(3763)

煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 尚誉, 桑楠(3773)

燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价 李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚(3781)

广州市南沙区第四区剖面镉富集特征及生物有效性 王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏(3789)

黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准 徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀(3799)

土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测 张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南(3811)

添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响 鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利(3825)

不同稻作系统土壤的 CH₄ 产生潜力与产生途径 沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华(3835)

东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮(3844)

同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞(3854)

岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较 肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛(3865)

紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异化响应 王智慧, 蒋先军(3876)

有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响 肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全(3884)

《环境科学》征订启事(3403) 《环境科学》征稿简则(3462) 信息(3493, 3655, 3834)

微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响

胡嘉敏¹, 左剑恶^{1,2*}, 李金波¹, 张艳艳¹, 艾翔³, 龚大惠³, 张继文³, 孙丁明⁴

(1. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 清华大学深圳国际研究生院, 深圳 518055; 3. 西安清科智联环境科学研究院有限公司, 西安 710000; 4. 西安石油大学化学化工学院, 西安 710000)

摘要: 广泛存在于自然环境中的微塑料可能会危害水生生物的生长和健康, 目前该方面的研究较少. 以淡水杂食性鱼类鲫鱼作为研究对象, 喂食不同微塑料浓度的鱼食进行为期 30 d 的食源暴露试验, 分析微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响. 结果表明, 与对照组相比, 各试验组中鲫鱼的身长没有明显变化, 但低浓度组的鲫鱼体重显著增加, 中浓度组和高浓度组的体重明显下降. 低浓度组的鲫鱼肝脏组织基本正常, 中浓度组和高浓度组的均出现了不同程度的肝组织异常现象, 其中高浓度组的肝脏损伤最为严重. 鲫鱼肠道中, 变形菌门、梭杆菌门、厚壁菌门和拟杆菌门是门水平上的优势菌种, 葡萄球菌属和劳氏菌属等致病菌在各试验组鲫鱼肠道中均有出现; α 多样性结果表明高浓度组的鲫鱼肠道微生物菌群最为丰富; PCoA 结果显示对照组和试验组的鲫鱼肠道微生物存在明显的聚类特征.

关键词: 微塑料; 鲫鱼; 生长; 肝脏损伤; 肠道微生物

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3664-08 DOI: 10.13227/j.hjck.202108002

Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition

HU Jia-min¹, ZUO Jian-e^{1,2*}, LI Jin-bo¹, ZHANG Yan-yan¹, AI Xiang³, GONG Da-hui³, ZHANG Ji-wen³, SUN Ding-ming⁴

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China; 3. Qingke Zhilian Environmental Science Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710000, China; 4. School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710000, China)

Abstract: Microplastics (MPs), which are widely present in the natural environment, may be harmful to the growth and health of aquatic organisms, though studies in this area are lacking. In this study, the crucian carp (*Carassius carassius*), a type of omnivorous freshwater fish, was chosen as the target, which was fed with fish food containing different concentrations of MPs for a 30-day food exposure experiment to study the effects of MPs on crucian growth, liver damage, and gut microbiome composition. Compared with that in the control group, the body length of the crucians in the environmental groups did not change significantly. The weight of the crucians in the low PE-MPs group increased significantly, but the weight of crucians in the medium and high PE-MPs groups decreased markedly. The liver tissues of the low PE-MPs group of crucians were basically normal, whereas crucians in the medium and high PE-MPs groups had varying degrees of liver damage, and crucians in the high PE-MPs group had the most serious liver damage. At the phylum level, Proteobacteria, Fusobacteria, Firmicutes, and Bacteroides were the dominant species in the gut of the crucians. Pathogens such as *Staphylococcus* and *Ralstonia* were present in the crucian gut of environmental groups. Alpha diversity results showed that the gut microbiome of crucians in the high PE-MPs group was the most abundant. PCoA results indicated that the gut microbiome of crucians in the control and environmental groups had obvious clustering characteristics.

Key words: microplastics; crucian; growth; liver damage; gut microbiome

微塑料是一类广泛存在于自然环境中的新兴污染物, 通常是指直径 < 5 mm 的塑料颗粒、纤维和薄膜等^[1~4]. 近些年微塑料对水系的污染问题已经演变成全球性问题, 不少研究者在多种水生动物体内检测出微塑料. Wang 等^[5] 在北江和珠江三角洲的肉食性鱼类体内平均检测出每条鱼 3.5 个和 3.0 个微塑料, 杂食性鱼类体内分别检测出每条鱼 6.8 个和 6.2 个微塑料; Mohsen 等^[6] 调查了中国渤海和黄海养殖海参摄入微塑料的情况, 海参个体中最多检测出 19 个微塑料颗粒; 鄱阳湖典型区铜锈环棱螺体内的微塑料丰度最高为 (2.48 ± 0.90) 个 $\cdot g^{-1}$, 赣江入湖口铜锈环棱螺体内微塑料丰度高于其他入湖口^[7].

微塑料对水生动物的影响和危害已引起全世界的广泛关注. 鱼类是最常见的水生动物, 以鱼类作为

研究对象具有现实意义. 有研究发现微塑料进入鱼体内后, 会影响其生长、代谢和各类器官功能^[8~13]. 赵佳等^[14] 的研究发现微塑料会在斑马鱼幼鱼肠道中累积, 微塑料的粒径越小, 越容易在肠道累积. Jabeen 等^[15] 研究了纤维状、颗粒状和碎片状微塑料对金鱼的影响, 结果表明暴露试验后金鱼出现了严重的肝脏和肠道损伤. 不仅如此, 微塑料对鱼类肠道微生物具有较大影响, 导致鱼类肠道菌群紊乱, 增加某些炎症和疾病发生的风险^[16~19]. 此外, 微塑料在水生动物体内富集, 会通过食物链传递转移给人类, 对人类健康造成潜在威胁^[20~24].

