

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立 40 周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战	王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)
河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险	王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)
海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展	袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)
环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测	李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)
环境水体中无机砷现场分析方法研究进展	薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)
海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展	黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展	骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)
水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制	王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)
中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物	史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)
中国油气系统甲烷逸散排放估算	陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)
2015 ~ 2020 年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征	李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)
九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征	程宏, 陈荣 (4924)
厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征	姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)
九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制	戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)
福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制	杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)
厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制	潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)
改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附	赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)
基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测	徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)
紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯	徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)

研究报告

2019 年秋季海南省 4 次臭氧污染过程特征及潜在源区分析	符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)
伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制	陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)
城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性	齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)
南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估	冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)
我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估	孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建锋 (5040)
东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析	陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)
长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析	刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)
青藏高原湖泊水环境特征及水质评价	刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)
基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素	查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)
丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系	贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)
铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能	王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)
基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群	章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)
寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析	杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)
中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析	田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾江新 (5131)
硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析	刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)
不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响	邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)
不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响	唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)
基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征	刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)
基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析	高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)
基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析	张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)
老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响	王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)
磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响	芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)
牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响	赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)
磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响	帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)
重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估	方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)
基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应	侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)
黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征	许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)
土壤多功能性对微生物多样性降低的响应	陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)
氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响	苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)
碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比	李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)
中国能源消费碳排放的空间化与时空动态	郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)
京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估	杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)
我国塑料污染防治政策分析与建议	李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估

孙晓楠¹, 陈浩², 贾其隆³, 朱弈⁴, 马长文¹, 叶建锋^{5*}

(1. 上海第二工业大学资源与环境工程学院, 上海 201209; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 3. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237; 4. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 5. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 针对我国陆域水体系统表层水微塑料(MPs)生态风险问题,通过 Science Direct 和 Web of Science 等网站查询关键词 microplastics、urban 和 river 等获取相关文献及数据,从 2017~2021 年的研究,覆盖 15 个省份 33 个水体,并基于 MPs 丰度、聚合物占比和化学危害数据构建了生态风险表征比率(RCR)的评价方法.结果表明,我国自然水体的 MPs 丰度平均值为 $(3\,604.2 \pm 5\,926.4) \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$,城市水体中 MPs 丰度平均值为 $(7\,722.6 \pm 9\,505.7) \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$;相应的,自然水体的 RCR 平均值为 22.09 ± 45.2 ,城市水体 RCR 平均值为 15.67 ± 34.8 .因此,根据 RCR 的值将生态风险程度划分为 4 个等级.其中,无显著风险(≤ 1)有 17 个,占 42.5%;低生态风险($1 \sim 10$)有 12 个,占 30%;中生态风险($10 \sim 100$)有 9 个,占 22.5%;高生态风险(> 100)有 2 个,占 5%.数据分析显示,自然水体的 MPs 丰度与 RCR 值($R^2 = 0.875$, $P < 0.01$)存在显著的相关性,但在城市水体的 MPs 丰度与 RCR 值间不存在显著的相关性.这表明 MPs 的丰度高并不能说明该地区的生态风险程度高.此外,各地的 RCR 值与流域面积呈正相关($R^2 = 0.864$, $P < 0.01$),同时,MPs 丰度与 GDP ($R^2 = 0.679$, $P < 0.05$)、流域常住人口($R^2 = 0.922$, $P < 0.05$)呈显著相关性.这项研究为评估 MPs 的生态风险提供了基线数据,是陆域水体系统表层水 MPs 生态风险评估的重要方式.

关键词: 微塑料(MPs); 陆域水体; 地表水; 风险评估; 风险表征比率; 社会因素

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5040-13 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202202181

Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China

SUN Xiao-nan¹, CHEN Hao², JIA Qi-long³, ZHU Yi⁴, MA Chang-wen¹, YE Jian-feng^{5*}

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 4. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 5. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To assess the ecological risk of microplastics (MPs) occurring in the surface water of terrestrial water systems across China, this study obtained relevant literature and data by searching keywords including microplastics, urban, and river on websites such as Science Direct and Web of Science. We constructed an evaluation method of ecological risk characterization ratio (RCR) based on chemical hazard data, as well as data of MPs abundance and polymer proportion originating in studies from 2017 to 2021 that covered 33 water bodies in 15 provinces. The results showed that the average abundance of MPs in natural water bodies in China reached $(3\,604.2 \pm 5\,926.4) \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$, and the average abundance of MPs in urban water bodies was $(7\,722.6 \pm 9\,505.7) \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$. The corresponding average RCR of natural water bodies was 22.09 ± 45.2 , and the average RCR of urban water bodies was 15.67 ± 34.8 . Therefore, according to the value of RCR, the ecological risk could be rated as four levels. Of these, no significant risk ($\text{RCR} \leq 1$) was found in 17 water bodies, accounting for 42.5%; low ecological risks ($\text{RCR} 1 \sim 10$) were found in 12 water bodies (30%); medium ecological risks ($\text{RCR} 10 \sim 100$) were found in 9 water bodies (22.5%); and high ecological risks ($\text{RCR} > 100$) were found in 2 water bodies (5%). Data analysis showed a significant correlation between MPs abundance and RCR values in natural water bodies ($R^2 = 0.875$, $P < 0.01$), though not in urban water bodies. This suggested that the high abundance of MPs could not precisely indicate a high degree of ecological risk in the area. In addition, RCR values were observed to be positively correlated with the watershed area ($R^2 = 0.864$, $P < 0.01$), and MPs abundance was correlated with GDP ($R^2 = 0.679$, $P < 0.05$) and watershed resident population ($R^2 = 0.922$, $P < 0.05$). This study provides baseline data for evaluating the ecological risk of MPs and a feasible method for evaluating the ecological risk of MPs in surface water of terrestrial water systems.

Key words: microplastics (MPs); terrestrial water system; surface water; risk assessment; risk characterization ratio; social factor

塑料具有耐腐蚀、绝缘性好和化学性稳定等特性,被用于制造各种各样的产品,为人类生活生产提供了大量的便利.然而,随着塑料制品需求量和使用寿命的增大,产生的塑料垃圾处理不当,造成了一系列环境问题.微塑料(microplastics, MPs)作为塑料衍生的新兴污染物在近年来受到广泛关注,它通常被定义为颗粒 $< 5 \text{ mm}$ 的塑料颗粒^[1],并在全球大部分生态环境系统中被发现,包括海洋^[2]、河流^[3]和湖

泊^[4]等.有研究表明,MPs 会对生态环境和生物体造成破坏^[5,6],这引起了人们对其潜在毒性及可能构成广泛的水生态风险的进一步担忧和关注.

收稿日期: 2022-02-24; 修订日期: 2022-03-23

基金项目: 上海自然科学基金项目(19ZR1443800); 上海科技创新行动计划项目(19DZ1204500)

作者简介: 孙晓楠(1994~),女,硕士研究生,主要研究方向为水体微塑料, E-mail: sun_xnan@163.com

* 通信作者, E-mail: yefj99@gmail.com

近年来,我国陆域水体系统表层水中的 MPs 污染变得令人担忧^[7]. 尽管先前大量的研究致力于海洋环境 MPs 污染的监测评估,但海洋环境中发生的 MPs 量仅占有总量的 2%,而从陆地传输到海洋的 MPs 却达到了 98%^[8],这表明陆域 MPs 污染的发生和传播是一个根本性问题,是实现 MPs 污染有效控制的关键目标区域. 在陆域系统中,城市是 MPs 污染发生的热点,而城市水体则是重要的传输途径. 武汉市^[9]城区湖泊中的 MPs 丰度范围在 $1.66 \times 10^3 \sim 8.93 \times 10^3 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$; 该研究发现越靠近城市中心的湖泊 MPs 丰度越高. 三峡水库^[10]的地表水和沉积物中也发现大量 MPs,地表水中含有 $1.60 \times 10^3 \sim 1.26 \times 10^4 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}$,沉积物(以湿重表示)中含有 $25 \sim 300 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,且发现较低密度的 PP 和 PE 等塑料微粒是主要污染类型. 综合全球其他地区水体数据^[11],我国内陆水域水体检测到的 MPs 含量更高.

