

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



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

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, 周崑, 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	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (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, 严仁娣, 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估	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估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (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, 郭道宇 (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, 国森, 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估	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, 吴铭彬, 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估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-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, 张峰, 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估	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榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 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, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 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)

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*

(华侨大学化工学院, 厦门 361021)

摘要: 本文分析了福建九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料的丰度及形态特征, 并探讨了其主要来源。结果表明, 九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料丰度范围(干沉积物)为 $640 \sim 1\,140 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $935 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与国内其他红树林区相比处于中等水平; 通过显微镜观察微塑料形态有颗粒状(39%)、碎片状(31%)和纤维状(30%); 颜色主要以透明为主(55%); 粒径以 $< 1 \text{ mm}$ 为主(92%); 用拉曼光谱鉴定出微塑料聚合物类型主要为聚乙烯、聚对苯二甲酸乙二酯和聚丙烯, 分别占 57%、34% 和 9%; 微塑料的来源主要是附近水产养殖产生的塑料废弃物、流域内的城镇及农村生活或工业废水和通过潮汐作用被运输至此的塑料垃圾; 扫描电镜-能谱分析发现, 微塑料表面具有凹陷、多孔和撕裂的特征, 并附着 Pb、Cd、Hg、Cr、Fe、Mn、Zn 和 Cu 等重金属元素。微塑料可能作为重金属的载体转移至沉积物中对湿地生态安全构成潜在威胁。

关键词: 九龙江口; 红树林湿地; 表层沉积物; 微塑料; 形态特征; 重金属

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0239-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104162

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, LIN Hui-rong, HU Gong-ren, YU Rui-lian*

(College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The abundance and morphological characteristics of microplastics in the surface sediments of mangrove wetlands in the Jiulong River estuary were analyzed. The main sources of microplastics were also explored in detail. The results showed that the abundance of microplastics ranged from 640 to $1\,140 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ (dry sediment), with an average of $935 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, exhibiting a medium level compared with other domestic and abroad mangrove areas. The microscopic observation found that the microplastics were granular (39%), fragmented (31%), and fibrous (30%); the color was mainly transparent (55%); and the particle size was less than 1 mm (92%). As observed via Raman spectroscopy, the main polymer types of the microplastics were identified to be polyethylene, polyethylene terephthalate, and polypropylene, accounting for 57%, 34%, and 9%, respectively. The main sources of microplastics were the plastic waste from aquaculture nearby, urban and rural domestic or industrial wastewater in the basin, and the plastic waste transported here by the tide. Additionally, SEM-EDS results showed that the surface of the microplastics had the characteristics of depression, porosity, and tearing, and some heavy metal elements such as Pb, Cd, Hg, Cr, Fe, Mn, Zn, and Cu were attached to the microplastics. Microplastics may be transferred to the sediments as carriers of heavy metals, posing a potential threat to wetland ecological security.

Key words: Jiulong River estuary; mangrove wetland; surface sediments; microplastics; morphological characteristics; heavy metals

微塑料(粒径 $< 5 \text{ mm}$)作为一种新型污染物,具有持久性、难降解和稳定性等化学特性,近年来受到广泛关注。进入水环境中的微塑料可被水生动物和水鸟误食,导致肠道堵塞和激素水平改变,甚至窒息死亡^[1]。由于环境中的微塑料疏水性强,比表面积大,可作为元素的载体而在水环境中运输和迁移^[2]。微塑料可改变水环境中重金属的生物有效性^[3],影响水生动物蛋白质合成、储能和生物转化等生理过程 and 变化^[4]。因此,微塑料污染问题备受关注。

红树林湿地是介于海洋和陆地环境之间独特的沿海过渡生态系统,具有丰富的生物多样性,在生态系统中发挥着重要作用^[5]。红树林湿地的特殊沉积环境可以促进富含营养物质、金属元素和矿物质的高表面积细小颗粒物和微塑料颗粒的沉积^[6],与一般潮滩相比,更易积累来自潮水和河流的污染物,

其沉积物是微塑料和重金属污染物重要的汇^[7]。位于福建省九龙江入海口滩涂潮间带的红树林省级自然保护区是以保护红树林生态系统和濒危动物物种为主的湿地类型自然保护区,也是福建省内面积最大、种类最多和生长最好的红树林分布区。目前学者主要集中于对九龙江口表层沉积物中重金属的分布特征及来源进行研究^[8,9],而在微塑料污染方面尚缺乏系统的研究。因此,本文开展了九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料的丰度、类型、分布特征、形貌特征和表面附着重金属情况的研究,以期近海沉积物中微塑料污染防控提供基础数据和科学依据。

收稿日期: 2021-05-19; 修订日期: 2021-07-12

作者简介: 刘倡君(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为湿地沉积物微塑料与重金属复合污染, E-mail: 735894695@qq.com

* 通信作者, E-mail: ruihany@hqu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 样品采集及预处理

