

目次

“大气十条”实施期间南京市 PM _{2.5} 化学组成与来源的演变特征	陈培林, 郭蓉, 王勤耕 (1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 PM _{2.5} 组分差异	王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹 (11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩 (20)
天津市采暖季不同气团来向 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇 (30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析	邓文博, 刘文娟 (38)
北京市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染数值响应解析	刘添强 (48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单	田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成 (58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征	王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平 (66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性	吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 栗少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏 (75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例	何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇 (85)
华北平原周县人为源氨排放清单及分布特征	康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳 (94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用	杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇 (104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响	魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹 (118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征	魏文淑, 祁建华, 常成 (127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子	黄柱良, 蔡家伟, 王儒威 (138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征	徐秋鸿, 刘曙光, 姜厦, Larisa Dorzhieva Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金字辰, 李鑫 (158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性	秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行 (169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估	何姝, 董慧岭, 任南琪 (180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价	王思瑞, 张坤峰, 昌盛, 张茉莉, 付青 (189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险	郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军 (198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素	吴文雨, 马菁晨, 杨磊, 李敏, 唐剑锋 (210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例	黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久 (219)
渭河微塑料污染现状与风险评价	山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫 (231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响	王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿 (243)
苦草叶表附和和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素	张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰 (252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性	璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯 (262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价	姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟 (272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制	罗晓佼, 张钊, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊 (282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征	宁嘉丽, 黄艳芸, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦 (293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林 (303)
基于地理探测器的山西省 2000 ~ 2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析	邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞 (312)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究	徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东 (323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性	胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉 (336)
四川盆地典型农耕地土壤重金属含量、污染及其影响因素	刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡 (347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析	陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪锦炉, 马进鹏, 梁翔宇 (356)
铜冶炼场周边土壤重金属污染特征与风险评价	彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元 (367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系	凌云, 刘汉燧, 张小婷, 魏世强 (376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征	王港, 余海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊 (387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素	王莹, 马彦斌, 王泽晶 (395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价	陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松 (405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估	黄凤艳, 周浪, 宋波, 虎瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞 (415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力	王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕 (426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对铜、砷同步钝化	尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清 (436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系	朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓妍, 韩新辉 (444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素	方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文 (452)
优化秸秆管理提高玉米农田碳氮效率与经济效益	王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新 (463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响	侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章 (473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能	南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌 (482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应	管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春 (494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征	赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦 (502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力	张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周 (512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析	于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹 (520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析	李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨 (531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为	李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平 (540)
中国县城碳排放时空演变与异质性	宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨 (549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移	向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明 (560)
中国 1991 ~ 2018 年突发环境事件时空特征及影响因素	余光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波 (572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应	张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲 (583)
《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)	

渭河微塑料污染现状与风险评价

山泽萱¹, 张妍^{1*}, 张成前¹, 时鹏², 张鑫¹

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 为探究西北地区渭河微塑料的赋存状态、形态特征、聚合物类型和潜在风险, 于2021年5月通过现场采样、显微镜观察、傅里叶红外光谱和显微拉曼光谱测定等, 鉴定了渭河水体中的微塑料的丰度分布、形状、粒径、颜色和聚合物类型, 并通过污染负荷指数法和物种敏感性分布法进行风险评价。结果表明, 所有采样点均有微塑料存在, 其丰度范围为 $(2.9 \pm 0.8) \sim (10.3 \pm 2.8) \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$, 渭河干流微塑料丰度高于支流。纤维(15.04%~77.03%)、小尺寸($<0.5 \text{ mm}$)(27.27%~89.38%)和彩色(有色)(15.85%~49.53%)为含量最高的微塑料形态, 聚乙烯(32.83%)、聚丙烯(29.79%)、聚苯乙烯(21.21%)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(10.61%)是检测出的主要聚合物类型。研究表明, 渭河微塑料污染处于国内中等水平, 微塑料丰度还未对水生生物构成影响, 但其较高的丰度值和塑料易吸附其他污染物的特性仍需引起警惕。

关键词: 微塑料; 渭河; 分布特征; 风险评价; 水体

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2023)01-0231-12 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202201054

Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River

SHAN Ze-xuan¹, ZHANG Yan^{1*}, ZHANG Cheng-qian¹, SHI Peng², ZHANG Xin¹

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Institute of Water Resources and Hydro-Electric Engineer, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: This study aimed to explore the occurrence state, morphological characteristics, polymer types, as well as potential ecology of microplastics in the Weihe River in Northwest China. Thus, we identified the abundance distribution, shape, particle size, color, and polymer type of microplastics in the surface water of the Weihe River by conducting field sampling, microscope observation, Fourier infrared spectroscopy, Micro-Raman spectroscopy, etc., during the normal water period (May) of 2021. Subsequently, we analyzed the potential ecological and environmental risks of microplastics using the pollution load index method and species sensitivity distribution method. The results showed that microplastics were detected to exist in all sampling points and the abundance ranged from (2.9 ± 0.8) to $(10.3 \pm 2.8) \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$. The concentration of microplastics in the main stream of the Weihe River was higher than that in the tributaries. Fiber (15.04%-77.03%), small size ($<0.5 \text{ mm}$) (27.27%-89.38%), and colored (15.85%-49.53%) were the predominant microplastic types. Polyethylene (32.98%), polypropylene (29.79%), polystyrene (21.21%), and polyethylene terephthalate (10.61%) were the main types of polymers detected. In general, the microplastic pollution in Weihe River was at a medium level and had not affected aquatic organisms, but its high concentration and the characteristic of the plastics to adsorb other pollutants are still of concern.

Key words: microplastics; Weihe River; distribution characteristics; risk assessment; surface water

2004年, Thompson等^[1]首次提出了微塑料(microplastic)这一概念, 它是指粒径小于5 mm的塑料颗粒、纤维或碎片。微塑料有着体积小、比表面积大、疏水性强等特点, 是许多疏水性有机污染物和重金属的理想载体^[2]。微塑料易被生物误食, 并在食物链中转移和富集。这些进入生物体内的微塑料会因为难以消化而产生的饱腹感使生物减少进食, 消耗能量储备, 影响其生理功能^[3]。研究发现浮游生物、贝类、鱼类、鸟类和哺乳类等生物体内均存在微塑料。它们会对生物的生理发育造成恶劣影响, 例如环境中的微塑料丰度会影响斑马鱼的生长和发育^[4], 进入丰年虾体内的聚丙烯会导致其死亡^[5]。

微塑料广泛存在于全球多种介质中, 在海洋、河流、湖泊、土壤、沉积物和地下水都检测出微塑料的存在^[6]。微塑料研究最早始于海洋环境, 目前几乎所有的海洋环境中(包括极地^[7]和深海^[8]地区)都检测到了丰度可观的微塑料。陆源输入是海

洋微塑料的主要来源, 河流是陆源性微塑料向海洋输送的最重要途径。近几年我国学者已经对海河^[9]、黄河^[10]、太湖^[11]、鄱阳湖^[12]和长江及其支流^[13,14]等进行了微塑料污染状况调查。总体来说, 我国河流微塑料丰度较高。迫切需要根据微塑料的理化特性来评估潜在的环境风险。目前针对河流微塑料风险评价的研究尚处于起步阶段, 我国学者基于各种评估模型, 探索了不同地区微塑料污染的环境风险。例如 Xu等^[15]于2018年首次使用污染负荷指数法评价中国淡水中微塑料造成的环境风险, Wang等^[16]也使用该方法对新疆玛纳斯河表层水中的微塑料进行评估, 陈锦灿等^[17]应用物种敏感性分布法分析了微塑料对水生生物的环境风险。

2021年习近平总书记将黄河流域生态保护和

收稿日期: 2022-01-06; **修订日期:** 2022-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601017); 陕西省高校科协青年人才托举计划项目(20190702)

作者简介: 山泽萱(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水体微塑料, E-mail: 476946712@qq.com

* 通信作者, E-mail: yanz@nwnu.edu.cn

发展列为中华民族伟大复兴的重大计划,渭河是黄河流量最大和跨度最长的支流,是陕西关中地区重要的水源地,供给着西北地区最主要的工农业区域用水.渭河环境系统的健康直接影响着关中地区社会经济发展的兴衰^[18].近30年来,由于沿途工农业废水和城镇生活污水入河排放量骤增,导致渭河及其支流全河段水质严重恶化.以往的水质监测指标集中在COD、BOD、高锰酸盐指数、有机污染物和重金属等,对于微塑料的污染状况,仅有Ding等^[19]在枯水期对其丰度与形态进行调查,但是并未深入研究渭河微塑料的聚合物类型,也未评估其潜在环境风险和时空分布.因此,本文在平水期对渭河微塑料污染现状进行调查,丰富渭河微塑料时空分布数据,解析微塑料的形态特征和聚合物类型,进一步对微塑料的潜在环境风险进行评价,以期为渭河微塑料污染防控提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区信息与样品采集

渭河位于中国西北地区,发源于甘肃省鸟鼠山

以北,主要流经甘肃、宁夏和陕西三省,在渭南市潼关县汇入黄河.本研究选取渭河陕西段(北纬33°00'~35°20',东经106°30'~110°30')为研究区.渭河在陕河长502 km,有着众多支流,水系分布呈扇形,气候类型为大陆性季风气候,年平均气温在7.8~13.5℃之间,降雨量在350~700 mm之间.

