

刘沙沙,邱月,张茜,等.基于激光红外成像的城市河流微塑料表征与来源解析 [J]. 中国环境科学, 2023,43(12):6700~6711.

Liu S S, Qiu Y, Zhang X, et al. Characterization and source analysis of microplastics in urban rivers based on Laser Direct Infrared Imaging [J]. China Environmental Science, 2023,43(12):6700~6711.

基于激光红外成像的城市河流微塑料表征与来源解析

刘沙沙^{*},邱月,张茜,索诚宇,任艺 (北京科技大学能源与环境工程学院,北京 100083)

摘要: 以北京典型城市河流——通惠河为例,基于激光红外成像系统,对微塑料的赋存特征、潜在来源及生态风险进行了系统研究。结果表明,通惠河表层水体中的微塑料丰度为 10~41 个/L,平均丰度为 (21.60 ± 10.5) 个/L;研究共检测出 16 种不同类型的微塑料,其中丰度较高的三类分别为聚酰胺(PA)、聚氯乙烯(PVC)和聚丁二酸丁二醇酯(PBS),其检出率分别为 25.90%、22.20% 和 18.10%;水体中微塑料以粒径 $<200\mu\text{m}$ 的小颗粒为主,其占总颗粒数的 91.20%;在形状方面,通惠河薄膜状微塑料占比最高,颗粒状次之,纤维状占比最低,三者所占比例依次为 67.59%、22.69% 和 9.72%。根据实地调研和微塑料表征结果,推测通惠河微塑料可能来源于岸边生活垃圾的破碎风化、排污管道的老化以及污水处理厂出水中的微塑料残留。风险评估结果表明,通惠河下游水体微塑料潜在生态风险指数处于危险和非常危险等级,且 PVC 微塑料是引起通惠河水生态系统风险加剧的主要塑料类型。因此建议相关部门加强对人为源塑料尤其是 PVC 塑料的源头管控,为城市河流的生态环境安全与保护提供支撑。

关键词: 微塑料; 城市河流; 激光红外成像; 来源; 风险评估

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)12-6700-12

Characterization and source analysis of microplastics in urban rivers based on Laser Direct Infrared Imaging. LIU Sha-sha^{*}, QIU Yue, ZHANG Xi, SUO Cheng-yu, REN Yi (School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China). *China Environmental Science*, 2023,43(12): 6700~6711

Abstract: Taking Tonghui River, a typical urban river in Beijing, as an example, the occurrence characteristics, potential sources and ecological risks of microplastics in urban rivers were systematically studied based on laser infrared imaging system. The results showed that the abundance of microplastics in the surface water of the river ranged from 10 to 41 pieces/L, with a mean value of (21.60 ± 10.5) pieces/L. Additionally, a total of 16 different types of microplastics were detected in our study, among which the three types with high abundance were polyamide (PA), polyvinyl chloride (PVC) and polybutylene succinate (PBS), with the detection rates of 25.90%, 22.20% and 18.10%, respectively. Moreover, fine microplastics with particle size $<200\mu\text{m}$ dominated in the river, which accounted for 91.20% of the total number of particles. In terms of microplastic shape, film accounted for the largest proportion (67.59%), followed by granules (22.69%) and fiber (9.72%). Finally, according to the results of field investigation and microplastic characterization, we proposed that microplastics in the Tonghui River probably originated from the weathering of domestic garbage on the shore, the aging of sewage pipelines, and the residues in the effluent of sewage treatment plants. The results of risk assessment showed that the potential ecological risk index of microplastics in the lower reaches of Tonghui River was at dangerous and very dangerous levels, and PVC microplastics were the main types of plastics that caused the increased risk of the water ecosystem in the river. Thus, it is recommended that the government strengthen the source control of man-made plastics, especially PVC plastics, to provide support for the ecological environment safety and protection of urban rivers.

