

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展	陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓 (1201)
全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展	孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙 (1214)
湖泊水质参数遥感监测研究进展	王思梦, 秦伯强 (1228)
淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展	赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超 (1244)
长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应	吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋 (1258)
中国土地利用碳排放变化及协调分区	李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯 (1267)
基于 STIRPAT 模型天津减污降碳协同效应多维度分析	刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛 (1277)
基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势	佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧 (1287)
浙江省大气颗粒物 PM _{2.5} 化学组分污染特征分析	周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳峰, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静 (1297)
南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源	徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕 (1310)
洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献	闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思 (1319)
江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征	宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜 (1328)
珠三角典型工业区挥发性有机物 (VOCs) 组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性	宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏 (1336)
2000 ~ 2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变	孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧 (1346)
港口自有移动源大气污染物排放清单	徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺 (1357)
基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控	欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙 (1368)
黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估	曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建 (1378)
桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征	余悦, 邢新丽, 程敏, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华 (1387)
广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析	陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成 (1397)
宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评价	徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军 (1407)
典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析	王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫 (1416)
车汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁 (1429)
石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析	丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞 (1440)
北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析	温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞 (1452)
拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价	单涛, 袁安龙, 黄子茜, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文 (1465)
南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素	高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔 (1475)
调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素	丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文 (1484)
典型城市内河细菌群落组成与氮循环功能垂直分布及溯源分析	谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晓艳, 郭蕾 (1497)
滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算	郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中 (1508)
窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制	曾少毅, 李坤权 (1519)
高比表面疏脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附	闵炳坤, 李坤权 (1528)
不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征	刘晨旭, 白晓慧 (1537)
水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析	杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕 (1542)
增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响	邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章 (1553)
三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化	李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源 (1562)
鄱阳湖平原直播稻 CH ₄ 通量及其与 CO ₂ 通量的综合温室效应	时元智, 崔远来, 时硕, 洪大林, 程婕 (1572)
不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析	周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君 (1583)
石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估	李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建升 (1593)
南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价	杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清 (1602)
三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析	石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然 (1611)
兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析	康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林 (1620)
粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价	王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨 (1636)
三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳 (1646)
某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价	王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东 (1657)
化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制	马强, 卫泽斌, 吴启堂 (1668)
再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制	林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞 (1678)
长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评价	刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红 (1686)
稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应	张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚 (1698)
巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性	冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕 (1706)
蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与韭菜修复铅镉污染土壤的影响	陈敏妮, 袁小奇, 张金峰, 何川黔, 高波 (1714)
地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议	王锐, 李瑜, 余京, 周蛟, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (1727)
张家口市北新屯地区蔬菜种植区锆元素富集特征及成因分析	安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原 (1735)
三峡库区消落带落叶杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化	谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓 (1748)
黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响	张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平 (1758)
化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响	王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明 (1768)
鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化	张丹, 彭双, 王丹青, 王一鸣, 林先贵 (1780)
牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响	张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林 (1792)
《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)	

淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展

赵伟高¹, 田一梅¹, 赵鹏¹, 赵令铵², 金超^{2*}

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275)

摘要: 微塑料(尺寸<5 mm的塑料)作为全球备受关注的新兴污染物,广泛存在于淡水环境中。微塑料易迁移,难降解,且比表面积大,对重金属等多种污染物有富集作用,大大增加了其对环境和生态的潜在危害。因此,本文首先定义微塑料在淡水环境中携带重金属并共同迁移的特殊环境行为为“木马效应”。随后,从淡水环境中微塑料的来源与分布、微塑料对重金属的富集作用、微塑料与重金属木马效应对其共同迁移行为的影响以及微塑料和重金属木马效应的生物影响这4个方面对淡水环境中微塑料与重金属的木马效应及其作用机制进行了总结和阐述。结果表明,作为面源广的污染物,微塑料广泛存在于淡水环境中;淡水环境中微塑料对重金属存在吸附行为,不同环境下对单一重金属吸附程度不同,主要受微塑料、金属和环境等因素共同影响,在多种重金属离子存在时会有竞争吸附;微塑料与重金属的木马效应会影响其共迁移行为;淡水环境中微塑料与重金属的木马效应,往往加剧了其对水生生物的毒性。通过全面了解淡水环境中微塑料与重金属的木马效应及其作用机制,可有效降低微塑料与重金属在淡水环境中的生态风险和对人类健康的影响提供借鉴。

关键词: 微塑料; 重金属; 淡水环境; 木马效应; 共迁移

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1244-14 DOI: 10.13227/j.hjkk.202202118

Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment

ZHAO Wei-gao¹, TIAN Yi-mei¹, ZHAO Peng¹, ZHAO Ling-an², JIN Chao^{2*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: As an emerging pollutant of global concern, microplastics (plastics with size <5 mm) and heavy metals are widely found in freshwater environments. Microplastics migrate easily, are difficult to degrade, and have large specific surface areas. They can enrich a variety of pollutants such as heavy metals and greatly increase their potential harm to the environment and ecology. Firstly, the special environmental behavior of microplastics carrying heavy metals and migrating together in freshwater environments was defined as the “Trojan-horse effect.” Then, the Trojan-horse effect and its mechanism of microplastics and heavy metals in the freshwater environment were summarized and expounded from four aspects: the source and distribution of microplastics in the freshwater environment, the enrichment effect of microplastics on heavy metals, the impact of microplastics and the heavy metal Trojan-horse effect on its migration behavior, and the biological impact of microplastics and the heavy metal Trojan-horse effect. The results showed that, as a wide range of non-point source pollutants, microplastics widely existed in freshwater environments. In freshwater environments, the adsorption degree of single metals was different in different environments. It was mainly affected by microplastics, metals, and environmental factors. There was competitive adsorption in the presence of multiple metal ions. The Trojan-horse effect of microplastics and heavy metals could also affect their co-transport behavior. The Trojan-horse effect of microplastics and heavy metals in the freshwater environment frequently exacerbated their toxicity to aquatic organisms. This study provides references for comprehensively understanding the Trojan-horse effect and its mechanism in microplastics and heavy metals in the freshwater environment, which could effectively reduce the ecological risk and impact on human health of microplastics and heavy metals in the freshwater environment.

Key words: microplastics; heavy metals; freshwater environment; Trojan-horse effect; co-transport

塑料广泛应用于各个行业和日常生活中,给人的生产生活带来诸多便利的同时也造成了巨大的塑料污染问题。根据中国物资再生协会统计分析,2019年全国废塑料产生量为6 300万 t,回收量仅占产生量的30%。废塑料有各种形状和尺寸,其中直径尺寸小于5 mm的塑料颗粒或塑料碎片被定义为“微塑料”^[1]。作为当前备受关注的新兴污染物,微塑料在海洋、河流、土壤和大气,甚至饮用水中陆续被发现^[2~5]。

微塑料包括初级微塑料和次级微塑料^[6]。初级微塑料是指用于护肤品、化妆品、洗涤剂和医疗用品等的塑料微珠,次级微塑料是由直接暴露环境中的大块塑料经过风化和光氧化等作用,破裂分解产生的大量的小塑料碎片^[6,7]。微塑料颗粒在塑料

加工厂附近的环境中尤为常见,而洗涤剂或塑料微珠可能存在于工业和生活污水中,它们可通过河流和河口进入自然环境。

近十年关于微塑料的研究主要集中在海洋环境中^[6,8],但淡水环境中的微塑料污染同样不容小觑。有研究发现,水环境中微塑料丰度自水库、河流、河口区、海岸和海洋依次降低,说明内陆水体是微塑料从陆地向海洋环境迁移的重要途径^[9]。微塑料可以有效地保留在河流中,更少流入海洋,有淡水环

收稿日期: 2022-02-17; 修订日期: 2022-06-22

作者简介: 赵伟高(1990~),男,工学博士,助理研究员,主要研究方向为淡水环境微塑料污染环境效应, E-mail: zhaoweigao@tju.edu.cn

* 通信作者, E-mail: jinchao3@mail.sysu.edu.cn

境中的微塑料浓度远高于海洋环境^[10]. 另外, 由于微塑料本身具有尺寸小、比表面大和疏水性强等特点, 有较强的吸附性和迁移能力, 被认为是环境中许多污染物的理想载体^[11]. 目前, 在鄱阳湖等淡水水体中已经发现了微塑料和重金属的吸附积累现象, 对水生生物存在潜在风险^[12-14]. 重金属是淡水生态系统的重要污染物, 这两种污染物之间的相互作用可能对水生生态系统安全造成严重的威胁^[5,15,16]. 在淡水环境中, 微塑料可能作为载体对重金属产生吸附、富集和迁移作用, 随着微塑料的迁移^[17], 负载着重金属的微塑料可能被释放到新的地点, 甚至在传递到生物体内^[18-20]. 本文将微塑料的这种环境行为定义为“木马效应”.

