

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

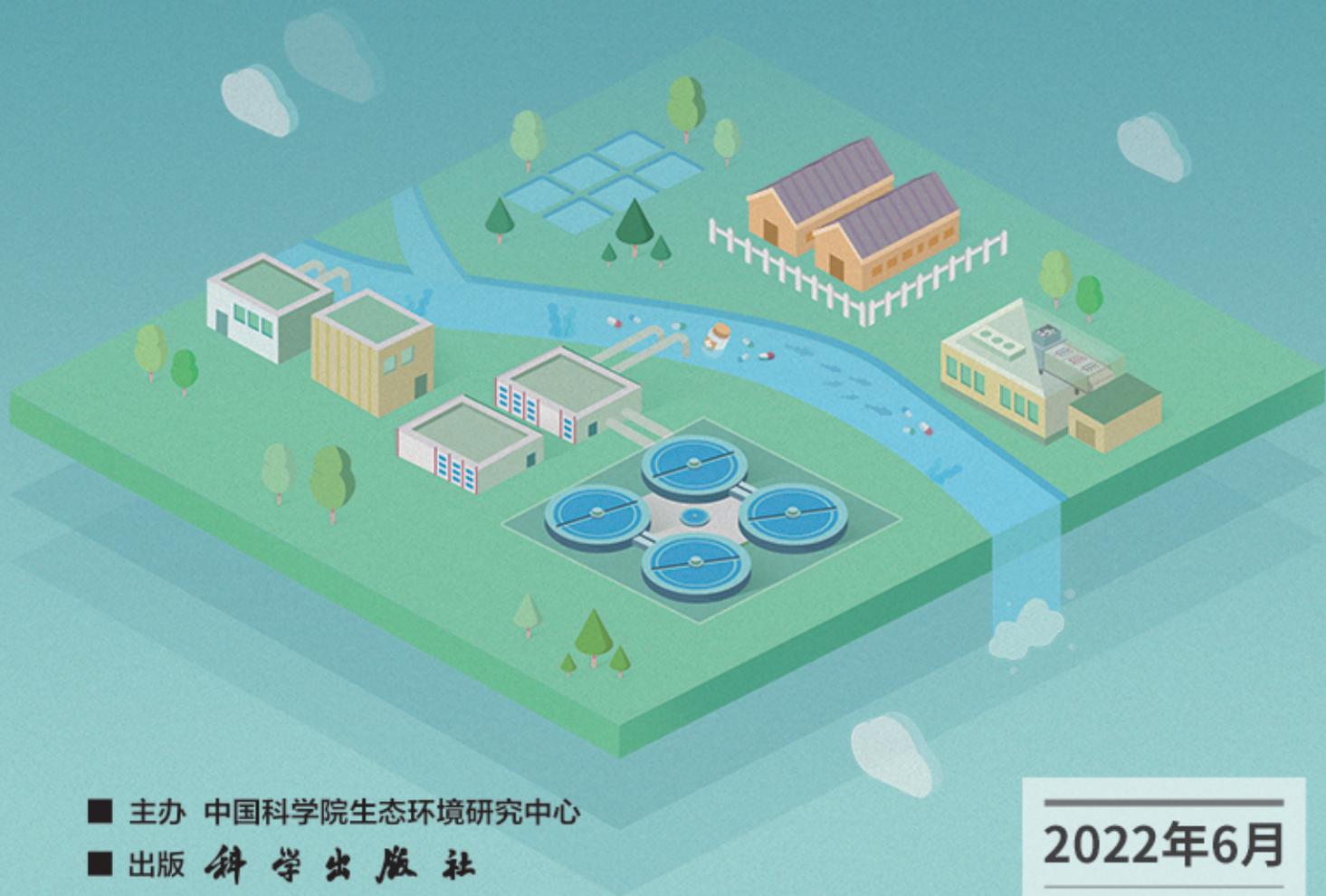
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期

Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM_{2.5} 浓度影响 邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)

新冠疫情管控措施对郑州市 PM_{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响 黄兵, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)

COVID-19 管控期间苏州市 PM_{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析 缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)

2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化 谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜祺, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)

基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM_{2.5} 来源 彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)

保定市冬季 PM_{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析 吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)

南京江北新区 PM_{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源 关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)

广西十万大山背景点 PM_{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析 邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)

大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例 张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)

基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)

天津市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染特征及气象影响分析 肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)

2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)

河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化 晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)

热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)

武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)

运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)

我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁 范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价 武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)

内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险 张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思璐, 孙兴滨, 王山军 (3005)

不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制 宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)

高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素 李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔景阳, 陈安强, 张丹 (3027)

青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)

东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)

湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险 刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)

长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价 张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)

香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)

城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应 陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)

2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子 屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)

嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系 王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)

近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)

长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制 谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)

高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法 顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋钟钟, 曹引, 赵红莉 (3140)

不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化 陈旭东, 高良敏 (3149)

生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染 石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)

不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响 吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)

北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析 席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐苏士, 荆红卫, 刘保献 (3177)

不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)

可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制 曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)

4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性 唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)

农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制 龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)

腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析 李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)

2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)

黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)

青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)

西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响 刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴鑫, 刘双燕 (3262)

贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 张倩, 韩贵琳 (3269)

南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析 董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)

神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价 严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)

石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复 许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)

水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响 谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)

改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应 罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)

土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应 罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)

小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响 靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)

重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征 廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)

长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征 廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)

基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应 梁建设, 白永平, 杨雪菡, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)

《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)

香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析

陈圣盛^{1,2}, 李卫明^{1,2*}, 张坤^{1,2}, 熊伟唯^{1,2}, 张续同^{1,2}, 刘子健^{1,2}

(1. 三峡水库生态系统湖北省野外科学观测研究站, 宜昌 443002; 2. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002)

摘要: 微塑料作为水体中一种普遍存在的污染物已引起社会的广泛关注. 为探究微塑料在淡水河流中的时空分布特征及其迁移规律, 以长江支流香溪河为例, 分别在2020年11月和2021年4月对香溪河表层水体、沉积物和消落带进行取样分析. 结果表明, 香溪河表层水体中微塑料的平均丰度为 $(6.64 \pm 1.32) \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$ (平水期) 和 $(5.00 \pm 1.07) \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$ (枯水期), 沉积物中微塑料的平均丰度为 $(0.56 \pm 0.13) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ (平水期) 和 $(0.41 \pm 0.09) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ (枯水期), 消落带中微塑料的平均丰度为 $(0.53 \pm 0.15) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ (平水期) 和 $(0.68 \pm 0.18) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ (枯水期), 表层水体、沉积物和消落带中微塑料丰度分布存在显著差异性 ($P < 0.05$). 在表层水体和沉积物中微塑料粒径主要分布在 $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$, 消落带中主要分布在 $1 \sim 5 \text{ mm}$; 表层水体和消落带中微塑料颜色以透明为主, 沉积物中以蓝色为主; 香溪河流域微塑料的形态以纤维为主, 材质主要是聚乙烯 (PE) 和聚丙烯 (PP). 影响微塑料分布的因素较多, 分析结果表明, 表层水体中微塑料丰度与水体流速呈负相关; 沉积物中微塑料丰度与河床底质类型有关, 与底质粒径呈负相关. 结合各个采样点位的微塑料丰度数据, 发现香溪河微塑料在流域空间分布上存在明显迁移过程: 沿河纵向主要表现为表层水体中微塑料顺河流方向的纵向迁移, 垂直方向上表现为水体与消落带、水体与沉积物的相互迁移.

