

南京城市水体中微塑料的赋存特性及其影响因素

诸裕良¹, 张 鹏², 沈晓腾²

(1. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:以南京城市河流秦淮河和夹江为研究对象,于2022年1月至2023年12月开展了调查采样,分析了研究期内两条河流的微塑料赋存特征,解析了微塑料的可能来源,并采用污染负荷指数法对研究区域的微塑料污染进行评估。结果表明:秦淮河微塑料颗粒平均丰度为 (612.3 ± 183.1) 个/ m^3 ,丰度范围为 $333.3 \sim 942.1$ 个/ m^3 ,夹江微塑料颗粒平均丰度为 (556.2 ± 263.7) 个/ m^3 ,丰度范围为 $201.1 \sim 933.3$ 个/ m^3 ;两条河流的微塑料颗粒粒径主要分布在 $0 \sim 1000 \mu\text{m}$,微塑料主要形状、颜色均分别为纤维状(秦淮河52.0%,夹江70.0%)和黑色(秦淮河63.2%,夹江72.5%);两条河流微塑料污染评估均显示污染程度为轻度。

关键词:微塑料;赋存特征;城市河流;污染评估;南京市

中图分类号:X522

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2025)04-0236-08

Occurrence characteristics and influencing factors of microplastics in urban water bodies of Nanjing//ZHU Yuliang¹, ZHANG Peng², SHEN Xiaoteng² (1. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking the urban rivers of Nanjing, Qinhuai River and Jiajiang River, as the research objects, an investigation and sampling were conducted from January 2022 to December 2023 to analyze the microplastic distribution characteristics of the two rivers during this period, to identify the possible sources of microplastics, and to assess the microplastic pollution in the study area using the pollution load index method. The results showed that the average abundance of microplastic particles in Qinhuai River was (612.3 ± 183.1) per cubic meter, with an abundance range of 333.3 to 942.1 per cubic meter, and the average abundance of microplastic particles in Jiajiang River was (556.2 ± 263.7) per cubic meter, with an abundance range of 201.1 to 933.3 per cubic meter; microplastic particle size in both rivers were mainly distributed in the range of 0 to $1000 \mu\text{m}$, and the main shapes and colors of microplastics were fibrous (52.0% in Qinhuai River, 70.0% in Jiajiang River) and black (63.2% in Qinhuai River, 72.5% in Jiajiang River); the assessment of microplastic pollution in both rivers showed that the pollution degree was mild.

Key words: microplastics; occurrence features; urban rivers; pollution assessment; Nanjing City

微塑料(microplastic, MP)是一类人工合成的黏性细颗粒,其定义为直径小于5 mm的塑料颗粒^[1],主要来源于人工制造的微塑料颗粒^[2]和大塑料的破碎降解^[3]。近年来,微塑料污染已经成为全球关注的焦点问题,关于水体中微塑料的研究也逐步从海洋拓展到淡水^[4]领域。入海河流作为微塑料向海洋输送的重要通道,其污染程度直接影响微塑料的入海通量^[5]。而与入海河流相连通的城市河流,因汇集了城市工业废水、生活污水以及城区雨水径流,成为入海微塑料的重要源头^[6],在水体微塑料的研究中占据重要地位。

已有研究表明,在全球范围内,河流是微塑料进入海洋的主要渠道之一。入海河流所携带的微塑料污染量直接影响着海洋微塑料的丰度和分布^[7]。

部分国家对水体中微塑料丰度开展了系统监测,如德国的莱茵河($300 \sim 600$ 个/ m^3)、法国的塞纳河($50 \sim 200$ 个/ m^3)以及美国的密西西比河($300 \sim 600$ 个/ m^3)等^[8],均进行过微塑料污染的相关调查。在我国,针对淡水环境中微塑料污染的研究也日益增多,如对北京北运河((1941 ± 201) 个/ m^3)^[9]、宜昌东山运河((7295 ± 1051) 个/ m^3)^[10]、哈尔滨信义沟($24990 \sim 54000$ 个/ m^3)^[11]等的调查。研究表明,

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFE0101000);国家自然科学基金面上项目(42176165)

作者简介:诸裕良(1965—),男,教授,博士,主要从事河口海岸动力学研究。E-mail:zhuyl@hhu.edu.cn

通信作者:沈晓腾(1987—),男,教授,博士,主要从事海岸带微塑料污染与控制研究。E-mail:xiaoteng.shen@hhu.edu.cn

不同河流的微塑料丰度存在显著差异,且通常呈现出与流域人口密度、工业发展水平、废水排放量等因素相关的趋势^[12]。为进一步探究河流中微塑料的分布特征、丰度规律及其影响因素,对典型城市河流开展微塑料调查研究尤为迫切。

我国是微塑料生产和消费的大国,长江作为我国第一大河,流域面积达 180 万 km²。由于长江流域经济发达、人口密集,其微塑料污染程度显著高于其他流域^[13]。南京作为长江流域下游的重要城市,其境内有两条主要的城市河流,秦淮河汇集南京市大量不同来源的生活、工业和农业废水;而夹江是为南京市的重要水源地,其水质直接关系市民的健康问题。

