

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献	赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)
基于卫星和地面监测的河西走廊 O ₃ 浓度时空分布及潜在源区分析	李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)
海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)
华东地区对流层 O ₃ 和前体物 HCHO 及 NO ₂ 的时空特征	王晓雯, 刘昊霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)
2006~2020 年广东省大气甲醛排放演变特征	明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)
淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力	黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)
西安市城市降尘和土壤尘 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中碳组分特征	沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)
长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应	高爽, 凌超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)
黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系	裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)
古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)
华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价	陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)
湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险	张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)
太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析	王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)
白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献	李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)
白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估	宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)
雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应	李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)
鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析	于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)
不同黑臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群	张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)
反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响	李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)
密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响	辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茜, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 舒舒兴, 张俊亚 (4985)
城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制	赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)
高效异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制	魏淑惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)
大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制	岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)
不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响	贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)
淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估	张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)
黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估	耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)
固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估	马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢 (5055)
鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征	赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)
聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响	陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)
聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响	郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)
聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响	赵肖琼, 张恒慧, 赵润枝, 张新梅 (5092)
离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算	张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 翁莉萍, 李永涛 (5102)
土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响	徐文彬, 饶良懿 (5114)
有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析	刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)
平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响	张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)
稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素	罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)
周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响	鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)
华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子	赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)
高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响	聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)
基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性	唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)
不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响	周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)
纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响	王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如苗, 孟庆尧 (5204)
不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性	刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)
CuFeO ₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性	刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)
基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应	陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)
基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估	郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)
基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估	赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)
重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评估及土壤环境基准值推导	马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)
安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析	贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)
湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估	杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)
不同含量外源镉在红壤中的变化特征	周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)
CO ₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析	张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)
综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例	陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)
《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)	

黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和 风险评价

耿娜^{1,2}, 赵广明^{3*}, 张大海^{1,2}, 袁红明³, 李先国^{1,2*}

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要: 河口湿地是陆海相互作用强烈的重要地球关键带,同时还受到人类活动的强烈影响. 黄河三角洲湿地作为年轻的暖温带河口湿地,其微塑料污染状况尚未得到充分研究. 因此对黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的形态、丰度、粒径和成分组成进行了测定,并使用污染负荷指数(PLI)和潜在污染风险指数(PRI)评估了研究区域微塑料污染状况和生态风险. 结果表明,黄河三角洲湿地微塑料丰度为 20 ~ 520 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$,中值为 150 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$. 微塑料形貌以纤维和黑色为主,粒径在 1 mm 以上,成分多为人造丝、聚乙烯、聚酯纤维和聚对苯二甲酸乙二醇酯等. 湿地中微塑料的 PLI 值介于 0.04 ~ 0.96 之间, PRI 值介于 0.00 ~ 171.60 之间,表明黄河三角洲湿地微塑料污染处于轻微污染和低生态风险水平.

关键词: 微塑料(MPs); 黄河三角洲(YRD); 湿地; 污染状况; 生态风险

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-5046-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202210339

Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland

GENG Na^{1,2}, ZHAO Guang-ming^{3*}, ZHANG Da-hai^{1,2}, YUAN Hong-ming³, LI Xian-guo^{1,2*}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China)

Abstract: Estuarine habitats are a critical zone of the Earth with strong land-sea interactions, that are strongly influenced by human activities. Microplastics (MPs) pollution in the Yellow River Delta (YRD) wetland, a typical young warm-temperate estuarine wetland, has not been comprehensively studied. The morphology, abundance, particle size, and polymer composition of MPs in the surface sediments of the YRD wetland were determined, and the pollution status and ecological risk in the study area were evaluated using the pollution load index (PLI) and potential pollution risk index (PRI). The results showed that the abundance of MPs in the YRD wetland was 20-520 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, with a median value of 150 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$. The MPs were primarily fibers in shape and black in color, with particle size over 1 mm. The polymer components were primarily rayon, polyethylene, polyester, and polyethylene terephthalate. The PLI and PRI values of the MPs in the area were between 0.04-0.96 and 0.00-171.60, respectively, indicating that the pollution of MPs in the YRD wetland was at a slightly polluted level with low ecological risk.

Key words: microplastics(MPs); Yellow River Delta(YRD); wetland; pollution status; ecological risk

微塑料(MPs)是指尺寸小于 5 mm 的小型塑料^[1],已是公认的新型污染物,其广泛存在于海洋^[2]、土壤^[3,4]、大气^[5,6]、河流^[7,8]、湿地^[9]、湖泊^[10,11]、生物体^[12]和人体粪便^[13]等各类介质和环境中. 湿地因其独特的地理位置和复杂的生态功能被认为是地球系统关键带,受陆海相互作用和人类活动的影响都非常强烈,是研究 MPs 污染状况的关键热点区域^[14]. 同时,河口湿地生态系统因其重要的生态和经济价值^[15]在 MPs 研究方面也备受关注. 近年来,湿地环境中研究 MPs 的来源和分布逐渐增加^[16,17],包括中国最高的城市湿地——拉鲁湿地,其表层沉积物中 MPs 丰度为 10 ~ 110 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$,主要受城市居民生活产生的塑料垃圾影响,鲜见受工业和农业的影响^[18]; 巴西东南部的沿海红树林湿地表层沉积物中 MPs 丰度为 85 ~ 3 080 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$,频繁的港口活动是其主要来源之一,同时 MPs 分布与植被状态存在相关性^[19]; 在巴西 Paranaguá 河口地区,MPs 以泡沫

和硬塑料碎片为主,丰度最大值甚至出现在环境保护区内,主要受城市和港口活动的影响^[20].

