

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附铅的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品品 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫红 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系

柴炳文¹, 尹华^{1*}, 魏强², 卢桂宁¹, 党志¹

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 华南理工大学医疗器械研究检验中心, 广州 510006)

摘要: 微塑料污染无处不在, 并受到了社会各界的关注。近年来, 关于微塑料在水生态系统中的报道越来越多, 而关于陆地生态环境, 尤其在电子废物拆解区土壤微塑料污染的研究还十分匮乏。以广东省汕头地区贵屿镇废弃的以不同拆解方式所造成的电子废物拆解样地为研究对象, 从生态毒理学和微生物学角度探讨了微塑料与其周围土壤环境之间的关系。通过 SEM-EDS 对微塑料表面进行表征, 发现其表面具有老化和降解的迹象; 这可能是由于微塑料长期暴露在土壤中, 以及原始的拆解方法造成其表面形态及性质发生了变化。另外, 在同一微塑料样品的不同表面位置, 金属元素类型存在较大差异; 说明微塑料所携带的一些金属元素并非本身固有, 而是从周围土壤环境中吸附的。利用 ICP-OES 对微塑料内载固有的 7 种重金属 (Pb、Cd、Cr、As、Ba、Co 和 Ni) 进行分析发现, 由于微塑料主要来源于各类电子废物, 其所含各重金属含量在不同样地中有所不同, 且几乎均高于周围土壤, 尤其 Ba 在微塑料中的含量比在土壤中高出 10^3 数量级。Ba 在塑料中主要以 BaSO_4 的形式存在, 常作为填料广泛添加于各种塑料中。此外, 对微塑料表面微生物进行 16S rRNA 测序, 并采用 Spearman 等级相关系数分析了微塑料表面细菌群落平均丰度前 50 的属与土壤环境因子之间的关系。这些微生物主要来源于微塑料所处的周围环境, 因此环境因子的差异会直接影响微塑料表面微生物群落。由不同拆解方式所导致的电子废物污染场地具有不同的土壤环境因素, 这些因素与微塑料表面微生物的相关性也存在差异。

关键词: 微塑料; 土壤; 重金属; 微生物; 电子废物; 贵屿

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1073-08 DOI: 10.13227/j.hjks.202007245

Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China

CHAI Bing-wen¹, YIN Hua^{1*}, WEI Qiang², LU Gui-ning¹, DANG Zhi¹

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Medical Devices Research and Testing Center, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Microplastic pollution is ubiquitous and has attracted significant public attention. Recent research on microplastic has focused on aquatic environments, but its impacts on soil ecosystems remain poorly understood, especially in e-waste dismantling zones. The objective of this study was to investigate the relationships between microplastic and surrounding soil in abandoned e-waste disassembling plots with different dismantling methods focusing on ecotoxicology and microbiology in Guiyu, Shantou District, Guangdong Province. The surface morphology of collected microplastics showed signs of aging and degradation, possibly due to their long-term exposure in the soil and the original disassembling methods. In addition, there were diverse metal elements at different surface positions of the same microplastic sample based on SEM-EDS analyses, indicating that some metal elements carried by microplastics are derived from the surrounding soil rather than being inherent to the microplastic. Moreover, seven heavy metals (Pb, Cd, Cr, As, Ba, Co, and Ni) inherent in microplastic were identified using ICP-OES, revealing that the concentrations varied in different sampling plots were typically higher than in the surrounding soil. In particular, the concentration of Ba in microplastic was 10^3 orders of magnitude higher than in soil. Indeed, Ba in the form of BaSO_4 is widely used as a filler in numerous plastics. Furthermore, microplastic-associated microorganisms were examined using 16S rRNA sequencing, and the relationships between the top 50 genera of microplastic-bound bacteria and soil environmental factors were analyzed using the Spearman's rank correlation coefficient. Microorganisms primarily originated from the surroundings of microplastics; therefore, environmental factors could directly affect the microbial communities associated with this type of pollutant. Importantly, different dismantling methods were associated with distinct soil environmental factors, and their correlations with microplastic-associated microorganisms also varied.

Key words: microplastic; soil; heavy metal; microorganism; e-waste; Guiyu

微塑料是指环境中粒径小于 5 mm 的塑料类污染物, 包括颗粒、薄膜和纤维等不同形貌类型^[1]。微塑料作为一种新型污染物, 已成为全球性的环境问题, 近年来受到国内外广泛关注, 然而目前大多数研究都集中于水生生态系统^[2-4]。由于土壤是由复杂的矿物-有机质组成, 并且水环境的研究方法不适用于土壤生态研究等原因, 使得微塑料对土壤环境污染影响的研究较少^[5]。事实上大部分塑料碎片都是在

陆地上被生产, 使用并丢弃的^[6]。微塑料可以通过长期的农用地膜残留、有机肥和污泥的施用、地表水灌溉和大气沉降等方式进入土壤环境^[7]。这些进入

收稿日期: 2020-07-26; 修订日期: 2020-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1501234, 41673091); 国家重点研发计划项目 (2018YFC1802800)

作者简介: 柴炳文 (1993 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土壤微塑料污染, E-mail: chaibingwen@163.com

* 通信作者, E-mail: huayin@scut.edu.cn

土壤中的微塑料,在长期的风化作用、紫外照射及其与土壤中其他组分的相互作用下,表面逐步老化、粗糙,微塑料逐渐裂解,粒径变小,比表面积增大,吸附位点增加,表面官能团增多,疏水性增强,辛醇/水分配系数升高,在土壤 pH、盐度、有机质和离子交换等复杂因素的调控下,对土壤重金属和有机污染物的吸附能力也逐渐增强,从而改变土壤理化性质,影响土壤生态系统健康^[8,9]. 因此,研究微塑料污染对土壤环境的影响十分必要.