关键词: 香溪河; 微塑料; 表层水体; 沉积物; 消落带; 分布特征; 迁移规律

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-3077-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202109268

Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin

CHEN Sheng-sheng^{1,2}, LI Wei-ming^{1,2*}, ZHANG Kun^{1,2}, XIONG Wei-wei^{1,2}, ZHANG Xu-tong^{1,2}, LIU Zi-jian^{1,2}

(1. Hubei Field Observation and Scientific Research Stations for Water Ecosystem in Three Gorges Reservoir, Yichang 443002, China; 2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Microplastics as a prevalent pollutant in water bodies have recently attracted widespread attention. To investigate the spatial and temporal distribution characteristics of microplastics in freshwater rivers and their migration patterns, the surface water, sediments, and subsidence zone of the Xiangxi River, a tributary of the Yangtze River, were sampled and analyzed in November 2020 and April 2021, respectively. The results showed that the average abundance of microplastics in the surface water of Xiangxi River was $(6.64 \pm 1.32) \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$ in flat water and $(5.00 \pm 1.07) \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$ in dry water, the average abundance of microplastics in sediments was $(0.56 \pm 0.13) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ in flat water and $(0.41 \pm 0.09) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ in dry water, and the average abundance of microplastics in the subsidence zone was $(0.53 \pm 0.15) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ in flat water and $(0.68 \pm 0.18) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ in dry water. There were significant differences in the abundance distribution of microplastics in the surface water, sediments, and subsidence zone ($P < 0.05$). In the surface water and sediments, the particle size of microplastics was mainly distributed in the range of $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$, and in the subsidence zone, it mainly ranged from $1 \sim 5 \text{ mm}$. The color of microplastics was mainly transparent in the surface water and subsidence zone and blue in sediments. The morphology of microplastics in the Xiangxi River basin was mainly fiber, and the materials were mainly polyethylene (PE) and polypropylene (PP). There were many factors affecting the distribution of microplastics. The analysis results showed that the abundance of microplastics in the surface water was negatively correlated with the flow rate of the water body. The abundance of microplastics in the sediment was related to the substrate type of the riverbed and negatively correlated with the substrate particle size. Combined with the microplastic abundance data of each sampling site, it was found that there was a significant migration process of microplastics in the spatial distribution of the Xiangxi River in the watershed. Along the river longitudinal direction, the longitudinal migration of microplastics in the surface water was along the river direction, and in the vertical direction, it showed the mutual migration between the water body and the subsidence zone and the water body and sediments.

Key words: Xiangxi River; microplastics; surface water; sediment; subsidence zone; distribution characteristics; migration pattern

塑料制品因其质量轻、成本低、隔热绝缘和经久耐用等优良特性被广泛应用于日常生活中,但随着塑料产量的快速增长,由于对塑料废弃物的监管不到位而随意丢弃和填埋所引发的环境问题也愈发严重^[1,2]. 塑料在环境中经过长时间的光化学降解、热氧化和生物腐蚀等过程的反复作用后,会裂解成粒径较小的塑料颗粒,当颗粒粒径小于 5 mm 时,即可被定义为微塑料^[3]. 微塑料的种类较多,主要包括聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP)、聚氯乙烯 (PVC)、聚苯乙烯 (PS) 和聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 等^[4]; 在形状上分为纤维、薄膜、碎片、颗粒和泡沫状

等^[5]. 微塑料具有较小的尺寸,较大的表面积且具有疏水性等特征,可以吸附有毒有害的有机污染物和重金属离子. 此外,微塑料容易被水生生物误食,影响水生生物的生长繁殖,并有可能随着食物链和食物网向更高营养级的生物传递,从而对生物多样性、生态系统服务功能和人类健康构成潜在的威胁^[6~11]. 近年来,国家日益重视塑料污染的危害,文

收稿日期: 2021-09-29; 修订日期: 2021-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979149)

作者简介: 陈圣盛 (1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: 851522040@qq.com

* 通信作者, E-mail: lwm000001@126.com

献[12]严格禁止生产超薄农用地膜和含塑料微珠日化产品等危害环境和人体健康的产品,鼓励公众减少使用一次性塑料制品。

塑料污染已成为当前生态环境领域的关注热点,最早对微塑料的相关研究主要集中在海洋环境^[8,13]。有研究表明,淡水环境是陆地环境和海洋环境微塑料迁移的桥梁,70%~80%的海洋微塑料都是通过淡水径流引入的^[14,15]。河流是环境中微塑料最终归趋的重要接纳体,同时也是海洋微塑料的一个重要陆源输入,故淡水环境中河流微塑料污染情况会直接影响近海海岸的微塑料污染程度。因此,近年来淡水环境中微塑料污染程度逐渐成为研究热点,目前已在鄱阳湖^[16,17]、太湖^[18]、赣江^[19]、珠江^[20]、丹江口水库^[21]和三峡水库^[22]等均检测到微塑料的分布。并且对微塑料性质的相关研究也愈加深入,袁海英等^[23]的研究发现滇池近岸水体微塑料丰度与总氮质量浓度呈极显著正相关,与叶绿素呈负相关;薛向东等^[24]的研究发现在不同 pH、温度等条件下微塑料对水中铜离子和四环素的吸附影响;李晨曦等^[25]的研究发现微塑料会影响其附着在表面的藻类生长情况;董姝楠等^[26]的研究发现聚酯类微塑料的沉降会随着电解质浓度升高而不断加强,而随着 pH 值的增加而降低。

香溪河是三峡库区一级支流,是三峡库区重要的生态功能影响区,探明其流域内微塑料的分布特点及迁移规律对整个三峡库区的生态安全具有重要意义。因此,本文以香溪河为例,分季节进行取样检测,结合香溪河水文动力条件和河床底质类型,探究其表层水体、沉积物和消落带中微塑料分布特点及其迁移特性,以补充淡水河流中微塑料污染方面的相关研究,以期为进一步研究内陆河流微塑料污染情况及其生态影响提供基础科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

香溪河是三峡水库近坝区内第一大支流,入江口距三峡大坝坝址约 32 km。香溪河全长 103 km,流域集水面积 3 099 km²^[27],上游支流南阳河发源于神农架林区木鱼镇红河,下游于秭归县归州镇香溪村注入长江。香溪河流域属亚热带大陆性季风气候,年降雨量为 900~1 200 mm,年平均气温为 17.24℃,是典型的山区季节性河流^[28]。

1.2 样品采集

本研究根据香溪河流域的水文环境特征,沿河共设置 11 个采样点位[包括香溪河干流 7 个采样点(xx00~xx06),位于上游的支流南阳河共 4 个采样点

(xx07~xx10)],具体采样点位分布如图 1 所示。分别在 2020 年 11 月(枯水期)和 2021 年 4 月(平水期)两个季度取样研究,每个采样点位采集表层水体样品、沉积物样品和消落带样品。上游南阳河水深较浅(<2 m),水体样品直接用铁桶提取,沉积物和消落带样品采用不锈钢铲直接铲取表层 5 cm 样品^[29]。干流水深较深(>20 m),使用卡盖式采水器采集表层水体样品,沉积物样品采用彼得逊采泥器抓取,消落带样品采用不锈钢铲铲取。采集的水体样品装入 2L 的棕色玻璃水样瓶中,将采集到的沉积物和消落带样品(湿重 1 kg)用锡箔纸包裹后装入聚乙烯自封袋(17 cm×25 cm)^[30]。所有样品冷冻在 4℃ 冰箱中保存,以便后续实验室检测。实时流速采用 Vector 三维点式流速仪(挪威)和便携式多普勒流速仪测得,河床底质粒径使用钢卷尺(1 mm 刻度)测得^[31]。

1.3 样品的分离与提取

水体样品:将水样转入 2 L 玻璃烧杯中,加入 100 mL H₂O₂ 溶液(30%)进行消解处理^[32,33],用玻璃棒轻微搅拌后,使用锡箔纸遮盖烧杯口(防止外源污染),静置 12 h(去除有机质)。待充分消解完后,使用真空抽滤装置对样品进行抽滤,滤膜采用孔径 10 μm、直径 47 mm 的玻璃纤维滤膜,得到的滤膜收集在直径 50 mm 的带盖玻璃培养皿中,贴好标签,以待后续镜检。

沉积物和消落带样品:将沉积物和消落带样品放入 60℃ 真空干燥箱中烘干至恒重^[34],采用实验用不锈钢筛网(5 mm)筛出粒径较大的杂质,每个点位称取 100 g 待测样品(干重)于洗净干燥的 1 L 烧杯中。每个烧杯中倒入 500 mL 饱和 NaCl 溶液(1.12 g·cm⁻³)进行浮选^[35,36],使用玻璃棒搅拌均匀后室温下静置 1 h,待充分沉降后,收集上清液于洗净干燥的 2 L 烧杯中,重复操作 2~3 次^[3,37]。向收集的上清液中加入 100 mL H₂O₂ 溶液(30%)进行消解处理,用玻璃棒轻微搅拌后,使用锡箔纸遮盖烧杯口(防止外源污染),静置 12 h(去除有机质)。后续真空抽滤步骤与水体样品相同。