本文以秦淮河和夹江为研究对象,调查了城市河流中微塑料的丰度,分析了其分布特征及影响因素,可为估算南京城市河流向长江及长江入海的微塑料通量提供数据支撑。

1 研究区概况

秦淮河位于江苏省西南部,是中国长江下游右岸支流,全长 110 km,流域面积 2 681 km²^[14]。进入秦淮河的污水主要包括工业污水,以及宾馆、居民、饭店等排放的生活污水;上游汇水区有大量的农田,其中的塑料薄膜等污染物也随地表径流进入河道。

夹江俗称大胜关水域,受长江潮汐影响,为感潮河段,位处长江南京段上游,南京市河西(秦淮河以西)地区,全长 13.6 km,流域内有北河口水厂、城南水厂、江心洲水厂、江宁开发区水厂等取水口,年取水量约 38 万 m³^[15],是南京市目前最重要的饮用水水源地。

两条河流在污染源、河流功能等方面具有显著差异。秦淮河的污染源主要来自城市生活污水和工业废水,以及农田径流带来的污染,而夹江流域污染较少,受长江主河道影响更多;秦淮河在文旅、灌溉等方面发挥着重要作用,夹江则主要承担着南京市重要的饮用水供应功能。

2022 年 1 月至 2023 年 12 月对南京市秦淮河和夹江开展了微塑料丰度采样调查。采样点位置需满足枯水期与汛期均能顺利采样、采样的方式对水体紊动影响较小、地理位置具有代表性,且水文条件适宜等条件;同时还需要考虑河流具体的地理环境,如是否有桥梁、亲水平台等基础设施可供利用。综上,选定秦淮河鬼脸城遗址公园亲水平台(32°3′13″N、118°44′44″E)与夹江绿博园亲水平台(32°6′35″N、18°25′26″E)两处采样点。两处采样点地理位置均具有代表性:鬼脸城遗址公园位于秦淮河中游,是秦

淮河微塑料污染较为严重的地段之一。在该处采样,能够较好地反映秦淮河中游微塑料污染的总体状况。绿博园亲水平台位于夹江中段,是夹江作为南京市重要饮用水水源地的关键地段。在该处采样可以直接监测夹江水质及微塑料污染状况,对评估南京市饮用水安全具有重要意义。两处采样平台均有便利的基础设施,与周边的桥梁、道路等基础设施连接良好,采样人员可以顺利到达,采取网或桶与伸缩杆连接的方式直接取样,对水流的干扰较小,提高了采样的准确性。此外,两处采样点水文条件适宜,附近河宽、水深适中,满足采样对水体深度和流速的要求;枯水期与汛期水文条件变化相对平稳,有利于保证采样的连续性和数据的可比性。

2 样品采集和微塑料定量分析

2.1 水样采集及微塑料分离与定量步骤

采样工作均选择在晴天或阴天进行,以此排除降雨对水样的干扰。采样时,使用 2.5 L 不锈钢取水器分 8 次采集,共计获取 20 L 水样。操作中,用绳索固定取水器后将其抛至离岸 5 m 的水面,待取水器完全浸没于水中时及时将其拉回,以确保所取水样均来自 0~0.5 m 的表层水域。同时,用水质仪(Y4001 手持多参数传感器)现场检测 5 项水质参数(溶解氧、浊度、电导率、pH 值、温度)。每个季节采样 2 次,秦淮河与夹江两个采样点均在同一天采样。

现场采样结束后,先将水样充分摇匀,随后取样 60 mL 放入烘干盒中。烘箱烘干(105℃,8 h)后用电子天平测量其干重,计算得到水样中的泥沙含量。随后将水样放在 4℃ 的环境中静置 24 h,使石块和树枝等杂物沉淀至水底。

将静置后的水样通过孔径为 5 mm 的不锈钢网筛,重复 3 次后用去离子水清洗网筛。用量筒量取 15 L 上层水样,使用 20 μm 尼龙膜进行抽滤,抽滤过程中要避免抽滤空气对样品造成污染。通过抽滤操作,水样中的固体物质会被集中截留在滤膜上,此时滤膜上的固体物质包含大量的有机质(如微藻、小虫)、泥沙颗粒以及微塑料颗粒。

为分离得到微塑料颗粒,在后续的消解试验中,先利用过氧化氢溶液在高温环境下充分分解生物质,以去除有机质;随后在浮选试验中,借助微塑料颗粒与泥沙颗粒密度差异较大的特点,分离获得无其他杂质干扰的微塑料悬浮液。具体步骤如下。

a. 消解:事先将要使用的过氧化氢溶液用玻璃纤维膜(0.4 μm)过滤,防止过氧化氢溶液中的杂质进入样品。使用过滤后的过氧化氢溶液冲洗 20 μm

的尼龙膜(NY2004700),将膜上附着的微塑料及其他杂质冲入消解用玻璃瓶中。消解生物质的过程会伴随着大量气泡的产生,故消解容器不能密封,用锡箔纸覆口并扎几个小洞使消解产生的气体能够顺利排出。为保证有机质能够被完全消解,将玻璃瓶放入摇床,分别在高温环境(60℃ ,80 r/min)和常温环境(26℃ ,80 r/min)中消解 24 h。

b. 浮选:事先制备好饱和食盐水并用玻璃纤维膜过滤,将过滤后的饱和食盐水加入消解的玻璃瓶中,常温下静置 24 h。饱和食盐水的加入加大了水样的密度,此时密度较大的颗粒如泥沙颗粒沉降到底部,而密度较小的微塑料颗粒则会上浮至水体表面,用虹吸装置将底部泥沙吸出。虹吸过程中应避免引起水体紊动将泥沙再次带入上层水体中。

c. 分离:将浮选后的水样用 5 μm 的尼龙膜(滤膜, NCG047100)进行抽滤,使水样中的微塑料颗粒集中到滤膜上以便后续观察。将载有微塑料颗粒的滤膜移入玻璃培养皿,记录编号后用锡箔纸封口,正面朝上放置在通风橱内风干后对其进行观测。