近年来关于微塑料的污染问题得到了广泛关注, 表 1 借助 CiteSpace 软件对微塑料的综述类文献进行了关键词计量研究, 对相关的关键词及其相关年份等进行了深入分析, 结果显示近年来学者们对于微塑料对海洋类生物产生的毒性以及微塑料产生的污染关注较多. 图 1 为 CiteSpace 软件生成的中国知网关于微塑料的关键词时间线谱图, 将关键词划分为 10 个类别, 其中展示了 10 个类别中每个关键词的发展情况. 其中上方年份为关键词首次出现的年份, 根据时间线可看出关于微塑料研究的发展历

程. 结合图 1 和表 1 可得到以下结论: ①目前关于微塑料的研究在主要集中于海洋环境与土壤环境, 关于淡水环境中微塑料与重金属的联合作用是一个空白领域; ②现有研究主要停留在实验室模拟环境条件, 真实环境下的研究相对匮乏; ③由于海洋生物会携带微塑料进入到生物链, 危害人体健康, 因此目前关于微塑料对海洋生物造成的污染研究热度较高. 结合现有研究进度, 本篇综述着重分析淡水环境下的微塑料与重金属的木马效应及作用机制, 旨在为有效降低微塑料与重金属在淡水环境中的生态风险和对人类健康的影响提供支持.

表 1 网站 Web of Science 以微塑料为关键词的综述类文献中被引次数最多的 7 个关键词

Table 1 Top seven most cited keywords in the review literature with microplastics as the key words on the “Web of Science” website				
关键词	年份	强度 ¹⁾	开始年份	结束年份
贝壳类	2016	1.41	2016	2017
污染物	2016	1.21	2017	2018
蠕虫属	2016	1.19	2017	2018
残骸摄入	2016	1.4	2018	2019
塑料粒径	2016	1.29	2019	2021
鱼类	2016	1.2	2019	2021
毒性	2016	1.03	2019	2021

1) “强度”数值越大, 则该关键词在对应年份关注度越高

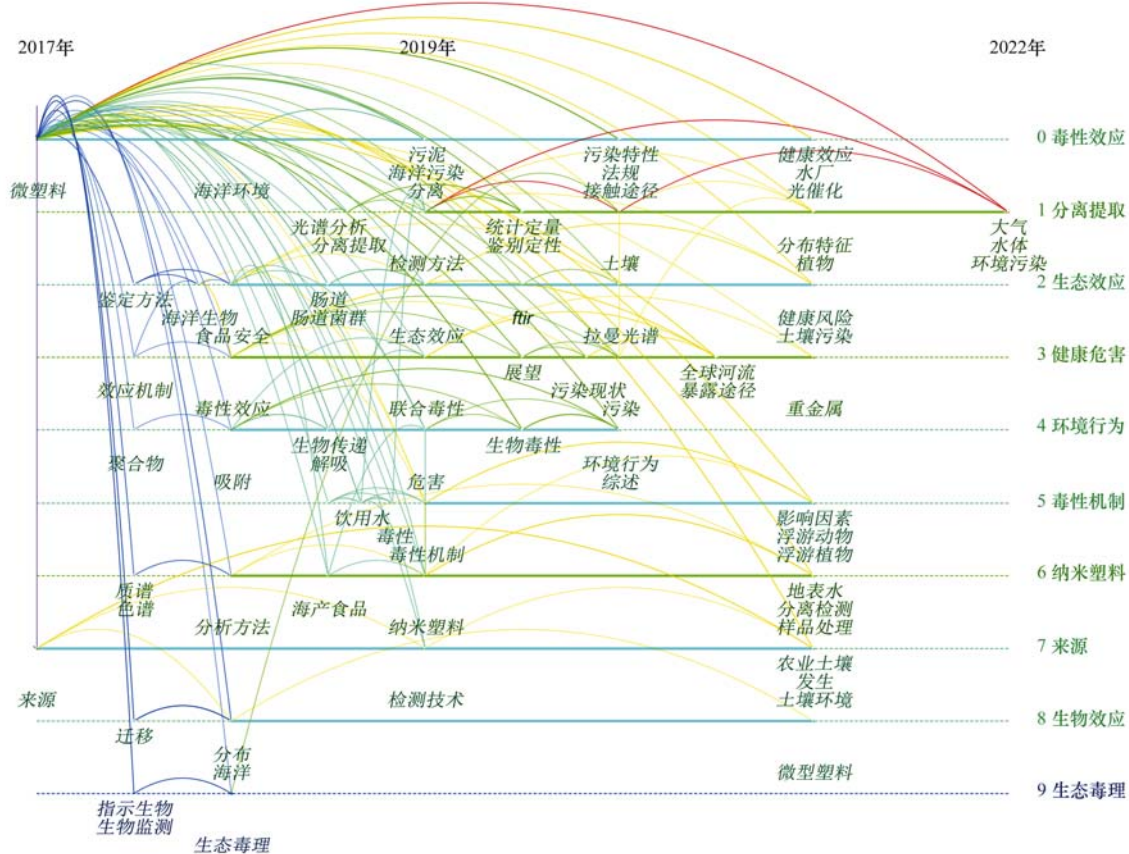


图 1 中国知网近 5 年以微塑料为关键词的综述关键词热度

Fig. 1 Review on microplastics in China National Knowledge Infrastructure in the past five years

通过查阅 ISI Web of Knowledge (<http://apps.webofknowledge.com>) 等网站,以“微塑料”和“重金属”为关键词进行检索,仅能获得 9 篇关于微塑料的综述.其中,Bradney 等^[21]和 Brewer 等^[22]主要论述了微塑料对人类健康的潜在威胁;Cheng 等^[23]介绍了微塑料在环境、能源及健康方面的应用;关于微塑料的风险性评估也是研究热度较高的方向,例如 Deidda 等^[24]分析了微塑料对无脊椎动物的毒性,Zhang^[25]主要针对微塑料作为一种吸附剂的潜在利用性研究.综上,目前关于微塑料与重金属木马效应和作用机制的课题还没有全面和系统的研究综述.本文结合国内外研究现状,着重论述了淡水环境中微塑料与重金属的木马效应和作用机制.淡水环境中微塑料和重金属是重要的污染物,淡水环境关乎取水水源安全,本文着眼于淡水环境中微塑料对重金属的特洛伊木马效应,从淡水环境中微塑料的来源与分布、微塑料对重金属的富集作用、微塑料与重金属木马效应对其共同迁移行为的影响以及微塑料和重金属木马效应的生物影响这 4 个方面进行总结.

1 淡水环境中微塑料的来源与分布

1.1 淡水环境中微塑料的来源

淡水环境主要包括河流、湖泊和地下水体等水环境^[26].2017 年,世界范围内将塑料垃圾带入海洋的前 20 条河流中,我国有 7 条分别是长江、西江、黄浦江、东江、珠江、汉江和淡水河^[27](见表 2).可以看出,我国是塑料排放大国,但关于河流中微塑料的治理却相对匮乏.我国河流中微塑料的来源主要是来自污水厂的出水.一方面,我国污水处理厂对微塑料的去除率不高;另一方面,由于污水处理厂本身的出水总量大,即使去除率提高,由于出水量基数大仍旧会排放大量的微塑料颗粒到河流中.污水处理厂是微塑料的处理点,同时也可能是微塑料的排放点.有研究表明,污水处理厂的二级处理工艺能截留 95% 以上的微塑料,饮用水厂能去除 99% 的微塑料^[28,29].在国内,位于广州的污水处理厂对微塑料的去除率均值为 44.3%,远低于国外^[30].因为目前污水处理厂的工艺并不是为了去除微塑料而设计的,所以污水处理厂出水 and 沉淀污泥仍含有一定量的微塑料^[31],Li 等^[32]的研究表明,污水处理后污泥中微塑料对金属污染物吸附能力有可能增强.Mintenig 等^[33]预计每个污水处理厂的塑料颗粒和纤维每年总排放量为 $9 \times 10^7 \sim 4 \times 10^9$ 个,数量庞大,由于不断排放大量处理后的污水,外运大量污泥,即使是工艺先进的污水处理厂,也很可能成为微

塑料进入淡水环境的重要来源^[34].鉴于微塑料的强大危害,可以将微塑料作为污水处理厂出水的一项排放指标,在处理工艺方面做出相应的调整,这样就可以有效减少淡水环境中微塑料的来源.当前过滤(砂滤、轮盘过滤器)仍是处理微塑料最经济、最直接有效的手段^[35],这是一条从根本上减少淡水环境中微塑料的措施.近期有学者研究发现污水处理厂的中试规模超滤系统的耦合效应及三级处理的先进技术可大幅去除废水中的微塑料污染^[36].北美五大湖泊中微塑料的研究发现丰度大于 10^5 个 $\cdot\text{km}^{-2}$ ^[37],同时,在中国的洞庭湖、鄱阳湖、洪湖和太湖等湖泊也发现微塑料的丰度高达 $10^3 \sim 10^4$ 个 $\cdot\text{m}^{-3}$ ^[37~40],即使在人迹罕至的青藏高原湖泊中也发现高达 10^5 个 $\cdot\text{km}^{-2}$ ^[41].这些微塑料主要是源于人类日常使用的塑料制品、大气传输或洗涤废水进入湖泊等,致使湖泊中含有较大量级的微塑料丰度^[40].然而,Meijer 等^[26]通过模型预测排放微塑料排名前 50 的河流,发现菲律宾的帕西格河现在是海洋微塑料污染最严重的河流,超过 1 000 条河流占全球河流塑料排放量的 80%,且模型预测的微塑料排放量排名前的河流与 2017 年 Lebreton 等^[27]实际调研河流微塑料排放量排名存在一定的差异,这可能是由于理论预测不能全面地考虑实际情况造成的,但理论预测一定程度也能为全球进一步加强海洋及河流微塑料污染提供参考信息.