黄河发源于青藏高原,是典型的世界大河之一,其含沙量位居世界首位,自西向东流经青海等九省(自治区)后,携带大量泥沙在山东省境内汇入渤海. 黄河三角洲(YRD)湿地是黄河在其入海口形成的冲积平原,北靠渤海湾,东临莱州湾,是世界上少有的年轻暖温带河口湿地生态系统^[21],清水沟黄河入海口和原刁口河流路(黄河故道),以及二河和三河是 YRD 的重要组成部分. 随着黄河流域人类活动的加剧,以及自然环境和土地利用模式的改变,不可避免地会有大量 MPs 进入 YRD 湿地,但该区域 MPs

收稿日期: 2022-10-30; 修订日期: 2022-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(42076070,41276067); 山东省自然科学基金项目(ZR2020MD079); 地质调查项目(DD20221775)

作者简介: 耿娜(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境微塑料和有机污染物的环境行为, E-mail: gengna97@163.com

* 通信作者, E-mail: guangming_210@163.com; lixg@ouc.edu.cn

污染特征的研究尚很不充分. 因此, 本研究主要通过 对 YRD 湿地表层沉积物中 MPs 形貌、粒径和成分组成等进行系统性的定性和定量分析, 阐明研究区域 MPs 的分布特征和来源, 并通过污染负荷指数 (PLI) 和潜在污染风险指数 (PRI) 计算, 进一步评估 MPs 的潜在生态风险.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究于 2021 年 6 月采集了二河 (TR)、三河 (SR)、黄河故道 (OW)、清水沟黄河入海口 (YE) 和黄河口旅游区其它位置 (WP) 这 5 个区域的表层沉积物, 共 54 个站点, 取样深度为 0 ~ 5 cm. 采样点 站位如图 1 所示, 东南部站位标示为 S1 ~ S33, 西北部 站位标示为 N1 ~ N21, 所有样品采集完成后用冰

块冷冻保存, 并立即送往实验室在 -20°C 下储存, 待 处理和分析.

1.2 样品处理和分析

沉积物样品冷冻干燥至恒重, 过 5 mm 不锈钢 筛后, 采用本实验室前期建立的改进密度浮选法^[22] 使用 ZnCl_2 (分析纯, 国药集团化学试剂有限公司) 饱和溶液 ($1.5\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$) 分离沉积物中的 MPs. 浮选 过程重复两次, 静置后取上层清液过 $32\text{ }\mu\text{m}$ 不锈钢 筛, 用 Milli-Q 水将筛网上的滤渣全部冲洗至烧杯 中, 用 30% H_2O_2 (分析纯, 国药集团化学试剂有限 公司) 消解后过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 玻璃纤维滤膜, 滤膜放置 于培养皿中于 4°C 下保存以待进一步分析. 每 10 个 样品设置一组空白加标实验, 以跟踪浮选分离方法 的回收率, 确保实验数据的稳定性和可靠性. 方法回 收率在 90.0% 以上, 且稳定性良好.



图 1 黄河三角洲湿地表层沉积物采样点站位示意

Fig. 1 Sampling sites of surface sediments in the Yellow River Delta wetland

滤膜中的微粒使用实验室光学显微镜 (SMZ1270, Nikon, 日本) 观察其形状、颜色和尺寸, 记录疑似 MPs 的相关参数并进行标示, 进而使用带衰减全反射附件的傅里叶变换红外光谱仪 (ATR-FT-IR, Spotlight 400, PerkinElmer, 美国) 确认是否是塑料并鉴定聚合物成分. 样品检测前进行空气背景扫描, 去除背景干扰, ATR-FT-IR 仪器参数如下: 扫描次数为 16 次, 光谱范围为 $4000\sim600\text{ cm}^{-1}$, 分辨率为 4 cm^{-1} , 成像面积为 $300\text{ }\mu\text{m}\times300$

μm . 所得红外光谱图与标准谱库进行比较, 匹配度 70% 以上的微粒确认为塑料成分. 本研究中, 经过红 外光谱确认为 MPs 的颗粒占比为 78.6% ~ 80.0%; MPs 丰度均以确认后的颗粒丰度表示.

沉积物粒径使用激光粒度分析仪 (Mastersizer 3000, Malver 公司, 英国) 进行测定, 以 Φ 值表示, 分辨率为 0.01Φ , 测量误差在 3% 以内 [$\Phi = -\log_2 d$, d 为沉积物颗粒的直径 (mm)]. 步骤如下: 研磨后的沉积物样品依次使用 10% H_2O_2 和 3

$\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 去除有机质和碳酸盐,再使用 Milli-Q 水洗至中性后,加入 $1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 六偏磷酸钠(分散剂),超声 30 min 后进行测定,重复测 3 次取平均值. TOC 使用元素分析仪(vario MACRO cube, Elementar 公司,德国)进行测定^[23],步骤如下:取 30 mg 研磨后的沉积物样品,用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 去除无机碳,使用 Milli-Q 水洗涤至中性,离心后将样品烘干至恒重,重复测 3 次取平均值.

1.3 质量控制

按本实验室前期建立的方法^[22]对样品采集和测试过程进行严格的质量控制. 简要描述如下:所有实验人员穿戴丁腈手套和棉质实验服等,所有仪器均避免使用塑料制品,并通过 Milli-Q 水清洗 3 遍后使用,分析过程使用的玻璃设备均用洁净铝箔覆盖. 此外,样品处理和鉴定步骤均在洁净实验台或者洁净室中进行,并在现场样品采集、样品处理和检测鉴定全过程中采用空白对照进行背景检测,对照组与样品同时分析,以此来确定 MPs 的检测鉴定是否受到环境空气的污染.

1.4 数据处理

微塑料的丰度单位为每 kg 干重沉积物的 MPs 数目,符号表示为 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$. 采样站位分布图使用 Arcgis 10.2 (Esri 公司)绘制,所有数据使用 Excel 2019 (Microsoft 微软公司)进行数学运算和处理,采用 SPSS statistics 版本 25 (IBM 公司)进行统计分析,相关图表使用 Origin 2018 (OriginLab 公司)进行绘制.