2.2 微塑料的观察与污染控制

将滤膜在通风橱中静置 1 d,待风干后再置于电子显微镜下进行观察计数。在体视显微镜(VMS135)下对滤膜上的微塑料进行识别、拍照和计数。观察、测量、记录微塑料的形态(颗粒、碎片、纤维)、尺寸(以微塑料颗粒的最大内径作为颗粒尺寸)和颜色。为方便与其他研究进行对比,同时依据微塑料的环境行为差异,将观测到的微塑料按粒径大小分类为 5 组(图 1):①<500 μm。该类微塑料颗粒较小,更容易被水流裹挟,迁移能力较强,不仅能更轻易地渗入水体深层,还易沉积至水底沉积物中,从而对水体环境造成长期的影响^[16]。②500~<1 000 μm。该类微塑料颗粒在水体中的悬浮能力较强,容易在水体表层或中层分布,并被水生生物误食,对生物的健康造成直接影响^[17]。③1 000~

<2 000 μm。该类微塑料颗粒因体积相对较大,沉降速度较快,更易在水底或河岸形成沉积,对底栖生物的影响可能更为显著,同时也会对水体的物理性质产生一定的影响。④2 000~5 000 μm。该类微塑料颗粒体积更大,沉降速度更快,不仅对底栖生态系统产生了较大的影响,还会对水质和生态环境产生一定的负面作用^[18]。⑤>5 000 μm。为观测到的大尺寸塑料碎片。

设定微塑料的鉴定标准为:①表面未见高亮、高闪的色彩,否则应调大倍镜倍数,反复检查高亮点和阴影存在的位置,防止有机物质干扰检测;②无明显可见生物质、藻类;③碎片状微塑料厚度均匀,边缘清晰;④两名试验观察人员同时判定为微塑料。

为了防止样本被污染,试验前将所需的试验器皿清洗后在烘箱中高温炙烤(105℃ ,30 min)杀菌消毒,再用去离子水冲洗试验容器 3 次,在不使用时用铝箔纸覆盖;试验过程中应避免使用塑料材质的试验器材,所有溶液提前制备并使用玻璃纤维膜(0.45 μm)过滤并密封保存;同时,在试验环境下放置 1 张潮湿的干净滤膜作为空白对照组,观测显示所有空白对照组中均未发现微塑料。

3 结果与分析

24 次采样中,秦淮河微塑料颗粒平均丰度为(612. 3 ± 183. 1) 个/m³, 丰度范围为 333. 3~942. 1 个/m³;夹江微塑料颗粒平均丰度为(556. 2 ± 263. 7) 个/m³, 丰度范围为 201. 1~933. 3 个/m³。对比与本文采样、预处理方法相似的研究(表 1),可见平均微塑料丰度与本文的试验结果处于同一量级,且处于中下水平。

3.1 微塑料颗粒粒径分布特征

根据微塑料颗粒粒径分布,秦淮河与夹江表层水体中主要为粒径为 0~500 μm 的微塑料,占比均超过 50%。小粒径的微塑料主要来源为初生小粒径微塑料和大塑料经老化、裂解形成的碎片。微塑料在河流中长距离迁移时,与岸坡及水体中的泥沙等物质发生碰撞,会进一步破碎成更小的颗粒。小粒径微塑料的占比能够反映微塑料碎片化程度及水环境污染的严重程度,比例较高时,水生生物的摄食概率会增加,进而导致微塑料在食物链中传递,破坏生态系统。秦淮河的小粒径微塑料占比高于夹江,推测其原因可能是秦淮河作为南京市的内污河道,汇集了大量城市生活污水,其中初生小粒径微塑料含量较高,污染程度更严重,因此其微塑料丰度及小粒径微塑料占比均显著高于夹江。

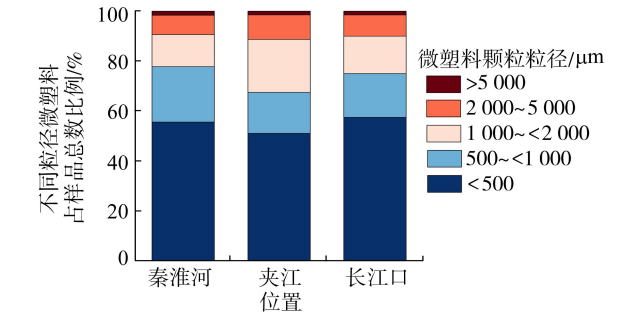


图 1 秦淮河、夹江与长江口微塑料粒径分布对比
Fig. 1 Comparison of microplastic particle size distribution in Qinhuai River, Jiajiang and Yangtze River Estuary

