

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	《环境科学》征稿简则(4303)
信息	(4506, 4678, 4741)

微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展

张龙飞^{1,2}, 刘玉环^{1,2,*}, 阮榕生^{1,2,3}, 赵蓝天⁴, 王允圃^{1,2}, 张琦^{1,2}, 曹雷鹏^{1,2}, 崔宪^{1,2}, 巫小丹^{1,2}, 郑洪立^{1,2}

(1. 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 南昌 330047; 2. 南昌大学生物质转化教育部工程研究中心, 南昌 330047; 3. 美国明尼苏达大学生物制品与生态工程系, 明尼苏达 55108; 4. 江西强盛科技有限公司, 南昌 330052)

摘要: 塑料制品的广泛应用使塑料废弃物对生态环境的危害日益显著,也是全球环境问题关注的热点,由于缺乏完善的塑料废弃物管理体系,大部分塑料废弃物仍按传统模式处理或滞留在环境中,回收利用效率低,尚未形成塑料生命周期循环。环境中的塑料在长期受到物理、化学和生物等多种因素作用后会发生老化降解,形成微(纳)米塑料;由于它们粒径小、比表面积大且带有电荷等特性,除本身具有毒性外,还能作为重金属、持久性有机污染物等其他污染物的载体或被载体,经径流、污水排放和水文气象等多种途径在环境中迁移,造成生态环境污染。微塑料(MPs)分布范围广,全球的水体(淡水、海洋)、土壤和大气环境中均存在不同程度的MPs污染,近些年甚至在人体胎盘、母乳、活人肺部和血液中也发现了MPs的踪迹。因此对国内外MPs在物理、化学和微生物作用下的形成机制及其在水体、土壤和大气环境中的丰度水平、迁移特征进行全面地综述,为监测环境中MPs的污染水平、探究其在环境中的运移规律、提出MPs污染环境治理策略和揭示MPs在不同作用下的降解机制提供资料参考。

关键词: 微塑料(MPs); 降解机制; 环境污染; 丰度水平; 迁移特征

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4728-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202209157

Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment

ZHANG Long-fei^{1,2}, LIU Yu-huan^{1,2,*}, RUAN Rong-sheng^{1,2,3}, ZHAO Lan-tian⁴, WANG Yun-pu^{1,2}, ZHANG Qi^{1,2}, CAO Lei-peng^{1,2}, CUI Xian^{1,2}, WU Xiao-dan^{1,2}, ZHENG Hong-li^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China; 2. Engineering Research Center for Biomass Conversion, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330047, China; 3. Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota, Minnesota 55108, USA; 4. Jiangxi Qiangsheng Technology Co., Ltd., Nanchang 330052, China)

Abstract: The extensive application of plastic products leads to the increasingly significant harm of plastic wastes to the ecological environment, which is also a focus of global environmental issues. Due to the lack of a sound plastic waste management system, most plastic waste is still treated by the traditional mode or remains in the environment, with low recycling efficiency, and the plastic life cycle has not yet formed. Plastics in the environment will age and degrade under the actions of physical (wear, waves), chemical (ultraviolet radiation, hydrolysis), and biological (fungi, bacteria) factors for a long time and generate micro (nano) plastics. Due to their small particle size, large specific surface area, and charged characteristics, in addition to their own toxicity, they can also be used as carriers or covert carriers of pollutants (heavy metals, persistent organic pollutants, polycyclic aromatic hydrocarbons, bacteria, etc.) to migrate in the environment through runoff, sewage discharge, and hydrometeorology, causing ecological environmental pollution. MPs pollution has been listed as the second largest scientific problem in the field of environmental and ecological science by the United Nations Environment Programme. MPs are widely distributed, and there are different degrees of MPs pollution in the global water (freshwater, ocean), soil, and atmospheric environment. Traces of MPs have also been found in human placentas, human breastmilk, living lungs, and blood in recent years. Therefore, the formation mechanisms of MPs under the actions of physics, chemistry, and microorganisms, as well as their abundance levels and migration characteristics in water, soil, and atmosphere environment were comprehensively reviewed, with the hope of providing reference for monitoring the pollution levels of MPs in the environment, exploring their transport laws in the environment, proposing the management strategy of MPs pollution, and revealing the degradation mechanisms of MPs under different effects.

Key words: microplastics(MPs); degradation mechanism; environment pollution; abundance level; migration characteristics

塑料制品因可塑性强和成本低等优点被广泛应用于建筑、新能源和日常生活等领域,表1展示了常见塑料聚合物的理化性质和应用。根据欧洲塑料协会和《全球塑料展望:经济驱动因素、环境影响和政策选择》的统计报告显示,2020年全球塑料累积产量为 9.0×10^9 t[如图1(a)]^[1],2019年全球近69%的塑料垃圾仍按传统模式进行填埋和焚烧处理,回收利用的部分仅占9%,其余22%的塑料垃圾因无人管理而滞留环境中[如图1

(b)]^[2],尚未形成塑料生命周期循环。长期暴露在环境中的塑料能通过物理^[3]、化学^[4,5]和微生物^[6]等多种因素作用老化,生成微(纳)米塑料。微

收稿日期: 2022-09-16; 修订日期: 2022-10-27

基金项目: 南昌市地表水及其沉积物中微塑料污染防治技术研究与产品开发项目(洪科字[2021]232-3号);国家自然科学基金项目(21878139, 21878237, 22166026);江西省自然科学基金项目(2020BAB203012);食品科学与技术国家重点实验室自由探索项目(SKLF-ZZB-202122)

作者简介: 张龙飞(1995~),男,博士研究生,主要研究方向为微塑料污染治理,E-mail:422409486@qq.com

* 通信作者,E-mail:568230889@qq.com

塑料(microplastics, MPs)是由 Thompson 等^[7]在海洋水体和沉积物中首次发现的一类直径小于 5 mm 的新型污染物。

环境中的 MPs 能经湿沉降、径流和污水排放等途径在水体^[8]、土壤^[9]和大气环境^[10]中迁移,近年来已经在沉积物^[11]、土壤^[9]、饮用水^[12]和食物^[13]等介质中被频频检出,甚至在人类胎盘^[14]、母乳^[15]、血液^[16]和活人肺部^[17]等部位中也发现了 MPs,这表明 MPs 已经进入食物链,人类可能会通过饮食、呼吸或皮肤接触等方式摄入 MPs,并对人体健康造成潜在危害^[18]。由于 MPs 粒径小、比表面积大且存在老化现象,除本身能引起假饱腹感^[19]、肠道炎症^[20]和代谢紊乱^[21]等毒性外,还能作为重金属^[22]和持久性有机污染物^[23]等污染物的载体或被载体。MPs 的摄入不仅为污染物转移至生物体提供了一条潜在途径,且载有污染物的 MPs 可能会在生

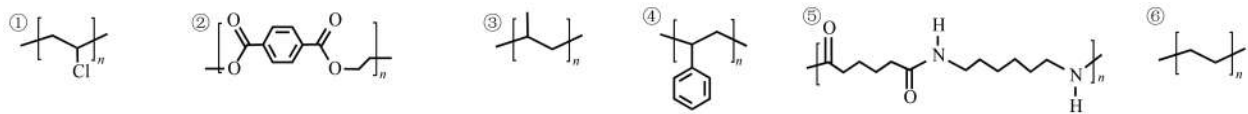
物体内产生联合毒理效应,从而影响生物的生长发育^[18]。

目前关于 MPs 的研究还处于初级阶段,主要集中在探讨单一塑料在物理、化学和微生物作用下的降解机制^[24,25]和通过区域性调研分析 MPs 的环境特征^[26,27]等领域。虽然已有大量研究,但由于缺乏完善的塑料垃圾管理体系和标准分析方法、微生物菌株筛选效率低以及鲜见关于降解过程中涉及的关键酶和化学反应的研究,且环境中常同时存在多种 MPs 等因素,各聚合物的研究进展差异大,距离实现应用还有许多问题亟待解决。因此,综述 MPs 在不同作用中的形成机制及其在环境介质中的分布特征和迁移规律,对开发不同环境基质中 MPs 标准分析方法、监测环境中 MPs 的污染水平、追溯 MPs 污染源、治理 MPs 环境污染和探寻同时高效降解多种 MPs 的研究方法具有前瞻性意义。

表 1 常见聚合物的理化性质和应用¹⁾

微塑料	化学式	应用领域	结构式
聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)	(C ₂ H ₃ Cl) _n	建筑材料、日用品、地板砖、人造革、管材、电线电缆、包装膜、发泡材料和密封材料等领域	①
聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)	(C ₁₀ H ₈ O ₄) _n	电子电器、开关;汽车工业中的流量控制阀、化油器盖、车窗控制器、脚踏变速器、配电盘罩、机械工业齿轮和喷雾器等领域	②
聚乙烯(polyethylene, PE)	(C ₂ H ₄) _n	薄膜制品、管材、注射成型制品、电线包裹层和工程塑料等领域	③
聚苯乙烯(polystyrene, PS)	(C ₈ H ₈) _n	塑料餐具、透明 CD 盒、仪表外壳、光学化学仪器零件、透明薄膜和化妆品类等领域	④
聚酰胺(polyamide, PA)	(NH-R-CO) _n	油墨、热合性粘结剂和涂料、环氧树脂熟化剂和模铸树脂等领域	⑤
聚丙烯(polypropylene, PP)	(C ₃ H ₆) _n	衣物类纤维制品、医疗器械、汽车、输送管道、化工容器、食品和药品包装等领域	⑥

