

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062)	
《环境科学》征稿简则(3116)	
信息(3164, 3259, 3572)	

宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源

刘立明^{1,2}, 王超¹, 巩文雯³, 陆安祥³, 任东², 涂清¹, 贾漫珂^{1,2*}

(1. 三峡大学生物与制药学院, 宜昌 443002; 2. 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002; 3. 农产品产地环境监测北京市重点实验室, 北京 100097)

摘要: 微塑料作为一种新兴环境污染物备受关注, 但大气微塑料的来源和健康危害尚不明晰. 为探究宜昌市不同功能区微塑料的分布特征和人体呼吸暴露风险, 分析不同地区大气微塑料的可能来源, 于2019年10~12月, 采集和分析宜昌市16个观测点的大气微塑料样品, 并利用HYSPLIT模型模拟大气后向轨迹. 结果表明, 宜昌市大气微塑料有纤维状、碎片状和薄膜状这3种形状; 透明、红色、黑色、绿色、黄色和紫色这6种颜色; 尺寸最小的为10.42 μm , 最大的为4 761.42 μm ; 平均沉降通量为 $(4\,400 \pm 474) \text{ n} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 种类有: 聚酯纤维(PET)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)、聚酰胺(PA)、橡胶(Rubber)、聚乙烯(PE)、醋酸纤维素(CA)和聚丙烯腈(PAN)这7种. 各功能区沉降通量依次为: 城市居民区 > 农业生产区 > 垃圾填埋场 > 化工园区 > 城镇居民区. 人体呼吸暴露风险评估模型表明, 城市居民区成人和儿童每天大气微塑料摄入量(EDI)高于城镇居民区. 大气后向轨迹模拟表明, 宜昌市各区县大气主要受周边地区影响, 部分大气微塑料可能来自周边地区的短距离运输. 总的来说, 宜昌市大气微塑料沉降通量较大, 潜在的生态暴露风险较高, 各区县部分微塑料可能经由大气短距离传输而来. 该结果可为长江中游地区大气微塑料研究提供基础数据支撑, 对大气微塑料污染的溯源和健康风险研究具有重要意义.

关键词: 大气微塑料; 功能区; 分布特征; 呼吸暴露; HYSPLIT模型; 后向轨迹; 来源

中图分类号: X131; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3152-13 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202208011

Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City

LIU Li-ming^{1,2}, WANG Chao¹, GONG Wen-wen³, LU An-xiang³, REN Dong², TU Qing¹, JIA Man-ke^{1,2*}

(1. College of Biological & Pharmaceutical Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Beijing Municipal Key Laboratory of Agriculture Environment Monitoring, Beijing 100097, China)

Abstract: As an emerging environmental pollutant, microplastics have attracted much attention, but the sources and health hazards of atmospheric microplastics (AMPs) remain unclear. In order to explore the distribution characteristics, assess the risk of human respiratory exposure, and analyze the sources of AMPs in different functional areas of Yichang City, AMPs samples from 16 observation points were collected and analyzed, and the HYSPLIT model was used. The results showed that the main shapes of AMPs in Yichang City were fiber, fragment, and film, and six colors were observed including transparent, red, black, green, yellow, and purple. The smallest size was 10.42 μm , and the largest was 4 761.42 μm . The deposition flux of AMPs was $(4\,400 \pm 474) \text{ n} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. The types of APMs were polyester fiber (PET), acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer (ABS), polyamide (PA), rubber (Rubber), polyethylene (PE), cellulose acetate (CA), and polyacrylonitrile (PAN). The order of the subsidence flux in each functional area was as follows: urban residential area > agricultural production area > landfill > chemical industrial park > town residential area. The human respiratory exposure risk assessment models showed that the daily intake of AMPs (EDI) for adults and children in urban residential areas was higher than in town residential areas. The atmospheric backward trajectory simulation showed that the AMPs in the districts and counties of Yichang City mainly came from the surrounding areas via short-distance transportation. This study provided basic data support for the research on AMPs in the middle reaches of the Yangtze River and was of great significance for the traceability and health risk research of AMPs pollution.

Key words: atmospheric microplastics; functional areas; distribution characteristics; respiratory exposure; HYSPLIT model; backward trajectory; source

塑料是人们生产生活中常用的材料之一, 由于对塑料制品缺乏科学有效的回收、降解和再利用技术, 使其对环境的污染日益严重^[1]. 近年来, 微塑料成为塑料污染中的热点问题. 大块塑料在环境中经过物理、化学和生物等作用, 变成细小的颗粒. 通常, 学者将尺寸介于1~5 000 μm 的塑料称为微塑料^[2,3]. 微塑料具有体积小、质量轻和密度小等特点, 在水、陆、空环境中可以不断交换、循环和积累. 2014年, 微塑料污染被联合国环境规划署确定为新出现的全球十大环境问题之一^[4].

大气微塑料的相关研究开始较晚, Dris等^[5]在2015年发表了首篇关于大气微塑料的研究, 对巴黎市区的大气微塑料情况做了详细报道. 随着大气微塑料研究的不断深入, 众多学者在这一领域取得了系列进展. Dris等^[5~7]连续3 a研究了巴黎室内和室外大气微塑料的分布情况, 人们开始了解空气中微

收稿日期: 2022-08-01; 修订日期: 2022-09-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0800902); 湖北省技术创新重大专项(2017ABA157)

作者简介: 刘立明(1969~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为微塑料毒理学, E-mail: ctgubh@ctgu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: mankejia@ctgu.edu.cn

塑料的基本特征. 此后,在土耳其萨卡里亚^[8]、伊朗阿沙鲁耶^[9]、英国伦敦^[10]和美国加利福尼亚^[11]等地相继报道了当地大气微塑料的研究进展. 国内的诸多地区,如东莞^[12]、上海^[13]、南海^[14]、北京^[15]和烟台^[16]等地也有大气微塑料研究报道. Cai 等^[12]通过被动采样方法,发现东莞室外大气微塑料的沉降通量为 $175 \sim 313 \text{ n} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. Liu 等^[13]建立模型,指出上海市民每天从室外环境中吸入约 21 个微塑料颗粒. Allen 等^[17]研究结果表明法国偏远的比利牛斯山也有大气微塑料存在,并利用 HYSPLIT 模型进行后向轨迹模拟分析,发现其可能来自 95 km 以外的城市. Brahney 等^[18]通过搜集分析美国境内保护区的干、湿微塑料样品,认为土壤和水中的微塑料再悬浮是城市中心湿沉降塑料主要来源,干塑料更小,能传播得更远;该研究还表明当地微塑料沉降速率为 $132 \text{ n} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,每年美国西部保护区微塑料沉积将超过 1 000 t. Liao 等^[19]研究发现温州地区室内微塑料浓度高于室外,城市微塑料浓度比农村高;室外暴露的微塑料最大可达到 $10^7 \text{ n} \cdot \text{a}^{-1}$. 2021 年,广州的一项研究发现河流不仅是大气微塑料的一个汇集地,而且可能是大气微塑料的二次来源^[20].

无论室内还是室外,人们都暴露在微塑料环境中. 早期的研究估计巴黎微塑料颗粒的呼吸暴露量为 $26 \sim 132 \text{ n} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[21],而 Vianello 等^[22]通过呼吸模拟指出从事轻体力工作的普通成年男性平均每天吸入 272 个微塑料颗粒. Domenech 等^[23]根据全球平均大气微塑料丰度 $0.685 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$ 和人均呼吸频率 $8.64 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,估计全球人类每日吸入 5.9 个微塑料. 美国的一项研究表明,当环境中微塑料丰度为 $9.8 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$,成年男性和女性每天分别吸入 170 个和

132 个微塑料,而儿童男性和女性每天分别吸入 110 个和 97 个微塑料^[24]. 环境中微塑料会与生物体接触,甚至进入生物体内^[25~27],有研究表明微塑料可改变小鼠体内与免疫反应、细胞应激反应和程序性细胞死亡相关的基因簇,影响细胞应激和程序性细胞死亡的调节^[28],少量纳米塑料可能造成人体组织、器官的局部感染发炎^[29],显著影响人肺上皮细胞 A549 活力,诱导促炎症细胞因子和促凋亡蛋白显著上升^[30]等,对健康的危害不容忽视.