表 1 不同河流表层水中微塑料的丰度

Table 1 Abundances of microplastics in surface water of different rivers

河流	平均丰度/(个/m ³)	丰度范围/(个/m ³)	主要形状	主要粒径/μm
南京夹江	556. 2±263. 7	367~2 033	纤维	0~500
南京秦淮河	612. 3±183. 1		纤维	0~500
南京九乡河 ^[19]	7 295±1 051		纤维	100~500
宜昌东山运河 ^[10]		24 990~54 000	纤维	0~500
哈尔滨信义沟 ^[11]			碎片	20~100
北京北运河 ^[9]	1941±201		纤维	0~300
长江口 ^[20]	4 137. 3±2 461. 5	1 660~8 925	纤维	0~1 000
秦皇岛入海河口 ^[21]	721. 42±530. 13		纤维	0~1 000
东海 ^[20]	1 245. 8±531. 5		纤维	0~1 000
淮河流域安徽段 ^[22]	39 800±3 367	172 000~519 000	纤维	0~500
武汉地表水 ^[23]	6 698 264±3 929 093		纤维	0~500
西贡河 ^[24]			纤维	0~500
哈德逊河 ^[25]		980	纤维	0~1 000
渥太华河 ^[26]		200	纤维	0~500
芝加哥河 ^[27]	13 700	纤维	0~1 000	
洛杉矶河 ^[28]		17 000	纤维	0~500
多瑙河 ^[29]			纤维	0~500

3.2 微塑料形状特征

根据采样观测结果,将微塑料根据形状不同分为3种类型:碎片状、纤维状、颗粒状(图2)。研究发现,在水体中纤维状的微塑料占主要部分,碎片和颗粒状的微塑料占比较小。秦淮河纤维状的微塑料占比为53%,碎片状的微塑料占比33%,颗粒状的微塑料占比14%;夹江的纤维状微塑料占比73%,碎片状微塑料占比14%,颗粒状微塑料占比13%(图3)。

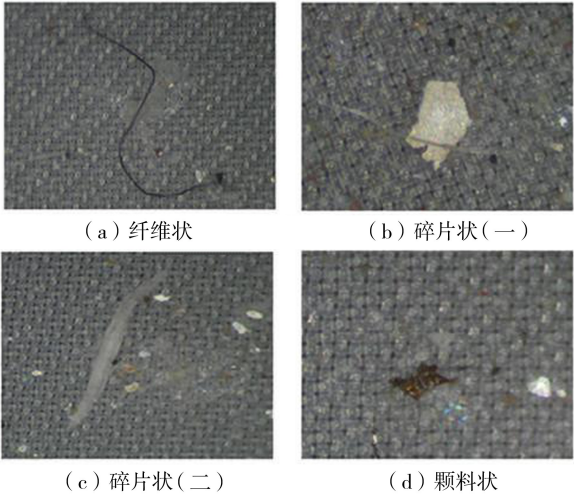


图 2 微塑料形状观测

Fig. 2 Observed microplastics

在体式显微镜下,纤维状微塑料质地柔软,形态多变,大多来自人类的化纤材质衣物,在洗涤过程中,塑料纤维发生断裂并跟随废水进入城市下水道中。纤维更容易被河流夹带并保持悬浮状态,导致在水中的占比高于沉积物中,而当前城市污水处理技术并不能够有效地去除纤维状的微塑料。排放量

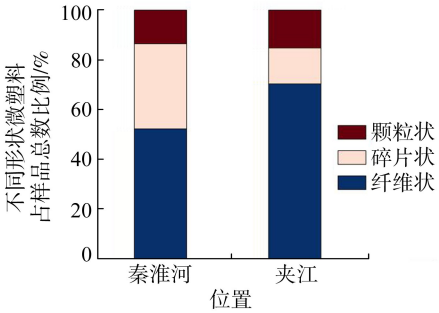


图 3 秦淮河微塑料形状分布

Fig. 3 Distribution of microplastic shapes in Qinhuai River and Jiajiang River

大、难以去除的特点导致纤维状的微塑料成为水体中微塑料的主要类型。

规则的圆球形微塑料多为初生微塑料,被广泛应用于化妆品、磨砂膏等日化产品中;而颗粒状但非规则球形的微塑料可能来源于轮胎等塑料制品的破碎与磨损。本文试验并未观测到该类规则圆球状微塑料,推测其可能在水体输运过程中发生了破碎与裂解。

碎片状微塑料最可能源于大塑料的破碎和裂解,在体视显微镜下多呈现边缘锯齿状。数据显示,秦淮河水样中碎片状微塑料的占比是夹江的3倍。冯杰等^[21]研究指出,在密度和体积相同的情况下,纤维状微塑料具有更大的浮力和更小的沉降速度。

夹江的纤维状微塑料占比高于秦淮河,而碎片状微塑料的占比则相反,在秦淮河中更高。这可能是因为夹江作为长江的分支,水体中的微塑料已历经较长时间的输运;而秦淮河水体中的微塑料刚从城市污水管道进入水体。随着微塑料在水体中输运