迄今为止,虽然已有大量关于由电子废物拆解所导致当地土壤重金属污染的报道^[10],但微塑料表面从周围土壤中所吸附重金属以及微塑料本身固有重金属的数据仍知之甚少. 此外,微塑料可为微生物提供吸附位点,使其长期吸附在微塑料表面,形成生物膜,并可以伴随微塑料的迁移,扩散到其他生态系统中,改变生态系统的菌群和功能^[11]. 目前,已有研究报道微塑料表面微生物具有高丰富度和多样性的特征,包括一些对海洋生物多样性有危险的致病性菌株^[11~13];但对寄居在土壤微塑料表面微生物的报道仅有 2 篇^[14,15]. 还有研究发现,电子废物拆解区土壤微塑料表面微生物的来源与微塑料周围的土壤环境有着密不可分的关系^[15],但影响其表面微生物群落组成的土壤环境因子尚不清楚. 这些都极大地限制了微塑料在生态毒理学和微生物学方面的研究进展.

以广东汕头市贵屿镇为研究对象,该区域自 20 世纪 90 年代,由上千家家庭式小作坊,使用原始粗暴的拆解方法回收电子废弃物中的各类贵金属及可回收零部件^[16]. 与此同时,电子废弃物拆解过程中所产生大量的微塑料被随意倾倒在土壤中. 因此,本研究探究该区域典型拆解场地土壤中的微塑料从周围环境中吸附到其表面的金属成分,对比微塑料固有的重金属含量与土壤重金属含量;并分析微塑料表面微生物群落结构组成与土壤环境因子之间的关系,以期为我国电子废物拆解区土壤中微塑料污染调查和研究提供基础数据信息和科学参考价值.

1 材料与方法

1.1 样品采集

针对研究区域内 3 块废弃的以不同拆解方式所造成的电子废物拆解样地:北林(手工拆解)、龙岗(塑料粉碎)和仙彭(露天焚烧)为调查对象(图 1),共采集了 75 个样本进行分析. 在每块样地中,用直径为 5 cm 的土钻随机钻取 0~20 cm 土层土样($n=5$),将土样用四分法混合均匀后过 2 mm 筛,剔除细根、石块和动植物残体等,自然风干后,

用于测定土壤理化性质和重金属含量;并随机采集微塑料($n=17$)和其周围土壤($n=3$)分别装至 2 mL 无菌离心管中后,放入冷藏箱带回实验室以便后续处理分析.



图 1 采样点示意

Fig. 1 Information of sampling sites

1.2 样品指标测试

微塑料表面微观形貌运用扫描电子显微镜 (SEM, Merlin, Zeiss, Germany) 进行观察鉴定,并结合能谱仪 (EDS, XFlash Detecor 6130, Bruker, Germany) 分析所选取的表面微域的金属元素组成. 土壤重金属含量以及微塑料固有的重金属含量采用 ICP-OES (iCAP 7200, Thermo Scientific, USA) 进行测定,其测定方法参照文献^[17]. 土壤理化性质见表 1,其测定方法参照文献^[18],即土壤 pH 值采用便携式 pH 计 (FE20, Mettler Toledo, Switzerland),水土比为 2.5:1,振荡 30 min 后测定. 土壤有机质 (SOM) 用 (Analytikjena) multi N/C 3100 型 TOC 分析仪测定. 总氮 (TN) 用元素分析仪 (Elementar Vario EL III, Germany) 测定,铵态氮用靛酚蓝比色法,硝态氮用紫外分光光度法来测定速效氮 (AN) 含量. 速效磷 (AP) 测定采用钼锑抗比色法,使用酸液浸提土样中的磷,随后以钼锑抗显色剂进行显色,然后使用紫外-可见分光光度计测定总磷 (TP) 含量. 分别通过火焰原子吸收分光光度法 (FAAS) 和中性醋酸铵法测定总钾 (TK) 和速效钾 (AK) 的含量.