1.5 生态风险评估

目前衡量土壤或沉积物中微塑料污染状况和生态风险的方法主要有污染负荷指数 (PLI) 法和潜在污染风险指数 (PRI) 法. PLI 最早是由 Tomlinson 等^[24]在 1980 年提出的衡量重金属污染程度的指标,但 Angulo^[25]把 PLI 作为评价不同地区不同污染物污染水平的标准化方法. PRI 最早是由 Hakanson^[26]提出的评价淡水湖沉积物中重金属污染的指标,既考虑了特定沉积物环境中污染物的影响,也考虑了多种污染物的复合影响,定量化分出潜在生态风险等级,而后也逐渐运用到评价微塑料污染的潜在风险^[27]. 这两者既可以用于反映某一采样点的污染状况,也可以用于反映某一整体区域的污染状况. Ebere 等^[28]使用这两个指数研究了淡水中 MPs 污染风险,Rakib 等^[29]在其基础上进一步改进用于评估河流沉积物中 MPs 污染风险. PLI 计算公式如下:

$$CF_i = C_i/C_0 \quad (1)$$

$$PLI_i = \sqrt{CF_i} \quad (2)$$

$$PLI_y = \sqrt[n]{PLI_1 \times PLI_2 \times PLI_3 \times \cdots \times PLI_n} \quad (3)$$

式中, i 表示站位点, n 表示采样点数, CF_i 表示环境实测值(C_i)与背景值(C_0)相比的污染指数, C_i 表示第 i 个站点的 MPs 丰度, C_0 的取值存在一定争议,本研究中按文献^[30]取值 $540\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$,是依据生物体无效应浓度确定的. PLI_i 和 PLI_y 分别表示第 i 个站点和总的 MPs 污染负荷指数. 评价标准划分如下: $PLI < 1$ 表示轻度污染, $1 < PLI < 2$ 表示中度污染, $PLI > 2$ 表示重度污染^[31].

潜在污染风险计算公式如下:

$$C_f = C/C_N \quad (4)$$

$$H_i = \sum \left(\frac{P_i}{C_N} \right) \times S_j \quad (5)$$

$$PRI_i = H_i \times C_f \quad (6)$$

$$PRI = \sqrt[n]{PRI_1 \times PRI_2 \times PRI_3 \times \cdots \times PRI_n} \quad (7)$$

式中, C 表示 MPs 污染丰度, C_N 表示未污染丰度,本研究中取值为 MPs 最小丰度 ($20\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$), C_f 表示环境实测值(C)与无污染值(C_N)相比的污染指数. P_i 表示具有聚合物风险评分的 MPs 浓度, S_j 表示特定聚合物的风险评分(聚乙烯为 11,聚对苯二甲酸乙二醇酯为 4,聚丙烯为 1,人造丝未有相关的风险评分未参与计算). 潜在污染风险等级按照 PRI 大小划分如下: < 150 表示 I 级生态风险(低风险), $150 \sim 300$ 表示 II 级生态风险(中风险), $300 \sim 600$ 表示 III 级生态风险(较高风险), $600 \sim 1\,200$ 表示 IV 级生态风险(高风险), $> 1\,200$ 表示 V 级生态风险(极高风险).

2 结果与讨论

2.1 黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料污染状况

黄河三角洲湿地中所有采样点均有微塑料检出,丰度范围为 $20 \sim 520\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$,均值为 $(169 \pm 119.5)\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$,中值为 $150\text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$;沉积物粒径范围为 $3.52 \sim 7.42\Phi$,TOC 范围为 $0.071\% \sim 1.94\%$ (表 1). 各区域 MPs 丰度中值按 $YE > SR > TR > WP > OW$ 顺序依次降低,各区域沉积物粒径中值按 $WP > YE > TR > SR > OW$ 顺序依次降低,而各区域 TOC 中值按 $YE > OW > WP > SR > TR$ 顺序依次降低; MPs 丰度中值与沉积物粒径和 TOC 中值的相关系数(R^2)分别为: 0.20 ($P = 0.451$) 和 0.0074 ($P = 0.086$),可以看出各区域间三者均无线性相关关系.

为更好了解 YRD 湿地 MPs 污染状况,将其与其它河口湿地沉积物中 MPs 丰度进行比较(表 2). 结果显示,YRD 湿地的 MPs 丰度略高于长江入海口、赛西纳河口和瓦尔诺河口沉积物中 MPs 丰度,低于里海南岸 17 条河流入海口、晋江河口红树林

表 1 黄河三角洲湿地不同区域 MPs 丰度及沉积物粒径、TOC 参数

Table 1 Abundance of MPs, sediment particle size (Φ), and TOC parameters in different regions of the YRD wetland				
采样区域	项目	MPs 丰度 / $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$	粒径	TOC/%
二河 (TR)	最小值	20	3.94 Φ	0.16
	最大值	360	5.45 Φ	0.73
	中值	140	5.11 Φ	0.20
三河 (SR)	最小值	40	4.25 Φ	0.094
	最大值	440	6.27 Φ	0.57
	中值	150	4.99 Φ	0.27
黄河故道 (OW)	最小值	40	3.90 Φ	0.29
	最大值	200	6.49 Φ	0.73
	中值	80	4.84 Φ	0.48
黄河入海口 (YE)	最小值	20	4.44 Φ	0.071
	最大值	520	6.89 Φ	1.45
	中值	170	5.62 Φ	0.64
黄河口旅游区 其他区域 (WP)	最小值	20	3.64 Φ	0.10
	最大值	320	7.45 Φ	1.94
	中值	120	5.71 Φ	0.31
整区	最小值	20	3.52 Φ	0.071
	最大值	520	7.42 Φ	1.94
	中值	150	5.20 Φ	0.52