Key words: microplastics; urban rivers; Laser Direct Infrared Imaging; sources; risk assessment

塑料因其质量轻、防水、耐用且价格便宜等特点,广泛应用于人类社会生产、生活。与此同时,大量塑料废物产生。据统计,有 79% 的塑料垃圾堆积在垃圾填埋场或自然环境中^[1]。此外,基于塑料自身特征,其进入环境后难以快速降解。当前塑料分布已呈现全球化趋势^[2-3]。而随着各类塑料废弃物在环境中的堆积,其在生物地球化学循环中产生的不良影响逐渐受到关注。研究显示,塑料污染已成为海洋生态安全威胁之一^[4-5]。

进入环境中的塑料常会发生老化,形成塑料碎片。2004 年,有学者在英国普利茅斯附近海滩以及河口和潮下沉积物中发现直径约 $20\mu\text{m}$ 、颜色鲜艳的塑料碎片,首次提出微塑料^[6]。至今,学者们常将直径小于 5mm 的塑料碎片或颗粒称为微塑料^[7]。微塑料

收稿日期: 2023-06-05

基金项目: 中央高校基本科研业务费(FRF-TP-20-059A1);国家重点研发计划(2022YFC3201902)

* 责任作者, 讲师, liushasha@ustb.edu.cn

具有尺寸小、比表面积大等特征,其在环境中可快速且远距离传输,易于吸附污染物并随食物链被动物、人类摄入^[2].研究发现,微塑料为水环境质量带来负面影响的同时^[8],在基因、细胞、组织、个体等不同水平影响生物安全^[4],其广泛存在于浮游生物、底栖动物、鱼类、鸟类甚至是包括人类在内的大型哺乳动物体内^[9-11],给生物安全带来严重威胁.总之,微塑料污染形势日益严峻^[12],迫切需要开展有关微塑料表征及其风险评估相关工作.

进入环境中的微塑料经过地表径流、地下径流和空气动力等途径进入水环境中^[13],影响水生生态系统物质循环和能量流动.值得注意的是,与淡水生态系统微塑料相关的研究仍有待深入^[14].不同于开放的海洋环境,相对封闭的淡水生态系统因其流速较慢、不易扩散且受人类活动影响更频繁,其更易于接收并沉积微塑料^[15].研究发现,世界上最大的淡水湖群——北美五大湖、瑞士六个大湖、非洲维多利亚湖、莱茵河等地表水样本中都检测到了较高丰度的微塑料^[15-16].我国的鄱阳湖、太湖、青海湖、骆马湖、洞庭湖、大辽河等湖泊、河流中也存在着不同程度的微塑料污染^[17-20].尽管越来越多学者将重心放在淡水生态系统中微塑料的生物地球化学过程的研究中,但关于城市河流微塑料赋存情况的研究仍较为有限.因此,迫切需要开展城市河流微塑料表征相关工作,以助力于河流生态系统微塑料研究体系的丰富和完善.

激光红外成像技术(Agilent 8700LDIR)以其高能量、自动化等优势逐渐应用于土壤和废水中微塑料丰度、尺寸、类型的分析中^[21-22].激光红外成像系统采用全新的激光红外成像,结合专门开发的微塑料检测工作流程,可实现10μm以上微塑料的全自动检测,简化了工作流程,且极大地提高了检测精度和效率.此外,激光红外成像系统突破了传统的傅里叶变换红外成像技术,其无需傅立叶变换红外光谱仪的干涉仪和分束器等器件,具有极高的稳定性和耐用性,且对实验室环境要求较低,即使对微米级样品也能获得信噪比足够高的红外谱图,进而实现微塑料样品的准确定性.

通惠河是北京市区主要的排水河道,属于典型的再生水河流.同时,其全程贯穿于城镇,受人类活动影响较大,环境风险防范工作面临更大的挑战.因

此,本研究以北京市通惠河为例,利用 LDIR 对水体中微塑料的丰度、类型、粒径及形状进行了分析,初步探讨了流域水体微塑料污染的来源和风险,以期为城市河流中微塑料赋存特征与来源解析提供方法参考.

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

通惠河位于北京市东部,全长 20.30km,总流域面积达 258.26km²,是北京市区内流域面积最大的水系^[24].通惠河几乎无清水补充,基流依赖于汛期降雨和高碑店污水处理厂出水,是典型的再生水河流,且沿岸仍不时有生活污水排入,水质情况堪忧^[23-24].