1) MPs 聚酰胺结构式以聚酰胺 66 为例展示,聚酰胺 66 由己二酸和己二胺缩聚而成



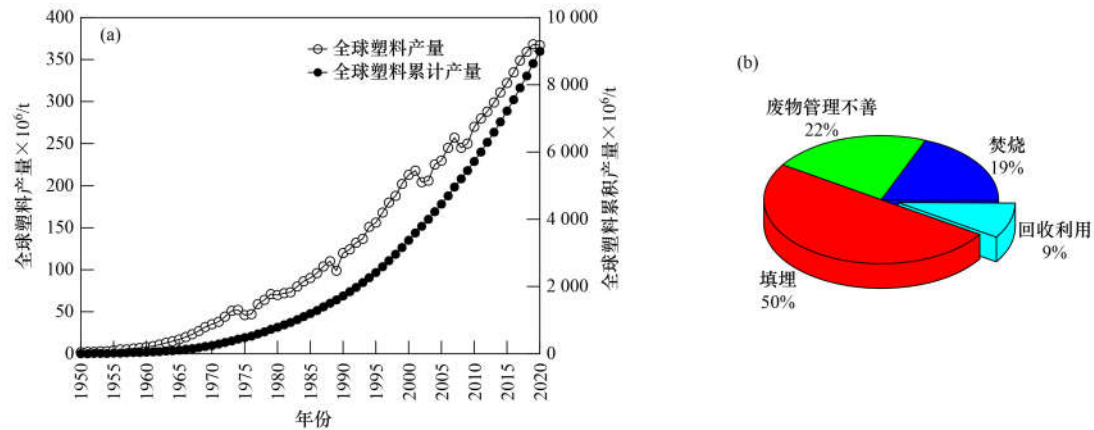
1 MPs 的形成机制

由于塑料制品的广泛应用,其产量也在增加^[1,6],根据欧洲塑料协会的统计[如图 1(a)],在 1950~2020 年全球塑料年产量从 1.7×10⁶ t 激增至 3.7×10⁸ t^[1],且在生活垃圾领域,塑料垃圾已排在第 3 位,仅次于有机垃圾和纸类垃圾^[28]。塑料垃圾在长期受到非生物(物理和化学)^[5,29]和生物因素(虫类和微生物)^[30,31]等多重作用后会发生老化降解,生成微(纳)米塑料,造成生态环境污染。因此,全面综述 MPs 的形成过程对深入开展揭示塑料降解机制的研究和开发同时高效降解塑料的方法具有重要作用,同样也为未来从源头上解决塑料污染问

题提供理论基础。

1.1 物理作用

暴露在外的塑料表面会受到机械磨损、海浪、光照和风化等因素的影响,往往首先发生非生物降解,表面呈现磨损和裂纹等碎片化现象^[32],且生成的微(纳)米塑料比表面积大,比中、大型塑料的降解速度更快^[33]。不同环境中的塑料物理老化程度也存在差异,有研究表明 MPs 在土壤环境中易与土壤团聚体(0.25~10 mm)吸附在一起,Zhang 等^[34]在采集的土壤样品中有 72% 的 MPs 颗粒带有土壤团聚体,28% 的处于分散状态,基于土壤环境相对封闭,紫外线和空气不足,且土壤团聚体的多孔结构能降低 MPs 与其他物质的碰撞频率等原因,这可能会



2019 年仅有 3 300 万 t 塑料垃圾回收利用

图 1 1950 ~ 2020 年全球塑料产量和 2019 年全球塑料垃圾分类占比

Fig. 1 Global plastic production from 1950 to 2020 and proportion of global plastic waste classification in 2019

使填埋的塑料降解较慢^[35]. 水体环境中的塑料因风浪作用活动范围广, 碰撞频率高, 表面易表征出破碎现象^[3], Corcoran 等^[29]发现在夏威夷考艾岛海滩采集的塑料因受机械外力的作用表面存在凹陷和棱角变圆等老化痕迹, 这与 Song 等^[25]采用紫外线辐射和机械磨损条件模拟 PE 和 PP 的老化结果一致, 且机械磨损在物理老化中起主要作用, 甚至会产生纳米颗粒, 而短期紫外线辐射无法使其破损, 这表明水体环境中的塑料在长期受到海浪和沙砾岩石碰撞等作用后, 表面会发生物理破损, 进而碎片化形成微(纳)米塑料.

经物理作用形成的微(纳)米塑料, 粒径变小, 表征出更大的比表面积, 吸附外界污染物的能力也显著增强, 同时暴露出更多的接触位点和化学键, 为化学作用和微生物附着并进一步降解提供反应场所.

1.2 化学作用

物理作用和化学作用在塑料降解过程中常存在协同效应, 经物理作用后的塑料会暴露出更多的反应位点和化学键, 在紫外线辐射、热和氧等联合作用下易发生氧化作用, 产生氢过氧化物, 诱导断裂或交联反应, 使聚合物的结构、弹性和延展性等性能

改变, 进而导致塑料碎片化, 因此光化学降解塑料也是次级 MPs 来源的一个重要途径^[4,5]. 由于暴露在外的塑料主要受到光、热、氧和物理因素的影响, 除了部分聚合物能发生水解反应外^[36], 光氧化反应是塑料发生化学降解的主要途径^[37], 且比水解速度快^[38], 分为链引发、链增殖和链终止这 3 个阶段^[5], 聚合物光氧化降解因结构不同存在差异. Gewert 等^[5]根据结构差异将其分为主链仅为 C—C 骨架(PE、PP、PS 和 PVC)和主链含有杂原子(PET 和 PA)的 2 类, 并对聚合物的光氧化过程进行了详细阐述, PE、PP 和 PS 类聚合物, 由于高分子量和缺乏官能团等特点, 机械磨损和光氧化作用是其前期老化的主要方式(如图 2)^[5,39], 该过程不仅增加了 MPs 的比表面积, 且饱和化学键(碳碳双键、羰基和醛基)的生成和极性的增加, 进一步提高其光氧化发生率和生物可利用率^[5,33]. PVC 对紫外辐射较为敏感^[5,40], 且氯原子能抑制需氧型微生物对其降解^[41], 因此, PVC 聚合物发生微生物降解前会优先进行光氧化降解. PVC 经紫外线辐射首先发生脱氯反应, 生成含有共轭双键的多烯烃聚合物(如图 3), 并进一步诱发光氧化降解^[5,42]. 由于 PET 聚合物具有酯基, 其非生物降解主要通过光诱导氧化和水解

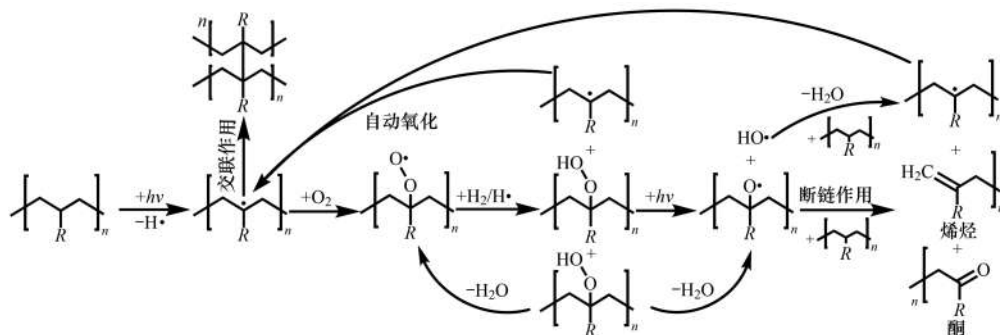


图 2 PE($R=H$)、PP($R=CH_3$) 和 PS($R=C_6H_5$) 的光氧化降解途径

Fig. 2 Photooxidative degradation pathways of PE ($R=H$), PP ($R=CH_3$), and PS ($R=C_6H_5$)