收稿日期: 2021-08-01; 修订日期: 2021-11-22

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103)

作者简介: 胡嘉敏(1995~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为微塑料对生物的毒性影响, E-mail: hjm18@mails.tsinghua.edu.cn

* 通信作者, E-mail: jiane.zuo@mail.tsinghua.edu.cn

微塑料进入鱼体内包括水源暴露和食源暴露两种途径。水源暴露是指微塑料经过鱼鳃进入鱼体, 进而对其呼吸系统造成影响; 食源暴露是指鱼类吞食表面附着了微塑料的食物, 微塑料直接进入其胃肠道^[25~28]。目前国内外关于微塑料对鱼类的影响研究较少且多集中于水源暴露。此外, 为便于检测微塑料进入鱼体内的位置和数量, 大多数研究以荧光微球作为水源暴露的污染源, 但荧光微球类的微塑料很少存在于自然环境中, 其研究结果可能与实际环境中微塑料对鱼类的影响有所不同; 而食源暴露可以通过喂食量计算出鱼类的微塑料摄入量, 在一定程度上可以解决这一难题^[25]。

鲫鱼是我国最常见的淡水鱼之一, 广泛存在于河流湖泊等水体中, 与人类关系密切。本文以鲫鱼为研究对象, 以工业制成的聚丙烯粉末作为暴露源, 通过 30 d 的微塑料食源暴露试验, 分析微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响, 深入了解并探究较长时期微塑料对鱼类的综合影响。

1 材料与方法

1.1 试验鱼的购买和养殖

体重身形大致相同[身长: (4.77 ± 1.21) cm; 体重: (7.91 ± 0.35) g]的健康鲫鱼购于西安当地水族馆, 暴露试验开始前预先在实验室养殖 14 d, 每天喂食适量的成品饲料 1 次。采用玻璃鱼缸养殖鲫鱼, 24 h 不间断曝气, 保持水中溶解氧(DO) > 8.0 mg·L⁻¹。环境温度为 (25 ± 1) °C, 光照周期为 14 h (光): 10 h (暗)。

1.2 主要试剂

磷虾粉和食品级拉丝粉购于西安当地水族馆。生理盐水(NaCl, 0.9%)、多聚甲醛固定液(PFA,

4%)、乙醇(C₂H₅OH, 75%)和二甲苯(C₈H₁₀, $\geq 9.0\%$)购于阿拉丁试剂有限公司; 聚乙烯微塑料粉末(polyethylene microplastics, PE-MPs)和丁香酚(C₁₀H₁₂O₂, $\geq 99.0\%$)购于北京瑞耀科技有限公司; 苏木精-伊红(HE)染色试剂盒购于北京双智科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

设置空白组为对照组, 喂食不含微塑料的普通鱼食; 设置低浓度组、中浓度组和高浓度组为试验组, 分别喂食含有低浓度、中浓度和高浓度的微塑料鱼食。每个试验组 3 个鱼缸, 每个鱼缸 10 尾鲫鱼。鱼缸大小为长 × 宽 × 高 = 60 cm × 60 cm × 50 cm。采用曝气 24 h 脱氯后的水每隔 1 d 换水一次, 每个鱼缸的换水量不超过总水量的 1/3, 吸取鱼缸底部残留粪便以保证鱼缸水质清洁。每日 09:00 和 17:00 各喂食 1 次, 每次每缸喂食 0.67 g。其他养殖环境和条件与 1.1 节相同。

1.3.2 鱼食的制作

将一定量的磷虾粉、食品级拉丝粉、PE-MPs 和超纯水分别加入到 500 mL 烧杯中, 搅拌均匀后采用小型不锈钢饲料机(梓晴, 中国)将混合物制作成颗粒鱼食, 室温下放置过夜使其自然风干(超纯水不计入摄入量)。不同鱼食的物料配比以及每组鲫鱼的微塑料摄入量如表 1 所示。Ašmonaitė 等^[29]以 10 mg MPs 作为每天每条鱼的摄入量研究微塑料对虹鳟鱼肠道运输的影响。为研究不同微塑料浓度对鲫鱼的影响, 本试验根据已有研究并设置低浓度组、中浓度组和高浓度组这 3 个微塑料暴露浓度, 分别(以 PE-MPs 计)为 6.38、12.18 和 22.33 mg·(鱼·d)⁻¹。

表 1 鱼食的物料配比及微塑料摄入量

Table 1 Material ratio of fish food and intake of microplastics

项目	磷虾粉/g	食品级拉丝粉/g	PE-MPs/g	超纯水/mL	微塑料摄入量(以 PE-MPs 计) /mg·(鱼·d) ⁻¹
对照	40.00	10.00	0.00	25.00	0.00
低浓度	40.00	10.00	2.50	25.00	6.38
中浓度	40.00	10.00	5.00	25.00	12.18
高浓度	40.00	10.00	10.00	25.00	22.33

1.4 检测方法和数据处理

1.4.1 PE-MPs 的表征

采用激光粒度仪(LS13320, Beckman, 美国)测定 PE-MPs 的粒径分布, 粒径检测范围为 0 ~ 2 000 μm; 采用扫描电镜 SEM(GEMINISEM 500, 蔡司, 德国)观察 PE-MPs 的表面形貌。

1.4.2 身长和体重测量

试验开始前随机选取 20 尾鲫鱼测量其身长和

体重; 试验结束后从每个试验组中随机选取 9 尾鲫鱼(即从每个平行鱼缸中随机选取 3 尾鲫鱼)再次测量其身长和体重, 测量后将鲫鱼放回原鱼缸。

1.4.3 肝脏组织学分析

从每个试验组中随机选取 9 尾鲫鱼(即从每个平行鱼缸中随机选取 3 尾鲫鱼), 丁香酚麻醉完全后用 75% 的乙醇擦拭鲫鱼表面进行消毒, 在无菌环境下解剖并完整地取出其肝脏, 用生理盐水冲洗肝

脏表面后立即放入 4% 的多聚甲醛中固定过夜后,委托西安 21 世纪生物科技有限公司进行肝脏组织学的检测. 大致经过冲洗、梯度浓度乙醇脱水、二甲苯透明、石蜡包埋、切片和 HE 染色等步骤,最终得到 HE 染色肝脏切片,并在体视显微镜(TS-200B, SDPTOP, 中国)下观察切片^[15, 30].