研究区域为九龙江口红树林湿地省级自然保护区,选取红树林湿地近岸端有明显排水沟的 A、B、C、D、E、F 和 G 这 7 个位置,当潮水退至最低时,沿着这些排水沟纵向深入红树林湿地约 200 ~ 300 m 用木铲进行采样,每隔约 50 ~ 100 m 采集一个表层沉积物样品(在 5 m × 5 m 范围内多点采集 0 ~ 5 cm 的混合样),沿同条排水沟由岸向海的采样点分别记为 X1、X2、X3...,其中 X 表示 A ~ G. 同时在 A、B、C、D、E、F 和 G 间隔位置(离排水沟相对较远)分别采集一个表层沉积物样品作对比,记为 J1、J2、J3、J4、J5、J6、J7、J8 和 J9. 采样点位置如图 1 所示,共采集 31 个表层沉积物样品. 采集的样品运回实验室,置于避光处自然风干,待沉积物半干后,将其放入烘箱,45℃ 烘干 24 h.

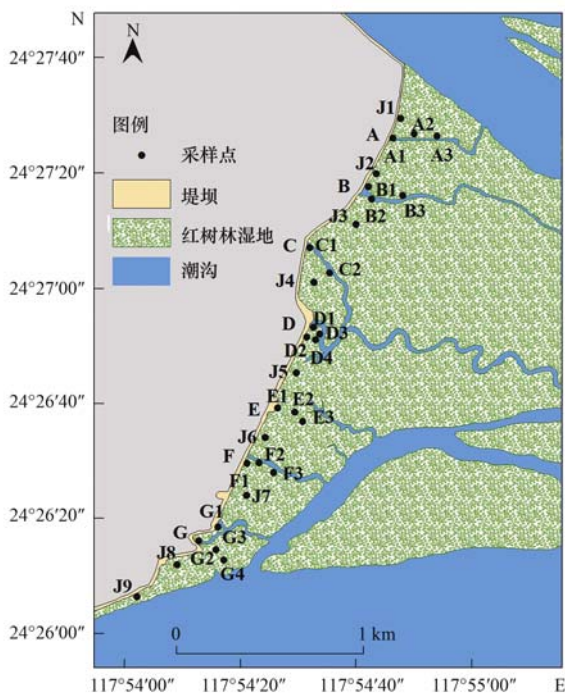


图 1 九龙江口红树林湿地表层沉积物采样

Fig. 1 Sampling locations of surface sediments in mangrove wetlands in the Jiulong River estuary

1.2 微塑料的分离与表征

基于 Thompson 等^[10]密度分离方法,本研究选用饱和氯化钠溶液作为浮选液将微塑料和沉积物颗粒分离,并利用双氧水消除有机质的影响^[11].

在显微镜(Olympus SZ61, 日本)下初步识别微塑料样品,按形状可分为颗粒、碎片和纤维状,按颜色可分为透明(半透明的也归入此类)、黑、蓝(包括深蓝和浅蓝色)、红(紫色和粉红色也归入此类)和绿色.

用显微拉曼光谱仪(Renishaw inVia Vi, 英国)鉴定微塑料聚合物类型,仪器配备 785 nm 的激光器,扫描光谱范围 100 ~ 3 200 cm⁻¹,每个样品在相同条件下重复扫描 3 次,每次扫描位置随机切换以保证结果的准确性.

使用配备了 EDS 能谱仪的场发射扫描电子显微镜对鉴定后的微塑料样品做进一步分析. 将微塑料样品粘在导电胶上,为获得更好的形态特征效果图,先对其喷铂粉处理再置于扫描电镜(Hitachi S4800, 日本)下观察,并启用 EDS 能谱仪(X-Act, Oxford, 英国)得到微塑料表面元素组成谱图.

1.3 数据处理

运用 Excel 2019 对微塑料的形貌、颜色、大小和类型进行统计,运用 ArcGIS 10.7 和 Excel 2019 整理绘图.

2 结果与讨论

2.1 微塑料丰度及分布特征

九龙江口表层沉积物微塑料丰度范围(干沉积物)为 640 ~ 1 140 n·kg⁻¹,平均值为 935 n·kg⁻¹;总体上,各点位微塑料丰度差异不大,并且沿同条排水沟由岸向海的采样点微塑料丰度并无递增或递减的规律,这说明潮汐作用能将微塑料较均匀地分布在研究区表层沉积物中.

九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料丰度与国内外其它地区红树林湿地沉积物中微塑料丰度相比(见表 1),低于广东福田红树林^[12],与晋江河口红树林^[13]、广东湛江红树林^[12]和海南东方红树林^[12]等地区处于相近水平,高于钦州湾红树林区^[14]、新加坡红树林^[15]、海南东寨港红树林^[12]、福建云霄红树林^[12]和广西防城港红树林^[12],这可能与各地区人类活动影响不同有关. 九龙江口红树林保护区位于九龙江与厦门湾交汇的入海口,在红树林的周边有大量水产养殖塘,人为活动影响较大.