目前对大气微塑料的研究主要探讨某一地区大气微塑料的分布特征及其可能来源,以城市功能区作为研究区域的报道较少. 湖北省宜昌市坐落在长江中游,地貌以高山丘陵为主,全市海拔在 35 ~ 2 427 m 之间. 本研究以宜昌市作为研究区域,通过对城市居民区、化工园区、农业生产区、城镇居民区和垃圾填埋场等功能区进行大气的被动型采样分析,探究该区域不同功能区微塑料的污染特征,即颜色、形状、种类和沉降通量的差异;使用人体呼吸暴露风险评估模型,评估宜昌市各功能区微塑料污染的潜在人体呼吸暴露风险;模拟大气后向轨迹,分析推测各区县大气微塑料的可能来源. 本文通过扩充大气微塑料基础性研究数据库,以期大气微塑料呼吸健康研究和推进宜昌等长江沿岸城市环境治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样观测地点和方法

本研究在湖北省宜昌市选取 16 个观测点(表 1 和图 1),采样时间从 2019 年 10 月 1 日至 12 月 29 日,连续采样 90 d. 功能区的划分依据《国土空间用途管制》^[31].

表 1 湖北省宜昌市大气微塑料观测点分布

Table 1 Location of the observation points of AMPs in Yichang City, Hubei Province			
序号	观测点	所属功能区	经纬度
1	西陵区-1(XL-1)	城市居民区	111.322 069°E, 30.724 477°N
2	点军区-1(DJ-1)	农业生产区	111.121 384°E, 30.663 612°N
3	伍家岗区-1(WJG-1)	城市居民区	111.330 765°E, 30.675 554°N
4	夷陵区-1(YL-1)	农业生产区	111.518 08°E, 30.635 821°N
5	猇亭区-1(XT-1)	化工园区	111.459 484°E, 30.508 527°N
6	猇亭区-2(XT-2)	垃圾填埋场	111.432 742°E, 30.613 213°N
7	枝江市-1(ZJ-1)	化工园区	111.631 691°E, 30.470 148°N
8	枝江市-2(ZJ-2)	化工园区	111.763 184°E, 30.432 88°N
9	枝江市-3(ZJ-3)	城市居民区	111.661 687°E, 30.384 817°N
10	兴山县-1(XS-1)	城镇居民区	110.759 363°E, 31.422 941°N
11	兴山县-2(XS-2)	垃圾填埋场	110.749 66°E, 31.355 744°N
12	当阳市-1(DY-1)	化工园区	111.850 21°E, 30.823 063°N
13	当阳市-2(DY-2)	农业生产区	111.859 525°E, 30.928 668°N
14	长阳县-1(CY-1)	城镇居民区	111.209 438°E, 30.497 288°N
15	长阳县-2(CY-2)	垃圾填埋场	111.266 124°E, 30.476 426°N
16	长阳县-3(CY-3)	农业生产区	110.991 232°E, 30.480 966°N

验中 16 个观测点所在区(县)大气后向轨迹. 基本参数设置如下:模拟时间从 2019 年 10 月 1 日至 12 月 29 日,模拟高度 500 m,模拟所有观测点过去 72 h 的气流轨迹. 依次输入观测点的坐标,通过后向轨迹模拟和聚类分析,得到对应的气流轨迹图. 气象数据源自 NOAA 气象数据网站^[33~35].

1.4 人体呼吸暴露风险评估模型

本文参考 Zhang 等^[36]和张爱芹^[37]报道的人体呼吸暴露风险评估模型,对宜昌市各功能区大气微塑料的人体每日微塑料呼吸摄入量进行评估. 具体公式如下:

$$EDI = c \times ED \times V_r \times f \times ER / BW \quad (1)$$

式中,EDI 为人体每日微塑料呼吸摄入量,ng·kg⁻¹; c 为大气微塑料的数浓度,ng·m⁻³,本研究中微塑料丰度(n·m⁻³)与数浓度(ng·m⁻³)之间的换算参考文献[38~40],其中体积是集样瓶底面积与气流高度的乘积,微塑料沉降高度参照后向轨迹模型的模拟高度(500 m); ED 为人在微塑料环境中的暴露时间,a; V_r 为人呼吸平均速率,m³·d⁻¹; f 为空气在肺

泡中气体交换的保留分数; ER 为人在室外环境中的暴露频率,d·a⁻¹; BW 为人的平均体重,kg.

相关参数取值见表 2. 由于人体在呼吸空气时,大尺寸塑料经过鼻、咽、喉和气管等呼吸器官时,会被阻隔无法进入肺部,因此本研究人体暴露风险评估选取尺寸小于 100 μm 的塑料颗粒^[36].

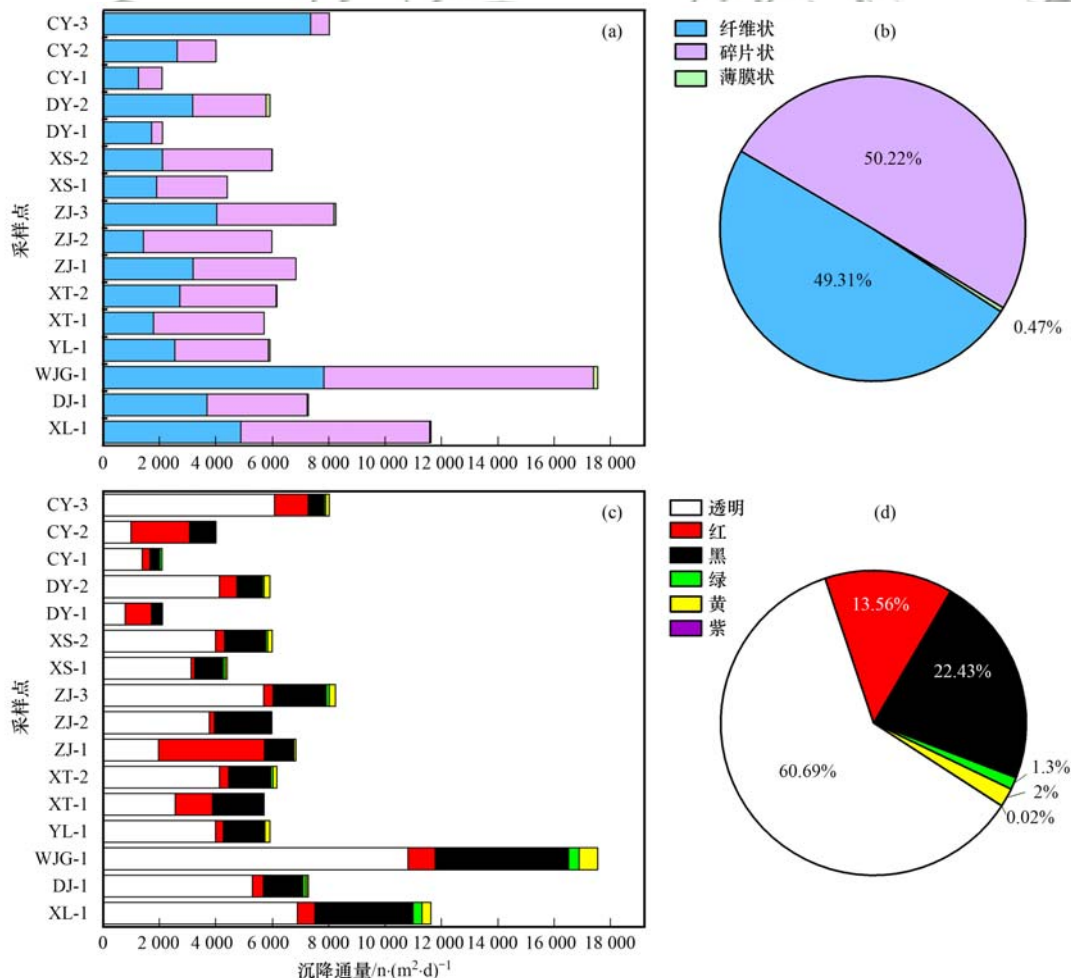
表 2 人体暴露风险评估模型相关参数因子值^[41]