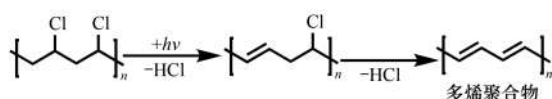


图3 PVC的脱氯和多烯聚合物的形成

Fig. 3 Dechlorination of PVC and formation of polyene

过程(如图4),使其酯键断裂,生成含有羧基、羟基和乙烯基等官能团的化合物,表征出颜色发黄、弹

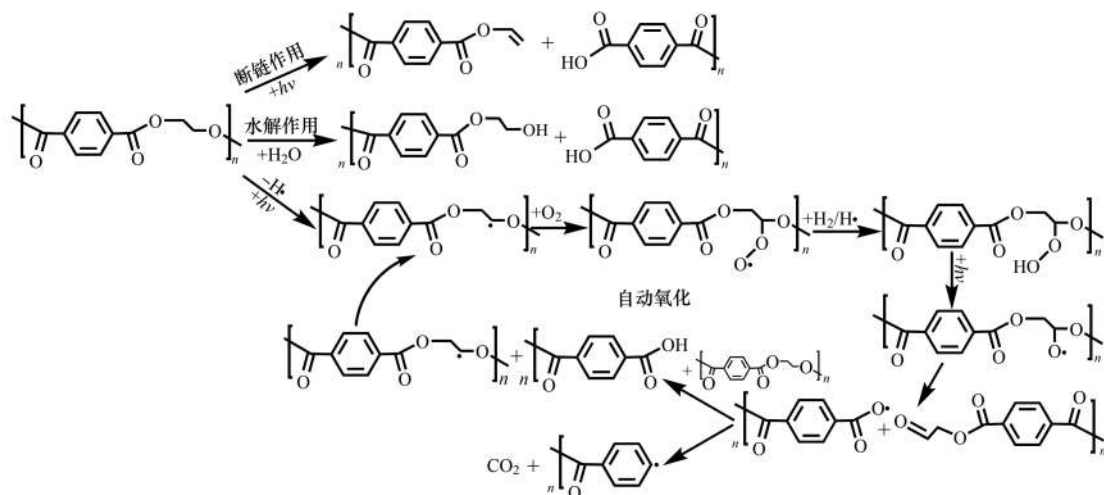


图4 PET的降解途径

Fig. 4 Degradation pathways of PET

1.3 微生物作用

塑料在经过非生物降解后,比表面积增大和含氧官能团的增加,使其表征出较高的生物可利用性,表面附着的微生物可以将其分解为 CO_2 、 H_2O 和 CH_4 等小分子化合物,主要包括4个过程[如图5(b)]:生物退化(塑料被非生物因素和微生物菌群碎片化)、解聚作用(微生物分泌的胞外酶和自由基等将塑料碎片分解成低聚物、二聚体和单体等)、同化作用(分子被菌体表面的受体识别后进入微生物细胞)和矿化作用(分子在细胞内被代谢成 CO_2 、 CH_4 、 N_2 、 H_2O 和其他化合物)^[6,43]. 目前关于塑料降解的微生物主要为真菌和细菌两类(如表2),有研究报道黑粉虫和黄粉虫等昆虫幼虫能将塑料作为生长所需的碳源,其本质仍为肠道菌群的作用^[31,44]. 微生物降解塑料过程可能是多种微生物和酶类的共同作用,Tischler等^[45]阐述了变形杆菌属、假单胞菌属和黄杆菌属降解苯乙烯的侧链氧化机制,即苯乙烯先后由苯乙烯单氧酶、氧化苯乙烯异构酶、苯乙醛脱氢酶和多种苯乙酸降解酶的催化逐步降解为苯乙酸,后经三羧酸循环完成苯乙烯的降解[如图5(a)]. Yoshida等^[46]分离的新型细菌 *Ideonella sakaiensis* 可以分泌降解 PET 和中间产物的酶,在 30°C 下6周基本能将低结晶度(1.9%)的

性和延展性降低的老化现象^[5,36].

环境中的塑料经光氧化和水解等化学作用,聚合物断链碎片化,生成含有不饱和化学键(碳碳双键、羰基、羧基和醛基)的化合物,带有这些官能团的微(纳)米塑料因其极性和比表面积的增加,不仅会进一步提高塑料本身的光氧化发生率和生物可利用性,还会强化环境中微(纳)米塑料积累的能力.

PET 薄膜完全降解;当 PET 的玻璃转化温度大于 75°C 时,PET 聚酯链流动性较低,处于易降解的高弹态^[46],但此时的酶常会发生变性而失活,而 Then 等^[47]用二硫键取代聚酯水解酶(TfCut2)中 Ca^{2+} 结合位点后,聚酯水解酶的最高耐温由 69.8°C 提高至 94.7°C ,且该酶处理 PET 薄膜 48 h 后,质量减少 $(25.0 \pm 0.8)\%$ [对照组 TfCut2: $(0.3 \pm 0.1)\%$],显著提高了降解效率.

此外,为减少塑料制品对生态环境的危害,采用生物降解塑料是代替传统塑料的主要趋势,如生物降解地膜等.然而,并不是所有的生物降解塑料都能在自然条件下完全降解,相反它们可能会更快地分解为 MPs,增加环境中 MPs 的积累^[48],这可能会加快表征 MPs 在生态环境中的危害性.目前完全生物降解塑料价格高且种类少,仍停留在实验阶段,短期内无法实现规模化生产和应用.因此,聚焦开展开发高效能的完全生物降解塑料,除了可以减少市场上非生物降解塑料的份额外,还能有效地遏制 MPs 对生态环境的持续污染,有利于自然界中的碳素循环,进而从源头上解决塑料污染问题.

微生物降解塑料对有效解决塑料垃圾堆积、填埋和降低塑料危害风险等方面具有巨大的应用前景,除了开发完全生物降解塑料外,目前针对微生物

降解塑料的研究主要集中在筛选摄食塑料的虫类、微生物菌种和阐述微生物降解塑料的机制等领域。基于微生物种类和降解过程中涉及的酶类多、降解机制复杂和现有的微生物降解效率有待提高且难以同时实现多种塑料高效降解等原因,限制了微生物在降解塑料领域的发展。

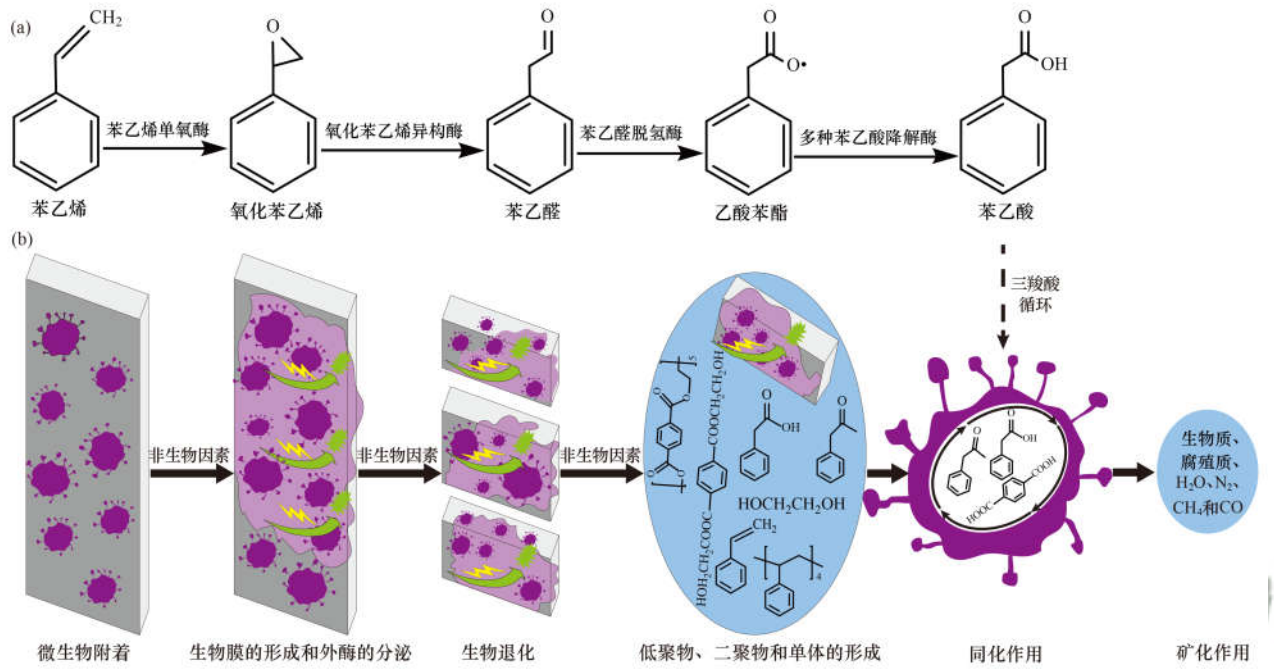


图 5 Styrene metabolic pathway via vinyl side chain oxygenation and schematic illustration of microbial degradation of plastics

表 2 降解塑料的真菌和细菌¹⁾
Table 2 Plastic-degrading fungi and bacteria

类别	塑料	菌株名称	降解效率(质量损失)/%	培养时间	菌株来源	文献
真菌	LDPE	<i>Zalerion maritimum</i>	56.7 ± 2.9	14 d	/	[49]
	LDPE	<i>Bacillus cereus</i> strain A5, a	35.72 ± 4.01	16 周	肯尼亚内罗毕丹罗拉垃圾场土壤	[43]
	LDPE	<i>Rhizopus oryzae</i> NS5	8.4 ± 3	1 月	实验室培养	[24]
	PP	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	PP 纳米复合材料:5.8	28 d	北马哈拉施特拉邦大学	[50]
	PP	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Paecilomyces variotii</i>	PP:0.62, PP/PBAT/热塑淀粉混合物:2.32	30 d	/	[30]
细菌	PVC	<i>Pseudomonas citronellolis</i>	18.58 ± 0.01	30 d	购买	[51]
	LDPE	<i>Alcanivorax borkumensis</i>	3.5 ± 0.34	80 d	科西嘉岛北部的海水样本	[52]
	LDPE	<i>Aspergillus oryzae</i> strain A5, 1	36.4 ± 5.53	16 周	肯尼亚内罗毕丹罗拉垃圾场土壤	[43]
	LDPE	<i>Brevibacillus borstelensis</i> strain B2, 2	20.28 ± 2.30	16 周	肯尼亚内罗毕丹罗拉垃圾场土壤	[43]
	PS	<i>Exiguobacterium</i> sp. strain YT2	7.4 ± 0.4	60 d	黄粉虫肠道中分离	[53]
	PVC	<i>Bacillus</i> sp.	0.26 ± 0.02	90 d	古吉拉特邦被塑料污染的海水	[54]
	HDPE		1.0 ± 0.01			
	PET	<i>Thermobifida fusca</i>	50	3 周	/	[55]

1) “/”表示引用文献中未提供该信息

2 环境中 MPs 的分布特征

基于 MPs 结构稳定和强疏水性等特性,其能经污水排放和径流等多种方式迁移,环境中的生物可能会因视觉混淆误食 MPs 并成为携带者^[56,57],通过食物链的传递产生生物放大效应^[58],这不仅会造成生态环境污染,可能还会危害人类身体健康^[59](如图 6).而且塑料制品的自然老化^[3]、洋流^[60]、风沙

和水文气象^[61,62]等因素会使 MPs 的运移规律更加复杂,因此,综述 MPs 在环境中的分布特征,对全面掌握其在环境中的污染水平和运移规律具有重要意义,也是从根本上解决 MPs 污染的科学基础。

