

目次

基于时间序列分解的京津冀区域PM _{2.5} 和O ₃ 空间分布特征	姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹 (2487)
基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析	周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕 (2497)
基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测	杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪 (2507)
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估	符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利 (2516)
京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估	高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬 (2525)
2022年北京市城区PM _{2.5} 水溶性离子含量及其变化特征	陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献 (2537)
郑州市冬春季PM _{2.5} 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估	陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛 (2548)
淄博市供暖前后PM _{2.5} 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险	孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文 (2558)
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析	李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元 (2571)
天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析	卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发 (2581)
基于空间尺度效应的山东省PM _{2.5} 浓度时空变化及空间分异地理探测	徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫 (2596)
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势	武婷, 崔焱文, 肖威德, 翟增秀, 韩萌 (2613)
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析	张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮 (2622)
景观格局对河流水质影响的尺度效应Meta分析	王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏敏, 陈丁江 (2631)
白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源	孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升 (2640)
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析	胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹 (2651)
庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价	刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红 (2665)
农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价	王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红 (2678)
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征	韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁 (2686)
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析	金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥 (2694)
再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征	贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚 (2707)
水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响	梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯 (2715)
银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系	蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟 (2727)
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析	张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然 (2741)
市政污水中吗啡来源辨析	邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高 (2748)
滦河流域生态环境动态遥感评价	李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪 (2757)
黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素	王奕洪, 孙学堂 (2767)
基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例	蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦 (2780)
贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因	李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬 (2793)
2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子	周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛 (2806)
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻 (2817)
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响	武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平 (2828)
西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响	江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家 (2840)
不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析	黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤 (2848)
基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测	胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏 (2859)
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响	孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟 (2871)
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性	周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰 (2881)
控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵 (2891)
生物炭对黄绵土中NO ₃ -N运移过程影响及模拟	白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇 (2905)
中国农田土壤重金属污染分析与评价	杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛 (2913)
城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望	王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰 (2926)
场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展	陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川 (2939)
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析	戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明 (2952)
拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价	韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成 (2962)
银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析	于路加, 马海军, 王翠平 (2971)
基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估	陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨菡, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆 (2983)
西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型	唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧 (2995)
贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划	韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波 (3005)
柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应	刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒 (3016)
改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响	肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明 (3027)
生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响	郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅 (3037)
基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应	姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋 (3047)
微塑料对土壤N ₂ O排放及氮素转化的影响研究进展	刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博 (3059)
土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响	戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3069)
养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征	宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华 (3078)
聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响	李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平 (3088)
鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测	俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽 (3098)
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径	徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡 (3107)
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析	徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪 (3119)

土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响

戴柳云¹, 侯磊¹, 王化¹, 符立松¹, 王艳霞¹, 李晓琳¹, 王万宾², 梁启斌^{1*}

(1. 西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650224; 2. 云南省生态环境科学研究院, 昆明 650034)

摘要: 土壤环境中微塑料污染受到广泛关注, 但小流域尺度下不同土地利用方式对微塑料污染影响的认知相对不足. 以洱海北部罗时江小流域为研究对象, 分析耕地、河岸带、草地和林地土壤中微塑料污染特征, 利用聚合物风险指数法评估4种地类土壤的污染风险, 探讨土地利用对土壤微塑料污染的影响. 结果表明: ①罗时江小流域土壤微塑料丰度在220~1 900 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 平均丰度为 $(711 \pm 55) \text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 主要聚合物类型为聚酯(PES, 32.52%)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET, 21.95%), 粒径集中于0.5~2 mm (61.89%), 超过75%的微塑料为纤维状, 颜色以透明为主(58.50%). ②小流域土地利用方式决定土壤微塑料的丰度和污染特征, 人类活动强度更大的耕地 $[(885 \pm 95) \text{n}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 和河岸带 $[(837 \pm 155) \text{n}\cdot\text{kg}^{-1}]$ 土壤微塑料丰度显著高于林地 $[(491 \pm 53) \text{n}\cdot\text{kg}^{-1}]$ ($P < 0.05$), 薄膜和碎片状微塑料主要赋存于耕地土壤, 微塑料聚合物类型和颜色种类也以耕地土壤最为丰富. ③耕地土壤微塑料风险指数等级(Ⅲ级)高于其余3种地类(Ⅰ级). 研究表明, 小流域内人类活动强度越大的土地利用方式, 其土壤微塑料赋存特征越复杂, 聚合物类型更丰富, 潜在污染风险越高, 应加强对耕地土壤微塑料污染的管控.

关键词: 微塑料(MPs); 土壤; 土地利用; 污染特征; 洱海罗时江小流域

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-3069-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202306061

Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin

DAI Liu-yun¹, HOU Lei¹, WANG Hua¹, FU Li-song¹, WANG Yan-xia¹, LI Xiao-lin¹, WANG Wan-bin², LIANG Qi-bin^{1*}

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Yunnan Research Academy of Eco-environmental Sciences, Kunming 650034, China)

Abstract: Microplastic pollution in the soil environment has received extensive attention, but the effects of different land use patterns on the sub-watershed scale on soil microplastic pollution are poorly understood. The Luoshijiang sub-watershed in the north of Erhai Lake was selected as the research object, and the characteristics of microplastic pollution in farmland, riparian zone, grassland, and woodland soils were analyzed. The pollution risks of microplastics in the four types of soil were assessed using the polymer risk index method, and the effects of land use patterns on the distribution and risk of microplastic pollution were further explored. The results showed that: ① The abundance of microplastics in the soil of the Luoshijiang sub-watershed ranged from 220 to 1 900 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, and the average abundance was $(711 \pm 55) \text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$. The main polymer types were polyester (PES, 32.52%) and polyethylene terephthalate (PET, 21.95%). The particle size of microplastics was concentrated in the range of 0.5-2 mm (61.89%). Fiber was the main shape of microplastics (>75%), and the dominant color was transparent (58.50%). ② Land use patterns determined the abundance and pollution characteristics of soil microplastics in the Luoshijiang sub-watershed. A significantly higher abundance of microplastics was found in the soil of farmland $[(885 \pm 95) \text{n}\cdot\text{kg}^{-1}]$ and riparian zone $[(837 \pm 155) \text{n}\cdot\text{kg}^{-1}]$, which had stronger intensities of human activity, than that in woodland soil $[(491 \pm 53) \text{n}\cdot\text{kg}^{-1}]$ ($P < 0.05$). Film and fragment microplastics mainly occurred in farmland soil, which also had the largest number of polymer types and the most abundant colors. ③ The risk index level of microplastics (Level Ⅲ) in the soil of farmland was higher than that of the other three land use patterns (Level Ⅰ). This research indicated that the higher the intensity of human activities of a sub-watershed was, the more complex the occurrence characteristics of soil microplastics, the richer the types of polymers, and the higher the potential pollution risks would be. Therefore, it is necessary to strengthen the control of soil microplastic pollution in farmland.