Table 2 Human exposure risk assessment model related parameter factor values		
相关参数因子	成人	儿童
ED	24	6
V _r	16.6	7.5
f	0.75	0.75
ER	43.75	43.75
BW	64	15

2 结果与讨论

2.1 大气微塑料沉降通量、种类、形状、颜色和尺寸

从微塑料沉降通量上看(图 3),16 个观测点的大气微塑料平均沉降通量为(4 400 ± 474)



(a) 各观测点中不同形状微塑料的沉降通量分布; (b) 不同形状微塑料在所有观测点总沉降通量中的占比; (c) 各观测点中不同颜色微塑料的沉降通量分布; (d) 不同颜色微塑料在所有观测点总沉降通量中的占比

图 3 各观测点微塑料的形状和颜色的分布情况

Fig. 3 Distribution of microplastics with different shapes and colors at each observation point

$\text{n} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 沉降通量最大位于伍家岗区-1 观测点 [WJG-1, $(17\,540 \pm 1\,458) \text{n} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], 最小位于长阳县-1 观测点 [CY-1, $(2\,093 \pm 190) \text{n} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]. 与国内的其他城市微塑料沉降通量相比, 宜昌微塑料平均沉降通量约是东莞的 100 倍^[12]、北京的 20 倍^[15] 和烟台的 10 倍^[42], Liu 等^[13] 研究发现, 上海市的微塑料沉降通量更小, 为 $0 \sim 0.139 \text{n} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 因此宜昌微塑料平均沉降通量较高.

从微塑料种类上看[图 4 和图 5(a)], 本研究采集的微塑料样品主要有聚酯纤维(PET)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚合物(ABS)、聚酰胺(PA)、橡胶(Rubber)、聚乙烯(PE)、醋酸纤维素(CA)和聚丙烯腈(PAN)这 7 种. 其中, 大气微塑料整体种类含量中, PET 含量最多(占 40%); CA 和 PAN 最少, 各占比 2.67%. 2022 年, 圣保罗市的一项研究表明大气中 PET 含量最多^[43]; 同年, 南极的一项研究结果显示南极降雪中约 79% 的样本中存在 PET^[44]. 以上

结论与本研究关于 PET 含量在大气微塑料整体种类含量最多的结论相符. PET 作为生活中常见的塑料, 广泛应用于生产生活, 如电子电器、汽车工业、机械工业、衣物、包装和塑料瓶等方面, 这可能是其沉降通量最大的原因.

从微塑料形状分布上看[图 3(a)和图 6], 微塑料中纤维状和碎片状占比较高, 薄膜状微塑料整体较少. 16 个观测点中均出现纤维状微塑料, 其中 CY-3 观测点纤维状占比最高, 达 92%; 碎片类微塑料也存在于所有的观测点, 其中 WJG-1 观测点沉降通量最大, 是 DY-1 观测点的 25 倍. XL-1 等 9 个观测点发现薄膜状微塑料, 其中 DY-2 观测点薄膜状微塑料最多, 但也仅占平均沉降通量的 3.14%.

从微塑料颜色分布上看[图 3(c)和图 6], 有透明色、红色、黑色、绿色、黄色和紫色这 6 种, 其中透明色、红色和黑色为主, 绿色和黄色较少, 紫色微塑料仅存在于 DJ-1 观测点, 且沉降通量极低. 城市居民区中黑色占比较高, 这与在上海^[13,45] 和马鞍

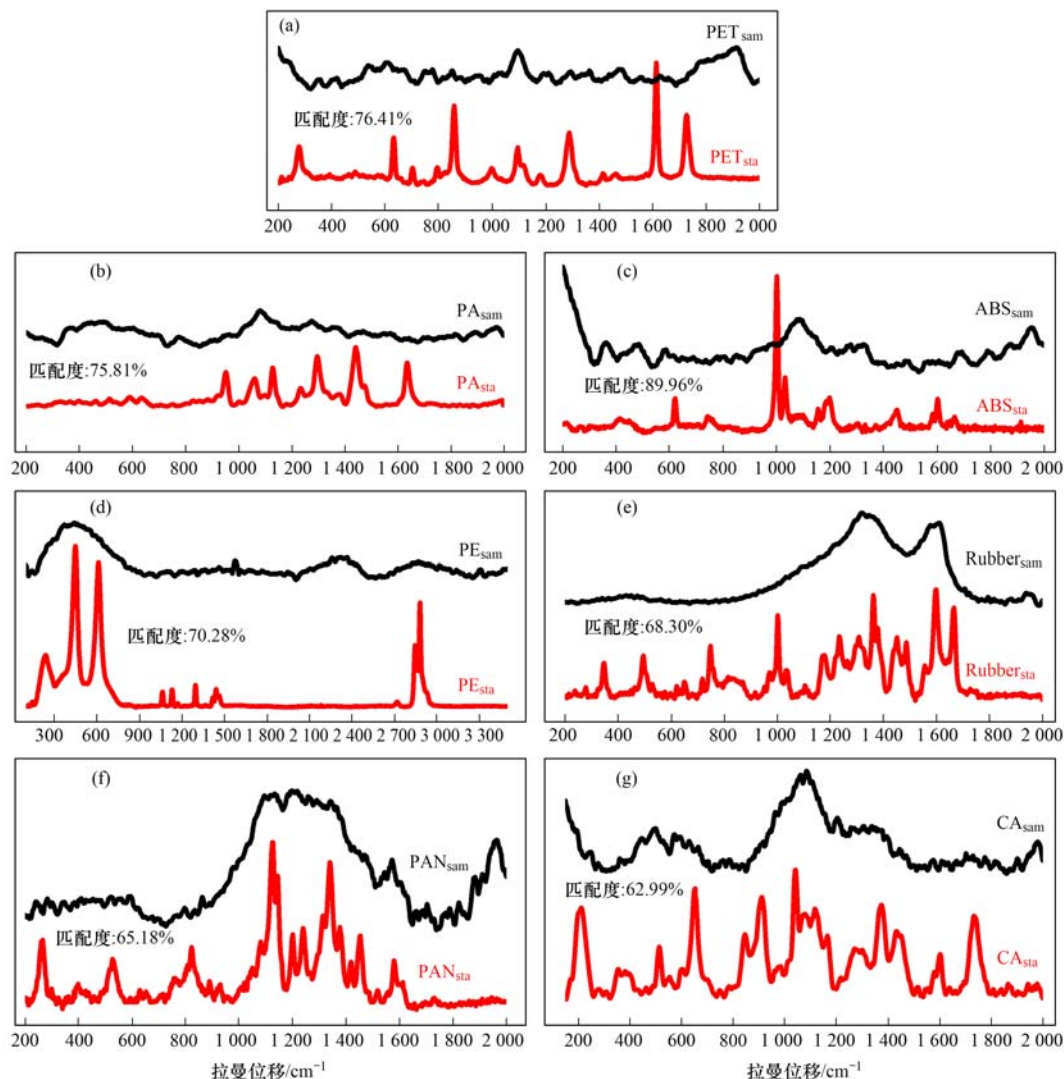


图 4 实验样品微塑料的拉曼光谱(sam)和标准拉曼光谱图(sta)

Fig. 4 Comparison of Raman spectra (sam) of microplastic samples and standard Raman spectra (sta)

山^[46]等地的研究相符,城市中黑色微塑料占比较多;化工园区中,透明色/白色微塑料和黑色占主导,这与 Abbasi 等^[9]在 2019 年研究的结果相似,所有颜色的微塑料中透明/白色占比最大.除此之外,也有研究报道大气微塑料有粉红色^[12,47]、深蓝色^[48]和橙色^[49],但本研究中未出现,可能与设备感光效果有关,其中也不排除紫外线照射导致褪色或者被染色的可能.