根据渭河的水文地质条件,同时考虑布点的均匀性及可行性原则,经过实地勘察,于2021年5月共采集25个水体样品,其中干流和支流分别采集9个和16个样品,包含5个位于西安市内污水处理厂下游的采样点,并在同一河流断面的不同位置采集平行水样.样点分布如图1所示.采样前先使用便携式水质三项仪检测每个采样点的温度、酸碱度、电导率和溶解氧,并使用超纯水将各工具清洗3遍以上.在距岸边一定距离处将2 L采样桶放入水下20~30 cm处进行取样,每一个采样点共采集25 L水样,并使用孔径为50 μm的不锈钢筛网过滤.用超纯水将筛网上的截留物冲洗进250 mL玻璃瓶中,带回实验室放入4℃冰箱保存.

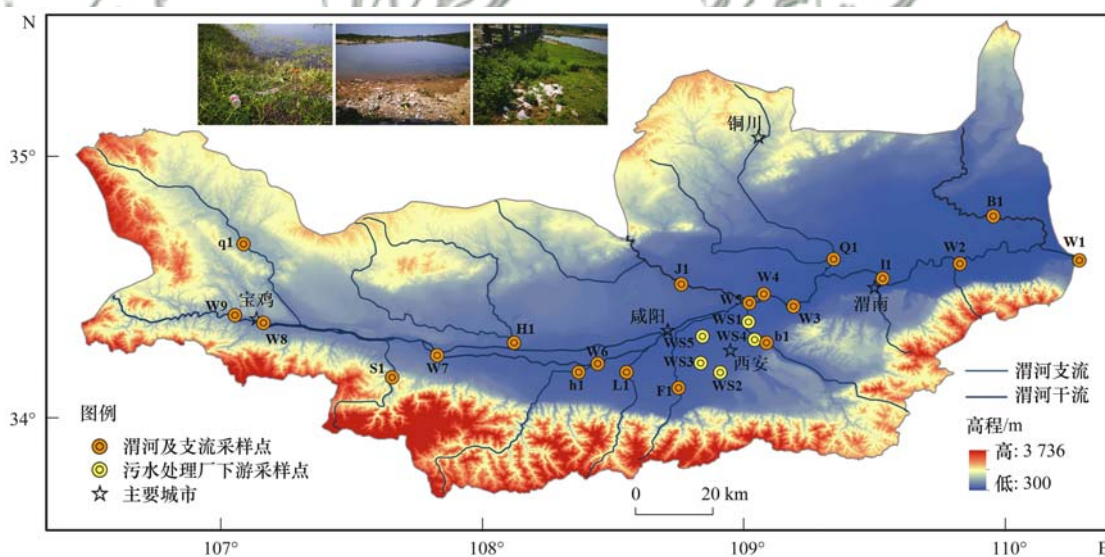


图1 渭河流域采样点示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling sites in Weihe River Basin

1.2 样品处理

将采集的水样转移到锥形瓶中,根据其体积添加适量30% H₂O₂,用铝箔封口后在60℃、120 r·min⁻¹的摇床中振荡24 h.之后添加NaCl增加水样密度,用干净的玻璃棒搅拌2 min并静置24 h.将静置后的上清液转移至烧杯中,加入超纯水稀释,将样品真空抽滤至0.45 μm的玻璃纤维滤膜上,并放入带盖玻璃培养皿中,最后,在50℃的烘箱中干燥24 h,准备显微镜观察.

为避免实验过程中可能存在的人为和空气中的

塑料污染,水样预处理过程中均保持实验室清洁,所有仪器和容器用超纯水仔细清洗.实验过程中所有人员均穿戴棉质工作服和丁腈手套.在处理水样同时进行空白实验,将超纯水抽滤至滤膜上并在空气中暴露72 h,结果表明,空白对照组并未发现塑料颗粒.

1.3 微塑料的观察与鉴定

将玻璃纤维滤膜放置在体视显微镜下观察和筛选.对疑似微塑料的颗粒进行拍照和测量,记录数量、尺寸、颜色和形状.微塑料尺寸划分为:<0.5、

0.5~1、1~2 和 2~5 mm. 形状归为 3 类,分别是纤维、碎片(薄膜)和颗粒. 主要颜色有白色、黑色、透明、蓝色、黄色、红色和绿色. 微塑料丰度以每升水中微塑料的个数来表示. 大于 1 mm 的微塑料颗粒使用傅里叶红外光谱仪 (INVENIO, Bruker, Germany), 小于 1 mm 的微粒使用显微共焦拉曼光谱仪 (LabRAM HR Evolution, France) 进行成分鉴定, 将所有光谱与标准图谱进行对比, 验证微塑料聚合物类型. 红外光谱采集波数范围为 4 000~400 cm^{-1} , 波数精度为 0.01 cm^{-1} , 分辨率为 0.09 cm^{-1} . 显微拉曼光谱采集波数范围为 200~2 500 cm^{-1} , 激光波长为 785 nm.

表 1 微塑料对淡水水生生物的慢性无效应浓度 (NOEC)

Table 1 Chronic no observed effect concentrations (NOEC) of microplastics on freshwater aquatic organisms							
门	科	物种	尺寸/ μm	持续暴露时间/d	NOECs/ $\text{n}\cdot\text{L}^{-1}$	生态终点	文献
节肢动物门	溞科	大型溞 <i>Ceriodaphnia dubia</i>	100~400	8	2.40×10^3	繁殖	[22]
		网纹溞 <i>Daphnia magna</i>	10	21	8.25×10^4	繁殖	[23]
		淡水枝角水溞 <i>Daphnia pulex</i>	10	21	5.00×10^4	繁殖	[24]
	马尔他钩虾科	fossarum 钩虾 <i>Gammarus fossarum</i>	32~250	28	1.67×10^5	生长	[25]
绿藻门	小球藻科	羊角月牙藻 <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	0.1	2	4.80×10^7	生长	[26]
蓝藻门	念珠藻科	水华鱼腥藻 <i>Dolichospermum flos-aquae</i>	<200	21	1.20×10^6	生长	[27]
被子植物门	狸藻亚科	狸藻 <i>Utricularia vulgaris</i>	5	7	7.00×10^4	生长	[28]
	浮萍科	浮萍 <i>Lemna minor</i>	40	7	1.19×10^4	生长	[29]
脊索动物门	鲤科	斑马鱼 <i>Danio rerio</i>	<250	21	3.40×10^2	生长	[30]
	双边鱼科	杜氏双边鱼 <i>Ambassis dussumieri</i>	1000	75	5.60×10^1	死亡	[31]
软体动物门	蜆科	淡水蜆 <i>Corbicula jaranicus</i>	<500	1	8.10×10^4	生长	[32]

已有研究中毒性单位会有所不同,有使用质量/体积作为毒性值单位^[25~27,31],其转换方法是假设微珠为球形,碎片和纤维分别为圆片和圆柱形,通过以下公式将该单位转换为颗粒数/体积^[33].

微珠:

$$\text{颗粒丰度} = \rho_B / \left(d \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \right) \quad (1)$$

碎片与纤维:

$$\text{颗粒丰度} = \rho_B / (d \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l) \quad (2)$$

式中,颗粒丰度为以颗粒数量/体积为单位表示的微塑料丰度; ρ_B 为以质量/体积为单位表示的微塑料浓度; d 为微塑料的颗粒密度; r 为微珠、碎片和纤维微塑料的半径; l 为碎片厚度和纤维微塑料的长度. 已有研究中的所有毒性数据都提供了关于微珠和碎片微塑料半径和纤维微塑料长度的信息.