塑料主要来源于原油聚合物,本身有一定的毒性,且毒性危害指数不同,进入环境会对生态系统造成一定毒性风险. 饮用水^[12]、大气^[13]、土壤^[14]和食物^[15]等环境中都追踪到了 MPs,甚至从人体内部^[16]都发现了 MPs,其颗粒本身会导致胃肠道受伤或阻塞,从而导致人体更严重的疾病^[17]. 此外,根据其聚合物类型,MPs 可能对生物生长、生态功能和人类健康产生不利影响. MPs 的风险评估很复杂,因为即使形成 MPs 的聚合物受到监管和批准,也并不意味着 MPs 在所有环境中具有相同的潜在危害和暴露途径^[18]. 在近年来,考虑 MPs 实际赋存或传播丰度,同时综合实际展现的毒性水平,相关的风险评估成为 MPs 研究的重要内容,为更具针对性的减量措施提供更加科学的依据. 尤其是在人口密集工业化水平较高的城市地区,水污染更为严重,对水体 MPs 生态风险的评估更为重要. Lithner 等^[19]开发了 55 种热塑性和热固性聚合物的危险等级模型,关于危害环境和人类健康的化学品的危害类别和类别. 因此,本研究引入聚合物危险等级提高 MPs 风险评估的准确性. 此前,研究人员基于各种评估模型探索了不同环境介质中 MPs 污染的风险. 例如, Wang 等^[20]利用 MPs 污染负荷指数(PLI)评估玛纳斯河流域地表水生态风险, Xu 等^[21]利用塑料聚合物危害评分建立了 MPs 聚合物类型指数以此来判断长江河口的 MPs 污染程度, Peng 等^[22]利用 Hakanson^[23]提出的生态风险指数法对中国上海淡水河流沉积物中的 MPs 进行了评价,定量评价了各采样点的 MPs 污染风险. 因此,考虑到 MPs 的环境分布和聚合物危险指数特征,在之后研究中考虑其大小和形状,以便更好地评估 MPs 在实际水环境中所构成的风险.

本文综合评估了我国陆域 12 个自然水体,21 个城市水体表层水中的 MPs 污染赋存,通过不同数据库获取我国陆域水体系统表层水 MPs 特征,构建了基于聚合物比例和 MPs 丰度为核心的 MPs 生态风险评估方法,探讨了各区域的 MPs 生态风险程度与差异,以及聚合物占比和社会因素等对风险表征比率的影响.

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究基于关键词 microplastics、urban 和 river 等,通过 Science Direct 和 Web of Science 等网站查询相关文献,从 2017 ~ 2021 年的研究,覆盖上海、广东和湖北等 15 个省份,黄浦江、珠江和洪湖等 33 个水体(图 1). 获取文献数据包含 MPs 丰度(单位均统一转换为 $\text{n} \cdot \text{m}^{-3}$)、形状、大小和聚合物占比,水体名称见表 1. 因文献中所展示信息有限,部分相关数据是根据对文献的分析推算得到. MPs 的部分形状数据为推算得出,推测数据有:太湖^[4]、乌梁素海^[24]、海河^[25]、洪湖^[26]、洞庭湖^[26]、东山湾^[27]、三峡水库^[10]和丹江口水库^[28]; 尺寸分布数据所涉及的全部文献均含有推断数据.

本文研究区域为我国陆域水体系统表层水中 MPs,研究以是否有大量人类活动以及是否远离城市为依据,将水体分为城市水体和自然水体. 城市水体包括城市河道和湖泊等,自然水体主要覆盖距离城市较远的江、河、湖、海. 横跨城市和自然态的水体被认为是自然水体,这样的水体在统计分析中暂不考虑. 从地理分布上看我国陆域水体 MPs 研究包括,河流和河口,主要集中在长江、黄河及其支流、珠江及其支流和经过城市的河流;湖泊,主要集中在青海湖、乌梁素海、洞庭湖、鄱阳湖、太湖和城市湖泊;水库,主要集中在三峡水库和丹江口水库等.

1.2 MPs 的采样与鉴定方法

我国陆域水体系统表层水中 MPs 采样与预处理方法见表 1. MPs 采集方法为水桶、机械泵、水样采集器或拖网采集. 水桶、机械泵和水样采集器是将取样工具直接放入水体,直至完全浸没,待取样器充满水样,拉出水面储存至玻璃瓶中. 用不同孔径的拖网也可收集 MPs,包括浮游生物网(112 ~ 333 μm)和 333 μm 孔径的拖网,将拖网撒入水体表面静等拖网完全进入水体后再捞起,使用足量的去离子水冲刷拖网,将拖网上的污染物转移到玻璃罐中. 随后将玻璃罐储存在 4℃ 的条件下,直到进一步的实验室分析. 为避免系统误差,尤其要注意的是,研

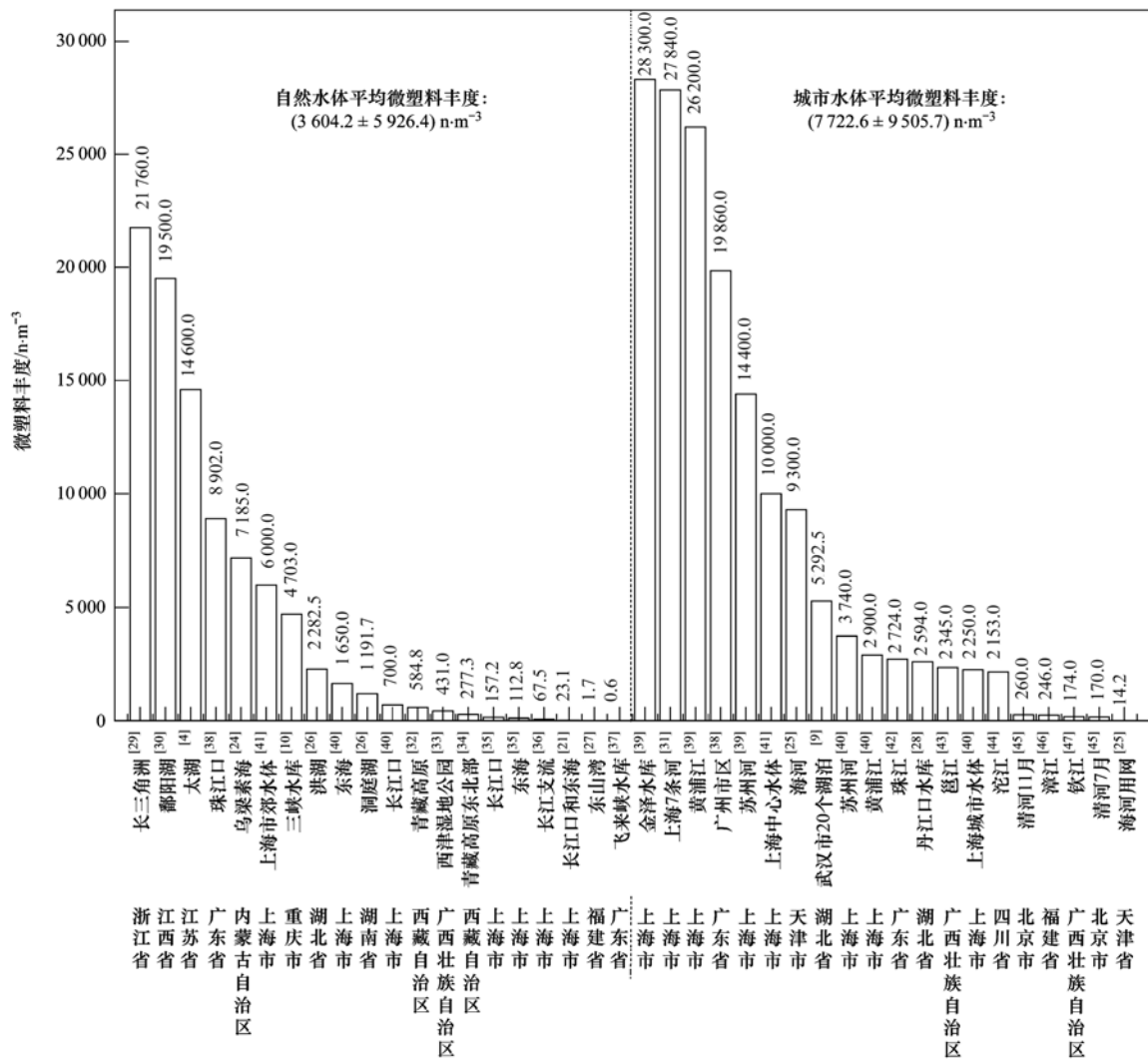


图1 我国陆域水体系统表层水中 MPs 丰度

Fig. 1 Abundance of MPs in surface waters of terrestrial water systems in China

究人员在采样时必须穿棉质实验室工作服,在采样和运输过程中避免使用塑料制品,使用金属或玻璃器具,并按时清洁采样工具和容器。

利用消解方法在不影响聚合物结构或化学完整性的情况下除去微塑料颗粒表面吸附的有机物,从而更精准地获取 MPs 聚合物结构的光谱信息。消解方法一般有:酸消解(H_2O_2 、 $FeSO_4$)、碱消解($NaCl$ 、 KOH)和湿式过氧化氢氧化消解。不同的消解方法也会使 MPs 的回收率不同。滤膜是为了截留 MPs,以便收集疑似 MPs 的所有颗粒,一般情况下选择 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的滤膜孔径。目前,常用的鉴定聚合物类别的方法有傅立叶红外光谱、拉曼光谱、扫描电镜。傅立叶红外光谱扫描速度快且灵敏度高;拉曼光谱有更宽的光谱范围,可检测低至 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的 MPs。