2.1 水体环境中 MPs 的分布特征

环境中的 MPs 主要通过污水排放、大气湿沉降和航运作业等途径进入湖泊、河流和海洋。Andrady^[4]研究表明,海洋垃圾中约 40%~80% 为塑

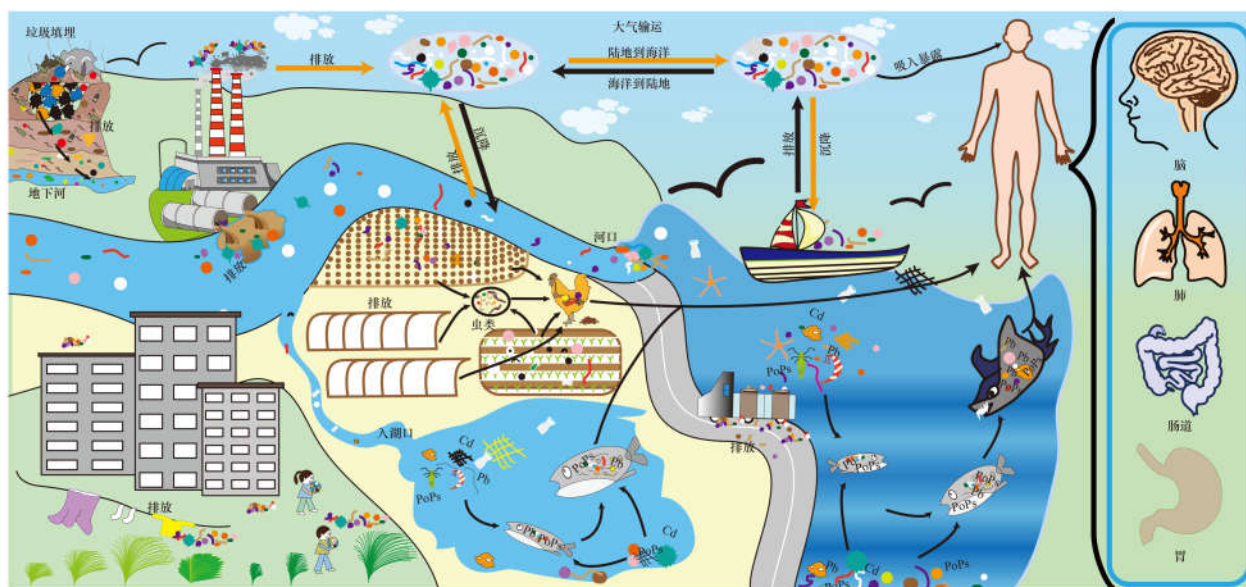


图 6 MPs 在环境中的迁移特征

Fig. 6 Migration characteristics of MPs in the environment

料,其中陆源塑料垃圾约占海洋塑料垃圾的 80%,主要为包装材料、手提袋和鞋类等^[63],且在 2021 年欧洲塑料协会公布的数据中,2020 年全球包装材料产量占塑料总量的 40.5%,因此监控不同水体环境中 MPs 的分布特征对 MPs 污染源的精准定位和水质安全至关重要。

2.1.1 淡水环境中 MPs 的分布特征

2.1.1.1 湖泊环境中 MPs 的分布特征

湖泊是水体更新周期较慢且相对封闭的水域,污水排放、湖泊与城市的距离和人类活动等是影响 MPs 污染湖泊的重要因素,不同地域的湖泊 MPs 丰度水平可能会存在差异(如表 3)。Wang 等^[64]对中国武汉市湖泊中 MPs 分布特征的研究发现,湖泊表层水体的 MPs 丰度水平和距市中心的距离呈负相关($P < 0.001$),人类活动是 MPs 污染湖泊的重要因素,特别是距离市中心和居民区较近的湖泊,这与 Yuan 等^[65]探究影响鄱阳湖表层水体中 MPs 分布特征的因素一致。除了人类活动外,水文气象和汛期等因素也会影响湖泊中 MPs 的丰度水平, Fischer 等^[66]对意大利博尔塞纳湖和丘西湖中 MPs 的丰度水平进行研究,结论显示采集样品前的大风和降雨导致博尔塞纳湖中 MPs 丰度水平增加;李文华等^[61]对鄱阳湖五河入湖口湿地地段和入江口区域的 MPs 丰度水平进行研究^[67],结果表明 MPs 的丰度水平呈枯水期 > 平水期 > 丰水期的规律,目前关于水文气象和汛期等因素对 MPs 运移规律影响的研究仍不充分,水文气象等因素因地制宜,不同地区的同类研究难以进行对比分析,因此限制了该领域的发展,但深入开展该领域的研究,是阐明 MPs 在

水体环境中运移规律的基础。

除了距离人类活动地区相对较近的湖泊 MPs 污染严重外,中国西藏思灵错盆地的 4 个湖泊中也存在 MPs 污染,通过形态特征分析表明其主要来源是日常塑料制品的分解^[81],这可能与当地人类活动有关,或是环境中遗存的 MPs 经径流、风沙和湿沉降等途径的输入,且 MPs 的输入还存在将重金属和持久性有机物污染物等其他污染物引入的风险,进而对湖泊水质安全和水生生物的生长发育造成潜在危害。

2.1.1.2 河流环境中 MPs 的分布特征

河流是环境中 MPs 的重要收纳库和向海洋输入的流动载体, Schmidt 等^[82]基于管理不善的塑料废弃物概念模型量化,得出全球每年通过河流进入海洋的塑料输入量为 $0.47 \times 10^6 \sim 2.75 \times 10^6 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, Mai 等^[83]使用更加稳健的模型($R^2 = 0.9$),估算出 2010 ~ 2050 年全球每年通过 1 518 条主要河流汇入海洋的塑料垃圾量约 $6.24 \times 10^4 \sim 2.9 \times 10^5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,并预测在 2028 年将达到峰值。虽然不同模型由于技术和数据量等因素,预测结果存在较大差异,但在一定程度上仍可佐证河流输入是 MPs 进入海洋的重要途径。

河流中 MPs 的分布特征与河流水文周期、入河(湖)口和污水排放等因素有关,中国武汉汉江和长江(武汉段)中 MPs 的平均丰度水平分别为 $(2933 \pm 305.5) \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(2516.7 \pm 911.7) \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$,低于对武汉市大部分湖泊的研究^[64](如表 3),这可能是由于河流中更强的流体动力学有助于 MPs 等污染物的疏散,湖泊环境相对封闭, MPs 丰度水平会

因塑料长期积累和降解而不断升高;且长江(武汉段)中的 MPs 丰度水平也低于长江口中的丰度水平($4\,137.3 \pm 2\,461.5$) $\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$ [72]. 同样李文华等[61]发现鄱阳湖入湖口沉积物中 MPs 的丰度水平高于 Yuan 等[65]对鄱阳湖沉积物中的研究结果

(如表 3),以上结果均表明河流在入湖(海)时,受到湖(海)水的顶托,导致泥沙和 MPs 等颗粒物在此处沉降积累,进而使 MPs 的丰度水平相对较高,也进一步证实河流是湖泊和海洋环境中 MPs 的重要输入源[72].

表 3 淡水环境介质中 MPs 的丰度特征¹⁾

Table 3 Abundance characteristics of MPs in freshwater environmental media

研究对象	类型	研究地区	微塑料丰度	微塑料粒径/ μm	微塑料成分	文献
湖泊	表层水体	中国太湖	$3.4 \sim 25.8 \text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$	100 ~ 1 000	PET、聚酯和 PP	[68]
		中国鄱阳湖	$5 \sim 34 \text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$	100 ~ 500	PP、PE、PVC 和 PA	[65]
		中国洞庭湖	$900 \sim 2\,800 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$	50 ~ 5 000	PE 和 PP	[69]
		中国洪湖	$1\,250 \sim 4\,650 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$			
		中国武汉东湖	$(5\,914 \pm 1\,580.7) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$	< 2 000	PET、PP、PE、PA 和 PS	[64]
		中国武汉簰子湖	$(8\,550 \pm 989.9) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$			
		中国武汉北湖	$(8\,925 \pm 1\,591) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$			
		中国武汉塔子湖	$(6\,175 \pm 1\,308.2) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$			
		中国武汉武湖	$(1\,660.0 \pm 639.1) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$			
		中国武汉沙湖	$(6\,390 \pm 862.7) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$			
		中国武汉南太子湖	$(6\,162.5 \pm 537.5) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$			
		中国武汉南湖	$(5\,745 \pm 901.6) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$			
	沉积物	意大利丘西湖	$2.68 \sim 3.36 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$	300 ~ 5 000	/	[66]
		意大利博尔塞纳湖	$0.82 \sim 4.42 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$			
		美国苏必利尔湖	$0.0013 \sim 0.0126 \text{ n}\cdot\text{m}^{-2}$	< 5 000	PE	[70]
		美国休伦湖	$0 \sim 0.0065 \text{ n}\cdot\text{m}^{-2}$			
		美国伊利湖	$0.0047 \sim 0.4663 \text{ n}\cdot\text{m}^{-2}$			
	沉积物	蒙古国库苏古尔湖	$0.000997 \sim 0.020264 \text{ n}\cdot\text{m}^{-2}$	< 5 000	PE 和 PS	[71]
		中国太湖	$11.0 \sim 234.6 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$	100 ~ 1 000	PET、聚酯和 PP	[68]
		中国鄱阳湖	$54 \sim 506 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$	100 ~ 500	PP、PE、PVC 和 PA	[65]
		中国鄱阳湖入江口	陡山: $356 \sim 877 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 渡口: $1\,090 \sim 1\,452 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 拓机: $858 \sim 1\,114 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 5 000	PE、LPPE 和 PP	[59]
		意大利丘西湖	$(234 \pm 856) \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 500	/	[66]
		意大利博尔塞纳湖	$(112 \pm 326) \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$			
河流	表层水体	中国武汉汉江	$(2\,933 \pm 305.5) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$	< 2 000	PET、PP、PE、PA 和 PS	[64]
		中国长江(武汉段)	$(2\,516.7 \pm 911.7) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$			
		中国长江口	$500 \sim 10\,200 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$	500 ~ 5 000	/	[72]
		中国闽江口	$(1\,245.8 \pm 531.5) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$	500 ~ 5 000	PP、PE 和 PVC	[73]
		中国椒江口	$(955.6 \pm 848.7) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$			
		中国瓯江口	$(680.0 \pm 284.6) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$			
		中国鄱阳湖-饶河龙口入湖段	$10 \sim 64 \text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$	10 ~ 9 500	PE、PS、LPPE 和 PP	[57]
		中国鄱阳湖五河入湖口 (赣江、抚河、修水、信江和饶河)	丰水期: $32.1 \sim 127.3 \text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$ 枯水期: $87.1 \sim 295.5 \text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$	100 ~ 5 000	PS、PP 和 PE	[67]
		中国三峡香溪河	$0.055 \sim 34.2 \text{ n}\cdot\text{m}^{-2}$	112 ~ 5 000	PE、PP、PS 和 PET	[56]
		奥地利多瑙河	$(0.3168 \pm 4.6646) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$	< 2 000	/	[74]
	沉积物	德国莱茵河	$0.892777 \text{ n}\cdot\text{m}^{-2}$	300 ~ 5 000	/	[75]
		英国泰马河口	$0.028 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$	< 5 000	PE、PS 和 PP	[76]
		韩国洛东江口	$0.62 \sim 860 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$	< 5 000	PE、PS 和聚酯	[77]
		中国长江口	$(3.42 \pm 1.31) \text{ n}\cdot\text{g}^{-1}$	100 ~ 2 500	/	[78]
		中国鄱阳湖五河入湖口 (赣江、抚河、修水、信江和饶河)	丰水期: $598.83 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 平水期: $729.50 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 枯水期: $1\,105.00 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$	100 ~ 5 000	PS、PP 和 PE	[61]
		中国三峡香溪河	$80 \sim 864 \text{ n}\cdot\text{m}^{-2}$	112 ~ 5 000	PE、PP、PS 和 PET	[56]
		德国莱茵河	$4\,000 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$	< 5 000	PE、PP 和 PS	[79]
		韩国洛东江	$8\,205 \sim 27\,606 \text{ n}\cdot\text{m}^{-2}$	1 000 ~ 5 000	/	[80]