使用国家生态环境基准计算软件-物种敏感度分布法 (EEC-SSD) 进行 SSD 曲线拟合,使用逻辑斯蒂分布模型进行拟合,获取保护 95% 物种的危险浓度值 (HC_5),使用评价因子法推导 PNEC,采用的方法是微塑料危险浓度值除以评价因子 (assessment factor, AF),表达式为:

1.4 微塑料风险评价方法

结合物种敏感性分布法 (species sensitivity distribution method, SSD) 和污染负荷指数法 (pollution load index, PLI) 对微塑料在河流中的污染风险进行评价. SSD 曲线拟合法是通过收集文献中的生物毒性数据来分析生物受污染物侵害的程度^[17]. 为了探究微塑料对渭河水环境中生物的毒性,估算出淡水中微塑料的预测无效应浓度 (PNEC),因此根据不同研究选择的水体环境和是否是渭河中常见生物种类等因素^[20,21],利用 Web of Science 等在线数据库,收集整理,挑选了 11 个慢性毒性数据 (表 1).

$$\text{PNEC} = \text{HC}_5 / \text{AF} \quad (3)$$

污染负荷指数法 (pollution load index, PLI) 是通过综合各个单一采样点指数求出区域指数,它不仅可以反映独立采样点的污染物污染程度,而且可以对某一区域的整体污染状况进行综合评价,直观体现区域内所包含的污染物的贡献程度. 计算公式如下^[15,16]:

$$\text{CF} = C / C_0 \quad (4)$$

$$\text{PLI}_n = \sqrt[n]{\text{CF}} \quad (5)$$

$$\text{PLI}_{\text{zone}} = \sqrt[n]{\text{PLI}_1 \times \text{PLI}_2 \times \text{PLI}_3 \times \cdots \times \text{PLI}_n} \quad (6)$$

式中,CF 为微塑料的污染系数, C 为各个采样点的微塑料实测值, C_0 为微塑料浓度的参考值, n 为采样点个数, PLI_{zone} 为区域内微塑料污染负荷指数. 关于 C_0 参考值的选择,秦一鸣^[34]使用了 Everaert 等^[35]根据 SSD 估算出的海水中微塑料的安全浓度,因此本文使用相同方法,即利用 SSD 推导得出的我国淡水中微塑料的安全浓度.

1.5 数据分析

渭河微塑料丰度使用单位 $\text{n}\cdot\text{L}^{-1}$ 来表示. 使用 Microsoft Excel 2010 和 Origin 2021 进行统计绘图,使用 ArcGIS 10.2 软件绘制采样点图,使用国家生

态环境基准计算软件绘制物种敏感度分布曲线图,使用 SPSS 软件将微塑料丰度与温度、溶解氧、电导率、pH 进行 Pearson 相关性分析,所有曲线 $P > 0.05$ 无统计学意义,采用主成分分析(PCA)对微塑料形态分布进行统计分析并使用 Origin 2021 进行绘制。

2 结果与讨论

2.1 渭河微塑料分布特征

如图 2 所示,渭河流域微塑料丰度范围在 $(2.9 \pm 0.8) \sim (10.3 \pm 2.8) \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,平均值为 $(5.8 \pm 1.6) \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$,渭河干流丰度范围为 $(4.1 \pm 0.8) \sim (10.3 \pm 2.8) \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$,支流丰度范围为 $(2.9 \pm 0.8) \sim (8.2 \pm 1.4) \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$ 。不同采样点的微塑料丰度差异明显,几乎所有高于 $6.5 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$ 的地点都位于人口密集区和农工业生产区。微塑料丰度最高的采样点 W7 位于宝鸡眉县,该点位于工业园区周边,且在 2 km 范围内存在塑料生产企业。其他丰度较高的地点

例如 F1,位于西安市周边县城,人口密集,但垃圾处理设施还不够完善,更易造成严重污染。微塑料丰度最低点为黑河下游 h1,这可能是因为该采样点位于人口较少的乡村,且周边没有较大型的工农业场所,此外黑河作为饮用水水源地,微塑料污染程度低也离不开水质的治理。由图 3 可知,渭河干流微塑料丰度与支流差异性较大,与西安污水处理厂下游差异较小,且普遍高于渭河支流与西安各污水处理厂下游。造成这一现象的原因是微塑料分子结构稳定,不易被环境分解吸收,而渭河支流地势起伏较大,流速快,沿岸各种人类活动产生的塑料垃圾会在水力作用下汇入干流。但是渭河干流微塑料丰度并未出现直接上升的趋势,这是因为渭河中下游水流平缓^[18],微塑料丰度变化主要受支流和沿岸的生活和工农业垃圾汇入的影响较大,累积效应并不明显。西安各污水处理厂下游微塑料丰度与渭河干流、支流相比并未出现大幅增高,这说明渭河流域微塑料不呈点源污染,农业活动导致的面源污染是渭河主要污染源。

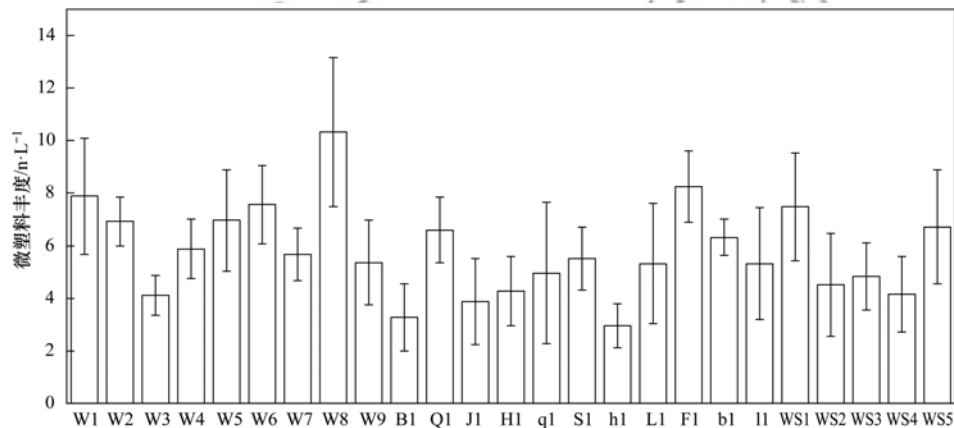
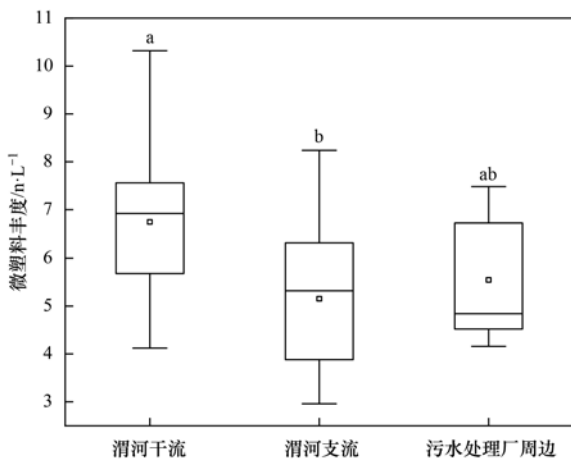


图 2 渭河流域微塑料丰度

Fig. 2 Abundance of microplastics in Weihe River Basin



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 3 渭河流域各区域微塑料丰度

Fig. 3 Abundance of microplastics in various regions of Weihe River Basin

近年来,已有许多研究关注了中国内陆河流微塑料的污染问题。Ding 等^[19]检测出渭河微塑料丰度为 $3.67 \sim 10.7 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $7.1 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$,略高于本研究获得的微塑料丰度。这可能是因为 Ding 等采样时间为枯水期,而本研究的采样时间为平水期,径流量更大,河水的稀释和自净能力有所增加,微塑料不易汇集。与我国其他区域相比,渭河微塑料污染状况处于中等水平,与乌梁素海 $[(1760 \pm 710) \sim (10120 \pm 4090) \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}]$ ^[10]和海河 $[(2640 \pm 1110) \sim (20590 \pm 8060) \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}]$ ^[9]相当,低于新疆的玛纳斯河 $[(21 \pm 3) \sim (43 \pm 8) \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}]$ ^[16]和太湖 $(3.4 \sim 25.8 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1})$ ^[11],相对高于青藏高原上部分河流 $[(483 \pm 118) \sim (967 \pm 141) \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}]$ ^[36]、广西漓江 $[(44.4 \pm 11.1) \sim (85.3 \pm 17.5) \text{ n} \cdot \text{m}^{-3}]$ ^[37]和四川沱江 $(911.57 \sim 3395.27 \text{ n} \cdot \text{m}^{-3})$ ^[14]。此外,渭河微

塑料丰度远低于黄河河口($497 \sim 930 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$)^[38]. 渭河是黄河中游的一条支流,这可能是因为黄河下游地区会积累中上游居民和工厂产生的废弃物,导致微塑料丰度增加.