表 1 国内外红树林沉积物中微塑料丰度调查结果统计

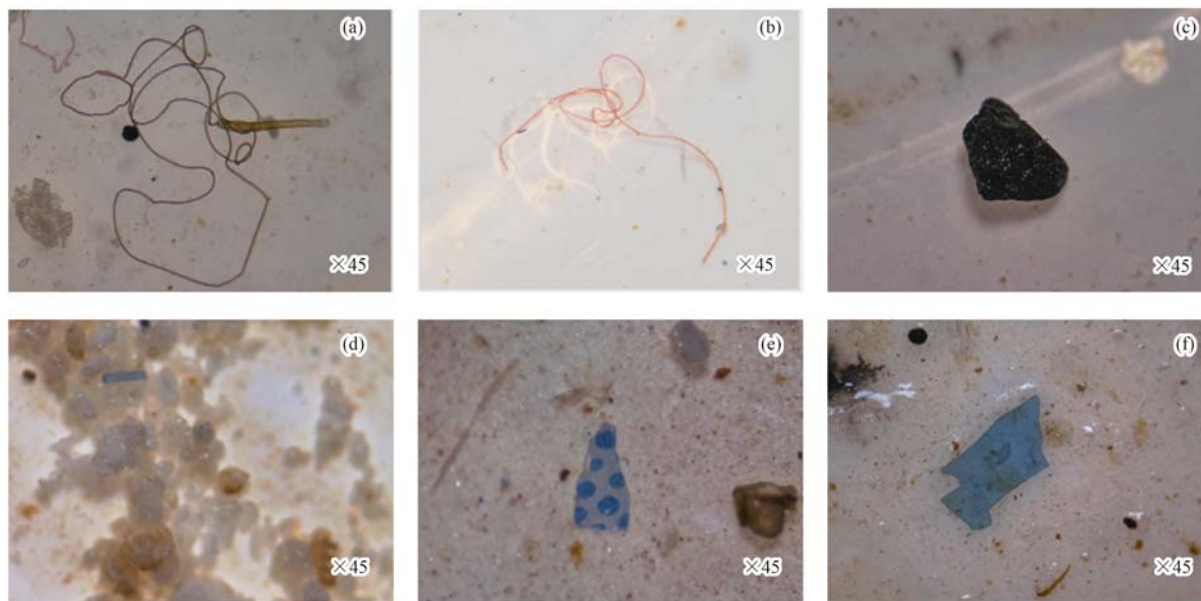
Table 1 Abundance of microplastics in mangrove sediments both domestic and abroad

调查区域	微塑料丰度/n·kg ⁻¹	文献
九龙江口红树林	640 ~ 1 140	本研究
广东福田红树林	2 249 ± 747	[12]
晋江河口红树林	980 ~ 2 340	[13]
广东湛江红树林	736 ± 269	[12]
海南东方红树林	649	[12]
中国钦州湾红树林	15 ~ 12 852	[14]
新加坡沿海红树林	36.8 ± 23.6	[15]
海南东寨港红树林	431	[12]
福建云霄红树林	424	[12]
广西防城港红树林	227 ± 173	[12]

并且九龙江流域人口分布较密集,流域内的工农业生产和居民生活会将大量微塑料排入九龙江,这些微塑料随江水下泄可能部分被截留在红树林湿地沉积物中导致该区域微塑料丰度较其它海滩地区偏高.另外,来自厦门湾周边排放及外海漂来的塑料垃圾也可能对本地区的微塑料丰度有所贡献.

2.2 微塑料的形态特征、主要成分及来源解析

微塑料形状主要为纤维、颗粒和碎片状(图2).纤维类主要呈细长线型或两头有卷须,颜色多为透明和彩色[图2(a)和2(b)].颗粒类多为无规则的颗粒,质地轻且较硬,颜色以透明、黑色为主[图2(c)和2(d)].碎片类多为块状或条状的一些塑料碎片,主要以透明和彩色为主[图2(e)和2(f)].



(a) 黑色纤维; (b) 红色纤维; (c) 黑色颗粒; (d) 透明颗粒; (e) 彩色碎片; (f) 蓝色碎片

图2 沉积物中微塑料的表面形貌特征

Fig. 2 Surface morphology of microplastics in sediments

研究区表层沉积物中微塑料的粒径分布情况见图3.按照粒径将研究区微塑料划分为3个范围: <0.05 、 $0.05 \sim 1$ 和 $1 \sim 2$ mm.总体而言,研究区表层沉积物中微塑料主要以粒径 <0.05 mm的为主,占总比例的55%;粒径为 $0.05 \sim 1$ mm占比为37%;而粒径为 $1 \sim 2$ mm的仅占8% [图3(a)]. A~G采样点位粒径 <0.05 mm的微塑料占

比均高于50%,但多数间隔点位(除J7和J9之外)粒径 <0.05 mm的微塑料占比均低于50%;与A~G采样点位相比,各间隔点位粒径为 $0.05 \sim 1$ mm的微塑料占比相对较大(除J7和J9之外,其余间隔点位均高于50%);各采样点位粒径为 $1 \sim 2$ mm的微塑料占比均较小,且差别不大[图3(b)].