Key words: microplastics(MPs); soil; land use pattern; pollution characteristics; Luoshijiang sub-watershed of Erhai Lake Basin

微塑料(MPs)被生态环境部界定为新污染物, 在水体、大气、土壤、沉积物以及生物体内均有检出, 微塑料中增塑剂、阻燃剂和固化剂等释放与累积具有潜在的毒性效应, 同时还能作为重金属、持久性有机物等其他污染物的载体, 导致复合污染, 对环境和人类健康造成影响^[1,2]. 环境介质中的微塑料及其释放的添加剂等可通过食物链或呼吸进入人体, 已有学者在人体粪便、肺部组织和血液中均检出微塑料^[3-5], 对人体健康存在潜在危害, 引发国内外学者的广泛关注, 成为当前国内外生态环保领域的研究前沿热点之一.

微塑料污染的研究始于海洋环境, 随后在内陆

淡水、土壤、沉积物和空气等不同环境介质逐步开展^[6,7]. 目前国内外学者对土壤中微塑料来源、污染特征、迁移过程和生态效应等方面进行相关研究, 认为土壤是微塑料的“汇”^[8]. 关于土壤微塑料污染特征, 诸多学者针对单一土地利用方式下土壤微塑料污染开展大量调查研究^[9-11], 少部分学者研究了不同土地利用土壤微塑料污染特征^[12-15]. 云南元谋地

收稿日期: 2023-06-07; 修订日期: 2023-07-24

基金项目: 云南省农业基础研究联合专项(202301BD070001-090); 云南省基础研究计划项目(202301AT070220); 云南省教育厅科学研究基金项目(2023Y0716)

作者简介: 戴柳云(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微塑料环境行为, E-mail: dly15288@126.com

* 通信作者, E-mail: qbliang@swfu.edu.cn

区土壤微塑料丰度表现为：设施农田 $[(1\,236 \pm 843) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 、传统农田 $[(695 \pm 430) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 和园地 $[(641 \pm 927) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 显著高于草地 $[(200 \pm 229) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}]$ 和林地 $[(85 \pm 22) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}]$ ，不同土地利用土壤中微塑料丰度、污染特征及污染源均存在明显差异^[12]。云南西双版纳香蕉种植园的土壤微塑料丰度高达 $(10\,975 \pm 261) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，约为橡胶种植林的10倍，是次生林和原始林的18倍，不同土地利用土壤中微塑料的分布存在变化，自然生态系统土壤微塑料丰度仅为人工生态系统的50%^[14]。湖北丹江口水库库区的调查显示，耕地、林地和湿地土壤微塑料丰度范围为 $645 \sim 15\,161 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，微塑料分布与土地利用密切相关，土壤微塑料丰度与人口密度呈显著正相关 $(P < 0.01)$ ^[15]。同样，在陕西黄土高原的研究发现^[16]，土壤微塑料丰度呈现耕地 $(7\,550 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}) >$ 苹果园 $(3\,440 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}) >$ 垃圾场 $(2\,283 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1})$ 的规律。上述研究发现，人类活动强度大的耕地和园地土壤微塑料污染更为严重，潜在生态风险高，微塑料丰度因地区和土地利用方式的不同也呈现较大差异。小流域作为相对独立和封闭的自然汇水区域，小流域内不同地类土壤污染物可能随地表径流汇集于下游湖泊等水体，对下游水体带来极大的生态环境风险，而小流域尺度下不同地类土壤微塑料污染特征研究鲜见报道。

洱海作为大理州重要饮用水源地，是云南省第二大高原湖泊，也是我国“新三湖”重点保护湖泊之一^[17,18]。罗时江是洱海北部重要的补给水源，多年平均径流量约 0.53 亿 m^3 ，为洱海贡献13%的水量，罗时江小流域内村庄密集，农业生产及日常生活的污染排放强度大，传统的面源污染问题突出^[19]。然而，该小流域土壤微塑料的污染状况、土地利用对土壤微塑料污染分布的影响及生态风险尚不明晰。为此，采集罗时江小流域耕地、河岸带、草地和林地土壤样品，基于密度浮选法分离提取微塑料，采用聚合物危害风险指数法评估各地类土壤微塑料的潜在生态风险，从小流域尺度分析典型地类土壤微塑料污染特征及生态风险，探讨土地利用对土壤微塑料污染分布的影响，以期后续开展小流域尺度下土壤微塑料迁移研究奠定基础，同时为洱海罗时江小流域微塑料污染管控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况和样品采集

洱海流域位于金沙江、澜沧江和元江三大水系分水岭地带，流域面积 $2\,565 \text{ km}^2$ 。罗时江为洱海北部重要入湖河流，发源于大理州洱源县右所镇下山

口附近，流经右所、邓川和上关3镇，罗时江小流域地处东经 $99^\circ 58' 28'' \sim 100^\circ 06' 48''$ ，北纬 $25^\circ 55' 30'' \sim 26^\circ 04' 25''$ ，总面积 135.01 km^2 （图1）。小流域内村落聚集且人口密度大 $(356 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2})$ ，是洱海流域内农业面源污染严重的子流域。为削减沿岸面源污染入河负荷，2018年在罗时江两岸修建了河岸带，西湖上游的河岸带长 3.24 km 、单侧宽 50 m ，下游河岸带长 8.31 km 、单侧宽 100 m 。小流域内林地、耕地、草地和河岸带为典型土地利用类型，面积占比分别为43.49%、34.50%、15.46%和1.47%^[19]。根据小流域内典型土地利用方式、地类面积占比及样点可达性，选取林地（记为F1~F6）、耕地（记为A1~A8）、草地（记为G1~G2）和河岸带（记为R1~R3）共19个样点，于2022年7月用“S”形布点法进行土壤样品采集，每个样点用不锈钢铲采集5个表层（0~20 cm）土壤样品，混合均匀后用四分法取 4 kg 土样，铝箔纸包好装箱带回实验室。

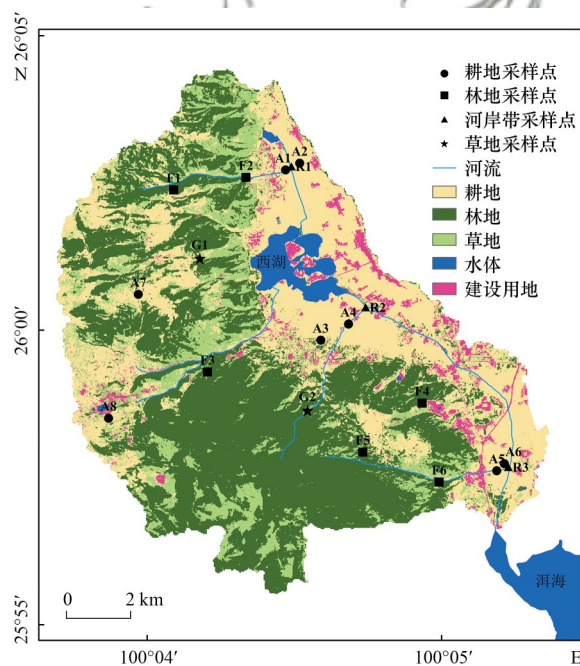


图1 罗时江小流域典型土地利用的土壤采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites under typical land use patterns in the Luoshijiang sub-watershed