为防止潜在的外源污染,野外采样及室内实验穿着棉质衣物,使用一次性丁腈手套^[38,39]。实验过程中尽量避免使用塑料器皿,实验所用器皿、工具使用前均需要先用纯水冲洗 3 次,再烘干使用,实验中所用润洗液均使用饱和 NaCl 溶液(1.12 g·cm⁻³)。

1.4 微塑料的鉴定分析

将抽滤所得到的滤膜置于徕卡体式显微镜(Leica S9D,美国)下观察其颜色、粒径及形态并拍照记录。采用 Nano Measuer 1.2 软件统计其粒径大小和丰度值,并挑选出塑料微粒或疑似塑料的微粒,



图 1 香溪河采样点位示意

Fig. 1 Sampling sites of Xiangxi River

使用傅里叶红外光谱仪 (PE·Fourier Transform, 美国) 对挑选出的微粒进行成分鉴定, 将扫描得到的数据使用 Origin 2017 绘制光谱图, 根据吸收峰值判定其主要组成成分。

1.5 数据处理

使用 ArcGis 10.2 软件绘制采样点位分布图; 使用 SPSS 22.0 进行单因素方差分析 (One Way ANOVA) 和斯皮尔曼 (Spearman) 相关性分析, 所有数据结果均在显著性水平为 0.05 情况下检验; 相关图表使用 Origin 2017 和 Excel 2016 完成。本研究水体中微塑料丰度单位使用“ $n \cdot L^{-1}$ ”表示, 沉积物和消落带中微塑料丰度单位使用“ $n \cdot g^{-1}$ ”表示。

2 结果与分析

2.1 香溪河微塑料的丰度和时空分布特征

本研究中表层水体、沉积物和消落带样品分别

采自 2020 年 11 月 (枯水期) 和 2021 年 4 月 (平水期), 沿河设置 11 个采样点位以调查香溪河流域微塑料的时空分布情况。3 种不同环境中各点位的微塑料丰度分布情况如图 2 所示。结果表明, 香溪河表层水体中微塑料平均丰度为 $(6.64 \pm 1.32) n \cdot L^{-1}$ (平水期) 和 $(5.00 \pm 1.07) n \cdot L^{-1}$ (枯水期), 丰度范围为 1.50 (xx09 的枯水期) $\sim 11.5 n \cdot L^{-1}$ (xx03 的平水期), 高于三峡水库表层水体微塑料平均丰度值 $(4.70 \pm 2.82) n \cdot L^{-1}$ (丰水期)^[22]。时间上微塑料丰度在 11 个点位中均表现为: 平水期 > 枯水期, 且在丰度值越高的点位, 其平水期和枯水期的差异越大; 空间上微塑料丰度整体上表现为: 中游 (xx03 ~ xx06 段) > 下游 (xx00 ~ xx02 段) > 上游 (xx07 ~ xx10 段), 其中在 xx03 (峡口镇) 和 xx06 (昭君镇) 丰度最高, 在 xx09 丰度最低, 丰度值与总体均值差异极为显著 ($P < 0.05$)。

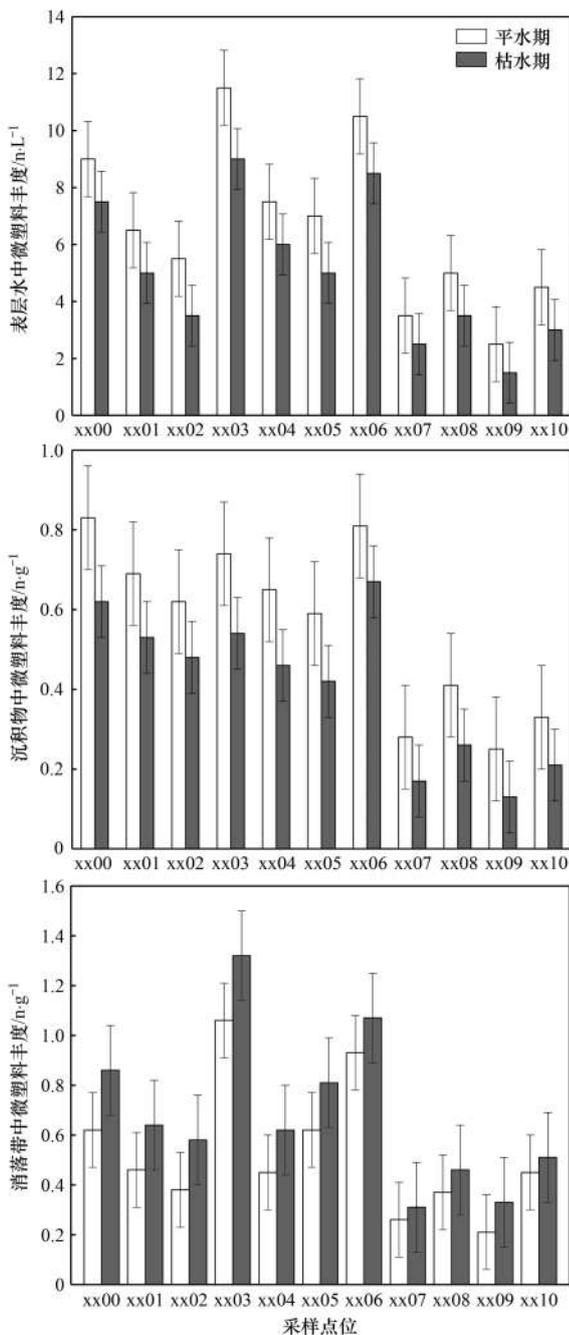


图2 3种不同环境中微塑料的丰度分布特征

Fig. 2 Abundance distribution characteristics of microplastics in three different environments

香溪河沉积物(干重)中微塑料平均丰度为 $(0.56 \pm 0.13) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ (平水期) 和 $(0.41 \pm 0.09) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ (枯水期), 丰度值范围为 $0.13 \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ (xx09 的枯水期) $\sim 0.83 \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ (xx00 的平水期). 两个季度结果显示微塑料丰度在 11 个点位中均表现为: 平水期 $>$ 枯水期; 整体空间分布表现为: 中下游(xx00 \sim xx06 段) $>$ 上游(xx07 \sim xx10 段). 其中在 xx00 (河口) 和 xx06 (昭君镇) 丰度值较大, 显著高于平均丰度值 ($P < 0.05$), 而在 xx07 和 xx09 丰度值较低, 显著低于平均丰度值 ($P < 0.05$).

香溪河消落带(干重)中微塑料平均丰度为

$(0.53 \pm 0.15) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ (平水期) 和 $(0.68 \pm 0.18) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ (枯水期), 丰度值范围为 $0.21 \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ (xx09 的平水期) $\sim 1.32 \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ (xx03 的枯水期). 消落带的 11 个点位中, 微塑料丰度均表现为: 平水期 $<$ 枯水期, 且中下游(xx00 \sim xx06 段) 的季度性差异比上游(xx07 \sim xx10 段) 更加明显. 消落带中微塑料丰度分布整体上表现为: 中游(xx03 \sim xx06 段) $>$ 下游(xx00 \sim xx02 段) $>$ 上游(xx07 \sim xx10 段). 且在 xx03 (峡口镇) 和 xx06 (昭君镇) 两个点位显著高于平均丰度值 ($P < 0.05$).

分析结果显示, 香溪河微塑料丰度普遍较高, 流域内表层水体、沉积物和消落带中微塑料分布存在明显的时空差异性, 但微塑料丰度随季节性变化波动差异相对于空间变化波动较小. 从时间上看, 表层水体和沉积物中微塑料丰度均为: 平水期 $>$ 枯水期, 而消落带中为: 平水期 $<$ 枯水期; 从空间分布来看, 整体上表现为: 中游(xx03 \sim xx06 段) $>$ 下游(xx00 \sim xx02 段) $>$ 上游(xx07 \sim xx10 段), 上游(xx07 \sim xx10 段) 受人为干扰较小, 在 3 种不同环境中微塑料丰度普遍低于中下游, 而在人口密集的中下游乡镇段(xx03 \sim xx06) 微塑料丰度显著高于其他点位.