2.2 渭河微塑料的形状、尺寸和颜色

根据形状,将渭河检测到的微塑料分为纤维、碎片(薄膜)和颗粒这3类.在光学显微镜下观察3种微塑料的典型图像如图4所示.本研究中渭河微塑料主要以纤维型为主,占比范围为15.04%~77.03%,平均值为50.20% [图5(a)和表2],在25个样点中有11个纤维含量超过50%.这与我国大部分内陆河流^[9~11]和Ding等^[19]对渭河的研究结果一致.通过主成分分析可以更直观地观察微塑料形状分布[图6(a)],纤维是第一主成分,贡献率为64.2%,碎片为第二主成分,贡献率是35.7%.纤维状

的微塑料主要来源于洗衣废水、大气中悬浮的微塑料颗粒、轮胎在行驶过程中磨损、渔业中使用的渔网和农业运输业中使用的绳子分解^[39,40].纤维含量多的地点大部分位于人口较多的区域,因此生活污水可能是河流中纤维的主要来源之一.碎片(薄膜)含量为13.51%~69.03%,但仅有采样点WS2(69.03%)中的含量超过50%.碎片(薄膜)一般为次生微塑料,可能来自于包装袋、塑料容器和农业生产使用的大棚覆膜等塑料制品破碎而成^[41].相对而言,颗粒在所有水样中占比最小,虽然所有样点都监测到颗粒的存在,但所占比例仅为2.99%~36.82%.颗粒更多属于原生微塑料,它们大多来自化妆品、空气喷砂剂和工业清洁剂等塑料工业的原料,是工业生产活动直接排放导致的^[42].因此,W7颗粒含量最高,是因为该点位附近存在工业生产场所.

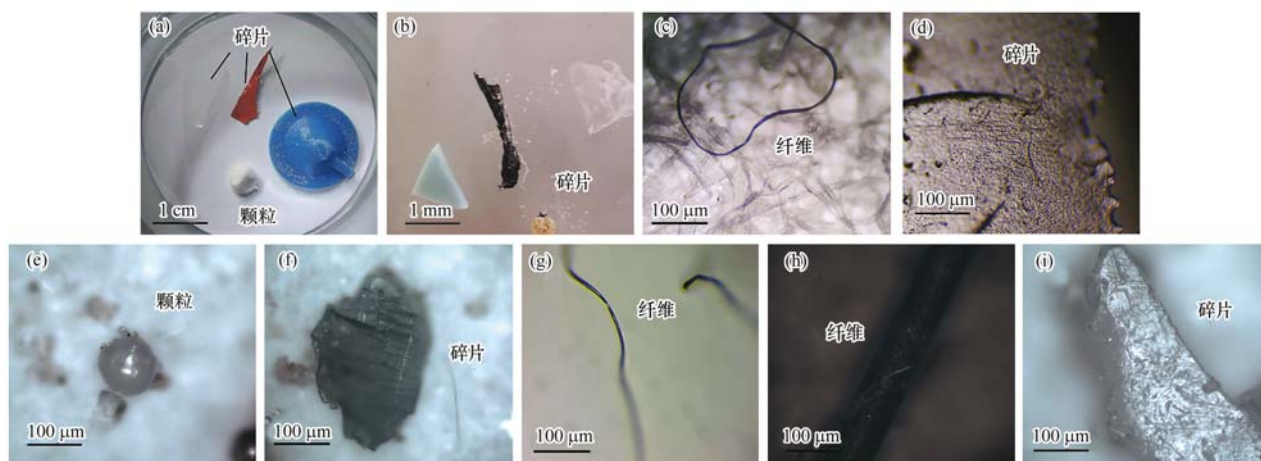


图4 渭河流域中不同形态的微塑料

Fig. 4 Different shapes of microplastics in Weihe River Basin

根据其尺寸,将微塑料分为4类: <0.5 、 $0.5 \sim 1$ 、 $1 \sim 2$ 和 $2 \sim 5 \text{ mm}$.如图5(b)和表2所示,在所有样品中,小于 0.5 mm 的微塑料最为丰富,占全部样品的27.27%~89.38%.其次是 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$,所占比例为10.62%~42.77%.相比之下, $1 \sim 2 \text{ mm}$ 和 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 之间的微塑料数量相对较少,其含量分别在 $0 \sim 30.65\%$ 和 $0 \sim 10.68\%$ 之间,且在6个和11个采样点中未发现这两种尺寸的微塑料.根据主成分分析可以发现,第一主成分 $<0.5 \text{ mm}$ 的微塑料贡献率高达71.5% [图6(b)].这与中国三峡和青海湖等地的数据类似^[13,42],随着粒径的增大,微塑料所占比例依次下降.较大型的微塑料降解会产生数个更小的微粒,因此微塑料的尺寸分布通常趋向于中小型^[14].根据图5(b)和图6(b)可以看出,污水处理厂下游(W51~W55)的样品中小粒径的微塑料含量更多,这可能是因为污水处理厂向接纳水体排放微塑料时已过滤掉较大颗粒.小型微塑料不仅容易

被生物误食还更易吸附携带有毒物质^[2],都会对生物生长发育构成潜在威胁.

渭河微塑料总计发现白色、黑色、透明、蓝色、黄色、红色和绿色这7种颜色,将它们划分为黑色、白色、透明和彩色这4类,各颜色所占比例如图5(c)和表2所示,主成分分析如图6(c)所示.其中彩色为第一主成分,占比为15.85%~49.53%,贡献率为40.8%.说明这部分微塑料来源较广,可能是来自于农业活动或是日常产生的生活垃圾.彩色的塑料碎片与捕猎者的食物类似,更易被鱼类和海龟等水生动物误食,危害其生长发育安全^[2].第二主成分是白色,占比为16.35%~47.58%,贡献率为33.5%,其次是透明色,占比为7.22%~42.48%.白色和透明色微塑料一般来源于渔线、塑料袋和尼龙网等白色塑料制品磨损破碎^[14],此外,有色微塑料可能会受到光、热和水力的作用而风化和褪色,形成白色微塑料.

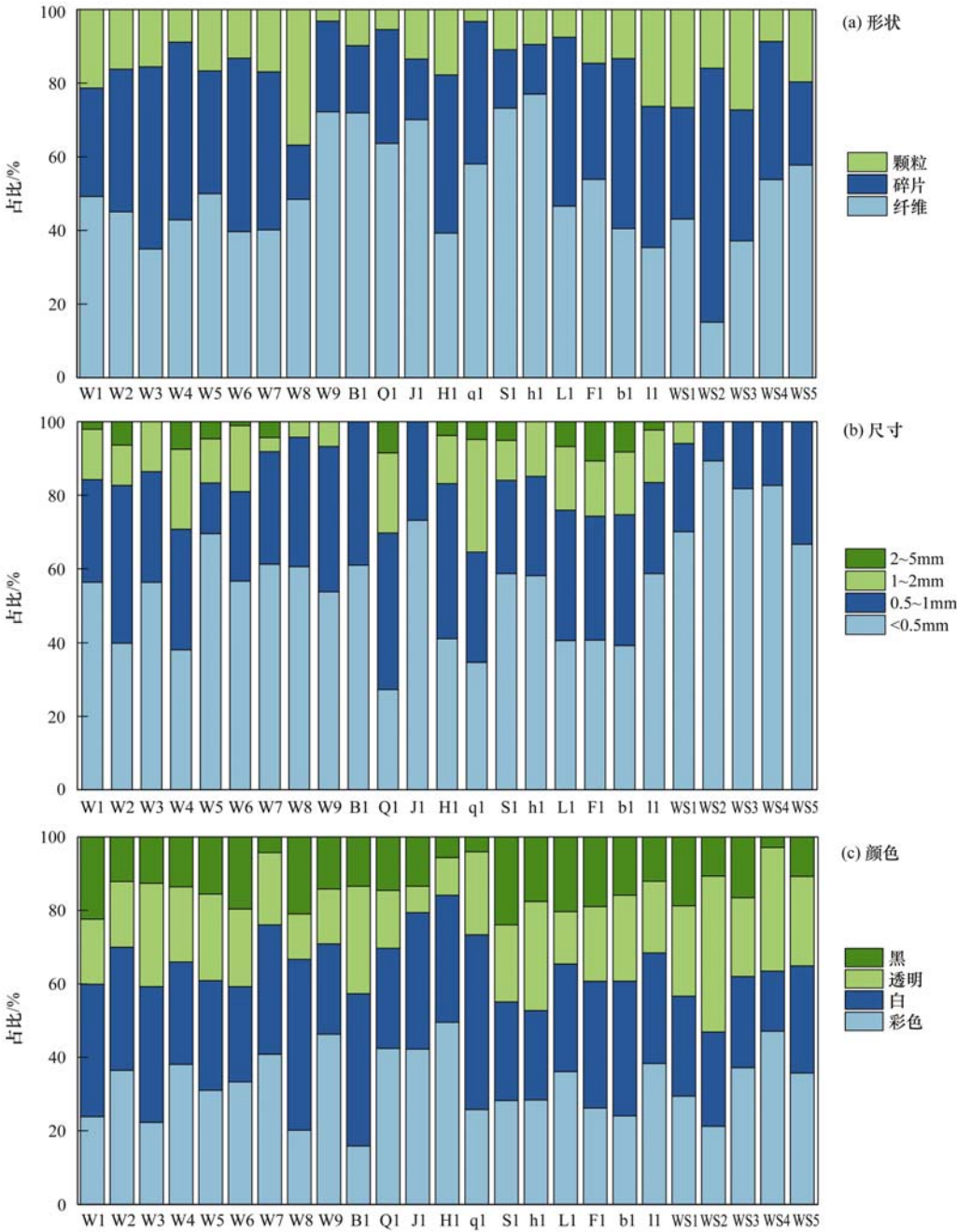


图5 渭河流域微塑料的形态分布

Fig. 5 Morphology of microplastics in Weihe River Basin

表2 渭河微塑料形状、尺寸和颜色占比数据

Table 2 Shape, size, and color percentage data of microplastics in Weihe River

项目		最小值/%	最大值/%	平均值/%
形状	纤维	15.04	77.03	50.20
	碎片	13.51	69.03	34.45
	颗粒	2.99	36.82	15.13
尺寸/mm	<0.5	27.27	89.38	56.65
	0.5~1	10.62	42.77	29.68
	1~2	0.00	30.65	10.63
	2~5	0.00	10.68	3.03
颜色	彩色	15.85	49.53	32.81
	白	16.35	47.58	31.58
	透明	7.22	42.48	21.45
	黑	2.88	23.91	14.17