1) “/”表示引用文献中未提供该信息

MPs 除了对河流存在不同程度的污染外,还会被水体环境中的生物误食而进入食物链. Zhao 等[73]

发现悬浮在水体中的 MPs 能增加低营养级生物的利用率,MPs 可能会向更高营养级生物迁移,同样

Zhang 等^[56]发现在中国三峡香溪河采集的 35 条鱼类肠胃中 MPs 检出率高达 25.7%,这表明悬浮于水体中的 MPs 会被水生生物误食,并在食物链中传递(如图 6)。且被生物摄入的 MPs 可能还会作为重金属等污染物的载体在食物链中迁移,李文华等^[57]研究了淡水鱼类对鄱阳湖流域饶河龙口入湖段中 MPs 和重金属的生物累积,发现鱼体内的 MPs 会经食物链进一步向高等营养级生物传递且可能会增加 Cd 和 Pb 等重金属在淡水鱼体内的富集^[18](如图 6)。以上研究表明,在 MPs 进入海洋的过程中,河流作为 MPs 迁移载体的功能越来越凸显,且 MPs 对河流水质和水体环境中水生生物的生长发育和食用安全也造成了潜在危害。

2.1.1.3 其他淡水环境中 MPs 的分布特征

水体环境中的 MPs 多以纤维和碎片状为主,因其表面光滑和粒径小等特点难以被去除^[84],目前已在城市排水系统^[85]和饮用水^[12]中被检出。南京某污水处理厂在经 MPs 去除效率为 78.57% 的工艺处理后,出水口仍有 $0.9 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MPs^[85]。Tong 等^[86]在中国不同城市采集的 38 份自来水中,MPs 检出率高达 94.7%,丰度水平为 $0 \sim 1\,247 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$,碎片、纤维和球体在不同样品中的占比分别为 53.85%~100%、1.18%~30.77% 和 2.27%~36.36%,主要成分为 PE、PP。同样 Kosuth 等^[87]在来自全球不同国家的 159 份自来水、12 种品牌的啤酒和 12 种品牌的商业海盐中均检出 MPs,检出率分别为 81%、100% 和 100%,丰度水平分别为 $0 \sim 61 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0 \sim 14.3 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $46.7 \sim 806 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中纤维类 MPs 占总量的 99%,该研究显示自来水是人类通过饮食摄入 MPs 贡献率最大(88%)的媒介,MPs 在自来水中的形态特征和成分可能会因给水管道的材质、所服务的人群和地区经济情况有关,人类长期饮用含有 MPs 污染的自来水,可能会对机体产生潜在危害。因此,监测自来水中 MPs 的丰度水平和阐明其来源对保障自来水水质安全和公众健康具有重要作用。

目前关于饮用水中 MPs 去除的研究仍不充分,主要集中在采用絮凝和活性炭过滤等传统方法上,去除效率有限,基于塑料污染日益严重、MPs 污染源和运移规律不清晰等原因,后期可能无法满足人类对饮用水的要求;有研究表明采用混凝和超滤膜技术对水体中微米级 MPs 具有较好的去除效果^[88,89],但针对不同成分的 MPs,关于处理环节中超滤膜的价格、清洗维护和混凝剂的选择等方面还需要更深入地研究。

2.1.2 海洋环境中 MPs 的分布特征

海洋是首次发现 MPs 的环境载体,也是广泛研

究 MPs 分布特征和潜在危害的主要对象^[7],海洋中的 MPs 主要来源于河流运输^[83]、橡胶轮胎磨损^[90]和大气湿沉降^[62]等途径,且其分布特征受人类活动、水文气象和地理位置等因素影响。有研究报道个人护理产品释放的 MPs 数量仅占全球入海初级 MPs 的 2%,洗涤衣物产生的初级 MPs 占比高达 35%,且中国通过洗涤衣物入海的 MPs 占 10.3%,仅次于印度和东南亚(15.9%)^[90],这与 Browne 等^[91]发现家用洗衣机每次洗涤单件衣物会向水体释放 1 900 根 MPs 纤维的结果一致,且证实服装中聚酯和丙烯酸纤维的成分比例与污水排放口处沉积物中的相似,这表明海洋中大部分 MPs 纤维可能来自洗涤衣物后的污水,并非塑料碎片或个人护理产品,尤其在沿海城市生活污水处理系统中,纤维类 MPs 是主要形态^[84]。在中国东海^[72]、南海^[92]和渤海^[93]等沿海海域的表层海水和沉积物中也存在 MPs 污染(如表 4),这可能和中国沿海经济带工业、渔业和旅游业相对密集以及人类活动频繁有关,致使 MPs 丰度水平相对较高。

进入海洋的 MPs 能通过气候和洋流环流等途径迁移,Kim 等^[94]探究影响韩国高潮海岸海滩 MPs 空间变化的因素时,发现季风和洋流使 MPs 的粒径分布和空间均匀性存在明显差异,这与 Veerasingam 等^[60]对印度果阿海滩的研究结果相同;同样由于受降雨量和东北季风的影响,中国香港西海岸的 MPs 丰度水平显著高于东海岸^[95](如表 4)。

MPs 作为环境中的新兴污染物,尽管关于水体环境中 MPs 污染的报道越来越多,但主要集中在河口、湖泊和沿海地区等地域,而鲜见关于 MPs 在内陆水系中的研究;如何实现对水体环境中 MPs 污染源的精准定位和去除及其在水文气象和洋流等因素作用下的运移规律仍不清晰,还需要进一步研究分析。基于中国是塑料生产大国,根据欧洲塑料协会公布的数据显示,2020 年中国塑料产量占全球塑料产量的 32%,且目前调研研究表明中国水体环境中 MPs 的丰度水平相对较高,潜在危害日益显著。因此,深入开展内陆水系环境中 MPs 分布特征的研究是监测水体环境中 MPs 丰度水平、探寻其污染源、治理环境中 MPs 污染和提高水质安全等问题的科学基础。

2.2 土壤环境中 MPs 的分布特征

MPs 在土壤中的分布特征因土地利用方式不同存在差异,其来源途径主要为污水污泥的应用、工业用地、地膜的使用和农田灌溉的引入等^[102,103]。Scheurer 等^[27]研究表明瑞士洪泛平原土壤中 MPs 的丰度水平与当地人口密度有关;澳大利亚悉尼工

表 4 不同海域环境介质中微塑料丰度特征¹⁾

Table 4 Abundance characteristics of MPs in different marine environmental media

类型	研究地区	微塑料丰度	微塑料粒径/ μm	微塑料成分	文献
表层海水	中国东海海岸	$(0.167 \pm 0.138) \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$	500 ~ 5 000	/	[72]
	中国香港西海岸	$(528 \pm 193) \sim (9\,067 \pm 7\,009) \text{ n} \cdot \text{m}^{-2}$	315 ~ 5 000	/	[95]
	中国香港东海岸	$(1\,177 \pm 570) \sim (1\,348 \pm 755) \text{ n} \cdot \text{m}^{-2}$			
	北海南部翡翠湾	$0 \sim 1\,770 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$	< 5 000	/	[96]
	意大利撒丁岛西海域	$0.15 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$	< 5 000	/	[97]
	东北大西洋海域	$(2.46 \pm 2.43) \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$	< 5 000	聚酯和 PA	[98]
	英吉利海峡西部海域	$0.27 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$	< 5 000	/	[99]
沉积物	白令海和楚科奇海	$0 \sim 68.88 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$	100 ~ 5 000	PP 和 PET	[11]
	中国南海	$0 \sim 132 \text{ n} \cdot \text{m}^{-2}$	1 000 ~ 20 000	PP 和 PE	[92]
	葡萄牙南岸	$(0.01 \pm 0.001) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$	/	人造纤维和 PS	[100]
	中国北部湾	$5.014 \sim 8.714 \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$	100 ~ 5 000	PE、PET、聚酯和 PS	[101]
	韩国德积群岛	$56 \sim 285\,673 \text{ n} \cdot \text{m}^{-2}$	50 ~ 2 000	PP 和 PE	[94]
沙土	中国渤海海岸	$(102.9 \pm 39.9) \sim (163.3 \pm 37.7) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$	/	PE 和 PS	[93]
MPs 颗粒	印度果阿海滩	/	< 5 000	PP 和 PE	[60]