1.2 样品处理及分析

土壤微塑料的分离与提取参照文献^[20]的方法并进行改进，主要包括分散、筛分、密度浮选、消解和再次浮选。每个样点称取 100 g 自然风干的土壤样品，设置3个重复，加入 $300 \text{ mL KPO}_3 (5.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1})$ 溶液充分分散后过孔径 $200 \mu\text{m}$ 的不锈钢筛网，用超纯水将筛网上的截留物冲洗至 500 mL 玻璃烧杯中，置于电热恒温鼓风干燥箱烘干至恒重；之后加入饱和 $\text{ZnCl}_2 (1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3})$ 溶液进行微塑料的分离提取，重复3次；依次加入 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Fe(II)}$ 和 $30\% \text{ H}_2\text{O}_2$ 溶

液各 20 mL 消解浮选后残留的有机质；再按每 20 mL 样品加入 6 g NaCl 进行二次浮选，用直径 47 mm、孔径 0.7 μm 的玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F)进行真空抽滤，滤膜置于玻璃培养皿自然风干.将自然风干的滤膜置于体视显微镜(Olympus SZX16，日本)下进行微塑料的形态鉴定，并拍照记录其粒径、形状和颜色等污染特征.据耕地、河岸带、草地和林地的土壤微塑料丰度特征、样点数量和各地类面积占比，分别随机挑取 49、22、12 和 40 个微塑料样品，利用显微傅里叶红外光谱仪(μ -FTIR，Thermo Scientific Nicolet 10，美国)测定红外吸收光谱图，根据标准图谱比对结果确定聚合物类型.

1.3 质量控制

在实验过程中，使用的器皿及器材均为不锈钢或玻璃材质，使用前均用蒸馏水润洗 3 次，实验过程中穿棉质实验服，全程佩戴一次性乳胶手套，避免二次污染.设置 3 个空白对照组(不添加土壤样品)进行实验，执行相同操作以估算实验环境中微塑料的背景污染水平.

2 结果与分析

2.1 不同土地利用下土壤微塑料的丰度与聚合物类型

罗时江小流域内所有样点均有微塑料检出，平均丰度为 $(711 \pm 55) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图 2(a)]，A6 是小流域内土壤微塑料丰度 $(1\,900 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1})$ 最高的样点，是丰度最低 G2 样点 $(220 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1})$ 的 8.64 倍，不同采样点间微塑料丰度分布存在差异 [$P < 0.05$ ，图 2(c)]. 4 种不同地类土壤中，耕地土壤的微塑料丰度最高 [$(885 \pm 95) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$]，其次是河岸带 [$(837 \pm 155) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$]、草地 [$(515 \pm 84) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$] 和林地 [$(491 \pm 53) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$]，不同土地利用方式下土壤中微塑料丰度存在较大差异. LSD 分析结果显示，耕地和河岸带土壤微塑料丰度显著高于林地 ($P < 0.05$)，表明人类活动强度大的地类(耕地和河岸带)土壤微塑料丰度高于人类干扰小的地类(林地和草地).

从所有土壤样品中选取 123 个疑似微塑料颗粒进行检测分析，共检出聚酯(polyester, PES)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)、玻璃纸(cellophane, CP)、人造丝(rayon, RY)、聚

1.4 微塑料风险评价

为评估罗时江小流域土壤微塑料污染的生态环境风险，以微塑料聚合物类型的危害分数作为评估微塑料风险的指标，基于聚合物的危害评分，根据聚合物风险指数(H)评价环境中微塑料的潜在风险^[21-23]，评价依据如表 1 所示，计算方法见公式(1).

$$H = \sum P_n \times S_n \tag{1}$$

式中， H 为聚合物风险指数； n 为特定聚合物； P_n 为罗时江小流域或某地类特定类型聚合物的占比； S_n 为每种聚合物的危害评分，聚丙烯、聚酯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚乙烯、聚丙烯-聚乙烯共聚物和聚氯乙烯对应的危害评分分别为：1、4、4、11、11 和 10 001^[23].

1.5 数据处理

利用 Nano measure 1.2 软件测定微塑料粒径，以每千克干土中微塑料的数量表示微塑料丰度，记作“ $\text{n} \cdot \text{kg}^{-1}$ ”. 在 SPSS 25.0 中采用最小显著性差异法(LSD)完成数据差异性分析，用 Origin 2021 绘制弦图和柱状图等.

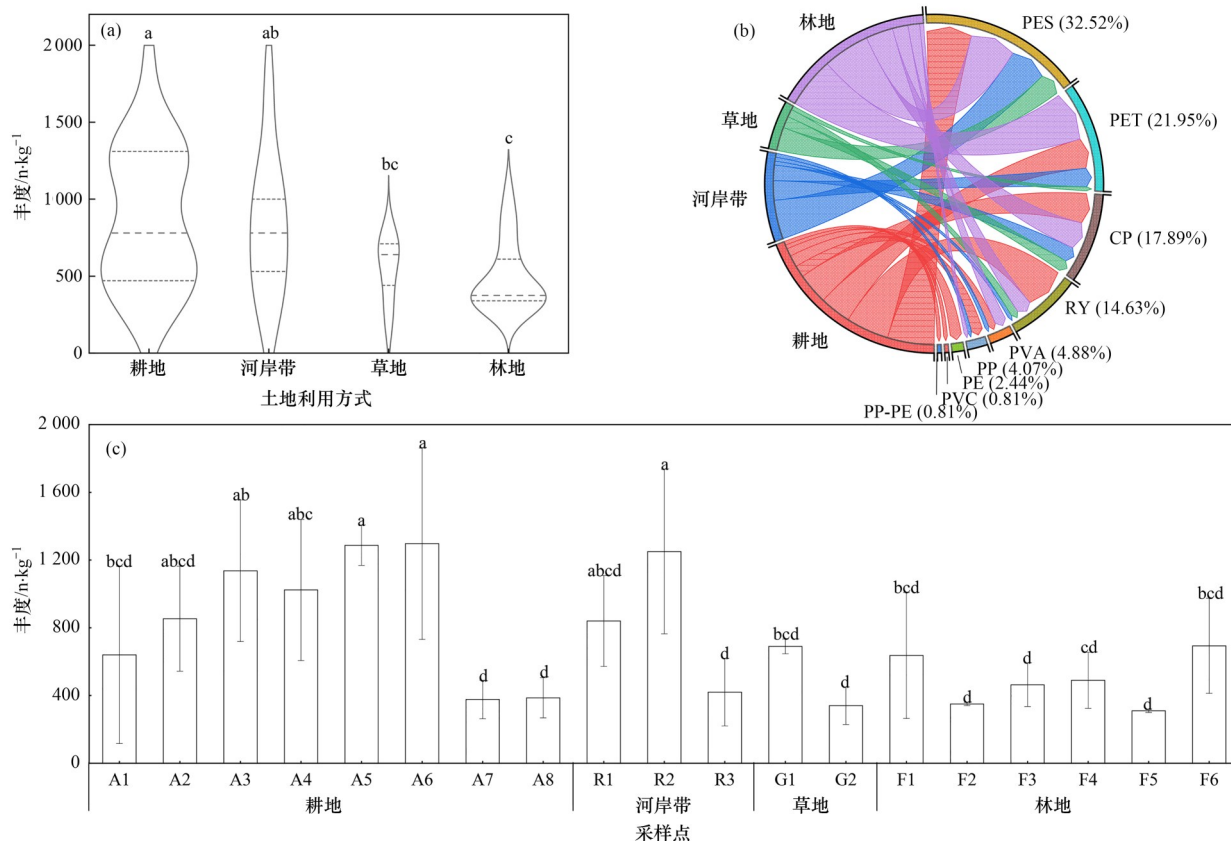
表 1 微塑料污染风险指数等级划分
Table 1 Classification of microplastic pollution risk index