2.3 微塑料的聚合物鉴定

利用傅立叶变换红外光谱(FT-IR)和显微拉曼光谱(micro-Raman)对聚合物类型进行鉴定,典型红外光谱和拉曼光谱如图7和图8所示.由于部分样点鉴定的微塑料颗粒数量较少,因此将所有样点的微塑料红外与拉曼光谱合并分析.接受鉴定的216个疑似塑料微粒中有18个并无明显峰值,塑料制品占比91.67%,这198个塑料微粒中共检测出了6种聚合物种类,分别是聚乙烯(PE)共65个、聚丙烯(PP)59个、聚苯乙烯(PS)42个、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)21个、聚氯乙烯(PVC)6个和聚碳酸酯(PC)5个.如图8所示,主要聚合物类型占比分

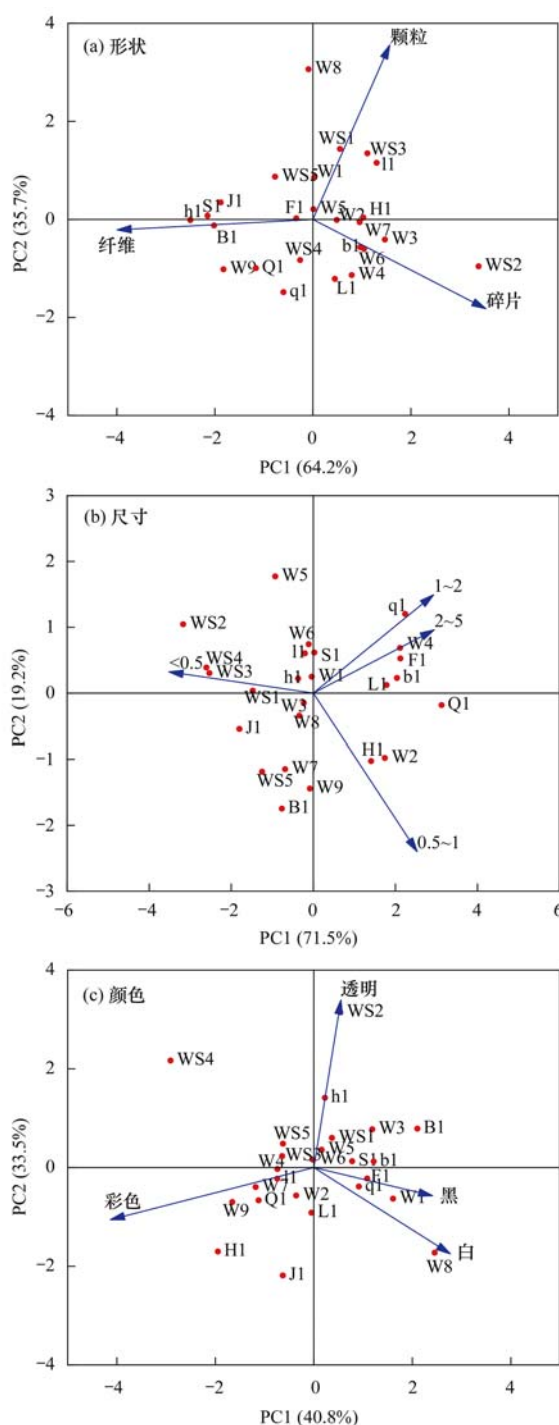


图6 渭河流域微塑料的主成分分析

Fig. 6 Principal component analysis of microplastics in Weihe River Basin

别为PE(32.83%)、PP(29.79%)、PS(21.21%)和PET(10.61%)。PE与PP无毒无味,具有优良的绝缘性、稳定性和耐热性,是世界上产量最高的两种塑料^[43]。PS常应用于制造业和化妆品等轻工业领域^[14]。PET常作为生产涤纶的原料,它们在生产和洗涤过程中易产生纤维,这也是纤维状微塑料数量多的原因之一^[44]。渭河内常见的微塑料类型有密度小于水的PP($0.91 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)和PE($0.962 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)也有大于水的PS($1.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)和PET($1.37 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

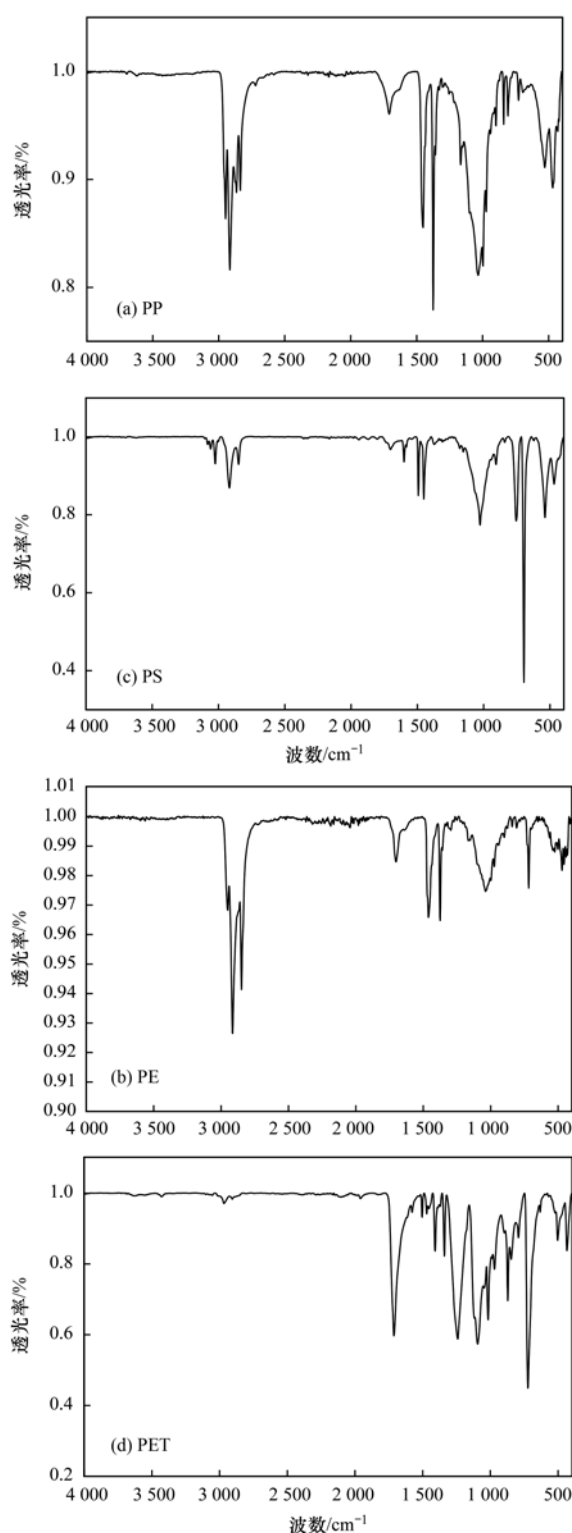


图7 渭河流域微塑料典型红外光谱图

Fig. 7 Fourier transform infrared spectra of the microplastics in Weihe River Basin

等.这说明除了密度,风力、河流流速和生物附着等因素也影响着微塑料在水体中的垂直分布^[14]。渭河表层水体中微塑料的聚合物分布是各类型塑料产量、外界环境和塑料内在特性相互作用的结果。

