

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 ..... 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 ..... 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 ..... 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 ..... 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 ..... 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 ..... 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 ..... 吴雪萍 (1926)

中国城市PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>时空分布特征和影响因素分析 ..... 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>时空变化特征及影响因素 ..... 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>污染特征及成因分析 ..... 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM<sub>2.5</sub>化学组成特征和空间差异 ..... 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM<sub>2.5</sub>来源 ..... 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM<sub>2.5</sub>改善的溢出效益 ..... 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM<sub>2.5</sub>载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 ..... 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 ..... 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 ..... 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 ..... 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 ..... 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 ..... 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 ..... 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 ..... 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 ..... 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 ..... 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 ..... 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 ..... 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橦橦 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 ..... 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 ..... 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 ..... 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 ..... 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 ..... 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 ..... 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 ..... 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 ..... 郭善嵩, 胡思, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 ..... 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 ..... 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 ..... 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 ..... 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 ..... 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 ..... 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 ..... 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 ..... 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N<sub>2</sub>O排放影响:基于Meta分析 ..... 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 ..... 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 ..... 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 ..... 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 ..... 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 ..... 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 ..... 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 ..... 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 ..... 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 ..... 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 ..... 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 ..... 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 ..... 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 ..... 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 ..... 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 ..... 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 ..... 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

# 典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征

许万璐, 范一凡\*, 钱新\*

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023)

**摘要:** 微塑料是近年来广受关注的一类新污染物. 淡水系统沉积物作为微塑料重要的汇, 能反映出当地微塑料的长期污染水平. 为探究典型城市河网沉积物中微塑料的时空分布特征, 于 2018 年 12 月和 2019 年 6 月在望虞河西岸河网区分别采集了 17 个采样点的沉积物样品, 使用体视显微镜和显微傅立叶变换红外光谱仪对微塑料进行形态观察以及成分鉴定. 结果表明, 微塑料的平均丰度(以 dw 计)为  $323.37 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 形状主要为碎片和纤维, 颜色以黑色和蓝色为主, 粒径主要分布在  $50 \sim 500 \mu\text{m}$  之间, 成分以 PET、PE、PVE、PS 和 PP 为主. 夏季微塑料的丰度低于冬季, 河网区上游地区微塑料的丰度高于中游和下游地区, 最高丰度出现在污水处理厂的出水口采样点, 沉积物中微塑料的丰度与表层水中微塑料的丰度无显著相关性. 应用正定矩阵因子分解(PMF)模型解析微塑料的来源, 发现微塑料的主要来源有农用塑料薄膜、生活废水、塑料垃圾以及工业生产. 研究可为典型城市河网微塑料污染防控提供支撑.

**关键词:** 城市河网; 微塑料(MPs); 沉积物; 时空分布; 来源

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2142-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202305056

## Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network

XU Wan-lu, FAN Yi-fan\*, QIAN Xin\*

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** As an emerging pollutant, microplastics have received increasing concern. Sediment can reflect the long-term pollution level of microplastics because it is recognized as a sink of microplastics. To explore the distribution characteristics of microplastics in sediments of a typical urban river network, sediment samples were collected from 17 sampling sites in December 2018 and June 2019. A stereomicroscope and micro-fourier transform infrared spectrometer were used to observe the morphology and identify the composition of microplastics. The results showed that the mean abundance of microplastics was  $323.37 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ . The microplastics were predominately black and blue in color,  $50\sim 500 \mu\text{m}$  in size, and fragment and fiber in shape, and the composition was mainly PET, PE, PVE, PS, and PP. The abundance of microplastics in summer was lower than that in winter, and the abundance of microplastics in upstream areas was higher than that in middle and downstream areas. It was found that the highest concentration occurred near a wastewater treatment plant, and there was no significant correlation between the abundance of microplastics in sediment and that in surface water. In this study, the PMF model was applied to analyze the sources of microplastic pollution. It was found that the main sources of microplastics were agricultural plastic film, domestic wastewater, plastic waste, and industrial production. Our study provided a scientific basis for the prevention and control of microplastic pollution in a typical urban river network.

**Key words:** urban river network; microplastics (MPs); sediment; spatial and temporal distribution; source

人们在工业生产和日常生活中广泛使用塑料制品, 在获得极大便利的同时, 所产生的大量塑料废弃物也给环境造成了巨大的压力. Thompson 等<sup>[1]</sup>于 2004 年首次提出了微塑料(microplastics, MPs)概念, 认为除了大粒径的塑料碎片外, 微小的塑料碎片和纤维同样广泛存在于环境中. 美国国家海洋与大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. NOAA)<sup>[2]</sup>对微塑料的定义作出规定: 尺寸小于 5 mm 的塑料颗粒, 这也成为了学术界普遍使用的微塑料定义. 有研究表明微塑料具有比表面积大和疏水性强的特点, 因此易吸附环境中的重金属<sup>[3]</sup>和持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)<sup>[4]</sup>等物质, 并且与大塑料碎片相比, 微塑料更易被生物吞食, 最终通过食物链进入人体并对人体产生危害<sup>[5]</sup>.

对于微塑料的研究最早开始于海洋生态系统<sup>[1]</sup>,

截至目前, 在淡水环境<sup>[6]</sup>、土壤<sup>[7]</sup>、大气<sup>[8]</sup>乃至生物体<sup>[9]</sup>中都检测出了微塑料的存在, 其中河流是微塑料污染在环境中迁移和扩散的重要途径<sup>[10]</sup>, 陆源性微塑料通过污水排放和雨水冲刷等方式进入河流中, 最终汇入湖泊或海洋<sup>[11]</sup>. 有学者提出, 相较于表层水, 沉积物更能反映微塑料的长期污染水平<sup>[12]</sup>, 因此, 探究沉积物中微塑料的分布特征, 对了解河流微塑料污染状况具有重要意义.