2.2 香溪河微塑料的形态特征

本研究依据前人的经验^[4,5], 将微塑料按粒径(r)大小分为 $0.01 \sim 0.1$ 、 $0.1 \sim 0.5$ 、 $0.5 \sim 1$ 和 $1 \sim 5 \text{ mm}$ 这 4 类; 按形状分为薄膜、纤维、碎片和颗粒这 4 类; 按颜色分为透明、蓝色、红色、绿色和黑色这 5 类. 如图 3(a) 所示, 3 种不同环境中微塑料粒径大小所占比例存在明显差异, 但季节性波动差异较小 ($P > 0.05$). 表层水体中微塑料主要以 $< 0.5 \text{ mm}$ (87.6%) 的形式存在, 沉积物中微塑料粒径分布范围较为均匀, 主要以 $0.1 \sim 1 \text{ mm}$ (73.9%) 的形式存在, 而消落带中微塑料粒径以 $1 \sim 5 \text{ mm}$ (39.3%) 为主. 在表层水体和沉积物两种环境中, 微塑料粒径越大, 其丰度在环境中所占比例则越小, 这与李征等^[40] 所得的结果相同. 粒径为 $1 \sim 5 \text{ mm}$ 的微塑料在表层水体和沉积物中占比较低 (3% \sim 7%), 而在消落带中占比较高 (38% \sim 40%), 这可能是大粒径 ($1 \sim 5 \text{ mm}$) 微塑料随水体径流时, 被土壤的截留作用有效阻隔在消落带而未进入水体. 在 3 种不同环境中微塑料的主体粒径大小分布可以表示为: r (消落带) $>$ r (沉积物) $>$ r (表层水体). 经过差异显著性检验, 结果表明表层水体、沉积物和消落带中微塑料粒径分布存在显著性差异 ($P < 0.05$). 如图 3(b) 所示, 结合各个点位数据进行相关性分析, 发现同点位的 3 种不同环境中微塑料的粒径分

布没有相关性,例如在上游点位的表层水体中只检测到 <0.5 mm 的微塑料,但在沉积物中检测出少量的 >0.5 mm 的微塑料,可能是经过长时间的积留,沉积物中的塑料物通过物理化学裂解和生物降解等方式储存了少量的大粒径微塑料. 在表层水体和沉积物两种环境中,沿河不同点位的微塑料粒径分布

也存在差异性,而消落带中微塑料粒径大小比沿河点位分布较为均匀,但其丰度分布如图 2 所示存在较大差异性,中游丰度值接近上游的两倍,分析其原因可能是中游是人口密集的乡镇段,人类生产生活产生的塑料垃圾较多,导致中游段的微塑料丰度远高于上游山区段.

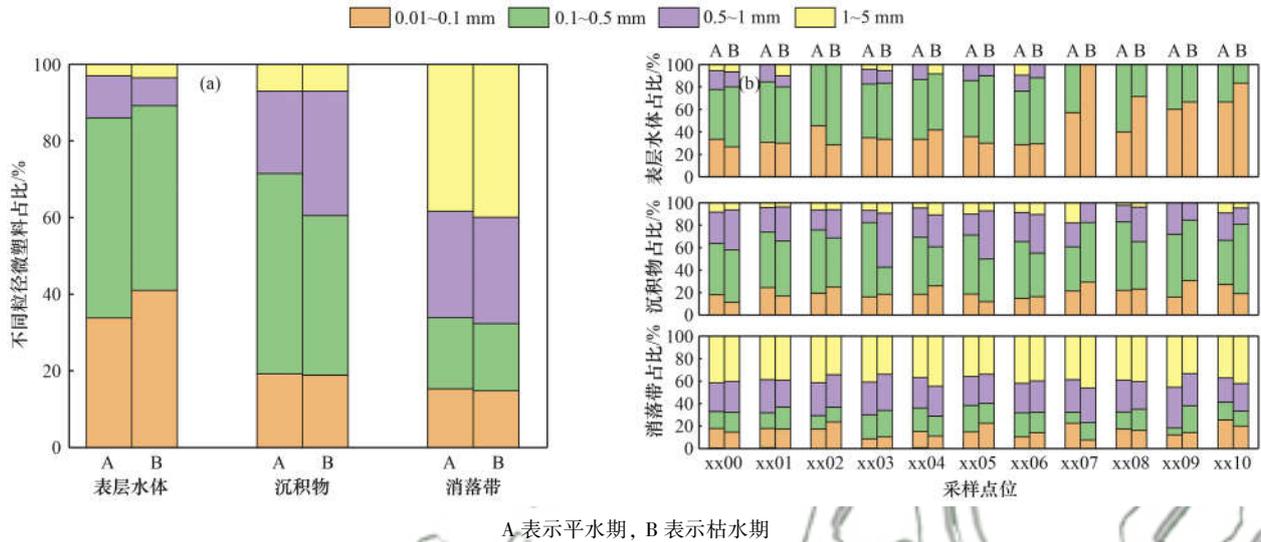


图 3 3 种不同环境中微塑料的粒径分布特征

Fig. 3 Particle size distribution characteristics of microplastics in three different environments

如图 4(a)所示,香溪河表层水体、沉积物和消落带中的微塑料形状时空差异性较小,均以纤维状为主(39.28%~62.74%),颗粒状最少(3.23%~10.39%),且纤维状微塑料在沉积物中分布占比要远大于其他形状的微塑料,说明纤维状微塑料在水体中更容易沉降到沉积物. 经过差异显著性检验,结果表明表层水体、沉积物和消落带中微塑料在形状比例上没有显著性差异($P > 0.05$). 如图 4(b)所示,通过对各个采样点位的数据分析,发现各点位之

间微塑料形状在 3 种不同环境中的分布存在一定差异,薄膜状微塑料主要分布在上游表层水体和下游消落带中,调查发现沿岸两边使用的农药化肥包装袋、农用薄膜等是其来源;纤维状微塑料主要分布在中下游,实地踏勘走访发现乡镇上居民的洗涤废水排放、航道内大量船舶负载货物和缓冲轮胎等纤维材料的老化分解是其直接来源.

香溪河流域微塑料的颜色分布在时间上相对稳定($P > 0.05$),但在空间上存在明显的差异性. 如图

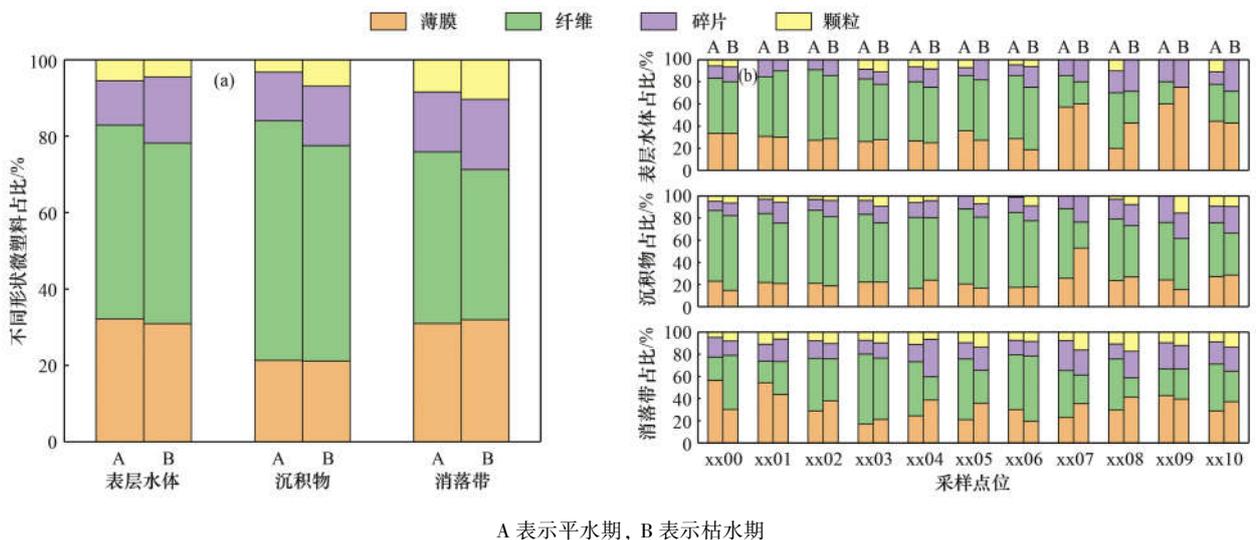


图 4 3 种不同环境中微塑料的形状分布特征

Fig. 4 Shape distribution characteristics of microplastics in three different environments

