万方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰，何亚磊，郭朝晖，肖细元，张严

主办 中国科学院生态环境研究中心
出版 科学出版社

双效期刊

2022年1月
第43卷 第1期
Vol.43 No.1

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第1期
2022年1月15日

目 次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价 …… 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述 …… 陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展 …… 曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的Meta分析 …… 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析 …… 赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周嵬, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 $PM_{2.5}$ 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析 …… 蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 $PM_{2.5}$ 时空分布特征和潜在源区季节分析 …… 王妘涛, 张强, 温肖宇, 窦乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 瞿程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 $PM_{2.5}$ 三维结构变化特征 …… 牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 …… 李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气VOCs污染特征及健康风险评估 …… 李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析 …… 余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州COVID-19期间大气VOCs体积分数变化特征 …… 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气VOCs在臭氧生成中的作用 …… 金丹 (132)
铜川市秋冬季大气VOCs特征及其 O_3 和SOA形成潜势分析 …… 易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收VOCs排放特征与排放因子 …… 谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系 …… 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析 …… 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险 …… 庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征 …… 方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源 …… 宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评价 …… 吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素 …… 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评价 …… 陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪杰 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系 …… 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价 …… 胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析 …… 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭逍宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中DOM特性分析 …… 李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征 …… 叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放 …… 徐金兰, 许洋, 李修民, 国淼, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素a和环境因子垂向分布的影响 … 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家河水库春季分层期 *nirS* 型反硝化菌群特征分析 …… 梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征 …… 张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评价 …… 王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素:以珠江三角洲为例 …… 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中22种PPCPs的多介质分布特征及风险评估 …… 张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中209种多氯联苯同类物分布特征与风险评估 …… 黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算 … 李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴锴彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO_2 通量支干流对比及影响机制初探 …… 秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb^{2+} 的吸附行为 …… 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价 …… 吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性 …… 邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对ANAMMOX生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析 …… 吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对ANAMMOX污泥活性恢复的影响及菌群特征 …… 罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于PMF模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析 …… 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿区农田土壤重金属含量特征及健康风险 …… 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区 …… 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于DGT技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素 …… 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应 …… 李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评价 …… 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解废渣-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估 …… 张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张晗, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评价 …… 梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响 …… 郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响 …… 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香椿土壤微生物群落的组成及多样性 …… 姜霓雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响 … 杨文娜, 余泺, 罗东海, 熊子怡, 王鋆燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征 …… 薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响 …… 闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响 …… 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

《环境科学》征订启事(73) 《环境科学》征稿简则(209) 信息(229, 266, 338)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第43卷第1期 2022年1月
Vol.43,No.1 Jan.,2022

城市路面积尘微塑料污染特征

方芹[1], 牛司平[1*], 陈予东[1], 于江华[2]

(1. 安徽工业大学能源与环境学院环境科学与工程系, 马鞍山 243002; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境检测与污染控制高技术研究重点实验室, 大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 微塑料作为一种新兴污染物,由于其对生态系统具有潜在的负面影响,受到了广泛的关注. 但是目前关于其在陆地环境中,尤其是路面积尘中的相关信息相对有限. 本文对马鞍山市雨山区路面积尘的微塑料污染特征进行了研究. 研究区域内单位面积路面所积累的微塑料丰度为(18.11±32.36)n·m^{-2},含量为(27.29±72.64)mg·m^{-2}; 而单位质量积尘中微塑料丰度为(223.00±197.01)n·kg^{-1},含量为(385.23±628.93)mg·kg^{-1}. 聚合物鉴定结果表明,路面积尘中的微塑料主要为聚丙烯(58.90%)和聚乙烯(30.08%). 对比发现商业区单位面积路面的微塑料丰度最高[(78.32±101.24)n·m^{-2}],其次是居住区[(19.81±14.30)n·m^{-2}]、工业区[(10.95±5.54)n·m^{-2}]、郊区[(8.56±8.13)n·m^{-2}]和文教区[(6.99±5.74)n·m^{-2}]. 意味着在面积相同的情况下,商业区路面积尘的微塑料污染更为严重. 从形状来看,路面积尘中的微塑料为薄膜、颗粒、纤维和球型,相应的数量占比分别为66.64%、16.14%、14.13%和3.10%,且绝大多数尺寸在1 000 μm以下. 本研究还发现单位面积路面的微塑料丰度与积尘负荷显著性正相关(r=0.599, P<0.01)而质量则与积尘负荷没有明显的相关性(r=0.067, P=0.780). 主要是因为积尘和塑料主要来源存在一定的差异. 通常在没有清扫的时候,路面积尘可以持续积累,但对微塑料而言只有存在外来输入的情况下才会有质量的增加. 另一方面,路面上的微塑料会在车辆等的外力作用下破碎导致其数量增加.

关键词:路面积尘; 微塑料; 城市; 空间分布; 土地类型

中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)01-0189-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202103147

Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust

FANG Qin[1], NIU Si-ping[1*], CHEN Yu-dong[1], YU Jiang-hua[2]

(1. Department of Environmental Science and Engineering, School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China; 2. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control (AEMPC), School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Microplastics (MPs), as an emerging contaminant, have attracted wide attention due to their potentially negative impact on the ecosystem. However, information on microplastic pollution in terrestrial environments, especially road dust, is still rare. In this study, the microplastic pollution in road dust from the Yushan District of Ma'anshan City was characterized. The abundances of MPs accumulated per square meter of road and dust were (18.11±32.36) n·m^{-2} and (223.00±197.01) n·kg^{-1}, respectively, and the contents were (27.29±72.64) mg·m^{-2} and (385.23±628.93) mg·kg^{-1}, respectively, with polypropylene (PP, 58.90%) and polyethylene (PE, 30.08%) as the major polymers based on the number fraction in dust. Additionally, in a given road area, the abundance of MPs in commercial areas was the highest [(78.32±101.24) n·m^{-2}], followed by residential [(19.81±14.30) n·m^{-2}], industrial [(10.95±5.54) n·m^{-2}], suburban [(8.56±8.13) n·m^{-2}], and educational [(6.99±5.74) n·m^{-2}] areas. In the case of the same area, the microplastic pollution from the commercial area was heavier. Regarding the shape of the MPs detected in road dust, 66.64% were present as films, 16.14% as granules, 14.13% as fibers, and 3.10% as spheres out of the total number detected. Most of the MPs were less than 1 000 μm in size. For a particular road area, the abundance of MPs was significantly correlated with the mass of dust (r=0.599, P<0.01), whereas there was no obvious correlation for the mass of MPs (r=0.067, P=0.780). Generally, the road dust can accumulate continuously prior to cleaning, whereas the mass of the MPs will not increase unless there is external input. Otherwise, MPs on the road will be broken down under the action of external forces such as vehicles, resulting in an increase in the number of MPs.

Key words: road dust; microplastics; urban area; spatial distribution; land use type

塑料因其轻便、耐用、价格低和耐腐蚀等优点而被广泛地用于生产和生活的各个方面[1]. 塑料制品的大量使用以及缺乏有效的回收,导致塑料污染日益严重[2~4]. 近年来微塑料污染问题开始受到关注[5,6]. 一般认为微塑料是粒径小于5 mm的塑料颗粒[7,8]. 在水生生态系统中,微塑料能够被生物当作食物而误食[9]. 由于其不能被消化而造成消化系统的损伤,例如胃肠道阻塞和损害,从而影响水生生物的健康和生长. 同时,由于微塑料尺寸小、比表面积大、疏水性强,能够成为一些有毒污染物(多环芳烃、多氯联苯和重金属等)的载体[10~12]. 随着微塑料的摄入,有毒物质也会进入生物体内,导致更强的生态风险.