近年来已有学者对我国部分河流沉积物中微塑料的污染状况进行了调查研究, 包括珠江<sup>[13]</sup>和湘江<sup>[14]</sup>等, 微塑料的丰度差异很大, 变化范围为  $5 \sim 9597 \text{ n}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 望虞河作为连接长江和太湖的唯一河

收稿日期: 2023-05-06; 修订日期: 2023-07-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3204400)

作者简介: 许万璐(1999~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为淡水环境中微塑料的环境行为与生态风险, E-mail: 550201187@qq.com

\* 通信作者, E-mail: fanyifan@nju.edu.cn; xqian@nju.edu.cn

道, 是“引江济太”调水工程的重要引水通道<sup>[15]</sup>, 对望虞河流域水体污染的研究和治理对于保障和改善太湖水质具有重要意义. 先前 Fan 等<sup>[16]</sup>已对望虞河河网水体微塑料的污染状况进行了调查分析, 但缺乏沉积物中的微塑料污染情况的调查研究, 本文可补充该地区沉积物中微塑料的污染数据.

正定矩阵因子分解法 (positive matrix factorization, PMF) 由 Paatero 等<sup>[17]</sup>于 1994 年首次提出, 经过不断改进, PMF 模型被广泛应用于国内外水<sup>[18]</sup>、大气<sup>[19]</sup>和土壤<sup>[20]</sup>污染物的源解析研究工作中. Abbasi<sup>[21]</sup>首次将 PMF 模型应用于伊朗湿地沉积物中微塑料的源解析, 本文进一步将 PMF 模型应用于河网沉积物微塑料污染源解析中.

为揭示太湖流域典型城市河网沉积物微塑料污染情况, 阐明其潜在来源, 本文以无锡望虞河西岸河网区为研究区域, 在冬季 (2018 年 12 月) 和夏季 (2019 年 6 月) 分别对河网区沉积物中微塑料的污染状况开展现场采样调查和分析, 揭示微塑料的时空分布特征, 并运用 PMF 模型, 阐明微塑料可能的污染来源, 以期对望虞河流域微塑料污染防控提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概述

望虞河位于太湖流域北侧, 全长 60.8 km, 是太湖洪水主要泄洪通道之一, 也是由长江直接向太湖引水的唯一骨干河道, 具有防洪、排涝、引水和航运等多种功能.

### 1.2 采样点位的布设及样品采集

共布设了 17 个采样点, 如图 1 所示. 采样点 WY-1、WY-2、WY-3 和 WY-4 位于无锡市望虞河干流, 采样点 BD-1、BD-2、BD-3、JL-1、JL-2 和 JL-3 分别位于望虞河两条主要支流伯渎港和九里河的干流, 伯渎港和九里河的支流也分别设置了一个采样点 BD-0 和 JL-0, 再分别在无锡内京杭运河 (JH)、市中心商业区 (C)、工业区 (I)、郊区 (R) 和某大型污水处理厂 (W) 各设置 1 处采样点. 于冬季 (2018 年 12 月) 和夏季 (2019 年 6 月) 分别使用 Peterson 采泥器于每个采样点采集约 2 kg 表层沉积物样品, 采样深度约为 0~20 cm, 用锡纸包裹后装入塑料袋中密封, 带回实验室后置于阴凉处保存.

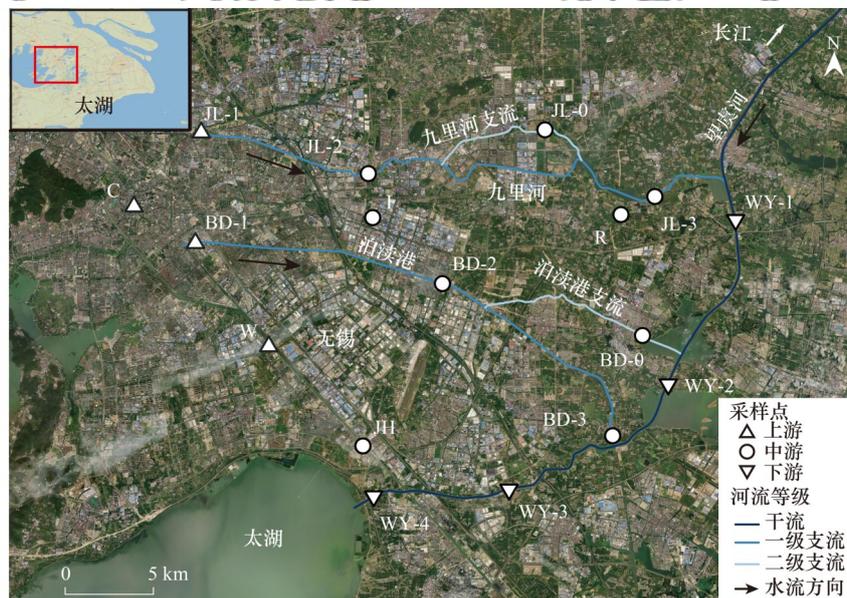


图 1 望虞河西岸河网区沉积物采样点示意

Fig. 1 Sampling sites in sediments of the river network area on the west bank of Wangyu River

### 1.3 沉积物中微塑料的提取

从每份沉积物湿样品中平行取 3 份 100 g 沉积物, 分别置于 500 mL 烧杯中, 用铝箔轻轻盖住烧杯口后放入 60°C 烘箱中烘干 48 h. 向烘干后的样品中加入 100 mL 偏磷酸钾溶液使沉积物解聚, 用玻璃棒充分搅拌后静置. 加入 100 mL 饱和氯化钠溶液 ( $\rho = 1.2 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ), 用玻璃棒充分搅拌后静置 15 min, 上清液

用直径 47 mm, 孔径 8  $\mu\text{m}$  的尼龙滤膜抽滤, 滤渣用纯水冲洗到洁净 100 mL 烧杯中, 重复以上操作 3 次. 向烧杯中加入 10 mL Fe(II) 溶液和 20 mL 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 用铝箔纸轻轻盖住烧杯口后在常温下静置 96 h 以充分消解天然有机物, 取上清液用 8  $\mu\text{m}$  尼龙膜抽滤, 最后将带有滤渣的滤膜放入洁净的玻璃培养皿中保存.