1) “/”表示引用文献中未提供该信息

业土壤中 MPs 的丰度水平较高,为 300 ~ 67 500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[104]. 中国土壤环境同样存在 MPs 污染, Liu 等^[9]在上海市某郊区菜地农田土壤的浅层区和深层区均检出 MPs, 丰度水平分别为 $(78.00 \pm 12.91) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(62.50 \pm 12.97) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著低于中国云南滇池土壤中 MPs 的丰度水平 $(7\,100 \sim 42\,960 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1})$, 平均值为 $18\,760 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[34], 但两者研究中 MPs 形态均主要为纤维、碎片和薄膜. 土壤环境中的 MPs 在人为因素的干扰下(种植、堆肥使用和垃圾填埋), 可能会和肥料、环境污染物及营养物质相互吸附被土壤中的生物摄入或直接被植物吸收, 经食物链传递, 对土壤种植环境、碳氮循环和农产品质量与安全产生潜在危害, 甚至威胁人体健康^[105] (如图 6). 而且由于土壤团聚体具有多孔结构, 土壤中的微(纳)米塑料能穿透大孔迁移至深层土壤^[35], 此外在地下水位高或者土壤孔隙较大的位点, MPs 也具有转移至地下水的可能^[27,106] (如图 6).

目前关于土壤中 MPs 分布特征和迁移规律的研究相对较少, 且由于缺乏完善的塑料垃圾管理体系, 陆地环境仍是塑料废弃物的主要场所, 与海洋环境相比, 陆地环境具有更强烈的风化效应和更高的紫外线辐射, 加之对塑料垃圾处置和回收作业的不规范, 次级 MPs 的形成效率可能更高^[103]. 因此, 建立完善的塑料垃圾管理系统和监测土壤环境中 MPs 的分布特征有助于揭示 MPs 在土壤环境中的运移规律和追溯土壤环境中 MPs 污染源, 并对保障土壤种植环境安全、提高农产品质量与安全水平具有重要意义.

2.3 大气环境中 MPs 的分布特征

迄今为止, 只有少数研究报道了 MPs 的大气迁移特征和大气湿沉降对 MPs 在生态系统中存在的

贡献程度^[62,107]. Cai 等^[10]研究发现中国东莞市大气沉降物中 MPs 平均沉降通量为 $(36 \pm 7) \text{ n} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 主要为 PE、PP 和 PS, 低于德国汉堡市大气中 MPs 的丰度水平 $275 \text{ n} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ ^[108]. MPs 除了存在城市大气中, 有学者在北极地区和比利牛斯山脉的无人区中也发现了 MPs 的痕迹^[109,110], 这表明大气中的 MPs 能经风沙和降雨等途径进行迁移^[111]. 有研究表明线状和碎片状的 MPs 粒子受空气拖曳力的影响^[62], 可在大气中进行长距离迁移, 并估算出亚洲和临近海域大气 MPs 的年排放量分别为 $3.1 \times 10^5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $6 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 从亚洲陆面通过大气输送沉降至海洋表面的 MPs 约占 1.4%, 其余沉降在陆面. 陆地到海洋的大气输送净通量是河流入海 MPs 输送通量的 2 倍, 约为 $3.9 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 这证实了大气输送是 MPs 进入陆地和海洋环境中的重要途径(如图 6). 且 Aves 等^[112]首次在南极洲罗斯岛地区采集的新降雪中检出 MPs, 经成分分析表明可能来源于当地科考基地或远距离传输, 该研究也是首次发现大气中的 MPs 能经雪花沉降至陆地, 并进一步佐证湿沉降是 MPs 进行迁移的途径之一.

室内空气、工厂废弃物的排放、车胎磨损和塑料垃圾的不规范处理等均有可能是 MPs 进入大气环境的途径, 经风沙和气象等因素的影响实现远距离迁移. 但目前因大气中 MPs 粒径小易受气象等因素影响、且区域性研究数据和标准分析方法的缺乏等问题, 不同区域的 MPs 丰度特征可能无法对比分析, 因此限制了 MPs 在大气环境领域的研究.

3 展望

MPs 污染已被联合国环境规划署列为环境与生

态科学研究领域的第二大科学问题,环境中的塑料废弃物在长期受到非生物和生物等因素作用后会形成微(纳)米塑料。因其结构稳定、疏水性强和比表面积大等特性,MPs除了能在生态环境中迁移外,还会通过自身毒性或作为其他污染物(重金属、持久性有机污染物、细菌)的载体或被载体对生物的生长发育产生毒理效应。人类可能会通过饮食或呼吸等方式摄入 MPs,且已经在人体胎盘、血液和母乳等部位中检出,目前虽然没有 MPs 对人体危害的报道,但这已经给人类健康敲响警钟,MPs 对生态环境污染问题亟待解决。

目前关于 MPs 的研究主要集中在通过区域性(海岸、河口)调研分析 MPs 的分布特征、探寻高效降解 MPs 的方法(化学、生物)和阐明单一塑料的降解机制等领域。但由于降解 MPs 的方法仍停留在实验阶段,距离投入应用还存在差距,另外微生物种类多、菌株筛选工作复杂且环境中常同时存在多种 MPs 及其与多种污染物吸附的共存体,增加了相关研究的难度,还有很多问题亟待阐明,如开发不同基质中 MPs 的标准分析方法、探寻 MPs 污染源、阐明 MPs 在不同处理方法中的降解机制和探究同时高效降解多种 MPs 的方法等问题仍悬而未决。

随着全球塑料产品产量和塑料废弃物累积量的增长,加之缺乏完善的塑料垃圾管理体系,距离实现塑料周期循环的目标仍有一段距离。且基于 5G 时代的发展和全球新型冠状病毒的暴发等背景,这将会提高电子产品、口罩和防护服等塑料制品的生产率,增加 MPs 向环境释放的风险,因此开展不同基质中 MPs 的标准分析方法、深入研究 MPs 在环境中的运移规律和探寻高效降解 MPs 的方法等领域的研究对监测环境中 MPs 污染水平、探寻其污染源和提出高效治理 MPs 污染环境的策略具有重要意义。

4 结论

(1)环境中的塑料能通过物理、化学和生物等多种作用老化降解,产生微(纳)米塑料,是环境中次级 MPs 的主要来源途径。目前关于塑料老化降解的研究仍处于以单一的聚合物为研究对象,探索高效降解塑料的方法、筛选摄入塑料的虫类和微生物等领域阶段,鲜有关于环境中多种 MPs 同时高效降解的研究。基于塑料种类多、筛选工作量大且降解机制复杂等原因,研究进展较慢,短期内 MPs 可能会在环境中持续积累,并进一步对生态环境产生危害。

(2)MPs 因其粒径小、强疏水性和结构稳定等

特征,在淡水(河流、湖泊、其他淡水环境等)、海洋、土壤和大气环境中均有分布。目前的调查表明中国水体环境中的 MPs 丰度水平高于其他国家。但由于标准分析方法的缺乏、现有调研 MPs 环境特征的研究方法和单位表达等评估标准不统一,且不同地区地理条件和水文气象特征差异明显等原因,不同学者进行对比分析时可能存在偏差,制约了探究 MPs 在土壤和大气环境中分布特征的研究进展。

(3)分布在环境中的 MPs 能经径流、湿沉降和水文气象等多种途径在环境中迁移,目前关于 MPs 迁移特征的研究主要集中在河流、湖泊和海洋等宏观层面,而水体、土壤和大气环境中的生物可能会因误食 MPs 成为携带者并在食物链中传递,但目前鲜有关于 MPs 在不同生物介质中迁移特征的研究,尤其是土壤和大气环境中的生物。阐明 MPs 在不同环境介质中的运移规律对 MPs 污染源的摸排和从源头上根除 MPs 污染具有重要作用,因此 MPs 在环境中的运移规律还需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 安立会,李欢,王菲菲,等. 海洋塑料垃圾污染国际治理进程与对策[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(6): 1334-1340.
An L H, Li H, Wang F F, et al. International governance progress in marine plastic litter pollution and policy recommendations [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(6): 1334-1340.
- [2] Organisation for Economic Co-operation and Development. Global plastics outlook: economic drivers, environmental impacts and policy options [M]. Paris: Organisation for Economic Cooperation and Development, 2022.
- [3] Enfrin M, Dumée L F, Lee J. Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes-origin, impact and potential solutions[J]. Water Research, 2019, **161**: 621-638.
- [4] Andrady A L. Microplastics in the marine environment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(8): 1596-1605.
- [5] Gewert B, Plassmann M M, Macleod M. Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2015, **17**(9): 1513-1521.
- [6] Ganesh K A, Anjana K, Hinduja M, et al. Review on plastic wastes in marine environment-biodegradation and biotechnological solutions[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, **150**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110733.
- [7] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic? [J]. Science, 2004, **304**(5672): 838-838.
- [8] Lebreton L C M, van der Zwet J, Damsteeg J W, et al. River plastic emissions to the world's oceans [J]. Nature Communications, 2017, **8**, doi: 10.1038/ncomms15611.
- [9] Liu M T, Lu S B, Song Y, et al. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China[J]. Environmental Pollution, 2018, **242**: 855-862.
- [10] Cai L Q, Wang J D, Peng J P, et al. Correction to: characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan City, China: preliminary research and first evidence [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**

