生方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京城区$PM_{2.5}$各组分污染特征及来源分析

安欣欣，曹阳，王琴，富佳明，王陈婧，景宽，刘保献

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年5月
第43卷 第5期
Vol.43 No.5

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第5期
2022年5月15日

目 次

北京城区 $PM_{2.5}$ 各组分污染特征及来源分析 …… 安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)
基于时空混合效应模型的京津冀 $PM_{2.5}$ 浓度变化模拟 …… 范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)
2000~2018年京津冀城市群 $PM_{2.5}$ 时空演变及其与城市扩张的关联 …… 赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 $PM_{2.5}$ 污染特征与来源解析 …… 庹雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王浥铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响:上海典型污染事件的WRF-Chem模拟 …… 张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)
省会城市不同功能区大气 $PM_{2.5}$ 化学组分季节变化及来源分析 …… 孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)
太原市冬季不同污染程度下 $PM_{2.5}$ 的化学组成、消光特征及氧化潜势 …… 任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)
郑州市冬季大气 $PM_{2.5}$ 金属元素来源及健康风险评价 …… 姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)
淄博市冬季 $PM_{2.5}$ 载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析 …… 白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)
承德市 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价 …… 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移 …… 付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青宪, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源 …… 张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)
基于模式过程分析技术天津地区 $PM_{2.5}$ 污染气象成因分析 …… 郝囝, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)
基于排放量和大气反应活性的VOCs污染源分级控制 …… 陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征 …… 菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)
基于前体物多情景排放的兰州市2030年夏季臭氧预测 …… 陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李泱, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进 …… 蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法 …… 石耀鹏, 胡京南, 褚旸晰, 段菁春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)
重污染天气应对"绩效分级、差异化管控"措施首次实践效果后评估 …… 曾景海, 王灿 (2436)
黄河流域水污染风险分区 …… 周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征 …… 李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价 …… 王韬轶, 潘保柱, 韩谞, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)
APCS-MLR结合PMF模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 …… 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)
河流底泥DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系 …… 肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析 …… 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 荀奎贤, 王春玲 (2500)
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性 …… 胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)
富营养化驱动下西凉湖百年来生态系统演化轨迹 …… 郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)
基于DGT技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析 …… 马玉珅, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析 …… 张彦, 邹磊, 梁志杰, 窦明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦(*Eichhornia crassipes*)对水体微塑料的吸附截留效应 …… 李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价 …… 刘舒娇, 丁剑楠, 石浚哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储存量 …… 姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示 …… 蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析 …… 李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李肖乾, 郑娜 (2586)
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变 …… 薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响 …… 李汶璐, 王志超, 杨文焕, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂向分布特征及群落构建 …… 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响 …… 高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)
鄱阳湖典型区铜锈环棱螺体内微塑料分布特征 …… 江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO_2-Sb-Ni 电极电催化氧化双酚A …… 符远航, 刘安迪, 黄纬斌, 唐柏彬, 张进忠 (2640)
磁性 $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$@SiO_2 催化 H_2O_2 降解亚甲基蓝效能及机制 …… 徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响 …… 蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)
AMD污泥复合材料吸附As(Ⅴ)的机制及其影响因素 …… 张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张予豪 (2673)
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响 …… 卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析 …… 李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析 …… 张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价 …… 陈航, 王颖, 王澍 (2719)
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响 …… 周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)
两种油菜配施水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤 …… 孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊姆, 刘杰 (2741)
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测 …… 王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年际变化特征 …… 徐曼, 高明, 余泺, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价 …… 邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响 …… 申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响 …… 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素 …… 何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响 …… 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献 …… 李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)

《环境科学》征订启事(2293) 《环境科学》征稿简则(2426) 信息(2585, 2672, 2708)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第43卷第5期 2022年5月
Vol.43,No.5 May,2022

骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储存量

姚明轩[1], 白雪[1,2*], 徐振佳[1], 李凤杰[1], 陆滢[1], 李畅[1], 华祖林[1,2]

(1. 河海大学环境学院, 南京 210098; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098)

摘要: 为探求骆马湖表层沉积物微塑料的分布特征, 于2019年夏季和2021年冬季收集了20个采样点的样品,使用光学显微镜观察微塑料特征并分类,使用傅里叶变换红外显微镜光谱仪鉴定其聚合物成分,使用扫描电子显微镜分析其表面形态. 结果表明,骆马湖夏季和冬季沉积物微塑料的丰度平均值为(513±201) n·kg^{-1}和(528±263) n·kg^{-1}. 总体而言, 60~500 μm、纤维、透明和聚乙烯微塑料占比最高,表层沉积物微塑料的储存量分别为111.20 t(9月)和74.16 t(1月). 结果发现,夏季人工泄洪后,闸后小尺寸微塑料的比例均高于闸前30%以上,证明水流剪切力是加速微塑料破碎的驱动力. 开始调水后,上游的微塑料丰度平均值从705 n·kg^{-1}下降到653 n·kg^{-1},而下游则从530 n·kg^{-1}增加到740 n·kg^{-1}. 上游沉积物中消失的是较小和较轻的塑料颗粒,如聚乙烯和聚丙烯. 它们随着水流在上游表层沉积物中再悬浮,迁移至下游,并再次沉降. 通过探讨人工泄洪和调水对蓄水湖表层沉积物微塑料分布的影响,为人工调控下微塑料的环境行为提供新的证据.

关键词:骆马湖; 表层沉积物; 微塑料; 环境行为; 人工泄洪; 调水工程

中图分类号: X524 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)05-2566-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202108270

Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake

YAO Ming-xuan[1], BAI Xue[1,2*], XU Zhen-jia[1], LI Feng-jie[1], LU Ying[1], LI Chang[1], HUA Zu-lin[1,2]

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China)

Abstract: In the summer of 2019 and the winter of 2021, surface sediments from 20 sampling sites were collected from Luoma Lake. An optical microscope was used to observe and classify the microplastics. A microscope Fourier transform infrared spectrometer was used to identify the polymer composition, and a field emission scanning electron microscope was used to analyze the surface morphology. The results showed that the average abundances of microplastics in Luoma Lake sediments were (513±201) n·kg^{-1} and (528±263) n·kg^{-1}. Overall, 60-500 μm fiber, transparent, and polyethylene microplastics accounted for the highest proportion. The storages of surface sediment microplastics were 111.20 t (September) and 74.16 t (January). After the artificial flood discharge, the proportion of small-sized microplastics behind the sluice was over 30% higher than that in front of the sluice, showing that hydrodynamic shear stress was the driver accelerating microplastic degradation. The average abundance of microplastics upstream of the water transfer route decreased from 705 n·kg^{-1} to 653 n·kg^{-1} after the water transfer, whereas the downstream increased from 530 n·kg^{-1} to 740 n·kg^{-1}. According to the microscope observation and polymer identification, the disappeared microplastics upstream were the smaller particles and lighter polymers like polyethylene and polypropylene. They resuspended from the surface sediments with the current, migrated from upstream to downstream, and resettled. The effects of artificial flood discharge and water transfer on the distribution of microplastics in the surface sediments of the impounded lake were investigated, providing new evidence for the environmental behavior of microplastics under artificial regulation.