### 1.4 微塑料的鉴定

使用体视显微镜(Mshot明美, MZ62)观察滤膜上的微塑料颗粒,记录粒径、颜色和形态信息,计数后从每张滤膜上随机挑取15~20个微塑料颗粒,用显微傅立叶变换红外光谱仪( $\mu$ -Fourier transform infrared spectrometer,  $\mu$ -FTIR, Vertex 70v)鉴定微塑料的成分,使用OMNIC软件将所得谱图与标准谱库进行匹配,匹配度达到70%以上则确认微塑料的聚合物类型。

### 1.5 质量控制

为避免微塑料提取过程中的污染,实验人员均穿戴天然乳胶手套和纯棉实验服,在洁净的工作台上进行实验,整个过程中保持实验室门窗关闭,排气扇打开,并尽量减少样品暴露在空气中的时间。实验过程中均使用玻璃材质容器,并且所有敞口容器均用铝箔覆盖,防止环境中的微塑料污染实验样品,清洗仪器和配制溶液等使用的高纯水均事先经0.45  $\mu\text{m}$ 玻璃纤维滤膜过滤。空白实验用100 mL经0.45  $\mu\text{m}$ 玻璃纤维滤膜抽滤后的纯水进行,整个实验过程与上述沉积物样品的实验步骤一致,从3份空白样品共发现6个微塑料颗粒,后文结果中已扣除空白值。

### 1.6 微塑料的来源解析

本文利用PMF模型探索微塑料可能的来源,并量化各来源对微塑料污染的贡献。PMF模型的基本原理是:先利用权重对各种成分微塑料的误差进行计算,再利用最小二乘法计算出微塑料的主要污染源及其贡献率。PMF模型将原始矩阵 $\mathbf{X}_{(m \times n)}$ 因子化,分解为两个因子矩阵 $\mathbf{F}_{(p \times n)}$ 和 $\mathbf{G}_{(m \times p)}$ 以及一个残差矩阵 $\mathbf{E}_{(m \times n)}$ ,如式(1)所示:

$$\mathbf{X}_{m \times n} = \mathbf{F}_{p \times n} \times \mathbf{G}_{m \times p} + \mathbf{E}_{m \times n} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{X}_{m \times n}$ 表示受体矩阵,即每个样品中每种成分微塑料的丰度; $\mathbf{F}_{p \times n}$ 表示因子谱矩阵; $\mathbf{G}_{m \times p}$ 表示源贡献矩阵,即每类源对每个样品微塑料的贡献; $\mathbf{E}_{m \times n}$ 表示残差矩阵, $m$ 、 $n$ 和 $p$ 分别表示样品、成分和源类数目。

PMF定义了一个目标函数 $Q$ ,通过迭代使这个目标函数的值最小:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (e_{ij}/s_{ij})^2 \quad (2)$$

式中, $e_{ij}$ 表示残差矩阵; $s_{ij}$ 表示第 $i$ 个样品中第 $j$ 个成分的不确定度;不确定度的计算方法如下式所示:

$$\text{Unc} = \frac{5}{6} \times \text{MDL} \quad (3)$$

$$\text{Unc} = \sqrt{(\text{RSD} \times \text{Abun})^2 + (0.5 \times \text{MDL})^2} \quad (4)$$

式中, Unc 表示各成分微塑料的不确定度(以 dw

计),  $\text{n} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; MDL表示各成分微塑料的检出限(以 dw 计),  $\text{n} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; Abun表示各成分微塑料的丰度(以 dw 计),  $\text{n} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; RSD表示各成分微塑料的相对标准偏差;当  $\text{Abun} \leq \text{MDL}$  时,采用式(3)计算;当  $\text{Abun} > \text{MDL}$  时,采用式(4)计算<sup>[22]</sup>。

### 1.7 数据分析

沉积物中微塑料的丰度(以 dw 计)用  $\text{n} \cdot \text{kg}^{-1}$  表示,数据储存在 Microsoft Excel 中,并使用 R v4.1.3 进行统计制图,微塑料的时空分布通过 QGIS v3.18 进行可视化描述。采用单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)比较微塑料丰度的时间、空间差异,采用 Spearman 相关性分析方法评估表层水、底层水与沉积物中微塑料丰度之间的关系,利用 EPA PMF 5.0<sup>[23]</sup>进行微塑料的来源解析。

## 2 结果与分析

### 2.1 微塑料的丰度

望虞河西岸河网区 34 份沉积物样品中微塑料的检出率达到 100%,共发现了 2 038 个微塑料,微塑料丰度(以 dw 计,下同)用每个采样点微塑料的个数除以干沉积物的质量计算得出,范围在 68.75~849.50  $\text{n} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,如图 2 所示。冬季微塑料的平均丰度为 363.80  $\text{n} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其中采样点 WY-4 的微塑料平均丰度最高,为 601.04  $\text{n} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,采样点 JH 的微塑料平均丰度最低,为 134.28  $\text{n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。夏季微塑料的平均丰度为 282.95  $\text{n} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,略低于冬季的平均丰度,采样点 W 的微塑料平均丰度最高,为 849.5  $\text{n} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,采样点 BD-3 的微塑料平均丰度最低,为 68.75  $\text{n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