1.2 水样采集

结合地理位置、周边建筑类型、实地调研情况,沿通惠河每间隔约 2km 布设一个采样点,共选取 11 个涵盖通惠河上中下游的采样点进行水质分析(采样点自下游到上游依次标记为 1~11)(图 1).结合样点水质情况、地理位置和周边环境状况,选取水质相对较差、塑料垃圾聚集的下游 5 个点位进行微塑料的采集与表征(采样点 1~5).从地理位置上该 5 个点位包括了桥梁和高速旁、公园附近、居民区、排污口、垃圾填埋场附近等特殊位置;从塑料垃圾聚集情况来看,采样期间该 5 个点位绿色废弃网罩、废弃轮胎等塑料废弃物聚集较为明显,其可反应人类活动对水环境中微塑料的影响.为减少采样扰动影响,本研究遵循自下而上的采样原则,于 2021 年 12 月,用棕色玻璃广口瓶在通惠河沿岸采集表层水 2.5L.采样时避开树叶、杆状物等杂物,避免剧烈搅动水体,取水瓶口朝向水流流向处取水.盛装水样的容器预留 10% 体积空间,以便于样品摇匀混合.样品采集完成后,尽快运至实验室,并置于 4℃ 冷库中妥善保存.

1.3 水质参数测定及水质评价

取 500mL 水样过玻璃纤维滤膜(GF/F,47mmØ,Whatman),滤液保存于玻璃瓶内置于 4℃ 下保存待测.

参照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[25],测定总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮(NH₃-N)及高锰酸盐指数(COD_{Mn})四项水质参数.TN 的测定使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012)^[26],TN 检

出限为 0.05mg/L ; TP 的测定使用流动注射-钼酸铵分光光度法(HJ-671-2013)^[27], 其检出限为 0.005mg/L ; $\text{NH}_3\text{-N}$ 使用纳氏试剂分光光度法(HJ535-2009)测定^[28], 检出限为 0.025mg/L ; COD_{Mn} 则使用酸式法

(GB11892-89)测定^[29], COD_{Mn} 检出限为 0.5mg/L .

参考《地表水环境质量标准》(GB3838-2002), 结合最差因子判别法^[30], 对通惠河 11 个采样点水质状况进行评价.

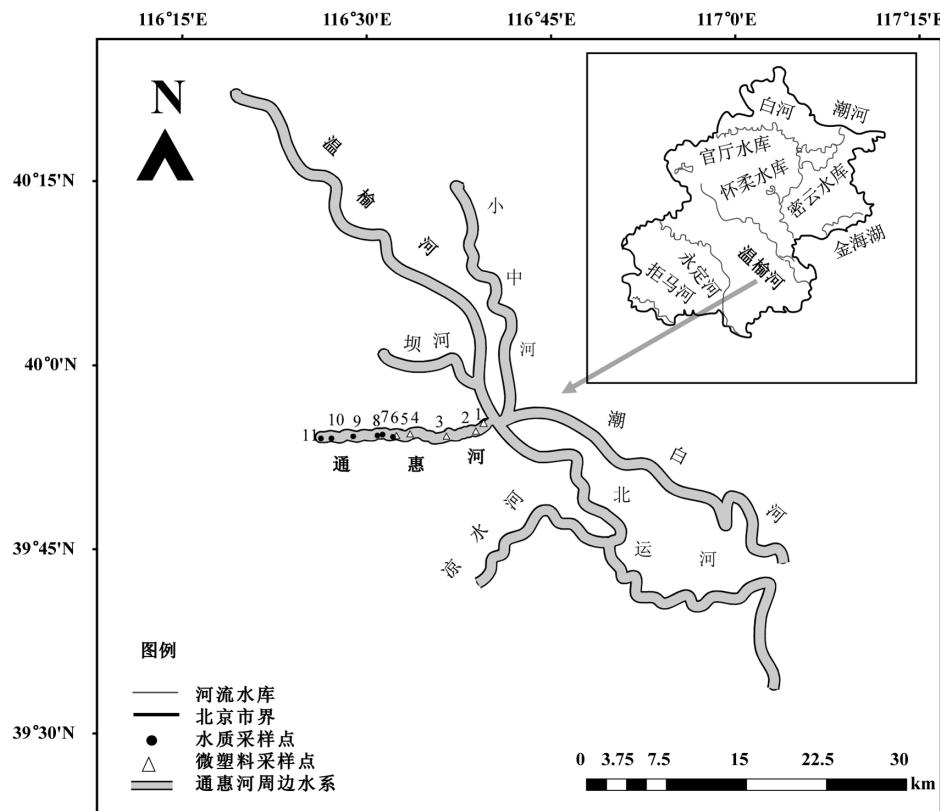


图 1 通惠河表层水体采样点示意
Fig.1 Schematic diagram of sampling sites of surface water in Tonghui River