风险指数(H)	<10	10~100	101~1 000	1 001~10 000	>10 000
风险等级	I	II	III	IV	V

乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)、聚丙烯(polypropylene, PP)、聚乙烯(polyethylene, PE)、聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)和聚丙烯-聚乙烯共聚物(polypropylene polyethylene copolymer, PP-PE)这 9 种微塑料. PES(32.52%)和 PET(21.95%)是罗时江小流域土壤微塑料的主要聚合物类型，其次是 CP 和 RY，检出率分别为 17.89% 和 14.63%，而 PVA、PP、PE、PVC 和 PP-PE 的检出率均低于 5% [图 2(b)]. 不同土地利用方式下，微塑料聚合物类型检出率存在差异，耕地土壤中聚合物类型更丰富(9 种)，PP-PE、PE 和 PVC 仅在耕地中检出，而草地中仅检出 4 种.

2.2 不同土地利用下土壤微塑料的粒径、形状和颜色分布

将观察到的微塑料分成 0.2~0.5、0.5~1、1~2 和 2~5 mm 这 4 个粒径范围(图 3). 罗时江小流域 4 种地类土壤中微塑料粒径集中分布于 0.5~1 mm 和 1~2 mm (60.06%~64.87%)，而 2~5 mm 的较少(13.49%~20.57%)，表明粒径较小(0.5~2 mm)的微塑料分布更为广泛. 草地土壤中 0.5~1 mm (40.76%) 的微塑料占比显著高于耕地(31.35%)、河岸带(29.33%)和林地



(a)和(c)微塑料丰度,(b)微塑料聚合物类型;不同小写字母表示不同土地利用方式下和不同采样点土壤微塑料丰度差异显著($P < 0.05$)

图2 不同土地利用方式下土壤微塑料丰度和聚合物类型分布

Fig. 2 Abundances and polymer types of microplastics in the soil of different land use patterns

(32.22%) ($P < 0.05$), 且 1~2 mm 占比显著低于耕地 ($P < 0.05$), 而其余 2 个粒径范围在不同地类间的分布差异不大。

纤维为罗时江小流域土壤中微塑料的主要检出形态 (75.27%), 其次是碎片 (21.41%) 和薄膜 (3.32%)。不同土地利用方式下, 微塑料在形状分布上存在差异 [图 4(a)], 薄膜 (3.36%) 和碎片 (28.39%) 微塑料主要分布在耕地土壤, 且显著高于草地 ($P < 0.05$)。

罗时江小流域土壤中共检出 8 种颜色的微塑料 [图 4(b)], 透明 (58.50%) 占比最高, 其次为黑色 (12.41%)、白色 (9.39%) 和蓝色 (9.39%), 而绿色 (4.97%)、红色 (2.36%)、黄色 (2.16%) 和棕色 (0.80%) 占比较低。各地类土壤中微塑料颜色分布特点不同, 透明 (47.64%~76.47%) 和黑色 (7.74%~23.36%) 较为常见, 耕地和河岸带土壤中微塑料 8 种颜色均有分布, 颜色较为丰富, 而草地土壤中仅发现 6 种颜色微塑料, 颜色种类相对较少。

2.3 不同土地利用下土壤微塑料的污染风险等级

基于各聚合物的危害评分, 结合罗时江小流域和 4 种地类土壤中不同聚合物的占比, 根据公式 (1) 计算得出小流域整体和不同地类土壤微塑料污染风

险, 结果见表 2。从中可知, 罗时江小流域土壤微塑料污染风险指数为 83.89, 污染风险等级为 II 级, 处于低风险。小流域内的耕地、河岸带、草地和林地这 4 种地类土壤微塑料污染风险指数值介于 2.33~206.69 之间, 风险等级为 I~III 级, 表现出不同程度的微塑料污染风险, 耕地土壤污染风险最高 (206.69), 风险等级达 III 级, 处于中等污染水平, 而河岸带 (2.77)、草地 (2.33) 和林地 (2.53) 的污染风险指数较小, 风险等级为 I 级, 均处于较低水平。因缺乏 CP、RY 和 PVA 的生态毒性数据, 无法确定其危害评分, 在计算该风险指数时未将其包含在内。

3 讨论

3.1 罗时江小流域土壤微塑料污染特征分析

所有土壤样点的微塑料检出率为 100%, 丰度范围为 220~1 900 n·kg⁻¹, 与云南省其他地区土壤微塑料丰度相比, 低于元谋干热河谷地区^[12]、滇池南岸耕地^[13]、西双版纳不同类型林地^[14]和云南 10 个县耕地土壤^[24]; 与其他省份相比, 高于汾河地区^[25]、杭州湾沿岸平原^[26]和广元烟田^[27], 但低于宝鸡地区^[28]、内蒙古河套灌区^[29]、王东沟流域^[16]和甘肃地区^[30]; 与国外部分研究相比, 高于德国耕地土壤^[31],