近 10 年来中国部分淡水系统沉积物中微塑料的污染状况如表 1 所示,与其他研究相比,望虞河西岸河网区沉积物中的微塑料污染处于中等偏高的水平。

### 2.2 微塑料的形态

望虞河西岸河网区沉积物中微塑料的粒径范围在 33~4 204  $\mu\text{m}$  之间,按照 0~50、50~500、500~1 000 和 1 000~5 000  $\mu\text{m}$  分为 4 个区间进行粒径分布分析,如图 3(a)和图 3(b)所示,发现位于 50~500  $\mu\text{m}$  粒径区间内的微塑料最多,表明望虞河西岸沉积物中的微塑料污染主要集中在粒径小于 500  $\mu\text{m}$  区间的小尺寸塑料污染,其原因可能是微塑料在自然环境中经过长时间的物理、化学和生物作用破碎成了小粒径的塑料碎片<sup>[33]</sup>,且与大塑料相比,小粒径的微塑料更容易进入地表水并积累在沉积物中<sup>[34]</sup>。

微塑料的颜色观察到黑色、蓝色、白色、红色、绿色和黄色这 6 种,如图 3(c)和图 3(d)所示。其中,黑色的微塑料是最多的,此外观察到最多的

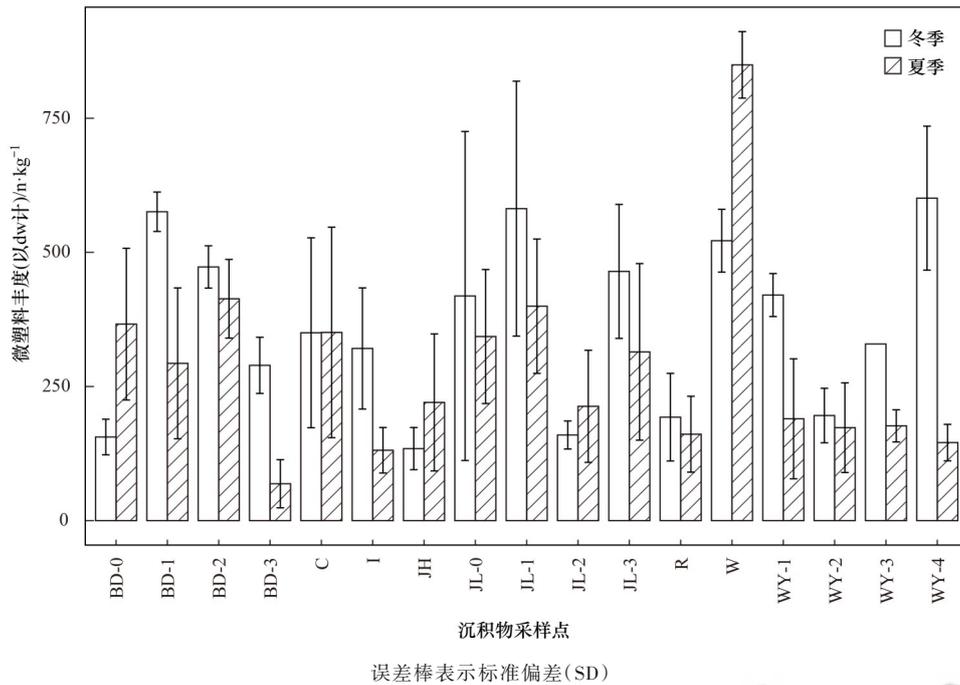


图 2 望虞河西岸河网区沉积物中微塑料的丰度  
Fig. 2 Abundances of microplastics in the sediments of river network area on the west bank of Wangyu River

表 1 中国部分淡水系统沉积物中微塑料污染状况  
Table 1 Microplastics in sediments of several freshwater systems in China

研究区域	采样时间	沉积物中微塑料丰度	文献
香溪河	枯水期:2020年11月 平水期:2021年4月	枯水期: $(0.41 \pm 0.09) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$ 平水期: $(0.56 \pm 0.13) \text{ n} \cdot \text{g}^{-1}$	[24]
永丰河	2018年5月	$5 \sim 72 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$	[25]
太湖	2015年8月	$11 \sim 234.6 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 dw 计)	[26]
三峡水库	2016年8月	$25 \sim 300 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 ww 计)	[27]
鄱阳湖	2017年11月	$54 \sim 506 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$	[28]
北京城市河流	2020年10月	$120 \sim 268 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$	[29]
湘江	2021年春季	$144 \sim 510 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 dw 计)	[14]
成都城市河流	2021年1月	$209.2 \sim 585.7 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 dw 计)	[30]
渭河	2017年冬季	$360 \sim 1320 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$	[31]
太湖	2019年8月	$460 \sim 1380 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 dw 计)	[32]
珠江广州段	2017年7月	$80 \sim 9597 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$	[13]
望虞河西岸河网区	冬季:2018年12月 夏季:2019年6月	冬季: $134.28 \sim 601.04 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 dw 计) 夏季: $68.75 \sim 849.50 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ (以 dw 计)	本研究

是蓝色、白色和红色的微塑料. 先前对该流域表层水中微塑料污染状况的研究发现, 表层水中检出的微塑料以蓝色为主, 其次分别为黑色、红色、绿色、黄色和白色<sup>[16]</sup>. 可以看出表层水和沉积物中微塑料的颜色构成相同, 而各种颜色的占例存在差异, 其原因可能是沉积物中的微塑料更易吸附其他污染物, 在物理和化学作用下造成颜色的改变<sup>[35]</sup>.

微塑料的形状有纤维、碎片、薄膜和微珠这4种, 如图3(e)和图3(f)所示. 其中, 碎片类占比最高, 其次为纤维、微珠和薄膜, 这一结果与该地

区表层水中微塑料的形状分布一致<sup>[16]</sup>. 值得一提的是, 望虞河西岸河网区沉积物中薄膜状微塑料在冬季仅占0.62%, 且在夏季并未检出薄膜状微塑料.