有研究表明微塑料已经广泛存在于水环境中[13]. 其来源主要包括污水处理厂出水、雨水径流和大气沉降[14~17]. Sang等[14]的研究发现雨水管道

收稿日期: 2021-03-16; **修订日期**: 2021-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701553); 安徽省自然科学基金项目(1808085QD109); 安徽省归国留学人员创新创业扶持计划项目; 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室开放基金项目; 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 方芹(1997~),女, 硕士研究生, 主要研究方向为微塑料环境行为,E-mail:17855528177@163.com

* 通信作者,E-mail:sipingniu@126.com

径流中微塑料丰度为(2 750 ± 760) ~ (19 040 ± 2 960) n·m^{-3}. 由于累积作用城市雨水蓄水池的微塑料丰度则更高,可达 490 ~ 22 894 n·m^{-3}[15]. 路面径流过程中污染物的输出与路面灰尘中污染物的干期积累密切相关[18]. 随着 20 世纪 70 年代开始对面源污染物问题的重视,已经有大量研究对路面积尘中的氮、磷和重金属等一些常规污染物进行了报道[19,20]. 然而对于微塑料这一新兴污染物仅有少量的研究进行了探讨[21]. 已经发现城市路面积尘中微塑料的来源包括汽车轮胎表面的磨损、道路涂料、建筑材料、人造草皮和破碎塑料的风力运输等[22,23]. 另外,灰尘中的粒径 < 150 μm 的微塑料易被风吹起而输送到其他区域[24~26]. 根据 Kitahara 等[25]的研究,日本东京、熊本和冲绳路面积尘中的微塑料丰度分别为(230 ± 50)、(96 ± 85)和(68 ± 77) n·kg^{-1},东京含量最高的原因可能是较高的人口密度和交通量. 印度金奈的路面积尘中的微塑料高达(2 279.4 ± 913.7) n·kg^{-1}[27]. 而伊朗布什尔市[24]、阿萨卢耶[23]和德黑兰[28]则分别在14 800 ~ 87 600、21 000 ~ 165 800 和 2 766.7 ~ 20 166.7 n·kg^{-1}的范围内变化. 对比来看,发展中国家的路面积尘中似乎比发达国家的具有更多数量的微塑料. 然而这一结论还需要更多的研究数据来支撑. 虽然人类活动与路面积尘中的微塑料污染程度密切相关,但究竟是哪种具体活动的影响更为显著以及人类活动的影响是否具有区域性差异也需要厘清.

总体来看,有关陆地系统的信息较海洋系统要相对缺乏[29,30],无论是进行微塑料生态风险的评估还是实施微塑料污染的管控,都需要更多的数据作为支撑[21,25]. 因此,开展城市路面积尘微塑料的相关研究具有十分重要的理论和实践意义. 本文以马鞍山市雨山区为研究对象,分析城市路面积尘微塑料污染的空间分布特征及其与人类活动的关系,并探讨城市路面积尘中微塑料污染的来源.

1 材料与方法

1.1 研究区域

马鞍山市位于安徽省的东部、长江中下游地区. 雨山区(118.44° ~ 118.64°E、31.58° ~ 31.74°N)现辖 4 个街道(雨山、安民、平湖、采石)、3 个乡镇(向山、银塘、佳山)和 1 个省级开发区,区域面积 173 km^2. 2019 年春季在无风的天气情况下从雨山区采集了 20 个路面积尘样品,具体位置见图 1. 为了减少雨前干期的影响,采样时期为降雨后 5 ~7 d. 采样时,以道路中心线为界,采集一侧路面的积尘,采样面积根据灰尘的量确定. 具体操作如下:用普通扫帚轻轻地将积尘清扫在一起,再使用木刷和小铁铲子将其收集,放入干净的自封袋中密封保存[21,23,26]. 同时,记录好采样的时间、地点和周围情况等信息. 样品采集后在实验室自然风干,以备后续分析.

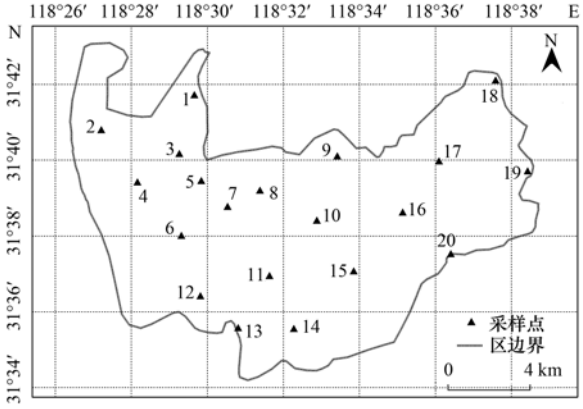


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.2 积尘中微塑料的分离

和沉积物以及土壤相同,一般采用密度分离方法从积尘中分离微塑料. 常用的浮选液有饱和氯化钠(NaCl)溶液[31]、氯化锌($ZnCl_2$)溶液[32]和碘化钠(NaI)溶液[14,22]. 本文选用氯化锌($ZnCl_2$)和氯化钠(NaCl)的混合溶液($ZnCl_2$: NaCl: 蒸馏水 = 10∶4.6∶10, ρ = 1.58 g·cm^{-3})作为浮选液[33]. 将风干后的灰尘样品在 60℃条件下干燥 24 h. 然后取 200 g 样品置于 500 mL 烧杯中,加入 400 mL 浮选液,用玻璃棒搅拌均匀后,静置过夜. 将烧杯中上清液倒入梨形分液漏斗中,静置 12 h. 随后将梨形分液漏斗中的上清液过 75 μm 的筛子,从底部将泥倒入烧杯继续进行浮选. 微塑料浮选、过滤步骤重复 3 次,以保证充分分离灰尘中的微塑料. 环境中的微塑料表面会附着诸如粘土矿物和有机质等类型的物质,可能干扰分析结果,需要进行消解处理. 常用的消解方法包括:酸溶液消解(HNO_3、HCl)、碱液消解(氢氧化钠、氢氧化钾)、氧化剂消解(过氧化氢、芬顿试剂)和酶消解. 目前国内外没有统一的消解方法,每种消解方法都存在一定的缺点. Hurley 等[34]和 Adomat 等[35]的研究指出将一定浓度的硝酸溶液与 30% 双氧水联合使用是具有相对较好的消解效果且大多数聚合物不会被分解. 在本研究中,参考了王璇等[33]和周倩[36]的方法,采用硝酸和双氧水进行消解:将浮选过筛之后的物质经蒸馏水冲入烧杯中,之后再加入 5 mL 65% 硝酸和 15 mL 30% 双氧水,室温下静置 8 h. 消解后的溶液过 0.45 μm 的水系滤膜,在烘箱温度 60℃烘干后,进行后续分析.

1.3　微塑料的表征

借助放大镜和显微镜，根据微塑料的硬度、光泽和颜色挑选出疑似微塑料后[37~39]，采用傅里叶变换红外光谱仪对其进行鉴定，将得到的谱图与聚合物标准谱库进行对比. 当匹配度超过 70% 时认为是微塑料[40,41].