1.3 MPs 风险评估

环境风险评估一般是评估化学物质,是通过分析化学物质的生命周期和危害属性等过程中进入生态环境的信息,生态环境和人体健康在此化学物质

的影响下会产生怎么样的风险程度,之后来制定解决方案。最开始的水体环境风险评估是基于淡水生物的毒性数据,采用物种敏感度分布 (species sensitivity distributions, SSD) 方法^[48] 计算了由预测无效应浓度 (predicted no effect concentration, PNEC) 值确定的淡水中 MPs 的风险商 (RQ)。慢性毒性数据,如无观察效应浓度 (no observed effect concentrations, NOEC)。采用对数正态模型拟合 SSD 曲线,计算出 5% 的危险浓度 (HC_5),即把不同物种对于 MPs 的 NOEC 拟合成曲线,然后于受影响物种比例 5% 位置处求得浓度。PNEC 由 HC_5 除以 1~5 的评估因子 (assessment factor, AF) 得出,其中 AF 取值 1^[49],由 NOEC 计算 PNEC 的概率分布,MEC 是在每个采样点的 MPs 实测丰度。利用风险商 (RQ) 方法评估了淡水中检测到的 MPs 的潜在生态风险,该方法曾用于评估海洋中 MPs 的风险^[50]。

$$PNEC = NOEC / AF = HC_5 / AF \quad (1)$$

$$RQ = MEC / PNEC \quad (2)$$

表 1 我国陆域水体系统表层水系统中 MPs 采样与预处理方法的比较¹⁾

地点	采样方法	消解方法	滤膜孔径/ μm	聚合物识别方法	文献
长三角洲	金属水桶和小铲	30% H ₂ O ₂	5.00	傅立叶红外光谱	[29]
鄱阳	采样器	30% H ₂ O ₂	0.45	拉曼光谱	[30]
太湖	333 μm 尼龙浮游生物网	30% H ₂ O ₂	0.45	傅立叶红外光谱	[4]
乌梁素海	金属水桶	30% H ₂ O ₂	0.45	傅立叶红外光谱	[24]
海河	333 μm 拖网和机械泵	30% H ₂ O ₂	1.20	傅立叶红外光谱	[25]
上海 7 条河	金属水桶	30% H ₂ O ₂	5.00	傅立叶红外光谱和拉曼光谱	[31]
三峡水库	机械泵	30% H ₂ O ₂	0.45	拉曼光谱	[10]
洪湖和洞庭湖	机械泵	30% H ₂ O ₂	0.45	拉曼光谱,	[26]
青藏高原	金属水桶	30% H ₂ O ₂	0.45	拉曼光谱	[32]
西津湿地公园	水样采集器	30% H ₂ O ₂	0.22	傅立叶红外光谱	[33]
青藏高原东北部	瓶子和小铲	湿式过氧化氢氧化	0.45	拉曼光谱	[34]
长江口和东海	金属水桶	30% H ₂ O ₂	0.45	傅立叶红外光谱	[21]
长江口和东海	机械泵	30% H ₂ O ₂	0.45	傅立叶红外光谱	[35]
长江支流	机械泵和取样器	30% H ₂ O ₂	75.00	傅立叶红外光谱	[36]
东山湾	330 μm 拖网	30% H ₂ O ₂ 、0.5 M FeSO ₄	0.70	拉曼光谱	[27]
飞来峡水库	112 μm 浮游生物网	/	1.00	傅立叶红外光谱	[37]
珠江口和广州市区	水样采集器	30% H ₂ O ₂	0.45	拉曼光谱	[38]
黄浦江、苏州河和金泽水库	不锈钢网	NaCl	0.22	傅立叶红外光谱	[39]
上海城市水体、黄浦江、苏州河、长江口和东海	金属水桶	10% KOH	20.00	傅立叶红外光谱	[40]
上海中心水体和上海市郊水体	采样器	NaCl	0.45	傅立叶红外光谱	[41]
武汉市 20 个湖泊	机械泵	30% H ₂ O ₂	0.45	拉曼光谱	[9]
珠江	水样采集器	30% H ₂ O ₂	5.00	傅立叶红外光谱	[42]
丹江口水库	机械泵	30% H ₂ O ₂	0.45	拉曼光谱	[28]
邕江	机械泵	30% H ₂ O ₂	0.45	拉曼光谱	[43]
沱江	不锈钢网	30% H ₂ O ₂	0.47	傅立叶红外光谱	[44]
清河	不锈钢网	30% H ₂ O ₂	10.00	傅立叶红外光谱	[45]
漳江	金属水桶	湿式过氧化氢氧化	/	拉曼光谱	[46]
钦江	采样器	NaCl	0.45	傅立叶红外光谱	[47]

1) 港、澳、台资料暂缺

式中,PNEC 表示预测无效应浓度,NOEC 表示无观察效应浓度,HC₅ 表示 5% 的危险浓度,AF 表示评估因子,RQ 表示风险商。

式(1)和式(2)使用的 PNEC,没有考虑到不同聚合物的 MPs 对水体的生态影响.因此,使用聚合物危害指数(S_i)^[19,27]对公式进行修改,不同聚合物的 S_i 有具体数值(表 2),但若有多种聚合物的共聚物出现,则用各聚合物的平均值来计算 S_i . 本研究采用聚合物危害指数数据算出 MPs 引起的聚合物风险指数(H),并以此为指标划分 H 危险等级^[27](表 3). 由于 PNEC 用到的毒理学实验数据主要是 PS、PET 和 PE 塑料,因此要对危害指数进行调整,用 1:1:1 的比例丰度来调整 S_i 的值,最终得出调整系数 k 为 1/15.

根据 MPs 的浓度和 MPs 聚合物组成的多样性,以及单个 MPs 聚合物所造成的危害和风险进行估算. Zhang 等^[43]拟合了 SSD 曲线,求得水体的 PNEC 为 $4\,920\text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$,是已有研究中最小的 PNEC 值,用于以下计算. 风险表征比率(RCR)是通过化学物质

分析 MPs 对生态环境的污染程度,最终可划分为 4 个等级(表 4)^[51].

$$Z_i = k \cdot S_i \tag{3}$$

$$H = \sum P_i \cdot Z_i \tag{4}$$

$$\text{MEC}_Z = \text{MEC} \cdot H \tag{5}$$

$$\text{RCR} = \text{MEC}_Z / \text{PNEC} \tag{6}$$

式中, S_i 表示第 i 种塑料的危害系数, H 表示 MPs 引起的聚合物风险指数, K 表示调整系数, Z_i 表示第 i 种塑料的调整危害指数, MEC_Z 表示是调整后的 MPs 实测丰度, P_i 表示第 i 种塑料在环境实测丰度中的占比, RCR 表示风险表征比率。

1.4 统计分析方法

采用 IBM SPSS 版本及 Origin 2021 (Origin Lab) 创建图形. 数据分析包括配对样本 t 检验和线性拟合等,以探讨 MPs 丰度及 RCR 与流域各经济指标之间的关系,自然水体与城市水体的 MPs 丰度与 RCR 值的关系, $P < 0.05$ 时认为所有结果具有统计学意义。

表 2 塑料聚合物的应用及危害指数、调整危害指数

Table 2 Plastic polymer application and hazard index, adjustment hazard index

聚合物类型	聚合物缩写	主要应用方面	危害指数 (S_i)	调整危害指数 (Z_i)
聚丙烯腈 (polyacrylonitrile)	PAN	织物和医用器物等	11 521	768
聚氯乙烯 (polyvinyl chloride)	PVC	管道、电缆绝缘和园林软管等	10 001	666.73
聚氨酯 (polyurethane)	PU 和 PUR	室内装潢、运动垫和包装袋等	7 384	492
苯乙烯-丙烯腈共聚物 (styrene-acrylonitrile copolymer)	SAN	化妆品容器、圆珠笔和打火机等	6 788	452.53
丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (acrylonitrile-butadiene-styrene resin)	ABS	汽车应用和管道等	6 552	436.8
聚醚砜 (polyethersulfone)	PES	电子器械等	1 414	94.27
聚碳酸酯 (polycarbonate)	PC	信息存储光盘和安全窗口等	1 177	78.46
聚酰胺和尼龙 (polyamide and nylon)	PA 和 Nylon	轴承和汽车应用等	50	3.33
聚苯乙烯 (polystyrene)	PS	眼镜架、塑料杯和包装等	30	2
聚乙烯 (polyethylene)	PE	玩具、瓶子、管子和家居用品等	11	0.733
聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene terephthalate)	PET	纺织、电子电器、医疗卫生和建筑等	4	0.267
聚丙烯 (polypropylene)	PP	食品包装和耐微波容器等	1	0.0667

表 3 MPs 风险指数 (H) 危险等级

Table 3 MPs risk index (H) risk level

项目	$0 < H \leq 1$	$1 < H \leq 10$	$10 < H \leq 100$	$100 < H \leq 1\,000$	$H > 1\,000$
危险等级	I	II	III	IV	V

表 4 MPs 风险表征比率 (RCR) 生态风险等级

Table 4 MPs risk characterisation ratio (RCR) ecological risk rating

项目	$0 < RCR \leq 1$	$1 < RCR \leq 10$	$10 < RCR \leq 100$	$RCR > 100$
生态风险等级	无显著风险	低生态风险	中生态风险	高生态风险

2 结果与分析

2.1 我国陆域水体系统表层水中 MPs 的丰度、聚合物类型、形状和尺寸特征

本研究覆盖了我国 12 个自然水体,21 个城市水体,展示了不同水体的 MPs 丰度情况(图 1). 数据表明,自然水体的 MPs 丰度范围在 $1.7 \sim 19\,550 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$,平均值为 $(3\,604.2 \pm 5\,926.420\,47) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$. 城市水体中 MPs 丰度范围在 $0.6 \sim 28\,300 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$,平均值为 $(7\,722.6 \pm 9\,505.7) \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$. 可明显看出经过城市水体 MPs 含量高于自然水体,约为自然水体的 2 倍. 最高丰度出现在城市水体上海金泽水库 MPs 丰度达 $28\,300 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$,而自然水体最高 MPs 丰度在鄱阳湖高达 $19\,550 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$.