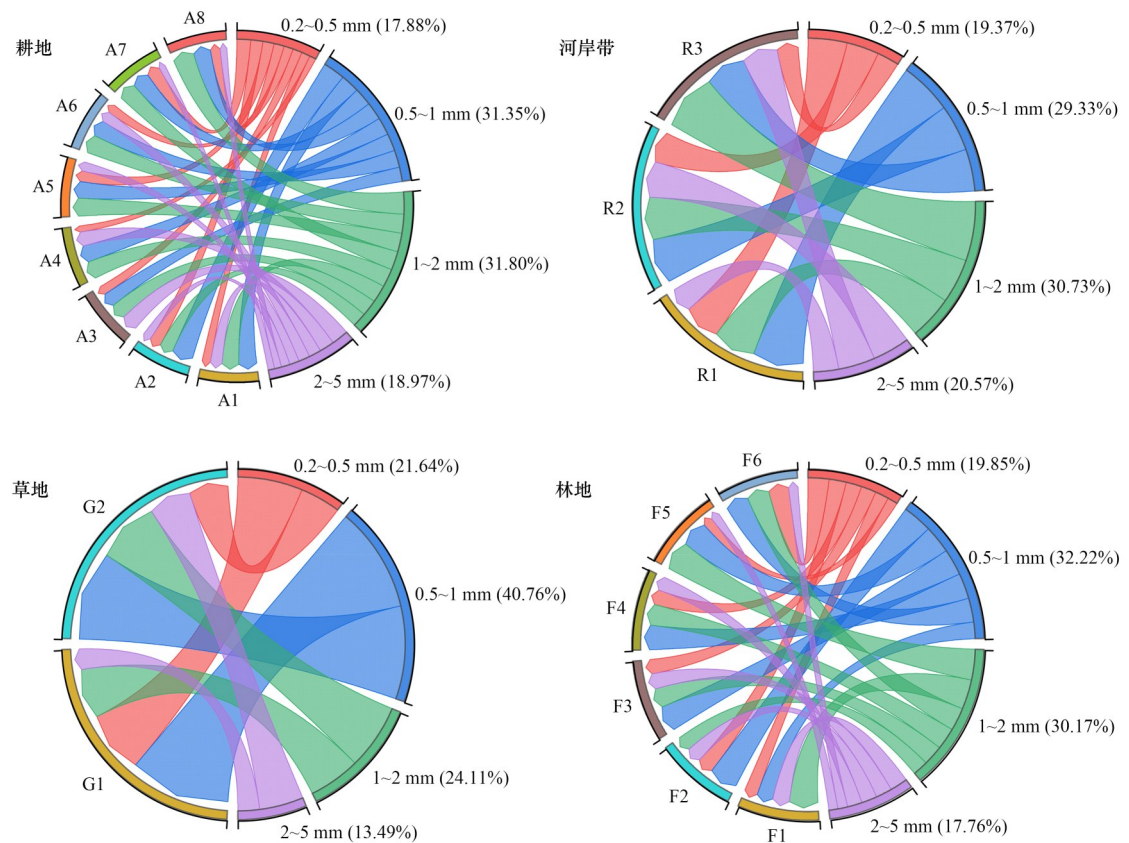


图3 不同土地利用方式下土壤微塑料粒径分布
Fig. 3 Distribution of microplastic sizes in the soil of different land use patterns

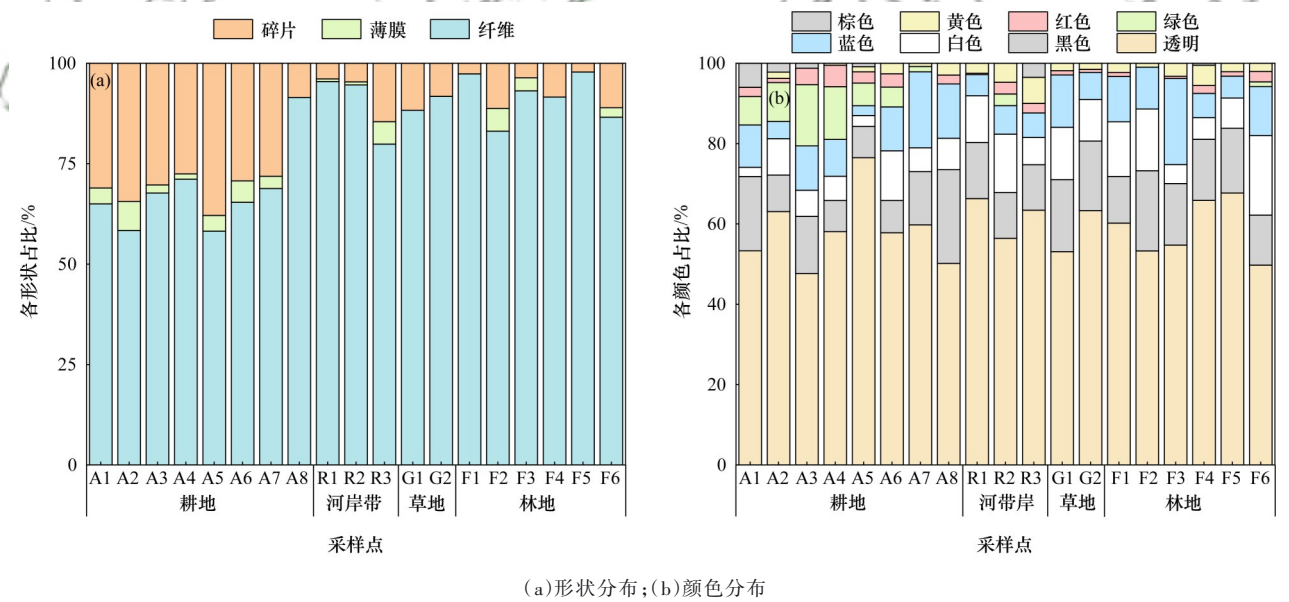


图4 不同土地利用方式下土壤微塑料形状和颜色分布
Fig. 4 Distribution of microplastic shapes and colors in the soil of different land use patterns

表2 不同土地利用方式下土壤微塑料污染风险指数等级					
Table 2 Levels of microplastic pollution risk index in the soil of different land use patterns					
地类	耕地	河岸带	草地	林地	罗时江小流域
微塑料污染风险指数	206.69	2.77	2.33	2.53	83.89
风险等级	Ⅲ	I	I	I	Ⅱ

低于印度沿海城镇土壤^[32](表3). 综上, 罗时江小流域土壤微塑料丰度处于较低水平^[33].

受各地区农业生产等人类活动差异的影响, 不同研究区微塑料丰度变化幅度较大, 如温室大棚和塑料薄膜使用频率较高的地区微塑料丰度普遍较高^[27,34]. 王志超等^[29]发现内蒙古河套灌区不同覆膜年限下(5、10和20 a)土壤中微塑料平均丰度分别为2 526、4 352和6 070 n·kg⁻¹, 微塑料丰度随覆膜年限的增加而升高, 土壤微塑料丰度分布受塑料薄膜使用量的影响. 本研究发现, 耕地土壤中薄膜微塑料检出率显著高于草地($P < 0.05$), 可能与地膜覆盖等农业活动有关. 同时, 调查发现罗时江小流域土壤微塑料以0.5~2 mm的小粒径占主导地位, 分布更为广泛, 这与辽宁辽河流域^[35]、云南元谋地区^[12]和西双版纳地区^[14]报道相

一致, 可能是本研究区以农业生产活动为主所致, 在耕作等人类活动强度较大的农业活动中, 微塑料易破碎变小. 此外, 云南地处低纬度高海拔地区, 紫外辐射强烈, 干湿季分明, 大粒径塑料在自然作用下易裂解成粒径更小的微塑料后进入土壤表层, 加之微塑料具有比表面积大、吸附性强的特点, 易在土壤中累积, 致使小粒径微塑料在土壤中广泛分布.

研究区共检出8种微塑料颜色, 透明占比最高(58.50%). 一方面源自透明塑料本身的大量生产, 例如一次性餐具、塑料袋等产品多由透明塑料制成, 老化分解后聚集于土壤; 另一方面, 云南地区具有较强的紫外线辐射、风化和降雨作用, 加速了彩色微塑料的褪色过程, 导致透明微塑料的比例增加^[2,14].