1.4 微塑料预处理

首先使用去离子水冲洗抽滤装置和滤膜, 然后将 2L 水样充分摇匀, 并过 $10\mu\text{m}$ 孔径不锈钢滤膜, 完成过滤后取滤膜浸没于盛有 50mL 过氧化氢(30%)的烧杯中, 用锡箔纸密封杯口后放入超声清洗器中超声消解 25min , 以使滤膜上物质充分脱落. 超声频率调至最低, 并使温度低于 35°C . 消解 25min 后弃去滤膜, 将烧杯封口静置消解 48h 以上, 直至溶液中无絮状物或肉眼可见沉淀.

消解完成后进行浮选, 将消解完成的溶液再次过 $10\mu\text{m}$ 不锈钢滤膜. 于三角瓶中加入适量甲酸钾后取滤膜浸没其中, 并置于超声清洗器内低频超声. 弃去滤膜, 加满甲酸钾, 并置于通风橱内静置 12h . 静置完成后, 套上浮选装置, 加入适量甲酸钾, 连接抽滤泵将甲酸钾吹入烧杯内, 静置 2h 后重复浮选 $2\sim 3$ 次. 选

择甲酸钾作浮选剂是因其具有密度高、不与聚合物反应等特征, 对高密度聚合物有较好的分离效果, 可实现样品的浓缩.

完成浮选后将浮选液再次过 $10\mu\text{m}$ 不锈钢滤膜, 并取滤膜置于粗玻璃试管内加入色谱纯级别无水乙醇, 超声不低于 30min . 完成超声后将滤膜取出, 对无水乙醇进行氮吹, 使其体积浓缩至 1mL 以下. 将浓缩后的样品转移至 2mL 玻璃小瓶内进行再次氮吹. 完成氮吹后放入 4°C 冰箱内冷藏, 等待上机测定. 若微塑料样品预处理完全, 则最终获得的无水乙醇为澄清溶液. 无水乙醇浑浊则表明预处理可能不彻底, 需重复上述步骤, 尽可能降低杂质对待测样品的干扰.

1.5 微塑料表征及风险评估

采用激光红外成像系统对微塑料进行特征表

征。首先使用农残级乙醇将预处理后的样品定容至0.5mL,然后进行5min低频超声。完成超声后,使用玻璃制微量滴管移取0.2mL左右样品均匀滴至安捷伦标准反射窗片上,并置于无尘环境中静置至乙醇溶液完全挥发后,将反射窗片置于样品底座上,并将底座置于样品台,启动Clarity软件开始测试。在软件中添加微塑料标准测试方法后,选取目标测试区域,软件将用 1800cm^{-1} 处固定波数对选定面积进行快速精准扫描。软件自动选择无颗粒空白区域,采集背景光谱,然后依次采集识别出的所有微颗粒的红外光谱,并在标准库中对光谱进行定性检索,完成区域内微塑料颗粒的识别、定位、图像采集。本研究测试样品为粒径介于50~500μm间的微塑料颗粒,上下限有所浮动,上机测样量为全部测试。

作为一种综合的风险评估方法,潜在生态风险指数法(PERI)^[31]较其它常用风险评估方法——污染符合指数(PLI)^[32]、聚合物风险指数法(PHI)^[33]可以更加全面地评估水环境中的微塑料的风险等级^[34],因此本研究采用PERI对通惠河水体中微塑料风险等级进行了评估。PERI详细计算过程如下所示:

$$C_{ri} = \frac{C_i}{C_r} \quad (1)$$

$$T_{ri} = \frac{P_i}{C_i} S_i \quad (2)$$

$$E_{ri} = T_{ri} \times C_{ri} \quad (3)$$

$$\text{PERI} = \sum_{i=1}^n E_{ri} \quad (4)$$

式中: C_{ri} 表示聚合物*i*的标准参考值,参考前人提到的微塑料生物体无效浓度,本研究以6.65个/L作为微塑料安全浓度标准参考值^[31]。 P_i 表示特定微塑料聚合物*i*的浓度, S_i 表示聚合物危险指数, T_{ri} 表示生态毒性响应因子, E_{ri} 则表示潜在生态风险指数;研究区域微塑料的综合潜在生态风险指数PERI则需将该点位不同样品的综合潜在生态风险指数进行相加得到; n 表示所有样点中聚合物的种类数^[35]。据前人研究显示,基于PERI值可以将微塑料风险划分为5个等级,即低、中等、高、危险、非常危险,其对应PERI值依次为≤150、150~300、300~600、600~1200、>1200^[36]。

1.6 数据处理

筛选LDIR检测报告中匹配度大于0.85且类型为塑料的聚合物,确定各点微塑料丰度,并根据

circularity和solidity初步分析微塑料形状,使用Origin(2018)绘图以实现数据可视化。

2 结果与分析

2.1 水环境质量分析

通惠河沿岸COD_{Mn}浓度范围为(2.72~5.48)mg/L,NH₃-N浓度为(0.26~0.88)mg/L,TP浓度为(0.03~0.12)mg/L,而TN浓度范围为(6.38~12.20)mg/L(图2)。沿河NH₃-N、TP采样点均值浓度均属于达标水体范围,而所有水质采样点TN均值均超标,因此沿河氮污染应密切关注。

COD_{Mn}和TP沿通惠河总体呈下降趋势,但采样点6处的COD_{Mn}、TP值分别为12.48和0.12mg/L,较采样点5和7偏高(图2)。根据实地采样观察推测可能与该点位临近污水处理厂出水口处有关。与COD_{Mn}和TP相比,通惠河的NH₃-N和TN浓度较为波动,但其在采样点8、9、10、11处的值仍表现出一定的下降趋势,NH₃-N浓度依次为0.40,0.37,0.30,0.26mg/L,TN浓度依次为9.04,7.59,7.18,6.38mg/L,表明通惠河上游受NH₃-N和TN污染较中游和下游稍小。11个采样点中,COD_{Mn}浓度超标点位分别为采样点2、3和6。各采样点NH₃-N浓度均达标,即低于1mg/L,且II类水体达标率高达72.7%。TP仅采样点6超过水质类别II,即大于0.1mg/L,从TP指标来看,通惠河各采样点水质良好。而全流域11个采样点TN浓度均超过V类标准。

结合最差因子判别法,选择COD_{Mn}和NH₃-N、TP三项指标对通惠河流域整体水质进行评价。结果显示,采样点6水质较差,属于V类水。实际调研结果显示,该点靠近污水处理厂出水口,表明生活污水和工业废水虽然经过处理,但出水水质仍然不容乐观。此外,靠近通惠河下游的采样点2和采样点3,其水质类别均属于IV类水,属于不达标水体,而靠近上游的采样点9、10、11其水质类别均属于II类水,属于达标水体,表明污染物随着水体的流动可以得到稀释,有利于水质改善。

综上,通惠河中下游水体水质较差,受人类活动影响较大。基于此,并结合采样点周边环境情况,选择下游采样点1~5进行微塑料样品采集,并采用激光红外光谱对微塑料赋存特征进行表征,以此分析水体微塑料潜在来源及生态风险。