关于地下水中微塑料的来源研究较为缺乏,目前学者们对海水环境的关注度较高,对地下水的研究相对匮乏.已被证实地下水中存在微塑料,微塑料进入地下水体的方式有多种,一般认为土壤中微塑料的垂直迁移以及地表水和地下水交换是地下水体中微塑料的重要来源.其次,微塑料体积小,土壤中的某些生物(蚯蚓)活动也可能导致微塑料通过土壤或某些生物洞穴进入土壤深层,从而侵入地下水体.此外,Re^[42]提出了一种潜在的微塑料迁移机制,工业工程和污水处理厂的出水一般排在河流系统中,在失去补给地下水水流的情况下,通过地表水的相互作用进入地下水环境,也有少部分直接将受污染水体注入地下水系统.

1.2 淡水环境中微塑料的分布

在家庭生活和企业生产过程中,污水处理厂对微塑料的处理效率还有待提高,其排放水中的微塑料丰度仍处于较高水平,废塑料容易被直接排放到陆地或内陆水体,因而淡水通常比海水更接近塑料来源,可能积累更多的微塑料.罗文雅^[43]的研究表明,淡水水域中微塑料丰度 ($1\,800 \sim 2\,400$ 个 $\cdot\text{m}^{-3}$) 明显高于河口及近海水域 (900 个 $\cdot\text{m}^{-3}$),微塑料很

可能从城市河网向海洋汇集. 徐慧韬^[44]的研究发现, 浙江省主要入海河流的微塑料检出率为 100%. 在 Lin 等^[30]的研究中, 珠江流域的微塑料污染情况同样严重, 最高丰度达到了 $7\,924\text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$. 当前, 越来越多的学者在河流、湖泊、水库、地下水环境^[45]和污水处理厂进出水^[29,30,46], 甚至在居民饮用水中也发现了微塑料^[47,48], 表明微塑料广泛存在于淡水环境中.

表 2 将塑料垃圾带入海洋的前 20 条河流¹⁾

Table 2 Top 20 rivers carrying plastic waste to the ocean

河流	国家或地区	中点输入估算 / $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	流域面积 / km^2
长江	中国	3.33×10^5	1.91×10^6
恒河	印度和孟加拉国	1.15×10^5	1.57×10^5
西江	中国	7.39×10^4	3.89×10^5
黄浦江	中国	4.08×10^4	2.62×10^4
克罗斯河	尼日利亚和喀麦隆	4.03×10^4	2.38×10^3
布兰塔斯河	印度尼西亚	3.89×10^4	1.11×10^4
亚马逊河	巴西、秘鲁、哥伦比亚和厄瓜多尔	3.89×10^4	5.91×10^6
巴石河	菲律宾	3.88×10^4	4.07×10^3
伊洛瓦底江	缅甸	3.53×10^4	3.77×10^5
梭罗河	印度尼西亚	3.25×10^4	1.58×10^4
湄公河	泰国、柬埔寨、老挝、中国、缅甸和越南	2.28×10^4	7.74×10^5
伊莫河	尼日利亚	2.15×10^4	7.92×10^3
东江	中国	1.91×10^4	3.33×10^4
塞拉尤河	印度尼西亚	1.71×10^4	3.71×10^3
马格达莱纳河	哥伦比亚	1.67×10^4	2.61×10^5
淡水河	中国台湾	1.47×10^4	2.68×10^3
珠江	中国	1.36×10^4	4.01×10^3
汉江	中国	1.29×10^4	2.95×10^4
普罗戈河	印度尼西亚	1.28×10^4	2.24×10^3
阿夸伊博姆河	尼日利亚	1.19×10^4	3.63×10^3

1) 中点输入估算: $M_{\text{OUT}} = K(M_{\text{MPW}}R)^a$, 式中, M_{OUT} 为流出处的塑料质量释放量, $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$; M_{MPW} 为人工屏障下游集水区内产生的管理不善的塑料废物 (mismanaged plastic waste, MPW) 质量; R 为月平均集水区径流; K 和 a 为回归参数, 此公式为基本公式, 需结合 Lebreton 等^[27] 建立的模型进行计算

如表 3 所示, 微塑料在内陆水体中的分布十分广泛且不受区域限制, 丰度和类型各不相同, 且受多种因素影响. 有研究表明靠近城市或人类聚居地和工农业用途用水的水体受到微塑料污染较为严重^[43,49]. Wang 等^[49]调查发现武汉市湖泊中微塑料丰度最高的北湖和黄子湖位于武汉市中心居民区, Yin 等^[37]调查发现长沙市中心旅游景点跃进湖测得的微塑料丰度最高, 湖泊微塑料丰度与离城市中心的距离呈负相关. 罗文雅^[43]调查发现上海崇明岛农田区中水样的微塑料平均丰度比风景区高出 57%, 浙江省纺织工业区内河道的表层水体和沉积物微塑料丰度分别高达 $2\,100 \sim 71\,000\text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $16.7 \sim 1\,323.3\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 污染尤其集中在纺织厂密集度高的区域, 说明生产活动是淡水环境微塑料污染的主要来源之一. 墨西哥萨瓦潘河和阿托亚克河由于污水处理厂的影响, 微塑料丰度保持较高的水平^[50], McCormick 等^[51]调查发现芝加哥河污水处理厂下游的塑料纤维增加了 10 倍, 污水处理厂附近的淡水生态系统受到了严峻的挑战. 总的来说, 微塑料的分布受多种因素影响, 其中人口密度、区域用地类型

和水文环境等是影响微塑料丰度的主要因素. 如表 3 所示, 在内陆水体中发现的微塑料种类大多数为 PE、PP 和 PS, 类型大多数为微纤维、碎片和薄膜. 聚乙烯和聚丙烯都是常见的进入淡水系统的原生微塑料, 主要来源包括纺织品、个人护理产品和工业原材料等^[52], 纺织品洗涤过程中会排放成千上万个微纤维, 且直径一般小于 $100\text{ }\mu\text{m}$. 性质各具差异的微塑料进入淡水环境后, 容易在水环境中发生漂浮和迁移, 与重金属等污染物结合, 进而造成潜在性的危害. 不同水体和不同水环境中微塑料的丰度、种类是不一样的, 所以微塑料的性质也会存在有一定差异, 因此知晓水体中微塑料的分布是进行本研究的一个前提条件.

2 淡水环境中微塑料与重金属的富集作用

2.1 微塑料对重金属的富集研究现状

目前矿山开采、垃圾填埋和工业废水排放等造成了严峻的重金属污染问题, 重金属在淡水环境中广泛存在^[57]. 微塑料自身具有尺寸小和比表面积大疏水性强等特点, 有较强的吸附性和迁

移能力. 可利用微塑料的自身性质特点吸附水中的重金属, 海洋环境中微塑料对重金属的吸附行为已经被广泛报道. 与海洋环境相似, 在淡水中也观察到微塑料表面吸附的重金属, 目前已有多种

重金属在微塑料中被鉴定出来. 表 4 为部分淡水中微塑料对重金属的富集情况, 受到背景值的影响, 淡水环境中微塑料对重金属的富集甚至可达几万 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[58].

表 3 部分内陆水体微塑料丰度及类型¹⁾

Table 3 Microplastics abundance and types in some inland waters							
研究地点	试样类型	丰度范围	主要塑料类型	颜色	尺寸(占比/%)	主要塑料形状	文献
浙江省河道	表层水体	(2 977.8 ± 2 248.1) n·m ⁻³	PE	总体上绿色 30.1%, 黑色 20.2%, 其他颜色占比差别不大	0~0.5 μm (63.1) 0.5~2.5 μm (35.1)	纤维、碎片和薄膜	[44]
上海市域河道	表层水体	(7 500 ± 2 800) n·m ⁻³	PES 和 PA	透明 84%, 黑色 15%, 红色 1%	<500 μm (44) 500~1 000 μm (31) >1 000 μm (25)	纤维	[53]
上海市域河道	沉积物	(1 575.5 ± 758.4) n·kg ⁻¹	PES、PA 和 PP	—	—	纤维、碎片和颗粒	[53]
上海市崇明岛	表层水体	2 520~12 200 n·m ⁻³	PES	蓝色和红色占 46%~76%	0.1~1 mm (56.7~80.0)	纤维、碎片和薄膜	[43]
武汉市内湖泊	表层水体	1 660~8 925 n·m ⁻³	PET、PP 和 PE	透明 24.7%, 彩色 50.4%~86.9%	<2 mm (>80)	纤维、颗粒和薄膜	[49]
长沙市内湖泊	表层水体	2 200~8 100 n·m ⁻³	PP、PE 和 PS	大部分透明	<2 mm (>89.5)	纤维、薄膜和泡沫	[37]
乌梁素海	表层水体	3 120~11 250 n·m ⁻³	PS、PP 和 PE	—	<2 mm (>98.2)	纤维和球状	[54]
渭河河段	表层水体	3 670~10 700 n·m ⁻³	PVC、PE 和 PP	—	<0.5 mm (40.8~68.8)	纤维、薄膜和碎片	[55]
渭河河段	沉积物	360~1 320 n·kg ⁻¹	PVC、PE 和 PP	—	0.5~1 mm (8.35~27.1)	纤维、薄膜和碎片	[55]
广州市珠江	表层水体	379~7 924 n·m ⁻³	PP、PE 和 PET	白色最多占 65.6%, 还有红、黑、蓝、白、黄、绿和透明	0.02~1 mm (44.8) 1~2 mm (36.5)	纤维和碎片	[30]
广州市珠江	沉积物	80~9 597 n·kg ⁻¹	PE 和 PP	黄色 (36.2%)、白色 (26.8%) 和黑色 (11.7%)	0.02~1 mm (65.3) 1~2 mm (29.5)	纤维和碎片	[30]
鄱阳湖湖口-长江段	沉积物	356~1 452 n·kg ⁻¹	PE	纤维类多为白色和彩色, 薄膜类多为透明和黑色, 碎片类以半透明、黑色及彩色为主	<1 mm (80.68)	碎片、纤维和薄膜	[12]
意大利丘西湖	表层水体	2.68~3.36 n·m ⁻³	PE、P 和 PET	—	—	碎片和纤维	[56]
意大利丘西湖	沉积物	(234 ± 85) n·kg ⁻¹	PE、PP 和 PET	—	—	碎片和纤维	[56]