表3 不同土地利用方式土壤塑料污染特征比较¹⁾

Table 3 Comparison of microplastic pollution characteristics in the soil of different land use patterns

国家/地区	土地利用方式	丰度/n·kg ⁻¹	主要粒径范围/mm	主要颜色	主要形状	文献
德国	耕地	217	—	黑色	—	[31]
印度	城市沿海土地	959 ± 277	0.3~5	红色	纤维	[32]
湖北丹江口库区	园地、旱地、水田和湿地	645~15 161	0.05~0.5	—	碎片	[15]
甘肃黄土高原	耕地、林地和园地	886~1 777	<0.25	透明	薄膜	[30]
山西汾河流域	沿岸土壤	290 ± 15	≤1	白色	纤维	[25]
浙江杭州湾	耕地	263~571	1~3	—	碎片和纤维	[26]
四川广元地区	耕地	120~890	1~2	透明	薄膜	[27]
内蒙古河套灌区	地膜覆盖或大棚耕地和裸地	2 526~6 262	<3	黑色	薄膜和碎片	[29]
陕西王东河流域	耕地、园地和垃圾场	900~12 650	≤0.05	—	碎片	[16]
辽宁辽河流域	耕地、草地、林地和荒地土壤	(13 ± 11)~(886 ± 133)	<1	白色	碎片	[35]
云南元谋地区	耕地、园地、草地和林地	50~3 450	<1	绿色	碎片	[12]
云南西双版纳地区	热带原生林、次生林、橡胶林和香蕉林土壤	(2 281 ± 2 461)~(4 487 ± 6 440)	0.2~0.5	蓝色	碎片和纤维	[14]
云南滇池流域	耕地和湖滨带表层土壤	7 100~42 960	0.05~1	—	纤维	[13]
云南10个县	耕地土壤	900~40 800	<0.5	透明	碎片	[24]
云南洱海罗时江小流域	耕地、河岸带、草地和林地土壤	220~1 900	0.5~2	透明	纤维	本研究

1)“—”表示文中没有相关内容

纤维为罗时江小流域土壤微塑料的主要形状, 与云南滇池南岸土壤^[13]和陕西农田土壤^[36]微塑料研究结果相似. 纤维可通过洗衣污水排放和衣物穿着释放等途径进入环境, 污水灌溉在水资源缺乏地区是重复利用水资源的重要途径, 污水重复利用可能是该研究区土壤微塑料的重要来源, 微塑料容易进入土壤环境, 导致土壤中丰度较高, 提高了土壤中微塑料的扩散风险^[37]. 同时, 纤维微塑料也更容易通过大气运输沉降至土壤中^[38], 导致纤维为土壤微塑料主要形状. 而辽河流域玉米地土壤中微塑料的形状以碎片为主, 蔬菜地土壤则以纤维和薄膜为主^[35], 这可能是调查区域的空间差异、地区发展模

式和土地利用方式等原因所导致, 表明微塑料污染分布与区域特征和人类活动相关.

PES和PET为罗时江小流域土壤微塑料主要的聚合物类型(54.48%), 其他研究表明PP和PE是土壤中常见微塑料类型^[15,39,40]. PP和PE是塑料大棚和地膜的主要材质^[41], 来源于农业活动, 但在该小流域内检出率不高(<4.10%), 现场采样调研发现罗时江小流域内大棚使用量较少, 土壤中此类聚合物积累量少. PES和PET是服饰的主要原料, 衣物洗涤污水的直排和灌溉可增加土壤微塑料丰度^[10,42], 可能是微塑料的重要来源, 这与纤维微塑料占主导的研究结果相互印证. 此外, 用于堆肥的农业固废中常

混有部分塑料垃圾, 在堆肥过程中可形成微塑料, 有研究发现有机肥中微塑料含量高达 $2\,550\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是土壤中微塑料的重要来源^[34]. 现场调研时发现, 小流域村庄与耕地毗邻, 存在生活污水直排入田的现象, 且当地农户存在有机肥直接还田的习惯. 因此, 生活污水直排和有机肥还田可能是罗时江小流域耕地土壤微塑料的主要来源.

3.2 土地利用对土壤微塑料分布及污染风险的影响

罗时江小流域不同土地利用土壤中微塑料丰度分布不均, LSD 分析显示, 人类活动强度大的耕地和河岸带土壤微塑料丰度显著高于人类活动强度小的林地 ($P < 0.05$), 与其他学者在云南元谋^[12]和青藏高原^[40]的研究结果一致. 青藏高原3种类型土壤中微塑料丰度表现为: 地膜覆盖 > 大棚 > 裸露土地, 元谋地区为: 耕地 > 园地 > 草地 > 林地, 人类活动强度大的地类微塑料丰度更高, 与本研究结果相同. 前述研究表明土地利用是影响土壤微塑料丰度分布的重要原因, 土壤中微塑料污染来源、土壤异质性及人类活动强度不同, 均可能造成微塑料丰度分布不均.

罗时江小流域村落与耕地交织分布, 人口密度为 $356\text{ 人}\cdot\text{km}^{-2}$, 远超全国平均水平, 人口主要聚集于小流域东部地势平坦区域. 耕地和河岸带临近居民区, 周边人口密集, 污染源广泛, 微塑料丰度更高, 颜色种类更为丰富, 灌溉和日常生活等人类活动是微塑料的主要污染源, 说明土地利用方式受人类活动的影响, 人类活动强度是影响微塑料分布的重要因素. 有研究表明, 微塑料丰度与村庄个数、村庄户数和人口密度显著正相关 ($P < 0.01$), 土地利用方式与人类活动强度密切相关^[15]. 此外, 除人类活动强度低于耕地外, 丰度较低的林地土壤微塑料分布还受到林木郁闭度的影响, 林冠面积大的植物能截留一部分大气沉降的微塑料, 减少微塑料在林地土壤中的累积量^[43].

实地调查与采样时发现, 罗时江小流域耕地塑料大棚极少使用, 却存在农膜的使用, 农业生产中遗弃的农膜、装农药和化肥的塑料袋(瓶)也可成为微塑料的来源, 耕作、播种和施肥等农业活动加剧了地膜、塑料瓶、塑料袋等的破碎和老化, 导致薄膜和碎片微塑料的分布表现为耕地显著高于草地 ($P < 0.05$), 且耕地中 $1\sim 2\text{ mm}$ 粒径微塑料占比显著高于草地 ($P < 0.05$). 不同程度的机械磨损作用可使大粒径微塑料破碎变小, 影响微塑料的粒径分布, 小粒径微塑料更易在不同环境介质间迁移, 大气沉降也可能是土壤中微塑料的来源之一^[39, 44, 45]. 然而, 较小粒径微塑料具有较大的比表面积, 易从环境中

吸附重金属、有机污染物和病原菌, 具有较高的生态风险^[34]. 因此, 评估土壤中微塑料污染的潜在风险至关重要.