5 所示,流域内主要以透明和蓝色微塑料为主 (63.71%~75.45%),在表层水体和消落带中主要检测出透明微塑料(38.14%~58.18%),沉积物中以蓝色(36.30%~37.10%)为主.经过差异显著性检验,结果表明表层水体、沉积物和消落带中微塑

料在颜色比例上存在显著性差异($P < 0.05$).黑色微塑料在香溪河流域内分布较小,表层水体中极少分布在中游乡镇段,但在沿河沉积物中广泛存在,这可能是沉积的微塑料在吸附污染物后发生了物理和化学变化使其颜色发生了改变^[40].

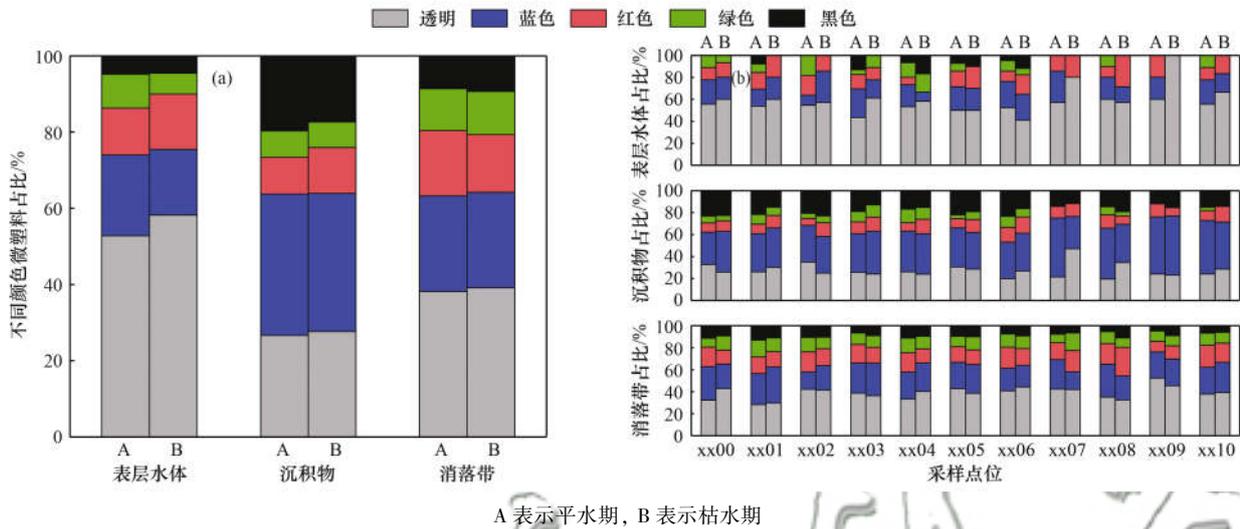


图 5 3 种不同环境中微塑料的颜色分布特征

Fig. 5 Color distribution characteristics of microplastics in three different environments

2.3 香溪河微塑料的主要成分

将挑选出的微粒样品利用傅里叶红外光谱仪进行检测,通过对官能团的特征峰分析,确定其组成成分,3 种不同环境及各点位微塑料成分分布如图 6 所示.香溪河微塑料主要分为聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和其他(OTH)共 5 类,占比分别为 34.49%、32.00%、18.47%、9.86% 和 5.18%,所检测的环境中相对应的红外光谱图如图 7 所示.整体而言,香溪河表层水体、沉积物和消落带中微

塑料的主要成分均为聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS),聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和其他(OTH)类微塑料在 3 种环境中均占比较小且随季节性变化相对稳定.经过差异显著性检验,结果表明不同成分的微塑料比例在表层水体、沉积物和消落带中没有显著性差异($P > 0.05$).结合每个采样点位的数据分析,不同点位具有不同优势成分的微塑料,例如聚苯乙烯(PS)类微塑料在乡镇点位(xx03 和 xx06)分布相对其他点位更加广泛,推测是乡镇的一次性塑料制品是聚苯乙烯

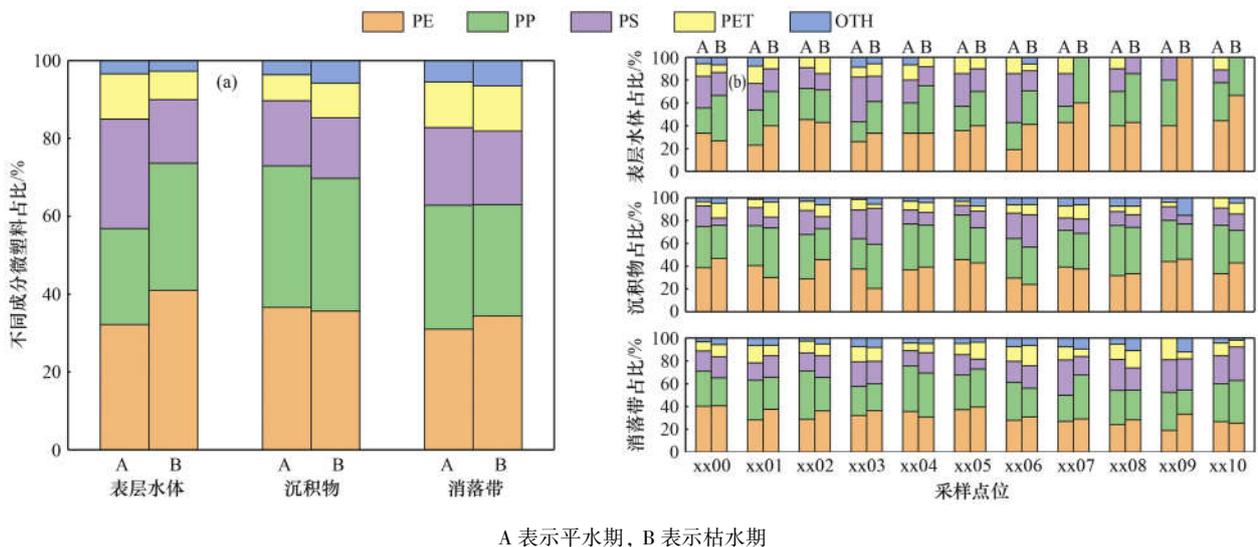


图 6 3 种不同环境中微塑料的成分分布特征

Fig. 6 Composition distribution characteristics of microplastics in three different environments

(PS)类微塑料的主要来源. 枯水期上游表层水体只检测到了聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP),可能是上游微塑料丰度低,单位表层水体样品中只检测到优势成分的微塑料也实属正常,而沉积物中检测到了其他成分的微塑料可能是由于水体温度、盐

度或是生物力以及其他外力等加速了微塑料的沉降过程^[41]. 聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)因其优良特性被广泛应用于生活中,是最为普遍的塑料来源,也使得香溪河流域的微塑料污染主要是聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP).