1) “—”表示文献中未涉及到该项目

表 4 淡水中微塑料对重金属的富集情况

Table 4 Enrichment of heavy metals by microplastics in fresh water				
研究地点	塑料种类	重金属种类	含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	文献
北江	PE 和 PP	Ni	1.33 ± 0.54	[46]
		Cd	8.27 ± 5.44	
		Pb	78.99 ± 28.61	
		Cu	258.90 ± 153.65	
		Zn	8242.65 ± 4020.63	
渭南河下游	PP、PE 和 PS	Cr	2.95 ± 2.96	[47]
		Cu	13.02 ± 18.26	
		Ni	0.78 ± 1.11	
		Pb	17.61 ± 18.26	
渭公河河口	PP 和 PE	Cr	17.30 ± 10.83	[33, 48]
		Cu	14.50 ± 5.35	
		Ni	3.52 ± 2.40	
		Pb	38.67 ± 22.47	
		Cd	2.81 ± 2.05	
鄱阳湖湖口-长江段	PE 和 PA	Zn	391.22 ± 154.10	[9]
		Cu、Cd、Pb、Zn 和 Cr	— ¹⁾	
		Cr、Co、Cu、Cd 和 Mn、Zn	—	
		Zn、Ni、Ce 和 La	—	
		—	—	
澳大利亚布里斯班河	PE、PA 和 PP	Cr、Co、Cu、Cd 和 Mn、Zn	—	[59]
乌梁素海湖	PE、PS 和 PET	Zn、Ni、Ce 和 La	—	[49]

1) “—”表示文献中未涉及到该项目

微塑料能积累周围环境中的重金属, 表面富集的重金属种类和浓度由周围环境主导. 在乌梁素海的微塑料表面检测出了稀土元素, 如铈和镧, 这主要

是由于乌梁素海地区矿区生产废水倾倒入湖, 导致了稀土元素与微塑料的结合^[60]. 李文华等^[12]研究发现在鄱阳湖收集的微塑料表面均吸附了铜、铅、

锌、铬和镉等重金属,且水体沉积物的重金属与微塑料的数量含量普遍存在正相关效应,水体沉积物中的高浓度重金属可能一部分由微塑料富集. Wang 等^[58]研究发现北江沿岸沉积物中的微塑料对镍、镉、铅、铜和锌等重金属有不同程度的富集,这些重金属一部分来自于作为添加剂的固有负载,另一部分是从周围环境中所积累的,在微塑料检测到的重金属浓度均高于微塑料所在的沉积物背景值,微塑料上浓度较高的金属元素在沉积物中含量也相对较多. 因此,微塑料是水体沉积物中富集重金属的重要载体. 然而,在 Ta 等^[61]对湄公河表层水体研究中,与 Cr 和 Ni 相比,Cu 和 Pb 在微塑料表面的吸附量更高,与河水背景值不相对应,这可能是因为微塑料对重金属富集受多因素影响,对不同重金属的吸附能力不同^[62].

2.2 微塑料对重金属富集的影响因素

微塑料对重金属的吸附能力主要受到微塑料的自身性质(种类、表面积、老化与官能团)、重金属离子性质(种类、浓度)和环境因素(pH、离子强度)的影响^[62,63].

2.2.1 微塑料自身性质的影响

微塑料对重金属的吸附作用根据微塑料的类型、尺寸大小和表面性质的不同而不同. 不同微塑料对同种重金属吸附能力不同^[64], Godoy 等^[65]总结了 PE、PP、PS 和 PVC 这 4 种微塑料对大部分重金属有较高的亲和力,但吸附能力各不相同. Lin 等^[66]考察了 3 种微塑料对 Pb 的吸附能力,PVC、PE 和 PS 的最大吸附量分别为 483.1、416.7 和 128.5 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,吸附速率则是 PS 最大,PVC 最小. 表面性质如表面形貌、孔隙率和官能团等是影响吸附的重要因素^[67,68],微塑料的比表面积、孔隙率和吸附能力之间存在正相关关系,有研究表明表面粗糙的微塑料比光滑的微塑料更容易吸附重金属^[65,69].

老化微塑料和纳米级微塑料对淡水中重金属的去向和迁移有重要影响. 在自然环境中微塑料会经历各种老化过程,转化为老化微塑料,与未经处理的原始微塑料相比,风化、紫外辐射和氧化等处理后的老化微塑料对重金属的吸附能力更强. 微塑料经过老化处理后,表面会形成粗糙、裂纹,不仅比表面积增大,而且能与金属离子络合的含氧官能团含量显著增加,随着老化时间的延长,老化微塑料对 Cu、Zn 和 Cd 的吸附能力不断增强^[55,70,71]. 王琼杰等^[72]研究发现单一体系下,相同老化条件下的 PP 和 PE 对 Cu 的吸附量要大于 Zn. 同时,微塑料在环境中还可能不断破碎变小,进一步转化为纳米塑料, Davranche 等^[73]通过实验发现纳米塑

料能吸附 97% 的 Pb,塑料碎片的纳米级尺寸可以使它们成为金属的潜在有效载体. 自然条件下微塑料的种类、表面性质和老化时间等都会影响与重金属的相互作用,探究微塑料在淡水环境中与重金属联合的最佳状态,从而更好地与重金属联合,降低微塑料与重金属在淡水环境中的生态风险和对人类健康的影响.

2.2.2 重金属离子性质的影响

同种微塑料对不同重金属的吸附能力不同,Zou 等^[74]研究发现 Pb 在 PVC 微塑料上的吸附比 Cd 和 Cu 更多. Guan 等^[75]强调了 PS 微塑料可吸附 Co、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Ag 离子,并且对不同的金属离子具有不同的吸附容量. Turner 等^[62]比较了相同时间下 PE 微球对不同重金属的吸附率,其中 Pb、Hg 和 Ag 最大,Co、Cd 和 Cr 最小.

自然环境中微塑料对重金属的富集是一个缓慢长期的过程,在长期实验中没有一种微塑料能对所有金属达到吸附饱和^[76,77],这可能是因为多种重金属共存时,不同重金属离子在微塑料表面形成了竞争吸附,影响微塑料对不同重金属的吸附能力^[78]. 高丰蕾等^[79]研究发现,当溶液中铅离子和铜离子共存时,微塑料对 Pb 的吸附量低于单一铅离子溶液,这表明共存离子间发生了竞争性吸附. 王琼杰等^[72]建立了铜离子和锌离子的复合体系,发现复合体系微塑料所吸收的金属离子浓度低于单一体系,这表明复合体系中存在竞争吸附作用.

2.2.3 环境因素的影响

微塑料对重金属的富集过程很容易受到其他环境介质的影响. Turner 等^[62]研究发现,随着 pH 值增大,聚乙烯微塑料对 Cd、Co、Ni 和 Pb 的吸附增加,对 Cr 的吸附减少,对 Cu 相对不变^[80]. 随着离子强度增大,聚乙烯微塑料对 Cd、Co 和 Ni 的吸附能力下降,而对 Cr 的吸附能力上升,对 Cu 和 Pb 相对不变^[80]. pH 和离子强度变化会影响表面络合、静电相互作用和形成竞争吸附,从而影响微塑料对重金属的吸附^[74,80,81].

温度升高通常会增强微塑料对重金属的吸附,Oz 等^[64]研究发现从 25℃ 升到 55℃,微塑料对 Pb 的吸附量有所上升,升高温度通常降低了微塑料的“玻璃性”,增加了对重金属等污染物的亲和力^[1]. 环境中的某些物质,如抗生素和腐植酸等也会影响微塑料对重金属的富集^[82], Godoy 等^[65]研究了微塑料在蒸馏水、海水、城市废水和灌溉用水条件下对重金属的吸附效果,发现废水和灌溉水中的有机物促进了微塑料对 Pb 和 Cr 的吸附.

3 淡水环境中微塑料与重金属的木马效应对其共同迁移的影响

3.1 微塑料的团聚行为

微塑料在被释放到水环境时会发生团聚,团聚行为不同于富集行为与迁移行为,团聚行为主要指微塑料相互之间的一种聚集行为.但微塑料的聚集行为会影响其迁移能力,一个塑料颗粒的迁移与一群塑料的迁移很明显是不一样的,欲弄清楚微塑料的迁移行为首当其冲的是研究它的团聚行为.淡水环境中微塑料的颗粒大小、离子强度和离子浓度包括水环境中的 pH 都会影响水环境中微塑料的团聚行为.