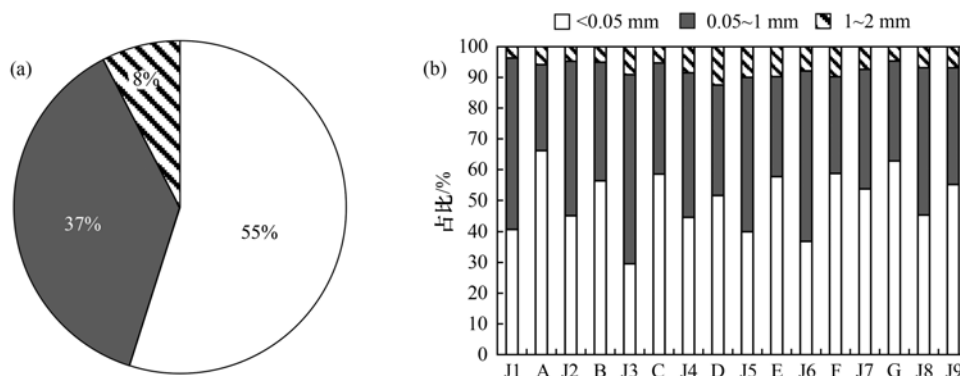


图3 研究区微塑料的粒径特征

Fig. 3 Particle size characteristics of microplastics in the study area

本研究中粒径 <0.05 mm的微塑料所占比例高达55%,与牡蛎体内微塑料粒径较相似^[16].由于小

尺寸的彩色微塑料与浮游动物的相似性,这类微塑料在进入水体后会产生一定程度的视觉混乱,容易

被水生生物或鸟类吃掉,并通过食物链或食物网向高等生物迁移或富集.

研究区表层沉积物中微塑料的颜色分布情况见图4. 总体而言,主要以透明为主,占总比的55%,黑色和蓝色占比接近,分别占比18%和17%,红色和绿色占比最小,分别占比6%和4%[图4(a)]. 各采

样点位透明微塑料占比多数高于50% (除A、D和E之外),并且占比接近[图4(b)]. 微塑料颜色多样的原因是,在塑料生产过程中经常添加粒径小于5 μm 的颜料分子作为着色剂,而且着色剂大多与树脂机械结合,在塑料老化过程中,树脂很容易从内部移走并浮到表面,形成新的污染^[17].

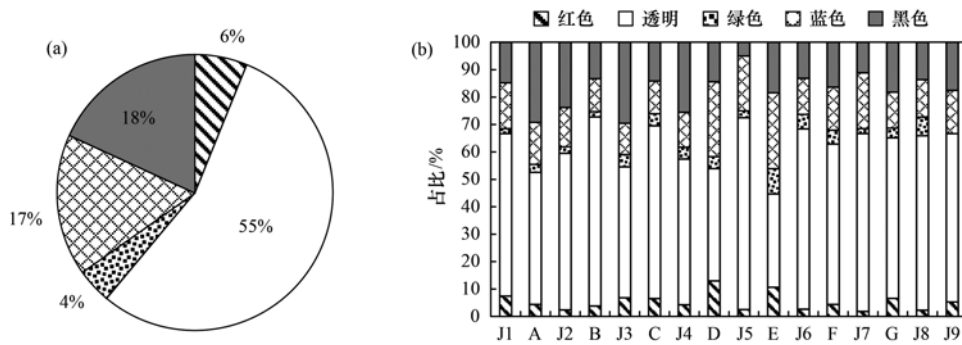


图4 研究区微塑料的颜色特征

Fig. 4 Color characteristics of microplastics in the study area

研究区不同形状微塑料占比情况见图5. 总体而言,主要以颗粒状为主,占比39%,纤维状和碎片状占比接近,分别为30%和31%[图5(a)]. 颗粒状占比较大的点位为A点和间隔点J1、J2和

J3,占比均大于50%;碎片状占比较大的点为间隔点J4和J5,占比接近或超过50%;纤维类占比较大的点为D点和间隔点J7,占比接近50%[图5(b)].