通过筛分得到 250 ~ 500、500 ~ 1 000、1 000 ~ 2 000和2 000 ~ 5 000 μm这 4 个粒径范围的微塑料. 借助体视显微镜对微塑料进行拍照以及塑料的颜色、形状统计. 利用扫描电镜(field emission scanning electron microscopy，FE-SEM)观察微塑料的微观形貌. 同时选取典型微塑料进行表面能谱(EDS)分析.

1.4　数据分析

微塑料的丰度使用$n\cdot kg^{-1}$(单位质量积尘中微塑料的个数)和$n\cdot m^{-2}$(单位路面面积中微塑料的个数)表示，含量使用$mg\cdot kg^{-1}$(单位质量积尘微塑料的含量)和$mg\cdot m^{-2}$(单位路面面积微塑料含量)表示. 采用 Origin 2017 和 Microsoft Excel 2013 等软件进行绘图. 利用 SPSS(24.0)方差分析(ANOVA)对样本均数差别进行显著性检验. 为了进一步探索积尘中微塑料的来源，还利用 SPSS 软件对数据进行了聚类分析.

1.5　质量控制

在采样和实验过程中，采取了以下措施来减少外部污染：在采样过程中，尽可能避免使用塑料产品. 实验过程中，将所有容器用蒸馏水洗涤 3 次并用铝箔包裹；实验人员均穿棉质衣服；样品干燥过程中使用铝箔纸覆盖. 空白实验使用蒸馏水过滤，未发现微塑料.

2　结果与讨论

2.1　积尘中微塑料种类

傅里叶红外光谱分析表明(图 2)，存在于路面积尘中微塑料有聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚酯(PET)、聚苯乙烯(PS)和硅橡胶(SR). 其中，聚丙烯(58.90%)和聚乙烯(30.08%)是积尘样品中丰

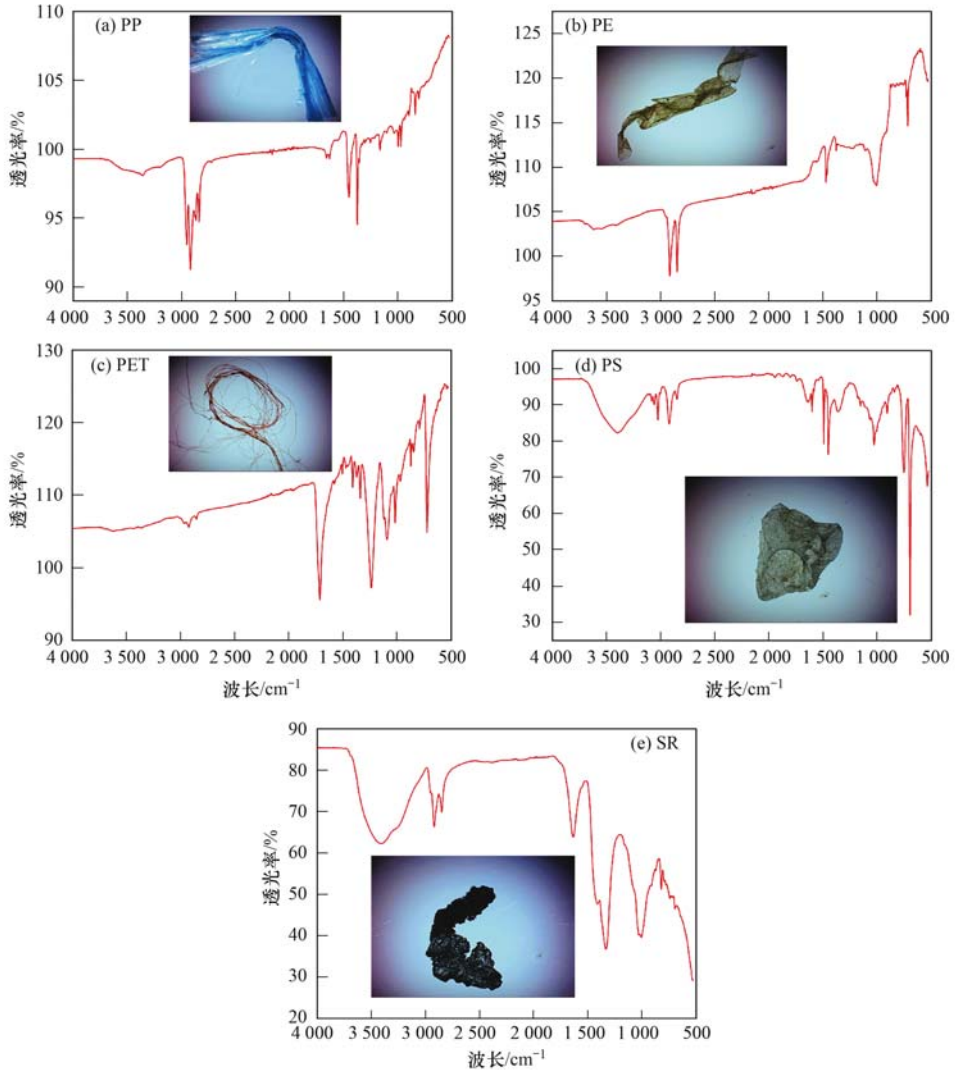
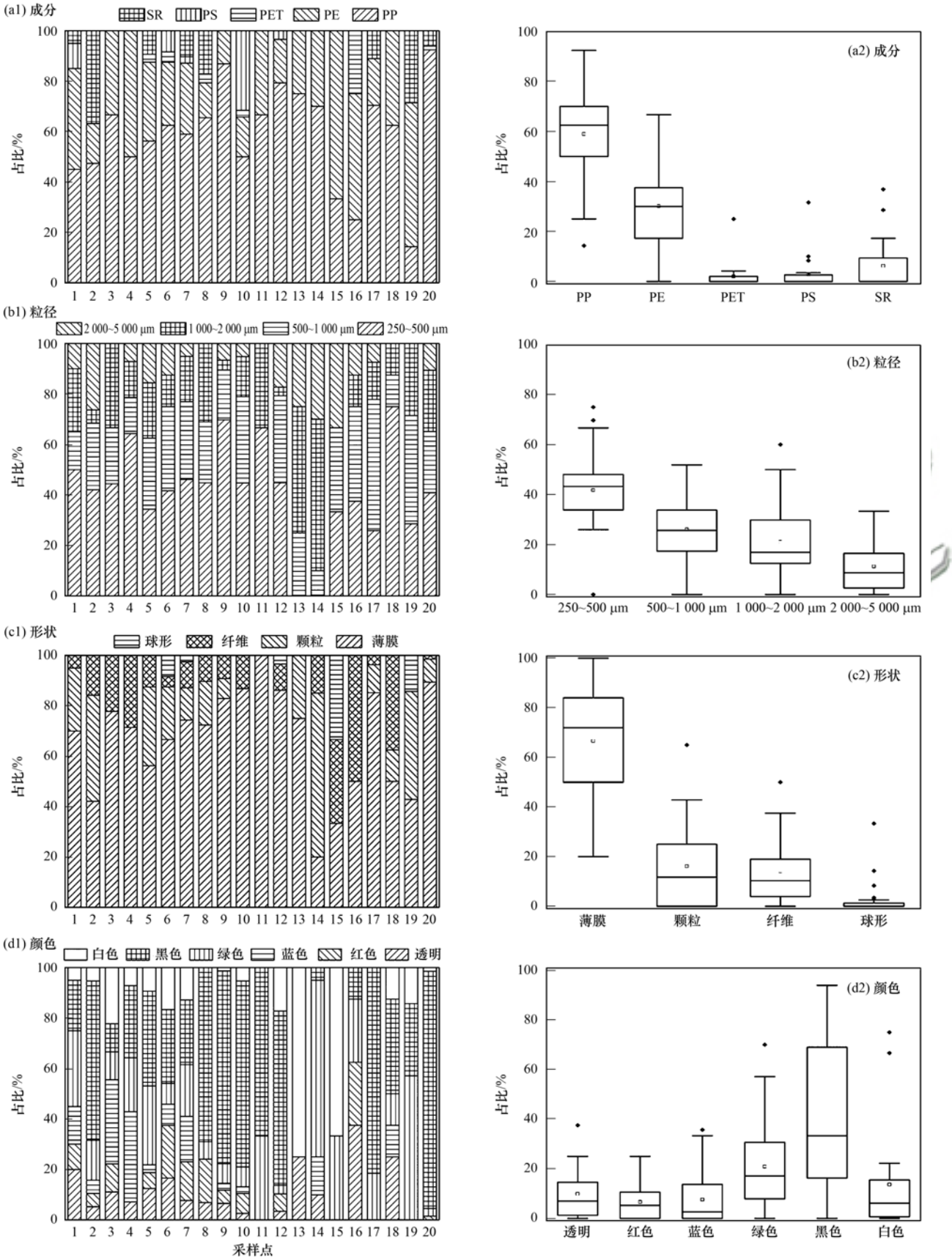