表 2 不同河口湿地沉积物 MPs 丰度¹⁾

Table 2 Abundance of MPs in sediments of different estuaries and wetlands				
采样地点	丰度/ $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$	检测方法	主要形状	文献
双台子河口	170 $\pm$ 96	傅里叶变换红外光谱	薄膜	[32]
大辽河口	237 $\pm$ 129		薄膜	
黄河三角洲 (2018 年)	136 ~ 2 060	—	碎片和纤维	[33]
晋江河口	980 ~ 2 340	拉曼光谱	纤维	[34]
珠江口	100 ~ 7 900	傅里叶变换红外光谱	纤维	[35]
长江入海口	20 ~ 340	傅里叶变换红外光谱	纤维	[36]
赛西纳河口	72 ~ 191	傅里叶变换红外光谱	碎片	[37]
瓦尔诺河口	46 ~ 100	—	—	[38]
里海 17 条河流入海口	350.6 $\pm$ 232.6	傅里叶变换红外光谱	纤维	[39]
黄河三角洲	20 ~ 520	傅里叶变换红外光谱	纤维	本研究

1) “—”表示文献中未提到相关内容

区域 MPs 丰度范围为 40 ~ 440 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 空间分布上以 N12 为分界点, 左右两边丰度接近, N12 站位出现 MPs 最大值 (440 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$), 该采样点位于渔业养殖区内, MPs 空间分布特征明显受到了人工养殖的影响; OW 区域 MPs 丰度相对较低 (40 ~ 200 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$), 但空间分布没有明显规律性, 主要受地形和土地利用类型不同的影响, 靠近农业种植区 MPs 丰度较高, 如 N18 (180 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 N21 (200 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$), 其余点位均位于河滩, 地势平缓, MPs 丰度相对就较低; YE 区域沿岸 MPs 总体呈现从上游到下游先减后增再减的趋势, 这与实际土地植被类型、地势和水动力输运有关. 宋劼等^[41]研究了黄河三角洲湿地不同植被类型区域沉积物中的 MPs, 得出了植被可加速 MPs 在河口湿地沉积的结论. 虽然 YE 区域整体上属于国家级自然保护区, 却在 S18 达到

湿地和珠江口湿地的 MPs 丰度, 基本接近 Xu 等^[32]研究的流入渤海河流入海口 (双台子和大辽河口) 沉积物中的 MPs 丰度. 然而本研究却显著低于 Duan 等^[33]研究的 2018 年 YRD 湿地 MPs (136 ~ 2 060 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$), 主要是因为采样点位和时间的不同, 其研究中, 旅游区和保护区 MPs 丰度 (分别为 676 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 122 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$) 高于本研究中 YE (包括 WP) 和 OW 区域, 而港口区则是 MPs 污染最严重的区域, 与其他两区差异很大. 总体上可以看出, YRD 湿地中 MPs 污染处于较低水平, 且与区域的服务功能密切相关, 近年来有一定的改善趋势.

2.2 黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料分布特征及影响因素

黄河三角洲湿地表层沉积物中 MPs 因区域不同呈现不同的分布特征 (图 2); TR 区域 MPs 丰度范围为 20 ~ 360 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$, 大体呈现从河流沿岸上游到下游逐渐增加的趋势, 这与 Rakib 等^[40]研究的 Karnaphuli 河流沉积物中 MPs 变化趋势一致, 主要是受河流水动力输运和流域人口密度的影响; SR

MPs 丰度最大值 (520 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$), 主要是因为 S18 位于凹陷水塘内, 较低的地势和较弱的水动力输运造成 MPs 积累. 近海潮汐的影响也可能是另一个重要原因. Bollmann 等^[42]认为 MPs 污染与人口密度和经济活动程度呈正相关; 龙籍艺等^[43]认为其与河流输入和近海潮汐等自然过程有关. 在 YE 区域, 旅游活动等人类生产生活会产生较大量的 MPs, 它们可能会沉积在附近的沉积物中, 也有可能在前述自然过程作用下被输运, 沉积在较远的地方, 使得 MPs 呈现出不规则分布特征.