- (35): 36074-36075.
- [11] Mu J L, Qu L, Jin F, *et al.* Abundance and distribution of microplastics in the surface sediments from the northern Bering and Chukchi Seas [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **245**: 122-130.
 - [12] Kirstein I V, Gomiero A, Vollertsen J. Microplastic pollution in drinking water [J]. *Current Opinion in Toxicology*, 2021, **28**: 70-75.
 - [13] Smith M, Love D C, Rochman C M, *et al.* Microplastics in seafood and the implications for human health [J]. *Current Environmental Health Reports*, 2018, **5**(3): 375-386.
 - [14] Ragusa A, Svelato A, Santacroce C, *et al.* Plasticenta: first evidence of microplastics in human placenta [J]. *Environment International*, 2021, **146**, doi: 10.1016/j.envint.2020.106274.
 - [15] Ragusa A, Notarstefano V, Svelato A, *et al.* Raman microspectroscopy detection and characterisation of microplastics in human breastmilk [J]. *Polymers*, 2022, **14**(13), doi: 10.3390/polym14132700.
 - [16] Leslie H A, van Velzen M J M, Brandsma S H, *et al.* Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood [J]. *Environment International*, 2022, **163**, doi: 10.1016/j.envint.2022.107199.
 - [17] Jenner L C, Rotchell J M, Bennett R T, *et al.* Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **831**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154907.
 - [18] Rubio L, Marcos R, Hernández A. Potential adverse health effects of ingested micro- and nanoplastics on humans. Lessons learned from *in vitro* and *in vitro* mammalian models [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 2020, **23**(2): 51-68.
 - [19] de Souza e Silva Pegado T, Schmid K, Winemiller K O, *et al.* First evidence of microplastic ingestion by fishes from the Amazon River estuary [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **133**: 814-821.
 - [20] Li B Q, Ding Y F, Cheng X, *et al.* Polyethylene microplastics affect the distribution of gut microbiota and inflammation development in mice [J]. *Chemosphere*, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125492.
 - [21] Jin Y X, Lu L, Tu W Q, *et al.* Impacts of polystyrene microplastic on the gut barrier, microbiota and metabolism of mice [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 308-317.
 - [22] Vedolin M C, Teophilo C Y S, Turra A, *et al.* Spatial variability in the concentrations of metals in beached microplastics [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **129**(2): 487-493.
 - [23] Yeo B G, Takada H, Yamashita R, *et al.* PCBs and PBDEs in microplastic particles and zooplankton in open water in the Pacific Ocean and around the coast of Japan [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **151**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110806.
 - [24] Awasthi S, Srivastava N, Singh T, *et al.* Biodegradation of thermally treated low density polyethylene by fungus *Rhizopus oryzae* NS 5 [J]. *3 Biotech*, 2017, **7**(1), doi: 10.1007/s13205-017-0699-4.
 - [25] Song Y K, Hong S H, Jang M, *et al.* Combined effects of UV exposure duration and mechanical abrasion on microplastic fragmentation by polymer type [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(8): 4368-4376.
 - [26] Kazour M, Jemaa S, Issa C, *et al.* Microplastics pollution along the Lebanese coast (Eastern Mediterranean Basin): occurrence in surface water, sediments and biota samples [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **696**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133933.
 - [27] Scheurer M, Bigalke M. Microplastics in Swiss floodplain soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(6): 3591-3598.
 - [28] Sorasan C, Edo C, González-Pleiter M, *et al.* Ageing and fragmentation of marine microplastics [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **827**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154438.
 - [29] Corcoran P L, Biesinger M C, Griff M. Plastics and beaches: a degrading relationship [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, **58**(1): 80-84.
 - [30] de Oliveira T A, Barbosa R, Mesquita A B S, *et al.* Fungal degradation of reprocessed PP/PBAT/thermoplastic starch blends [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, **9**(2): 2338-2349.
 - [31] Peng B Y, Su Y M, Chen Z B, *et al.* Biodegradation of polystyrene by dark (*Tenebrio obscurus*) and yellow (*Tenebrio molitor*) mealworms (Coleoptera: Tenebrionidae) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(9): 5256-5265.
 - [32] Cai L Q, Wang J D, Peng J P, *et al.* Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan City, China: preliminary research and first evidence [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(32): 24928-24935.
 - [33] Shah A A, Hasan F, Hameed A, *et al.* Biological degradation of plastics: a comprehensive review [J]. *Biotechnology Advances*, 2008, **26**(3): 246-265.
 - [34] Zhang G S, Liu Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in Southwestern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **642**: 12-20.
 - [35] Blasing M, Amelung W. Plastics in soil: analytical methods and possible sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 422-435.
 - [36] Allen N S, Edge M, Mohammadian M, *et al.* Hydrolytic degradation of poly(ethylene terephthalate): importance of chain scission versus crystallinity [J]. *European Polymer Journal*, 1991, **27**(12): 1373-1378.
 - [37] Born M P, Brüll C. From model to nature — a review on the transferability of marine (micro-) plastic fragmentation studies [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **811**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151389.
 - [38] Gewert B, Plassmann M, Sandblom O, *et al.* Identification of chain scission products released to water by plastic exposed to ultraviolet light [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5**(5): 272-276.
 - [39] Yousif E, Haddad R. Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review [J]. *SpringerPlus*, 2013, **2**, doi: 10.1186/2193-1801-2-398.
 - [40] Owen E D. Degradation and stabilisation of PVC [M]. Dordrecht: Springer, 1984.
 - [41] Sayler G S, Sanseverino J, Davis K L. Biotechnology in the sustainable environment [M]. New York: Springer, 1997.
 - [42] Nagy T T, Iván B, Turcsányi B, *et al.* Crosslinking, scission and benzene formation during PVC degradation under various conditions [J]. *Polymer Bulletin*, 1980, **3**(11): 613-620.
 - [43] Muhonja C N, Makonde H, Magoma G, *et al.* Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite

- Nairobi-Kenya[J]. PloS one, 2018, **13**(7), doi: 10.1371/journal.pone.0198446.
- [44] Brandon A M, Gao S H, Tian R M, *et al.* Biodegradation of polyethylene and plastic mixtures in mealworms (larvae of *Tenebrio molitor*) and effects on the gut microbiome [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(11): 6526-6533.
- [45] Tischler D, Eulberg D, Lakner S, *et al.* Identification of a novel self-sufficient styrene monooxygenase from *rhodococcus opacus* 1CP[J]. Journal of Bacteriology, 2009, **191**(15): 4996-5009.
- [46] Yoshida S, Hiraga K, Takehana T, *et al.* A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate) [J]. Science, 2016, **351**(6278): 1196-1199.
- [47] Then J, Wei R, Oeser T, *et al.* A disulfide bridge in the calcium binding site of a polyester hydrolase increases its thermal stability and activity against polyethylene terephthalate[J]. FEBS Open Bio, 2016, **6**(5): 425-432.
- [48] Fan P, Yu H, Xi B D, *et al.* A review on the occurrence and influence of biodegradable microplastics in soil ecosystems; are biodegradable plastics substitute or threat? [J]. Environment International, 2022, **163**, doi: 10.1016/j.envint.2022.107244.
- [49] Paço A, Duarte K, da Costa J P, *et al.* Biodegradation of polyethylene microplastics by the marine fungus *Zalerion maritimum*[J]. Science of the Total Environment, 2017, **586**: 10-15.
- [50] Shimpi N, Borane M, Mishra S, *et al.* Biodegradation of isotactic polypropylene (iPP)/poly (lactic acid) (PLA) and iPP/PLA/nano calcium carbonates using *Phanerochaete chrysosporium*[J]. Advances in Polymer Technology, 2018, **37**(2): 522-530.
- [51] Giacomucci L, Raddadi N, Soccio M, *et al.* Polyvinyl chloride biodegradation by *Pseudomonas citronellolis* and *Bacillus flexus* [J]. New Biotechnology, 2019, **52**: 35-41.
- [52] Delacuvellerie A, Cyriaque V, Gobert S, *et al.* The plastisphere in marine ecosystem hosts potential specific microbial degraders including *Alcanivorax borkumensis* as a key player for the low-density polyethylene degradation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, **380**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120899.
- [53] Yang Y, Yang J, Wu W M, *et al.* Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating mealworms; part 2. role of gut microorganisms [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(20): 12087-12093.
- [54] Kumari A, Chaudhary D R, Jha B. Destabilization of polyethylene and polyvinylchloride structure by marine bacterial strain [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(2): 1507-1516.
- [55] Müller R J, Schrader H, Profe J, *et al.* Enzymatic degradation of poly(ethylene terephthalate): rapid hydrolyse using a hydrolase from *T. Fusca* [J]. Macromolecular Rapid Communications, 2005, **26**(17): 1400-1405.
- [56] Zhang K, Xiong X, Hu H J, *et al.* Occurrence and characteristics of microplastic pollution in Xiangxi bay of Three Gorges Reservoir, China [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(7): 3794-3801.
- [57] 李文华, 简敏菲, 余厚平, 等. 鄱阳湖流域饶河龙口入湖段优势淡水鱼类对微塑料及重金属污染物的生物累积[J]. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 357-369.
- Li W H, Jian M F, Yu H P, *et al.* Bioaccumulation effects of microplastics and heavy metals pollutants in the dominant freshwater fish species in the Longkou entry of Raohe River, Lake Poyang Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, **32**(2): 357-369.
- [58] Chang X, Fang Y, Wang Y, *et al.* Microplastic pollution in soils, plants, and animals: a review of distributions, effects and potential mechanisms [J]. Science of the Total Environment, 2022, **850**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157857.
- [59] 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.
- [60] Veerasingam S, Saha M, Suneel V, *et al.* Characteristics, seasonal distribution and surface degradation features of microplastic pellets along the Goa Coast, India [J]. Chemosphere, 2016, **159**: 496-505.
- [61] 李文华, 简敏菲, 余厚平, 等. 鄱阳湖“五河”入湖口沉积物中微塑料污染物的特征及其时空分布[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 397-406.
- Li W H, Jian M F, Yu H P, *et al.* Characteristics of microplastic pollution and temporal-spatial distribution in the sediments of the five rivers in the Lake Poyang Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(2): 397-406.
- [62] Long X, Fu T M, Yang X, *et al.* Efficient atmospheric transport of microplastics over Asia and adjacent oceans [J]. Environmental Science & Technology, 2022, **56**(10): 6243-6252.
- [63] Barnes D K A, Galgani F, Thompson R C, *et al.* Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2009, **364**(1526): 1985-1998.
- [64] Wang W F, Ndungu A W, Li Z, *et al.* Microplastics pollution in inland freshwaters of China: a case study in urban surface waters of Wuhan, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **575**: 1369-1374.
- [65] Yuan W K, Liu X N, Wang W F, *et al.* Microplastic abundance, distribution and composition in water, sediments, and wild fish from Poyang Lake, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **170**: 180-187.
- [66] Fischer E K, Paglialonga L, Czech E, *et al.* Microplastic pollution in lakes and lake shoreline sediments -a case study on Lake Bolsena and Lake Chiuse (central Italy) [J]. Environmental Pollution, 2016, **213**: 648-657.
- [67] 李文刚, 简敏菲, 聂佳敏, 等. 鄱阳湖湿地水土环境中微塑料的时空分布及多源性[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(10): 2862-2870.
- Li W G, Jian M F, Nie J M, *et al.* Spatiotemporal distribution and multi-source characteristics of microplastics in the soil and water environment of Poyang Lake Wetland, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, **33**(10): 2862-2870.
- [68] Su L, Xue Y G, Li L Y, *et al.* Microplastics in Taihu Lake, China [J]. Environmental Pollution, 2016, **216**: 711-719.
- [69] Wang W F, Yuan W K, Chen Y L, *et al.* Microplastics in surface waters of Dongting Lake and Hong Lake, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **633**: 539-545.
- [70] Eriksen M, Mason S, Wilson S, *et al.* Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, **77**(1-2): 177-182.
- [71] Free C M, Jensen O P, Mason S A, *et al.* High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake [J].