从聚合物种类分布情况可以发现,PP、PE 和 PET 等聚合物类型在我国陆域水体系统表层水中是相对较高的(图 2). 其中,自然水体 PP、PE 和 PET 占比的均值分别为 25.3%、40.1% 和 13.4%,城市水体 PP、PE 和 PET 占比的均值分别为 23.9%、21.4% 和 34.9%. 但也存在一些特殊水域,自然水体太湖、长江口和东海没有发现 PE 材质 MPs,城市水体中,金泽水库和上海中心水体没有发现 PP 材质 MPs;没有发现 PP 材质 MPs 的地方集中在上海

地区. 城市水体中的聚合物种类比自然水体中多,PC、PE-PVA 和 PAN 为城市水体中特有的聚合物.

在 MPs 形状特征方面,数据显示,在绝大部分水域中纤维状 MPs ($3.9\% \sim 93.4\%$) 所占比例是相对较高的(图 3). 计算出自然水体中的纤维 MPs 占比均值和城市水体中纤维 MPs 占比均值后,可知城市水体中纤维 MPs 含量比自然水体中纤维状 MPs 含量高 15%.

不同水体中 MPs 的尺寸分布,在绝大部分水体中 $<1 \text{ mm}$ 的 MPs 占 ($46.8\% \sim 97\%$) 主导地位(图 4). 其中,上海的小规模河口 99.5% 的 MPs $<2 \text{ mm}$ ^[31]; 武汉 20 个城市湖泊中 $<2 \text{ mm}$ 的 MPs 含量 $>80\%$ ^[9]. 洞庭湖中 $<2 \text{ mm}$ 的 MPs 含量占总量的 65%^[26].

2.2 水体 MPs 的风险表征比率分析

图 5 显示我国自然水体的 RCR 范围为 $0.000\,3 \sim 164.87$,均值为 22.09 ± 45.2 . 城市水体 RCR 范围为 $0.000\,2 \sim 165.46$,均值为 15.67 ± 34.8 . 这说明自然水体和城市水体的 MPs 环境风险表征比率大致在同一数量及范围内,且均值处在同一风险程度,但差值范围大.

从聚合物的角度来说,PP 的危害指数很小,对整体的 RCR 值影响不明显. 危险指数较高的 PAN

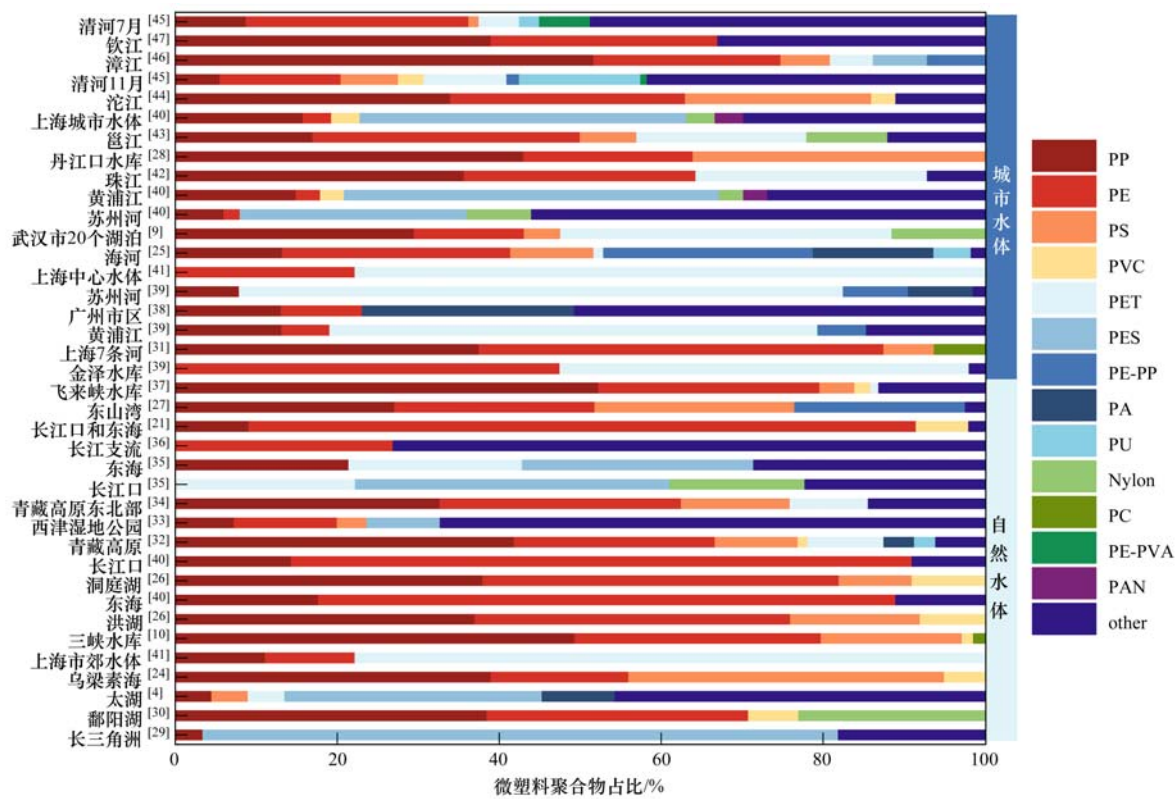


图2 我国陆域水体系统表层水中 MPs 的聚合物类型
Fig. 2 Polymer type of MPs in surface waters of terrestrial water systems in China

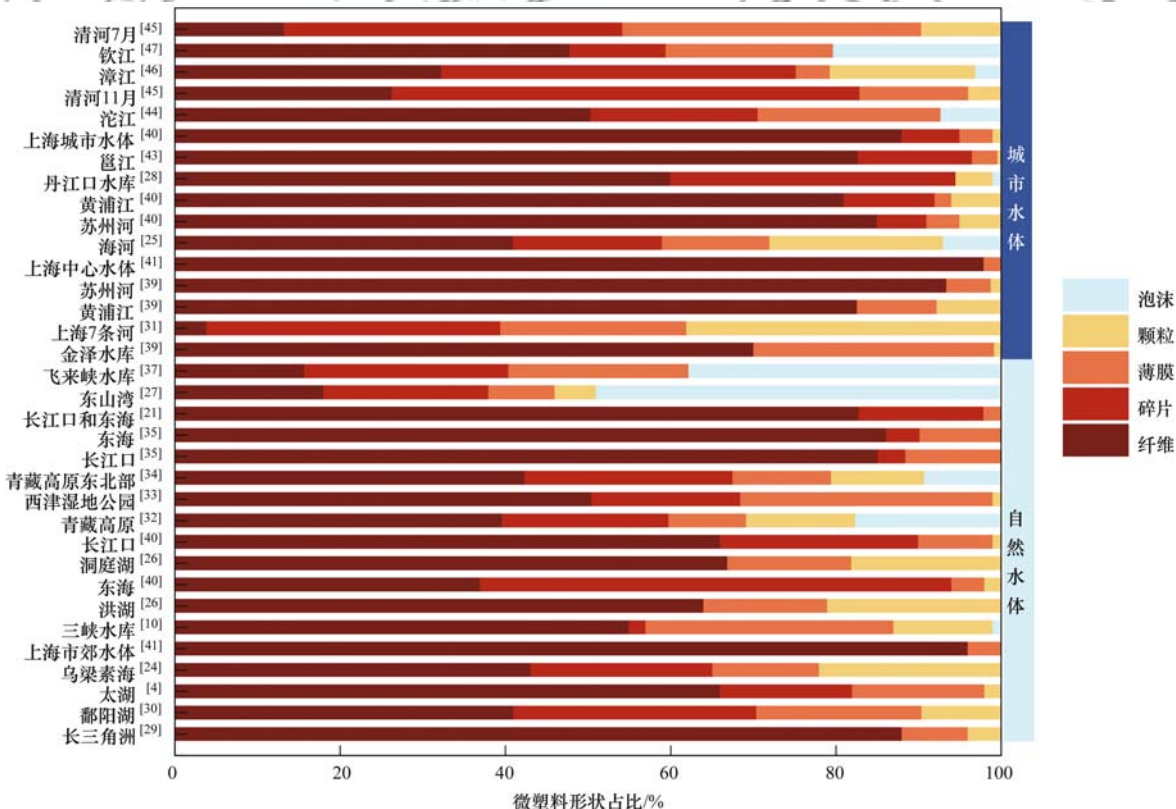


图3 我国陆域水体系统表层水中 MPs 的形状特征
Fig. 3 Shape characteristics of MPs in surface waters of terrestrial water systems in China