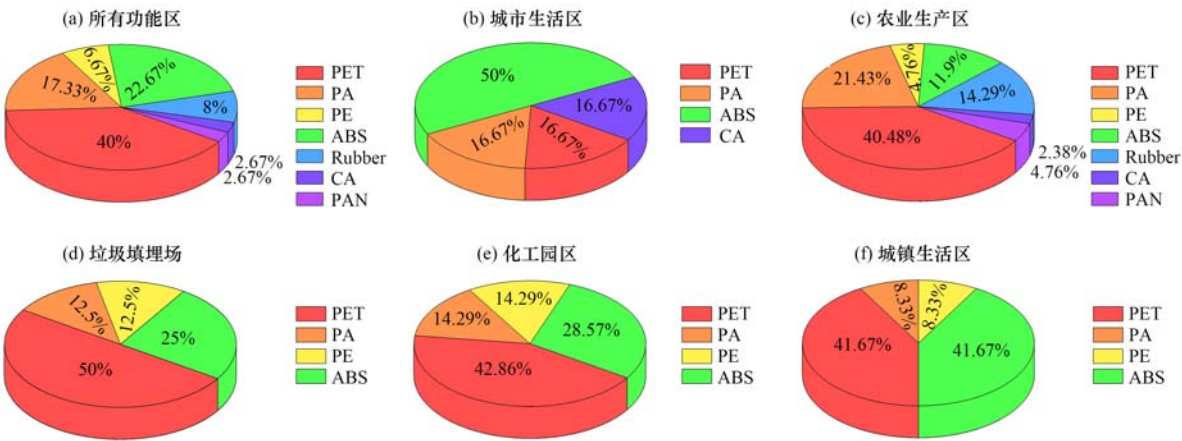
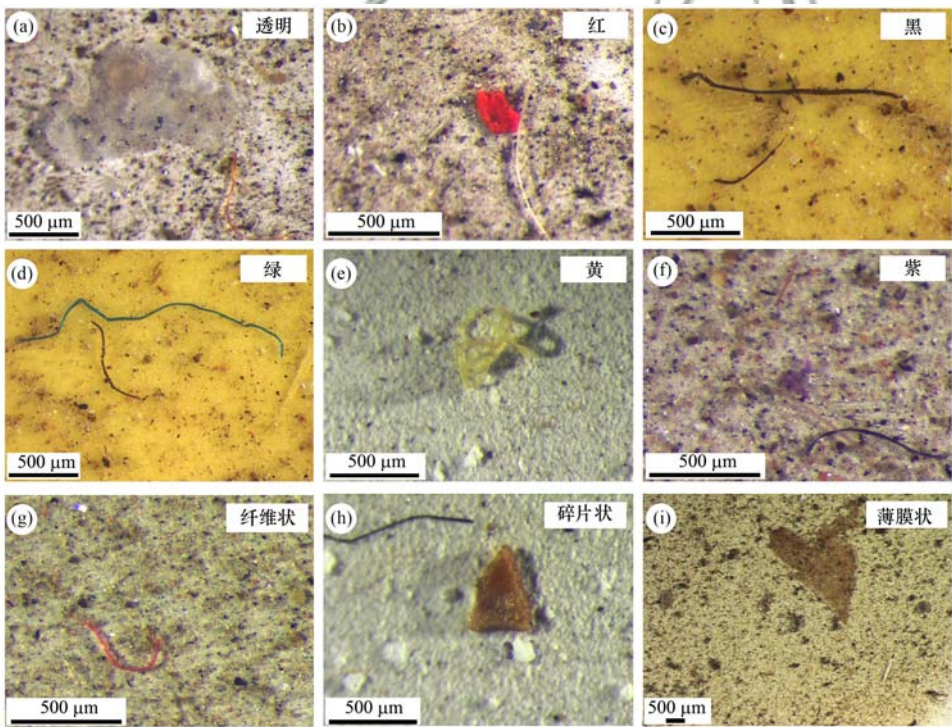


图 5 不同功能区各类微塑料沉降通量占比情况

Fig. 5 Proportion of various types of microplastic deposition flux in different functional areas



(a) ~ (f) 为不同颜色微塑料在体视显微镜下的照片; (g) ~ (i) 为不同形状微塑料在体视显微镜下的照片

图 6 不同颜色和形状的大气微塑料

Fig. 6 Photographs of AMPs of different colors and shapes

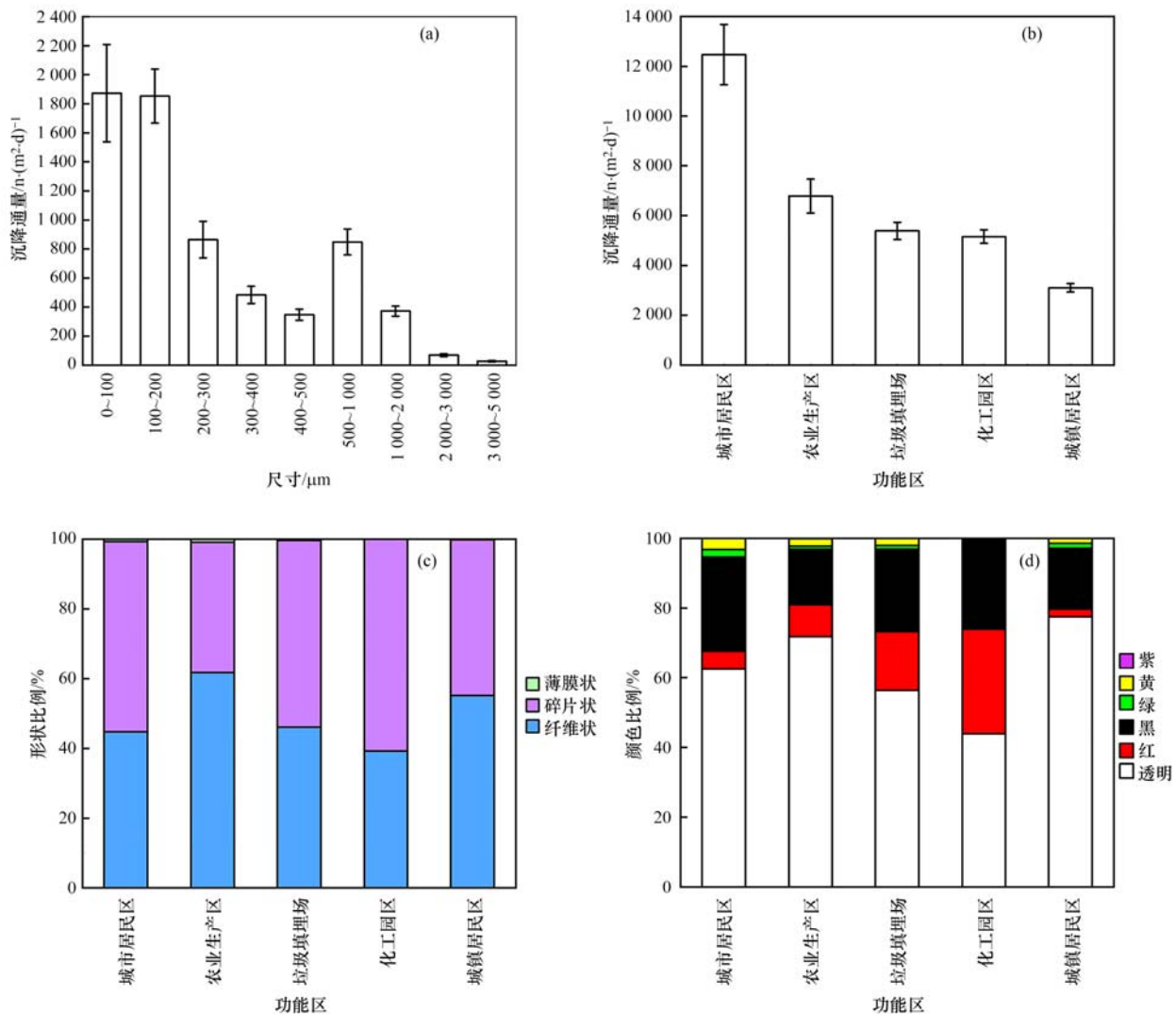
从微塑料尺寸分布上看[图 7(a)],本研究观察到的最小尺寸为 10.42 μm ,最大的长达4 761.42 μm ,在 10 ~ 5 000 μm 范围内微塑料的沉降通量大体上随着尺寸的增大而减少.但 XT-1 和 CY-3 这两个观测点与其他观测点有所不同,主要集中在 100 ~ 2 000 μm ,100 μm 以下的微塑料相对较少.