图 2　积尘中典型微塑料傅里叶红外光谱图

Fig. 2　Fourier infrared spectroscopy of typical MPs in road dust

度最高的聚合物[图 3(a)]. 聚丙烯具有耐腐蚀性以及耐热性等特点,被广泛应用于食品包装、编织袋和服装材料. 聚乙烯塑料薄膜常被用于购物袋和产品外包装. 二者破碎后都会成透明薄膜状微塑料.



(a)成分; (b)粒径; (c)形状; (d)颜色

图 3 路面积尘中微塑料的物理形貌

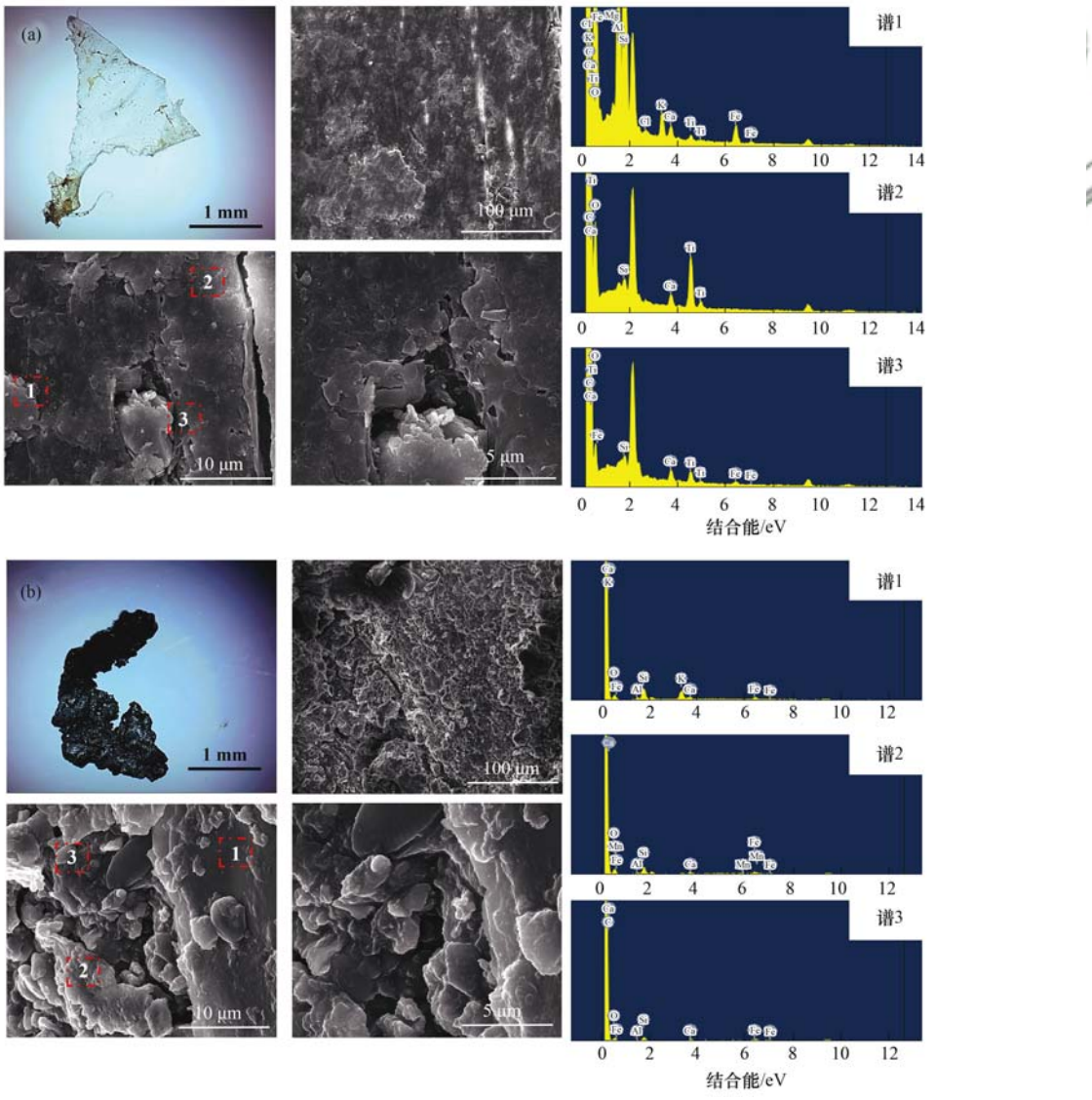
Fig. 3 Physical morphology of microplastics in sediments

硅橡胶、聚苯乙烯和聚酯所占比例较小，分别约为6.22%、2.80% 和 1.99%. 聚酯类微塑料主要来源于衣物纤维. 聚苯乙烯微塑料主要与商品包装以及快递运输中所用的白色泡沫有关. 而硅橡胶类塑料由于其耐磨损，耐氧化等优良性能，主要用于汽车轮胎以及其他零部件.

2.2　积尘中微塑料形貌特征

本文利用体视显微镜和扫描电镜将路面积尘中的微塑料按照粒径、形状和颜色进行分类(图3). 积尘中微塑料粒径主要集中在 250 ~ 500 μm，数量占比约为 41.75%. 总体来看，粒径小于1 000 μm 的微塑料占比在 65% 以上. 从形状来看，研究区的微塑料可分为 4 类，具体为薄膜、颗粒、纤维和球型. 其中薄膜状微塑料数量最多，占比为 66.64%，其次是颗粒状(16.14%)、纤维类(14.13%)及球型(3.10%). 本研究结果与伊朗的布什尔市[24]以及阿萨卢耶[23]的情况相似，路面积尘中的微塑料都是薄膜状为主. 从颜色上来看，研究区域的微塑料有透明色、红色、蓝色、绿色、黑色和白色这 6 种颜色. 其中，黑色微塑料(41.44%)居多，其次是绿色(20.87%)和白色(13.61%).