1.3 微塑料表面微生物分离

将微塑料样品带回实验室后,对其表面微生物进行分离. 首先向无菌离心管中滴入磷酸缓冲盐溶

表 1 土壤理化性质¹⁾
Table 1 Physicochemical properties of sampled soils

样地	pH	SOM /g·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	TP /g·kg ⁻¹	TK /g·kg ⁻¹	AN /mg·kg ⁻¹	AP /mg·kg ⁻¹	AK /mg·kg ⁻¹
龙岗	7.12 ± 0.08	46.56 ± 14.65	0.72 ± 0.15	0.19 ± 0.05	3.26 ± 0.11	28.47 ± 0.72	2.99 ± 0.33	91.91 ± 4.72
北林	7.06 ± 0.09	26.95 ± 3.34	0.54 ± 0.04	0.15 ± 0.03	3.62 ± 0.55	26.72 ± 0.72	4.72 ± 1.21	109.95 ± 5.70
仙彭	7.05 ± 0.08	55.18 ± 21.74	2.61 ± 2.10	1.60 ± 0.28	0.56 ± 0.20	37.57 ± 6.44	3.48 ± 0.81	82.06 ± 28.83

1) SOM:土壤有机质; TN:总氮; TP:总磷; TK:总钾; AN:速效氮; AP:速效磷; AK:速效钾

液,置于自动振荡器中振荡,将振荡后的微塑料用无菌镊取出;再将与微塑料一起振荡后的混合溶液置于高速冷冻离心机中离心,弃上清液,得到微塑料表面微生物,并保存在-80℃冰箱内,直到DNA提取。

1.4 DNA 提取和 16S 扩增子测序

使用 HiPure Soil DNA 试剂盒 (Magen Biotech, Guangzhou, China) 对样品进行 DNA 提取, Qubit 3.0 Fluorometer (Invitrogen, Carlsbad, CA, USA) 检测 DNA 样品的浓度, MetaVx™ 文库构建试剂盒, 构建测序文库。以 30~50 ng DNA 为模板, 采用包含“CCTAC GGRRBGCASCAGKVRVGAAT”序列的上游引物 341F 和包含“GGACTACNVGGGTWCTAATCC”序列的下游引物 806R 扩增 V3 和 V4 区。另外, 通过 PCR 向 16S rDNA 的 PCR 产物末端加上带有 Index 的接头, 以便进行测序。

使用 Agilent 2100 生物分析仪 (Agilent Technologies, Palo Alto, CA, USA) 检测文库质量, 并且通过 Qubit 3.0 Fluorometer 检测文库浓度。DNA 文库混合

后, 按 Illumina MiSeq (Illumina, San Diego, CA, USA) 仪器使用说明书进行 2×250 bp 双端测序, 由 MiSeq 自带的 MiSeq Control Software (MCS) 读取序列信息。

1.5 数据分析

首先利用 QIIME (1.9.1)^[19] 对原始数据进行去接头和低质量过滤处理, 然后去除嵌合体序列, 得到有效序列后进行聚类分析, 按 97% 的序列相似度进行归并和 OTU 划分, 并选取每个 OTU 中丰度最高的序列作为该 OTU 的代表序列, 通过将 OTU 代表序列与 Silva 132 数据库的模板序列相比对, 获取每个 OTU 所对应的分类学信息。随后采用 Spearman 等级相关系数对微塑料表面细菌群落平均丰度前 50 的属和土壤环境因子之间的关系进行探索, 并用 R 语言的 Heatmap 包绘制热图。