2.2 不同功能区的微塑料分布

在宜昌的 5 个主要功能区中微塑料沉降通量由

多到少依次为:城市居民区、农业生产区、垃圾填埋场、化工园区和城镇居民区[图 7(b)].

城市居民区微塑料沉降通量相较其他区域最大,与城市居民区人口数量密切相关.2014 年美国(发达国家)和印度(发展中国家)的人均塑料消费量分别为 95 kg 和 8 kg^[50],巴基斯坦农村地区以 PET 和 PC 为主的大气微塑料丰度低于城市地区^[36],表明了城市居民区社会发展水平高,使用塑



(a) 不同尺寸微塑料沉降通量分布; (b) 各功能区微塑料沉降通量分布; (c) 各功能区不同颜色微塑料沉降通量分布; (d) 各功能区不同形状微塑料沉降通量分布

图7 宜昌大气微塑料尺寸及各功能区大气微塑料的分布特征

Fig. 7 Sizes of AMPs in Yichang and their distribution characteristics in each functional area

料频率高. 在本研究中, 城区居民区样品中透明微塑料比例较高[图 7(c)], 可能是透明塑料袋、塑料吸管和保鲜膜等一次性塑料制品使用频率较高导致. 同为城市居民区, 微塑料沉降通量由多到少依次为: WJG-1 > XL-1 > ZJ-3, 其中 WJG-1 甚至是 ZJ-3 的 2 倍多, 这与三地的人口数量、经济水平和城市发展情况有一定相关. 宜昌东站、宜昌市中心客运站都位于伍家岗区, 并且四周高速公路环绕, 同时伍家岗区的工厂数量比西陵区和枝江市多, 所以城市居民区中, 伍家岗区大气微塑料沉降通量最大.

农业生产区较大的微塑料沉降通量与该地区的农业生产模式有密切关系. 目前, 该地区农村大量使用地膜, 在农作物萌芽初期起到保温、保湿的作用, 地膜经过太阳照射和风吹雨淋等作用进而分解成微塑料, 部分悬浮在大气当中. 本研究中, 微塑料沉降通量由多到少依次为: CY-3 > DJ-1 > YL-1 > DY-2,

而且这些地区透明和黑色微塑料比例较高[图 7(d)], 这与农业生产活动中大量使用的透明和黑色农用地膜存在一定关联.

垃圾填埋场是包括塑料在内的各类废弃物汇集的地方, 在太阳光照射和风吹雨淋条件下塑料长时间堆放逐渐分解成微塑料, 也是大气微塑料的可能来源之一. Hu 等^[51]在垃圾转运站采样发现, 单个转运站向环境排放微塑料颗粒的速率为 41 297 ~ 82 593 n·h⁻¹. 本研究 3 个垃圾填埋场中, 微塑料沉降通量由多到少依次为: XT-2 > XS-2 > CY-2, 其中 XT-2 微塑料沉降通量最大 [(6 164 ± 532) n·(m²·d)⁻¹].

同为化工园区, 微塑料沉降通量由多到少依次为: ZJ-1 > ZJ-2 > XT-1 > DY-1, 这可能与园区内企业生产的产品种类、企业环境治理力度、企业效益、人口密度和经济发展等方面存在相关联系. 化工园

区有着相对严格的环保制度,工业“三废”需要集中处理. 本研究中3个化工园区观测点(XT-1、ZJ-1和DY-1)均未发现薄膜状微塑料[图3(a)],这应该与工厂生产的产品有关,在化工园区所设观测点均以生产化肥和精细化工为主,没有使用相关的原料,一定程度上说明了化工园区不是薄膜状微塑料的来源地.

城镇居民区多以小型零售业和服务业为主,满足人们日常生活之必需,人口密度也较低,因此大气中微塑料数量较低. 兴山、长阳这两个城镇居民区的微塑料沉降通量较其他功能区少,应与城镇居民区的主要功能有关,城镇人口密度较城市低,生活节奏较慢,经济欠发达,故而微塑料污染较小.

2.3 人体呼吸暴露风险评估

采用公式(1)计算人体每日微塑料呼吸摄入量(EDI),对宜昌市各功能区大气微塑料的人体呼吸暴露量进行评估,结果见表3. 结果表明,宜昌各功能区中成人和儿童EDI依次为:城市居民区>垃圾填埋场>农业生产区>化工园区>城镇居民区. 生活在城市居民区的成人和儿童的EDI是最多的,分别是城镇居民区成人和儿童的3.8倍,同时生活在城市的儿童EDI要大于生活在城镇的成人. Zhang等^[36]通过收集12个国家的室内粉尘样品,研究发现微塑料每天摄入量随着年龄增长而减少,但是本研究中成人EDI高于儿童,可能是样品收集方式、样品环境和计算模型等差异,造成结论的不同.

表3 宜昌市各功能区成人和儿童每日大气微塑料呼吸摄入量(EDI)

Table 3 Daily respiratory intake of AMPs (EDI) for adults and children in different functional areas of Yichang City

功能区	微塑料丰度/ $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$	微塑料浓度/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	EDI/ $\text{ng}\cdot\text{kg}^{-1}$	
			成人	儿童
城市居民区	7.06	261.48	5.34×10^4	2.57×10^4
垃圾填埋场	4.24	157.04	3.21×10^4	1.55×10^4
农业生产区	3.22	119.26	2.44×10^4	1.17×10^4
化工园区	2.36	87.41	1.79×10^4	8.60×10^3
城镇居民区	1.87	69.26	1.41×10^4	6.82×10^3

本研究中成人EDI最大为 $5.34\times10^4\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$,最小为 $1.41\times10^4\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$; 儿童EDI最大为 $2.57\times10^4\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$,最小为 $6.82\times10^3\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$. Zhang等^[36]在12个国家室内环境中每日微塑料摄入量的研究中发现,韩国($8\times10^4\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)、日本($7.3\times10^4\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)、沙特阿拉伯($4.2\times10^4\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)、希腊($3.9\times10^4\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)、罗马尼亚($3.6\times10^4\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)、美国($3.6\times10^4\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)和科威特($2.7\times10^4\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)这7个国家的儿童PET的摄入均高于本研究儿童微塑料的日呼吸摄入量,巴基斯坦($5.9\times10^3\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)、印度($5.1\times10^3\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)和哥伦比亚($3.8\times10^3\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)则较低. 成人中,韩国($1.2\times10^4\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)和日本($1.1\times10^4\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$)与本研究地区处于同一水平,其他国家较低,哥伦比亚成人PET日摄入量仅 $360\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$. 总体而言,宜昌各功能区儿童EDI与本研究所得结果基本处于同一水平,甚至略低. 有关澳大利亚等地的室内空气微塑料研究中指出^[52,53],当地每人每天平均摄入量为 $5.48\times10^2\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$,儿童每天最高可摄入 $8.49\times10^2\text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$,该研究认为儿童暴露在微塑料环境中存在较大的风险. 本研究中城镇居民区的儿童EDI最小,但也是澳大利亚地区儿童最高摄入量的8倍,因此,可以认为宜昌市居民有一定程度的微塑料暴露健康风险.