从图 4 可以看出路面积尘中的微塑料表面粗糙程度较高，受到了不同程度的侵蚀和破坏，具有凸起、凹陷、多孔、裂纹和缝隙等特征. 主要是由于路面上的微塑料会受到人流和车流等的机械性挤压和摩擦等作用. 粗糙程度较高的微塑料容易成为重金属和有机污染物等污染物的载体[42,43]. 尽管使用 HNO_3 和 H_2O_2 对微塑料进行了消解处理，但是仍然可以看到其表面还是附着一定量的 Ca、K、Fe、Al、Mn、Na、Mg 和 Ti 等元素. 而不同类型的微塑料以及在同一微塑料不同位置上的元素种类有一定的差异，这样的结果与微塑料的种类及其表面性质和所



(a)透明薄膜；(b)黑色颗粒

图4　积尘中微塑料场发射扫描电镜图

Fig. 4　Transmission scanning electron microscopy of MPs in road dust

处的环境有关.

2.3 微塑料的空间分布特征

由图5(a)~5(d)可知,雨山区路面上的微塑料丰度为0.43~149.90 n·m^{-2}和15.00~760.00 n·kg^{-1},平均丰度为(18.11±32.36)n·m^{-2}和(223.00±197.01)n·kg^{-1};含量为0.20~329.53

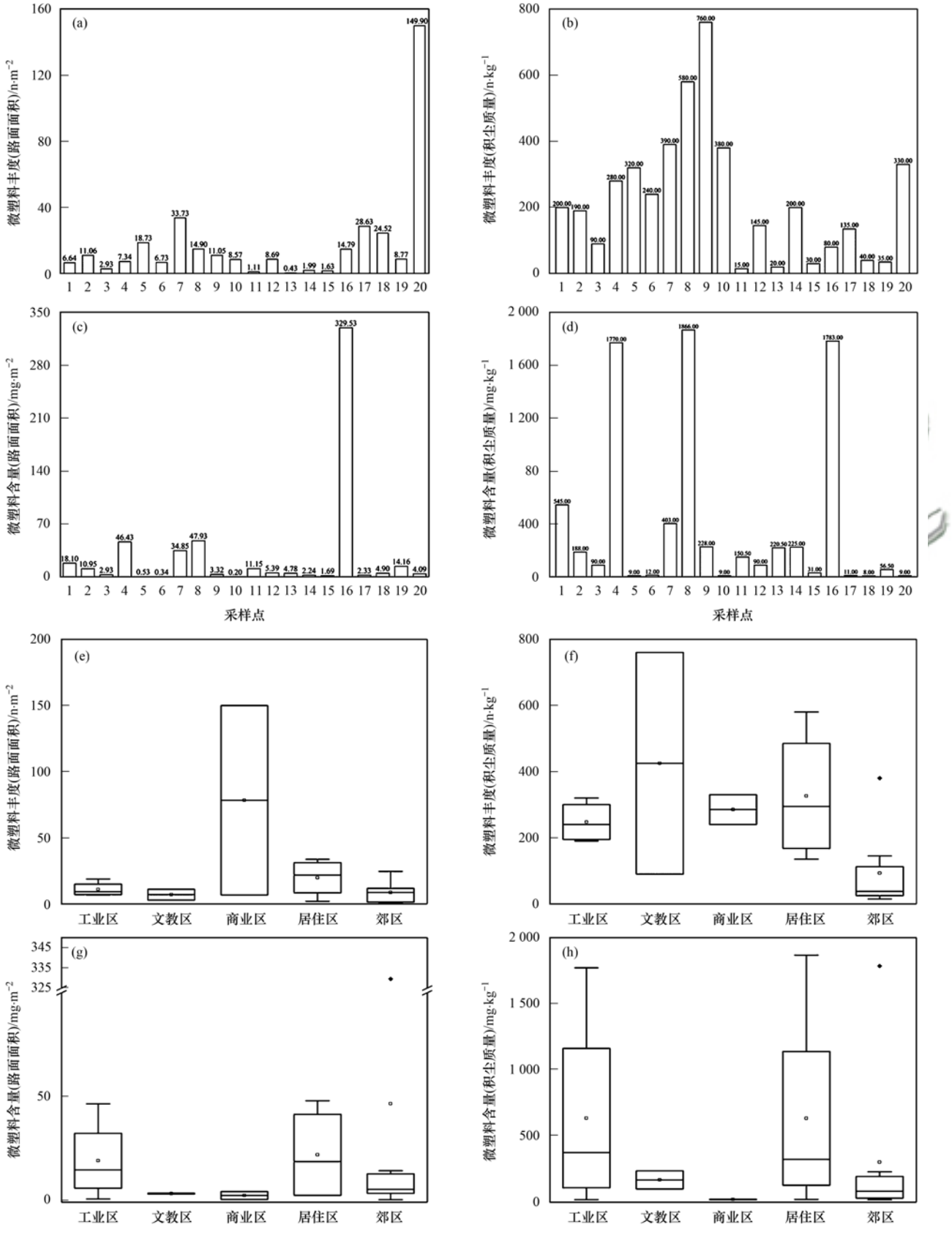


图5 雨山区路面积尘微塑料空间分布

Fig. 5 Spatial distribution characteristics of MPs in road dust in Yushan District

mg·m^{-2}和 8.00 ~ 1 866.00 mg·kg^{-1}，平均含量为(27.29 ± 72.64) mg·m^{-2} 和(385.23 ± 628.93) mg·kg^{-1}. 以上结果表明，微塑料普遍存在于路面积尘中. 20 号点位于郊区，单位面积路面的微塑料丰度最高，主要是塑料垃圾缺乏有效地管理，导致微塑料在路面积累. 两一方面，由于大货车的通行，路面积尘负荷量大(0.45 kg·m^{-2})，造成单位质量积尘中的微塑料丰度较低. 9 号点周边有两所学校，人车流量大，增加了积尘中微塑料的来源. 但该采样点道路清扫频率高，积尘负荷低(0.01 kg·m^{-2})，单位质量积尘中微塑料的丰度较高. 16 号点的单位面积路面对应的微塑料的含量最高. 该位置附近有农田和居民区，薄膜、纤维状微塑料居多. 4、8 和 16 号点路面积尘量较少，单位质量积尘中微塑料含量较高. 通过以上结果可以发现，微塑料赋存情况采用不同的表达方法时，所得到的结果可能不一致. 目前不同的研究所采用的表达方法不同(表 1)，进行数据比较时，存在一定的困难，因此需要建立统一的表达方法. 从实际应用的角度来看，采用路面面积作为基准的表达方法可能更好一些. 这种情况下可以根据单位面积丰度或含量来估算一个区域微塑料的总量. 为了更好地分析路面灰尘中微塑料的丰度和含量分布与其所对应功能区之间的关系，按照工业区、文教区、商业区、居住区和郊区 5 种土地利用类型微塑料污染情况进行分析[图 5(e) ~ 5(h)]. 工业区、文教区、商业区、居住区和郊区对应的单位面积路面微塑料丰度分别为(10.95 ± 5.54)、(6.99 ± 5.74)、(78.32 ± 101.24)、(19.81 ± 14.30) 和(8.56 ± 8.13) n·m^{-2}，单位质量积尘中微塑料丰度分别为(247.50 ± 62.92)、(425.00 ± 473.76)、(285.00 ± 63.64)、(326.25 ± 200.81) 和(93.13 ± 123.52) n·kg^{-1}，单位面积路面微塑料含量为(19.00 ± 19.66)、(3.12 ± 0.27)、(2.21 ± 2.65)、(21.84 ± 23.20) 和(46.48 ± 114.47) mg·m^{-2}，单位质量积尘中微塑料含量为(628.00 ± 793.27)、(159.00 ± 97.58)、(10.50 ± 2.12)、(626.26 ± 841.89) 和(293.56 ± 606.32) mg·kg^{-1}. 商业区单位面积路面微塑料丰度相对其他区域较高，可能是因为商业区有许多商店和餐馆，塑料制品使用频繁，增加了微塑料进入环境的可能性. 郊区单位质量积尘微塑料的平均丰度最低，主要是由于郊区积尘量较大. 而微塑料的含量在各个区域的分布整体没有显著性差异(单位质量积尘中微塑料含量：$F = 0.522$，$P = 0.721$；单位面积路面微塑料含量：$F = 0.229$，$P = 0.918$).