2.4 渭河微塑料污染潜在风险评价

渭河流域中下游生物完整性略低于上游^[45],根

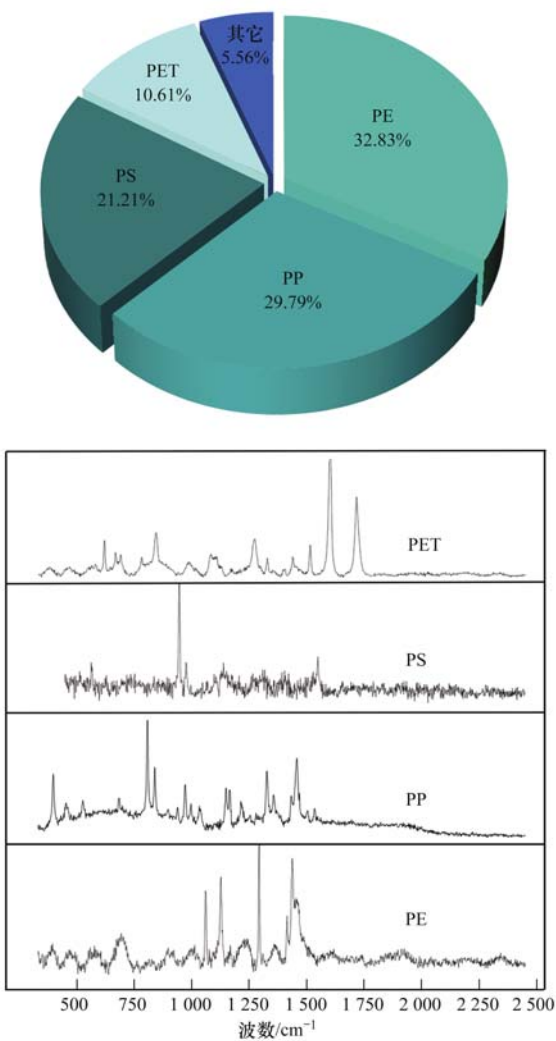


图8 渭河流域微塑料典型拉曼光谱图和占比
Fig. 8 Raman spectra and percentages
of the microplastics in Weihe River Basin

据已有调查发现^[20,21],渭河鉴定到的鱼类共51种,鲤科占比最多,浮游植物共58种,绿藻占比最多,其次是硅藻和蓝藻等,浮游动物共34种,轮虫占比最多,其次是原生动物、枝角类和桡足类等。目前还未有直接针对渭河优势水生物种进行的微塑料毒性研究,因此,本文在挑选物种时选择了与渭河常见生物同科同属的生物,以期对渭河进行更科学的生态评价。

图9是利用逻辑斯蒂分布模型对被测物种的SSD曲线拟合结果,按照微塑料影响程度大小排序依次为:羊角月牙藻、水华鱼腥藻、fossarum钩虾、网纹蚤、淡水蚬、狸藻、淡水枝角水蚤、浮萍、大型蚤、斑马鱼和杜氏双边鱼。根据软件计算得到的风险阈值 HC_5 为 $82.47\text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$, HC_5 的数值大小表示微塑料对水生生物的影响程度,数值越大表示受微塑料的影响越小。此外,从数据筛选的结果来看,水生生物急性数据满足构建SSD曲线要求,可以使用评价因子法计算无明显影响浓度值PNEC,根据选

择的物种种类,确定评价因子为5^[33]。根据公式(3)计算得到PNEC值为 $16.49\text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$,高于渭河微塑料丰度最高值($10.3\text{ n}\cdot\text{L}^{-1}$),但是两者数值相差不大,由于微塑料难降解的特性,渭河沿岸仍需对塑料垃圾排放进行更加严格的管控,防止微塑料丰度升高对渭河水生生物产生不可逆的伤害。

利用污染负荷指数法评价渭河微塑料的污染程度,定量评价各站点微塑料的污染风险。根据公式,计算每个采样点的PLI值,结果如图10所示,其范围在0.42~0.79之间。根据表3给出的微塑料污染风险等级标准,可以发现渭河PLI值均小于1。渭河整体的 PLI_{zone} 值为0.58,这说明渭河的微塑料污染程度处于轻微污染,但人口较多和农业活动较频繁的地点(W1、W7和F1等)仍需要引起重视。

表3 微塑料污染负荷划分标准

Table 3 Criteria for degrees of the pollution load of microplastics			
PLI	<1	1~2	>2
污染程度	轻微污染	中等污染	重度污染

2.5 渭河微塑料与其他污染物的吸附行为

微塑料除自身携带有毒物质外,还易吸附环境中的污染物,例如多环芳烃(PAHs)、多氯联苯(PCBs)、全氟化合物(PFAS)等有机污染物和铜、锌和等重金属^[46]。风化、紫外线辐射、pH值、温度、盐度和塑料本身的疏水性都可能影响污染物在微塑料上的吸附^[47,48]。目前渭河流域水污染问题较为严重,一些监测断面水质达到了V类^[18],易被微塑料吸附的有机污染物和重金属是造成渭河污染的重要因素。因此,渭河微塑料造成的环境风险还需要与其他污染物质结合进行综合分析。

微塑料吸附污染物的主要机制是表面吸附中的物理吸附,其作用机制为疏水作用、静电作用、氢键与 π 键的相互作用等。因此,微塑料的疏水性、比表面积、塑料与污染物的表面电荷和渭河水体的酸碱性是影响微塑料吸附能力的主要因素^[48,49]。其具体影响为:①微塑料的疏水性受接触角的影响,接触角越大疏水性越高,吸附能力越强。本研究检测到的6种聚合物中含量最多的PP、PE接触角最大^[50]。②颗粒越小,比表面积越大,微塑料上的吸附位点越多。渭河内更易吸附污染物质的小尺寸微塑料含量最多。③渭河水体的pH值会影响微塑料的表面电荷和有机污染物的存在形式,当塑料的pH值大于环境pH值时微塑料带正电,反之则带负电;当有机污染物的酸性解离常数大于环境pH值时有机物带正电,小于时带负电,等于时有机污染物呈分子态^[48]。渭河各采样点的pH值范围为7.36~9.64,

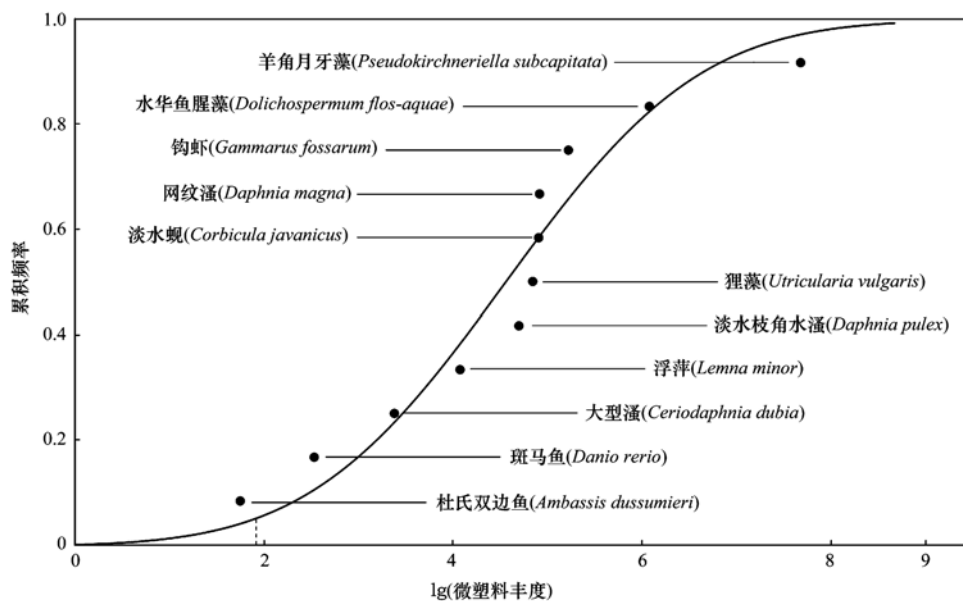


图9 微塑料对渭河水生生物的物种敏感性分布

Fig. 9 Species sensitivity distribution of microplastics to aquatic organisms in Weihe River

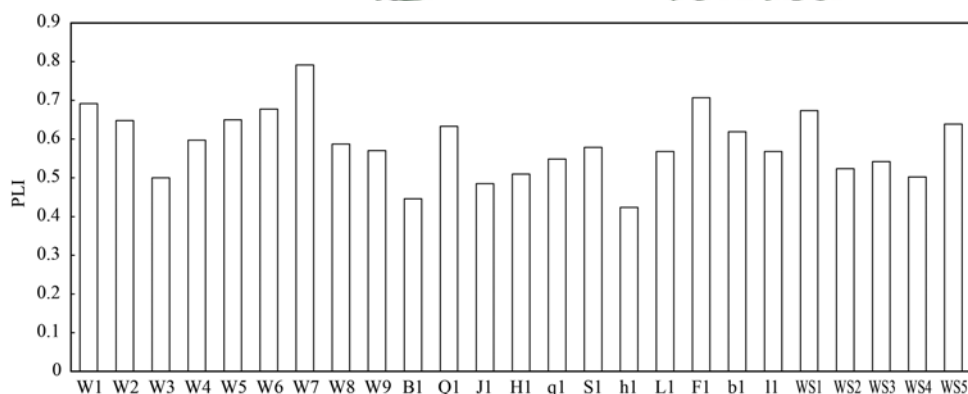


图10 渭河流域微塑料各采样点的 PLI 值

Fig. 10 PLI values of each sampling site of microplastics in Weihe River Basin

会根据不同污染物质的化学特性从而对吸附产生不同影响。④温度也会对吸附产生影响,当环境温度处于 15 ~ 25℃ 时,微塑料吸附量会随温度升高而增加,当温度高于或低于这一区间时吸附能力都会随温度增高而降低^[51]。渭河采样点温度范围在 16.6 ~ 23.4℃,处于吸附能力较强区段,这也说明春秋两季微塑料吸附能力会因温度适宜而增加。