- Marine Pollution Bulletin, 2014, **85**(1): 156-163.
- [72] 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.
- [73] Zhao S Y, Zhu L X, Li D J. Microplastic in three urban estuaries, China[J]. Environmental Pollution, 2015, **206**: 597-604.
- [74] Lechner A, Keckeis H, Lumesberger-Loisl F, *et al.* The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river [J]. Environmental Pollution, 2014, **188**: 177-181.
- [75] Mani T, Hauk A, Walter U, *et al.* Microplastics profile along the Rhine River [J]. Scientific Reports, 2015, **5**, doi: 10.1038/srep17988.
- [76] Sadri S S, Thompson R C. On the quantity and composition of floating plastic debris entering and leaving the Tamar Estuary, Southwest England [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **81**(1): 55-60.
- [77] Kang J H, Kwon O Y, Lee K W, *et al.* Marine neustonic microplastics around the southeastern coast of Korea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **96**(1-2): 304-312.
- [78] 朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 等. 长江口潮流表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2067-2074.
- Zhu X T, Yi J, Qiang L Y, *et al.* Distribution and settlement of microplastics in the surface sediment of Yangtze Estuary [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2067-2074.
- [79] Klein S, Worch E, Knepper T P. Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine-Main area in Germany [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(10): 6070-6076.
- [80] Lee J, Hong S, Song Y K, *et al.* Relationships among the abundances of plastic debris in different size classes on beaches in South Korea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, **77**(1-2): 349-354.
- [81] Zhang K, Su J, Xiong X, *et al.* Microplastic pollution of lakeshore sediments from remote lakes in Tibet Plateau, China [J]. Environmental Pollution, 2016, **219**: 450-455.
- [82] Schmidt C, Krauth T, Wagner S. Correction to export of plastic debris by rivers into the sea [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(2): 927-927.
- [83] Mai L, Sun X F, Xia L L, *et al.* Global riverine plastic outflows [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(16): 10049-10056.
- [84] Talvitie J, Mikola A, Koistinen A, *et al.* Solutions to microplastic pollution-removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies [J]. Water Research, 2017, **123**: 401-407.
- [85] 陈瑀, 张宴, 苏良湖, 等. 南京城市污水处理厂中微塑料的赋存特征[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(9): 3835-3841.
- Chen Y, Zhang Y, Su L H, *et al.* Occurrence characteristics of microplastics in Nanjing urban wastewater treatment plant [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(9): 3835-3841.
- [86] Tong H Y, Jiang Q Y, Hu X S, *et al.* Occurrence and identification of microplastics in tap water from China [J]. Chemosphere, 2020, **252**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126493.
- [87] Kosuth M, Mason S A, Wattenberg E V. Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt [J]. PLoS One, 2018, **13**(4), doi: 10.1371/journal.pone.0194970.
- [88] Ma B W, Xue W J, Ding Y Y, *et al.* Removal characteristics of microplastics by Fe-based coagulants during drinking water treatment [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, **78**: 267-275.
- [89] Pivokonsky M, Cermakova L, Novotna K, *et al.* Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water [J]. Science of the Total Environment, 2018, **643**: 1644-1651.
- [90] Boucher J, Friot D. Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources [M]. Gland: IUCN, 2017.
- [91] Browne M A, Crump P, Niven S J, *et al.* Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(21): 9175-9179.
- [92] Zhao S Y, Zhu L X, Li D J. Characterization of small plastic debris on tourism beaches around the South China Sea [J]. Regional Studies in Marine Science, 2015, **1**: 55-62.
- [93] Yu X B, Peng J P, Wang J D, *et al.* Occurrence of microplastics in the beach sand of the Chinese inner sea: the Bohai Sea [J]. Environmental Pollution, 2016, **214**: 722-730.
- [94] Kim I S, Chae D H, Kim S K, *et al.* Factors influencing the spatial variation of microplastics on high-tidal coastal beaches in Korea [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2015, **69**(3): 299-309.
- [95] Cheung P K, Cheung L T O, Fok L. Seasonal variation in the abundance of marine plastic debris in the estuary of a subtropical macro-scale drainage basin in South China [J]. Science of the Total Environment, 2016, **562**: 658-665.
- [96] Dubaish F, Liebezeit G. Suspended microplastics and black carbon particles in the jade system, southern North Sea [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2013, **224**(2), doi: 10.1007/s11270-012-1352-9.
- [97] de Lucia G A, Caliani I, Marra S, *et al.* Amount and distribution of neustonic micro-plastic off the western Sardinian coast (central-western Mediterranean Sea) [J]. Marine Environmental Research, 2014, **100**: 10-16.
- [98] Lusher A L, Burke A, O'Connor I, *et al.* Microplastic pollution in the northeast Atlantic Ocean: validated and opportunistic sampling [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **88**(1-2): 325-333.
- [99] Cole M, Webb H, Lindeque P K, *et al.* Isolation of microplastics in biota-rich seawater samples and marine organisms [J]. Scientific Reports, 2014, **4**, doi: 10.1038/srep04528.
- [100] Frias J P G L, Gago J, Otero V, *et al.* Microplastics in coastal sediments from southern Portuguese shelf waters [J]. Marine Environmental Research, 2016, **114**: 24-30.
- [101] Qiu Q X, Peng J P, Yu X B, *et al.* Occurrence of microplastics in the coastal marine environment: first observation on sediment of China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, **98**(1-2): 274-280.
- [102] Ng E L, Lwanga E H, Eldridge S M, *et al.* An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems [J]. Science of the Total Environment, 2018, **627**: 1377-1388.
- [103] Nizzetto L, Bussi G, Futter M N, *et al.* A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2016, **18**(8): 1050-1059.
- [104] Fuller S, Gautam A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(11): 5774-5780.
- [105] Mazzon M, Gioacchini P, Montecchio D, *et al.* Biodegradable plastics: effects on functionality and fertility of two different soils

- [J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, **169**, doi: 10.1016/j.apsoil.2021.104216.
- [106] Rillig M C, Ziersch L, Hempel S. Microplastic transport in soil by earthworms[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-01594-7.
- [107] Brahney J, Mahowald N, Prank M, *et al.* Constraining the atmospheric limb of the plastic cycle[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, **118**(16), doi: 10.1073/pnas.2020719118.
- [108] Klein M, Fischer E K. Microplastic abundance in atmospheric deposition within the metropolitan area of Hamburg, Germany [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **685**: 96-103.
- [109] Bergmann M, Mützel S, Primpke S, *et al.* White and wonderful? Microplastics prevail in snow from the Alps to the Arctic[J]. *Science Advances*, 2019, **5**(8), doi: 10.1126/sciadv.aax1157.
- [110] Allen S, Allen D, Phoenix V R, *et al.* Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment [J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(5): 339-344.
- [111] Bullard J E, Ockelford A, O'Brien P, *et al.* Preferential transport of microplastics by wind [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **245**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118038.
- [112] Aves A R, Revell L E, Gaw S, *et al.* First evidence of microplastics in Antarctic snow[J]. *The Cryosphere*, 2022, **16**(6): 2127-2145.

《环境科学》连续 11 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2022 年 12 月 5 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2022 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果,《环境科学》荣获“2022 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 11 次获此殊荣。评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”。

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter ...	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil ...	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)