2 结果与分析

2.1 微塑料表面形态及吸附的金属元素

如图 2 所示, 从土壤样品中随机挑选出微塑料,

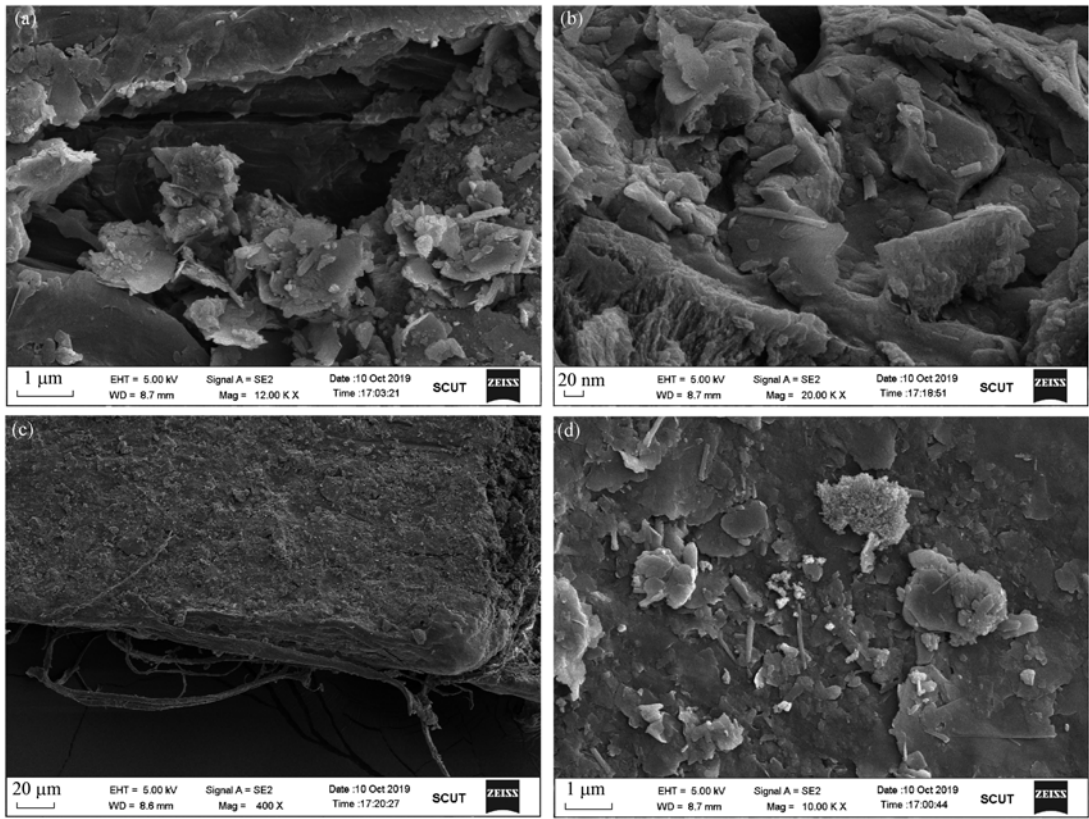


图 2 土壤中微塑料的表面形态特征
Fig. 2 Surface morphology of microplastics in the soil

通过 SEM 观察其表面形态. 在观察前, 将微塑料样品用超声波清洗, 除那些抗超声波的材料外, 大多数松散附着材料都从微塑料表面去除. 图 2 表明, 所有的微塑料表面都具有老化和降解的迹象; 包括裂痕、孔洞, 及不均匀的凸起和凹陷 [图 2(a) 和 2(b)], 表层似乎已与下层分开 [图 2(a)]. 图 2(c) 和 2(d) 表明微塑料表面还具有粗糙的毛边, 鳞状的凸起和附着的颗粒等等. 利用 SEM 所配备的 EDS 对微塑料表面的金属元素组成进行分析. EDS 能谱显示微塑料表面存在多种类型的金属元素, 如 Si、Cd、Ba、Pb 和 Al 等元素 (图 3). 但在同一微塑料样品的不同表面位置, 金属元素类型存在较大差异, 说明微塑料所携带的一些金属元素并非本身存在, 而是来自于周围土壤环境.

2.2 微塑料固有及其周围土壤的重金属浓度

基于 EDS 所检测出微塑料样品表面的重金属元素, 分别对 3 块样地的微塑料以及其周围土壤的 7 种重金属 (Pb、Cd、Cr、As、Ba、Co 和 Ni) 含量进行了测定. 微塑料和土壤中各重金属含量见图 4, 微塑料固有的重金属含量在不同样地中有所不同, 这可能是由于在每块样地所拆解的电子废物种类不同所导致的. 而土壤的重金属含量在不同样地中的差异却不明显. 此外, 除龙岗样地土壤中 Ni 的含量高于微塑料的浓度之外, 微塑料中各重金属含量均高于周围土壤. 不难发现 Ba 在所有重金属中含量最高, 尤其在龙岗和北林样地, Ba 在微塑料中的含量比在土壤中高出 10^3 数量级. Ba 在塑料中主要以 $BaSO_4$ 的形式存在, 因具有化学惰性强、稳定性好、耐酸碱、硬度适中、高比重、高白度和能吸收有害射线等优点, 因此作为填料广泛添加于各种塑料中, 如聚丙烯 (PP) 和尼龙 (PA) 等.

2.3 微塑料表面细菌群落与土壤环境因子之间的关系

图 5 展示了 3 块样地中土壤微塑料表面细菌群落平均丰度前 50 的属与土壤环境因子之间的关系. 在不同的样地中, 有些微塑料表面细菌群落与同样的土壤环境因子之间的相关性是一致的. 例如: *Pedomicrobium* 属在龙岗样地和仙彭样地中与土壤 AP 都呈显著正相关, *Flavisolibacter* 和 *Bryobacter* 属在龙岗样地中的相关性与在北林样地保持一致. 但有些微塑料表面细菌群落与相同的土壤环境因子之间的相关性却恰恰相反. 例如: *Qipengyuania* 属和 *Phenylobacterium* 属在龙岗样地中与土壤 pH 呈显著负相关, 与 Pb 和 Ni 呈显著正相关; 但在北林样地中与土壤 pH 呈显著正相关, 与 Pb 和 Ni 呈显著负相关. 同时, *Gaiella* 属和 *Dongia* 属在龙岗样地中与