时间的增加,纤维状微塑料更容易漂浮于水面,碎片状微塑料则更容易发生沉积。

3.3 微塑料的颜色分布特征

微塑料有多种颜色,本文试验观测到的主要以黑、白、灰、红色为主(图4)。塑料本身为无色或乳白色,生活中五颜六色的塑料都是在制作过程中添加色素染色而成,在水中经过长时间的浸泡后会褪色。相较于透明或灰色的微塑料,色彩鲜艳的微塑料更容易被水体中的滤食动物所误食^[30],然后通过食物链进入人体,对人体健康产生危害。因此研究微塑料的颜色组成也是微塑料污染防治的重要一环。

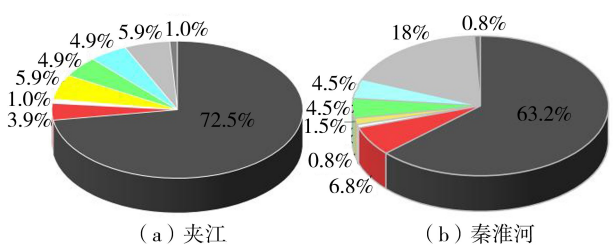


图4 秦淮河、夹江微塑料颜色分布

Fig. 4 Color distribution of microplastics in Qinhuai River and Jiajiang River

3.4 微塑料的季节分布特征

在采样结果中,对于微塑料丰度,秦淮河最高值出现在2023年2月,为1021个/m³;夹江最高值出现在2023年1月,为1087.1个/m³,最高丰度值出现在枯水期。为研究微塑料的季节分布特征,将1年分为春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)和冬季(12—2月)。秦淮河与夹江均为长江支流,夏季为丰水期,冬季为枯水期。秦淮河丰水期平均微塑料丰度为582.5个/m³,枯水期为627.2个/m³;夹江丰水期平均微塑料丰度为536.9个/m³,枯水期为564.5个/m³。

数据显示,丰水期的微塑料丰度低于枯水期,这可能是由于丰水期河水流量增大对流域内的微塑料起到了稀释作用。同时,丰水期的大量降雨会加速陆域微塑料向河流汇集,在一定程度上提升了微塑料的丰度,因此丰水期与枯水期的微塑料丰度差异并不显著。数据表明,微塑料丰度与季节的相关性较弱(图5)。

其他研究中,微塑料在水体中的分布受降水的影响,表现出与本文不同的结果。例如,对长江口及其邻近海域的调查显示,丰水期微塑料丰度显著高于枯水期^[31]。其原因可能在于,长江口的微塑料丰度与入江河流及湖泊的流量呈正相关关系,即丰水期入江流量大,携带的微塑料量大,导致丰水期微塑料丰度较高;枯水期入江流量小,携带的微塑料量

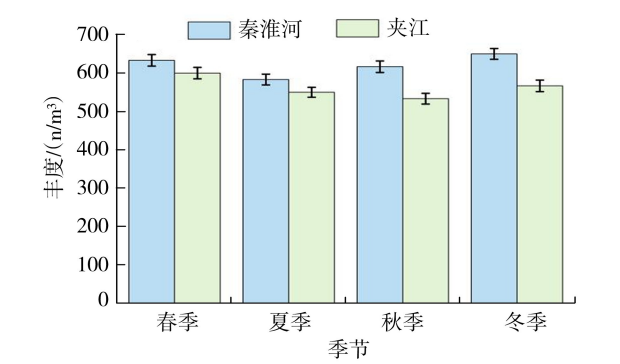


图5 秦淮河、夹江微塑料季节分布

Fig. 5 Seasonal distribution of microplastics in Qinhuai River and Jiajiang River

少,因此微塑料丰度较低。

与长江不同,南京秦淮河和夹江的微塑料丰度受周边居民及工厂排放的废水中塑料的影响更大,而该类排放受季节因素影响较小,1a的排放量总体波动平缓。因此,在污染源相对稳定的情况下,南京秦淮河和夹江呈现出枯水期水量少、微塑料丰度高,丰水期水量多、微塑料丰度低的特征。

3.5 微塑料丰度与环境参数的相关性分析

将秦淮河与夹江两组微塑料丰度与所测得的6项环境参数进行相关性分析,用Pearson积差相关系数描述其相关性,当 $p < 0.05$ 时认为有统计学意义(表2)。

表2 秦淮河、夹江微塑料丰度与环境参数相关系数
Table 2 Correlation coefficient between abundance of microplastics and environmental parameters in Qinhuai River and Jiajiang River

环境参数	秦淮河		夹江	
	相关系数	p 值	相关系数	p 值
溶解氧	0.12	0.671	0.15	0.583
浊度	0.10	0.703	0.17	0.531
电导率	-0.157	0.560	0.34	0.202
pH值	0.06	0.835	0.39	0.135
温度	-0.07	0.790	-0.18	0.509
含沙量	-0.60	0.013	-0.52	0.037

相关系数表示两个变量之间的相关程度,根据计算所得的相关系数绘制相关性热力图,结果如图6所示(绿色越深表示越正相关,红色越深表示越负相关)。

通过相关性分析及显著性检验发现,在两个采样点的多项水质参数中,仅河流含沙量与微塑料丰度呈现较强负相关($p < 0.05$,相关系数为负值且绝对值接近1),具有统计学意义,可进一步开展相关性分析。