路面积尘主要来源于路面材料、土壤尘、机动车尾气尘和大气沉降[44]，是持续产生的. 路面微塑料的来源包括汽车轮胎表面的磨损、道路涂料、建筑材料、人造草皮和大塑料垃圾的破碎[22,26,45]，这些产生过程不一定是持续的. 较大的塑料进入环境之后，经过路面车辆磨损等外力作用下破碎成许多更小的塑料，会导致微塑料的数量增加. 但是在微塑料破碎过程中其质量有可能变化不大. 将微塑料丰度与积尘负荷进行相关性分析发现，单位面积路面微塑料丰度与积尘负荷显著相关($r = 0.599$，$P = 0.005 < 0.01$)；而积尘负荷和单位面积路面微塑料含量($r = 0.067$，$P = 0.780$) 没有显著相关性(图 6). 有研究表明单位面积路面微塑料丰度高的区域，微塑料降雨输出更多[17,19,20]，所以合理地清扫频率可以降低微塑料的数量. 同时也可减少降雨时向水环境中输入的微塑料数量. 结果还表明单位质量路面积尘微塑料丰度($r = -0.259$，$P = 0.269$) 和含量($r = -0.182$，$P = 0.442$) 与积尘负荷没有显著相关性.

通过与其他区域的研究结果比较发现，雨山区路面积尘微塑料的含量与部分区域处于同一污染水平[21]. 丰度较草津和加德满都等城市偏高[22,25](表 1)，而相对于印度的金奈[27] 以及伊朗的阿萨卢

表 1　研究区域与文献路面积尘微塑料丰度比较

Table 1　Comparison of the microplastic abundance in road dust between the study area and the literature

研究区域	丰度	文献
雨山区	15.00 ~ 760.00 n·kg^{-1}、0.43 ~ 149.90 n·m^{-2}、(223.00 ± 197.01) n·kg^{-1} 和(18.11 ± 32.36) n·m^{-2}	本研究
草津(日本)	(2.0 ± 1.6) n·m^{-2}	[22]
岘港(越南)	(19.7 ± 13.7) n·m^{-2}	[22]
加德满都(尼泊尔)	(12.5 ± 10.1) n·m^{-2}	[22]
金奈(印度)	(2 279.4 ± 913.7) n·kg^{-1}	[27]
布什尔市(伊朗)	14 800 ~ 87 600 n·kg^{-1}	[24]
阿萨卢耶(伊朗)	21 000 ~ 165 800 n·kg^{-1}	[23]
德黑兰(伊朗)	2 766.7 ~ 20 166.7 n·kg^{-1}	[28]
维多利亚(澳大利亚)	20.6 ~ 529.3 n·kg^{-1}	[21]
东京(日本)	(230 ± 50) n·kg^{-1}	[25]
熊本(日本)	(96 ± 85) n·kg^{-1}	[25]
冲绳(日本)	(68 ± 77) n·kg^{-1}	[25]

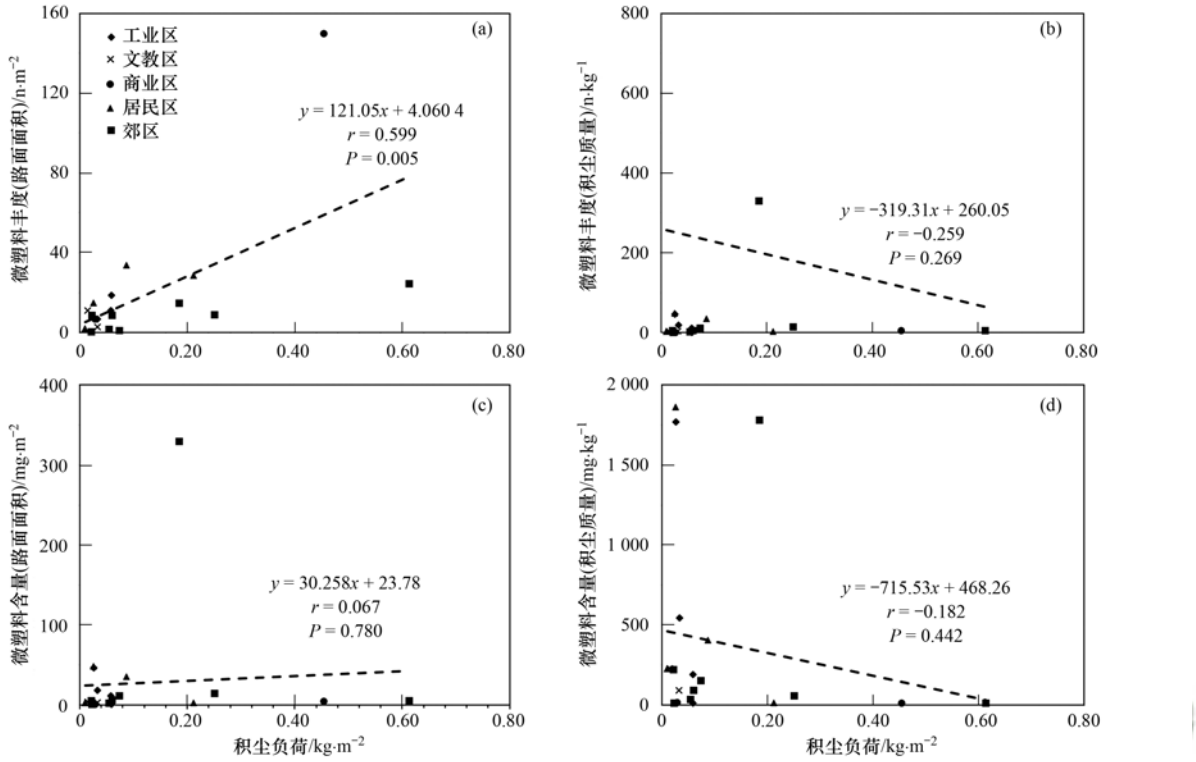


图 6 积尘负荷与微塑料分布相关性

Fig. 6 Correlation between the mass of dust and distribution of MPs

耶[23]和布什尔市[24]偏低. 丰度的差异和清扫的方式、频率、降雨情况以及路面洒水等因素有关. 对于草津、东京和加德满都等城市,每天的清扫频率高,减少了路面积尘以及微塑料的积累,而印度和伊朗的路面清扫频率低,人流量大,路边塑料垃圾堆积较多,积尘中微塑料的来源多.