2.4 宜昌市大气微塑料的溯源模拟

HYSPLIT模型是由美国国家海洋和大气管理局研发,用于描述污染物和有害物质的大气传输、扩散和沉积,在大气气流轨迹模拟方面具有广泛的应用^[17,45,54]. 该模型中后向轨迹模拟通过模拟某一地区过去时间大气气流的来源,即溯源,可用于追溯该地区大气污染的可能来源. 本研究使用HYSPLIT模型来模拟宜昌市大气微塑料的可能来源,通过对样品采集的9个区(县)2019年10~12月的大气后向轨迹模拟分析计算、聚类分析,发现宜昌市9个区(县)大气气流主要来自西北方和东北方(图8).

2019年10月,9个区(县)的大气气流主要来自东北方,占比超过80%,气流自内蒙古,经河北、北京、山东和河南等地到达湖北(图8). 由各地区10月大气轨迹图可以看出[图8(a1)~8(i1)],轨迹1占比超过50%,且轨迹短,运动速度快,可能对当地影响较大. 正如Ding等^[54]模拟珠江口附近观测点的大气轨迹发现,气流轨迹主要来自东南沿海城市方向,即东南沿海城市是观测点大气微塑料的潜在来源. 以长阳县为例,当地大气主要来自东北方向的西陵区、点军区、伍家岗区等地,而西陵区、点军区、伍家岗区三地大气微塑料含量较高,空气中的微塑料可能随着气流飘向长阳县,因此长阳县大气中部分微塑料可能来自以上3个地方. 兴山县

28% 的大气轨迹来自东南方,即来自夷陵区、点军区、西陵区方向,也一定程度上表明兴山县的部分大气微塑料有可能来自宜昌市城区. 因此,2019 年 10 月的大气轨迹图表明,长阳县和兴山县有部分气

流来自宜昌城区,使得城区的部分微塑料可能通过大气迁移到周边地区.

2019 年 11 月,宜昌市城区西陵区、点军区、伍家岗区和夷陵区这 4 个地区主要有来自东北、西北

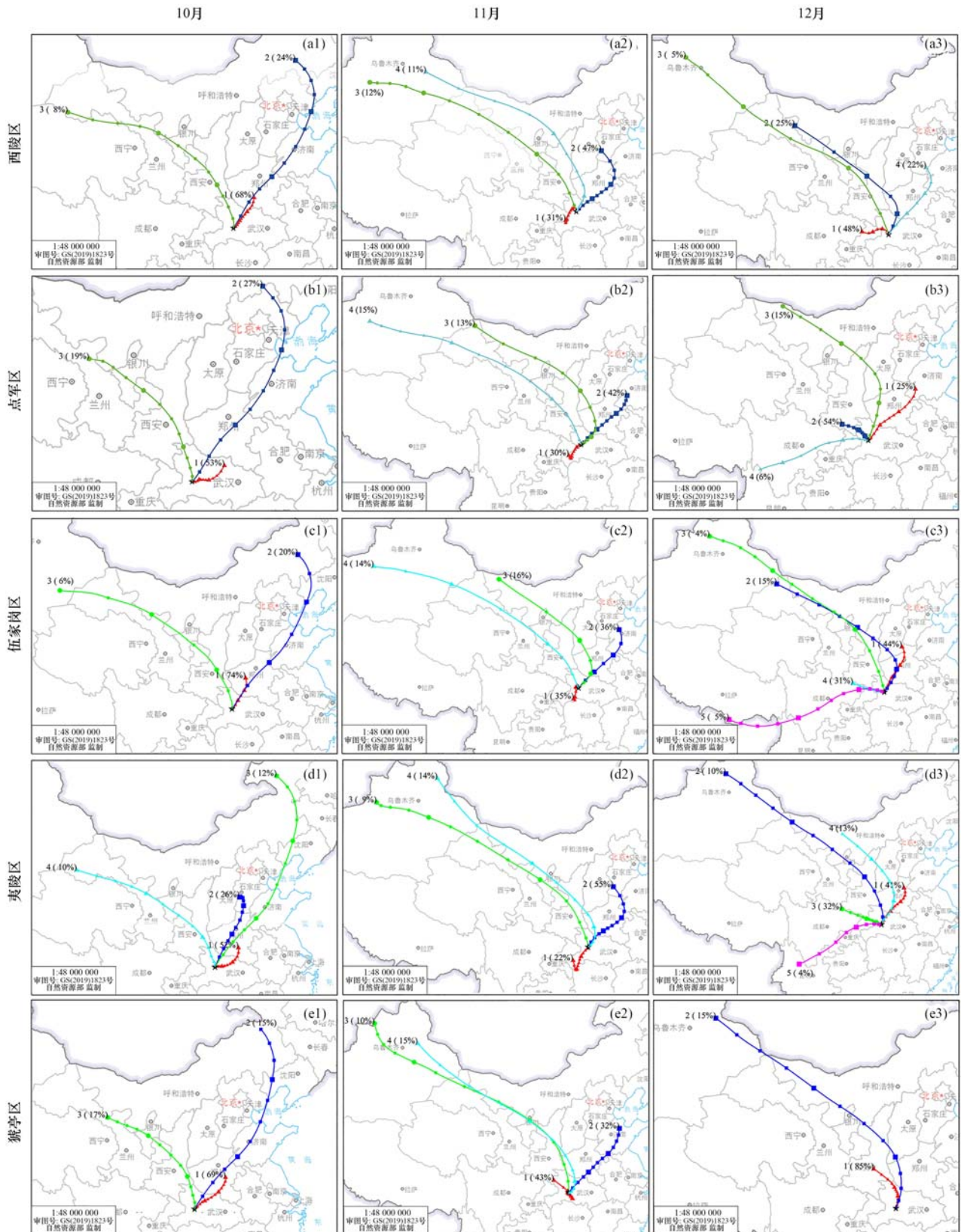
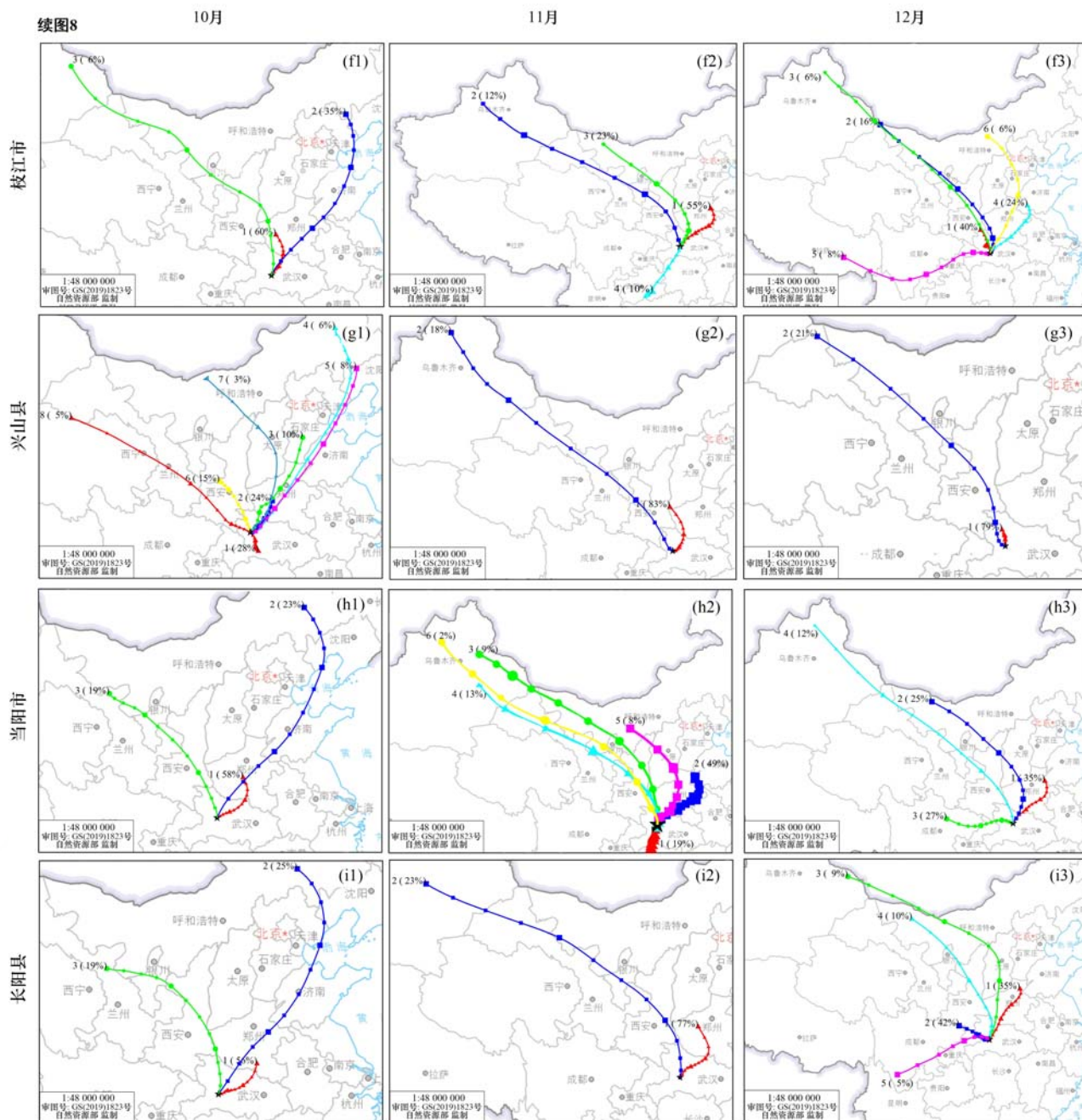