和 PES 等聚合物含量较多,整体 RCR 值会偏高. 总体而言,图5 说明城市水体的 RCR 平均值较低,但

是属于中生态风险类型的地区较多. 在本研究中,我国陆域水体系统表层水中 MPs 的风险指数(H)值低

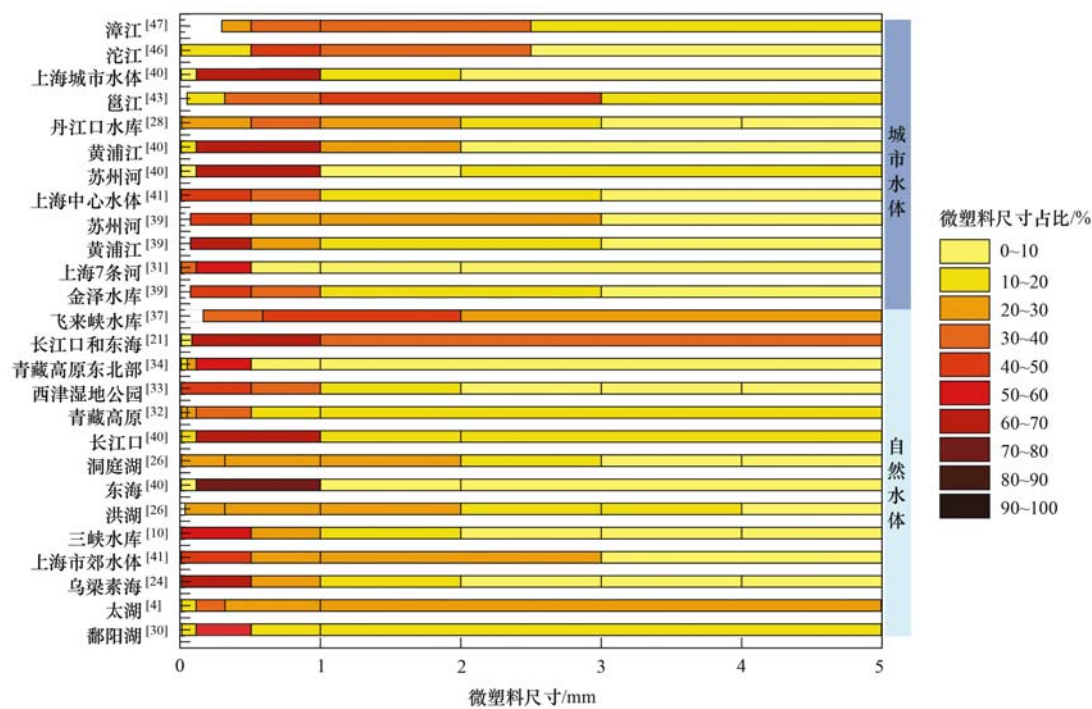


图 4 我国陆域水体系统表层水中 MPs 的尺寸特征

Fig. 4 Size characteristics of MPs in surface waters of terrestrial water systems in China

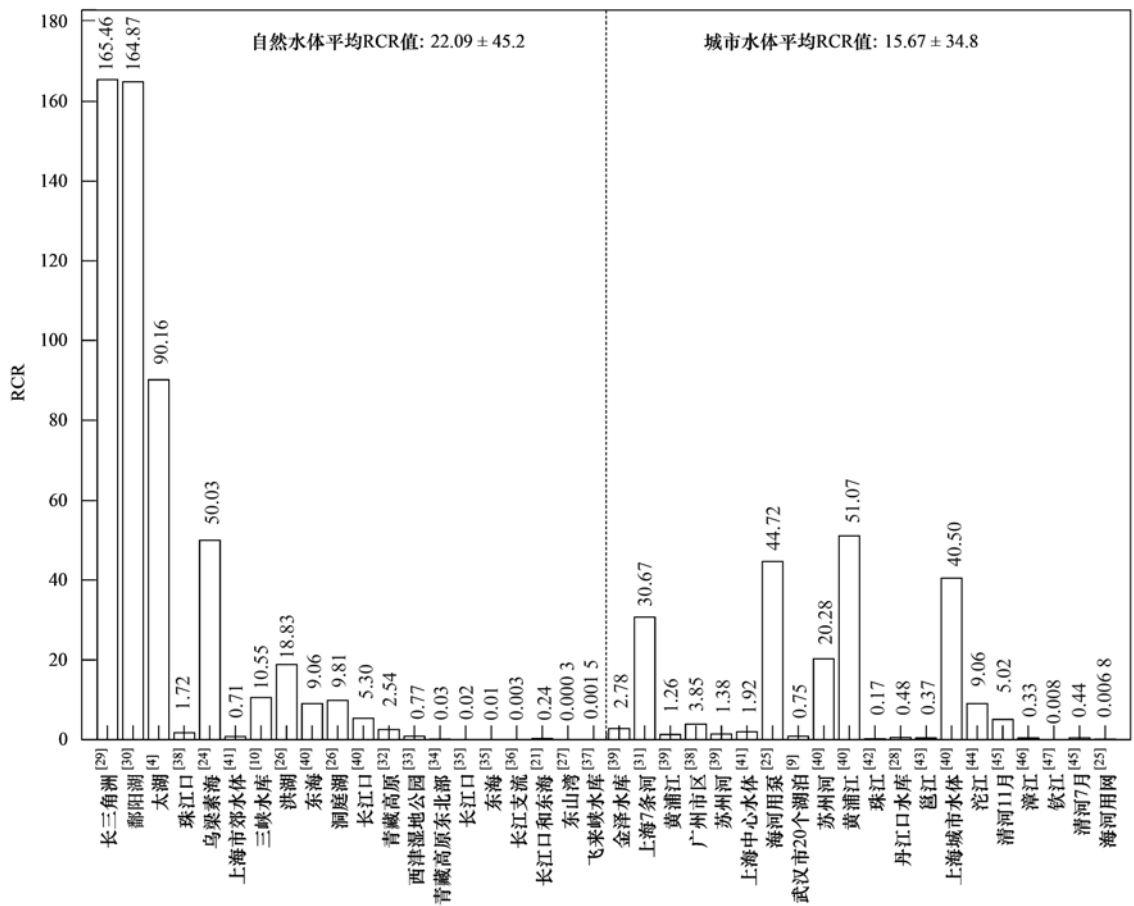


图 5 我国陆域水体系统表层水中 MPs 的风险表征比率

Fig. 5 Risk characterisation ratio of MPs in surface water of continental water system in China

于 10, 表明其化学风险水平较低 (表 3). 上海金泽水库的 MPs 丰度是调查过程中最高的, 但由于采样

分析过程中的聚合物种类较少, 且是 PET 和 PP 这样危险指数较小的聚合物, 因此 RCR 为 2.78, 属于

低生态风险区域. 而长三角的小水体本身丰度值就很高(达 $21\,760\text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$), 并且聚合物种类中包含 PES 这种危险指数相对较高的聚合物, RCR 的计算结果是 165.46, 属于高风险生态区域.

MPs 丰度值会影响 RCR 值. 对自然水体来说, MPs 的丰度与 RCR 值显著相关($R^2 = 0.875$, $P < 0.01$); 但城市水体经统计分析, 结果表明, MPs 的丰度与 RCR 的关系不显著($R^2 = 0.01$, $P = 0.884$). 此外, 采样区域分布、调查时间和采样方式等因素都会对 RCR 值造成显著影响.