Key words: Luoma Lake; surface sediment; microplastic; environmental behavior; artificial flood discharge; water transfer

塑料具有低成本且多功能的特点,在过去几十年中被广泛应用,据 Plastics Europe 发布的报告显示[1], 2019年全球塑料产量已达3.7×10^8 t,超过大多数人造材料[2]. 到2025年,估计有192个国家或地区因管理不善而产生最高达2.5×10^8 t的海洋塑料垃圾[3],而大块塑料在自然环境下会破碎成微米甚至纳米级别的塑料碎片. 微塑料通常被定义为尺寸小于5 mm的塑料颗粒,由于降解缓慢和在环境中的持久性[4],微塑料容易长时间暴露在水体中并和水生生物相互作用[5],造成潜在的生态威胁[6~8].

内陆淡水是微塑料进入海洋的重要途径[4],该领域一直是微塑料的研究重点. 由于其持续积累,湖泊成为淡水系统中微塑料的主要"汇"[9]. 对于一些特定的水体,如水交换频繁的浅水湖泊,沉积物比地表水更能反映微塑料长期的污染水平[10]. 此外,水库或大坝等特殊水工结构可能是微塑料积累的热点,水流冲击[11,12]、非点源污染[13]和人工洪水[14]能改变微塑料的运输和迁移行为,因此探究人为影响下微塑料的分布特征和环境行为有着重要意义.

骆马湖是换水频繁的人工调控湖泊,截至2021年4月,南水北调东线工程已向中国北方地区调水超过4.9×10^9 t[15],而骆马湖是东线工程的重要节点,年调水量巨大. 除了长达半年的调水期外,骆马湖的主要支流还具有泄洪、灌溉等功能,进出水频

收稿日期: 2021-08-24; **修订日期**: 2021-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(21876044); 国家自然科学基金重点项目(51739002); 中央高校基本科研业务费专项(B200202110)

作者简介: 姚明轩(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为淡水湖泊微塑料的分布特征和环境行为效应, E-mail: 191305020066@hhu.edu.cn

* 通信作者,E-mail:baixue@hhu.edu.cn

繁. 骆马湖的上游是拥有稠密人口和发达工业的长江流域[16]，存在大量未妥善处置的塑料垃圾，长江和支流地区微塑料污染严重[17]，但大规模的调水工程对沿线城市湖泊带来的环境风险和对微塑料环境行为的影响仍缺乏调研数据. 本研究阐明了骆马湖表层沉积物微塑料的丰度、特征和时空分布，计算其储存量，通过探讨人工泄洪和调水对表层沉积物微塑料分布特征的影响，以期为人工调控下微塑料的破碎和迁移行为提供新的证据.

1　材料与方法

1.1　研究区域

骆马湖是位于中国江苏省的城市浅水湖泊，南北长约 27 km，东西宽约 20 km，水域面积 260 km^2. 作为淮河流域第三大湖泊，骆马湖是宿迁市和徐州市数百万居民的重要饮用水源[16]，具有防汛抗旱的功能，同时带动了当地渔业、水产养殖和旅游业的兴旺[18].

1.2　样品采集

本研究从骆马湖收集了 20 个采样点的表层沉积物，深度为 0 ~ 3 cm，点位布设如图 1 所示，根据当地土地总体规划将采样点划分为自然保护区、工业区、旅游区、渔业养殖区和农田区. 非调水期采样日期为2019 年 9 月，调水期采样日期为 2021 年 1 月，其间有持续半年的大规模调水. 样品储存在装满干冰的容器中，采样当日运送至实验室作进一步分析.

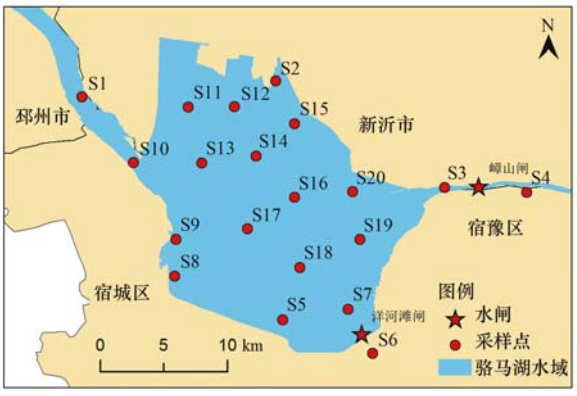


图 1　骆马湖的地理位置和采样点分布示意

Fig. 1　Geographical location and sampling sites of Luoma Lake

1.3　样品处理

沉积物样品在 −50℃ 下冷冻干燥后通过 5 mm 不锈钢网粗筛. 取 50 g 样品置于 250 mL 烧杯中，加入 150 mL 饱和氯化钠溶液，磁力搅拌 10 min 后静置沉降 12 h 以上. 收集上清液并在真空下通过滤纸（Whatman GF/B glass microfiber，Britain），将滤后颗粒冲洗至烧杯中. 以上分离过程重复 3 次后，将样品置于 60 mL 30% 过氧化氢中，在 65℃ 下消解 8 h 以上，充分降解有机物以避免植物纤维对显微镜观察的干扰[19]. 再次真空过滤后，将滤纸转移到培养皿中并在室温下干燥.

1.4　样品分析

在光学显微镜（Leica DM2500 & DM2500 LED，Leica Corporation，Germany）下目视检查滤纸上的所有颗粒，将观察到的颗粒根据形状、颜色和尺寸分类计数. 通过傅里叶变换红外显微镜光谱仪（Spotlight 200i，PerkinElmer，US）以 16 次扫描的速率识别疑似塑料颗粒，光谱范围为 4000 ~ 650 cm^{-1}，分辨率为 8 cm^{-1}，鉴定结果对比谱库验证，匹配分数超过 80% 则确定为塑料成分. 使用扫描电子显微镜（SU8220，Hitachi，Japan）分析微塑料的表面形态.

1.5　储存量计算

本研究参考了 Cai 等[20] 关于南海海水微塑料储存量的研究成果，其通过单位体积海水微塑料含量推算至水域储存量，本研究将该计算原理应用到由单位质量沉积物的微塑料丰度推算至湖泊沉积物的储存量. 同时，基于形状差异（纤维、薄膜和微球）估算单个微粒体积和质量，结合各形状微塑料占比计算单位沉积物的微塑料储存量，计算过程如下：

$$S = \sum M_i \times \rho_i \times A_i \times h \qquad (1)$$

式中，S 为骆马湖表层沉积物微塑料的质量储存量；i 为骆马湖水域分区，骆马湖渔业和水路运输活动主要集中于徐州市境内即骆马湖北部[21]，同时基于文献[22]中区域名录和实地调研情况发现，骆马湖南部宿迁境内多为饮用水源地保护区、渔业繁殖保护区和湿地，人类活动较少，故将骆马湖水域划分为渔业养殖区和禁渔区；M_i 为分区 i 单位沉积物的微塑料质量；ρ_i 为分区 i 沉积物的密度；A_i 为分区 i 的水域面积；h 为沉积物采样深度，取 3 cm.