有研究证实,微塑料在离子浓度 NaCl ($1 \sim 100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 和 CaCl_2 ($0.1 \sim 15 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 溶液中保持稳定,随着水环境中离子强度的增加,微塑料的团聚行为明显增强^[83,84].其原因在于水环境中离子强度增强后,微塑料颗粒间的双电层受到压缩而变薄,表面电荷被屏蔽,微塑料颗粒间的静电排斥力减少,从而易发生团聚行为.另外,有些微塑料颗粒表面存

在羟基和羧基等官能团,官能团之间可能会形成某种化学键,从而使微塑料的团聚行为增强.尤其是微塑料吸附某些有机污染物时,那么相互之间形成化学键的机会大大增加,致使团聚行为更加明显.有研究表明^[85],当水环境中的 pH 值降低时,即水环境中 H^+ 增加时,微塑料表面的官能团会在 H^+ 的作用下发生质子化,结果使微塑料的亲水性降低从而发生团聚行为;与此相反,当水环境中的 pH 值升高时,即水环境的 OH^- 增加,微塑料表面的官能团发生去质子化反应导致表面电负性增加,微塑料颗粒间的静电排斥力增加而不易发生团聚行为.

3.2 微塑料的迁移行为研究

微塑料性质稳定,且密度低,进入内陆水体后难以被降解,可在风力和河流流动等外力作用下进行长时间和长距离的迁移,最终到达海洋,如图 2 所示.然而,内陆水体不仅是将微塑料转移至海洋的“传送带”,而且是发生微塑料迁移和沉降的“存储点”,保留了大部分的微塑料污染^[9,86].微塑料在水中聚集到一定程度后会发生下沉,转移到沉积物中长期存在^[87].除了直接进入淡水环境,微塑料还可



图 2 微塑料在自然环境的迁移路径

Fig. 2 Transport path diagram of microplastics in natural environment

能因为垃圾渗滤液、农膜和污水处理厂污泥,或室外塑料制品和涂层表面的磨损,释放出二次微塑料进入土壤和自然水体,并进一步迁移渗入地下水中^[1]。

为了进一步理解淡水环境中的微塑料如何发生迁移,需要将塑料来源、颗粒行为和迁移机制联系起来。已有研究通过实验模拟微塑料在多孔介质中的迁移沉积行为,由此推测微塑料在自然环境中的迁移机制^[86]。Tong 等^[88]研究发现不同尺寸的 PS 颗粒均能穿透石英砂滤柱[滤后数浓度(c)/滤前数浓度(c_0) > 0.60], Zhao 等^[89]研究发现离子强度和流速协同影响 PS 颗粒的沉积,在低离子强度、高流速条件下 PS 颗粒附着效率最小,具有强的迁移能力。Mao 等^[90]研究发现 PS 纳米颗粒的临界混凝浓度(critical coagulation concentration)显著高于水环境中的离子强度,说明 PS 纳米颗粒在淡水环境中的团聚率较低。环境因素会影响颗粒的粒径、电荷负性等,从而改变塑料颗粒的迁移行为。Hou 等^[91]研究表明 PE 颗粒在多孔介质中的迁移能力较弱($c/c_0 = 0.06$),加入环境中常见的富里酸会促进 PE 颗粒的迁移($c/c_0 = 0.10$)。老化作用可以改变颗粒表面的官能团,从而增加电荷负性和亲水性,有利于塑料颗粒的迁移。在 Liu 等^[92]的研究中,PS 纳米颗粒在紫外线或 O_3 中暴露老化后,在饱和多孔介质中的迁移能力显著提高,尤其是臭氧氧化处理后的 PS 纳米颗粒($c/c_0 > 0.80$)。

目前针对微塑料迁移行为的研究主要是使用原生聚苯乙烯微球进行的室内模拟,由于标准化的原生聚苯乙烯微球在自然环境中很少发现,可能无法准确反映实际环境。自然环境具有非均匀性和复杂性,实验室环境具有单一性与稳定性,不同作用下的微塑料的迁移行为可能存在较大差异,故目前需加强开展结合实地环境的相关研究,从而探究出关于微塑料在多种环境下的迁移行为机制。

3.3 微塑料和重金属的共迁移研究

在淡水环境中,微塑料富集重金属的同时,二者结合发生共迁移。微塑料在内陆水体中迁移,富集在表面的重金属污染物便随着微塑料转移到沉积物、地下水等,在各类水体中持久存在,可能对生态环境造成持久性影响。

微塑料与细菌^[93]、生物炭^[93,94]、黏土^[95]和抗生素^[94,96]等物质的共迁移研究已被广泛报道,但还没有特地针对微塑料和重金属离子在环境中共迁移的系统性研究。微塑料和重金属是淡水环境中广泛存在的污染物,并且存留时间长,目前也无较好的方法去除吸附重金属的微塑料,在此背景下应积极探

究关于微塑料和重金属的共迁移,从而降低其生态风险,改善淡水环境与生态环境。

根据微塑料和其他物质共迁移的研究,微塑料和重金属的共迁移行为能够更好地预测。Zhao 等^[96]研究了微塑料和四环素在多孔介质中的共迁移,在 KCl 溶液中二者没有显著影响,在 $CaCl_2$ 溶液中二者显著相互影响了迁移行为,说明共迁移会受到阳离子类型的影响。Hu 等^[97]研究了 PS 纳米颗粒与萘在多孔介质中的共迁移,发现萘的存在显著降低了 PS 纳米颗粒的迁移率,在低离子强度下 PS 纳米颗粒显著提高了萘的迁移率。Liu 等^[92,98]对比老化前后的 PS 纳米颗粒,发现 PS 纳米颗粒老化后增强了与非极性化合物(萘)与极性化合物(4-壬基酚)的结合,老化能够进一步提高微塑料携带污染物的迁移能力。Luis 等^[99]的研究结果证明微塑料与铬之间的毒理相互作用,突出了进一步研究微塑料和其他常见污染物的联合效应的重要性。

Li 等^[100]研究发现不同粒径的微塑料通过改变铁氧化物的表面性质、空间斥力或改变石英砂上沉积位点等机制,对铁氧化物在石英砂中的迁移和沉积行为产生了不同的影响。铁氧化物对不同粒径的塑料颗粒行为有着不同的影响,赤铁矿和针铁矿的存在显著增强了 $2\ \mu m$ 微塑料的沉积,纳米颗粒的迁移行为则几乎不变。Cai 等^[101]研究发现二氧化钛纳米颗粒都会增强微塑料在多孔介质中的沉积,减少迁移。二氧化钛纳米颗粒存在下,增加了沉积位点,与微塑料形成团聚体,从而影响了微塑料的迁移。以上研究表明,微塑料有促进金属氧化物运输的潜力,金属氧化物也可能对微塑料的迁移行为有影响。

有研究也报道了重金属与其他微米或纳米级胶体的共迁移行为,可为微塑料与重金属的共迁移行为提供借鉴^[102,103]。Jiang 等^[104]曾报道氧化石墨烯能够促进 Pb^{2+} 和 Cd^{2+} 在石英砂中的迁移,而重金属则抑制了氧化石墨烯胶体的迁移。Li 等^[105]曾报道,重金属与细菌在迁移时存在吸附作用,这种相互作用使得在大多数情况下两种物质会互相抑制对方的迁移。Fang 等^[106]也曾报道,纳米二氧化钛在迁移过程中能够携带重金属一同穿透土柱,提高铅的迁移率,天然有机物的加入可以通过促进纳米二氧化钛的迁移促进铅的迁移。以上研究表明,在迁移过程中重金属易受其他胶体物质的影响,同时也会对共存物质的迁移产生影响。

4 微塑料与重金属木马效应的生物影响

微塑料在淡水环境中广泛存在,水生生物容易

误食微塑料,造成累积效应.如图3所示,由于微塑料和重金属很难降解,富集了重金属的微塑料一旦被水生生物摄入体内,一般难以排出,延长了有害物质在水生生物肠道的停留时间,一方面会影响水生生物自身生长,另一方面可经过食物链的生物放大

作用逐级在动物体内成百倍地富集,最终通过多种途径进入人体引发疾病^[81].李文华等^[13]在鄱阳湖鱼类鳃部和消化道检测到了微塑料及其表面附着的重金属,发现微塑料在一定程度上增强了重金属在水生生物体内的累积效应.