2.4 城市路面积尘微塑料污染来源分析

聚类分析是基于单位路面面积中微塑料丰度及其物理形貌的相似性对采样位置进行划分,结果如图 7 所示. 可以看出, 20 个采样点被分为 3 组. 第一组包括 11、13、14、3、9、7、4、2、8、12、15、6 和 10 号点,大部分点位于郊区,路面积尘量较多,单位路面面积中微塑料丰度较低. 第二组包括 5、17、19、16、18 和 7 号点,位于人类活动较为频繁的区域,微塑料产生量大,丰度较高. 第三组仅包含 20 号点,该点积尘量较高,单位路面面积微塑料丰度最高. 路面积尘中主要为聚丙烯和聚乙烯薄膜类微塑料. 聚丙烯和聚乙烯类塑料大多应用在购物袋、食品包装、家用物品等领域. 这些塑料在使用后被丢弃,破碎成更小的碎片后沉积在路面积尘中. 硅橡胶类塑料由于其耐磨损,耐氧化等优良性能,被广泛用于汽车轮胎、软管、鞋底和其他零部件. 车辆在行驶过程中,轮胎会磨损产生出一定量的微塑料. Wang 等[46]的研究指出,车辆轮胎或者其他橡胶产品磨碎后主要为黑色颗粒和碎片. 因此路面积尘中的硅橡胶类微塑料来源于汽车轮胎的磨损. 微塑料扫描电镜能谱结果中汽车尾气中微量元素的存在[27],也证明了微塑料来源于汽车轮胎以及其他零部件的磨损. 聚酯类塑料包括聚酯纤维和碎片,聚酯纤维来源于衣物纤维,碎片来源于饮料瓶的破碎. 聚苯乙烯微塑料多为白色泡沫,在产品包装、快递运输和外卖饭盒中使用较多,由于其密度低,破碎后容易迁移到路面积尘中.

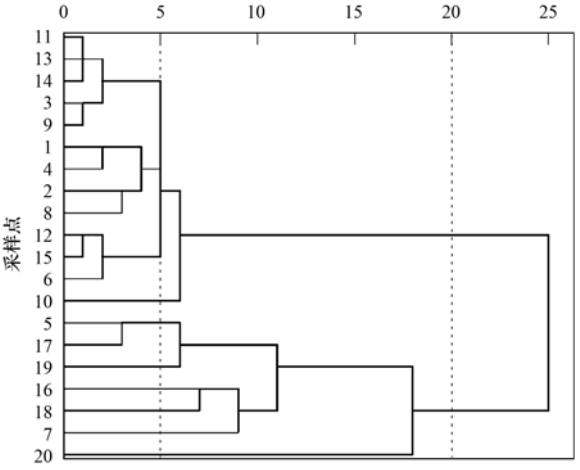


图 7 雨山区采样点聚类的树状图(欧式聚类)

Fig. 7 Dendrogram showing clustering of sampling sites from Yushan District (Euclidean clustering)

3 结论

(1)城市路面积尘微塑料多为透明薄膜类和黑

色颗粒,成分有聚丙烯、聚乙烯和硅橡胶类,粒径小于1 000 μm的微塑料占据主导地位.

(2)不同功能区的路面积尘中的微塑料丰度有一定差异. 商业区由于人车流量大,其单位面积路面微塑料丰度相对其他区域较高,微塑料污染也更为严重.

(3)对于微塑料污染状况采用不同表达方法时,得出的结论可能会具有较大的差别,急需建立统一的表达方法.

(4)由于路面积尘和微塑料主要来源的差异,路面积尘累积过程中微塑料的质量可以没有显著的变化. 但车辆等的外力作用能使微塑料发生破碎导致其数量增加,出现积尘负荷越高,单位面积路面微塑料丰度也越高的情况.

参考文献:

[1] Van Cauwenberghe L, Devriese L, Galgani F, *et al*. Microplastics in sediments: a review of techniques, occurrence and effects[J]. Marine Environmental Research, 2015, **111**: 5-17.

[2] Capozzi F, Carotenuto R, Giordano S, *et al*. Evidence on the effectiveness of mosses for biomonitoring of microplastics in fresh water environment[J]. Chemosphere, 2018, **205**: 1-7.

[3] Li C, Busquets R, Campos L C. Assessment of microplastics in freshwater systems: A review [J]. Science of the Total Environment, 2020, **707**, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2019. 135578.

[4] 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.

[5] Pramanik B K, Roychand R, Monira S, *et al*. Fate of road-dust associated microplastics and per- and polyfluorinated substances in stormwater[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, **144**(10): 236-241.

[6] Chamas A, Moon H, Zheng J J, *et al*. Degradation rates of plastics in the environment[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, **8**(9): 3494-3511.

[7] Al-Thawadi S. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: challenges and threats to aquatic organisms[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, **45**(6): 4419-4440.

[8] Stock F, Kochleus C, Bänsch-Baltruschat B, *et al*. Sampling techniques and preparation methods for microplastic analyses in the aquatic environment-A review[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2019, **113**: 84-92.

[9] Browne M A, Underwood A J, Chapman M G, *et al*. Linking effects of anthropogenic debris to ecological impacts [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 2015, **282**(1807), doi: 10. 1098/rspb. 2014. 2929.

[10] Gao F L, Li J X, Sun C J, *et al*. Study on the capability and characteristics of heavy metals enriched on microplastics in marine environment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **144**: 61-67.

[11] Wang J, Li J, Wang Q, *et al*. Microplastics as a vector for HOC bioaccumulation in earthworm *Eisenia fetida* in soil: importance of chemical diffusion and particle size [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(19): 12154-12163.

[12] Tourinho P S, Kočí V, Loureiro S, *et al*. Partitioning of chemical contaminants to microplastics: sorption mechanisms, environmental distribution and effects on toxicity and bioaccumulation [J]. Environmental Pollution, 2019, **252**: 1246-1256.

[13] Niu L H, Li Y Y, Li Y, *et al*. New insights into the vertical distribution and microbial degradation of microplastics in urban river sediments [J]. Water Research, 2021, **188**, doi: 10. 1016/j. watres. 2020. 116449.

[14] Sang W J, Chen Z Y, Mei L J, *et al*. The abundance and characteristics of microplastics in rainwater pipelines in Wuhan, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, **755**, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2020. 142606.

[15] Liu F, Olesen K B, Borregaard A R, *et al*. Microplastics in urban and highway stormwater retention ponds[J]. Science of the Total Environment, 2019, **671**: 992-1000.

[16] Roychand R, Pramanik B K. Identification of micro-plastics in Australian road dust [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, **8**(1), doi: 10. 1016/j. jece. 2019. 103647.

[17] Shruti V C, Pérez-Guevara F, Elizalde-Martínez I, *et al*. Current trends and analytical methods for evaluation of microplastics in stormwater[J]. Trends in Environmental Analytical Chemistry, 2021, **30**, doi: 10. 1016/j. teac. 2021. e00123.