经聚合物风险指数法评估, 罗时江小流域土壤微塑料污染等级达Ⅱ级, 其中耕地为污染等级最高的地类(Ⅲ级). 聚合物类型是影响微塑料生态风险的重要因素, 危害评分高达 10 001 的聚合物 PVC 仅在耕地中检出, 土地利用方式影响微塑料聚合物类型的分布, 进而影响微塑料生态风险, 高评分聚合物是导致耕地土壤微塑料风险指数较高的重要原因. 丹江口库区中等风险区域(Ⅲ级)主要由 PVC 和 PC(聚碳酸酯, polycarbonate)导致^[15], 说明聚合物类型影响微塑料风险污染水平. 类似地, 特拉什湖^[46]和涅水河流域^[47]等地的微塑料风险指数评估结果表明, 高危害评分的聚合物会导致局部区域产生高环境风险. 其次, 微塑料的生态风险不仅由微塑料聚合物类型决定, 丰度也是重要因素. 高评分的 PVC 是小流域内土壤微塑料污染风险的主要贡献者, 在耕地土壤中检出率为 2.04%, 而在罗时江小流域中则低至 0.81%, 从而出现耕地土壤微塑料污染指数大于罗时江小流域的结果. 高评分、低浓度的聚合物也可导致土壤环境呈较高风险水平^[46]. 丹江口库区具有较高的 PVC 占比, 71.90% 区域微塑料污染为Ⅲ级和Ⅳ级水平^[15], 高于本研究区污染水平. 此外, 罗时江小流域耕地土壤中的微塑料可能在雨季随地表径流通过罗时江流入洱海, 具有潜在的生态污染风险. 因此, 未来在洱海流域微塑料污染管控中应重视土壤微塑料的污染问题.

4 结论

(1) 罗时江小流域土壤中微塑料平均丰度为 $(711 \pm 55)\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 聚合物类型主要为聚酯(PES)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET), 纤维状和 $0.5\sim 2\text{ mm}$ 的微塑料占主导地位, 微塑料污染风险处于较低水平(Ⅱ级).

(2) 不同土地利用方式下的微塑料丰度存在显著性差异, 耕地和河岸带土壤微塑料丰度显著高于林地土壤 ($P < 0.05$). 薄膜、碎片和 $1\sim 2\text{ mm}$ 微塑料分布均表现为耕地显著高于草地 ($P < 0.05$), 与翻耕、施肥和灌溉等农业活动有关.

(3) 土壤中微塑料分布受人类活动的影响, 人类活动强度大的耕地土壤丰度高, 聚合物类型丰富, 微塑料潜在污染风险更高, 土地利用方式影响微塑料污染特征及污染风险, 人类活动是影响微塑料分布的主要因素.

参考文献:

- [1] Petersen F, Hubbart J A. The occurrence and transport of microplastics: The state of the science[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **758**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143936.
- [2] 张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 等. 微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展[J]. *环境科学*, 2023, **44**(8): 4728-4741.
Zhang L F, Liu Y H, Ruan R S, *et al.* Research progress on distribution characteristics and formation mechanisms of microplastics in the environment [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(8): 4728-4741.
- [3] Zhang J J, Wang L, Trasande L, *et al.* Occurrence of polyethylene terephthalate and polycarbonate microplastics in infant and adult feces[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2021, **8**(11): 989-994.
- [4] Jenner L C, Rotchell J M, Bennett R T, *et al.* Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **831**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154907.
- [5] Leslie H A, Van Velzen M J M, Brandsma S H, *et al.* Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood[J]. *Environment International*, 2022, **163**, doi: 10.1016/j.envint.2022.107199.
- [6] Jung Y S, Sampath V, Prunicki M, *et al.* Characterization and regulation of microplastic pollution for protecting planetary and human health[J]. *Environmental Pollution*, 2022, **315**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.120442.
- [7] Mendoza L M R, Vargas D L, Balcer M. Microplastics occurrence and fate in the environment [J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2021, **32**, doi: 10.1016/j.cogsc.2021.100523.
- [8] Rochman C M. Microplastics research-from sink to source [J]. *Science*, 2018, **360**(6384): 28-29.
- [9] 马贵, 丁家富, 周悦, 等. 固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估[J]. *环境科学*, 2023, **44**(9): 5055-5062.
Ma G, Ding J F, Zhou Y, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of microplastics in farmland soil in Guyuan [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(9): 5055-5062.
- [10] 薄录吉, 李冰, 张凯, 等. 农田土壤微塑料分布、来源和行为特征[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 2375-2383.
Bo L J, Li B, Zhang K, *et al.* Distribution, sources, and behavioral characteristics of microplastics in farmland soil [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 2375-2383.
- [11] Xu B L, Liu F, Cryder Z, *et al.* Microplastics in the soil environment: Occurrence, risks, interactions and fate-a review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2020, **50**(21): 2175-2222.
- [12] Zhang Y, Wang K, Chen W Z, *et al.* Effects of land use and landscape on the occurrence and distribution of microplastics in soil, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **847**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157598.
- [13] Zhang G S, Liu Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 12-20.
- [14] Xu G R, Yang L, Xu L, *et al.* Soil microplastic pollution under different land uses in tropics, southwestern China [J]. *Chemosphere*, 2022, **289**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133176.
- [15] 王峰, 公玮, 刘哲, 等. 南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估[J]. *环境科学*, 2023, **44**(11): 6279-6286.
Wang F, Gong W, Liu Z, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of microplastics in soil in Danjiangkou Reservoir area of South-to-North Water Diversion Project [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(11): 6279-6286.
- [16] 郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 等. 黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4748-4755.
Hao Y L, Hu Y X, Bai X X, *et al.* Abundances and morphology patterns of microplastics under different land use types on the Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4748-4755.
- [17] 储昭升, 高思佳, 庞燕, 等. 洱海流域山水林田湖草各要素特征、存在问题及生态保护修复措施[J]. *环境工程技术学报*, 2019, **9**(5): 507-514.
Chu Z S, Gao S J, Pang Y, *et al.* Characteristics, problems and ecological protection and restoration measures of mountain-river-forest-farmland-lake-grassland elements in Lake Erhai Basin [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2019, **9**(5): 507-514.
- [18] 李晓琳, 帅永芳, 张翼, 等. 基于 GIS 的洱海流域氮素时空分异特征及源结构解析[J]. *湖泊科学*, 2022, **34**(3): 816-827.
Li X L, Shuai Y F, Zhang Y, *et al.* GIS-based analysis on the temporal and spatial variation characteristics of nitrogen and its sources in Lake Erhai Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, **34**(3): 816-827.
- [19] 梁启斌, 李瑞琳, 李佳琛, 等. 洱海罗时江小流域林地-农田-河岸带土壤碳氮磷化学计量特征[J]. *西南农业学报*, 2022, **35**(11): 2587-2594.
Liang Q B, Li R L, Li J C, *et al.* Stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in the forestland-farmland-riparian zone of Luoshijiang small watershed in Erhai Basin [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, **35**(11): 2587-2594.
- [20] 韩丽花, 李巧玲, 徐笠, 等. 大辽河流域土壤中微塑料的丰度与分布研究[J]. *生态毒理学报*, 2020, **15**(1): 174-185.
Han L H, Li Q L, Xu L, *et al.* Abundance and distribution of microplastics of soils in Daliao River Basin [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2020, **15**(1): 174-185.
- [21] Li R L, Yu L Y, Chai M W, *et al.* The distribution, characteristics and ecological risks of microplastics in the mangroves of Southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **708**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135025.
- [22] Romarate II R A, Ancla S M B, Patilan D M M, *et al.* Breathing plastics in Metro Manila, Philippines: presence of suspended atmospheric microplastics in ambient air [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, **30**(18): 53662-53673.
- [23] Lithner D, Larsson Å, Dave G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(18): 3309-3324.
- [24] Huang B, Sun L Y, Liu M R, *et al.* Abundance and distribution characteristics of microplastic in plateau cultivated land of Yunnan Province, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(2): 1675-1688.
- [25] 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.
- [26] Zhou B Y, Wang J Q, Zhang H B, *et al.* Microplastics in agricultural soils on the coastal plain of Hangzhou Bay, east China: Multiple sources other than plastic mulching film [J]. *Journal of*