$$M_i = \sum \rho_0 \times n_{ij} \times V_{ij} \qquad (2)$$

式中，ρ_0 为微塑料密度，参考 Sui 等[23] 将桑沟湾主要聚合物成分的平均密度作为微塑料密度的计算方法，此处取值为骆马湖沉积物中检测出常见塑料类型即聚乙烯（0.96 $g\cdot cm^{-3}$）和尼龙（1.00 $g\cdot cm^{-3}$）的平均密度为 0.98 $g\cdot cm^{-3}$；j 为微塑料形状类型；n_{ij} 为分区 i 单位沉积物中第 j 种微塑料的数量；V_{ij} 为分区 i 第 j 种微塑料的单个微粒体积，在显微镜下观察纤维呈细长条状，薄膜呈厚度小的圆扁平状，碎片（微球）呈规则或不规则球体，故将其概化为窄底圆柱体、宽底圆柱体和球体，其中纤维和薄膜厚度

均按实际观测值 8 μm 估算,长度或直径按观测尺寸的平均值估算.

$$N = \sum C_i \times \rho_i \times A_i \times h \quad (3)$$

式中, N 为骆马湖表层沉积物微塑料的数量储存量; C_i 为分区 i 的微塑料丰度平均值.

1.6 质量控制

考虑到微塑料提取过程中的污染,本实验采取严格的预防措施,所有玻璃容器均经超声清洗,并用铝箔覆盖. 实验后检查纯水洗涤过滤后的 3 个空白滤纸以量化污染,在空白滤纸中发现 1 ~ 3 根纤维并鉴定为羊毛,表明实验室的污染可以忽略不计.

1.7 数据处理

所有数据使用 Origin 2019 进行分析,微塑料的时空分布通过 Arc GIS 10.2 进行可视化,使用 CANOCO 5 的典型关联分析评估环境变量和微塑料成分之间的关系[24].

2 结果与分析

2.1 微塑料的丰度分布

本研究在骆马湖的 20 个采样点发现了 477 个和 338 个微塑料,丰度平均值在 120 ~ 1 000 n·kg^{-1} 之间. 9 月微塑料丰度平均值为(513 ± 201) n·kg^{-1},低于 1 月的(528 ± 263) n·kg^{-1}. 如图 2 所示,和其他土地类型相比,工业区、旅游区和农田区发现了较高的微塑料丰度. 位于工业区的 S11 微塑料丰度平均值在 9 月为 850 n·kg^{-1},在 1 月为 720 n·kg^{-1},邳州市工业区和附近的农业排水可能是其污染源[25]. 旅游区的微塑料丰度平均值为 515 n·kg^{-1}和 580 n·kg^{-1},农田用地则为 572 n·kg^{-1}和 730 n·kg^{-1},均高于自然保护区的 392 n·kg^{-1}和 306 n·kg^{-1}.

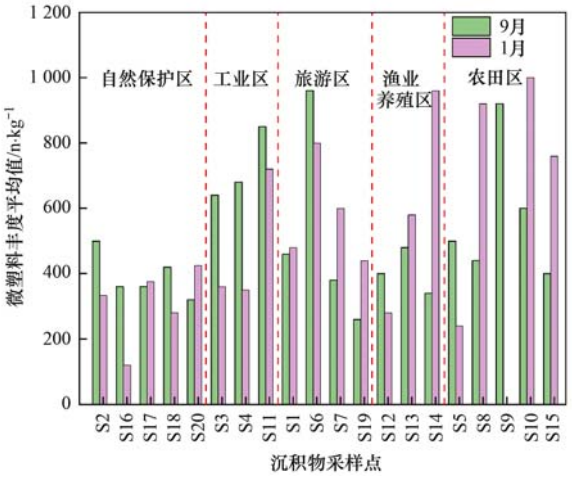


图 2 骆马湖采样点和功能区表层沉积物中微塑料丰度

Fig. 2 Abundance of microplastics in surface sediments at sampling points and functional areas of Luoma Lake

2.2 微塑料的形态特征

2.2.1 微塑料的尺寸分布

骆马湖表层沉积物微塑料尺寸以 60 ~ 500 μm 为主,其占比在 9 月为 58.7%,在 1 月为 51.1%. 9 月是人工泄洪的重要时期,大块塑料更容易发生破裂,因此出现小粒径微塑料的可能性更高. 如图 3 所示, 9 月嶂山闸前 S3 的小粒径微塑料(<1 mm)占比为 34.38%, 闸后 S4 处这一占比则增加到 79.41%,而大粒径微塑料(>3 mm)则从 37.5% 减少到 2.94%. 洋河滩闸小粒径微塑料占比则从闸前 S7 的 63.16% 增加到闸后 S6 的 93.75%,大粒径微塑料从 5.26% 减少到 0. 据骆马湖水利管理局和骆运水利工程管理处提供的水闸运行资料显示,泄洪期间两座水闸的流量平均值分别为 254 m^3·s^{-1}和 39.5 m^3·s^{-1}. 结果表明,水闸流量越大,闸后小粒径微塑料增加的比例则越大. 相比之下,冬季缺水的嶂山闸前后微塑料的粒径分布几乎相同,水流剪切力带来的微塑料破碎效应得到了削弱.

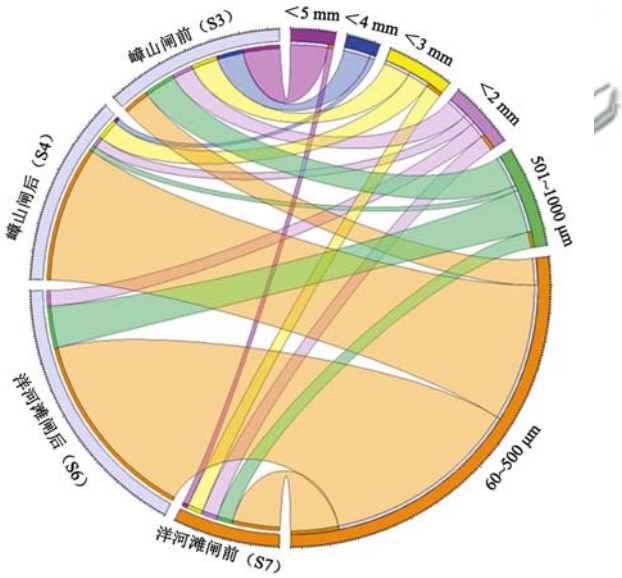


图 3 夏季嶂山闸和洋河滩闸前后微塑料粒径分布

Fig. 3 Microplastic size distribution in front of and behind Zhangshan sluice and Yanghetan sluice in summer

有研究指出,人工洪水后下游微塑料的尺寸更小且数量更多[14],急流打碎了大块塑料并增加了小颗粒塑料的比例,这和骆马湖闸后微塑料粒径更小的发现相一致. 如图 4 所示,骆马湖沉积物微塑料的扫描电镜图表明位于泄洪河道的站点(S3 和 S4)比湖心站点(S14)具有更复杂更粗糙的表面形态特征,划痕更多,碎片的脱落更加明显,这进一步证明泄洪会加速微塑料的机械磨损和破碎.