### 2.3 微塑料的聚合物成分

本研究共挑选了381个微塑料颗粒进行聚合物成分鉴定, 共检测出20种类型的聚合物. 望虞河西岸河网区沉积物样品中微塑料主要成分为聚对苯二甲酸乙二醇酯 (polyethylene glycol terephthalate, PET), 如图4所示, 其次分别为聚乙烯 (polyethylene, PE)、聚氯乙烯 (polyvinyl chloride,

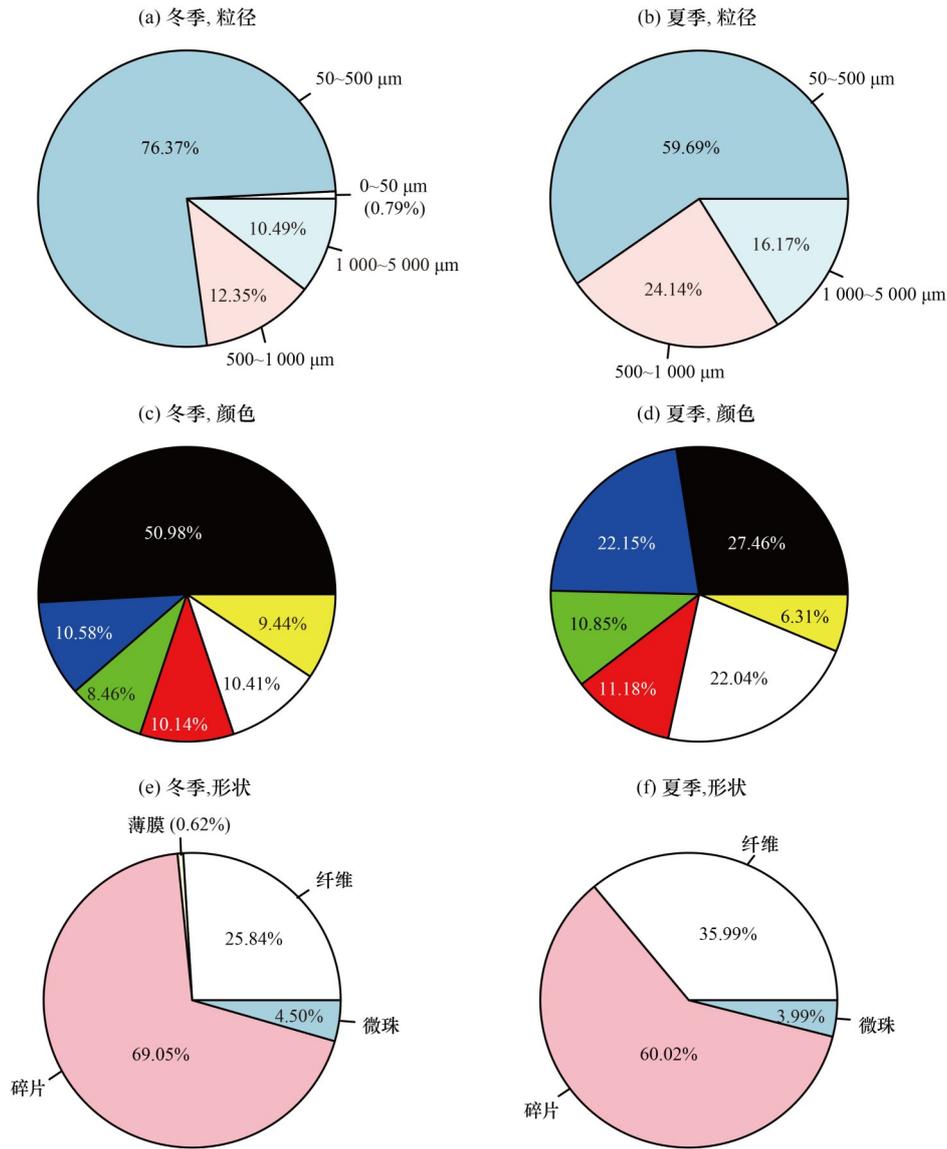


图3 望虞河西岸河网区沉积物中微塑料的形态

Fig. 3 Morphology of microplastics in sediments of the river network area on the west bank of Wangyu River

PVC)、聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 和聚丙烯 (polypropylene, PP). PE 和 PP 具有价格低廉、化学性能稳定的优点, 在日常生活中被大量使用<sup>[36]</sup>, 但由于其密度低于河水密度 (PP 密度约为 0.85 ~ 0.92

$g \cdot cm^{-3}$ , PE 密度约为 0.89 ~ 0.98  $g \cdot cm^{-3}$ ), 因此需要吸附其他有机物或杂质使其密度增大, 进而沉降到沉积物中<sup>[37]</sup>, 这可能是导致其占比小于 PET (密度约为 1.38 ~ 1.41  $g \cdot cm^{-3}$ ) 的原因.

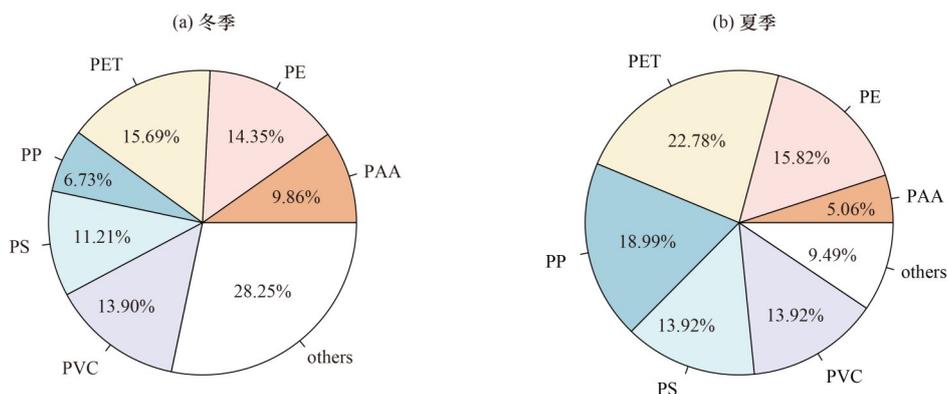


图4 望虞河西岸河网区沉积物中微塑料的成分

Fig. 4 Composition of microplastics in sediments of the river network area on the west bank of Wangyu River

### 3 讨论

#### 3.1 望虞河西岸沉积物中微塑料污染的时空分布特征

夏季望虞河西岸河网区沉积物中微塑料的丰度低于冬季, ANOVA 结果表明冬、夏两季沉积物中微塑料的丰度间存在显著差异 ( $F = 4.97, P < 0.05$ ), 其原因可能是夏季降雨造成表层沉积物中物质的再悬浮, 导致表层沉积物中微塑料的丰度降低<sup>[38]</sup>.