2.3 黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的形貌特征和来源分析

MPs 的主要形貌和成分是指示其来源的重要指标. 图 3 显示出 YRD 湿地表层沉积物中 MPs 颜色较为丰富, 主要包括黑色、透明、蓝色、白色和其他颜

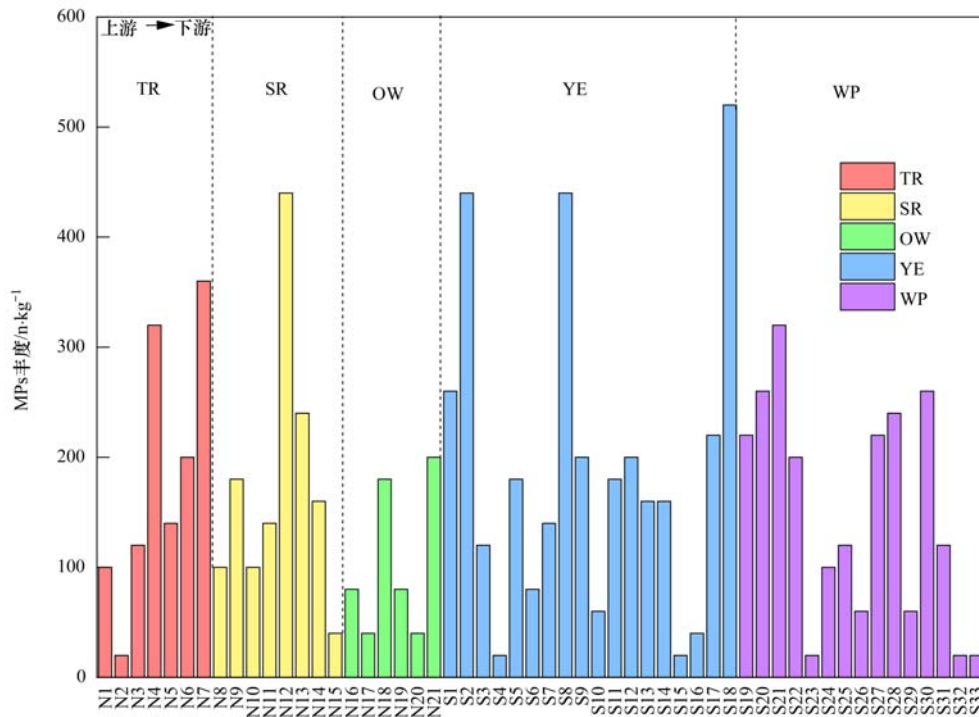


图2 黄河三角洲湿地各采样点 MPs 丰度

Fig. 2 MPs abundance of each sampling site in the YRD wetland

色(红色、绿色和棕色等)共5类,所占比例分别为50.34%、19.91%、17.45%、4.92%和7.38%[图3(a)].黑色占比最大,主要与最初的塑料制品用途用量有关;极少数的MPs(1.12%)同时出现蓝色和透明色等多段颜色,显示出环境对于MPs的老化作用明显,也有文献表明彩色或浅色MPs可能由于光老化等作用褪变成黑色或透明^[44].MPs实际形状分为纤维状、薄膜状、碎片状和颗粒状这4类,如图3(b),这4类形状占比分别为58.43%、38.43%、2.47%和0.67%.纤维状MPs较多除了与其来源较多有关外,还有可能是因为生物膜较为容易在其上生长,导致浮力降低(密度增加)而沉积^[45,46].MPs粒径介于34.60~5 000.00 μm 之间,其中<100、100~500、500~1 000和>1 000 μm 所占比例分别为1.12%、15.73%、30.34%和52.81%[图3(c)],其中1 mm以下的MPs和1 mm以上的MPs

占比相差不大.利用ATR-FT-IR鉴定的聚合物成分主要有人造丝、聚乙烯(PE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚酯纤维(polyester)和其他成分;如图3(d),它们所占比例分别为48.21%、39.73%、6.25%、1.12%和4.69%,与长江口和珠江口MPs聚合物成分相似,一定程度上反映了不同类型聚合物的生产和使用消费量.

纤维状人造丝、PET和PE是YRD湿地中MPs污染的主要类型(图3和图4).人造丝是国内最普遍的人造纤维之一,主要用于个人卫生产品和纺织品,PET常被工业用于生产服装和纺织品,PE常用于食品包装、农业地膜和渔具的制作.已有研究表明^[47],洗涤一件衣物的废水中可以检测出超过1 900个纤维,结合不同聚合物的密度(人造丝:1.50 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,PET:1.37 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,PE:0.96 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$),并根据Wang等^[48]提出的“微塑料特定源

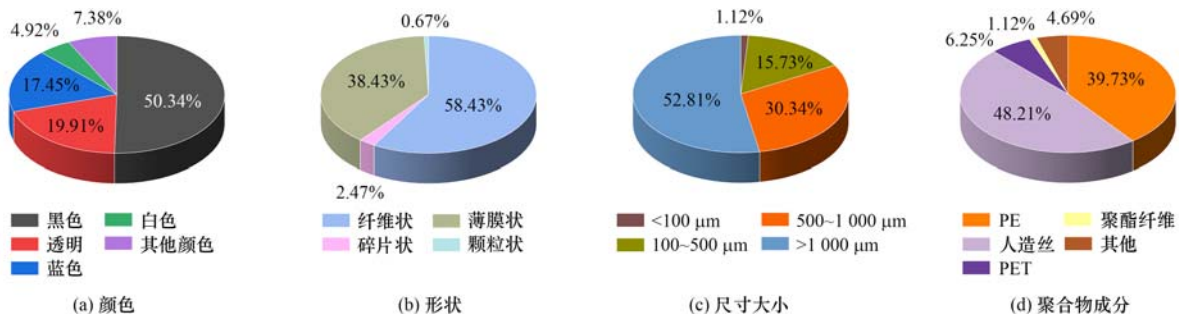


图3 黄河三角洲湿地沉积物中 MPs 的形貌占比

Fig. 3 Morphological proportion of MPs in wetland sediments of the YRD wetland

分类系统”,可以推知 YRD 湿地 MPs 的主要来源是洗衣废水等生活污水的排放和渔具的使用与不当处理. 当地居民衣物等生活纺织品洗涤后产生的次生 MPs 会随污水直接或间接进入湿地, MPs 经过大气或者河流冲刷沉降进入沉积物; 纤维状 PE 主要与渔业活动有关, 钓鱼线或者渔网在使用过程中发生磨损破碎甚至丢弃而造成 MPs 污染. 同样, 根据孙德斌等^[49]对 YRD 湿地土地利用类型划分可知, 薄膜状 PE 主要是因为种植区农业地膜的使用, 其在环境作用下逐步裂解. 碎片状和颗粒状塑料来源广泛, 但是在本工作的研究区域内含量较少, 很难准确判断其来源.

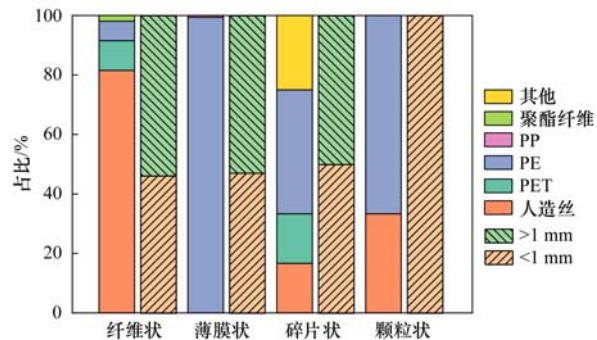


图4 黄河三角洲湿地沉积物中 MPs 形貌特征关系
Fig. 4 Relationship between MPs morphology and characteristics in wetland sediments of the YRD wetland

通过上述形貌和成分分析可知, YRD 湿地中 MPs 的主要来源为次级来源, 是人类活动与自然环境过程相互作用的结果, 主要来源于洗衣废水和生活污水的排放、垃圾的不当处置和渔业用具和农业地膜的使用. 值得注意的是, 湿地中 MPs 类型与渤