2.2.2 微塑料的形状分布

骆马湖表层沉积物中检测到 4 种不同形状的微塑料. 总体而言,纤维最常见,其占比在 9 月为

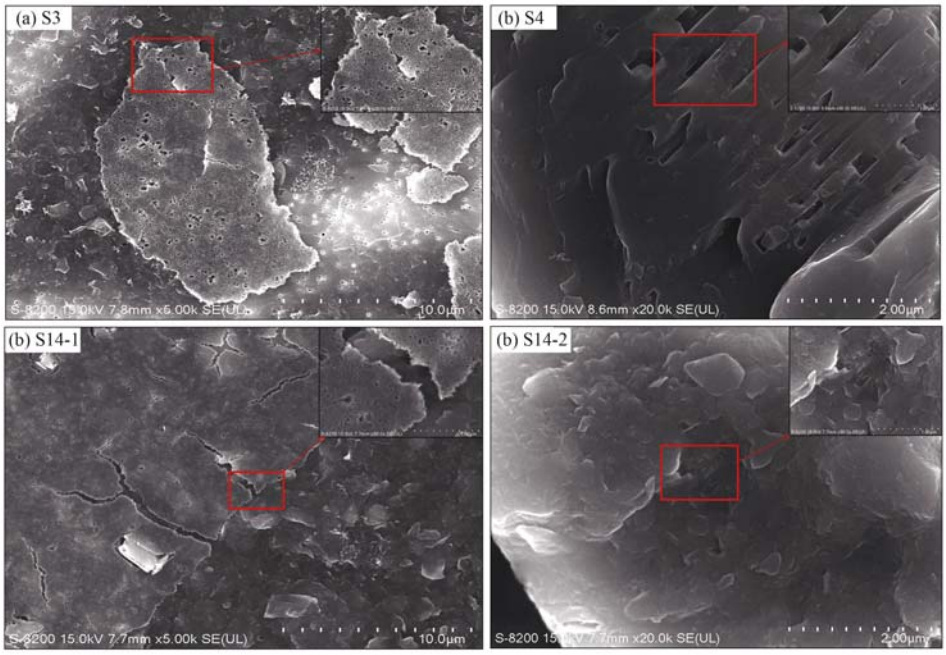


图 4　骆马湖不同采样点沉积物中微塑料的扫描电子显微镜图像

Fig. 4　Scanning electron microscope images of microplastics in the sediments of different sampling points in Luoma Lake

45.07%,在 1 月为 43.20%,其次是碎片、薄膜和小球. 在水产养殖区的纤维中, 1 月大尺寸纤维(>2 mm)的比例比 9 月高 40.17%,而小尺寸纤维(<500 μm)在禁渔区所占比例很高,其占比在 9 月为 16.92%,在 1 月为 35.48%. 根据 Wang 等[26]提出的"微塑料特定源分类系统",小尺寸纤维来自人口稠密地区服装纤维的脱落,大尺寸纤维则是渔网和渔绳的断裂,且往往是透明的. 因此,冬季水产养殖区更活跃的渔业活动和南部城区的生活污水排放是造成纤维尺寸分布差异的重要原因.

2.2.3　微塑料的颜色分布

沉积物中微塑料大部分是透明的,其 9 月占比在 48%~100%之间, 1 月占比在 34.48%~100%之间. 此外,蓝色和红色微塑料是最常检测到的,其中大部分来自废弃渔线和污水厂排放的衣物纤维. 有研究发现,白色塑料由于长期暴露于自然环境中而趋于变成淡黄色[27]. 因此,在通过白色、透明和淡黄色作为颜色依据来识别微塑料时,存在由塑料变色而引起的丰度高估风险.

2.2.4　微塑料的聚合物成分

本研究筛选出 402 个颗粒并进行鉴定,占总数的 49.33%,典型微塑料样品的光镜图和显微红外光谱如图 5 所示. 除人造丝和纤维素很少被算作塑料外,骆马湖沉积物微塑料主要成分为聚乙烯、尼龙、聚四氟乙烯和聚对苯二甲酸乙二醇酯,占比分别为 22.89%、9.20%、8.71% 和 7.21%. 从时间分布来看(图 6),调水期的聚乙烯占比下降,聚对苯二甲酸乙二醇酯比例几乎不变,尼龙和聚丙烯则增加了一倍.

3　讨论

3.1　骆马湖微塑料丰度和污染特征

骆马湖 9 月的沉积物微塑料丰度略低于 1 月,有研究认为雨季充沛的降水会增加河流流量,导致微塑料丰度降低[28],骆马湖的嶂山闸在夏季成为泄洪通道,而水动力不足的冬季则使得微塑料更有可能沉降至沉积物表面. S11 有较高的微塑料丰度平均值,除了可能存在的工业污染源外,封闭的水域也会导致微塑料聚集,这和先前研究发现半岛环流削弱了水交换,加快微塑料富集的现象相似[10,29]. 旅游区的高丰度微塑料反映了地区微塑料和人类娱乐活动之间的相关性,青岛沙滩的研究也得到了类似结论[30,31]. 而农耕使用的塑料制品如地膜和大棚则是农业用地微塑料污染水平高的成因,青藏高原、丹江口水库支流河和汾河的调研证实了农田对微塑料的污染贡献[32~34]. 骆马湖沉积物微塑料丰度和其他淡水湖泊的比较见表 1,其丰度平均值高于中国的太湖、鄱阳湖和雨山湖. 骆马湖周围有 9 个城镇和数百万人口,邳州工业区和宿迁化工园区也位于湖岸[16],人类活动远比其他地方频繁,潜在污染源更多. 尽管有研究称污水处理厂对微塑料的去除率高达 90%[35],但污水的大量排放仍使得骆马湖微塑料污染处于较高水平. 因此,人口密集的城市和频繁的人类活动是骆马湖微塑料丰度高的重要原因.