2.3 社会因素与 MPs 丰度及 RCR 值的统计分析

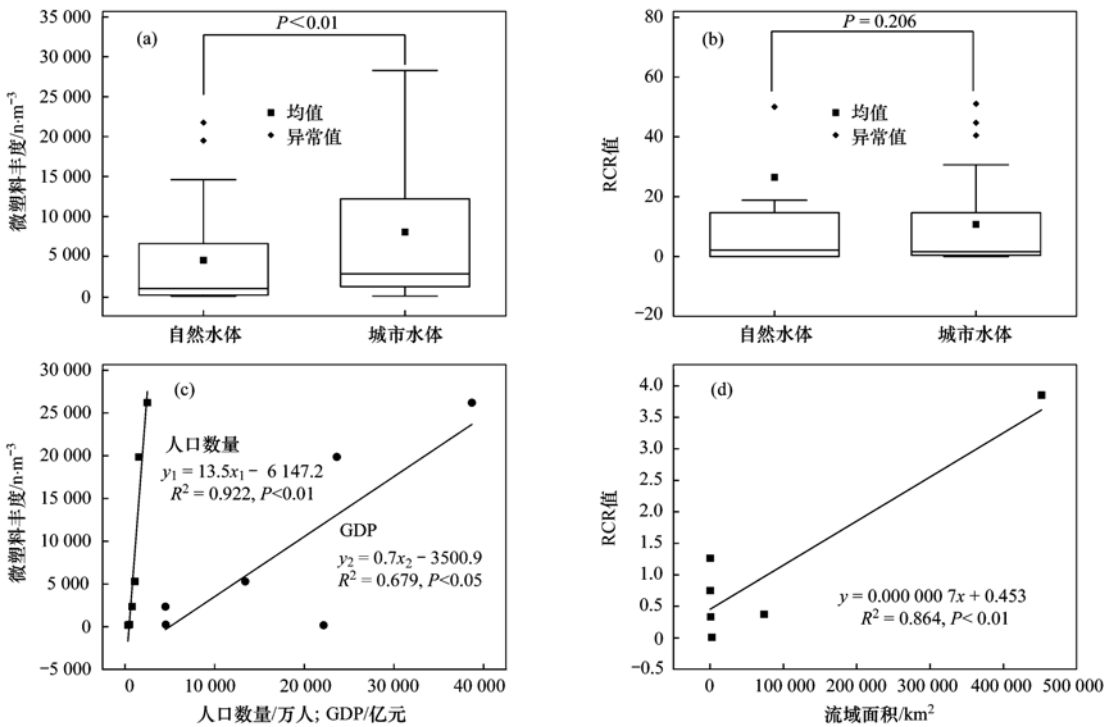
本研究经配对样本 t 检验分析表明, 城市水体

的 MPs 丰度显著高于自然水体($P < 0.01$) [图 6 (a)], 但在 RCR 值方面, 这种差异并不显著($P > 0.05$) [图 6 (b)]. 研究地区均为城市水体, 社会因素数据来自国家统计局及地方统计局(表 5). 结果表明, MPs 丰度和流域面积 ($R^2 = 0.188$, $P = 0.391$)、RCR 与 GDP ($R^2 = 0.150$, $P = 0.447$)、RCR 与流域常住人口 ($R^2 = 0.274$, $P = 0.287$) 不存在显著相关性; 但各地的 RCR 值与流域面积呈正相关 ($R^2 = 0.864$, $P < 0.01$), 而 MPs 丰度与 GDP ($R^2 = 0.679$, $P < 0.05$)、流域常住人口 ($R^2 = 0.922$, $P < 0.01$) 显著性相关 [图 6 (c) 和图 6 (d)].

表 5 城市水体的社会因素数据

Table 5 Social factor data of urban water body

水域	城市	年份	常住人口/万人	GDP/亿元	流域面积/km ²	文献
武汉市 20 个湖泊	湖北省武汉市	2017	1 089.29	13 410	226.117	[9]
广州市区水域	广东省广州市	2019	1 530.59	23 628.6	452 000	[38]
黄浦江	上海市	2020	2487	38 700.58	201	[39]
邕江	广西省南宁市	2019	781.97	4 506.56	73 728	[43]
漳江	福建省漳州市	2020	505.43	4 545.6	1 000	[46]
钦江	广西省钦州市	2020	330	22 156.69	2 457	[47]



(a) 自然水体与城市水体中微塑料丰度关系, (b) 自然水体、城市水体与 RCR 值关系, (c) 微塑料丰度与城市人口、GDP 关系, (d) RCR 值与流域面积关系

图 6 我国陆域水体系统表层水中 MPs 的丰度和风险表征比率与水域相关社会因素的相关性
Fig. 6 Correlation between the abundance and risk characterization ratio of MPs in surface water of terrestrial water system in China and relevant social factors in water

3 讨论

3.1 我国陆域水体系统表层水 MPs 污染情况

从地理分布上看, 我国淡水 MPs 研究主要集中在

在长江流域、珠江流域以及部分城市内河水域. 随着人口密度和人类活动的增加, 淡水系统中的 MPs 污染变得令人担忧. Sulistyowati 等^[52]发现印度尼西亚西萨达河地表水样品丰度介于 13.33 ~ 113.33

$\text{n}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间. Scherer 等^[53]发现捷克 Elbe 地表水 MPs 含量 $5.57 \text{ n}\cdot\text{m}^{-3}$. 与世界其他地区的数据相比,发现中国内陆水域检测到的 MPs 含量更丰富. 这可能表明,中国内陆水系的污染比较严重.

在本研究样本中,PP、PE 和 PET 超总量的 60%. 大部分 PE 和 PP 在日常生活和工业过程中都被广泛使用^[54,55],消费总量占全球塑料使用量的一半. 自然水体中 PA 和 PES 居多,并且大多发现在与渔民活动有关的下游和河口地区^[56]. Xiong 等^[57]发现 PE、PS 和 PP 是中国长江下游最常见的聚合物. Zhou 等^[14]发现黄海中聚合物较多的是 PP、PE 和 PS,渤海^[58]和地中海^[59]中聚合物众多的也是 PP、PE 和 PS. 据报道,PET 纤维的一半来源是服装^[60],城市中有大量人口流动,可能使得 PET 在城市中广泛分布. 而大部分 PE 薄膜可能来自农田活动,例如塑料薄膜覆盖^[61],农田较多处在城市郊区. 这可以解释为何城市水体中的 PET 多而 PE 较少.

本研究发现我国陆域水体系统表层水纤维状 MPs 高达 58%. 城市水体中的纤维 MPs 被认为来自洗涤废水^[62]、悬浮大气颗粒^[63]、轮胎磨损颗粒^[64]和捕鱼活动产生的废物^[10]. 城市地区中生活污水可能是河流中纤维的主要来源之一,这也可能是造成城市 MPs 丰度高的重要原因之一. 自然水体中的纤维,在很大程度上来自养殖场的渔网和渔绳等^[26]. 此外,生活污水厂排水、地表径流、农业和大气沉降也是水体中塑料纤维的潜在来源.

我国陆域水体系统表层水生态系统发现 MPs 最常见的尺寸是 $<1 \text{ mm}$. 然而,其他地区报告结果与之相同,如韩国洛东江 ($<0.3 \text{ mm}$ 的 MPs 占总量的 81%)^[65]和五大湖^[66] ($0.350\sim0.999 \text{ mm}$ 之间的 MPs 占总量的 81%),这些地区明显富集了小型 MPs. 这些小型 MPs 的来源可能是人为直接排放,如个人护理用品中的颗粒;由于机械降解^[67]、光氧化^[1]和生物降解^[68]导致的大型塑料碎片的深度破碎.

3.2 我国陆域水体系统表层水中 MPs 的生态风险评估

MPs 丰度值和采样区域分布等因素会改变生态环境的风险等级. 本研究中显示同地区不同采样方式收集到的 MPs 数量是大不相同的. 同一地区的 RCR 也会存在一定差异,例如 Chen 等^[39]研究的黄浦江与 Luo 等^[40]研究的黄浦江采样时间和具体采样地点略有差异,RCR 的值分别为 1.26 和 51.07,直接影响了生态风险程度. 气候也会影响 RCR 值,分别在夏季和冬季对北京清河^[45]的水体进行采样,夏季和冬季的 RCR 值分别为 0.43 和 5.02,生态风

险程度也从无生态风险转变成低生态风险. 本研究发现天气状况的不同也会影响水体中 MPs 的含量,温度、风和降雨都会影响 MPs 的垂直分布^[10]. 同时,采样方式对 RCR 值也有一定影响,天津海河^[25]用拖网和机械泵采取水样,明显机械泵采取水样中的 MPs 丰度高于拖网采取的水样,机械泵采取水样中的 MPs 丰度大约是拖网采取的水样的 656 倍,而机械泵采取水样中的 RCR 大约是拖网采取的水样的 657 倍. 传统上由于按体积计算,水样采集器收集的样本丰度高于拖网采集的样本丰度^[69]. 就尺寸而言,水样采集器收集样品比拖网采样捕获更多更小的 MPs^[70]. 为讨论本研究评估方法的可靠性,该方法显示福建东山湾是无显著风险 ($\text{RCR}=0.0003$),在 Pan 等^[27]研究中东山湾潜在生态风险较小,这与本研究的结论一致.

不同聚合物的危害指数会影响到 RCR 值. 一些聚合物的危害指数是比较高的,比如 PAN、PVC 和 PC 等,这表明聚合物的危害指数和含量显著影响了 H 值的大小. 由于 PAN、ABS 和 SAN 等全球塑料产生量较少,且不易分解,因此它们会在水体中累积,很少在科学研究中被发现,然而,它们相对较高的暴露概率和强大的潜在毒性对人类健康构成了潜在风险^[71]. 这就导致一些研究区域聚合物危险指数较低受到轻度污染,而聚合物危险指数高且含量高的区域则受到严重污染. 因此,金泽水库、黄浦江和广州市区河流等地区,不能单纯依靠聚合物危害指数来证明研究区目前的污染状况. 然而,风险表征比率可以揭示研究区域 MPs 污染的生态风险程度,为确定其潜在的生态风险提供参考. 因此,MPs 聚合物类型的变化在一定程度上影响了研究区污染水平的变化.

然而,MPs 的风险评估还存在一些问题,包括缺乏统一的量化模型和明确的背景值. 此外,MPs 可以吸附周围环境中的各种污染物(包括重金属和持久性有机污染物)^[72],这不可避免地增强了它们的毒性. 人类可能通过食物、饮料和空气途径接触 MPs^[73-75]. 因此,需要进一步研究我国陆域水体系统表层水区域中 MPs 对人体的潜在暴露途径,明确其对人体的潜在风险. 大多数研究都是针对 MPs 的丰度和聚合物分布进行监测,以评估海面、河口、湖泊和沉积物等的 MPs 污染水平,但没有把 MPs 的尺寸考虑在内. 如何评价 MPs 与其他污染物联合作用时的复杂毒性,仍有待进一步研究.