分析表明,泥沙浓度与微塑料丰度呈负相关关系,可能的原因是河流含沙量与河水流量及采样前的降水量密切相关。采样前降水量增加会导致河流

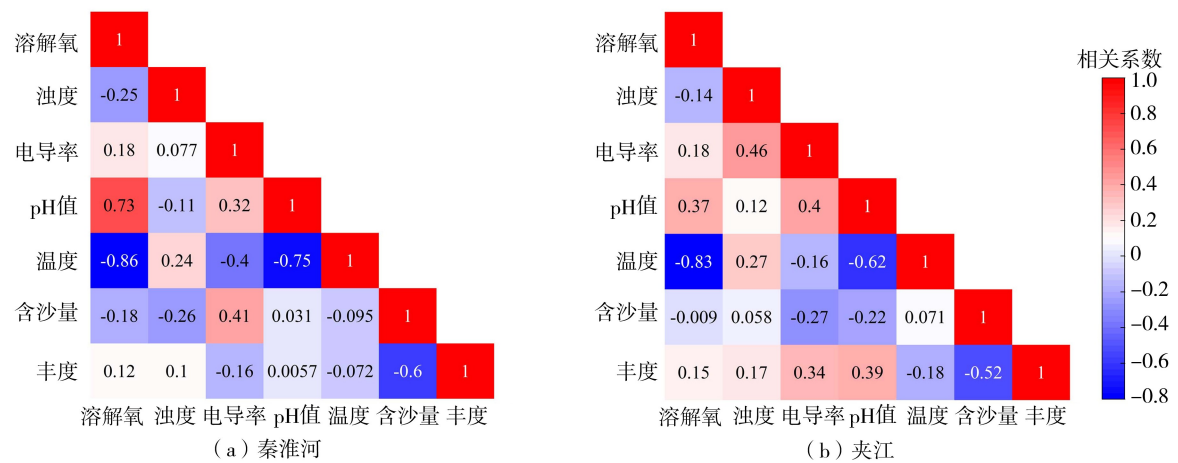


图 6 秦淮河、夹江微塑料丰度与环境参数相关性热力图

Fig. 6 Thermodynamic diagram of correlation between abundance of microplastics and environmental parameters in Qinhuai River and Jiajiang River

流量增大,水体紊动加剧,河床底部泥沙被扰动,进而使河水中的含沙量升高;而河水流量增加会对河流中的微塑料含量产生稀释作用,导致微塑料丰度下降。相反,采样前降水量较小则会使河流流量减少、径流平缓,河水中的含沙量降低,微塑料丰度则相对较高。此外,已有研究指出,微塑料会与有机物相互作用形成絮凝体^[32],而泥沙也会与有机物发生絮凝反应,三者可能存在相互作用。随着泥沙浓度升高,表层微塑料颗粒可能与泥沙共同沉降,从而导致水体中微塑料丰度减少。

3.6 秦淮河、夹江微塑料污染风险评估

使用由 Tomlinson 等^[33]提出的用于河口重金属污染风险评估的污染负荷指数法对秦淮河和夹江微塑料污染进行评估。该方法对两个采样点的污染状况进行综合评估,选择 Everaert 等^[34]利用数学模型估算出的水体表面漂浮微塑料安全丰度(6650 个/m³)作为参考值,该参考值只考虑微塑料暴露的直接影响,不考虑微塑料与水体中其他化学物质相互作用的影响,得出采样点全年的微塑料污染负荷指数,并根据该指数值评定污染程度等级:>2 为重污染,1~2 为中污染,<1 为轻污染。根据对 24 次采样数据的处理,计算得到 2022 年与 2023 年秦淮河全年的微塑料污染负荷指数为 0.293,夹江为 0.270,污染程度均为轻度。

4 结 论

a. 为了更好地了解南京秦淮河与夹江的微塑料丰度与污染程度,于 2022 年 1 月至 2023 年 12 月开展了 24 次微塑料丰度调查,研究了秦淮河与夹江的微塑料时空分布和变化规律,结果显示微塑料丰度与季节变化相关性较小,但两条河流丰水期的微

塑料丰度均小于枯水期,这可能是由于丰水期降水较多,导致河流流量增加,对微塑料含量起到了稀释作用。

b. 2022—2023 年内秦淮河微塑料颗粒平均丰度为(612.3±183.1)个/m³,丰度范围为 333.3~942.1 个/m³;夹江微塑料颗粒平均丰度为(556.2±263.7)个/m³,丰度范围为 201.1~933.3 个/m³。纤维状微塑料是丰度最高的形状类型,微塑料类型没有季节差异,黑色的微塑料占比最大。

c. 使用污染负荷指数法对秦淮河与夹江全年的微塑料污染进行评估,其微塑料污染负荷指数分别为 0.293 和 0.270,均为轻度污染。

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, 2014, 304: 838.
- [2] BROWNE M A, CRUMP P, NIVEN S J, et al. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(21): 9175-9179.
- [3] ANDRADY A L. Microplastics in the marine environment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(8): 1596-1605.
- [4] 王华, 李思琼, 曾一川, 等. 长江流域微塑料生态风险综合评估 [J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 107-116. (WANG Hua, LI Siqiong, ZENG Yichuan, et al. Comprehensive assessment of microplastics ecological risk in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 107-116. (in Chinese)).
- [5] 刘慧婷, 周志文, 葛琦. 微塑料在我国重要水体中的污染现状 [J]. 环境保护与循环经济, 2022, 42(9): 42-47. (LIU Huiting, ZHOU Zhiwen, GE Qi, et al. Microplastic pollution in important water bodies in China [J].