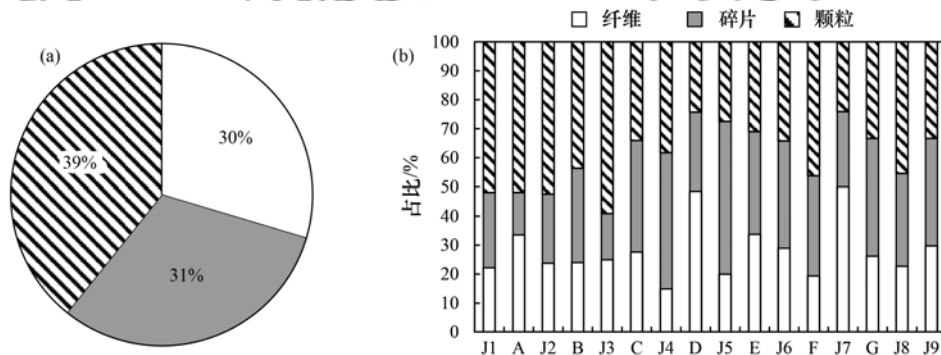


图5 研究区微塑料的形状特征

Fig. 5 Shape characteristics of microplastics in the study area

通过拉曼光谱仪鉴定分析,浮选分离出来的微塑料主要包括3种聚合物类型:聚乙烯(PE)、聚对苯二甲酸乙二酯(PET)和聚丙烯(PP),占比情况见

图6,总体而言,主要以PE为主,占比为57%,PET和PP占比分别为34%和9%[图6(a)]. 除D点外,各点PE类型微塑料占比均高于50%;D点PET

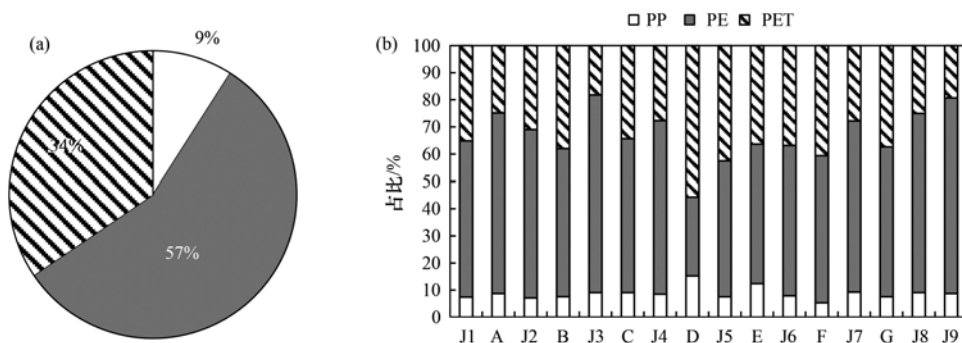


图6 研究区不同聚合物微塑料比例

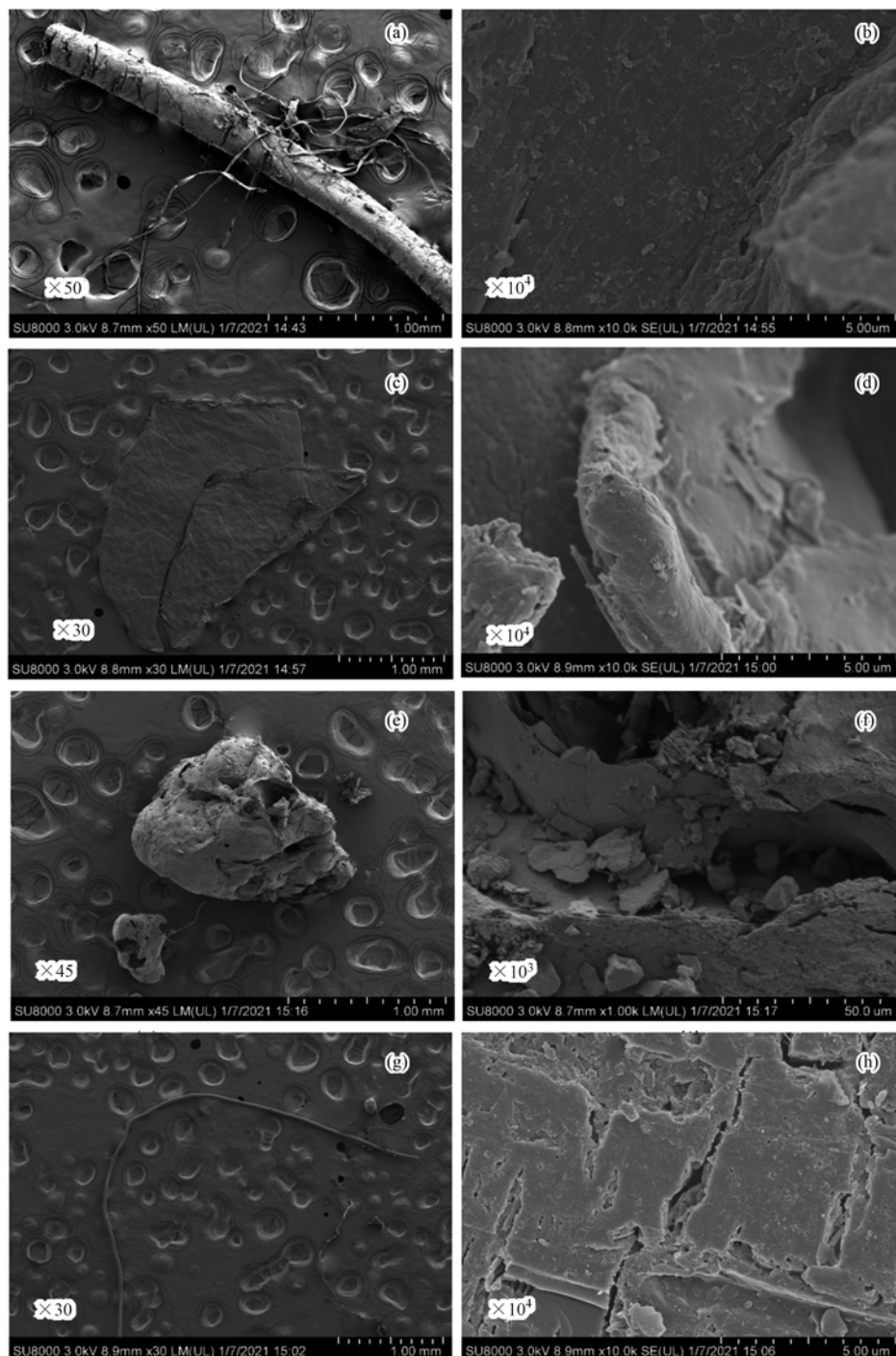
Fig. 6 Different proportions of polymer microplastics in the study area