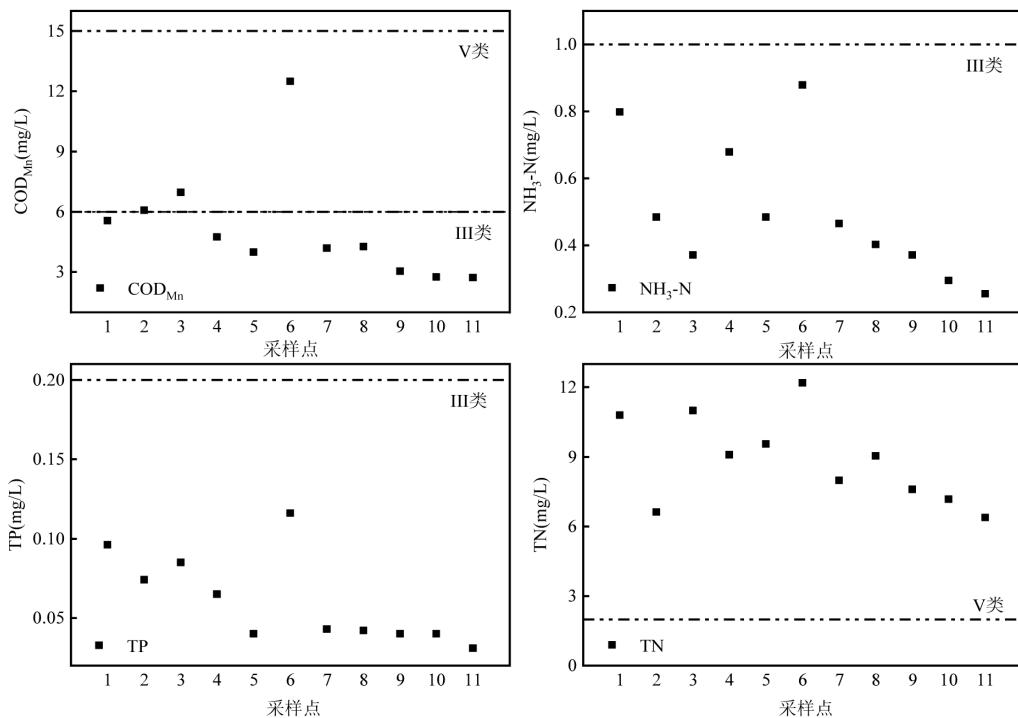


图2 通惠河各采样点水质参数特征
Fig.2 Water quality parameters at sampling points in Tonghui River

2.2 微塑料的丰度与分布特征

Clarity 软件在与标准库比对过程中,将匹配度高于 65% 的结果用于定性分析。有研究显示,当匹配度仅为 65% 时,得到的聚合物鉴定往往和实际存在较大的差异^[37]。因此,为提高准确度,需对检测报告进行进一步筛选。本研究筛选出匹配度

大于 85% 的粒子,并从类型上剔除非塑料材质的微颗粒,如玉米醇溶蛋白(Zein)、硅胶(Silica)、几丁质(Chitin)、棉和尼龙的混合物(COTTON81%+ NYLON19%)等等。本研究最终筛选匹配度最低为 84.52%,最高为 97.33%,提高了检测报告分析数据的可信度。

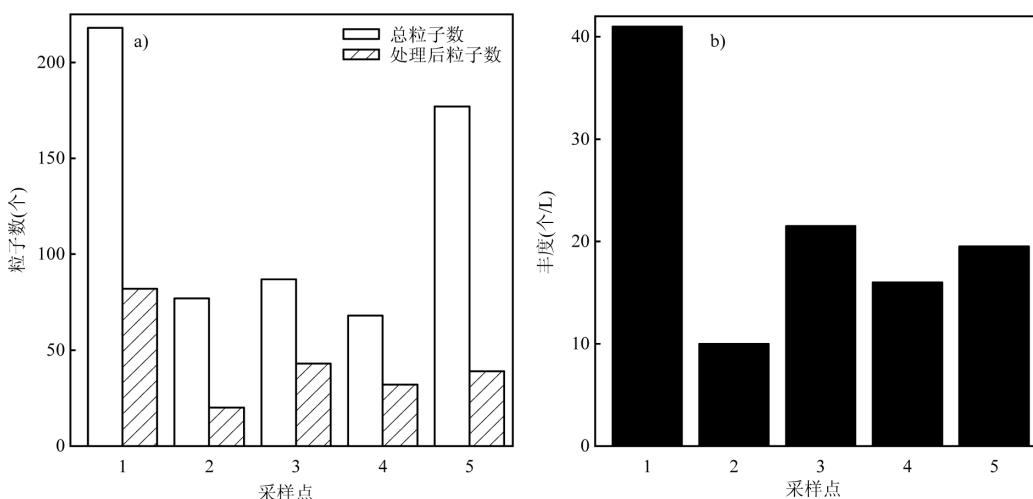


图3 通惠河微颗粒数目及微塑料丰度
Fig.3 The number of microparticles and distribution of microplastics abundance in Tonghui River