3.3 社会因素对于我国陆域水体系统表层水 RCR 值和 MPs 丰度的影响

MPs 污染发生在全球多地被证明与社会因素存

在关系.本研究通过 MPs 对生态风险评估计算展示的 RCR 区域分布,RCR 值与流域面积呈正相关($R^2 = 0.864$, $P < 0.01$). RCR 的值由 1.3 节的公式可以看出与 MPs 本身的丰度和聚合物特征有密切的关系.流域面积的大小会影响河水流量,从而会影响到 MPs 的数量和特征等.因此,可以判断 RCR 值和流域面积相关性.

人口密度与 MPs 丰度有显著相关性.本研究表明,MPs 丰度与 GDP ($R^2 = 0.679$, $P < 0.05$),流域常住人口($R^2 = 0.922$, $P < 0.01$)等社会因素呈正相关关系. Zhang 等^[47]的研究也表明,MPs 丰度与流域人口密度呈显著正相关. Wang 等^[9]调查了武汉市的湖泊和河流,发现 MPs 污染水平与人口密度呈显著正相关.工业园区或物流园区附近的 MPs 含量最高,表明人类活动可能是 MPs 污染加剧的最重要原因之一^[38]. Browne 等^[76]发现人口密集地区的 MPs 较多,且其丰度与人口密度显著关系.根据切萨皮克湾河口采样分析结果, Yonkos 等^[77]的研究观察到,在人口密度更高的城市地区,MPs 的浓度更高.在我国上海是中国人口最多的城市之一,人口显著高于武汉、南宁等城市,人口数量甚至比中小城市高 10 倍以上(数据来自国家统计局).因此,长江口 MPs 含量远高于其他沿海地区.

MPs 丰度与流域 GDP 呈正相关,这与 Tang^[78]的研究结果一致.中国是世界上最大的塑料生产国和消费国,虽然中国人口基数大,人均产塑料量在全球排名靠后,但排入海洋的废弃物确实占世界前列^[79].中国不同地区不同的经济增长水平、城镇化水平和资源水平等,使得沿海地区的 MPs 丰度呈现出明显的多样性.特定地点的经济发展水平,如旅游发达地区,导致 MPs 丰度增加^[80],这与本研究分析的结果相同.因此,社会因素数据可能在某种程度上解释了我国陆域水体系统表层水 MPs 数量的多少.

目前越来越多的研究关注 MPs 的毒性及其在环境中的应用.当人类和动物不断接触 MPs 时,MPs 有直接或间接造成伤害的倾向^[81].重要的是管理塑料的使用,以减少塑料污染对环境的影响.人工聚合物(包括 MPs)不属于国家水质标准中的污染物.2019 年生态环境部建议建立包括重金属化合物在内的有毒有害水污染物清单^[82].这反映了政府对更新中国现有淡水水质标准的愿望,将人工聚合物作为水质指标或参数纳入标准可能是一个机会.

4 结论

(1) 自然水体的 MPs 丰度平均值为($3\ 604.2 \pm 5\ 926.4$) $\text{n} \cdot \text{m}^{-3}$,城市水体 MPs 丰度平均值为

($7\ 722.6 \pm 9\ 505.7$) $\text{n} \cdot \text{m}^{-3}$;自然水体的 RCR 平均值为 22.09 ± 45.2 ,城市水体 RCR 平均值为 15.67 ± 34.8 .

(2) 在形状和大小上,MPs 分别以纤维状和 $0.5 \sim 2\ \text{mm}$ 为主.检测到 MPs 的主要聚合物类型为 PP (21.3%)、PE (24.4%) 和 PET (13.3%).

(3) 本研究一共分析 40 个数据,其中 17 个无显著风险、12 个低生态风险、9 个中生态风险和 2 个高生态风险.我国陆域水体系统表层水中 MPs 污染与周围的社会经济发展密切相关,RCR 值与流域面积,MPs 丰度与 GDP、流域常住人口均有显著影响($P < 0.05$).

(4) 我国陆域水体表层水中,城市水体 MPs 丰度远高于自然水体,MPs 的丰度、采样方式和聚合物占比会影响风险表征比率 RCR 的值,因此,MPs 的丰度与 RCR 值并不是完全呈正比关系.总的来说,本研究的结果为我国陆域水体系统表层水中 MPs 的生态风险评估提供了基础方法,这将有助于人们了解 MPs 的分布、来源和生态影响,可以支持进一步监测和管理 MPs 对淡水资源的威胁.

参考文献:

- [1] Andrady A L. Microplastics in the marine environment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, **62**(8): 1596-1605.
- [2] C3zar A, Echevarria F, Gonz3lez-Gordillo J I, et al. Plastic debris in the open ocean [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**(28): 10239-10244.
- [3] Wagner M, Scherer C, Alvarez-Mu3oz D, et al. Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2014, **26**(1), doi: 10.1186/s12302-014-0012-7.
- [4] Su L, Xue Y G, Li L Y, et al. Microplastics in Taihu Lake, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 711-719.
- [5] Barboza L G A, Lopes C, Oliveira P, et al. Microplastics in wild fish from North East Atlantic Ocean and its potential for causing neurotoxic effects, lipid oxidative damage, and human health risks associated with ingestion exposure [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **717**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134625.
- [6] Schrank I, Trotter B, Dummert J, et al. Effects of microplastic particles and leaching additive on the life history and morphology of *Daphnia magna* [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113233.
- [7] Wang Z Q, Zhang Y L, Kang S C, et al. Research progresses of microplastic pollution in freshwater systems [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **795**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148888.
- [8] Boucher J, Friot D. Primary microplastics in the oceans: a global evaluation of sources [M]. Gland: IUCN, 2017.
- [9] 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.
- [10] Di M X, Wang J. Microplastics in surface waters and sediments