1.4.4 肠道微生物组成检测

从每组中随机选取 15 尾鲫鱼(即从每个平行鱼缸中随机选取 5 尾鲫鱼),解剖步骤与 1.4.3 节相同,完整取出其肠道. 用生理盐水冲洗出鲫鱼肠道内容物,并将相同鱼缸中冲洗出的鲫鱼肠道内容物混合放置于 10 mL 离心管中,作为一个平行. 设置离心机的转速为 $8\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 时间 15 min, 离心后在无菌环境下取出沉淀物置于 2 mL 无菌离心管中,液氮速冻后立即送至西安 21 世纪生物科技有限公司进行鲫鱼肠道高通量的委托测试. 大致过程如下:使用 FastDNA[®] SPIN Kit for Soil(MP Biomedicals, 美国)试剂盒提取肠道内容物微生物的总 DNA; 通过琼脂糖凝胶电泳检测基因组 DNA 的完整性,并通过 Nanodrop 2000(10x Genomics, 美国)和 Qubit3.0 分光光度计(Thermo Fisher Scientific, 美国)检测基因

组 DNA 的浓度和纯度; 用引物 341F (5'-CCTACGGGNGGCWGCAG-3') 和 805R (5'-GACTACHVGGGTATCTAATCC-3') 扩增 16S rRNA 基因 V3-V4 区,最后采用 Illumina NovaSeq 6000 测序仪(Illumina, 美国)上机测序^[31].

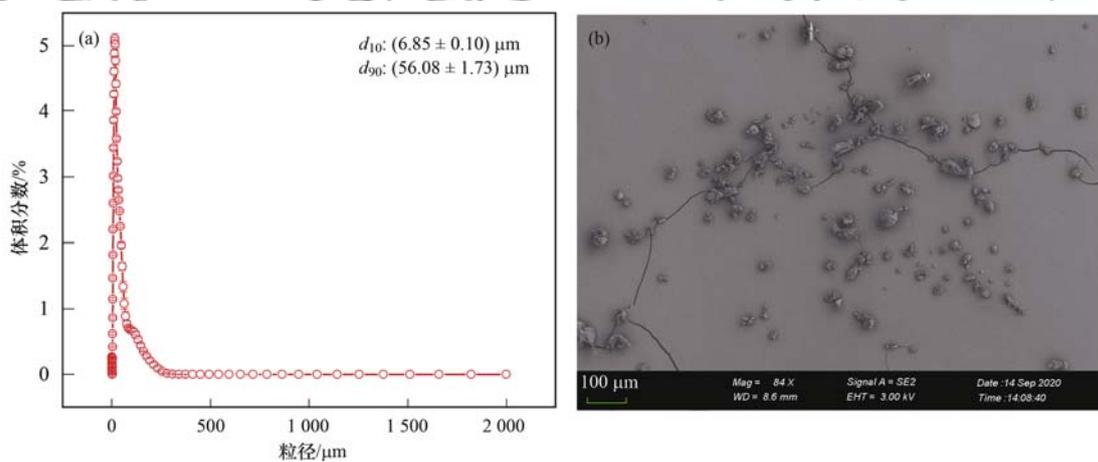
1.4.5 数据处理及分析

本试验采用 SPSS 19.0 进行数据处理及单因素方差分析(One-Way ANOVA), 使用 Origin 2020 进行图表绘制.

2 结果与分析

2.1 PE-MPs 的表征

采用激光粒度仪和扫描电镜对 PE-MPs 进行表征. PE-MPs 的粒径分布如图 1(a)所示, PE-MPs 粉末主要位于 $0\sim 300\ \mu\text{m}$ 的粒径区间内. d_{10} 和 d_{90} 是衡量粉末粒径分布的主要指标,表示小于该粒径的颗粒体积分别占到总体积的 10% 和 90%. 由图 1(a)可知, PE-MPs 粉末中约有 10% 的微塑料粒径 $< 6.85\ \mu\text{m}$, 90% 的微塑料粒径 $< 56.08\ \mu\text{m}$. PE-MPs 粉末的形状为略带棱角的球形或椭球形,大小分布相对均匀[图 1(b)].



(a) PE-MPs 的粒径分布, (b) PE-MPs 的表面形貌

图 1 PE-MPs 的表征

Fig. 1 Characterization of PE-MPs

2.2 鲫鱼身长和体重的变化

本试验前后分别测量鲫鱼的身长和体重,观察鲫鱼的生长变化. 如图 2(a)所示,各试验组中鲫鱼的身长均没有显著差异. 由图 2(b)可知,试验前鲫鱼的平均体重为 4.74 g, 试验后对照组、低浓度组、中浓度组和高浓度组中鲫鱼的平均体重均有所增长,分别为 5.92、6.20、4.97 和 5.59 g. 与对照组相比,低浓度组的鲫鱼体重增加 4.73%, 中浓度组和高浓度组中的鲫鱼体重分别降低 16.05% 和 5.57%, 但与对照组均无显著差异.