结果表明,所选 5 个代表性采样点(采样点 1~5)

中均检测到微塑料的存在。采样点 1、2、3、4、5 检

出微颗粒粒子数依次为 218, 77, 87, 68, 177 个(图 3a), 经匹配度筛选和非塑料材质微颗粒剔除后, 得到采样点 1~5 其表层水水样中的微塑料丰度分别为 41, 10, 21.5, 16, 19.5 个/L (图 3b). 由图 3 可知, 采样点 1 的总体粒子数、处理后粒子数及丰度均较其余 4 个采样点高, 其丰度是其他 4 个采样点丰度的 2~4 倍. 采样点 1 位于通惠河下游即将汇入北运河处, 是通惠河、北运河、温榆河交汇点, 因此推测水域环境复杂是采样点 1 易于积聚污染物的原因之一. 采样点 2 的微塑料丰度最低, 该点位于西海子公园附近, 地处城郊, 人口密度较低, 离居民区较远, 周边多为政府机构, 远离商业区, 因此推测受人类活动影响较小可能是采样点 2 微塑料丰度较其余点位偏低的原因.

采样点 1~5 表层水中微塑料平均丰度为 (21.60 ± 10.5) 个/L, 远高于北运河和怀河流域微塑料平均丰度. 文献显示, 2020 年北运河和怀河微塑料丰度依次为 (1.94 ± 2.01) ~ (8.16 ± 1.78) , (1.55 ± 4.05) ~ (3.38 ± 4.66) 个/L^[38]. 结果表明虽然近几年通惠河河道治理取得成效, 但其表层水体中微塑料污染应引起重视. 此外, 通惠河代表性采样点微塑料的丰度并未表现出明显的空间分布差异(图 3), 这可能是由于随着水体流动, 微塑料积聚的同时也向沉积物沉降, 使得河流沉积物成为表层水体微塑料的汇, 而不表现出明显的空间分布特征.

2.3 微塑料类型组成特征

本研究检测到通到微塑料颗粒总共涉及 16 种不同聚合物类型, 分别为丙烯酸酯(Acrylates)、纤维素(CE)、高密度聚乙烯(HDPE)、聚酰胺(PA)、聚丁二酸丁二醇酯(PBS)、聚碳酸酯(PC)、聚乙烯(PE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚羟基脂肪酸酯(PHA)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚丙烯(PP)、聚碳酸亚丙酯(PPC)、聚苯乙烯(PS)、聚四氟乙烯(PTFE)、聚氨酯(PU)、聚氯乙烯(PVC).

如图 4 所示, 采样点 1 共检测出 14 种微塑料类型, 是微塑料类型最多的点位, 且该点位的 Acrylates、PPC 和 PC 是该点的特有类型. 此外, 采样点 1 的 PVC 检出率最高, 高达 37.8%, PA、PBS、PC 和 PVC 四类共占检出率的 78.0%. 与采样点 1 相比, 其余采样点检出微塑料类型相对较少. 采样点 2、3、5 均检测出 8 种类型微塑料. 分析结果显示, PA 是采样点 2 中主要的塑料类型, 其检出率达 40.0%, 该点

位其余几种类型微塑料检出率则较低. 在采样点 3 中丰度最高的前 4 种微塑料分别是 PA、PBS、PVC、PET, 其对应的检出率为 30.2%、25.6%、20.9%、11.6%. 对于采样点 5, 其 PBS 检出率最高, 达 36.9%, 次之为 PA(25.6%)、PVC(15.4%) 和 PET(10.3%), 其余类型微塑料检出率较低. 采样点 4 共检测出 7 种类型, 其检出类型较其余点位偏少. 值得注意的是, 采样点 4 其 PA 检出率约占所有检出微塑料粒子量的一半(46.9%), 表明采样点 4 受 PA 类型微塑料影响较大. 除了 PA 外, 采样点 4 的 PET(18.8%) 和 PP(12.5%) 两种类型微塑料占比也较高, 应受到一定关注.