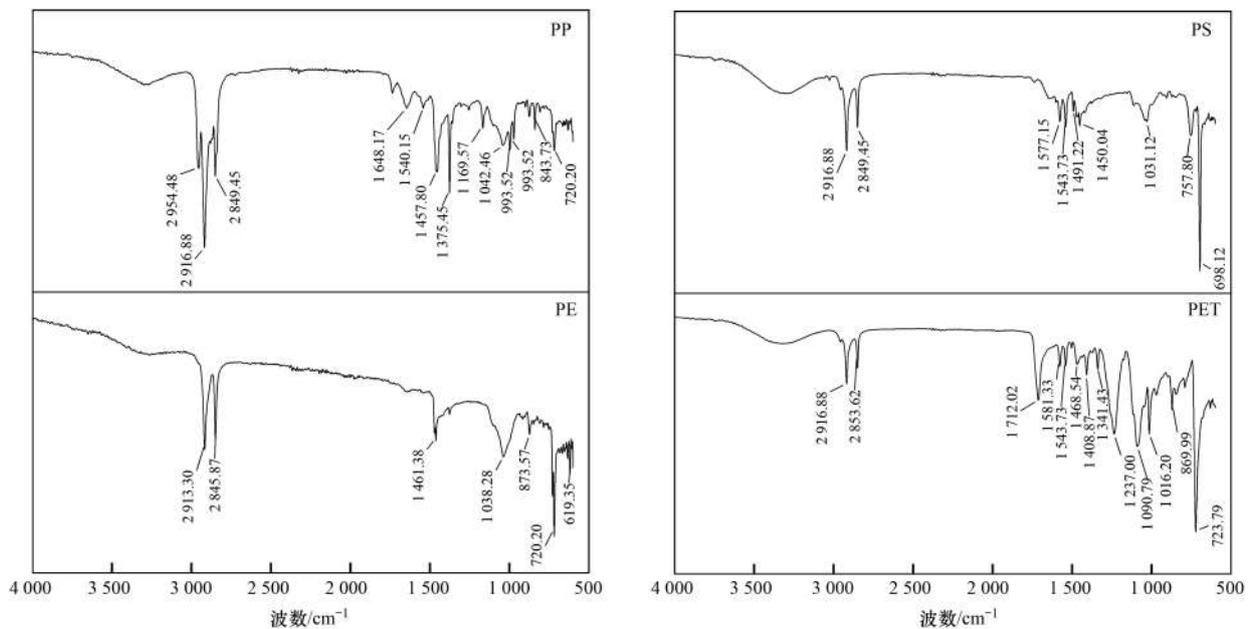


图7 香溪河典型微塑料红外光谱图

Fig. 7 Infrared spectra of typical microplastics in Xiangxi River

2.4 微塑料空间分布与水体流速和河床底质类别的响应关系

2.4.1 表层水体中微塑料丰度与流速的关系

为研究香溪河表层水体中微塑料丰度分布与水体流速的关系,在采样时测得表层水体实时流速(v). 数据结果显示,在中下游(xx00~xx06段)流速较小,为 $0.001 \sim 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,上游(xx07~xx10段)流速较大,为 $0.04 \sim 0.57 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 如图8所示,结合各个点位的微塑料丰度数据,发现在表层水体流速

相对较低的点位(xx00~xx06和xx08),其微塑料丰度值相对偏高;而流速相对较高的点位(xx07、xx09和xx10),其微塑料丰度值相对偏低. 通过对表层水体中微塑料的丰度与水体流速进行斯皮尔曼(Spearman)相关性分析,如表1所示,结果表明两者呈明显负相关($r = -0.702$, $P = 0.0003 < 0.05$). 说明香溪河表层水体中微塑料在随水体沿河纵向迁移过程中,水体流速是影响表层水体中微塑料丰度分布的重要因素之一.

2.4.2 沉积物中微塑料丰度与河床底质粒径的关系

本研究通过实地取样及测量^[31],根据粒径(D)大小将底质分为漂石($20 \sim 80 \text{ cm}$)、砂卵石($6 \sim 20 \text{ cm}$)和淤泥($< 0.1 \text{ cm}$)这3类^[42]. 研究区域内中下游(xx00~xx06段)主要是淤泥,上游(xx07~xx10段)以砂卵石和少量漂石为主. 具体测量数据结果如表2所示.

如图9所示,结合各个点位沉积物中微塑料丰度和底质粒径数据进行分析. 结果表明,中下游段底质均为淤泥,底质粒径较小,其沉积物中微塑料丰度较大;而上游底质粒径较大,沉积物中微塑料丰度较小,其中xx09点位底质粒径最大,为砂卵石和漂石底质,其沉积物中微塑料丰度值最小. 结合鲁瀚友

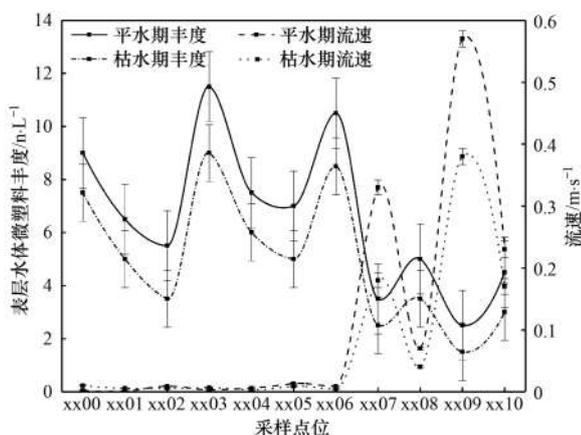


图8 表层水体中微塑料丰度分布与流速关系

Fig. 8 Relationship between microplastics abundance distribution and flow velocity in surface water

表 1 表层水体中微塑料丰度与水体流速的相关性分析¹⁾

Table 1 Correlation analysis between microplastic abundance in surface water and water velocity

项目	类型	相关性	
		水体微塑料丰度	流速
水体微塑料丰度	Spearman 相关性	1.000	-0.702 *
	Sig. (双尾)	—	0.000 3
流速	Spearman 相关性	-0.702 *	1.000
	Sig. (双尾)	0.000 3	—

1) * 表示在 0.05 水平极显著相关(双尾); “—” 表示没有相关数据

表 2 香溪河河床底质类别

Table 2 Streambed substrate category of Xiangxi River

采样点位	粒径(D)/cm	底质类型
xx00 ~ xx06	<0.1	淤泥
xx07	17.290 ± 2.163	砂卵石和漂石
xx08	13.629 ± 0.896	砂卵石
xx09	19.865 ± 3.140	砂卵石和漂石
xx10	10.129 ± 0.561	砂卵石

等^[31]对相关河床粒径决定河床相对粗糙度的变化研究,推测可能是底质粒径越小,单位体积沉积物对微塑料的摩擦力越大,越容易积留微塑料;反之,底质粒径越大,单位体积沉积物对微塑料的摩擦力越小,越容易随水体流动而发生迁移.对沉积物中微塑料丰度与底质粒径大小进行斯皮尔曼(Spearman)相关性分析,分析结果见表 3.结果表明,沉积物中微塑料的丰度与其底质粒径大小呈现出明显的负相关

表 3 沉积物中微塑料丰度与底质粒径的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis between microplastic abundance in sediments and sediment particle size

项目	类型	相关性	
		沉积物微塑料丰度	底质粒径
沉积物微塑料丰度	Spearman 相关性	1.000	-0.794 *
	Sig. (双尾)	—	0.004
底质粒径	Spearman 相关性	-0.794 *	1.000
	Sig. (双尾)	0.004	—

1) * 表示在 0.05 水平极显著相关(双尾); “—” 表示没有相关数据

3 讨论

3.1 香溪河流域微塑料总体分布特征

与部分典型淡水环境中微塑料含量相比(表 4),整体来看,香溪河流域微塑料污染较为严重,微塑料丰度分布存在明显的时空差异性.具体表现在平水期时,表层水体和沉积物中微塑料丰度要高于枯水期,而消落带中微塑料丰度要低于枯水期,可能是平水期时雨量充足,通过径流方式携带了大量微塑料进入水体,导致水体微塑料丰度大量增加.从各点位横向来看,微塑料从消落带进入水体后,一部分微塑料会随着水流而向下游迁移,一部分会被水生生物误食从而进入食物链和食物网中,还有一部分

性($r = -0.794$, $P = 0.004 < 0.05$),说明河床底质类型是影响香溪河沉积物中微塑料丰度分布的重要因素之一.