2.3 鲫鱼肝脏组织学分析

肝脏是动物体重要的排毒器官^[15]. 图 3 进行了对照组、低浓度组、中浓度组和高浓度组的鲫鱼肝脏组织学分析,便于了解其肝脏损伤和健康状况,其中黑色、绿色、黄色、蓝色和红色三角分别表示胰腺、肝细胞、有核红细胞、白细胞和黑色素巨噬细胞中心. 从中可知,对照组鲫鱼的肝脏组织结构正常,肝细胞胞核较大,可见粉红色胞浆,各类细胞排列整齐紧密,腺泡结构正常;低浓度组鲫鱼的肝脏组织结构基本正常,胰腺可见大量嗜酸性酶原颗粒;

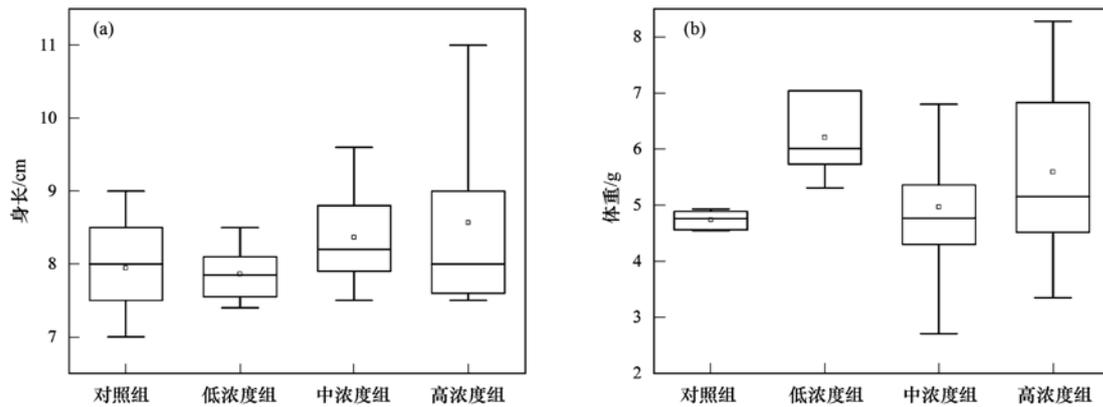
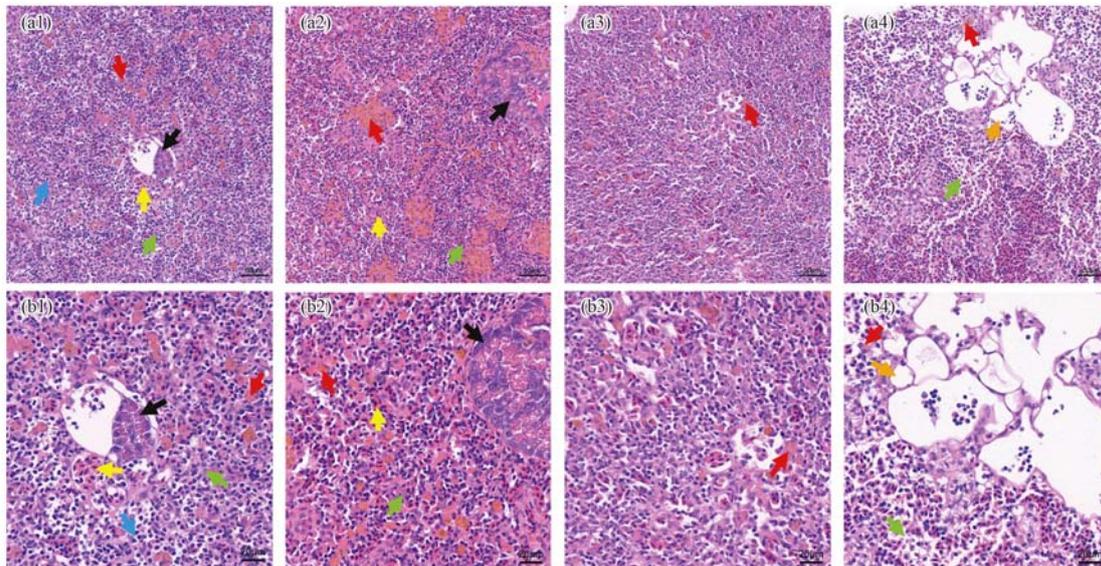


图2 喂食含有不同浓度微塑料鱼食的鲫鱼生长情况

Fig. 2 Growth change of crucians fed with fish food containing different concentrations of microplastics



黑色三角表示胰腺,绿色三角表示肝细胞,黄色三角表示有核红细胞,蓝色三角表示白细胞,红色三角表示黑色素巨噬细胞中心,橘色三角表示空泡;(a)和(b)表示不同放大倍数的肝脏切片,(a1)~(a4)和(b1)~(b4)依次表示对照组、低浓度组、中浓度组和高浓度组

图3 喂食含有不同浓度微塑料鱼食的鲫鱼肝脏组织学分析

Fig. 3 Liver histology of crucians fed with fish food containing different concentrations of microplastics

中浓度组的鲫鱼肝脏组织结构轻度异常,细胞排列较为整齐,黑色素巨噬细胞中心数量减少(红色三角);高浓度组鲫鱼肝脏组织结构重度异常,细胞排列疏松,间隙增大(绿色三角),可见大量空泡(橘色三角),黑色素巨噬细胞中心数量急剧减少(红色三角)。