占比超过 50%, 其余点均小于 50%, 且差别不大; 各点 PP 占比最小, 且占比接近 [图 6(b)]。

本研究几类塑料来源主要有以下 3 个方面。

①红树林湿地附近有多家水产养殖厂, 养殖塘周围有大量塑料桶、废弃塑料薄膜、塑料瓶和饲料包装袋。Li 等^[14]对钦州湾红树林沉积物中微塑料的研究表明, 微塑料主要来源于水产养殖, 聚合物类型以

PE 为主, PE 被广泛应用于水产养殖, 如编织袋和渔网等。由此可以推断水产养殖的废弃物也可能是九龙江口红树林湿地微塑料的一个重要来源。②除了聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP), 还有部分丝状纤维, 经鉴定它们主要为 PET, 由于红树林地处乡镇附近, 大量生活污水直接排入入海排洪渠中; 在九龙江沿岸有大量排污水沟及多个污水处理厂, 微塑料可随这



(a) 和 (b) 为细长形塑料纤维, (c) 和 (d) 为碎片状微塑料, (e) 和 (f) 为颗粒状微塑料, (g) 和 (h) 为丝状的圆形塑料纤维; 每横排为同一微塑料, 放大倍数不同

图 7 扫描电镜下微塑料表面特征

Fig. 7 Surface characteristics of microplastics under scanning electron microscope

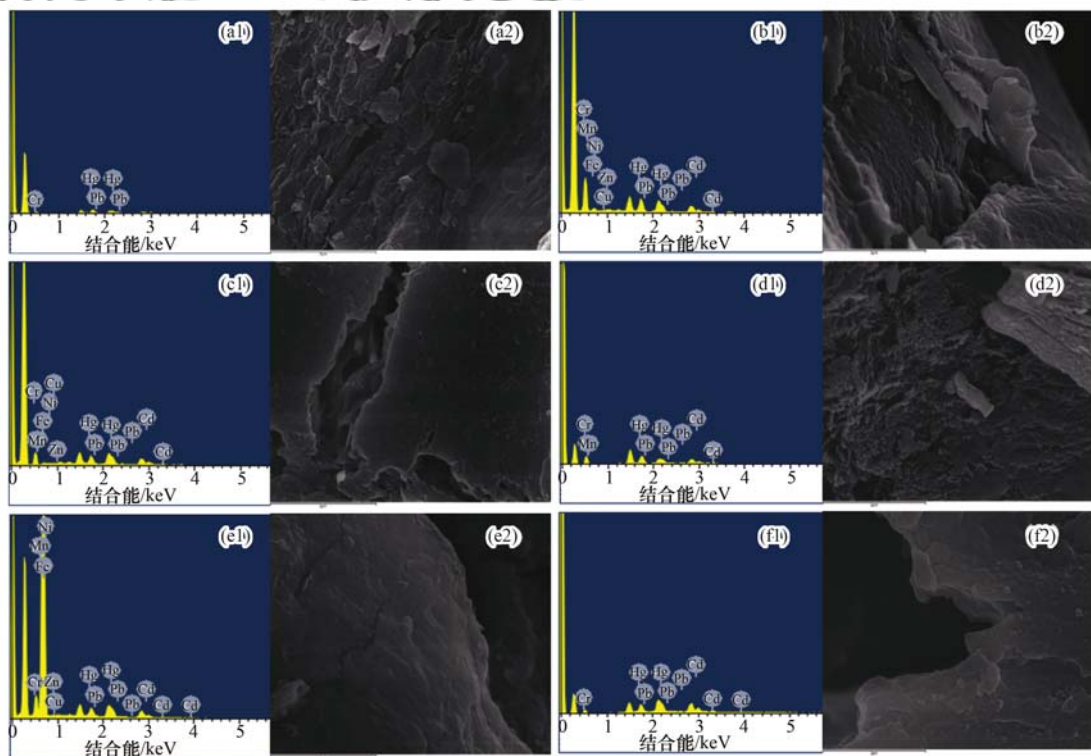
类废水通过排水系统汇入九龙江,经过九龙江口流入台湾海峡. Peng 等^[18]通过对长江河口微塑料的研究发现,微塑料主要来源于衣物清洗. 其次,湿地沉积物中纤维类微塑料占比仅次于颗粒状,部分在显微镜下的形貌特征为很明显的丝状物,这也证明了纤维类微塑料的主要来源是衣物纤维. ③在红树林湿地近岸处,有大量塑料垃圾堆积,这些塑料垃圾的来源可能是通过洋流和潮汐作用将海洋中的塑料垃圾输送到此,这些塑料在强烈的紫外线或波浪潮汐力和自然环境的风化作用下极易破碎分解成微塑料^[19]. 各点位微塑料形状、大小、颜色和类型具有差异,其主要原因是流经不同点位附近的排水沟水流的来源不同,有的直接来自养殖塘排水;有的可能来自城镇及农村生活或工业废水,而这些不同的入海排水会携带不同类型的微塑料.