为解释土地利用类型、经济发展水平、人口和地理位置等环境变量对湖岸微塑料特征的影响,本

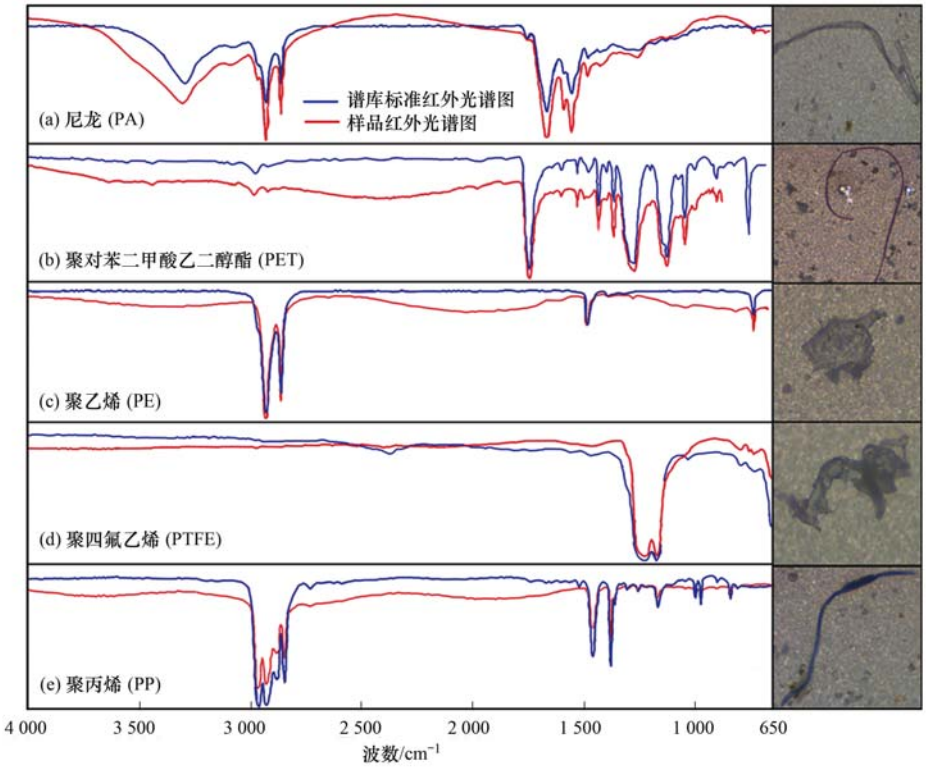
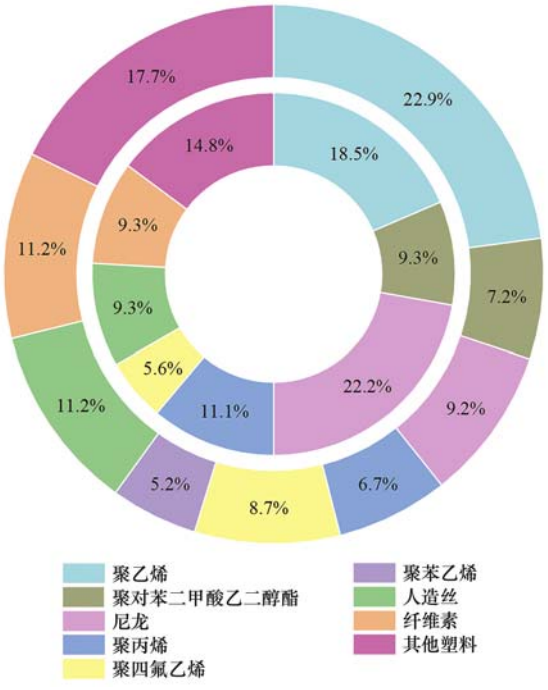


图 5 典型微塑料样品光镜及其对应的红外光谱图

Fig. 5 Typical optical microscope pictures and infrared spectra of selected microplastic samples

研究进行了典型的关联分析(如图 7). 如果微塑料不同形状占比(实心)和环境变量(空心)的夹角是锐角,则证明它们之间存在正相关,且锐角越小,相关性越高. 在排除部分解释度较小的因素后,结果表明 1 月自然用地面积和碎片微塑料间呈正相关,农业用地和旅游用地面积和薄膜微塑料占比呈正相关,同样的结论也适用于 9 月旅游用地和薄膜微塑料之间的关系. 有研究表明农耕作业者通常不会从农田中清理塑料覆盖物,且消耗的地膜数量和土壤中的塑料残留量之间存在显著线性关系[41]. 大部分留在田间的覆盖物分解为微塑料,这解释了农田用地薄膜微塑料的高丰度. 同时,在靠近景区的湖岸搜集到塑料包装废弃物经鉴定为聚乙烯,和大部分薄膜微塑料的成分一致,证明了人类丢弃的包装袋是薄膜微塑料的来源. 因此,土地利用类型如农业和旅游用地会影响湖岸微塑料的形状分布.

聚乙烯是骆马湖沉积物微塑料的主要成分,其占比在 9 月为 22.89%,在 1 月为 21.35%. 在长江下游城市中,除聚丙烯外,聚乙烯是地表水中最常见的微塑料类型[17],并且有可能通过调水工程迁移至骆马湖中. 聚对苯二甲酸乙二醇酯常用于制造饮料容器和包装材料,其纤维用于服装编织. 和低质量且小体积的尼龙相似,聚对苯二甲酸乙二醇酯较高的密度使其更容易沉降. 聚四氟乙烯的制品通常用作电线的绝缘层和耐腐蚀的绝缘部件,在骆马湖发现的聚四氟乙烯微塑料超过半数集中在宿迁化工园区的 S3 和 S4,其中涉及化工新材料生产的高污染企业可能是造成微塑料污染的潜在来源.



内环表示调水期,外环表示非调水期

图 6 调水期和非调水期骆马湖沉积物微塑料聚合物组成分布

Fig. 6 Distribution of microplastic polymer composition in the sediments of Luoma Lake during the water transfer period and non-water transfer period

表 1　全球湖泊沉积物中微塑料的分布

Table 1　Distribution of microplastics in lake sediments worldwide

地点	主要微塑料类型	丰度平均值/n·kg^{-1}	文献
太湖，中国	100 ~ 333 μm，纤维和玻璃纸	11.0 ~ 234.6	[36]
鄱阳湖，中国	<0.5 mm，纤维、聚乙烯和聚丙烯	54 ~ 506	[9]
雨山湖,中国	<1 mm，纤维、聚乙烯和聚丙烯	278.9 和 277.1	[37]
洞庭湖，中国	<0.5 mm，纤维和聚对苯二甲酸乙二醇酯	180 ~ 693	[38]
维多利亚湖，乌干达	300 ~ 1 000 μm，碎片和聚乙烯	0 ~ 108	[39]
牛轭湖，尼日利亚	微球和聚对苯二甲酸乙二醇酯	347 ~ 4 031 和 507 ~ 7 593	[40]
骆马湖，中国	60 ~ 500 μm，纤维、聚乙烯和尼龙	513 和 528	本研究

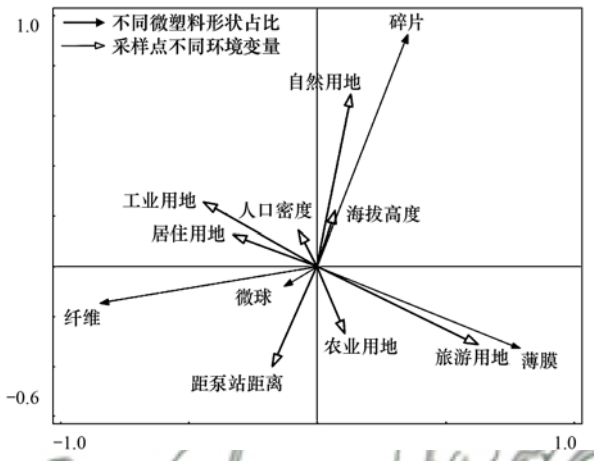


图 7　1 月环境变量和微塑料成分典型的关联分析

Fig. 7　Canonical correspondence analysis of environmental variables and the microplastic composition in January

3.2　骆马湖表层沉积物微塑料的储存量

尽管 Cai 等[20]关于微塑料储存量的计算原理对淡水湖泊的底泥适用，但在计算单位海水微塑料的含量时，缺少对微塑料体积和质量差异的考量，得到的数据在一定程度上和实际情况存在偏差. 基于此，本研究根据形状估算单个微粒体积，对微塑料储存量的计算方法进行改进，估算出骆马湖单位沉积物的微塑料质量为 0 ~ 30.27 mg·kg^{-1}，这和 He 等[42]研究中的 0.18 ~ 129.20 mg·kg^{-1}和 Reineccius 等[43]研究中的 0 ~ 39 μg·(10 g)$^{-1}$仅相差一个数量级. 经计算，骆马湖表层沉积物中微塑料的储存量分别为 111.20 t(9 月)和 74.16 t(1 月)，分别相当于 5.67×10^{12}个和 5.42×10^{12}个.