图 8 2019 年 10 ~ 12 月宜昌市各区 (县) 大气后向轨迹模拟

Fig. 8 Simulated atmospheric backward trajectory of each district (county) in Yichang City from October to December 2019



和西南这 3 个方向的气流,其中东北方向的气流主要来自河北,经由山东、安徽和河南等地到达湖北;西北方向的气流轨迹较长,速度稍慢,主要来自新疆,途经甘肃、青海、宁夏和陕西,到达湖北;而西南方向气流轨迹则较短,运动速度较快,主要来自宜昌城区和湖北省内其他地区[图 8(a2)~8(d2)].有研究在罗斯海、阿蒙森海和威德尔海等海域发现了微塑料^[55,56],学者在南极地区气流后向轨迹模拟结果表明,南极降雪中的微塑料可能通过大气传输来自以上海域^[44].枝江市、当阳市、兴山县和长阳县这 4 个地区,大气气流轨迹显示主要来自西北和东北两个方向,其中西北转东北方向气流轨迹单一,轨迹短,运行速度快,占主导[图 8(f2)~8(i2)].如兴山县,西北转东北方向气流轨迹占比 83%,轨迹

短,主要来自兴山县周边地区,说明当地空气质量可能受周边县市影响较大.

2019 年 12 月,实验观测点的 9 个区(县)的大气气流主要自西北和东北方向而来[图 8(a3)~8(i3)].其中,猇亭区和兴山县所有气流轨迹来自西北方向,且短距离气流占主导,说明在 12 月份以上两地可能有部分微塑料来自周边地区.此外,点军、伍家岗、夷陵和长阳等地来自西北和东北方向的气流基本持平,还有少量来自西南方向的长轨迹气流.气流轨迹表明西陵、当阳两地有部分气流来自西方,尤其在西陵区,来自西方的气流占比达 48%,说明西陵区 12 月的大气微塑料含量可能受周边的点军区、长阳县和秭归县等地的影响.刘巧婧^[57]对吐鲁番市 2017 年大气颗粒物进行了后向轨迹聚类分

析,发现冬季各类污染物(除 O_3 之外)的平均浓度最高,受近距离传输影响较大,大气扩散条件差,不利于污染物的扩散。综上,本研究认为,宜昌市各区县大气气流主要来自周边地区的短距离运输,微塑料也会随之迁移流动,因此大气中微塑料丰度受周围地区的可能影响较大。

3 结论

(1)宜昌大气微塑料整体特征如下:形状以纤维状和碎片状为主;颜色以透明色、红色和黑色为主;尺寸最小的只有 $10.42\ \mu\text{m}$,最大的长达 $4\ 761.42\ \mu\text{m}$;种类有 PET、ABS、PA、Rubber、PE、CA 和 PAN 这 7 种,最多的 PET 占比 40%;大气微塑料沉降通量整体偏高,平均沉降通量为 $(4\ 400 \pm 474)\ \text{n}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。

(2)城市居民区的沉降通量最大,为 $(12\ 471 \pm 1\ 209)\ \text{n}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$,城镇居民区则最小,为 $(3\ 099 \pm 169)\ \text{n}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。不同地区的同一功能区的大气微塑料含量会受人类活动、经济发展、地域特色和地理位置等因素影响,经济相对较发达的伍家岗区和西陵区的微塑料沉降通量较大。

(3)人体呼吸暴露风险评估模型表明,宜昌城市居民区成人和儿童 EDI 最大,城镇居民区最小,各功能区无论成人还是儿童,总体微塑料摄入量都较高,具有一定的呼吸暴露健康风险。

(4)后向轨迹模拟表明宜昌市各区县的大气受周围影响较大,气流主要来自周边地区的短距离运输,大气微塑料污染可能源自周边地区。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood[J]. *EFSA Journal*, 2016, **14**(6), doi:10.2903/j.efsa.2016.4501.
- [3] 骆永明, 施华宏, 涂晨, 等. 环境中微塑料研究进展与展望[J]. *科学通报*, 2021, **66**(13): 1547-1562.
Luo Y M, Shi H H, Tu C, *et al.* Research progresses and prospects of microplastics in the environment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, **66**(13): 1547-1562.
- [4] Raynaud J. Valuing plastics: The business case for measuring, managing and disclosing plastic use in the consumer goods industry[R]. United Nations Environment Programme (UNEP), 2014.
- [5] Dris R, Gasperi J, Rocher V, *et al.* Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **12**(5): 592-599.
- [6] Dris R, Gasperi J, Saad M, *et al.* Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment?[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **104**(1-2): 290-293.
- [7] Dris R, Gasperi J, Mirande C, *et al.* A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **221**: 453-458.
- [8] Tunahan Kaya A, Yurtsever M, Çiftçi Bayraktar S. Ubiquitous exposure to microfiber pollution in the air[J]. *The European Physical Journal Plus*, 2018, **133**(11), doi: 10.1140/epjp/i2018-12372-7.
- [9] Abbasi S, Keshavarzi B, Moore F, *et al.* Distribution and potential health impacts of microplastics and microrubbers in air and street dusts from Asaluyeh County, Iran[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **244**: 153-164.
- [10] Wright S L, Ulke J, Font A, *et al.* Atmospheric microplastic deposition in an urban environment and an evaluation of transport[J]. *Environment International*, 2020, **136**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105411.
- [11] Gaston E, Woo M, Steele C, *et al.* Microplastics differ between indoor and outdoor air masses: insights from multiple microscopy methodologies[J]. *Applied Spectroscopy*, 2020, **74**(9): 1079-1098.
- [12] Cai L Q, Wang J D, Peng J P, *et al.* Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China: preliminary research and first evidence[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(32): 24928-24935.
- [13] Liu K, Wang X H, Fang T, *et al.* Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **675**: 462-471.
- [14] Wang X H, Li C J, Liu K, *et al.* Atmospheric microplastic over the South China Sea and East Indian Ocean: abundance, distribution and source[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **389**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121846.
- [15] Li Y W, Shao L Y, Wang W H, *et al.* Airborne fiber particles: types, size and concentration observed in Beijing[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **705**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135967.
- [16] 田媛, 涂晨, 周倩, 等. 环渤海海岸大气微塑料污染时空分布特征与表面形貌[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(4): 1401-1409.
Tian Y, Tu C, Zhou Q, *et al.* The temporal and spatial distribution and surface morphology of atmospheric microplastics around the Bohai Sea[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(4): 1401-1409.
- [17] Allen S, Allen D, Phoenix V R, *et al.* Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment[J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(5): 339-344.
- [18] Brahney J, Hallerud M, Heim E, *et al.* Plastic rain in protected areas of the United States[J]. *Science*, 2020, **368**(6496): 1257-1260.
- [19] Liao Z L, Ji X L, Ma Y, *et al.* Airborne microplastics in indoor and outdoor environments of a coastal city in eastern China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **417**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126007.
- [20] Huang Y M, He T, Yan M T, *et al.* Atmospheric transport and deposition of microplastics in a subtropical urban environment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126168.
- [21] Prata J C. Airborne microplastics: consequences to human health?[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **234**: 115-126.
- [22] Vianello A, Jensen R L, Liu L, *et al.* Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a Breathing