2.4 鲫鱼肠道微生物的组成

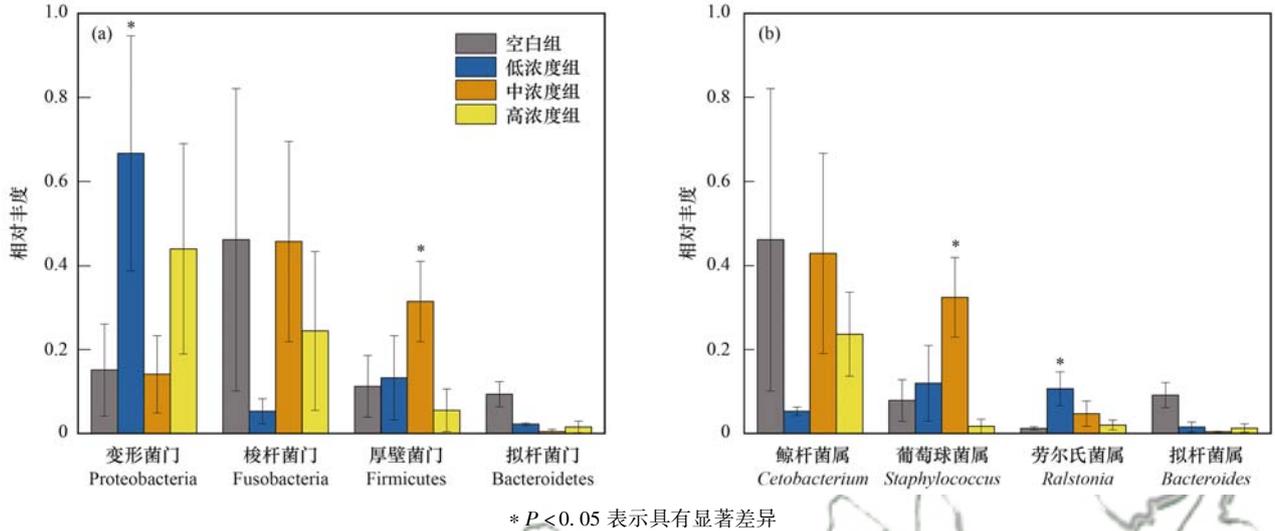
图4给出了喂食不同浓度微塑料的试验组中鲫鱼肠道微生物的变化情况.选择相对丰度较高且具有代表性的4种门水平细菌进行分析,结果表明变形菌门、梭杆菌门、厚壁菌门和拟杆菌门是对照组、低浓度组、中浓度组和高浓度组的优势菌种.由图4(a)可知,对照组鲫鱼肠道中梭杆菌门的相对丰度最高,为46.14%;变形菌门是低浓度组鲫鱼肠道中的最主要菌种,占比为66.69%,且与对照组相

比具有显著差异($P < 0.05$);中浓度组鲫鱼肠道中厚壁菌门的相对丰度明显高于其他组($P < 0.05$);拟杆菌门在不同试验组鲫鱼肠道中的相对丰度呈现出一定的下降趋势.由图4(b)可知,在属水平上,对照组和中浓度组鲫鱼肠道中占比最大的是鲸杆菌属;与对照组相比,中浓度组鲫鱼肠道中葡萄球菌属的相对丰度显著增加($P < 0.05$);劳尔氏菌属在不同试验组中的占比均明显高于对照组,但拟杆菌属的相对丰度略有下降。

α 多样性指数可以通过 Observed species、Chao1、Shannon 和 Simpson 指数进行比较分析. Observed species 和 Chao1 指数用于估计样本中的物种总数,数值越大表示物种丰富度越高;类似地,Shannon 指数越大, Simpson 指数越小说明物种多样性越高.由图5可知,以上4个指数的分析结果表明

高浓度组鲫鱼肠道中的微生物多样性最高,而对照组、低浓度组和中浓度组的菌种丰富度之间没有明显差异.图 6 是不同试验组的主成分分析(PCoA)结

果,从中可知对照组与中浓度组鲫鱼肠道的菌种类最为相似,低浓度组和高浓度组与对照组的差异较大.



* $P < 0.05$ 表示具有显著差异

图 4 鲫鱼肠道微生物组成的变化

Fig. 4 Change in the microbiome composition in crucian gut

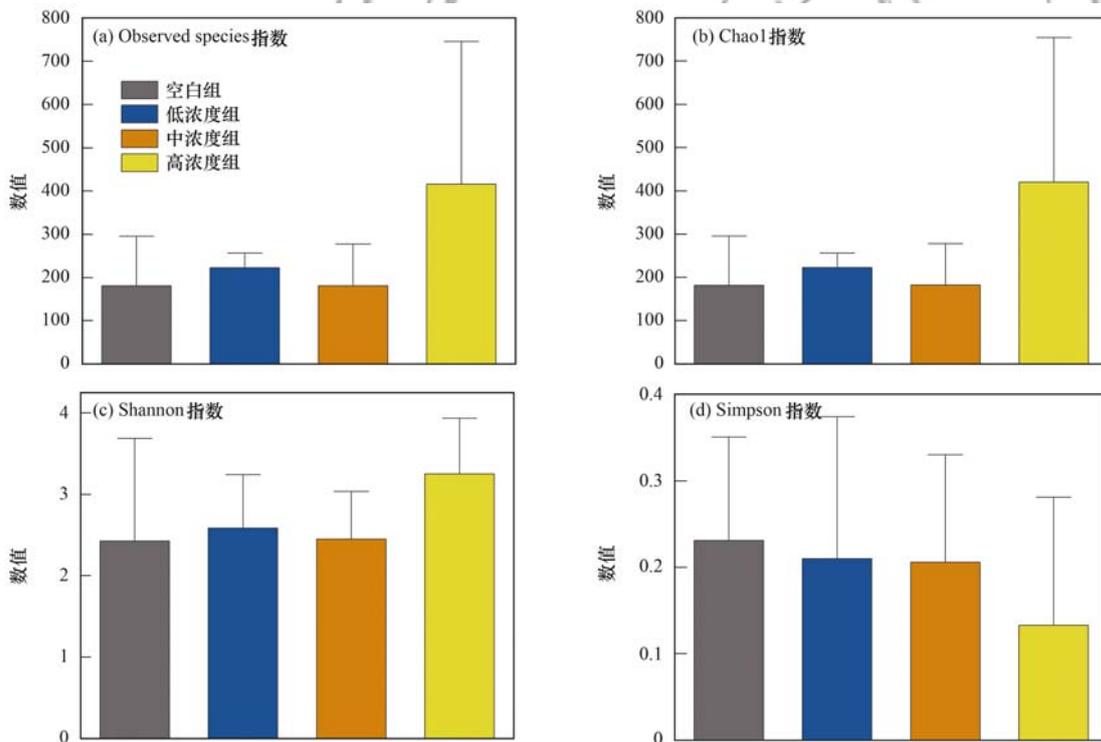


图 5 鲫鱼肠道微生物的 α 多样性分析

Fig. 5 Analysis of α diversity in the gut microbiome of crucians

3 讨论

目前微塑料对鱼类的生长影响研究较少,鱼类的生长主要可用身长和体重进行评估. Yin 等^[32]的研究将聚苯乙烯(polystyrene, PS)荧光微塑料加入鱼缸中,结果发现相比于对照组,14 d 和 21 d 的暴露试验后黑鲮鱼的生长速率显著降低; Zhang 等^[19]