骆马湖沉积物微塑料的储存量低于桑沟湾的 183.73 t[23]，造成这种差异的原因有两个. 首先，虽然骆马湖有着远大于桑沟湾的 260 km^2 水域面积，但其禁渔区或自然保护区面积超过一半，且春季有长达 5 个月的禁渔期. 而桑沟湾一直是中国最重要的水产养殖区之一，因此骆马湖的渔业活动远不如桑沟湾活跃. 其次，作为南水北调东线工程上重要的蓄水湖，骆马湖进出水频繁，水流运动增加了微塑料迁移的可能性. 另外，本研究建议以微塑料的单位储存量而不是总量作为衡量微塑料储存水平的指标，以便不同地区之间的比较. 如表 2 所示，桑沟湾沿海水域的微塑料单位储存量最高，而这一区域更接近人类集中生活的城市[23]，且数据表明港口运输业和渔业繁荣的中国台湾省高雄港也显示出较高的微塑料单位储存量[44]. 在本研究中，禁渔区的微塑料单位储存量低于养殖区，这是因为大量的水产养殖用具、渔具和人为丢弃的塑料垃圾进入湖中[45~47]，人类的渔业活动加剧了养殖区的微塑料污染，极大地影响了微塑料的分布特征.

表 2　来自其他研究的沉积物中微塑料的储存量数据

Table 2　Storage of microplastics in the sediments from other studies

地点	类型	采样深度/cm	质量储存量/t	单位储存量/t·km^{-2}	文献
桑沟湾,中国	海湾中心	0 ~ 2	100.05	1.34	[23]
	沿海水域		51.54	1.37	
	湾口		31.34	0.84	
台湾省西南海岸,中国	高雄港	0 ~ 5	4.8	0.48	[44]
	沿海地区		5.3	0.07	
骆马湖,中国	渔业养殖区	0 ~ 3	48.45	0.62	本研究
	禁渔区		44.23	0.24	

3.3　调水工程对骆马湖表层沉积物微塑料的影响

本研究沿骆马湖西岸的调水路线设置了 6 个采样点，包括 4 个上游站点(S5、S6、S8、S9)和 2 个下游站点(S1、S10)，以探究调水期和非调水期微塑料分布特征的差异性. 作为南水北调东线工程的水利枢纽，皂河泵站的抽水加剧了水力扰动，被带动的水流会在泵站下游连续冲刷一定距离的沉积物表面. 如图 8 所示，开始调水后上游沉积物中微塑料的丰度平均值从 705 n·kg^{-1}下降到 653 n·kg^{-1}，而下游从 530 n·kg^{-1}增加到 740 n·kg^{-1}. 这表明尽管调水

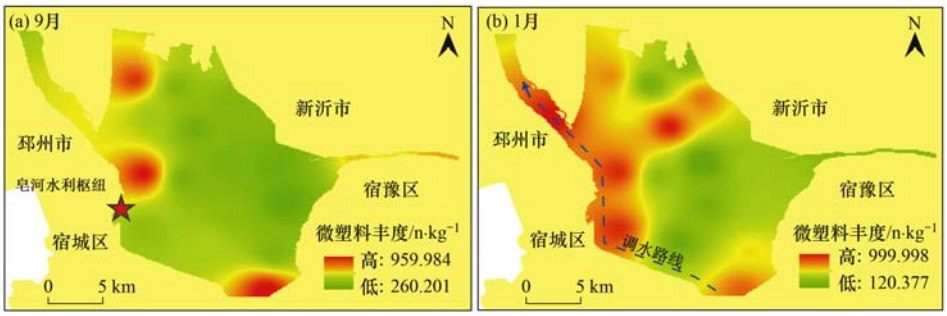


图 8 不同时期骆马湖沉积物中微塑料丰度和空间分布

Fig. 8 Abundance and spatial distribution of microplastics in Luoma Lake sediment during different periods

工程使得表层沉积物微塑料有向北迁移的风险,但在到达下一个泵站前实现了再沉降. 有研究发现经过开坝造成的人工洪水后,在远离大坝的地表水中检测到较高浓度的微塑料[13],这和骆马湖中微塑料的迁移规律是一致的.

骆马湖西北部的 S1 和 S10 距离泵站较远,缺少允许输送微塑料的流体动力条件[48, 49]. 泵站带来的水流冲刷了上游表层沉积物,促使其成为释放微塑料的"源". 随着和泵站距离的增加,水流的动能逐渐减弱,流速降低,下游沉积物成为微塑料的"汇". 本研究对调水路线上 6 个采样点的聚合物成分进行了鉴定,发现上游尼龙(1.00 ~ 1.13 g·cm^{-3})和聚对苯二甲酸乙二醇酯(1.55 g·cm^{-3})的比例在开始调水后保持不变,而聚乙烯(0.96 g·cm^{-3})和聚丙烯(0.91 g·cm^{-3})的比例从 39.6% 下降到 35%. 开始调水后的 S1 处检测出了 50% 聚丙烯和聚乙烯的这类轻质微塑料,这表明当南水北调东线工程向北调水时,动能较大的上游水流卷起较轻的微塑料,并将它们输送更远的距离. He 等[50]的流体动力学和粒子传输模型表明,尼龙和聚对苯二甲酸乙二醇酯等密度较高的微塑料可能会在靠近污染源的地方积聚,而高流量则会输送更轻的微塑料,这和在骆马湖的发现相一致. 开始调水后微塑料的尺寸分布和未调水时存在显著差异,沿线采样点中 60 ~ 500 μm 的微塑料在非调水期的比例(68.29%)接近调水期(36.67%)的两倍. 开始调水后 <2 mm 的小尺寸微塑料比例从上游到下游依次从 66.67% 增加到 73.91% 再到 84%. 调水工程缩短了上游的水力停留时间,带走了小尺寸的微塑料,随着和泵站距离的增加,这部分微塑料失去了持续迁移的动能,并在流速较低的下游重新沉降.

4 结论

(1)骆马湖表层沉积物 9 月微塑料丰度平均值为(513 ± 201) n·kg^{-1},低于 1 月的(528 ± 263) n·kg^{-1},其中工业区、旅游区和农田区均体现了较高的微塑料污染水平.