海中 MPs 有一定的相似性(包括水体). Zhang 等^[50]研究了渤海表层水体 MPs 丰度平均值为 (0.33 ± 0.34) 颗 $\cdot \text{m}^{-3}$, 主要来源于钓鱼线和泡沫的丢弃, 聚合物成分主要为 PE. Zhao 等^[51]得出渤海和黄海沉积物中 MPs 丰度平均值分别为 $171.80 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $123.60 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, 主要形状为纤维(93.88%), 聚合物类型有人造丝、PE 和 PET; 而 Zhu 等^[52]研究了渤海近岸沉积物中的 MPs, 丰度平均值为 $(458.60 \pm 150.00) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, 主要形状为纤维(77.10%), 聚合物类型有人造丝和 PE. 不难发现, 在渤海和 YRD 湿地沉积物中, 纤维状人造丝、PE 和 PET 是 MPs 主要类型. YRD 地理位置的特殊性使得其既可能作为渤海 MPs 的“源”, 也可能成为其“汇”.

2.4 黄河三角洲湿地微塑料生态风险评估

按分类标准, $\text{PLI} < 1.0$ 表明污染较为轻微. YRD 区域内各站位 MPs 的 PLI 值介于 $0.04 \sim 0.96$ 之间(图 5), 整体区域内的 $\text{PLI}_y = 0.24$, 均属于不同程度的轻微污染. 除了 MPs 的丰度外, PLI 值的大小还取决于 C_0 的取值, 由于目前 MPs 的环境基准值没有确定, 多数研究均采用生物体无效应浓度. Everaert 等^[30]模拟了 MPs 在海洋环境中的演变规律, 结合 MPs 的环境暴露水平和生态效应评估, 确定出 MPs 的生物体无效应浓度为 $540 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, 也是本研究中 C_0 的取值. 值得注意的是, 这种评估方法仍有改进的余地. 首先, 计算过程中 C_0 的参考值不同, 结果亦不相同; 其次, 该方法对于 MPs 的生态效应只考虑了直接影响, 缺少 MPs 作为各类污染物的载体对生态环境的危害; 第三, 该方法只从整体

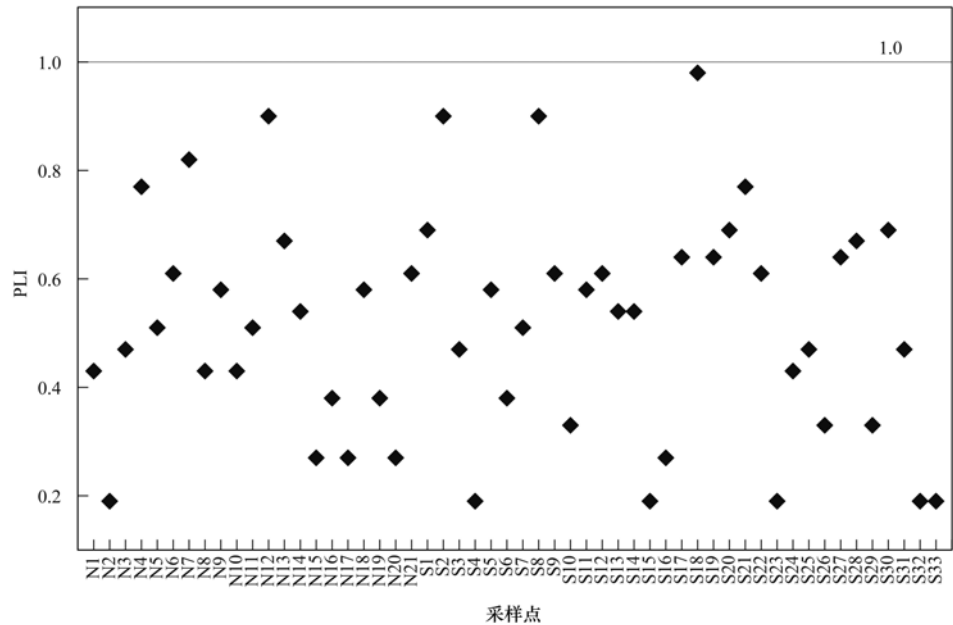


图5 黄河三角洲湿地 MPs 的污染负荷指数
Fig. 5 Pollution load index of MPs in the YRD wetland

MPs 丰度去估算,并没有细化到不同的聚合物类型对环境的风险不同等。

潜在污染风险指数考虑了不同聚合物类型具有不同的生态风险这一点。计算结果表明,YRD 湿地不同区域的潜在污染风险存在一定差异(图6);大部分采样点均属于 I 级(低)生态风险($PRI < 150$),只有 N12 的潜在污染风险等级为 II 级(中)生态风险($PRI = 171.60$);整体区域 PRI 为

38.10,属于 I 级低生态风险。需要指出的是,因为缺乏相应聚合物的风险数据,本研究 PRI 计算中仅考虑了 YRD 区域内沉积物中的 PE 和 PET,丰度最高的人造丝和极少的其他聚合物未考虑在内,因此潜在污染风险指数肯定是被低估了;但是,综合两种风险评估方法的结果以及 MPs 的分布特征来看,YRD 湿地存在一定的 MPs 污染,污染负荷和潜在污染风险较小。