Fan 等<sup>[16]</sup>对该地区同时期表层水中微塑料污染状况的研究表明, 夏季微塑料的平均丰度显著高于冬季, Spearman 相关性分析的结果表明, 表层水、底层水和沉积物中微塑料的丰度之间不存在显著相关性 ( $P > 0.05$ ), 因为沉积物反映了微塑料的长期积累的水平.

夏季望虞河西岸河网区沉积物中微塑料的平均丰度遵循上游>中游>下游的分布规律, 冬季微塑料的平均丰度遵循下游>上游>中游的分布规律, 如图 5 所示. ANOVA 的结果表明上游微塑料丰度与中、下游微塑料丰度之间存在显著差异 ( $F = 14.18, P < 0.05$ ), 其原因可能是上游地区位于无锡市经济发达的梁溪区、锡山区和新吴区, 人口密度大, 工业生产活动多, 并且包含一个大型污水处理厂(采样点 W), 污水的排放使得该点位的微塑料丰度无论是冬季还是夏季都处于极高的水平, Carr 等<sup>[39]</sup>的研究同样表明, 污水处理厂的处理工艺并不能完全去除废水中的微塑料. 京杭运河(采样点 JH)以及城郊(采样点 R)冬季和夏季的微塑料丰度均处于一个较低的水平, 其原因可能是远离市区, 人口密度小, 工业生产活动较少.

#### 3.2 微塑料的潜在来源分析

PMF 模型的分析结果表明, 望虞河西岸河网区沉积物中的微塑料可能有 4 个潜在来源, 各污染源

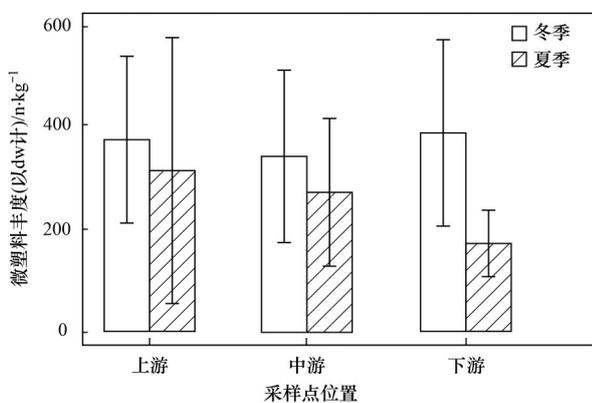


图 5 上、中、下游地区沉积物中微塑料的丰度  
误差棒表示标准偏差(SD)

Fig. 5 Abundances of microplastics in the sediments from up-, middle-, and down-stream

对不同成分微塑料的贡献如图 6 所示. 可以看出, 冬季因子 1 对 PET 和 PP 有较大的贡献率, 因子 2 对 PS 的贡献最为突出, 因子 3 对 PVC 和 PAA 有较大的贡献率, 因子 4 对各种成分微塑料都有一定的贡献率, 表明该因子是一个综合污染源. 夏季因子 1 对 PE 的贡献最为突出, 因子 2 对 PET、PP 和 PAA 都有较大的贡献率, 因子 3 对 PVC 的贡献最为突出, 因子 4 对各种成分微塑料都有一定的贡献率, 其中对 PS 的贡献最为突出.

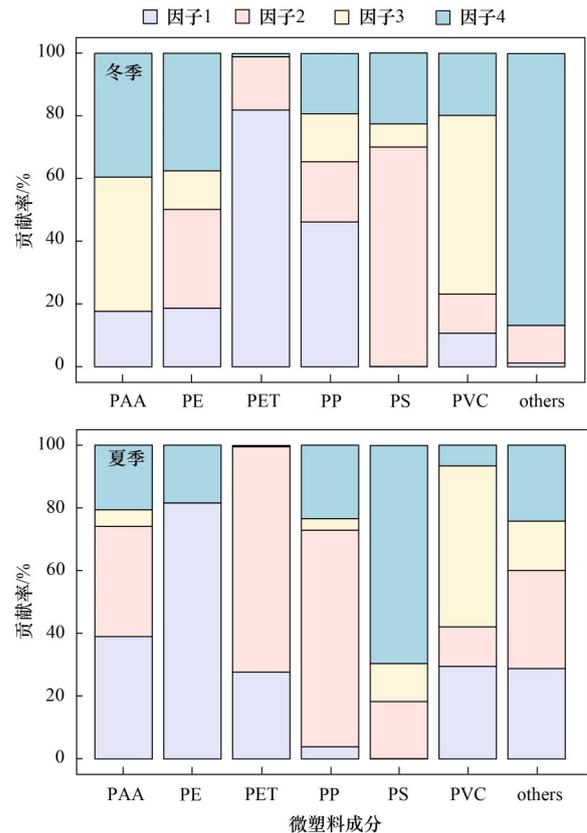


图 6 4 种污染源对各成分微塑料的贡献

Fig. 6 Contribution of four sources to different microplastic components

环境中常见的微塑料成分以及它们的主要用途如表 2 所示, 根据各种成分微塑料的用途, 可以推断 2018 年 12 月的因子 1、2、3 和 4 分别为塑料垃圾、生活污水、工业生产和农业生产; 2019 年 6 月的因子 1、2、3 和 4 分别为农业生产、塑料垃圾、工业生产和生活污水.