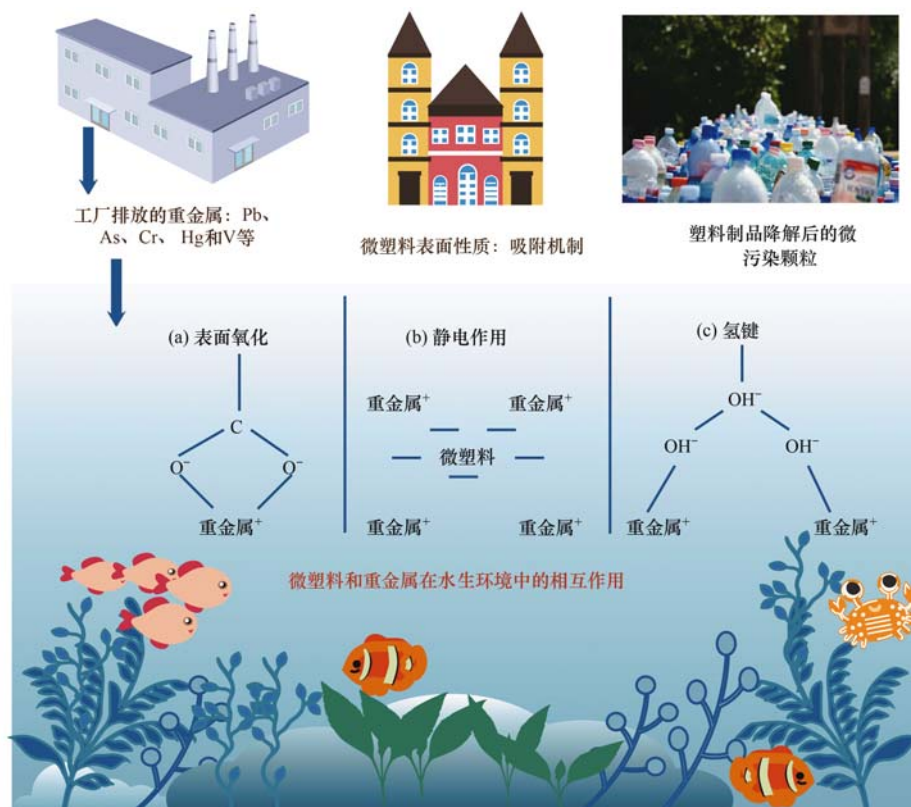


图3 微塑料与重金属相互作用及联合生态影响

Fig. 3 Interaction and combined ecological effects of microplastics and heavy metals

微塑料与重金属共存时,往往加剧了污染物对水生生物的毒性,二者联合作用主要体现在微塑料可能会增加水生生物摄入重金属的浓度.张明兴等^[107]研究发现聚苯乙烯微球的存在显著促进了卤虫对Cu和Cr的摄入和排出.Kim等^[108]研究发现了Ni和聚苯乙烯微塑料共存时,大型蚤摄入Ni的量比没有微塑料时更多,且Ni对大型蚤的毒性增强.Huang等^[109]研究发现在聚乙烯微塑料存在下,蚯蚓体内以及蚯蚓周边环境中的Cr浓度增大,对蚯蚓的生长和繁殖产生不利影响,包括DNA的损伤.Hou等^[91]研究发现微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的造成影响.

其次,微塑料在水生生物体内无法消化吸收,可能会影响水生生物的自身抗性,例如摄食能力降低和消化系统损伤等,影响免疫功能,使得水生生物对重金属污染的抵抗力下降^[99,110].粒径较大的微塑料容易富集在水生生物的腮、肝脏和肠道,从而影响水生生物的呼吸作用和消化功能.Luís等^[99]研究表明微塑料的存在会增强Cd对鳊虎鱼的毒性,使其

摄食能力、生物酶活性显著降低,导致免疫力下降,更容易遭受其他污染物的危害.Tong等^[94]研究发现PVC、PS和PE这3种微塑料都对铜绿微囊藻的生长有显著抑制作用,生物酶和细胞膜受到损伤,释放的藻毒素增加.随着微塑料浓度的增加,微塑料对小球藻和微囊藻等淡水藻类光合作用的抑制效应越强^[111],增大了藻细胞受重金属胁迫的风险.龚志伟等^[112]研究发现,微塑料表面的微生物群落特征会根据微塑料的种类发生改变,即微生物的群落构建过程受微塑料影响.Zhou等^[113]研究表明巩膜珊瑚的微塑性富集能力具有物种特异性,适应微塑性污染的物种可能在未来的珊瑚群落中占主导地位^[36,114~116].

综合以上分析,微塑料会对生物的摄食、生长、发育及繁殖等生命活动造成诸多不利的影响,对整个生态所带来的健康风险日益令人担忧^[117].除此之外,微塑料还充当“特洛伊木马”的角色,将重金属等污染物输入或输出活体,从而进入到食物链,危及人类健康.微塑料与重金属不仅对生物存在诸多

风险,对整个生态环境也有着潜在威胁,如何最大程度上降低甚至去除微塑料以及相关结合体,是目前亟需解决的一个问题。

5 结论

(1)淡水环境中微塑料污染越来越受到全球性的关注,已有的研究证实了微塑料能够吸附水中的重金属,并可作为污染物的载体进入生物体内,随食物链传递。因此,在现阶段的研究中,应加强关于微塑料与重金属木马效应及联合作用机制的研究,找到一种切实可行减少淡水资源中微塑料与重金属污染的方法,从而有效控制微塑料与重金属污染物沿食物链进入人体,危害人体健康。

(2)此外,为进一步降低微塑料与重金属对生态环境的影响,必须对微塑料采取控制措施,生活污水、工业废水以及某些富含微塑料的污水在进行污水处理时需严格控制其出水,污水处理厂可以在减少城市污水的微塑料污染方面发挥重要作用。同时,微塑料不易分解且性质稳定,在淡水环境中微塑料相互之间会发生团聚,当团聚到一定程度时会发生下沉从而进入土壤和自然水体,污水处理厂的出水进入河流后,在外力作用下迁移到海洋。

(3)因此,微塑料在土壤、海洋、大气及本综述所探讨的淡水环境都有存在,是地球上一种普遍存在且面源广的污染物。微塑料的特洛伊木马效应可能会大大促进重金属在环境间传递并进入生物体,增加危害人类健康以及生态健康的风险。另外,随着科学的进步与发展,研究分析微塑料,微塑料与重金属的木马效应及联合作用对于改善其控制措施具有重要意义。综上所述,新兴塑料污染物的威胁使这一领域的进展成为一个紧迫的问题,针对微塑料和重金属等污染物的毒性和迁移效应,需要进一步开展关于其共同迁移和毒性测试的工作,以评估其对人类和生态环境的共同影响。

参考文献:

- [1] Alimi O S, Farner Budarz J, Hernandez L M, *et al.* Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: Aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(4): 1704-1724.
- [2] Chu X X, Zheng B, Li Z X, *et al.* Occurrence and distribution of microplastics in water supply systems: In water and pipe scales [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **803**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150004.
- [3] Zhang K, Hamidian A H, Tubić A, *et al.* Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **274**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116554.
- [4] Wang L W, Wu W M, Bolan N S, *et al.* Environmental fate, toxicity and risk management strategies of nanoplastics in the environment: Current status and future perspectives [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **401**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123415.
- [5] Wang C H, Zhao J, Xing B S. Environmental source, fate, and toxicity of microplastics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **407**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124357.
- [6] Eerkes-Medrano D, Thompson R C, Aldridge D C. Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs [J]. *Water Research*, 2015, **75**: 63-82.
- [7] Li J Y, Liu H H, Chen J P. Microplastics in freshwater systems: a review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection [J]. *Water Research*, 2018, **137**: 362-374.
- [8] Li C R, Busquets R, Campos L C. Assessment of microplastics in freshwater systems: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **707**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135578.
- [9] 李爱峰, 李方晓, 邱江兵, 等. 水环境中微塑料的污染现状、生物毒性及控制对策 [J]. *中国海洋大学学报*, 2019, **49**(10): 88-100.
Li A F, Li F X, Qiu J B, *et al.* Pollution status, biological toxicity and control strategy of microplastics in water environments: a review [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, **49**(10): 88-100.
- [10] Tang Y Q, Liu Y G, Chen Y, *et al.* A review: research progress on microplastic pollutants in aquatic environments [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **766**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142572.
- [11] 张贺, 邹亚丹, 徐擎擎, 等. 微塑料与水中污染物的联合作用研究进展 [J]. *海洋湖沼通报*, 2019, (2): 59-69.
Zhang G, Zou Y D, Xu Q Q, *et al.* Proceedings of joint effect of microplastics and pollutants in water [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019, (2): 59-69.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 扈瀚文, 杨萍萍, 薛含含, 等. 环境微塑料污染的研究进展 [J]. *合成材料老化与应用*, 2020, **49**(1): 97-102.
Hu H W, Yang P P, Xue H H, *et al.* Research progress on environmental pollution of microplastics [J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2020, **49**(1): 97-102.
- [15] Ling X, Yan Z H, Liu Y X, *et al.* Transport of nanoparticles in porous media and its effects on the co-existing pollutants [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **283**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117098.
- [16] Ren Z F, Gui X Y, Xu X Y, *et al.* Microplastics in the soil-groundwater environment: aging, migration, and co-transport of