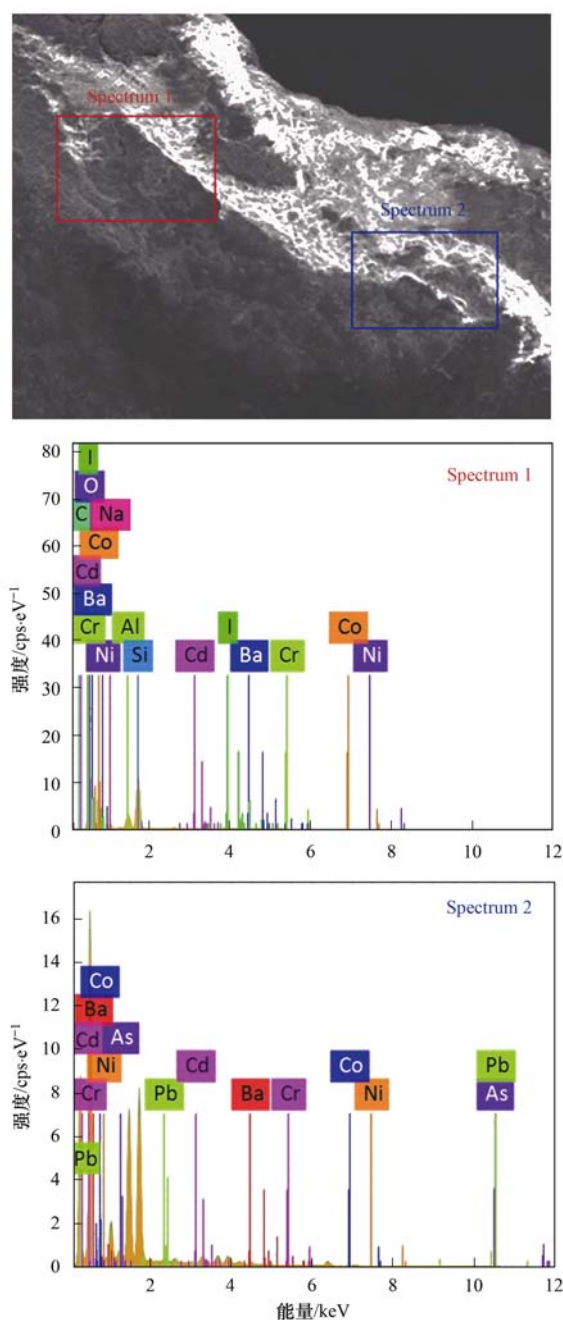


图 3 土壤中微塑料的 SEM-EDS 局部影像图

Fig. 3 SEM-EDS images of microplastic in the soil

土壤 TK 和 AK 呈显著正相关, 与 Co、Ba、Cr、TN、AN、SOM 和 TP 呈显著负相关; 但在北林样地中与土壤 TK 和 AK 却呈显著负相关, 与 Co、Ba、Cr、TN、AN、SOM 和 TP 呈显著正相关. 此外, *Sphingomonas* 属在龙岗样地中与土壤 AP 呈显著正相关, 但在仙彭样地中却与其为显著负相关.

3 讨论

3.1 微塑料与重金属之间的相互作用

由于长期暴露在土壤中, 以及原始的拆解方法, 如化学、机械和露天焚烧等可能是造成贵屿土壤微塑料表面形态发生变化的主要原因. 这些因素增加

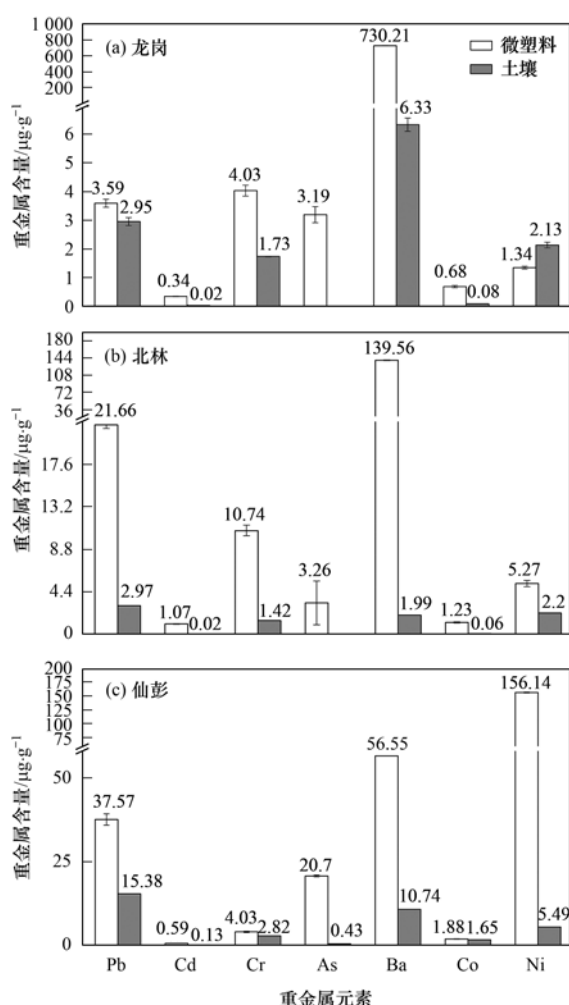


图4 3块样地微塑料及土壤的重金属含量
Fig. 4 Contents of heavy metals of microplastics and soils from three plots

了微塑料表面的粗糙程度,改变了其理化性质,金属的积累可能通过二价阳离子和氧阴离子与塑料表面带电或极性位点之间的相互作用,以及中性金属-有机复合物与疏水性表面之间的非特异性相互作用而进行^[20]。同时,实验室实验和实地环境监测也证明了微塑料可以从周围环境中吸附金属离子^[21~24]。另外,微塑料表面所形成的生物膜以及由于风化作用所形成的极性官能团(例如:酮)都会增加金属的积累^[25,26]。因此,由于微塑料长期存在于环境中并与微生物接触,它们之间的相互作用值得关注。并且随着微塑料在环境中的分解,极性或表面积的增加仍可提高对金属的吸附能力。