渭河内检测到有机污染物有邻苯二甲酸酯 (PAEs)、多环芳烃 (PAHs)、多溴联苯醚 (PBDEs)、多氯联苯 (PCBs) 和有机氯农药 (OCPs) 等^[52,53]。微塑料对 PAEs 与 PAHs 的吸附主要受疏水作用的影响;对 PBDEs 的主要吸附机制是静电作用,其对不同塑料的吸附能力排序为: PS > PA > PP > PE^[54];对 PCBs 和 OCPs 的主要吸附机制是疏水作用和离子交换,受外界环境中温度的影响较大,当温度在 4 ~ 32℃ 时吸附能力较强,高温会抑制吸附^[55]。渭河陕西段水体中存在 As、Hg、Pb、Cd、Cr、Ni、Cu 和

Zn 等重金属^[56],其中 Hg 浓度超过了Ⅲ类水质标准,其他重金属含量位于Ⅰ~Ⅱ类浓度限值内。重金属常通过静电引力与微塑料发生吸附作用,王琼杰等^[49]发现 pH 值对微塑料吸附重金属的能力影响较大,当 pH 位于 3 ~ 6 时,吸附能力会逐渐增强。目前来说,渭河内微塑料很可能携带多种其他化学污染物,渭河部分生态环境还会增加部分微塑料的吸附能力,因此未来应将渭河微塑料与渭河其他化学污染物结合进行综合分析。

3 结论

(1)渭河干流与支流 25 个采样点均存在微塑料。其丰度范围在 $(2.9 \pm 0.8) \sim (10.3 \pm 2.8) \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,渭河干流丰度高于支流,宝鸡眉县附近微塑料丰度最高。纤维状、小粒径 ($< 0.5 \text{ mm}$) 和有色微塑料占比最多。渭河微塑料共鉴定出 6 种聚合物类型,PE 和 PP 占比最多。渭河微塑料的理化类型表明其

主要来源是农业活动和生活污水排放,工业排放影响较小。

(2)通过污染负荷指数法和物种敏感性分布法进行潜在环境风险评价,单一区域(PLI)计算显示渭河各采样点均处于轻度污染,总体区域(PLI_{zone})计算显示渭河处于轻度污染。物种敏感性分布法的结果表明,微塑料的无明显影响丰度值为 $17.5 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$,高于渭河微塑料丰度最高值($10.3 \text{ n} \cdot \text{L}^{-1}$)。

(3)总体而言,渭河微塑料丰度未对水生生物构成直接威胁,但其污染程度与我国其他内陆水域相比比较高,而且微塑料还易吸附渭河内其他污染物构成复合污染。所以渭河沿岸需加强周边农业和生活废弃物的管理,严格执行禁塑令,大力研发塑料替代品,积极探索与实施河流微塑料去除方法。

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): 838.
- [2] Zhang L Y, Li Y G, Wang W X, *et al.* The potential of microplastics as adsorbents of sodium dodecyl benzene sulfonate and chromium in an aqueous environment [J]. Environmental Research, 2021, **197**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111057.
- [3] 胡嘉敏, 左剑慈, 李金波, 等. 微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响[J]. 环境科学, 2022, **43** (7): 3664-3671.
Hu J M, Zuo J E, Li J B, *et al.* Effects of microplastics exposure on Crucian growth, liver damage, and gut microbiome composition [J]. Environmental Science, 2022, **43** (7): 3664-3671.
- [4] 赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 等. 微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累[J]. 环境科学, 2021, **42** (1): 485-491.
Zhao J, Rao B Q, Guo X M, *et al.* Effects of microplastics on embryo hatching and intestinal accumulation in larval Zebrafish *Danio rerio* [J]. Environmental Science, 2021, **42** (1): 485-491.
- [5] Jeyavani J, Sibiya A, Bhavaniramy S, *et al.* Toxicity evaluation of polypropylene microplastic on marine microcrustacean *Artemia salina*: An analysis of implications and vulnerability [J]. Chemosphere, 2022, **296**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133990.
- [6] Selvam S, Jesuraja K, Venkatramanan S, *et al.* Hazardous microplastic characteristics and its role as a vector of heavy metal in groundwater and surface water of coastal south India [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **402**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123786.
- [7] Esposito G, Prearo M, Renzi M, *et al.* Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of benthic by-catches from an eastern Mediterranean deep-sea environment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, **174**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.113231.
- [8] Fragão J, Bessa F, Otero V, *et al.* Microplastics and other anthropogenic particles in Antarctica: using penguins as biological samplers [J]. Science of the Total Environment, 2021, **788**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147698.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Su L, Xue Y G, Li L Y, *et al.* Microplastics in Taihu Lake, China [J]. Environmental Pollution, 2016, **216**: 711-719.
- [12] 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 等. 鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 [J]. 环境科学, 2022, **43** (3): 1447-1454.
Liu S L, Jian M F, Zou L, *et al.* Microbial community structure on microplastic surface in the *Grus leucogeranus* reserve of Poyang Lake [J]. Environmental Science, 2022, **43** (3): 1447-1454.
- [13] 陈圣盛, 李卫明, 张坤, 等. 香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 [J]. 环境科学, 2022, **43** (6): 3077-3087.
Chen S S, Li W M, Zhang K, *et al.* Distribution characteristics of microplastics and their migration patterns in Xiangxi River basin [J]. Environment Science, 2022, **43** (6): 3077-3087.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 陈锦灿, 方超, 郑榕辉, 等. 应用物种敏感性分布评估微(纳米)塑料对水生生物的生态风险 [J]. 生态毒理学报, 2020, **15** (1): 242-255.
Chen J C, Fang C, Zheng R H, *et al.* Assessing ecological risks of Micro (nano) plastics to aquatic organisms using species sensitivity distributions [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, **15** (1): 242-255.
- [18] 张鑫. 地表水、地下水硝酸盐时空变化及其来源分析——以渭河流域关中段为例 [D]. 西安: 西北大学, 2021.
Zhang X. Spatiotemporal variation and source analysis of nitrate in surface water and groundwater——Guanzhong section of Wei River basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [19] Ding L, Mao R F, Guo X T, *et al.* Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the Northwest of China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **667**: 427-434.
- [20] 白海峰, 王怡睿, 宋进喜, 等. 渭河浮游生物群落结构特征及其与环境因子的关系 [J]. 生态环境学报, 2022, **31** (1): 117-130.
Bai H F, Wang Y R, Song J X, *et al.* Characteristics of plankton community structure and its relation to environmental factors in Weihe River, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31** (1): 117-130.
- [21] 徐宗学, 武玮, 殷旭旺. 渭河流域水生态系统群落结构特征及其健康评价 [J]. 水利水电科技进展, 2016, **36** (1): 23-30.
Xu Z X, Wu W, Ying X W. Community structure characteristics and health assessment of aquatic ecosystem in Weihe basin, China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, **36** (1): 23-30.