研究了 2、10 和 200 μm 的 PS 微塑料对青鲮鱼的生长影响,结果发现青鲮鱼的身长没有明显变化,但体重有较明显的增加.此外,还有一些研究发现微塑料对鱼类的生长没有显著影响^[17,33].本研究中微塑料的食源暴露试验对鲫鱼的身长改变并不显著,但鲫鱼的体重具有较明显变化.与对照组相比,低浓度组中的鲫鱼体重有所增加,但中浓度和高浓度组中鲫

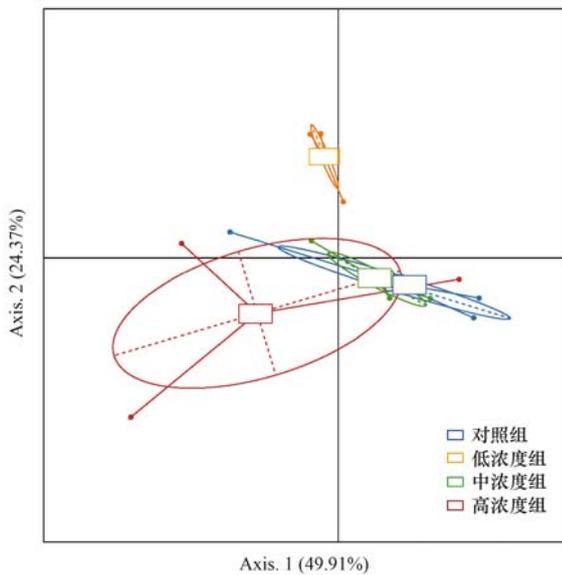


图6 主成分分析 PCoA

Fig. 6 Principal coordinate analysis (PCoA)

鱼的生长速率有所下降, 体重明显减小. 这说明在短期暴露中, 低浓度的微塑料鱼食对鲫鱼的生长具有一定促进作用, 随着鱼食中微塑料含量的增加, 鲫鱼的体重均有所下降, 微塑料会抑制鲫鱼的生长.

肝脏作为生物体的重要排毒器官, 可用于评估微塑料对鱼类的毒性影响^[9,15,34]. Rochman 等^[9]研究了微塑料和污染物对青鳉鱼的复合影响, 结果表明试验组中青鳉鱼出现了严重的肝脏损伤现象. 在本研究中, 微塑料食源暴露试验 30 d 后, 与对照组相比, 低浓度组的鲫鱼肝组织基本正常, 中浓度组和高浓度组的鲫鱼肝脏中黑色素巨噬细胞中心急剧减少. 黑色素巨噬细胞中心对生物体内各种物质的再循环和降解具有重要作用, 其数量减少意味着出现了一定的肝脏损伤^[35]. 不仅如此, 高浓度组的鲫鱼肝脏出现了较大空泡, 肝脏损伤最为严重.

肠道微生物菌群的平衡对人类和动物的健康具有重要的指示作用, 肠道菌群的紊乱可能会增加炎症和疾病发生的风险^[16,18,36,37]. 本研究选择具有代表性的 4 种门水平细菌, 分别是变形菌门、梭杆菌门、厚壁菌门和拟杆菌门. 有研究表明, 变形菌门包括沙门氏菌和霍乱弧菌等病原菌, 较高丰度的变形菌门会引起肠道微生物的紊乱并危害宿主健康^[38,39]. 低浓度组和高浓度组的鲫鱼肠道中变形菌门的相对丰度分别是对照组的 2.93 倍和 4.47 倍, 说明低浓度组和高浓度组中的鲫鱼肠道微生物出现较明显的紊乱现象, 可能会危害鲫鱼的健康并影响其正常生长. 低浓度组、中浓度组和高浓度组的梭杆菌门丰度均有明显下降, 这可能预示着鲫鱼体内维生素的缺乏^[40]. 通常认为厚壁菌门的增加和拟杆

菌门的减少与肥胖症有关^[39,41]. 与对照组相比, 低浓度组中的鲫鱼体重具有明显增长, 与上述 2 种菌群的变化趋势相印证, 说明低浓度组的鲫鱼患肥胖症的概率增加. 另外, 尽管中浓度组的鲫鱼肠道中厚壁菌门和拟杆菌门也有类似的变化趋势, 但在 30 d 的试验时间内其体重反而有所下降. 值得注意的是高浓度组中微生物的群落变化没有低浓度组和中浓度组显著, 这可能是因为该组鱼食中的微塑料浓度较高, 易团聚, 鲫鱼通过粪便排出大部分微塑料颗粒, 因此影响程度不及低浓度和中浓度组. 今后的研究中应增加平行组和暴露时间, 深入分析微塑料进入鲫鱼体内消化道中的残留情况, 以期更加全面地研究鱼类生长和肠道微生物菌群的关系.

在属水平上, 鲸杆菌属是淡水鱼肠道中的优势菌种, 可产生维生素 B12 等营养物质, 对鱼类的生长发育具有重要作用^[42,43]. 与对照组相比, 低浓度组、中浓度组和高浓度组鲫鱼肠道中鲸杆菌属的相对丰度明显下降, 说明微塑料暴露试验后, 鲫鱼的生长受到了不利影响. 此外, 试验组鲫鱼肠道中的葡萄球菌属和劳尔氏菌属的相对丰度显著增加, 这 2 种菌属是典型的致病菌, 说明鲫鱼肠道出现了感染发炎等症状, 与上述结论相互佐证^[39,43~45]. PCoA 分析的结果显示, 对照组、低浓度组、中浓度组和高浓度组鲫鱼肠道中的微生物菌群有较明显的聚类特征, 并且高浓度组鲫鱼肠道中微生物菌群的种类最多. 以上结果说明微塑料的食源暴露试验之后, 鲫鱼的肠道微生物组成发生显著变化, 微塑料的存在增加了鲫鱼的疾病发生风险, 对鲫鱼具有一定的负面影响.