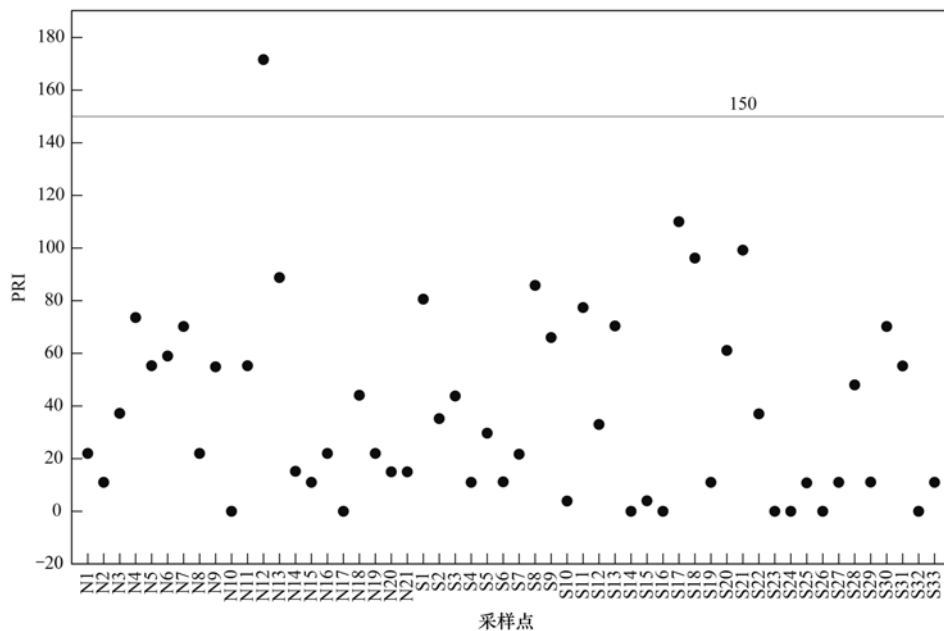


图6 黄河三角洲湿地 MPs 的潜在污染风险指数

Fig. 6 Potential pollution risk index of MPs in the YRD wetland

3 结论

(1) YRD 湿地沉积物中 MPs 丰度范围为 $20 \sim 520 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ [均值为 $(169 \pm 119.5) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$],中值为 $150 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$,处于较低污染水平。MPs 丰度主要与人口密集程度、土地利用类型、经济活动和生产生活方式有关。

(2) 沉积物中 MPs 形貌以黑色纤维状为主,粒径在 1 mm 以上的 MPs 略占优势,成分多为聚乙烯(PE)、人造丝、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和聚酯纤维(polyester);洗衣废水和生活污水的排放、农业地膜和渔业用具的使用是湿地中 MPs 的主要来源。

(3) YRD 区域内整体 PLI 值和 PRI 值分别为 0.24 和 38.10,表明存在一定的 MPs 污染,但污染程度和潜在污染风险较低。

参考文献:

- [1] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, *et al.* Lost at sea: where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, **304**(5672), doi: 10.1126/science.1094559.
- [2] Ryan P G, Moore C J, Van Franeker J A, *et al.* Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, **364**(1526): 1999-2012.
- [3] Scheurer M, Bigalke M. Microplastics in Swiss floodplain soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(6): 3591-3598.
- [4] Koutnik V S, Leonard J, Alkidim S, *et al.* Distribution of microplastics in soil and freshwater environments: global analysis and framework for transport modeling [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **274**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116552.
- [5] Ding J F, Sun C J, He C F, *et al.* Atmospheric microplastics in the Northwestern Pacific Ocean: Distribution, source, and deposition [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **829**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154337.
- [6] Liu Z, Bai Y, Ma T T, *et al.* Distribution and possible sources of atmospheric microplastic deposition in a valley basin city (Lanzhou, China) [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, **233**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113353.
- [7] 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.
- [8] Jin X, Fu X D, Lu W J, *et al.* Fugitive release and influencing factors of microplastics in urbanized watersheds: a case study of the central area of Suzhou city [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **837**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155653.