- [22] Shima Z, Kumar A, Neale P A, *et al.* Impact of microplastic beads and fibers on Waterflea (*Ceriodaphnia dubia*) survival, growth, and reproduction: implications of single and mixture exposures[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51** (22): 13397-13406.
- [23] De Felice B, Sabatini V, Antenucci S, *et al.* Polystyrene microplastics ingestion induced behavioral effects to the cladoceran *Daphnia magna*[J]. *Chemosphere*, 2019, **231**: 423-431.
- [24] Jaikumar G, Brun N R, Vijver M G, *et al.* Reproductive toxicity of primary and secondary microplastics to three cladocerans during chronic exposure[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **249**: 638-646.
- [25] Straub S, Hirsch P E, Burkhardt-holm P. Biodegradable and petroleum - based microplastics do not differ in their ingestion and excretion but in their biological effects in a freshwater invertebrate *Gammarus fossarum*[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, **14** (7), doi: 10.3390/ijerph14070774.
- [26] Casado M P, Macken A, Byrne H J. Ecotoxicological assessment of silica and polystyrene nanoparticles assessed by a multitrophic test battery[J]. *Environment International*, 2013, **51**: 97-105.
- [27] Yokota K, Waterfield H, Hastings C, *et al.* Finding the missing piece of the aquatic plastic pollution puzzle: interaction between primary producers and microplastics [J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2017, **2** (4): 91-104.
- [28] Yu H W, Zhang X L, Hu J W, *et al.* Ecotoxicity of polystyrene microplastics to submerged carnivorous *Utricularia vulgaris* plants in freshwater ecosystems[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **265**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114830.
- [29] Kalčíková G, Žgajnar Gotvajn A, Kladnik A, *et al.* Impact of polyethylene microbeads on the floating freshwater plant duckweed *Lemna minor*[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **230**: 1108-1115.
- [30] Qiao R X, Deng Y F, Zhang S H, *et al.* Accumulation of different shapes of microplastics initiates intestinal injury and gut microbiota dysbiosis in the gut of zebrafish[J]. *Chemosphere*, 2019, **236**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.07.065.
- [31] Naidoo T, Glassom D. Decreased growth and survival in small juvenile fish, after chronic exposure to environmentally relevant concentrations of microplastic [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **145**: 254-259.
- [32] Esterhuizen M, Buchenhorst L, Kim Y J, *et al.* *In vivo* oxidative stress responses of the freshwater basket clam *Corbicula javanicus* to microplastic fibres and particles [J]. *Chemosphere*, 2022, **296**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134037.
- [33] Jung J W, Park J W, Eo S, *et al.* Ecological risk assessment of microplastics in coastal, shelf, and deep sea waters with a consideration of environmentally relevant size and shape [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **270**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116217.
- [34] 秦一鸣. 乌梁素海微塑料污染特征及风险评价[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- Qing Y M. Pollution characteristics and risk assessment of microplastics in Lake Ulansuhai[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2020.
- [35] Everaert G, van Cauwenberghe L, de Rijke M, *et al.* Risk assessment of microplastics in the ocean: modelling approach and first conclusions [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **242**: 1930-1938.
- [36] Jiang C B, Yin L S, Li Z W, *et al.* Microplastic pollution in the rivers of the Tibet Plateau[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **249**: 91-98.
- [37] 谢沅汕, 张清科, 张漓杉, 等. 污水处理厂对漓江桂林市河段淡水生物中微塑料累积的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41** (11): 4999-5007.
- Xie Y S, Zhang Q K, Zhang L S, *et al.* Impact of a sewage treatment plant on the accumulation of microplastics in freshwater organisms in the Lijiang River of the Guilin Urban Section [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (11): 4999-5007.
- [38] Han M, Niu X R, Tang M, *et al.* Distribution of microplastics in surface water of the lower Yellow River near estuary[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **707**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135601.
- [39] Fadare O O, Okoffo E D. Covid-19 face masks: a potential source of microplastic fibers in the environment [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **737**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140279.
- [40] Choi C E, Zhang J Q, Liang Z Y. Towards realistic predictions of microplastic fiber transport in aquatic environments: secondary motions [J]. *Water Research*, 2022, **218**, doi: 10.1016/j.watres.2022.118476.
- [41] Hidayatullah H, Lee T G. A study on characteristics of microplastic in wastewater of South Korea: identification, quantification, and fate of microplastics during treatment process [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **146**: 696-702.
- [42] 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.
- [43] Stanton T, Johnson M, Nathanail P, *et al.* Freshwater microplastic concentrations vary through both space and time [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114481.
- [44] Nan B X, Su L, Kellar C, *et al.* Identification of microplastics in surface water and Australian freshwater shrimp *Paratya australiensis* in Victoria, Australia [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **259**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113865.
- [45] Wu J T, Mao R C, Li M Y, *et al.* Assessment of aquatic ecological health based on determination of biological community variability of fish and macroinvertebrates in the Weihe River Basin, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110651.
- [46] Chaudhry A K, Sachdeva P. Microplastics' origin, distribution, and rising hazard to aquatic organisms and human health: Socio-economic insinuations and management solutions [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2021, **48**, doi: 10.1016/j.rsmas.2021.102018.
- [47] 李婉逸, 刘智临, 苗令占, 等. 淡水系统中4种塑料颗粒的老化过程及DOC产物分析[J]. *环境科学*, 2021, **42** (8): 3829-3836.
- Li W Y, Liu Z L, Miao Z L, *et al.* Aging process and DOC analysis of four different types of plastic particles in freshwater systems [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (8): 3829-3836.
- [48] 李明媛, 陈启晴, 刘学敏, 等. 微塑料吸附有机污染物的研究进展[J]. *环境化学*, 2022, **41** (4): 1101-1113.
- Li M Y, Chen Q Q, Liu X M, *et al.* Research progress on sorption of organic pollutants by microplastics [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41** (4): 1101-1113.
- [49] 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.
- [50] Liu X M, Xu J, Zhao Y P, *et al.* Hydrophobic sorption behaviors of 17 β -Estradiol on environmental microplastics [J]. *Chemosphere*, 2019, **226**: 726-735.
- [51] Dong X F, Zheng M G, Qu L Y, *et al.* Sorption of tonalide, musk xylene, galaxolide, and musk ketone by microplastics of polyethylene and polyvinyl chloride [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **144**: 129-133.
- [52] 白强. 典型持久性有机污染物在渭河流域西咸段的分布及在DE氧化沟中的降解特征分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- Bai Q. Analysis of the distribution of typical persistent organic pollutants in Weihe River basin and its degradation characteristics [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [53] Chen Y P, Zhao Y, Zhao M M, *et al.* Potential health risk assessment of HFRs, PCBs, and OCPs in the Yellow River basin [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **275**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116648.
- [54] Zhan Z W, Wang J D, Peng J P, *et al.* Sorption of 3,3',4,4'-tetrachlorobiphenyl by microplastics: a case study of polypropylene[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **110**(1): 559-563.
- [55] Xu P C, Ge W, Chai C, *et al.* Sorption of polybrominated diphenyl ethers by microplastics[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, **145**: 260-269.
- [56] 任丽江, 张妍, 张鑫, 等. 渭河流域关中段地表水重金属的污染特征与健康风险评价[J]. *生态环境学报*, 2022, **31**(1): 131-141.
- Ren L J, Zhang Y, Zhang X, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in surface water in Guanzhong Section of the Weihe River Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, **31**(1): 131-141.



CONTENTS

Evolution of PM _{2.5} Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP	CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)
Differences in PM _{2.5} Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province	WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, <i>et al.</i> (11)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter	ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, <i>et al.</i> (20)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin	LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (30)
Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method	DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)
Numerical Response Analysis of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Beijing	LIU Tian-qiang (48)
High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region	TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (58)
Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing	WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, <i>et al.</i> (66)
Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO _x -VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi	WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, <i>et al.</i> (75)
Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou	HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, <i>et al.</i> (85)
Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain	KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, <i>et al.</i> (94)
Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models	YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, <i>et al.</i> (104)
Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City	WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (118)
Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao	WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)
Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China	HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)
Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary	XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, <i>et al.</i> (158)
Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities	QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, <i>et al.</i> (169)
Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China	HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)
Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City	WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (189)
Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China	ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (198)
Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta	WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (210)
Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province	HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (219)
Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River	SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, <i>et al.</i> (231)
Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae	WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, <i>et al.</i> (243)
Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in <i>Vallisneria natans</i> and Planktonic Bacteria Communities	ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, <i>et al.</i> (252)
Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing	QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, <i>et al.</i> (262)
Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA	JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, <i>et al.</i> (272)
Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir	LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (282)
Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall	NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (303)
Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector	SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, <i>et al.</i> (312)
Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (323)
Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake	HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, <i>et al.</i> (336)
Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin	LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (347)
Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia	CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, <i>et al.</i> (356)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites	PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, <i>et al.</i> (367)
Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China	LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, <i>et al.</i> (376)
Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil	WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, <i>et al.</i> (387)
Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se	WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning	CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, <i>et al.</i> (405)
Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province	HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i> (415)
Potential of Intercropping <i>Pennisetum purpureum</i> Schum with <i>Melia azedarach</i> L. and <i>Broussonetia papyrifera</i> for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas	WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (426)
Inactivation of Cd and As by an <i>Enterobacter</i> Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil	YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, <i>et al.</i> (436)
Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest in Loess Hilly Region	ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, <i>et al.</i> (444)
Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors	FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, <i>et al.</i> (452)
Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System	WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, <i>et al.</i> (463)
Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, <i>et al.</i> (473)
Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, <i>et al.</i> (482)
Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region	GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, <i>et al.</i> (494)
Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China	ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, <i>et al.</i> (502)
QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands	ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, <i>et al.</i> (512)
Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China	YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, <i>et al.</i> (520)
Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis	LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, <i>et al.</i> (531)
Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals	LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, <i>et al.</i> (540)
Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China	SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, <i>et al.</i> (549)
Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years	XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, <i>et al.</i> (560)
Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018	YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (572)
Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment	ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, <i>et al.</i> (583)