2.3 微塑料的表面特征和对重金属的吸附作用

用扫描电镜观察从红树林湿地沉积物中浮选分离出来的微塑料,部分样品典型表面特征如图 7 所示. 结果显示,九龙江口红树林沉积物中分离出来的微塑料经历了不同程度的机械侵蚀和化学风化,有明显的裂纹、裂缝、褶皱、凹陷或凸起等老化现象,这些复杂的形貌特征主要是由于受到紫外线辐射、机械磨损和化学风化等作用造成的. 因为环境中的微塑料,特别是表层沉积物中的微塑料,对氧气的利

用率较高和直接暴露在阳光下并且更容易与其它固体颗粒发生碰撞,因此会加速老化. 本研究的结果与邓俊^[13]对晋江河口、Wang 等^[20]对北江河沿岸和李文华等^[21]对鄱阳湖湖口-长江段土壤或沉积物中微塑料表面形貌特征的研究结果一致.

针对 9 种重金属(Pb、Cd、Hg、Cr、Fe、Mn、Zn 和 Cu)进行了 EDS 分析,微塑料样品表面元素组成结果如图 8 所示. 不同微塑料样品表面元素组成差别较大,但均检测到一定量的重金属元素,这表明不同类型的微塑料对重金属元素的亲和力不同. 另外,从能谱图中还可以发现,在微塑料表面有凹陷、裂缝或有裂丝状处其表面元素组成更多样化,且更容易检测到重金属元素,说明老化后的微塑料更易吸附重金属. 这是由于沉积物中微塑料样品表面具有裂纹、凹陷、断裂、褶皱等特点,导致微塑料的比表面积增大,从而增加其吸附重金属的能力. Holmes 等^[22]对河口环境中微塑料中的 Cd、Co、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 进行了检测,发现微塑料在环境中的吸附容量大于实验室环境. 在塑料生产过程中通常会添加一些金属离子作为催化剂、颜料或稳定剂^[23,24]. Decho^[25]的研究发现,微塑料表面形成的生物膜也会影响金属在塑料上的积累. Ashton 等^[26]的研究提出,金属阳离子或金属配合物能与微塑料表面的带电中心或中性区相互作用,并与水合氧化物



电镜图为扫描区域图

图 8 扫描电镜-能谱仪分析微塑料表面元素组成

Fig. 8 Result of surface element composition of microplastics by SEM-EDS

沉淀或吸附。所以,微塑料与重金属复合污染不容小觑,微塑料可以作重金属污染的载体并对动物和人类有潜在生态风险性。

3 结论

(1)九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料的丰度范围(干沉积物)为 $640 \sim 1\,140 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $935 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。形状主要以颗粒状为主(39%);其聚合物类型为 PE、PET 和 PP,其中以 PE 为主(57%);大小主要以小型($<1 \text{ mm}$, 92%)为主;其颜色以透明微塑料居多(55%)。附近的水产养殖可能是微塑料的重要来源之一,部分 PE 和 PP 的颗粒和碎片也可能来源于生活中的塑料包装制品,此外,在海流和潮汐作用下,海洋中的塑料垃圾有可能被汇集至此,并且在环境作用下被破碎分解成微塑料。