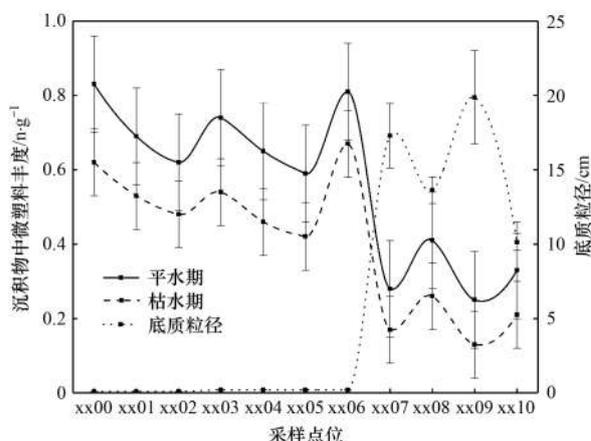


图 9 沉积物中微塑料丰度分布与河床底质粒径关系

Fig. 9 Relationship between microplastic abundance distribution in sediments and bed bottom particle size

由于自身重力或由其吸附性而吸附重金属和有机污染物后发生沉降,致使沉积物中微塑料丰度随之增加,然而,其间具体的量化关系有待进一步实验探究,此时消落带成为水体微塑料的源;而当河道内水位下降时,水体中部分微塑料会被滞留在消落带,此时消落带成为水体微塑料的汇^[43].沿河流纵向来看,微塑料丰度分布存在显著差异性($P < 0.05$),表现为:中游 > 下游 > 上游.其主要原因是上游是山区型河流,坡降较大,人为干扰度较小,微塑料丰度相对较低;而中游主要是乡镇段,人口密集,沿岸人类活动产生的塑料废弃物较多,特别在是峡口镇(xx03)和昭君镇(xx06)微塑料丰度值最大. Browne 等^[44]的研究结果也表明,微塑料分布特征与研究区

域内的人口密度密切相关;下游沿岸人口密度相对中游较小,沿河种植了大量柑橘树,使用的农药化肥和农用膜等^[45]均是微塑料的潜在来源.同时,香溪河航运经济较为发展,在给人们带来经济效益的同时,也加重了流域内微塑料污染程度.

香溪河微塑料的成分主要以聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)为主,这主要是因它们具有多种优良特性而被广泛应用于日常生活中,是最普遍的塑料材质.香溪河和三峡水库^[22]的微塑料形状都以纤维类为主,且香溪河表层水体中微塑料平均丰度要高于三峡水库表层水体中平均丰度,说明香溪河微塑料分布特征对三峡水库微塑料的分布具有一定影响.

表4 部分典型淡水环境中微塑料含量¹⁾

研究区域	水体中丰度/ $n \cdot L^{-1}$	沉积物中丰度/ $n \cdot g^{-1}$	文献
鄱阳湖	10.00 ~ 64.00	0.36 ~ 1.45	[16,17]
太湖	3.40 ~ 25.80	0.01 ~ 0.23	[18]
赣江	0.20 ~ 5.40	0.01 ~ 1.28	[19]
丹江口水库	0.47 ~ 15.02	0.03 ~ 0.30(湿重)	[21]
三峡水库	1.60 ~ 12.61	0.03 ~ 0.30(湿重)	[22]
北运河	1.17 ~ 9.94	0.11 ~ 0.30	[46]
香溪河	1.50 ~ 11.50	0.13 ~ 0.83	本研究

1) 为方便对比,数据进行了单位换算

3.2 香溪河微塑料的来源及迁移分析

结合实地踏勘走访情况,分析香溪河微塑料的来源主要是沿河两岸的塑料垃圾、生活污水、工业废水、农药化肥和农用薄膜等点面源污染.根据河流受人为干扰程度的大小情况将其分为上游(人为干扰度小的山区段)和中下游(人为干扰度大的乡镇段)进行分段分析.上游山区段人口密度较小,微塑料的来源主要是沿河道两岸少量居民随意丢弃的塑料垃圾和生活污水直排入河,上游坡降较大,水深较浅,水流较快且河床底质以砂卵石和少量漂石为主,部分微塑料会沉积在河床底部,还有部分微塑料会随水体向下游迁移;中下游乡镇段人口密集,河道从乡镇中间穿过,沿岸两边的塑料垃圾、生活污水和工业废水的排放以及农药化肥和薄膜的使用是微塑料的主要来源,河道两岸的塑料废弃物经过长时间生物化学降解后,会随雨水冲刷或地表水径流而迁移,而土壤的沥滤作用^[47]会使粒径较大的微塑料滞留在消落带,粒径较小的微塑料会通过消落带直接进入水体.由于中下游坡降较小,水深较深,水流缓慢且河床底质是以淤泥为主,使得大量微塑料沉积在河床.结合香溪河各个点位的微塑料丰度数据,分析各个点位表层水体、沉积物和消落带中微塑料丰度分布变化情况,发现香溪河微塑料在流域空间分布上存在明显迁移过程(图10):沿河纵向主

要是水体中微塑料顺河流方向的纵向迁移,垂直方向上表现为水体与消落带、水体与沉积物的相互迁移.微塑料在水体与消落带之间的迁移主要是依靠地表径流和水位变化实现;微塑料在水体与沉积物之间的迁移主要是通过微塑料的自身沉降和水动力扰动实现,香溪河微塑料的最终归宿主要是沉积在河床沉积物和沿水流向下游三峡水库迁移.

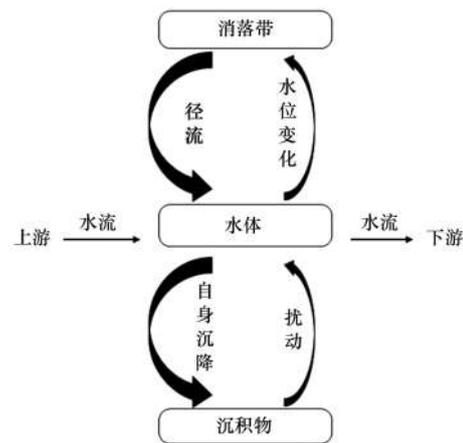


图10 微塑料迁移分析

Fig. 10 Migration analysis of microplastics

4 结论

(1) 香溪河表层水体中微塑料丰度值范围为 $1.50 \sim 11.50 n \cdot L^{-1}$, 粒径以 $0.01 \sim 0.5 mm$ 为主, 颜色主要为透明; 沉积物中微塑料丰度值范围为 $0.13 \sim 0.83 n \cdot g^{-1}$, 粒径以 $0.1 \sim 1 mm$ 为主, 颜色主要为蓝色; 消落带中微塑料丰度值范围为 $0.21 \sim 1.32 n \cdot g^{-1}$, 粒径以 $1 \sim 5 mm$ 为主, 颜色主要为透明. 香溪河流域微塑料污染以纤维和薄膜形态为主, 其主要成分为聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS).

(2) 香溪河微塑料丰度分布具有时空差异性. 微塑料丰度分布随季节性波动相对较小, 但具有明显的空间差异性, 横向上表现为: 消落带 > 沉积物 > 表层水, 纵向上表现为: 中游 > 下游 > 上游, 微塑料丰度最高的点位均在中游乡镇段, 其次是靠近入江口的下游段, 上游山区段微塑料丰度相对较小.

(3) 香溪河微塑料的分布特征受多方面的影响, 分析结果表明, 表层水体中微塑料丰度与水体流速呈现明显的负相关, 说明水体流速是影响水体微塑料分布的重要因素之一; 沉积物中微塑料丰度与河床底质粒径大小呈现明显负相关, 说明河床底质类型是影响沉积物中微塑料分布的重要因素之一.

(4) 香溪河微塑料依靠地表径流和水位变化实现消落带与水体之间迁移过程, 通过自身沉降和水动力扰动实现在水体与沉积物之间的迁移过程.