4 结论

(1) 与对照组相比, 微塑料暴露试验后各试验组中鲫鱼的身长没有明显变化, 但低浓度组的鲫鱼体重明显增加, 中浓度和高浓度组的鲫鱼体重有所下降.

(2) 中浓度组和高浓度组的鲫鱼均出现了不同程度的肝脏损伤, 高浓度组的肝脏损伤最为严重.

(3) 微塑料暴露试验组中鲫鱼肠道微生物的组成发生明显改变, 葡萄球菌属和劳尔氏菌属等致病菌出现在试验组的鲫鱼肠道中, 微塑料的存在可能增加了某些疾病发生的风险.

(4) 试验组的鲫鱼肠道微生物具有明显的聚类特征, 其中高浓度组鲫鱼的肠道微生物菌种最为丰富.

参考文献:

[1] Andrady A L. The plastic in microplastics: a review[J]. Marine

- Pollution Bulletin, 2017, **119**(1): 12-22.
- [2] Cole M, Lindeque P, Halsband C, *et al.* Microplastics as contaminants in the marine environment; a review[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(12): 2588-2597.
- [3] Da Costa J P, Santos P S M, Duarte A C, *et al.* (Nano) plastics in the environment-Sources, fates and effects[J]. Science of the Total Environment, 2016, **566-567**: 15-26.
- [4] Pannetier P, Cachot J, Cl randeau C, *et al.* Toxicity assessment of pollutants sorbed on environmental sample microplastics collected on beaches: Part I-adverse effects on fish cell line[J]. Environmental Pollution, 2019, **248**: 1088-1097.
- [5] Wang S D, Zhang C N, Pan Z K, *et al.* Microplastics in wild freshwater fish of different feeding habits from Beijiang and Pearl River Delta regions, south China [J]. Chemosphere, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127345.
- [6] Mohsen M, Wang Q, Zhang L B, *et al.* Microplastic ingestion by the farmed sea cucumber *Apostichopus japonicus* in China [J]. Environmental Pollution, 2019, **245**: 1071-1078.
- [7] 江为群, 胡启武, 简敏菲, 等. 鄱阳湖典型区铜锈环棱螺体内微塑料分布特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2633-2639.
Jiang W Q, Hu Q W, Jian M F, *et al.* Distribution characteristics of Microplastics in *Bellamya aeruginosa* in typical area of Poyang Lake[J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2633-2639.
- [8] Cedervall T, Hansson L A, Lard M, *et al.* Food chain transport of nanoparticles affects behaviour and fat metabolism in fish[J]. PLoS One, 2012, **7**(2), doi: 10.1371/journal.pone.0032254.
- [9] Rochman C M, Hoh E, Kurobe T, *et al.* Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress [J]. Scientific Reports, 2013, **3**, doi: 10.1038/srep03263.
- [10] Rochman C M, Parnis J M, Browne M A, *et al.* Direct and indirect effects of different types of microplastics on freshwater prey (*Corbicula fluminea*) and their predator (*Acipenser transmontanus*) [J]. PLoS One, 2017, **12**(11), doi: 10.1371/journal.pone.0187664.
- [11] 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.
- [12] 张帆, 王壮. 微/纳米塑料对淡水生物毒性、机理及其影响因素研究进展[J]. 生态毒理学报, 2021, **16**(3): 95-106.
Zhang F, Wang Z. Toxicity, mechanism and their impact factors of micro/Nano plastics to freshwater organisms; a review [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, **16**(3): 95-106.
- [13] Qiang L Y, Cheng J P. Exposure to polystyrene microplastics impairs gonads of zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Chemosphere, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128161.
- [14] 赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 等. 微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 485-491.
Zhao J, Rao B Q, Guo X M, *et al.* Effects of microplastics on embryo hatching and intestinal accumulation in larval zebrafish *Danio rerio* [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 485-491.
- [15] Jabeen K, Li B W, Chen Q Q, *et al.* Effects of virgin microplastics on goldfish (*Carassius auratus*) [J]. Chemosphere, 2018, **213**: 323-332.
- [16] Clemente J C, Ursell L K, Parfrey L W, *et al.* The impact of the gut microbiota on human health: an integrative view [J]. Cell, 2012, **148**(6): 1258-1270.
- [17] Feng S B, Zeng Y H, Cai Z H, *et al.* Polystyrene microplastics alter the intestinal microbiota function and the hepatic metabolism status in marine medaka (*Oryzias melastigma*) [J]. Science of the Total Environment, 2021, **759**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143558.
- [18] 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.
- [19] Zhang X, Wen K, Ding D X, *et al.* Size-dependent adverse effects of microplastics on intestinal microbiota and metabolic homeostasis in the marine medaka (*Oryzias melastigma*) [J]. Environment International, 2021, **151**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106452.
- [20] Teuten E L, Rowland S J, Galloway T S, *et al.* Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants [J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(22): 7759-7764.
- [21] Zhu L, Wang H, Chen B J, *et al.* Microplastic ingestion in deep-sea fish from the South China Sea [J]. Science of the Total Environment, 2019, **677**: 493-501.
- [22] Jiang B R, Kauffman A E, Li L, *et al.* Health impacts of environmental contamination of micro- and nanoplastics: a review [J]. Environmental Health and Preventive Medicine, 2020, **25**(1), doi: 10.1186/s12199-020-00870-9.
- [23] 张羽西, 缪爱军. 微塑料对人体健康的影响概述[J]. 南京大学学报(自然科学), 2020, **56**(5): 729-736.
Zhang Y X, Miao A J. The impact of microplastics on human health: A review [J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2020, **56**(5): 729-736.
- [24] Zhang C N, Wang J, Zhou A G, *et al.* Species-specific effect of microplastics on fish embryos and observation of toxicity kinetics in larvae [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **403**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123948.
- [25] Jacob H, Besson M, Swarzenski P W, *et al.* Effects of virgin micro- and nanoplastics on fish: trends, meta-analysis, and perspectives [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(8): 4733-4745.
- [26] Wan Z Q, Wang C Y, Zhou J J, *et al.* Effects of polystyrene microplastics on the composition of the microbiome and metabolism in larval zebrafish [J]. Chemosphere, 2019, **217**: 646-658.
- [27] Ory N C, Gallardo C, Lenz M, *et al.* Capture, swallowing, and egestion of microplastics by a planktivorous juvenile fish [J]. Environmental Pollution, 2018, **240**: 566-573.
- [28] Jovanovi  B, Gokdağ K, G ven O, *et al.* Virgin microplastics are not causing imminent harm to fish after dietary exposure [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, **130**: 123-131.
- [29] A monaite G, Sundh H, Asker N, *et al.* Rainbow trout maintain intestinal transport and barrier functions following exposure to polystyrene microplastics [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(24): 14392-14401.
- [30] Rainieri S, Conlledo N, Larsen B K, *et al.* Combined effects of microplastics and chemical contaminants on the organ toxicity of zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Environmental Research, 2018, **162**: 135-143.
- [31] 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.
- [32] Yin L Y, Chen B J, Xia B, *et al.* Polystyrene microplastics alter the behavior, energy reserve and nutritional composition of marine