表 2 常见的微塑料成分及其用途

成分	主要用途	文献
PE	作塑料包装盒和一次性产品	[40]
PET	涤纶和饮料包装的生产原料	[41]
PP	塑料编织袋和塑料袋	[36]
PS	泡沫塑料制品和个人护理产品	[42]
PVC	管材、电线和电缆	[43]

结合微塑料的形态来看,薄膜状微塑料的主要来源有质地较薄的塑料袋以及工农业生产中使用的覆盖物<sup>[34]</sup>,冬季气温低,使用地膜覆盖可以抑制土壤温度下降,保证作物产量<sup>[44]</sup>.本文检测出的薄膜状微塑料仅占微塑料总数的0.34%,无锡市第一产业生产总值仅占地区生产总值的1.06%,因此研究区域农业活动较少是薄膜状微塑料占比少的原因.2018~2019年无锡市统计年鉴数据表明,2019年无锡市农区农用塑料薄膜的使用量较2018年减少了44.38%,本研究于2018年冬季检测出薄膜状微塑料,而在2019年夏季未检测出薄膜状微塑料,这一变化与无锡市农用塑料薄膜使用量的变化趋势相符,因此薄膜状微塑料的来源可能是农用塑料薄膜.

纤维状微塑料的来源有衣物、绳子以及渔网、鱼线的分解<sup>[45]</sup>.本文的研究区域大部分位于无锡市,渔业生产活动少,水产品产量仅占无锡全市的12%,而市区人口密度大且城镇人口比重高,因此纤维状微塑料的主要来源可能是洗衣废水的排放.碎片状微塑料的来源较广,工业生产以及生活塑料废弃物裂解或破碎后都有可能形成塑料碎片<sup>[34]</sup>,因此碎片状微塑料以次生微塑料为主<sup>[46]</sup>,此外,污水排放和道路径流也是塑料碎片的重要来源<sup>[29]</sup>.

#### 4 结论

(1)望虞河西岸河网区沉积物中微塑料的平均丰度(以dw计)为 $323.37 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,与国内其他河流相比微塑料污染处于中等偏高的水平,且冬季的平均丰度高于夏季.微塑料的颜色以黑色和蓝色为主,粒径主要分布在 $50 \sim 500 \mu\text{m}$ 之间,形状主要为碎片和纤维,成分以PET、PE、PVE、PS和PP为主.

(2)望虞河西岸河网区沉积物中微塑料的丰度存在时空差异性.夏季微塑料丰度显著低于冬季,上游微塑料丰度显著高于中、下游,其中,最高丰度出现在污水处理厂出水口,表层水、底层水和沉积物中微塑料的丰度之间无显著相关性.

(3)望虞河西岸河网区沉积物中微塑料的主要来源有农用塑料薄膜、生活废水、塑料垃圾以及工业生产.

#### 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] Baker J E, Foster G F, Masura J, *et al.* Concentration of marine microplastics in the puget sound [A]. In: Arthur C, Baker J (Eds.). *Proceedings of the Second Research Workshop on Microplastic Marine Debris* [C]. Silver Spring: NOAA, 2011. 12.

[3] 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 等. 九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系[J]. *环境科学*, 2022, **43**

(1): 239-246.

Liu C J, Luo Z X, Yan Y, *et al.* Occurrence characteristics of microplastics in mangrove sediments in the Jiulong River estuary and the association with heavy metals[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 239-246.

[4] Lee H, Shim W J, Kwon J H. Sorption capacity of plastic debris for hydrophobic organic chemicals [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 1545-1552.

[5] Farrell P, Nelson K. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **177**: 1-3.

[6] Fan J X, Zou L, Duan T, *et al.* Occurrence and distribution of microplastics in surface water and sediments in China's inland water systems: a critical review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **331**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129968.

[7] Yang H R, Yan Y M, Yu Y K, *et al.* Distribution, sources, migration, influence and analytical methods of microplastics in soil ecosystems [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, **243**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.114009.

[8] Chen G L, Feng Q Y, Wang J. Mini-review of microplastics in the atmosphere and their risks to humans [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135504.

[9] Cho Y, Shim W J, Jang M, *et al.* Abundance and characteristics of microplastics in market bivalves from South Korea [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **245**: 1107-1116.

[10] Zhao M J, Cao Y X, Chen T T, *et al.* Characteristics and source-pathway of microplastics in freshwater system of China: a review [J]. *Chemosphere*, 2022, **297**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134192.

[11] Yang L, Zhang Y L, Kang S C, *et al.* Microplastics in freshwater sediment: a review on methods, occurrence, and sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **754**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141948.

[12] 姚明轩, 白雪, 徐振佳, 等. 骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2566-2574.

Yao M X, Bai X, Xu Z J, *et al.* Distribution characteristics, sources, and storage of microplastics in surface sediments of Luoma Lake [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2566-2574.

[13] 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.

[14] Yin L S, Wen X F, Huang D L, *et al.* Abundance, characteristics, and distribution of microplastics in the Xiangjiang River, China [J]. *Gondwana Research*, 2022, **107**: 123-133.

[15] 姚天启, 严晗璐, 廖雪珂, 等. 引调水河道氮的迁移转化及微生物群落结构特征——以望虞河为例[J]. *环境科学学报*, 2022, **42**(1): 195-204.

Yao T Q, Yan H L, Liao X K, *et al.* Characteristics of nitrogen transformation and microbial community structure in the diversion river: a case study of the Wangyu River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(1): 195-204.

[16] Fan Y F, Zheng J L, Deng L G, *et al.* Spatiotemporal dynamics of microplastics in an urban river network area [J]. *Water Research*, 2022, **212**, doi: 10.1016/j.watres.2022.118116.

[17] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values [J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.

[18] 杨丽萍. 浙江省两个典型流域水体污染特征及污染源解析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

Yang L P. Water pollution characteristics and source apportionment in two representative watersheds in Zhejiang Province [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.