然而,通过探究微塑料对金属的长期吸附数据以及微塑料自身的重金属与土壤所含重金属浓度相对比,发现微塑料携带的大部分重金属来源于其固有负载。由图4可见,贵屿土壤微塑料含有较高的重金属含量,这可能归因于微塑料主要来源于各类电子废物。在塑料制造过程中,金属通常作为固有负载

添加(例如催化剂、颜料和稳定剂),以提高塑料的日常使用性能^[22,27]。总的来说,微塑料中添加了不同浓度水平的重金属,这一结论与之前的研究一致^[17,28,29]。

在贵屿,废弃的拆解场地与农用地之间的距离很近,并且当地农民使用污水灌溉农田,甚至直接在有些未被修复过的拆解场地中种植农作物。农业的耕作会加速微塑料在土壤中的分解,这可能会导致化合物的浸出,对当地的食物安全造成危害。此外,近期有研究表明,亚微米级塑料可直接被作物的侧根部位吸收并在植物体中累积^[30],而这些微塑料可能会通过食物链的传播,最终进入人体。虽然人们对生物体所摄入微塑料和重金属之间相互作用的影响知之甚少,但可以进一步研究微塑料在模拟生理条件下所释放的重金属,因为在肠道条件下有机污染物的浸出率比在海水中更高^[31]。微塑料的摄入为重金属、未反应残留单体和持久性有机污染物向生物体转移提供了潜在途径^[32]。不可否认的是,塑料在分解成更小的微塑料后,对生态系统的危害会增加,造成这一现象的主要原因是微塑料在分解过程中会释放出重金属等有毒物质。

3.2 微塑料表面微生物与环境之间的相互作用

由于微塑料表面具有疏水性以及较大的比表面积,其可以作为微生物的寄居地^[11,12]。虽然微塑料为惰性材料,但其所含(表面吸附和内载固有)的污染物(持久性有机污染物和增塑剂等)可以作为微生物的生长碳源^[15],微生物可能更倾向于生活在微塑料表面。此外,不同性质的塑料和塑料中添加剂(在制造过程中有意添加以提高材料性能的化合物)的数量和组成都会影响微塑料表面微生物的物种组成^[33]。但这些微生物主要来源于微塑料所处的周围环境,因此环境因子的差异会直接影响微塑料表面微生物群落。在贵屿镇调研的由3种不同拆解方式所导致的电子废物污染场地具有不同的土壤环境因素,这些因素与微塑料表面微生物的相关性也存在差异。为了适应不同的微塑料特性及其周围的生态环境,这些微生物已经进化出很多的依附机制^[33]。此外,拆解场地中存在大量的疏水性有机污染物,而这些污染物在微塑料和土壤之间的传输可能会受到微生物的影响,一方面是由于微生物的吸附特性,另一方面是因为其具有代谢污染物的能力^[34]。许多细菌、真菌和藻类都有降解有机污染物的能力^[35],这也证明了微生物对塑料相关化学物质的积累和/或通过代谢去除具有很高的相关性,并且可能会影响微塑料的生物可利用性。由于环境因素、材料和生物表面特性都会对微生物附着在微塑