- jacopever (*Sebastes schlegelii*) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, **360**: 97-105.
- [33] LeMoine C M R, Kelleher B M, Lagarde R, et al. Transcriptional effects of polyethylene microplastics ingestion in developing zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Environmental Pollution, 2018, **243**: 591-600.
- [34] 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.
- [35] 罗小春. 保肝解毒汤对实验性肝病鳗鲡黑色素巨噬细胞中心的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- Luo X C. Influence of Baogan Jiedu Tang (BJT) on melanomacrophage centers in experimental hepatosiseel (*Anguilla anguilla*) [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015.
- [36] Sharpton T J. Role of the gut microbiome in vertebrate evolution [J]. mSystems, 2018, **3**(2), doi: 10.1128/mSystems.00174-17.
- [37] Yamashiro Y. Gut microbiota in health and disease[J]. Annals of Nutrition & Metabolism, 2017, **71**(3-4): 242-246.
- [38] 郭晶宇, 陈亚然, 毛慧敏, 等. 人乳与牛乳 N-链寡糖组对小鼠肠道菌群的影响[J]. 食品科学, 2022, **43**(1): 127-134.
- Guo J Y, Chen Y R, Mao H M, et al. Effects of N-glycome from human milk and bovine milk on mice intestinal microorganisms [J]. Food Science, 2022, **43**(1): 127-134.
- [39] 麦浩彬, 郭鑫伟, 王金港, 等. 摄食不同水平饲料蛋白质对珍珠龙胆石斑鱼幼鱼肠道组织形态和菌群组成的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2020, **35**(1): 63-70.
- Mai H B, Guo X W, Wang J G, et al. Effects of dietary protein levels on intestinal tract histomorphology and microflora composition in juvenile pearl gentian grouper (*Epinephelus lanceolatus* ♂ × *E. fuscoguttatus* ♀) [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, **35**(1): 63-70.
- [40] Xu K H, Zhang Y D, Huang Y M, et al. Toxicological effects of microplastics and phenanthrene to zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Science of the Total Environment, 2021, **757**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143730.
- [41] Ley R E, Turnbaugh P J, Klein S, et al. Human gut microbes associated with obesity[J]. Nature, 2006, **444**(7122): 1022-1023.
- [42] Li T T, Long M, Gatesoupe F J, et al. Comparative analysis of the intestinal bacterial communities in different species of carp by pyrosequencing[J]. Microbial Ecology, 2015, **69**(1): 25-36.
- [43] 丁红秀, 李忠莹, 刘俊, 等. 不同生境草鱼肠道微生物组成和群落特征分析[J]. 微生物学报, 2021, **61**(3): 729-739.
- Ding H X, Li Z Y, Liu J, et al. Comparison of intestinal microbiome composition and community characteristics of Grass Carp from different habitats [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2021, **61**(3): 729-739.
- [44] Zhang N C, Wang L, Wei Y. Effects of *Bacillus pumilus* on growth performance, immunological indicators and gut microbiota of mice[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2021, **105**(4): 797-805.
- [45] Zhou Y L, He G L, Jin T, et al. High dietary starch impairs intestinal health and microbiota of largemouth bass, *Micropterus salmoides* [J]. Aquaculture, 2021, **534**, doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.736261.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model .....	..... PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method .....	..... WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port .....	..... XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter .....	..... WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019 .....	..... KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan .....	..... WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area .....	..... LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019 .....	..... ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain .....	..... GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an .....	..... ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatio-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data .....	..... WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze .....	..... CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors .....	..... YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period .....	..... JI Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region .....	..... NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake .....	..... HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake .....	..... WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River .....	..... ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff .....	..... ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems .....	..... CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths .....	..... WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin .....	..... LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water .....	..... PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing .....	..... MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition .....	..... HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment .....	..... REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors .....	..... LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater .....	..... YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process .....	..... LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge .....	..... GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 .....	..... XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years .....	..... CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst .....	..... HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt .....	..... ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area .....	..... SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area .....	..... LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China .....	..... WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province .....	..... XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility .....	..... ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan .....	..... LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems .....	..... SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas .....	..... MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment .....	..... LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas .....	..... XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils .....	..... WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil .....	..... XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)