- [9] Zhang K, Xiong X, Hu H J, *et al.* Occurrence and characteristics of microplastic pollution in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(7): 3794-3801.
- [10] Belontz S L, Corcoran P L, De Haan-Ward J, *et al.* Factors driving the spatial distribution of microplastics in nearshore and offshore sediment of Lake Huron, north America [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, **179**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113709.
- [11] Cera A, Pierdomenico M, Sodo A, *et al.* Spatial distribution of microplastics in volcanic lake water and sediments: relationships with depth and sediment grain size [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **829**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154659.
- [12] Lourenço P M, Serra-Gonçalves C, Ferreira J L, *et al.* Plastic and other microfibers in sediments, macroinvertebrates and shorebirds from three intertidal wetlands of southern Europe and west Africa [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 123-133.
- [13] Zhang N, Li Y B, He H R, *et al.* You are what you eat: microplastics in the feces of young men living in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **767**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144345.
- [14] Liu H Y, Tang L, Liu Y N, *et al.* Wetland-a hub for microplastic transmission in the global ecosystem [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, **142**: 153-154.
- [15] Biltcliff-Ward A, Stead J L, Hudson M D. The estuarine plastics budget: a conceptual model and meta-analysis of microplastic abundance in estuarine systems [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022, **275**, doi: 10.1016/j.ecss.2022.107963.
- [16] Li J, Zhang H, Zhang K N, *et al.* Characterization, source, and retention of microplastic in sandy beaches and mangrove wetlands of the Qinzhou Bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **136**: 401-406.
- [17] Zhou Z Y, Zhang P Y, Zhang G M, *et al.* Vertical microplastic distribution in sediments of Fuhe River estuary to Baiyangdian Wetland in northern China [J]. *Chemosphere*, 2021, **280**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130800.
- [18] Liu Q, Hu H J, Xiong X, *et al.* Urban natural wetland as a sink for microplastics: a case from Lalu Wetland in Tibet, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **828**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154399.
- [19] Zamprogno G C, Caniçali F B, Cozer C D R, *et al.* Spatial distribution of microplastics in the superficial sediment of a mangrove in southeast Brazil: a comparison between fringe and basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **784**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146963.
- [20] Mengatto M F, Nagai R H. A first assessment of microplastic abundance in sandy beach sediments of the Paranaguá Estuarine Complex, south Brazil (RAMSAR site) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, **177**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113530.
- [21] 焦瑞峰, 葛雷. 黄河三角洲湿地陆生植物监测与评估研究 [J]. *水资源开发与管理*, 2021(12): 11-18.
- Jiao R F, Ge L. Monitoring and evaluation of terrestrial plants in wetland of the Yellow River Delta study [J]. *Water Resources Development and Management*, 2021(12): 11-18.
- [22] Liu Y D, Gao F L, Li Z Z, *et al.* An optimized procedure for extraction and identification of microplastics in marine sediment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, **165**: 112130.
- [23] Li Z Z, Liu Y D, Zhang D H, *et al.* Distribution and environmental risk assessment of microplastics in continental shelf sediments in the southern East China Sea: a high-spatial-resolution survey [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, **177**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2022.113548.
- [24] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, *et al.* Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index [J]. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 1980, **33**(1-4): 566-575.
- [25] Angulo E. The Tomlinson pollution load index applied to heavy metal, 'Mussel-Watch' data: a useful index to assess coastal pollution [J]. *Science of the Total Environment*, 1996, **187**(1): 19-56.
- [26] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, **14**(8): 975-1001.
- [27] 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.
- [28] Eber E C, Wirnkör V A, Rakib R J. Application of index models for assessing freshwater microplastics pollution [J]. *World News of Natural Sciences*, 2021, **38**: 37-38.
- [29] Rakib R J, Al Nahian S, Alfonso M B, *et al.* Microplastics pollution in salt pans from the Maheshkhali Channel, Bangladesh [J]. *Scientific Reports*, 2021, **11**(1), doi: 10.1038/s41598-021-02457-y.
- [30] 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.
- [31] 徐沛. 长江口邻近海域微塑料时空分布特征及生态风险评估初步研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [32] Xu Q J, Xing R L, Sun M D, *et al.* Microplastics in sediments from an interconnected river-estuary region [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **729**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139025.
- [33] Duan Z H, Zhao S, Zhao L J, *et al.* Microplastics in Yellow River Delta wetland: occurrence, characteristics, human influences, and marker [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113232.
- [34] Deng J, Guo P Y, Zhang X Y, *et al.* Microplastics and accumulated heavy metals in restored mangrove wetland surface sediments at Jinjiang Estuary (Fujian, China) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **159**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111482.
- [35] Zuo L Z, Sun Y X, Li H X, *et al.* Microplastics in mangrove sediments of the Pearl River Estuary, south China: correlation with halogenated flame retardants' levels [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **725**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138344.
- [36] Peng G Y, Zhu B S, Yang D Q, *et al.* Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **225**: 283-290.
- [37] Blašković A, Guerranti C, Fastelli P, *et al.* Plastic levels in sediments closed to Cecina river estuary (Tuscany, Italy) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, **135**: 105-109.
- [38] Enders K, Käppler A, Biniash O, *et al.* Tracing microplastics in aquatic environments based on sediment analogies [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1), doi: 10.1038/s41598-019-50508-2.
- [39] Ghayebzadeh M, Taghipour H, Aslani H. Abundance and distribution of microplastics in the sediments of the estuary of seventeen rivers: Caspian southern coasts [J]. *Marine Pollution*

- Bulletin, 2021, **164**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112044.
- [40] Rakib R J, Hossain M B, Kumar R, *et al.* Spatial distribution and risk assessments due to the microplastics pollution in sediments of Karnaphuli River Estuary, Bangladesh [J]. Scientific Reports, 2022, **12**(1), doi: 10.1038/s41598-022-12296-0.
- [41] 宋劼, 易雨君, 周扬, 等. 黄河三角洲潮上带和潮间带不同生境微塑料分布规律[J]. 海洋与湖沼, 2022, **53**(3): 607-615.
- Song J, Yi Y J, Zhou Y, *et al.* Occurrence and distribution of microplastics in different habitats in supratidal intertidal zone of Huanghe river delta [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2022, **53**(3): 607-615.
- [42] Bollmann U E, Simon M, Vollertsen J, *et al.* Assessment of input of organic micropollutants and microplastics into the Baltic Sea by urban waters[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, **148**: 149-155.
- [43] 龙籍艺, 童春富, 王涛, 等. 长江口潮间带沉积物微塑料分布特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(9): 2860-2871.
- Long J Y, Tong C F, Wang T, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of microplastics in intertidal zone sediments of the Yangtze Estuary[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(9): 2860-2871.
- [44] Abidli S, Antunes J C, Ferreira J L, *et al.* Microplastics in sediments from the littoral zone of the north Tunisian coast (Mediterranean Sea)[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2018, **205**: 1-9.
- [45] Vianello A, Boldrin A, Guerriero P, *et al.* Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: first observations on occurrence, spatial patterns and identification[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, **130**: 54-61.
- [46] Vaughan R, Turner S D, Rose N L. Microplastics in the sediments of a UK urban lake [J]. Environmental Pollution, 2017, **229**: 10-18.
- [47] Parrish K, Fahrenfeld N L. Microplastic biofilm in fresh- and wastewater as a function of microparticle type and size class[J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2019, **5**(3): 495-505.
- [48] Wang T, Zou X Q, Li B J, *et al.* Preliminary study of the source apportionment and diversity of microplastics: taking floating microplastics in the South China Sea as an example [J]. Environmental Pollution, 2019, **245**: 965-974.
- [49] 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 等. 黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3241-3252.
- Sun D B, Li Y Z, Yu J B, *et al.* Spatial distribution and eco-stoichiometric characteristics of soil nutrient elements under different vegetation types in the yellow river delta wetland[J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 3241-3252.
- [50] 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.
- [51] Zhao J M, Ran W, Teng J, *et al.* Microplastic pollution in sediments from the Bohai Sea and the Yellow Sea, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, **640-641**: 637-645.
- [52] Zhu X P, Ran W, Teng J, *et al.* Microplastic pollution in nearshore sediment from the Bohai Sea coastline[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, **107**(4): 665-670.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qi, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WSI for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers: A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ming, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)