(2)骆马湖微塑料主要是纤维,聚合物成分主要是聚乙烯, 60 ~ 500 μm 和透明的微塑料占比最高.

(3)人工泄洪后,闸后小尺寸微塑料的比例均高于闸前 30% 以上,人为调控进出水导致的水流剪切力是加速微塑料破碎的驱动因素.

(4)在调水的影响下,小尺寸(<2 mm)和低密度的微塑料(聚乙烯和聚丙烯)实现了再悬浮、迁移和再沉降的环境行为.

参考文献:

[1] Plastics-the facts 2020[EB/OL]. https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020, 2020-06-21.

[2] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. Science Advances, 2017, **3**(7), doi: 10.1126/sciadv.1700782.

[3] Jambeck J R, Geyer R, Wilcox C, *et al*. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. Science, 2015, **347**(6223): 768-771.

[4] Lebreton L C M, Van Der Zwet J, Damsteeg J W, *et al*. River plastic emissions to the world's oceans [J]. Nature Communications, 2017, **8**(1), doi: 10.1038/ncomms15611.

[5] Zhang Y, Pu S Y, Lv X, *et al*. Global trends and prospects in microplastics research: a bibliometric analysis[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, **400**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123110.

[6] Cao Y X, Zhao M J, Ma X Y, *et al*. A critical review on the interactions of microplastics with heavy metals: mechanism and their combined effect on organisms and humans[J]. Science of the Total Environment, 2021, **788**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147620.

[7] 刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 等. 鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2639-2646.
Liu S L, Jian M F, Zhou L Y, *et al*. Pollution characteristics of microplastics in migratory bird habitats located within Poyang Lake wetlands[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2639-2646.

[8] 李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 等. 鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 242-252.
Li W H, Jian M F, Liu S L, *et al*. Occurrence relationship between microplastics and heavy metals pollutants in the estuarine sediments of Poyang Lake and the Yangtze River [J].

Environmental Science, 2020, **41**(1): 242-252.

[9] Yuan W K, Liu X N, Wang W F, *et al*. Microplastic abundance, distribution and composition in water, sediments, and wild fish from Poyang Lake, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **170**: 180-187.

[10] Teng J, Zhao J M, Zhang C, *et al*. A systems analysis of microplastic pollution in Laizhou Bay, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **745**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140815.

[11] Huang Y L, Tian M, Jin F, *et al*. Coupled effects of urbanization level and dam on microplastics in surface waters in a coastal watershed of Southeast China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, **154**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111089.

[12] Wang C, Xing R L, Sun M D, *et al*. Microplastics profile in a typical urban river in Beijing[J]. Science of the Total Environment, 2020, **743**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140708.

[13] Zhang K, Xiong X, Hu H J, *et al*. Occurrence and characteristics of microplastic pollution in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir, China[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(7): 3794-3801.

[14] Song J, Hou C Y, Zhou Y, *et al*. The flowing of microplastics was accelerated under the influence of artificial flood generated by hydropower station[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **255**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120174.

[15] 赵存厚. 南水北调工程概述[J]. 水利建设与管理, 2021, **41**(6): 5-9.
Zhao C H. Summary of south-to-north water transfer project[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2021, **41**(6): 5-9.

[16] Lu Y, Hua Z L, Chu K J, *et al*. Distribution behavior and risk assessment of emerging perfluoroalkyl acids in multiple environmental media at Luoma Lake, East China[J]. Environmental Research, 2021, **194**, doi: 10.1016/j.envres.2021.110733.

[17] Xiong X, Wu C X, Elser J J, *et al*. Occurrence and fate of microplastic debris in middle and lower reaches of the Yangtze River-from inland to the sea[J]. Science of the Total Environment, 2019, **659**: 66-73.

[18] Qu X, Chen Y S, Liu H, *et al*. A holistic assessment of water quality condition and spatiotemporal patterns in impounded lakes along the eastern route of China's south-to-north water diversion project[J]. Water Research, 2020, **185**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116275.

[19] 王志超, 杨建林, 杨帆, 等. 乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素 a 的响应关系[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 673-680.
Wang Z C, Yang J L, Yang F, *et al*. Distribution characteristics of microplastics in ice sheets and its response to salinity and chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 673-680.

[20] Cai M G, He H X, Liu M Y, *et al*. Lost but can't be neglected: huge quantities of small microplastics hide in the South China Sea[J]. Science of the Total Environment, 2018, **633**: 1206-1216.

[21] 集中式地表水饮用水水源地基础状况调查报告————宿迁市骆马湖洋河滩水源地突发环境事件应急预案[EB/OL]. http://hbj.suqian.gov.cn/shbj/hjyj/202010/f57dab07b9e740f0ac8e1bc755af1f22.shtml, 2020-10-30.

[22] 江苏省国家级生态保护红线规划[EB/OL]. http://www.jiangsu.gov.cn/art/2018/6/26/art_46143_7715521.html, 2018-06-09.

[23] Sui Q, Zhang L J, Xia B, *et al*. Spatiotemporal distribution, source identification and inventory of microplastics in surface sediments from Sanggou Bay, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **723**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138064.

[24] Niu L H, Li Y Y, Li Y, *et al*. New insights into the vertical distribution and microbial degradation of microplastics in urban river sediments[J]. Water Research, 2021, **188**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116449.

[25] 王志超, 杨帆, 杨文焕, 等. 内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4590-4598.
Wang Z C, Yang F, Yang W H, *et al*. Occurrence characteristics and quality estimation of microplastics in drainage ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia[J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4590-4598.

[26] Wang T, Zou X Q, Li B J, *et al*. Preliminary study of the source apportionment and diversity of microplastics: taking floating microplastics in the South China Sea as an example[J]. Environmental Pollution, 2019, **245**: 965-974.

[27] 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.

[28] Yan M T, Nie H Y, Xu K H, *et al*. Microplastic abundance, distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou city and Pearl River estuary, China[J]. Chemosphere, 2019, **217**: 879-886.

[29] Jiang Y, Yang F, Zhao Y N, *et al*. Greenland Sea Gyre increases microplastic pollution in the surface waters of the Nordic Seas[J]. Science of the Total Environment, 2020, **712**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136484.

[30] 罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 等. 青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2631-2638.
Luo Y D, Lin Q H, Jia F L, *et al*. Distribution characteristics of microplastics in Qingdao coastal beaches[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2631-2638.

[31] Gao F L, Li J X, Hu J, *et al*. The seasonal distribution characteristics of microplastics on bathing beaches along the coast of Qingdao, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, **783**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146969.

[32] Feng S S, Lu H W, Liu Y L. The occurrence of microplastics in farmland and grassland soils in the Qinghai-Tibet plateau: different land use and mulching time in facility agriculture[J]. Environmental Pollution, 2021, **279**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116939.

[33] 潘雄, 林莉, 张胜, 等. 丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1372-1379.
Pan X, Lin L, Zhang S, *et al*. Composition and distribution characteristics of microplastics in Danjiangkou Reservoir and its tributaries[J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1372-1379.