- Thermal Manikin[J]. ScientificReports, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-45054-w.
- [23] Domenech J, Marcos R. Pathways of human exposure to microplastics, and estimation of the total burden[J]. Current Opinion in Food Science, 2021, **39**: 144-151.
- [24] Cox K D, Covernton G A, Davies H L, *et al.* Human consumption of microplastics [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(12): 7068-7074.
- [25] 陶辉, 戚怡婷, 于多, 等. 微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1455-1462.
- Tao H, Qi Y T, Yu D, *et al.* Influence of microplastics on the development of proteus biofilm [J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1455-1462.
- [26] 李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 等. 鄱阳湖流域水葫芦 (*Eichhornia crassipes*) 对水体微塑料的吸附截留效应[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2548-2556.
- Li W G, Wu X E, Jian M F, *et al.* Adsorption and interception effects of *Eichhornia crassipes* on microplastics in water of the Poyang Lake basin[J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2548-2556.
- [27] 胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 等. 微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3664-3671.
- Hu J M, Zuo J E, Li J B, *et al.* Effects of microplastic exposure on crucian growth, liver damage, and gut microbiome composition[J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3664-3671.
- [28] Lu K, Lai K P, Stoeger T, *et al.* Detrimental effects of microplastic exposure on normal and asthmatic pulmonary physiology[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126069.
- [29] Hwang J, Choi D, Han S, *et al.* Potential toxicity of polystyrene microplastic particles [J]. Scientific Reports, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-64464-9.
- [30] Xu M K, Halimu G, Zhang Q R, *et al.* Internalization and toxicity: a preliminary study of effects of nanoplastic particles on human lung epithelial cell [J]. Science of the Total Environment, 2019, **694**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133794.
- [31] 吴次芳, 谭永忠, 郑红. 国土空间用途管制[M]. 北京: 地质出版社, 2020.
- [32] Menges F. Spectragryph-optical spectroscopy software[EB/OL]. <https://www.effemm2.de/spectragryph/>, 2022-08-01.
- [33] Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, *et al.* NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, **96**(12): 2059-2077.
- [34] Rolph G, Stein A, Stunder B. Real-time environmental applications and display system: READY [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, **95**: 210-228.
- [35] Draxler R R, Hess G D. Description of the HYSPLIT4 Modelling system[EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/255682850_Description_of_the_HYSPLIT4_modelling_system, 2022-08-01.
- [36] Zhang J J, Wang L, Kannan K. Microplastics in house dust from 12 countries and associated human exposure[J]. Environment International, 2020, **134**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105314.
- [37] 张爱芹. 内蒙古典型功能区土壤中 POPs 的污染特征及人体暴露风险评估[D]. 北京: 中央民族大学, 2021.
- [38] Yu Z Y, Zhang L, Huang Q S, *et al.* Combined effects of micro-/nano-plastics and oxytetracycline on the intestinal histopathology and microbiome in zebrafish (*Danio rerio*) [J]. Science of the Total Environment, 2022, **843**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156917.
- [39] Leslie H A, Brandsma S H, van Velzen M J M, *et al.* Microplastics en route: field measurements in the Dutch River delta and Amsterdam canals, wastewater treatment plants, North Sea sediments and biota[J]. Environment International, 2017, **101**: 133-142.
- [40] 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.
- [41] HJ 25.3-2014, 污染场地风险评估技术导则[S].
- [42] 周倩, 田崇国, 骆永明. 滨海城市大气环境中发现多种微塑料及其沉降通量差异[J]. 科学通报, 2017, **62**(33): 3902-3909.
- Zhou Q, Tian C G, Luo Y M. Various forms and deposition fluxes of microplastics identified in the coastal urban atmosphere [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, **62**(33): 3902-3909.
- [43] Amato-Lourenço L F, dos Santos Galvão L, Wiebeck H, *et al.* Atmospheric microplastic fallout in outdoor and indoor environments in São Paulo megacity [J]. Science of the Total Environment, 2022, **821**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153450.
- [44] Aves A R, Revell L E, Gaw S, *et al.* First evidence of microplastics in Antarctic snow [J]. The Cryosphere, 2022, **16**(6): 2127-2145.
- [45] Liu K, Wang X H, Wei N, *et al.* Accurate quantification and transport estimation of suspended atmospheric microplastics in megacities: Implications for human health [J]. Environment International, 2019, **132**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105127.
- [46] 方芹, 牛司平, 陈予东, 等. 城市路面积尘微塑料污染特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 189-198.
- Fang Q, Niu S P, Chen Y D, *et al.* Characteristics of microplastic present in urban road dust [J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 189-198.
- [47] Liu K, Wu T N, Wang X H, *et al.* Consistent transport of terrestrial microplastics to the ocean through atmosphere [J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(18): 10612-10619.
- [48] 门志远, 刘硕, 李昀东, 等. 哈尔滨新区不同下垫面悬浮大气微塑料污染特征及潜在生态风险评估[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(6): 329-336.
- Men Z Y, Liu S, Li Y D, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risk assessment of microplastics suspended in different underlying surfaces in Harbin New Area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(6): 329-336.
- [49] 涂晨, 田媛, 刘颖, 等. 大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1821-1828.
- Tu C, Tian Y, Liu Y, *et al.* Occurrence of atmospheric (micro) plastics and the characteristics of the plastic associated biofilms in the coastal zone of Dalian in summer and autumn [J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1821-1828.
- [50] Plastics Insight. Market by country [EB/OL]. <https://www.plasticsinsight.com/export-market/explore-your-market-by-country-profile/>, 2019-09-09.
- [51] Hu T Y, He P J, Yang Z, *et al.* Emission of airborne microplastics from municipal solid waste transfer stations in downtown[J]. Science of the Total Environment, 2022, **828**,

- doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154400.
- [52] Soltani N S, Taylor M P, Wilson S P. Quantification and exposure assessment of microplastics in Australian indoor house dust[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **283**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117064.
- [53] Ageel H K, Harrad S, Abdallah M AE. Occurrence, human exposure, and risk of microplastics in the indoor environment [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2022, **24** (1): 17-31.
- [54] Ding Y C, Zou X Q, Wang C L, *et al.* The abundance and characteristics of atmospheric microplastic deposition in the northwestern South China Sea in the fall [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **253**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118389.
- [55] Cincinelli A, Scopetani C, Chelazzi D, *et al.* Microplastic in the surface waters of the Ross Sea (Antarctica): occurrence, distribution and characterization by FTIR [J]. *Chemosphere*, 2017, **175**: 391-400.
- [56] Munari C, Infantini V, Scoconi M, *et al.* Microplastics in the sediments of Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, **122**(1-2): 161-165.
- [57] 刘巧婧. 吐鲁番市大气颗粒物污染特征与来源分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- Liu Q J. Pollution characteristics and source analysis of atmospheric particulate matter in Turpan city [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2022年12月29日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上发布了2021年度中国科技论文统计结果。统计结果显示《环境科学》2021年度总被引频次13 744,影响因子3.317,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列。

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)