- [19] 鹿雄, 杨凌霄, 张婉, 等. 海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2284-2293.  
Tuo X, Yang L X, Zhang W, *et al.* Characteristics and source analysis of PM<sub>2.5</sub> in Qingdao in winter under the action of sea-land-atmosphere convergence [J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2284-2293.
- [20] 陈航, 王颖, 王澍. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2719-2731.  
Chen H, Wang Y, Wang S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around Tongshan mining area [J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2719-2731.
- [21] Abbasi S. Prevalence and physicochemical characteristics of microplastics in the sediment and water of Hashilan Wetland, a national heritage in NW Iran [J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, **23**, doi: 10.1016/j.eti.2021.101782.
- [22] 贺博文, 裴赛赛, 李仪琳, 等. 承德市 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评估[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2343-2354.  
He B W, Nie S S, Li Y L, *et al.* Seasonal distribution characteristics, source analysis, and health risk evaluation of PAHs in PM<sub>2.5</sub> in Chengde [J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2343-2354.
- [23] United States Environmental Protection Agency. Positive matrix factorization model for environmental data analyses [EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-research/positive-matrix-factorization-model-environmental-data-analyses>, 2023-05-06.
- [24] 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]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 3077-3087.
- [25] Rao Z, Niu S P, Zhan N, *et al.* Microplastics in sediments of River Yongfeng from Maanshan City, Anhui Province, China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2020, **104**(2): 166-172.
- [26] Su L, Xue Y A, Li L Y, *et al.* Microplastics in Taihu Lake, China [J]. Environmental Pollution, 2016, **216**: 711-719.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 胡嘉敏, 左剑恶, 李嶙, 等. 北京城市河流河水和沉积物中微塑料的组成与分布[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5275-5283.  
Hu J M, Zuo J E, Li D, *et al.* Composition and distribution of microplastics in the water and sediments of urban rivers in Beijing [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5275-5283.
- [30] Zhang Y T, Peng Y T, Xu S Z, *et al.* Distribution characteristics of microplastics in urban rivers in Chengdu City: the influence of land-use type and population and related suggestions[J]. Science of the Total Environment, 2022, **846**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157411.
- [31] 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.
- [32] Zhang Q J, Liu T, Liu L, *et al.* Distribution and sedimentation of microplastics in Taihu Lake [J]. Science of the Total Environment, 2021, **795**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148745.
- [33] Hayes D G, Wadsworth L C, Sintim H Y, *et al.* Effect of diverse weathering conditions on the physicochemical properties of biodegradable plastic mulches [J]. Polymer Testing, 2017, **62**: 454-467.
- [34] Wen X F, Du C Y, Xu P, *et al.* Microplastic pollution in surface sediments of urban water areas in Changsha, China: abundance, composition, surface textures [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, **136**: 414-423.
- [35] 李征, 高春梅, 杨金龙, 等. 连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3212-3221.  
Li Z, Gao C M, Yang J L, *et al.* Distribution characteristics of microplastics in surface water and sediments of Haizhou Bay, Lianyungang [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3212-3221.
- [36] 周泽妍, 王思琦, 张盼月, 等. 白洋淀-府河入淀口段沉积物中微塑料的丰度及分布特征[J]. 环境工程学报, 2021, **15**(1): 360-367.  
Zhou Z Y, Wang S Q, Zhang P Y, *et al.* Microplastic abundance and distribution in sediments of Fuhe River estuary into the Baiyangdian Lake [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, **15**(1): 360-367.
- [37] Wang Z F, Su B B, Xu X Q, *et al.* Preferential accumulation of small (<300 μm) microplastics in the sediments of a coastal plain river network in eastern China [J]. Water Research, 2018, **144**: 393-401.
- [38] Park T J, Kim M K, Lee S H, *et al.* Temporal and spatial distribution of microplastic in the sediment of the Han River, South Korea [J]. Chemosphere, 2023, **317**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.137831.
- [39] Carr S A, Liu J, Tesoro A G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants [J]. Water Research, 2016, **91**: 174-182.
- [40] Fahrenfeld N L, Arbuckle-Keil G, Beni N N, *et al.* Source tracking microplastics in the freshwater environment [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2019, **112**: 248-254.
- [41] 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, 2020, **259**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113865.
- [42] Jiang C B, Yin L S, Wen X F, *et al.* Microplastics in sediment and surface water of west Dongting Lake and south Dongting Lake: abundance, source and composition [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, **15**(10), doi: 10.3390/ijerph15102164.
- [43] 陈威名. 大辽河岸滩微塑料分布及迁移调查研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.  
Chen W M. Investigation on distribution and migration of microplastics in tidal flat of Daliao River [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [44] 张金瑞, 任思洋, 戴吉照, 等. 地膜对农业生产的影响及其污染控制[J]. 中国农业科学, 2022, **55**(20): 3983-3996.  
Zhang J R, Ren S Y, Dai J Z, *et al.* Influence of plastic film on agricultural production and its pollution control [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, **55**(20): 3983-3996.
- [45] 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.
- [46] Zhang K, Gong W, Lv J Z, *et al.* Accumulation of floating microplastics behind the Three Gorges Dam [J]. Environmental Pollution, 2015, **204**: 117-123.

## CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China .....	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency .....	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition .....	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing .....	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University .....	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing .....	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China .....	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Chinese Cities .....	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021 .....	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period .....	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter .....	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei .....	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region .....	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Liaocheng City .....	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa .....	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries .....	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes .....	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment .....	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River .....	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang .....	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China .....	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes .....	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin .....	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin .....	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City .....	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network .....	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed .....	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus .....	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects .....	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation .....	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism .....	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar .....	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin .....	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake .....	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River .....	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers .....	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process .....	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area .....	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost .....	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field .....	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics .....	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N <sub>2</sub> O Emission: A Meta-analysis .....	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model .....	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction .....	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning .....	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity .....	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall .....	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity .....	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil .....	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain .....	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites .....	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou .....	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China .....	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing .....	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines .....	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil .....	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems .....	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)