参考文献:

- [1] Li J L, Liu H H, Chen J P. Microplastics in freshwater systems: a review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection[J]. *Water Research*, 2018, **137**: 362-374.
- [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] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, *et al.* Lost at sea: where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, **304**(5672), doi: 10.1126/science.1094559.
- [4] Wagner M, Scherer C, Alvarez-Muñoz D, *et al.* Microplastics in freshwater ecosystems: What we know and what we need to know [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2014, **26**(1), doi: 10.1186/s12302-014-0012-7.
- [5] Tsang Y Y, Mak C W, Liebich C, *et al.* Microplastic pollution in the marine waters and sediments of Hong Kong[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **115**(1-2): 20-28.
- [6] Farrell P, Nelson K. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **177**: 1-3.
- [7] Setälä O, Fleming-Lehtinen V, Lehtiniemi M. Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **185**: 77-83.
- [8] Mu J L, Qu L, Jin F, *et al.* Abundance and distribution of microplastics in the surface sediments from the northern Bering and Chukchi Seas[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **245**: 122-130.
- [9] Browne M A, Dissanayake A, Galloway T S, *et al.* Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(13): 5026-5031.
- [10] 周倩, 章海波, 李远, 等. 海岸环境中微塑料污染及其生态效应研究进展[J]. *科学通报*, 2015, **60**(33): 3210-3220. Zhou Q, Zhang H B, Li Y, *et al.* Progress on microplastics pollution and its ecological effects in the coastal environment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(33): 3210-3220.
- [11] Hämer J, Gutow L, Köhler A, *et al.* Fate of Microplastics in the marine isopod *Idotea emarginata*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(22): 13451-13458.
- [12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 《“十四五”循环经济发展规划》出炉: 到 2025 年废钢利用量达 3.2 亿吨 开展塑料污染全链条治理专项行动 [EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztlz/sswxhjzfzgh/202107/t20210714_1290426.html?code=&state=123, 2021-07-14.
- [13] Zhang C F, Zhou H H, Cui Y Z, *et al.* Microplastics in offshore sediment in the Yellow Sea and East China Sea, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **244**: 827-833.
- [14] Klein S, Worch E, Knepper T P. Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine-Main area in Germany [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(10): 6070-6076.
- [15] Andrady A L. Microplastics in the marine environment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**(8): 1596-1605.
- [16] 李文华, 简敏菲, 余厚平, 等. 鄱阳湖流域饶河龙口入湖段优势淡水鱼类对微塑料及重金属污染物的生物累积[J]. *湖泊科学*, 2020, **32**(2): 357-369. Li W H, Jian M F, Yu H P, *et al.* Bioaccumulation effects of microplastics and heavy metals pollutants in the dominant freshwater fish species in the Longkou entry of Raohe River, Lake Poyang Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(2): 357-369.
- [17] 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.
- [18] Su L, Xue Y G, Li L Y, *et al.* Microplastics in Taihu Lake, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 711-719.
- [19] 吕雅宁. 赣江水和沉积物体系中微塑料的污染研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2020.
- [20] 郑可. 珠江流域野生淡水鱼类中塑料及有机磷塑料添加剂污染[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2019.
- [21] 底明晓. 长江流域河型水库微塑料污染特征及微塑料与雌二醇的吸附动力学研究[D]. 武汉: 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园), 2019.
- [22] Di M X, Wang J. Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 1620-1627.
- [23] 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 等. 滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3166-3175. Yuan H Y, Hou L, Liang Q B, *et al.* Correlation between microplastics pollution and eutrophication in the near shore waters of Dianchi Lake [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3166-3175.
- [24] 薛向东, 王星源, 梅雨晨, 等. 微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3675-3683. Xue X D, Wang X Y, Mei Y C, *et al.* Sorption behaviors of copper ions and tetracycline on microplastics in aqueous solution [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3675-3683.
- [25] 李晨曦, 高雨萱, 张佳祺, 等. 附着在不同微塑料表面的藻类结构与群落组成[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(8): 3360-3366. Li C X, Gao Y X, Zhang J Q, *et al.* Structure and community composition of algae attached to different microplastic substrates [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(8): 3360-3366.
- [26] 董姝楠, 夏继红, 王为木, 等. 典型水环境因素对聚酯微塑料沉降的影响机制研究[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(2): 735-742. Dong S N, Xia J H, Wang W M, *et al.* Effect mechanism of aquatic environmental factor on the sedimentation of polyethylene terephthalate microplastic [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(2): 735-742.
- [27] 唐涛, 黎道丰, 潘文斌, 等. 香溪河河流连续统特征研究[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(1): 141-144. Tang T, Li D F, Pan W B, *et al.* River continuum characteristics of Xiangxi River [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(1): 141-144.
- [28] 付娟, 李晓玲, 戴泽龙, 等. 三峡库区香溪河消落带植物群落构成及物种多样性[J]. *武汉大学学报(理学版)*, 2015, **61**(3): 285-290. Fu J, Li X L, Dai Z L, *et al.* Floristic composition and plant community diversity of water-level fluctuation zone along Xiangxi River, Three Gorges Reservoir Area [J]. *Journal of Wuhan University (Natural Science Edition)*, 2015, **61**(3): 285-290.
- [29] Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson R C, *et al.* Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(6): 3060-3075.

- [30] Noik V J, Tuah P M. A first survey on the abundance of plastics fragments and particles on two sandy beaches in Kuching, Sarawak, Malaysia [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, **78**, doi: 10.1088/1757-899X/78/1/012035.
- [31] 鲁瀚友, 李志威, 胡旭跃, 等. 拉萨河直孔水库上下游河床粒径与粗糙度变化[J]. 水力发电学报, 2020, **39**(8): 104-111.
Lu H Y, Li Z W, Hu X Y, *et al.* Particle size and roughness of Lhasa River bed upstream and downstream of Zhikong Reservoir [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, **39**(8): 104-111.
- [32] 王志超, 孟青, 李卫平, 等. 不同消解方法对微塑料质量及其表面特征的影响[J]. 环境工程学报, 2020, **14**(5): 1385-1393.
Wang Z C, Meng Q, Li W P, *et al.* Effect of different digestion methods on microplastic quality and surface characteristics [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, **14**(5): 1385-1393.
- [33] Liebezeit G, Dubaish F. Microplastics in beaches of the East Frisian islands Spiekeroog and Kachelotplate [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, **89**(1): 213-217.
- [34] 韩丽花, 李巧玲, 徐笠, 等. 大辽河沉积物中微塑料的污染特征[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(4): 1649-1658.
Han L H, Li Q L, Xu L, *et al.* The pollution characteristics of microplastics in Daliao River sediments [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(4): 1649-1658.
- [35] Nuelle M T, Dekiff J H, Remy D, *et al.* A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments [J]. Environmental Pollution, 2014, **184**: 161-169.
- [36] 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 等. 长江口潮滩表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2067-2074.
Zhu X T, Yi J, Qiang L Y, *et al.* Distribution and settlement of microplastics in the surface sediment of Yangtze Estuary [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2067-2074.
- [37] Claessens M, De Meester S, Van Landuyt L, *et al.* Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(10): 2199-2204.
- [38] Cózar A, Sanz-Martín M, Martí E, *et al.* Plastic accumulation in the Mediterranean Sea [J]. PLoS One, 2015, **10**(4), doi: 10.1371/journal.pone.0121762.
- [39] Browne M A, Crump P, Niven S J, *et al.* Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(21): 9175-9179.
- [40] 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.
- [41] Sathish N, Jeyasanta K I, Patterson J. Abundance, characteristics and surface degradation features of microplastics in beach sediments of five coastal areas in Tamil Nadu, India [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **142**: 112-118.
- [42] 袁润章. 中国土木工程百科全书: 工程材料·下[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [43] Zhang K, Chen X C, Xiong X, *et al.* The hydro-fluctuation belt of the Three Gorges Reservoir: source or sink of microplastics in the water? [J]. Environmental Pollution, 2019, **248**: 279-285.
- [44] Browne M A, Galloway T S, Thompson R C. Spatial patterns of plastic debris along estuarine shorelines [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(9): 3404-3409.
- [45] Huang Y, Liu Q, Ji 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.
- [46] 胡嘉敏, 左剑恶, 李嶙, 等. 北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5275-5283.
Hu J M, Zuo J E, Li D, *et al.* Composition and distribution of microplastics in the water and sediments of Urban Rivers in Beijing [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5275-5283.
- [47] Dong Z Q, Qiu Y P, Zhang W, *et al.* Size-dependent transport and retention of micron-sized plastic spheres in natural sand saturated with seawater [J]. Water Research, 2018, **143**(1): 518-526.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transport and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-ji, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Autochthonic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)