- Environmental Protection and Circular Economy, 2022, 42 (9): 42-47. (in Chinese))
- [6] MIN Rui, MA Kai, ZHANG Hongwei, et al. Distribution and risk assessment of microplastics in Liujiaxia Reservoir on the upper Yellow River[J]. Chemosphere, 2023, 320: 138031.
- [7] LEBRETON L, VAN DER ZWET J, DAMSTEEG J W, et al. River plastic emissions to the world's oceans[J]. Nature Communications, 2017, 8: 15611.
- [8] DOBARADARAN S, KERMANI M, NAZARI S. The occurrence of microplastics in rivers: a review on the sources, impacts, and potential solutions [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27 (26): 27369-27387
- [9] 胡嘉敏, 左剑恶, 李頔, 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 Jiamin, ZUO Jian'e, LI Di, et al. Composition and distribution of microplastics in water and sediments of urban rivers in Beijing [J]. Environmental Science, 2021, 42 (11): 5275-5283. (in Chinese))
- [10] 丁爽, 李卫明, 张续同, 等. 宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算[J]. 环境科学, 2024, 45 (3): 1448-1456. (DING Shuang, LI Weiming, ZHANG Xutong, et al. Assessment of microplastic pollution and annual emission estimation in Dongshan Canal, Yichang [J]. Environmental Science, 2024, 45 (3): 1448-1456. (in Chinese))
- [11] 李昀东. 哈尔滨城市内河中微塑料赋存特征、源解析及环境影响因素[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.
- [12] 潘玉龙, 张崇森. 我国地表水体微塑料的流域分布特征和生态风险[J]. 环境科学, 2025, 46 (5): 2694-2707. (PAN Yulong, ZHANG Chongmiao. Distribution characteristics and ecological risks of microplastics in surface water bodies across river basins in China [J]. Environmental Science, 2025, 46 (5): 2694-2707. (in Chinese))
- [13] 李天翠, 黄小龙, 吴辰熙, 等. 长江流域水体微塑料污染现状及防控措施[J]. 长江科学院院报, 2021, 38 (6): 143-150. (LI Tiancui, HUANG Xiaolong, WU Chenxi, et al. Microplastic pollution in the Yangtze River Basin: status quo and control measures [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021: 38 (6): 143-150. (in Chinese))
- [14] GEYER R, JAMBECK J R, LAW K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. Science Advances, 2017, 3 (7): e1700182.
- [15] COLE M, LINDEQUE P, HALSBAND C, et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62 (12): 2588-2597.
- [16] 孙昊, 陈求稳, 丁珏, 等. 基于 EFDC 模型的太湖微塑料迁移规律及污染概率分布模拟[J]. 水资源保护, 2023, 39 (6): 169-177. (SUN Hao, CHEN Qiuwen, DING Jue, et al. Simulation of microplastic migration regularity and pollution probability distribution in Taihu Lake based on EFDC model [J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (6): 169-177. (in Chinese))
- [17] WRIGHT S L, THOMPSON R C, GALLOWAY T S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review[J]. Environmental Pollution, 2013, 178: 483-492.
- [18] HORTON A A, WALTON A, SPURGEON D J, et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities[J]. Science of the Total Environment, 2017, 586: 127-141.
- [19] 张家铭, 周斌, 陈旸, 等. 南京市九乡河流域栖霞段近四十年沉积序列微塑料赋存特征[J]. 地球与环境, 2024, 52 (2): 221-229. (ZHANG Jiaming, ZHOU Bin, CHEN Yang, et al. Characteristics of microplastic deposition in the last four decades of the Xixia Section of Jiuxiang River Basin, Nanjing [J]. Earth and Environment, 2024, 52 (2): 221-229. (in Chinese))
- [20] ZHAO Shiye, ZHU Lixin, WANG Teng, et al. Suspended microplastics in the surface water of the Yangtze Estuary System, China: first observations on occurrence, distribution[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 86 (1-2): 562-568.
- [21] 冯杰, 尹卓, 许春阳, 等. 基于传输路径的秦皇岛海域微塑料分布特征调查[J]. 海洋环境科学, 2023, 42 (1): 80-88. (FENG Jie, YIN Zhuo, XU Chunyang, et al. Investigation of microplastic distribution characteristics in Qinhuangdao sea area based on transport pathways [J]. Marine Environmental Science, 2023, 42 (1): 80-88. (in Chinese))
- [22] 张海强, 高良敏, 葛娟, 等. 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[J]. 环境科学, 2023, 44 (9): 5036-5045. (ZHANG Haiqiang, GAO Liangmin, GE Juan, et al. Microplastic contamination characteristics and risk assessment in water and sediment of the Anhui Section of the Huai River Basin [J]. Environmental Science, 2023, 44 (9): 5036-5045. (in Chinese))
- [23] 包旭辉, 闫振华, 陆光华. 我国淡水中微塑料的污染现状及生物效应研究[J]. 水资源保护, 2019, 35 (6): 115-123. (BAO Xuhui, YAN Zhenhua, LU Guanghua. Study on pollution status and biological effect of microplastics in fresh water of China [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (6): 115-123. (in Chinese))
- [24] LAHENS L, STRADY E, KIEU-LE T, et al. Macroplastic and microplastic contamination assessment of a tropical river (Saigon River, Vietnam) transversed by a developing megacity [J]. Environmental Pollution, 2018, 236: 661-671.
- [25] MILLER R Z, WATTS A J, WINSLOW B O, et al. Mountains to the sea: river study of plastic and non-plastic