- Hazardous Materials, 2020, **388**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121814.
- [27] 刘琳琳, 王鹏, 孙曙光, 等. 四川广元植烟土壤微塑料分布状况分析[J]. 中国烟草学报, 2023, **29**(1): 46-54.
- Liu L L, Wang P, Sun S G, *et al.* Distribution of micro plastics in tobacco planting soil in Guangyuan, Sichuan Province [J]. Acta Tabacaria Sinica, 2023, **29**(1): 46-54.
- [28] 宋佃星, 马莉, 王全九. 宝鸡地区典型农田土壤中微塑料赋存特征及其环境效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, **35**(2): 170-175.
- Song D X, Ma L, Wang Q J. Occurrence characteristics and environmental effects of microplastics in typical farmland soils in Baoji area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, **35**(2): 170-175.
- [29] 王志超, 孟青, 于玲红, 等. 内蒙古河套灌区农田土壤中微塑料的赋存特征[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(3): 204-209.
- Wang Z C, Meng Q, Yu L H, *et al.* Occurrence characteristics of microplastics in farmland soil of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(3): 204-209.
- [30] Zhang H X, Huang Y M, An S S, *et al.* Microplastics trapped in soil aggregates of different land-use types: A case study of Loess Plateau terraces, China [J]. Environmental Pollution, 2022, **310**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119880.
- [31] Harms I K, Diekötter T, Troegel S, *et al.* Amount, distribution and composition of large microplastics in typical agricultural soils in Northern Germany [J]. Science of the Total Environment, 2021, **758**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143615.
- [32] Reethu M, Biswajit R, Aravind G H, *et al.* A first report on the spatial and temporal variability of microplastics in coastal soils of an urban town in south-western India: Pre- and post-COVID scenario [J]. Marine Pollution Bulletin, 2023, **190**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.114888.
- [33] Silori R, Shrivastava V, Mazumder P, *et al.* Understanding the underestimated: Occurrence, distribution, and interactions of microplastics in the sediment and soil of China, India, and Japan [J]. Environmental Pollution, 2023, **320**, doi: 10.1016/j.envpol.2022.120978.
- [34] 杨杰, 李连祯, 周倩, 等. 土壤环境中微塑料污染: 来源、过程及风险[J]. 土壤学报, 2021, **58**(2): 281-298.
- Yang J, Li L Z, Zhou Q, *et al.* Microplastics contamination of soil environment: sources, processes and risks [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, **58**(2): 281-298.
- [35] 韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 等. 辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1781-1790.
- Han L H, Xu L, Li Q L, *et al.* Levels, characteristics, and potential source of micro (meso) plastic pollution of soil in Liaoh River Basin [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1781-1790.
- [36] 陈荣龙, 陈延华, 黄珊, 等. 陕西关中农田土壤中塑料碎片和微塑料残留及其累积特征研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, **30**(10): 1649-1658.
- Chen R L, Chen Y H, Huang S, *et al.* Residues and accumulation characteristics of plastic fragments and micro-plastics in farmland soil of Guanzhong Plain, Shaanxi [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, **30**(10): 1649-1658.
- [37] 崔盼盼, 张晶晶, 胥荣威, 等. 纤维微塑料污染的产生及其影响因素[J]. 纺织学报, 2022, **43**(3): 193-200.
- Cui P P, Zhang J J, Xu R W, *et al.* Pollution of fibrous microplastics and its influencing factors [J]. Journal of Textile Research, 2022, **43**(3): 193-200.
- [38] 李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 等. 桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 2062-2071.
- Li P Z, Wu L, Huang F F, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of microplastics in water of different functional parks in Guilin [J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 2062-2071.
- [39] 吴亚梅, 王育鹏, 王康, 等. 北京市设施农业土壤微塑料的污染特征及潜在来源[J]. 生态毒理学报, 2022, **17**(4): 333-344.
- Wu Y M, Wang Y P, Wang K, *et al.* Pollution characteristics and potential sources of microplastics in facility agricultural soil in Beijing [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, **17**(4): 333-344.
- [40] Zhang H X, Huang Y M, An S S, *et al.* Land-use patterns determine the distribution of soil microplastics in typical agricultural areas on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **426**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127806.
- [41] He L Y, Li Z B, Jia Q, *et al.* Soil microplastics pollution in agriculture [J]. Science, 2023, **379**(6632), doi: 10.1126/science.adf6098.
- [42] 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.
- [43] Weber C J, Opp C. Spatial patterns of mesoplastics and coarse microplastics in floodplain soils as resulting from land use and fluvial processes [J]. Environmental Pollution, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115390.
- [44] 张小慧, 迪丽努尔·塔力甫, 买里克扎提·买合木提, 等. 乌鲁木齐南部大气及降尘中微塑料的形貌特征[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(12): 5542-5548.
- Zhang X H, Talifu D, Maihemuti M, *et al.* Morphological characteristics of microplastics in the atmosphere and dustfall in southern Urumqi [J]. China Environmental Science, 2022, **42**(12): 5542-5548.
- [45] Liang T, Lei Z Y, Fuad M T I, *et al.* Distribution and potential sources of microplastics in sediments in remote lakes of Tibet, China [J]. Science of the Total Environment, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150526.
- [46] 孙雪纯, 侯书贵, 黄壬晖, 等. 可可西里特拉什湖中微塑料污染特征、来源和生态风险[J]. 环境科学学报, 2023, **43**(2): 231-240.
- Sun X C, Hou S G, Huang R H, *et al.* Characteristics, sources and ecological risks of microplastics in Telashi Lake in Hoh Xil [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, **43**(2): 231-240.
- [47] 范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 等. 湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4430-4439.
- Fan M Y, Huang Y M, Zhang H X, *et al.* Distribution, risk, and influencing factors of microplastics in surface water of Huangshui River Basin [J]. Environmental Science, 2022, **43**(10): 4430-4439.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>	(2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>	(2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>	(2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>	(2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>	(2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>	(2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>	(2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>	(2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>	(2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>	(2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>	(2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>	(2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>	(2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>	(2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>	(2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>	(2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>	(2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>	(2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>	(2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>	(2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>	(2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying	(2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>	(2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>	(2793)
Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>	(2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>	(2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>	(2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>	(2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>	(2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>	(2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>	(2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i>	(2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>	(2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>	(2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>	(2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>	(2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>	(2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>	(2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>	(2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping	(2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>	(2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>	(3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>	(3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>	(3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>	(3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>	(3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>	(3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>	(3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>	(3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>	(3119)