(2)九龙江口红树林表层沉积物中的微塑料受到了不同程度的机械侵蚀或化学风化,出现凹陷、断裂和裂缝等特点;其表面吸附有 Pb、Cd、Hg、Cr、Fe、Mn、Zn 和 Cu 等重金属元素,在微塑料表面有凹陷、裂缝处更容易检测到重金属元素,并且表面元素组成更多样化,说明老化后的微塑料更容易吸附重金属。微塑料表面吸附重金属类型差异性较大,说明不同微塑料对重金属的亲合力不同。微塑料与重金属复合污染不可轻视,微塑料可作为重金属的载体通过食物链或食物网转移到更高级的动物体中,具有潜在生态风险。

参考文献:

- [1] Zhao S Y, Zhu L X, Wang T, *et al.* Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: first observations on occurrence, distribution [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **86**(1-2): 562-568.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Karami A, Romano N, Galloway T, *et al.* Virgin microplastics cause toxicity and modulate the impacts of phenanthrene on biomarker responses in African catfish (*Clarias gariepinus*) [J]. *Environmental Research*, 2016, **151**: 58-70.
- [5] Mcleod E, Chmura G L, Bouillon S, *et al.* A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO_2 [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, **9**(10): 552-560.
- [6] Alongi D M. Present state and future of the world's mangrove forests [J]. *Environmental Conservation*, 2002, **29**(3): 331-349.
- [7] Prasad M B K, Ramanathan A L. Sedimentary nutrient dynamics in a tropical estuarine mangrove ecosystem [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, **80**(1): 60-66.
- [8] 林承奇, 陈枫桦, 胡恭任, 等. 基于 PMF 模型解析九龙江河口表层沉积物重金属来源 [J]. *地球与环境*, 2020, **48**(4): 443-451.
- [9] 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 九龙江近岸表层沉积物重金属污染评价及来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(4): 1218-1225.
- [10] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, *et al.* Lost at sea: where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, **304**: 838.
- [11] 熊宽旭, 赵新月, 周倩, 等. 黄海桑沟湾水体及沉积物中微塑料污染特征研究 [J]. *海洋环境科学*, 2019, **38**(2): 198-204, 220.
- [12] Xiong K X, Zhao X Y, Zhou Q, *et al.* The pollution characteristics of microplastics in the water and sediments of Sanggou bay in the Yellow Sea [J]. *Marine Environmental Science*, 2019, **38**(2): 198-204, 220.
- [13] Li R L, Yu L Y, Chai M W, *et al.* The distribution, characteristics and ecological risks of microplastics in the mangroves of Southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **708**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135025.
- [14] 邓俊. 晋江河口红树林恢复工程对土壤重金属和微塑料的影响 [D]. 泉州: 华侨大学, 2019. 57-58.
- [15] Deng J. Effects of mangrove wetland restoration on the heavy metals and microplastics of soils in Jinjiang estuary [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2019. 57-58.
- [16] Li J, Zhang H, Zhang K N, *et al.* Characterization, source, and retention of microplastic in sandy beaches and mangrove wetlands of the Qinzhou Bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **136**: 401-406.
- [17] Nor N H M, Obbard J P. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **79**(1-2): 278-283.
- [18] 冉文. 黄渤海沉积物和牡蛎体内微塑料污染现状研究 [D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2018. 16-20.
- [19] Ran W. Research on the status of microplastics pollution in sediments and oysters in the Bohai Sea and the Yellow Sea [D]. Yantai: Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, 2018. 16-20.
- [20] Sahin S, Yayla P. Effects of testing parameters on the mechanical properties of polypropylene random copolymer [J]. *Polymer Testing*, 2005, **24**(5): 613-619.
- [21] Peng G Y, Zhu B S, Yang D Q, *et al.* Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **225**: 283-290.
- [22] 左书华, 庞启秀, 杨华, 等. 海州湾海域悬沙分布特征及运动规律分析 [J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2013, **32**(1): 10-17.
- [23] Zuo S H, Pang Q X, Yang H, *et al.* Analysis on the distribution and movement of suspended sediment in Haizhou Bay Sea Area [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2013, **32**(1): 10-17.
- [24] 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.
- [21] 李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 等. 鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 242-252.
- Li W H, Jian M F, Liu S L, *et al.* Occurrence relationship between microplastics and heavy metals pollutants in the estuarine sediments of Poyang Lake and the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 242-252.
- [22] 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.
- [23] Becker M, Edwards S, Massey R I. Toxic chemicals in toys and children's products: limitations of current responses and recommendations for government and industry[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(21): 7986-7991.
- [24] 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.
- [25] Decho A W. Microbial biofilms in intertidal systems; an overview [J]. *Continental Shelf Research*, 2000, **20**(10-11): 1257-1273.
- [26] Ashton K, Holmes L, Turner A. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **60**(11): 2050-2055.



CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos 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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (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	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (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-jiang, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (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, <i>et al.</i> (569)