microfiber pollution in the northeast USA [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017, 124(1): 245-251.

[26] VERMAIRE J C, POMEROY C, HERCZEGH S M, et al. Microplastic abundance and distribution in the open water and sediment of the Ottawa River, Canada, and its tributaries[J]. Facets, 2017, 2(1): 301-314.

[27] MCCORMICK A, HOELLEIN T J, MASON S A, et al. Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(20): 11863-11871.

[28] MOORE C J, LATTIN G L, ZELLERS A F. Quantity and type of plastic debris flowing from two urban rivers to coastal waters and beaches of southern California [J]. Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management, 2011, 11(1): 65-73.

[29] LECHNER A, KECKEIS H, LUMESBERGER-LOISL F, et al. The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter out-numbers fish larvae in Europe's second largest river [J]. Environmental Pollution, 2014, 188: 177-181.

[30] CARPENTER E J, ANDERSON S J, HARVEY G R, et al. Polystyrene spherules in coastal waters[J]. Science, 1972, 406(772): 749-750.

[31] 徐沛, 彭谷雨, 朱礼鑫, 等. 长江口微塑料时空分布及风险评估[J]. 中国环境科学, 2019, 39(5): 2071-2077. (XU Pei, PENG Guyu, ZHU Lixin, et al. Spatial-temporal distribution and pollution load of microplastics in the Changjiang Estuary [J]. China Environmental Science, 2019, 39(5): 2071-2077. (in Chinese))

[32] 侯俊, 许晓雅, 程芳, 等. 微塑料与有机污染物的相互作用及环境行为研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 22-28. (HOU Jun, XU Xiaoya, CHENG Fang, et al. Research progress on interaction and environment behavior between microplastics and organic pollutants [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 22-28. (in Chinese))

[33] 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: 566-575.

[34] EVERAERT G, VAN CAUWENBERGHE L, RIJCKE M D, et al. Risk assessment of microplastics in the ocean: modelling approach and first conclusions [J]. Environmental Pollution, 2018, 242: 1930-1938.

(收稿日期: 2024-11-28 编辑: 胡新宇)

(上接第 235 页)

[22] 侯金霄, 黄林显, 胡晓农, 等. 基于 EMD-LSTM 耦合模型的趵突泉岩溶地下水水位预测应用[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(4): 92-98. (HOU Jinxiao, HUANG Linxian, HU Xiaonong, et al. Application of EMD-LSTM coupled model to karst groundwater level prediction in Baotou Spring[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(4): 92-98. (in Chinese))

[23] PAN Mingyang, ZHOU Hainan, CAO Jiayi, et al. Water level prediction model based on GRU and CNN[J]. IEEE Access, 2020, 8: 60090-60100.

[24] 冯鹏宇, 金韬, 沈一选, 等. 基于 CNN-Transformer 的城区地下水位预测[J]. 计算机仿真, 2023, 40(4): 492-498. (FENG Pengyu, JIN Tao, SHEN Yixuan, et al. Prediction of urban groundwater level based on CNN-Transformer[J]. Computer Simulation, 2023, 40(4): 492-498. (in Chinese))

[25] WEI Aihua, LI Xue, YAN Liangdong, et al. Machine learning models combined with wavelet transform and phase space reconstruction for groundwater level forecasting[J]. Computers and Geosciences, 2023, 177: 105386.

[26] 佃松宜, 厉潇滢, 杨丹, 等. 基于融合注意力机制 LSTM 网络的地下水位自适应鲁棒预测[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(1): 54-64. (DIAN Songyi, LI Xiaoying, YANG Dan, et al. Adaptive robust prediction of groundwater level based on fusion attention mechanism LSTM network[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(1): 54-64. (in Chinese))

[27] 任欢, 王旭光. 注意力机制综述[J]. 计算机应用, 2021, 41(增刊1): 1-6. (REN Huan, WANG Xuguang. Review of attention mechanism [J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(Sup1): 1-6. (in Chinese))

[28] 李小根, 段小芳, 付景保, 等. 基于 GIS 的丹江口水库土地利用/覆被动态变化特征分析[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 90-98. (LI Xiaogen, DUAN Xiaofang, FU Jingbao, et al. Analysis of land use and land cover dynamic change characteristics of Danjiangkou Reservoir based on GIS[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2022, 43(3): 90-98. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-11-21 编辑: 胡新宇)