- contaminants - a critical review [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **419**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126455.
- [17] Ho W K, Leung K S Y. The crucial role of heavy metals on the interaction of engineered nanoparticles with polystyrene microplastics[J]. *Water Research*, 2021, **201**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117317.
- [18] Khalid N, Aqeel M, Noman A, *et al.* Linking effects of microplastics to ecological impacts in marine environments[J]. *Chemosphere*, 2021, **264**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128541.
- [19] Huang W, Song B, Liang J, *et al.* Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: a review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **405**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124187.
- [20] Huang D L, Tao J X, Cheng M, *et al.* Microplastics and nanoplastics in the environment: macroscopic transport and effects on creatures[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **407**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124399.
- [21] Bradley L, Wijesekara H, Palansooriya K N, *et al.* Particulate plastics as a vector for toxic trace-element uptake by aquatic and terrestrial organisms and human health risk[J]. *Environment International*, 2019, **131**, doi: 10.1016/j.envint.2019.104937.
- [22] Brewer A, Dror I, Berkowitz B. The mobility of plastic nanoparticles in aqueous and soil environments: a critical review [J]. *ACS ES&T Water*, 2020, **1**(1): 48-57.
- [23] Cheng H, Li L J, Wang B J, *et al.* Multifaceted applications of cellulosic porous materials in environment, energy, and health [J]. *Progress in Polymer Science*, 2020, **106**, doi: 10.1016/j.propolymsci.2020.101253.
- [24] Deidda I, Russo R, Bonaventura R, *et al.* Neurotoxicity in marine invertebrates: an update [J]. *Biology*, 2021, **10**(2), doi: 10.3390/biology10020161.
- [25] Zhang H Y, Pap S, Taggart M A, *et al.* A review of the potential utilisation of plastic waste as adsorbent for removal of hazardous priority contaminants from aqueous environments [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113698.
- [26] Meijer L J J, van Emmerik T, van der Ent R, *et al.* More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean[J]. *Science Advances*, 2021, **7**(18), doi: 10.1126/sciadv. aaz5803.
- [27] 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**(1), doi: 10.1038/ncomms15611.
- [28] 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.
- [29] Johnson A C, Ball H, Cross R, *et al.* Identification and quantification of microplastics in potable water and their sources within water treatment works in England and Wales [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(19): 12326-12334.
- [30] Lin L, Zuo L Z, Peng J P, *et al.* Occurrence and distribution of microplastics in an urban river: a case study in the Pearl River along Guangzhou city, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **644**: 375-381.
- [31] 许霞, 侯青桐, 薛银刚, 等. 污水厂中微塑料的污染及迁移特征研究进展[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(11): 4393-4400.
- Xu X, Hou Q T, Xue Y G, *et al.* Research progress on the transference and pollution characteristics of microplastics in wastewater treatment plants[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(11): 4393-4400.
- [32] Li X W, Mei Q Q, Chen L B, *et al.* Enhancement in adsorption potential of microplastics in sewage sludge for metal pollutants after the wastewater treatment process [J]. *Water Research*, 2019, **157**: 228-237.
- [33] Mintenig S M, Int-Veen I, Löder M G J, *et al.* Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging [J]. *Water Research*, 2017, **108**: 365-372.
- [34] Talvitie J, Mikola A, Setälä O, *et al.* How well is microlitter purified from wastewater? -A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2017, **109**: 164-172.
- [35] Carr S A, Liu J, Tesoro A G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2016, **91**: 174-182.
- [36] Tadsuwan K, Babel S. Microplastic abundance and removal via an ultrafiltration system coupled to a conventional municipal wastewater treatment plant in Thailand [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, **10**(2), doi: 10.1016/j.jece.2022.107142.
- [37] Yin L S, Jiang C B, Wen X F, *et al.* Microplastic pollution in surface water of urban lakes in Changsha, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(9), doi: 10.3390/ijerph16091650.
- [38] 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.
- [39] Su L, Xue Y G, Li L Y, *et al.* Microplastics in Taihu Lake, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 711-719.
- [40] 熊雄, 吴辰熙. 湖泊——内陆水体微塑料污染的热点区域[J]. *自然杂志*, 2021, **43**(4): 243-250.
- Xiong X, Wu C X. Lakes—hotspots of microplastic pollution in inland water bodies[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2021, **43**(4): 243-250.
- [41] Xiong X, Zhang K, Chen X C, *et al.* Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake - Qinghai Lake [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **235**: 899-906.
- [42] Re V. Shedding light on the invisible: addressing the potential for groundwater contamination by plastic microfibers [J]. *Hydrogeology Journal*, 2019, **27**(7): 2719-2727.
- [43] 罗文雅. 长三角地区不同水域环境中微塑料污染特征研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [44] 徐慧韬. 浙江省主要入海河流微塑料和重金属研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [45] Panno S V, Kelly W R, Scott J, *et al.* Microplastic contamination in karst groundwater systems [J]. *Groundwater*, 2019, **57**(2): 189-196.
- [46] Okoffo E D, O'Brien S, O'Brien J W, *et al.* Wastewater treatment plants as a source of plastics in the environment: a review of occurrence, methods for identification, quantification and fate [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2019, **5**(11): 1908-1931.
- [47] Koelmans A A, Mohamed Nor N H, Hermesen E, *et al.* Microplastics in freshwaters and drinking water: critical review and assessment of data quality[J]. *Water Research*, 2019, **155**:

- 410-422.
- [48] Mintenig S M, Löder M G J, Primpke S, *et al.* Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **648**: 631-635.
- [49] 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.
- [50] Shruti V C, Jonathan M P, Rodriguez-Espinosa P F, *et al.* Microplastics in freshwater sediments of Atoyac River basin, Puebla City, Mexico[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **654**: 154-163.
- [51] 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.
- [52] Besseling E, Quik J T K, Sun M z, *et al.* Fate of nano- and microplastic in freshwater systems: a modeling study [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 540-548.
- [53] 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.
- [54] Mao R F, Hu Y Y, Zhang S Y, *et al.* Microplastics in the surface water of Wuliangsu Lake, northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **723**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137820.
- [55] 陈守益. 微塑料的老化过程及其对污染物吸附的影响机制[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- [56] 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 Chiusi (central Italy) [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **213**: 648-657.
- [57] 周巧巧, 任勃, 李有志, 等. 中国河湖水体重金属污染趋势及来源解析[J]. *环境化学*, 2020, **39**(8): 2044-2054.
- Zhou Q Q, Ren B, Li Y Z, *et al.* Trends and sources of dissolved heavy metal pollution in water of rivers and lakes in China [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(8): 2044-2054.
- [58] 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.
- [59] He B B, Duodu G O, Rintoul L, *et al.* Influence of microplastics on nutrients and metal concentrations in river sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114490.
- [60] Wang Z C, Qin Y M, Li W P, *et al.* Microplastic contamination in freshwater: first observation in Lake Ulansuhai, Yellow River Basin, China[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, **17**(4): 1821-1830.
- [61] Ta A T, Babel S. Microplastics pollution with heavy metals in the aquaculture zone of the Chao Phraya River Estuary, Thailand [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **161**, doi: 10.1016/j.marpollbul.2020.111747.
- [62] Turner A, Holmes L A. Adsorption of trace metals by microplastic pellets in fresh water[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **12**(5): 600-610.
- [63] Yu F, Yang C F, Zhu Z L, *et al.* Adsorption behavior of organic pollutants and metals on micro/nanoplastics in the aquatic environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **694**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133643.
- [64] Oz N, Kadizade G, Yurtsever M. Investigation of heavy metal adsorption on microplastics [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, **17**(4): 7301-7310.
- [65] Godoy V, Blázquez G, Calero M, *et al.* The potential of microplastics as carriers of metals[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113363.
- [66] Lin Z K L, Hu Y W, Yuan Y J, *et al.* Comparative analysis of kinetics and mechanisms for Pb(II) sorption onto three kinds of microplastics [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **208**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111451.
- [67] Wang F Y, Yang W W, Cheng P, *et al.* Adsorption characteristics of cadmium onto microplastics from aqueous solutions[J]. *Chemosphere*, 2019, **235**: 1073-1080.
- [68] 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.
- [69] Fotopoulou K N, Karapanagioti H K. Surface properties of beached plastic pellets [J]. *Marine Environmental Research*, 2012, **81**: 70-77.
- [70] Lang M F, Yu X Q, Liu J H, *et al.* Fenton aging significantly affects the heavy metal adsorption capacity of polystyrene microplastics[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **722**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137762.
- [71] Wang Q J, Zhang Y, Wangjin X Y, *et al.* The adsorption behavior of metals in aqueous solution by microplastics effected by UV radiation[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **87**: 272-280.
- [72] 王琼杰, 张勇, 张阳阳, 等. 老化微塑料对水体中重金属铜和锌的吸附行为研究[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(7): 2712-2726.
- Wang Q J, Zhang Y, Zhang Y Y, *et al.* Adsorption of heavy metal ions Cu^{2+} and Zn^{2+} onto UV-aged microplastics in aquatic system[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(7): 2712-2726.
- [73] Davranche M, Veclin C, Pierson-Wickmann A C, *et al.* Are nanoplastics able to bind significant amount of metals? The lead example[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **249**: 940-948.
- [74] Zou J Y, Liu X P, Zhang D M, *et al.* Adsorption of three bivalent metals by four chemical distinct microplastics [J]. *Chemosphere*, 2020, **248**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126064.
- [75] Guan J N, Qi K, Wang J Y, *et al.* Microplastics as an emerging anthropogenic vector of trace metals in freshwater: significance of biofilms and comparison with natural substrates [J]. *Water Research*, 2020, **184**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116205.
- [76] 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.
- [77] Ahechti M, Benomar M, El Alami M, *et al.* Metal adsorption by microplastics in aquatic environments under controlled conditions: exposure time, pH and salinity [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2022, **102**(5): 1118-1125.
- [78] 王琼杰, 张勇, 陈雨, 等. 水体中微塑料的环境影响行为研究进展[J]. *化工进展*, 2020, **39**(4): 1500-1510.