- of the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 1620-1627.
- [11] Yusuf A, Sodiq A, Giwa A, *et al.* Updated review on microplastics in water, their occurrence, detection, measurement, environmental pollution, and the need for regulatory standards[J]. *Environmental Pollution*, 2022, **292**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.118421.
- [12] Zhang Q, Xu E G, Li J N, *et al.* A review of microplastics in table salt, drinking water, and air; direct human exposure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54** (7): 3740-3751.
- [13] Liu K, Wu T N, Wang X H, *et al.* Consistent transport of terrestrial microplastics to the ocean through atmosphere [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53** (18): 10612-10619.
- [14] Zhou Q, Zhang H B, Fu C C, *et al.* The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. *Geoderma*, 2018, **322**: 201-208.
- [15] EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). Presence of microplastics and nanoplastics in food, with particular focus on seafood[J]. *EFSA Journal*, 2016, **14** (6), doi: 10.2903/j.efsa.2016.4501.
- [16] Wright S L, Kelly F J. Plastic and human health: a micro issue? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51** (12): 6634-6647.
- [17] Revel M, Chatel A, Mouneyrac C. Micro (nano) plastics: a threat to human health? [J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, **1**: 17-23.
- [18] Bergmann M, Gutow L, Klages M. Marine anthropogenic litter [M]. Cham: Springer, 2015.
- [19] Lithner D, Larsson Å, Dave G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409** (18): 3309-3324.
- [20] Wang G L, Lu J J, Li W J, *et al.* Seasonal variation and risk assessment of microplastics in surface water of the Manas River Basin, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, **208**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111477.
- [21] Xu P, Peng G Y, Su L, *et al.* Microplastic risk assessment in surface waters: a case study in the Changjiang Estuary, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **133**: 647-654.
- [22] Peng G Y, Xu P, Zhu B S, *et al.* Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China; a case study of risk assessment in mega-cities [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **234**: 448-456.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, **14** (8): 975-1001.
- [24] Mao R F, Hu Y Y, Zhang S Y, *et al.* Microplastics in the surface water of Wuliangsuhai Lake, northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **723**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137820.
- [25] Liu Y, Zhang J D, Cai C Y, *et al.* Occurrence and characteristics of microplastics in the Haihe River: an investigation of a seagoing river flowing through a megacity in northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114261.
- [26] 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.
- [27] Pan Z, Liu Q L, Jiang R G, *et al.* Microplastic pollution and ecological risk assessment in an estuarine environment: the Dongshan Bay of China[J]. *Chemosphere*, 2021, **262**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127876.
- [28] Di M X, Liu X N, Wang W F, *et al.* Manuscript prepared for submission to environmental toxicology and pharmacology pollution in drinking water source areas: microplastics in the Danjiangkou Reservoir, China [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2019, **65**: 82-89.
- [29] Hu L L, Chernick M, Hinton D E, *et al.* Microplastics in small waterbodies and tadpoles from Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52** (15): 8885-8893.
- [30] 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.
- [31] Zhang J X, Zhang C L, Deng Y X, *et al.* Microplastics in the surface water of small-scale estuaries in Shanghai [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **149**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110569.
- [32] Feng S S, Lu H W, Yao T C, *et al.* Microplastic footprints in the Qinghai-Tibet Plateau and their implications to the Yangtze River Basin [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **407**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.124776.
- [33] Wang Q P, Huang K, Li Y Z, *et al.* Microplastics abundance, distribution, and composition in freshwater and sediments from the largest Xijin Wetland Park, Nanning, South China [J]. *Gondwana Research*, 2021, doi: 10.1016/j.gr.2021.07.009.
- [34] Feng S S, Lu H W, Tian P P, *et al.* Analysis of microplastics in a remote region of the Tibetan Plateau: implications for natural environmental response to human activities [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **739**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140087.
- [35] Zhao S Y, Wang T, Zhu L X, *et al.* Analysis of suspended microplastics in the Changjiang Estuary: implications for riverine plastic load to the ocean [J]. *Water Research*, 2019, **161**: 560-569.
- [36] Li Y B, Lu Z B, Zheng H Y, *et al.* Microplastics in surface water and sediments of Chongming Island in the Yangtze Estuary, China [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2020, **32** (1), doi: 10.1186/s12302-020-0297-7.
- [37] Tan X L, Yu X B, Cai L Q, *et al.* Microplastics and associated PAHs in surface water from the Feilaixia Reservoir in the Beijing River, China [J]. *Chemosphere*, 2019, **221**: 834-840.
- [38] Yan M T, Nie H Y, Xu K H, *et al.* Microplastic abundance, distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou city and Pearl River estuary, China [J]. *Chemosphere*, 2019, **217**: 879-886.
- [39] Chen H, Jia Q L, Zhao X, *et al.* The occurrence of microplastics in water bodies in urban agglomerations: impacts of drainage system overflow in wet weather, catchment land-uses, and environmental management practices [J]. *Water Research*, 2020, **183**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116073.
- [40] Luo W Y, Su L, Craig N J, *et al.* Comparison of microplastic pollution in different water bodies from urban creeks to coastal waters [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **246**: 174-182.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] Zhang X, Leng Y F, Liu X N, *et al.* Microplastics' pollution and risk assessment in an urban river: a case study in the Yongjiang River, Nanning City, South China [J]. *Exposure and Health*, 2020, **12**(2): 141-151.
- [44] Zhou G Y, Wang Q G, Zhang J, *et al.* Distribution and characteristics of microplastics in urban waters of seven cities in the Tuojiang River basin, China [J]. *Environmental Research*, 2020, **189**, doi: 10.1016/j.envres.2020.109893.
- [45] Wang C, Xing R L, Sun M D, *et al.* Microplastics profile in a typical urban river in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **743**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140708.
- [46] Pan Z, Sun Y, Liu Q L, *et al.* Riverine microplastic pollution matters: a case study in the Zhangjiang River of Southeastern China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **159**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111516.
- [47] Zhang L S, Liu J Y, Xie Y S, *et al.* Distribution of microplastics in surface water and sediments of Qin river in Beibu Gulf, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **708**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135176.
- [48] ECB. Technical guidance document on risk assessment [R]. Ispra: ECB, 2003.
- [49] Adam V, Yang T, Nowack B. Toward an ecotoxicological risk assessment of microplastics: comparison of available hazard and exposure data in freshwaters [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2019, **38**(2): 436-447.
- [50] Everaert G, van Cauwenberghe L, de Rijcke M, *et al.* Risk assessment of microplastics in the ocean: modelling approach and first conclusions [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **242**: 1930-1938.
- [51] 沈洪艳, 胡小敏. 不同环境介质中污染物生态风险评价方法的国内研究进展 [J]. *河北科技大学学报*, 2018, **39**(2): 176-182.
- Shen H Y, Hu X M. Research progress on ecological risk assessment methods of pollutants in different environmental media at domestic [J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2018, **39**(2): 176-182.
- [52] Sulistyowati L, Nurhasanah, Riani E, *et al.* The occurrence and abundance of microplastics in surface water of the midstream and downstream of the Cisadane River, Indonesia [J]. *Chemosphere*, 2021, **291**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133071.
- [53] Scherer C, Weber A, Stock F, *et al.* Comparative assessment of microplastics in water and sediment of a large European river [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **738**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139866.
- [54] Hahladakis J N, Velis C A, Weber R, *et al.* An overview of chemical additives present in plastics: migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **344**: 179-199.
- [55] Au S Y, Lee C M, Weinstein J E, *et al.* Trophic transfer of microplastics in aquatic ecosystems: identifying critical research needs [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, **13**(3): 505-509.
- [56] Silva-Cavalcanti J S, Silva J D B, de Franca E J, *et al.* Microplastics ingestion by a common tropical freshwater fishing resource [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **221**: 218-226.
- [57] Xiong X, Wu C X, Elser J J, *et al.* Occurrence and fate of microplastic debris in middle and lower reaches of the Yangtze River-From inland to the sea [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **659**: 66-73.
- [58] Zhang W W, Zhang S F, Wang J Y, *et al.* Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 541-548.
- [59] Kedzierski M, Palazot M, Soccalingame L, *et al.* Chemical composition of microplastics floating on the surface of the Mediterranean Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, **174**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.113284.
- [60] Carr S A. Sources and dispersive modes of micro-fibers in the environment [J]. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2017, **13**(3): 466-469.
- [61] Ng E L, Huerta Lwanga E, Eldridge S M, *et al.* An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1377-1388.
- [62] Hernandez E, Nowack B, Mitrano D M. Polyester textiles as a source of microplastics from households: a mechanistic study to understand microfiber release during washing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(12): 7036-7046.
- [63] Liu K, Wang X H, Fang T, *et al.* Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **675**: 462-471.
- [64] Jarlskog I, Strömvall A M, Magnusson K, *et al.* Occurrence of tire and bitumen wear microplastics on urban streets and in sweepsand and washwater [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **729**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138950.
- [65] Eo S, Hong S H, Song Y K, *et al.* Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea [J]. *Water Research*, 2019, **160**: 228-237.
- [66] 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.
- [67] Kooi M, Besseling E, Kroeze C, *et al.* Modeling the fate and transport of plastic debris in freshwaters: review and guidance [A]. In: Wagner M, Lambert S (Eds.). *Freshwater Microplastics: Emerging Environmental Contaminants?* [M]. Cham: Springer, 2018.
- [68] Shah A A, Hasan F, Hameed A, *et al.* Biological degradation of plastics: a comprehensive review [J]. *Biotechnology Advances*, 2008, **26**(3): 246-265.
- [69] Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson R C, *et al.* Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(6): 3060-3075.
- [70] Barrows A P W, Neumann C A, Berger M L, *et al.* Grab vs. neuston tow net: a microplastic sampling performance comparison and possible advances in the field [J]. *Analytical Methods*, 2017, **9**(9): 1446-1453.
- [71] Yuan Z H, Nag R, Cummins E. Ranking of potential hazards from microplastics polymers in the marine environment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **429**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128399.
- [72] Zhang C F, Zhou H H, Cui Y Z, *et al.* Microplastics in offshore sediment in the Yellow Sea and East China Sea, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **244**: 827-833.
- [73] Cox K D, Covernton G A, Davies H L, *et al.* Human consumption of microplastics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(12): 7068-7074.

- [74] Rist S, Carney Almroth B, Hartmann N B, *et al.* A critical perspective on early communications concerning human health aspects of microplastics[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **626**: 720-726.
- [75] Vianello A, Jensen R L, Liu L, *et al.* Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a Breathing Thermal Manikin[J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-45054-w.
- [76] 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.
- [77] Yonkos L T, Friedel E A, Perez-Reyes A C, *et al.* Microplastics in four estuarine rivers in the Chesapeake Bay, U. S. A. [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48** (24): 14195-14202.
- [78] Tang G W, Liu M Y, Zhou Q, *et al.* Microplastics and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Xiamen coastal areas: implications for anthropogenic impacts[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **634**: 811-820.
- [79] Jambeck J R, Geyer R, Wilcox C, *et al.* Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015, **347**(6223): 768-771.
- [80] 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.
- [81] Prata J C, da Costa J P, Lopes I, *et al.* A one health perspective of the impacts of microplastics on animal, human and environmental health [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **777**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146094.
- [82] 生态环境部办公厅, 国家卫生健康委办公厅. 关于征求《有毒有害水污染物名录(第一批)》(征求意见稿)意见的函[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/201902/t20190201_691863.html, 2019-01-01.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2021年12月27日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上发布了2020年度中国科技论文统计结果。统计结果显示《环境科学》2020年度总被引频次12 709,影响因子2.736,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列。

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University	 HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review	 LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary	CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach	YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay	QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province	 YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen	PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters	ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS	XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes	XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019	FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley	 CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas	QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing	FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China	SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed	CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season	 LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau	LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope	 ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir	HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation	WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems	 ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions	 DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis	 TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis	 LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China	 SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions	TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis	LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model	 GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS	ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area	WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils	 LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil	ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L.	SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing	FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios	 HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity	CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes	SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction	 LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China	HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings	 YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China	LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)