[34] 朱宇恩, 文瀚萱, 李唐慧娴, 等. 汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3894-3903.
Zhu Y E, Wen H X, Li T H X, *et al*. Distribution and sources of microplastics in farmland soil along the Fenhe River[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3894-3903.

[35] Xu Z J, Bai X, Ye Z F. Removal and generation of microplastics in wastewater treatment plants: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **291**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.125982.

[36] Su L, Xue Y G, Li L Y, *et al*. Microplastics in Taihu Lake, China [J]. Environmental Pollution, 2016, **216**: 711-719.

[37] 王璇, 牛司平, 宋小龙, 等. 城市湖泊沉积物微塑料污染特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3240-3248.
Wang X, Niu S P, Song X L, *et al*. Characterization of microplastic pollution of sediments from urban lakes [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3240-3248.

[38] Yin L S, Wen X F, Du C Y, *et al*. Comparison of the abundance of microplastics between rural and urban areas: a case study from East Dongting Lake[J]. Chemosphere, 2020, **244**, doi: 10.1016/j. chemosphere. 2019. 125486.

[39] Egessa R, Nankabirwa A, Basooma R, *et al*. Occurrence, distribution and size relationships of plastic debris along shores and sediment of northern Lake Victoria [J]. Environmental Pollution, 2020, **257**, doi: 10. 1016/j. envpol. 2019. 113442.

[40] Oni B A, Ayeni A O, Agboola O, *et al*. Comparing microplastics contaminants in (dry and raining) seasons for Ox- Bow Lake in Yenagoa, Nigeria[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **198**, doi: 10. 1016/j. ecoenv. 2020. 110656.

[41] Huang Y, Liu Q, Jia W Q, *et al*. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment[J]. Environmental Pollution, 2020, **260**, doi: 10. 1016/j. envpol. 2020. 114096.

[42] He B B, Goonetilleke A, Ayoko G A, *et al*. Abundance, distribution patterns, and identification of microplastics in Brisbane River sediments, Australia[J]. Science of the Total Environment, 2020, **700**, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2019. 134467.

[43] Reineccius J, Bresien J, Waniek J J. Separation of microplastics from mass-limited samples by an effective adsorption technique [J]. Science of the Total Environment, 2021, **788**, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2021. 147881.

[44] Chen C F, Ju Y R, Lim Y C, *et al*. Seasonal variation of diversity, weathering, and inventory of microplastics in coast and harbor sediments[J]. Science of the Total Environment, 2021, **781**, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2021. 146610.

[45] Mao R F, Hu Y Y, Zhang S Y, *et al*. Microplastics in the surface water of Wuliangsuhai Lake, northern China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **723**, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2020. 137820.

[46] 李征, 高春梅, 杨金龙, 等. 连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3212-3221.
Li Z, Gao C M, Yang J L, *et al*. Distribution characteristics of microplastics in surface water and sediments of Haizhou Bay, Lianyungang[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3212-3221.

[47] Xue B M, Zhang L L, Li R L, *et al*. Underestimated microplastic pollution derived from fishery activities and "hidden" in deep sediment [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(4): 2210-2217.

[48] De Carvalho A R, Garcia F, Riem-Galliano L, *et al*. Urbanization and hydrological conditions drive the spatial and temporal variability of microplastic pollution in the Garonne River [J]. Science of the Total Environment, 2021, **769**, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2020. 144479.

[49] Weideman E A, Perold V, Ryan P G. Limited long-distance transport of plastic pollution by the Orange-Vaal River system, South Africa[J]. Science of the Total Environment, 2020, **727**, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2020. 138653.

[50] He B B, Smith M, Egodawatta P, *et al*. Dispersal and transport of microplastics in river sediments[J]. Environmental Pollution, 2021, **279**, doi: 10. 1016/j. envpol. 2021. 116884.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 5

May 15, 2022

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Urban Area of Beijing ····· AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, *et al.* (2251)

Modeling of $PM_{2.5}$ Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model ····· FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, *et al.* (2262)

Spatio-temporal Evolution Patterns of $PM_{2.5}$ and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018 ····· ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, *et al.* (2274)

Characteristics and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence ····· TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, *et al.* (2284)

Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem ····· ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, *et al.* (2294)

Source Apportionment and Seasonal Changes in $PM_{2.5}$ Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City ····· SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, *et al.* (2304)

Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of $PM_{2.5}$ Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan ····· REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, *et al.* (2317)

Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient $PM_{2.5}$ in the Winter of Zhengzhou ····· YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, *et al.* (2329)

Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in $PM_{2.5}$ During Winter in Zibo City ····· BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, *et al.* (2336)

Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in $PM_{2.5}$ in Chengde ····· HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, *et al.* (2343)

Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China ····· FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, *et al.* (2355)

Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain ····· ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, *et al.* (2363)

Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology ····· HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, *et al.* (2373)

Classification Control of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity ····· CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, *et al.* (2383)

Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China ····· YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, *et al.* (2395)

Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030 ····· CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, *et al.* (2403)

Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation ····· CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, *et al.* (2415)

Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis ····· SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, *et al.* (2427)

Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Plolicy During Heavy Air Pollution Alert ····· ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)

Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin ····· ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, *et al.* (2448)

Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin ····· LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, *et al.* (2459)

Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River ····· WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, *et al.* (2467)

APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen ····· SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, *et al.* (2476)

Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments ····· XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)

Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City ····· HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, *et al.* (2500)

Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake ····· HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, *et al.* (2510)

Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication ····· ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, *et al.* (2518)

Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology ····· MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, *et al.* (2527)

Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm ····· ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, *et al.* (2537)

Adsorption and Interception Effects of *Eichhornia crassipes* on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin ····· LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, *et al.* (2548)

Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake ····· LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, *et al.* (2557)

Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake ····· YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, *et al.* (2566)

Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment ····· CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, *et al.* (2575)

Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River ····· LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, *et al.* (2586)

Non-point Source Pollution (NPSP) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River ····· XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, *et al.* (2595)

Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments ····· LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, *et al.* (2606)

Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period ····· ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, *et al.* (2614)

Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir ····· GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, *et al.* (2624)

Distribution Characteristics of Microplastics in *Bellamya aeruginosa* in Typical Area of Poyang Lake ····· JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, *et al.* (2633)

Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO_2-Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes ····· FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, *et al.* (2640)

Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H_2O_2 Catalyzed by Magnetic $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4@SiO_2$ ····· XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, *et al.* (2650)

Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite ····· JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, *et al.* (2662)

Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(Ⅴ) by AMD Sludge Composite Material ····· ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, *et al.* (2673)

Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates ····· LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, *et al.* (2685)

Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors ····· LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)

Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions ····· ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)

Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area ····· CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)

Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil ····· ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, *et al.* (2732)

Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of *Brassica napus* L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils ····· MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, *et al.* (2741)

Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem ····· WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, *et al.* (2751)

Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field ····· XU Man, GAO Ming, YU Luo, *et al.* (2758)

Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers ····· XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, *et al.* (2770)

Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil ····· SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, *et al.* (2779)

Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain ····· GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, *et al.* (2788)

Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain ····· HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, *et al.* (2802)

Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland ····· WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, *et al.* (2812)

Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China ····· LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, *et al.* (2822)