[18] Järlskog I, Strömvall A M, Magnusson K, *et al*. Occurrence of tire and bitumen wear microplastics on urban streets and in sweepsand and washwater[J]. Science of the Total Environment, 2020, **729**, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2020. 138950.

[19] Kumari S, Jain M K, Elumalai S P. Assessment of pollution and health risks of heavy metals in particulate matter and road dust along the road network of Dhanbad, India[J]. Journal of Health and Pollution, 2021, **11**(29), doi: 10. 5696/2156-9614-11. 29. 210305.

[20] 林孜, 姬亚芹, 林宇, 等. 鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 3918-3923.
Lin Z, Ji Y Q, Lin Y, *et al*. Characteristics and source apportionment of carbon components in road dust in Anshan[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 3918-3923.

[21] Su L, Nan B X, Craig N J, *et al*. Temporal and spatial variations of microplastics in roadside dust from rural and urban Victoria, Australia: implications for diffuse pollution[J]. Chemosphere, 2020, **252**, doi: 10. 1016/j. chemosphere. 2020. 126567.

[22] Yukioka S, Tanaka S, Nabetani Y, *et al*. Occurrence and characteristics of microplastics in surface road dust in Kusatsu (Japan), Da Nang (Vietnam), and Kathmandu (Nepal)[J]. Environmental Pollution, 2020, **256**, doi: 10. 1016/j. envpol. 2019. 113447.

[23] 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.

[24] Abbasi S, Keshavarzi B, Moore F, *et al*. Investigation of microrubbers, microplastics and heavy metals in street dust: a study in Bushehr city, Iran[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, **76**(23), doi: 10. 1007/s12665-017-7137-0.

[25] Kitahara K I, Nakata H. Plastic additives as tracers of microplastic sources in Japanese road dusts[J]. Science of the Total Environment, 2020, **736**, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2020. 139694.

[26] 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.

[27] Patchaiyappan A, Dowarah K, Ahmed S Z, *et al*. Prevalence and characteristics of microplastics present in the street dust collected from Chennai metropolitan city, India [J]. Chemosphere, 2021, **269**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128757.

[28] Dehghani S, Moore F, Akhbarizadeh R. Microplastic pollution in deposited urban dust, Tehran metropolis, Iran [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, **24**(25): 20360-20371.

[29] Yu L, Zhang J D, Liu Y, *et al*. Distribution characteristics of microplastics in agricultural soils from the largest vegetable production base in China[J]. Science of the Total Environment, 2021, **756**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143860.

[30] Zhang Z Y, Mamat Z, Chen Y G. Current research and perspective of microplastics (MPs) in soils (dusts), rivers (lakes), and marine environments in China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **202**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110976.

[31] 赵昕, 陈浩, 贾其隆, 等. 城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3612-3620.
Zhao X, Chen H, Jia Q L, *et al*. Pollution status and pollution behavior of microplastic in surface water and sediment of urban rivers [J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3612-3620.

[32] 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 Liaohe River basin[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1781-1790.

[33] 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.

[34] Hurley R R, Lusher A L, Olsen M, *et al*. Validation of a method for extracting microplastics from complex, organic-rich, environmental matrices [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(13): 7409-7417.

[35] Adomat Y, Grischek T. Sampling and processing methods of microplastics in river sediments-A review [J]. Science of the Total Environment, 2021, **758**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143691.

[36] 周倩. 典型滨海潮滩及近海环境中微塑料污染特征与生态风险[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.

[37] Fries E, Dekiff J H, Willmeyer J, *et al*. Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2013, **15**(10): 1949-1956.

[38] Yao P, Zhou B, Lu Y H, *et al*. A review of microplastics in sediments: spatial and temporal occurrences, biological effects, and analytic methods[J]. Quaternary International, 2019, **519**: 274-281.

[39] Lin L, Zuo L Z, Peng J P, *et al*. Occurrence and distribution of microplastics in an urban river: a case study in the Pearl River along Guangzhou City, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **644**: 375-381.

[40] Peng G Y, Xu P, Zhu B S, *et al*. Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China: a case study of risk assessment in mega-cities[J]. Environmental Pollution, 2018, **234**: 448-456.

[41] Sun X M, Wang T, Chen B J, *et al*. Factors influencing the occurrence and distribution of microplastics in coastal sediments: from source to sink[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **410**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124982.

[42] 范秀磊, 邹晔锋, 刘加强, 等. 老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1901-1912.
Fan X L, Zou Y F, Liu J Q, *et al*. Adsorption and desorption behaviors of antibiotics on TWP and PVC particles before and after aging[J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1901-1912.

[43] 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.

[44] O'Brien S, Okoffo E D, Rauert C, *et al*. Quantification of selected microplastics in Australian urban road dust[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **416**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.125811.

[45] Klöckner P, Reemtsma T, Eisentraut P, *et al*. Tire and road wear particles in road environment - Quantification and assessment of particle dynamics by Zn determination after density separation[J]. Chemosphere, 2019, **222**: 714-721.

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

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 43 No. 1

Jan. 15, 2022

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China ····· PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, *et al.* (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review ····· CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, *et al.* (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge ····· ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, *et al.* (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China ····· RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, *et al.* (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China ····· ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, *et al.* (46)
Real-time Source Apportionment of $PM_{2.5}$ and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan ····· JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, *et al.* (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of $PM_{2.5}$ in Yuncheng City ····· WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, *et al.* (74)
Three-dimensional Structure Variation of $PM_{2.5}$ During Cold Front Advance in Eastern China ····· MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area ····· LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, *et al.* (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China ····· LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, *et al.* (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa ····· YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, *et al.* (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period ····· LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, *et al.* (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb ····· JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O_3 and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China ····· YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, *et al.* (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes ····· XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, *et al.* (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels ····· WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, *et al.* (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo ····· WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, *et al.* (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City ····· PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, *et al.* (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust ····· FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, *et al.* (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources ····· SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, *et al.* (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China ····· WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, *et al.* (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin ····· LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, *et al.* (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake ····· CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, *et al.* (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals ····· LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, *et al.* (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing ····· HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, *et al.* (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water ····· LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, *et al.* (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course ····· LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, *et al.* (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City ····· YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, *et al.* (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules ····· XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, *et al.* (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries ····· TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, *et al.* (295)
Characteristic Analysis of *nirS* Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification ····· LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, *et al.* (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir ····· ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, *et al.* (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China ····· WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta ····· LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, *et al.* (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area ····· ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, *et al.* (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers ····· HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, *et al.* (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration ····· LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, *et al.* (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO_2 Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area ····· QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, *et al.* (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red ····· LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, *et al.* (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter ····· WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, *et al.* (398)
Nitritation Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment ····· DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, *et al.* (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community ····· WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, *et al.* (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics ····· LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, *et al.* (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model ····· XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, *et al.* (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China ····· CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, *et al.* (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products ····· WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, *et al.* (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique ····· SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, *et al.* (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice ····· LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, *et al.* (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse ····· DONG Jun-wen, GAO Pei-pei, SUN Hong-xin, *et al.* (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable ····· ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-liang, *et al.* (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula ····· LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, *et al.* (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil ····· GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, *et al.* (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau ····· WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, *et al.* (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of *Torreya grandis* cv. Merrillii Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion ····· JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, *et al.* (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community ····· YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, *et al.* (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China ····· XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, *et al.* (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation ····· MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, *et al.* (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain ····· WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, *et al.* (569)