- Wang Q J, Zhang Y, Chen Y, *et al.* Research progress on environmental influence behavior of microplastics in water[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, **39**(4): 1500-1510.
- [79] 高丰蕾, 李景喜, 孙承君, 等. 微塑料富集金属铅元素的能力与特征分析[J]. 分析测试学报, 2017, **36**(8): 1018-1022.
- Gao F L, Li J X, Sun C J, *et al.* Analysis on ability and characteristics of microplastics to enrich metal lead[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2017, **36**(8): 1018-1022.
- [80] Holmes L A, Turner A, Thompson R C. Interactions between trace metals and plastic production pellets under estuarine conditions[J]. Marine Chemistry, 2014, **167**: 25-32.
- [81] Naqash N, Prakash S, Kapoor D, *et al.* Interaction of freshwater microplastics with biota and heavy metals: a review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2020, **18**(6): 1813-1824.
- [82] 庞敬文. 微塑料对典型污染物的携带机制研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
- [83] Cai L, Hu L L, Shi H H, *et al.* Effects of inorganic ions and natural organic matter on the aggregation of nanoplastics [J]. Chemosphere, 2018, **197**: 142-151.
- [84] Li S C, Liu H, Gao R, *et al.* Aggregation kinetics of microplastics in aquatic environment: Complex roles of electrolytes, pH, and natural organic matter[J]. Environmental Pollution, 2018, **237**: 126-132.
- [85] 董姝楠, 夏继红, 王为木, 等. 土壤-地下水中微塑料迁移的影响因素及机制研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(14): 1-8.
- Dong S N, Xia J H, Wang W M, *et al.* Review on impact factors and mechanisms of microplastic transport in soil and groundwater [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(14): 1-8.
- [86] Horton A A, Dixon S J. Microplastics: an introduction to environmental transport processes[J]. WIREs Water, 2018, **5**(2), doi: 10.1002/wat2.1268.
- [87] Li C C, Gan Y D, Dong J Y, *et al.* Impact of microplastics on microbial community in sediments of the Huangjinxia Reservoir—water source of a water diversion project in western China[J]. Chemosphere, 2020, **253**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126740.
- [88] Tong M P, He L, Rong H F, *et al.* Transport behaviors of plastic particles in saturated quartz sand without and with biochar/ Fe_3O_4 -biochar amendment[J]. Water Research, 2020, **169**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115284.
- [89] Zhao W G, Zhao P, Tian Y M, *et al.* Investigation for synergies of ionic strength and flow velocity on colloidal-sized microplastic transport and deposition in porous media using the colloidal-AFM probe[J]. Langmuir, 2020, **36**(22): 6292-6303.
- [90] Mao Y F, Li H, Huangfu X L, *et al.* Nanoplastics display strong stability in aqueous environments: Insights from aggregation behaviour and theoretical calculations [J]. Environmental Pollution, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113760.
- [91] Hou J, Xu X Y, Lan L, *et al.* Transport behavior of micro polyethylene particles in saturated quartz sand: impacts of input concentration and physicochemical factors [J]. Environmental Pollution, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114499.
- [92] Liu J, Zhang T, Tian L L, *et al.* Aging significantly affects mobility and contaminant-mobilizing ability of nanoplastics in saturated loamy sand[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(10): 5805-5815.
- [93] He L, Wu D, Rong H F, *et al.* Influence of nano- and microplastic particles on the transport and deposition behaviors of bacteria in quartz sand [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(20): 11555-11563.
- [94] Tong M P, Li T F, Li M, *et al.* Cotransport and deposition of biochar with different sized-plastic particles in saturated porous media[J]. Science of the Total Environment, 2020, **713**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136387.
- [95] Li M, Zhang X W, Yi K X, *et al.* Transport and deposition of microplastic particles in saturated porous media: Co-effects of clay particles and natural organic matter [J]. Environmental Pollution, 2021, **287**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117585.
- [96] Zhao P, Cui L M, Zhao W G, *et al.* Cotransport and deposition of colloidal polystyrene microplastic particles and tetracycline in porous media: the impact of ionic strength and cationic types [J]. Science of the Total Environment, 2021, **753**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142064.
- [97] Hu E Z, Shang S Y, Fu Z T, *et al.* Cotransport of naphthalene with polystyrene nanoplastics (PSNP) in saturated porous media: Effects of PSNP/naphthalene ratio and ionic strength [J]. Chemosphere, 2020, **245**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125602.
- [98] Liu J, Ma Y N, Zhu D Q, *et al.* Polystyrene nanoplastics-enhanced contaminant transport: role of irreversible adsorption in glassy polymeric domain [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(5): 2677-2685.
- [99] Luís L G, Ferreira P, Fonte E, *et al.* Does the presence of microplastics influence the acute toxicity of chromium(VI) to early juveniles of the common goby (*Pomatoschistus microps*)? A study with juveniles from two wild estuarine populations [J]. Aquatic Toxicology, 2015, **164**: 163-174.
- [100] Li M, He L, Zhang M Y, *et al.* Cotransport and deposition of iron oxides with different-sized plastic particles in saturated quartz sand[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(7): 3547-3557.
- [101] Cai L, He L, Peng S N, *et al.* Influence of titanium dioxide nanoparticles on the transport and deposition of microplastics in quartz sand [J]. Environmental Pollution, 2019, **253**: 351-357.
- [102] Xie B Y, Jiang Y J, Zhang Z, *et al.* Co-transport of Pb (II) and Cd (II) in saturated porous media: effects of colloids, flow rate and grain size[J]. Chemical Speciation & Bioavailability, 2018, **30**(1): 135-143.
- [103] Zhou D D, Jiang X H, Lu Y, *et al.* Cotransport of graphene oxide and Cu(II) through saturated porous media[J]. Science of the Total Environment, 2016, **550**: 717-726.
- [104] Jiang Y J, Zhang X X, Yin X Q, *et al.* Graphene oxide-facilitated transport of Pb^{2+} and Cd^{2+} in saturated porous media [J]. Science of the Total Environment, 2018, **631-632**: 369-376.
- [105] Li X H, Xu H X, Gao B, *et al.* Cotransport of *Herbaspirillum chlorophenolicum* FA1 and heavy metals in saturated porous media: effect of ion type and concentration[J]. Environmental Pollution, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.07.108.
- [106] Fang J, Zhang K K, Sun P D, *et al.* Co-transport of Pb^{2+} and TiO_2 nanoparticles in repacked homogeneous soil columns under saturation condition: effect of ionic strength and fulvic acid[J]. Science of the Total Environment, 2016, **571**: 471-478.
- [107] 张明兴, 王莹, 王立军, 等. 重金属和聚苯乙烯微球对卤虫的复合毒性效应研究[J]. 生态毒理学报, 2019, **14**(1): 99-105.
- Zhang M X, Wang Y, Wang L J, *et al.* Combined toxicity of

- polystyrene microplastics and heavy metals to brine shrimp (*Artemia parthenogenetica*) [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, **14**(1): 99-105.
- [108] Kim D, Chae Y, An Y J. Mixture toxicity of nickel and microplastics with different functional groups on *Daphnia magna* [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(21): 12852-12858.
- [109] Huang C D, Ge Y, Yue S Z, *et al.* Microplastics aggravate the joint toxicity to earthworm *Eisenia fetida* with cadmium by altering its availability [J]. Science of the Total Environment, 2021, **753**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142042.
- [110] Pannetier P, Morin B, Le Bihanic F, *et al.* Environmental samples of microplastics induce significant toxic effects in fish larvae [J]. Environment International, 2020, **134**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105047.
- [111] Wu Y M, Guo P Y, Zhang X Y, *et al.* Effect of microplastics exposure on the photosynthesis system of freshwater algae [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, **374**: 219-227.
- [112] 龚志伟, 马杰, 苏趋, 等. 典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制 [J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4697-4705.
- Gong Z W, Ma J, Su Q, *et al.* Composition characteristics and construction mechanism of microbial community on microplastic surface in typical redox environments [J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4697-4705.
- [113] Zhou Z, Wan L, Cai W Q, *et al.* Species-specific microplastic enrichment characteristics of scleractinian corals from reef environment; insights from an *in-situ* study at the Xisha Islands [J]. Science of the Total Environment, 2022, **815**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152845.
- [114] Duan J J, Bolan N, Li Y, *et al.* Weathering of microplastics and interaction with other coexisting constituents in terrestrial and aquatic environments [J]. Water Research, 2021, **196**, doi: 10.1016/j.watres.2021.117011.
- [115] Dong H, Chen Y L, Wang J, *et al.* Interactions of microplastics and antibiotic resistance genes and their effects on the aquaculture environments [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **403**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123961.
- [116] Deng H, He J X, Feng D, *et al.* Microplastics pollution in mangrove ecosystems; a critical review of current knowledge and future directions [J]. Science of the Total Environment, 2021, **753**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142041.
- [117] Gaylarde C C, Neto J A B, Da Fonseca E M. Nanoplastics in aquatic systems - are they more hazardous than microplastics? [J]. Environmental Pollution, 2021, **272**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115950.



CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-rui, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)