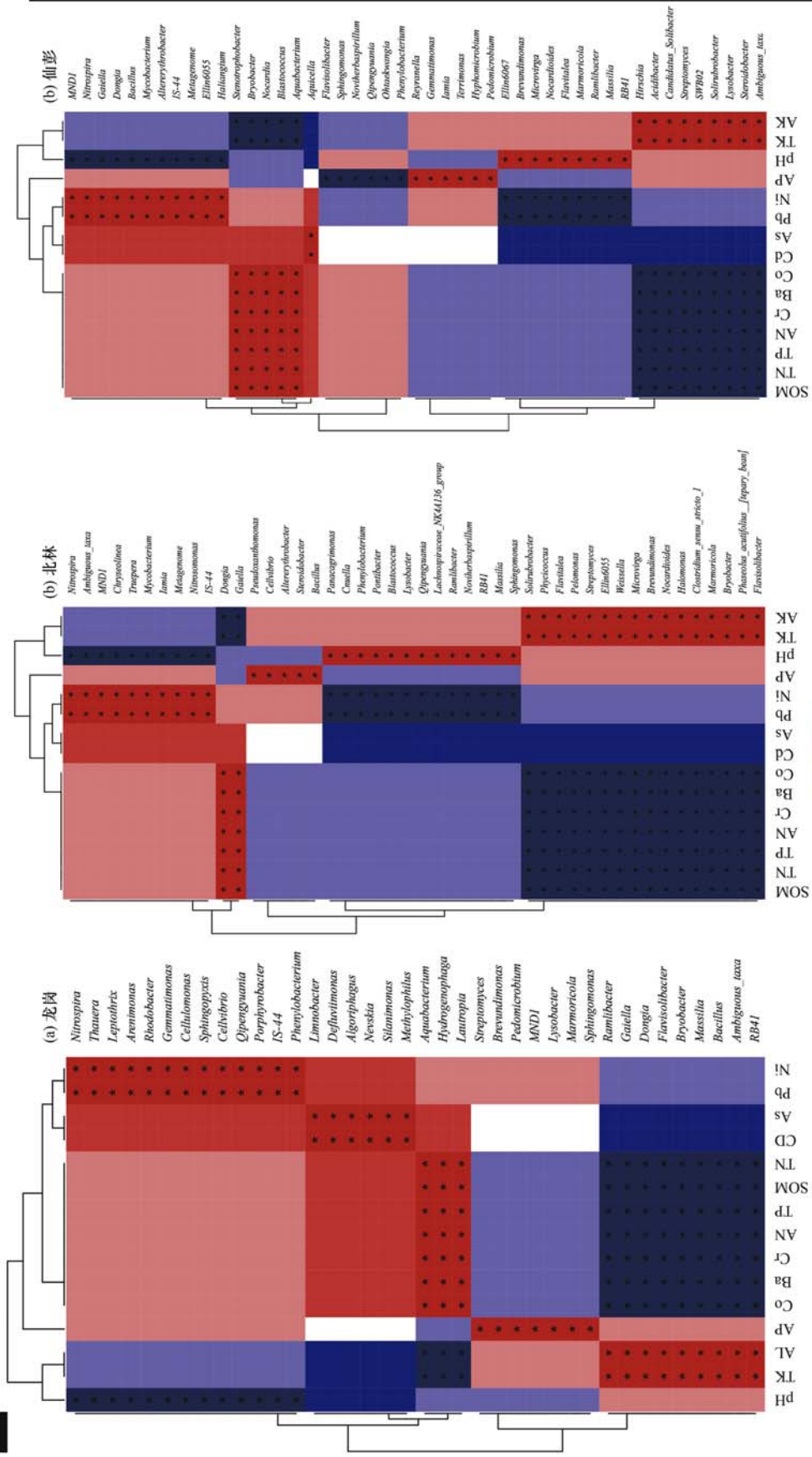


图 5 3块样地微塑料表面细菌群落平均丰度前50的属与土壤环境因子的相关性热图

Fig.5 Heat map of correlations between the top 50 microplastic-associated bacterial genera and environmental factors in three plots

料表面造成影响,任何栖息在微塑料表面的微生物都是选择过程的结果. 影响微塑料表面的群落及其决定群落结构和演替模式的潜在因素是亟待解决的科学问题.

微生物不仅是构成土壤生态系统的重要组成部分,也是环境塑料生物修复最有希望的候选者. 然而,大多数普通塑料被证明是非常顽固的,即使在已知有利于微生物降解的条件下. 此外,一旦塑料进入了土壤环境中将会持久存在. 不仅如此,微塑料作为具有疏水表面的外源性颗粒,极有可能为异养微生物活性提供新的底物,使其表面微生物群落与周围环境和其他有机残留物明显不同^[36~38]. 总之,微塑料研究所面临的挑战是考虑在不同环境条件下,不同种类微塑料与附着在其表面微生物的之间的相互作用,从而为微塑料对土壤环境的影响提供科学的风险评估.

4 结论

(1) 贵屿镇电子废物拆解区土壤微塑料表面具有老化和降解的迹象,且存在多种金属元素;但在同一微塑料样品的不同表面位置,金属元素类型存在较大差异.

(2) 微塑料固有的重金属含量在不同样地中有所不同,且几乎均高于周围土壤.

(3) Ba 在塑料中主要以 BaSO₄ 的形式存在,其含量比在土壤中高出 10³ 数量级.

(4) 在不同的样地中,微塑料表面细菌群落与土壤环境因子之间的相关性有所差异.

参考文献:

- [1] 骆永明,周倩,章海波,等. 重视土壤中微塑料污染研究 防范生态与食物链风险[J]. 中国科学院院刊, 2018, **33**(10): 1021-1030.
- Luo Y M, Zhou Q, Zhang H B, *et al.* Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2018, **33**(10): 1021-1030.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 罗雅丹,林千惠,贾芳丽,等. 青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2631-2638.
- Luo Y D, Lin Q H, Jia F L, *et al.* Distribution characteristics of microplastics in Qingdao coastal beaches [J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2631-2638.
- [5] Rillig M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(12): 6453-6454.
- [6] de Souza Machado A A, Kloas W, Zarfl C, *et al.* Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. Global Change Biology, 2018, **24**(4): 1405-1416.
- [7] Bläsing M, Amelung W. Plastics in soil: analytical methods and possible sources[J]. Science of the Total Environment, 2018, **612**: 422-435.
- [8] Horton A A, Walton A, Spurgeon D J, *et al.* Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities[J]. Science of the Total Environment, 2017, **586**: 127-141.
- [9] Wong J K H, Lee K K, Tang K H D, *et al.* Microplastics in the freshwater and terrestrial environments: prevalence, fates, impacts and sustainable solutions [J]. Science of the Total Environment, 2020, **719**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137512.
- [10] Song Q B, Li J H. Environmental effects of heavy metals derived from the e-waste recycling activities in China: a systematic review [J]. Waste Management, 2014, **34**(12): 2587-2594.
- [11] Zettler E R, Mincer T J, Amaral-Zettler L A. Life in the "Plastisphere": microbial communities on plastic marine debris [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(13): 7137-7146.
- [12] Amaral-Zettler L A, Zettler E R, Slikas B, *et al.* The biogeography of the Plastisphere: implications for policy [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2015, **13**(10): 541-546.
- [13] de Tender C A, Devriese L I, Haegeman A, *et al.* Bacterial community profiling of plastic litter in the Belgian part of the North Sea[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(16): 9629-9638.
- [14] Zhang M J, Zhao Y R, Qin X, *et al.* Microplastics from mulching film is a distinct habitat for bacteria in farmland soil [J]. Science of the Total Environment, 2019, **688**: 470-478.
- [15] Chai B W, Li X, Liu H, *et al.* Bacterial communities on soil microplastic at Guiyu, an E-Waste dismantling zone of China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, **195**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110521.
- [16] Xu P J, Tao B, Zhou Z G, *et al.* Occurrence, composition, source, and regional distribution of halogenated flame retardants and polybrominated dibenzo-*p*-dioxin/dibenzofuran in the soils of Guiyu, China[J]. Environmental Pollution, 2017, **228**: 61-71.
- [17] Wang J D, Peng J P, Tan Z, *et al.* Microplastics in the surface sediments from the Beijiang River littoral zone: composition, abundance, surface textures and interaction with heavy metals [J]. Chemosphere, 2017, **171**: 248-258.
- [18] 柴炳文. 氮沉降和生物质炭添加对香榧林地土壤微生物的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018. 14-15.
- Chai B W. Effects of soil microbial under nitrogen deposition and biochar amendment in a torrefied grandis orchard[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2018. 14-15.
- [19] Caporaso J G, Kuczynski J, Stombaugh J, *et al.* QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data [J]. Nature Methods, 2010, **7**(5): 335-336.
- [20] Holmes L A, Turner A, Thompson R C. Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment [J]. Environmental Pollution, 2012, **160**: 42-48.

- [21] Brennecke D, Duarte B, Paiva F, *et al.* Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, **178**: 189-195.
- [22] Godoy V, Blázquez G, Calero M, *et al.* The potential of microplastics as carriers of metals[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**(3), doi: 10.1016/j.envpol.2019.113363.
- [23] Massos A, Turner A. Cadmium, lead and bromine in beached microplastics[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **227**: 139-145.
- [24] Turner A, Holmes L A. Adsorption of trace metals by microplastic pellets in fresh water[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **12**(5): 600-610.
- [25] Fotopoulou K N, Karapanagioti H K. Surface properties of beached plastic pellets[J]. *Marine Environmental Research*, 2012, **81**: 70-77.
- [26] Rochman C M, Hentschel B T, Teh S J. Long-term sorption of metals is similar among plastic types: implications for plastic debris in aquatic environments[J]. *PLoS One*, 2014, **9**(1), doi: 10.1371/journal.pone.0085433.
- [27] Fahrenfeld N L, Arbuckle-Keil G, Beni N N, *et al.* Source tracking microplastics in the freshwater environment[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2019, **112**: 248-254.
- [28] Dobaradaran S, Schmidt T C, Nabipour I, *et al.* Characterization of plastic debris and association of metals with microplastics in coastline sediment along the Persian Gulf [J]. *Waste Management*, 2018, **78**: 649-658.
- [29] Zhou Y F, Liu X N, Wang J. Characterization of microplastics and the association of heavy metals with microplastics in suburban soil of central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **694**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133798.
- [30] Li L Z, Luo Y M, Li R J, *et al.* Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode[J]. *Nature Sustainability*, 2020, doi: 10.1038/s41893-020-0567-9.
- [31] Bakir A, Rowland S J, Thompson R C. Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **185**: 16-23.
- [32] Wang J D, Tan Z, Peng J P, *et al.* The behaviors of microplastics in the marine environment [J]. *Marine Environmental Research*, 2016, **113**: 7-17.
- [33] Rummel C D, Jahnke A, Gorokhova E, *et al.* Impacts of biofilm formation on the fate and potential effects of microplastic in the aquatic environment[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2017, **4**(7): 258-267.
- [34] Ding H X, Li Y, Hou J, *et al.* Sorption behavior and modeling of endocrine-disrupting chemicals on natural sediments: role of biofilm covered on surface [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(2): 1380-1388.
- [35] Ghosal D, Ghosh S, Dutta T K, *et al.* Current state of knowledge in microbial degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): a review[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, **7**, doi: 10.3389/fmicb.2016.01369.
- [36] McCormick A, Hoellein T J, Mason S A, *et al.* Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(20): 11863-11871.
- [37] Dussud C, Meistertzheim A L, Conan P, *et al.* Evidence of niche partitioning among bacteria living on plastics, organic particles and surrounding seawaters [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **236**: 807-816.
- [38] Jiang P L, Zhao S Y, Zhu L X, *et al.* Microplastic-associated bacterial assemblages in the intertidal zone of the Yangtze Estuary [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **624**: 48-54.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polymers to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)