整体来看, 通惠河检出的 16 种类型的微塑料中, PA、PVC 和 PBS 是最主要的微塑料类型, 比例均在 20.0% 左右. 其中, PA 的检出率最高, 其次是 PVC 和 PBS, 三者检出率分别为 25.9%、22.2%、18.1%. 而 PHA 和 PMMA 的检出率最低, 其对应检出率值分别为 0.46% 和 0.46%.

2.4 微塑料粒径分布特征

本研究所测得微塑料的粒径范围为 35.6~439.9 μm (图 5). 具体而言, $\leq 100 \mu\text{m}$ 的微塑料颗粒占 67.6%, $\leq 200 \mu\text{m}$ 的微塑料颗粒占总体的 91.2%, 而 $> 300 \mu\text{m}$ 的微塑料颗粒仅占 2.8%. 此外, PHA、HDPE 和 CE 三种类型微塑料均仅在 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的粒径范围内检出, 所有 PPC、PMMA 的粒径均分布在 100~200 μm 区间内. 且所有微塑料类型中, PBS 的粒径分布范围最广, 其次是 PVC 和 PET.

各采样点粒径分布特征与总体粒径分布特征基本一致(图 5). 此外, 采样点 3 的微塑料粒径最为集中, $\leq 100 \mu\text{m}$ 的颗粒占 76.7%, $\leq 200 \mu\text{m}$ 的颗粒高达 97.7%. 而采样点 2 中小尺寸微塑料较少, 该点位 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的微塑料占 55.0%, $\leq 200 \mu\text{m}$ 的占 80.0%. 上述结果表明, 通惠河微塑料表层水体主要受 200 μm 以下的小粒径微塑料影响, 这可能是因为微塑料随着水流运动过程中或者在大气等其他自然环境中, 因受不同形式机械应力作用而发生降解或风化破碎, 从而形成小粒径微塑料^[39]. 值得注意的是, 已有研究表明, 水生生物更容易误食水体中与其食物具有相似大小的微塑料颗粒^[40], 因此通惠河中所测得的小尺寸微塑料可能会对该流域水生生态系统造成不利影响. 因此, 未来应重点关注城市河流小粒径微塑料污染带来的健康效应.

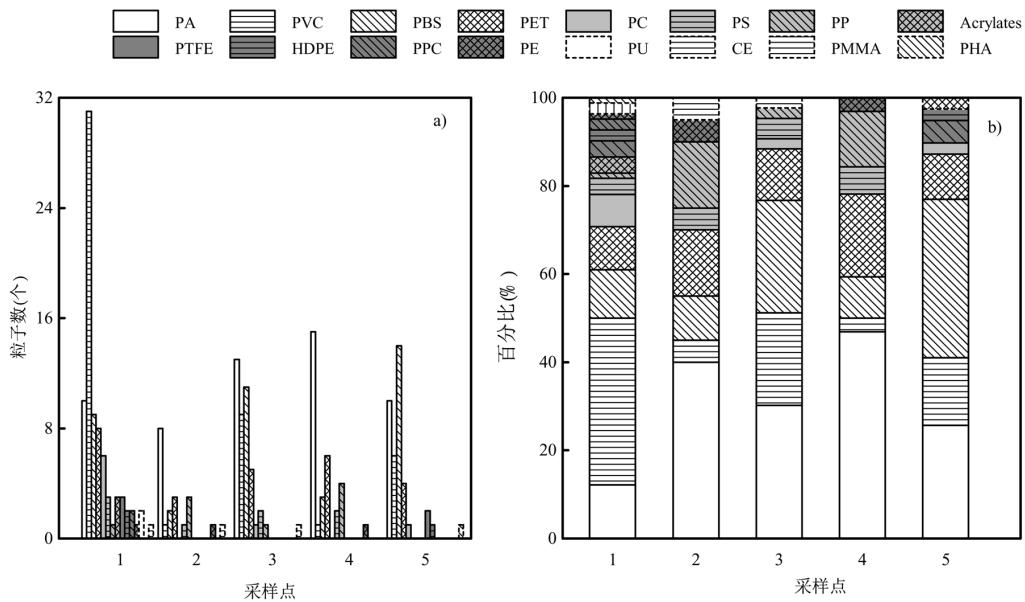


图4 通惠河不同类型微塑料个数及相对丰度

Fig.4 The number of microparticles and relative abundance of different type of microplastics in Tonghui River

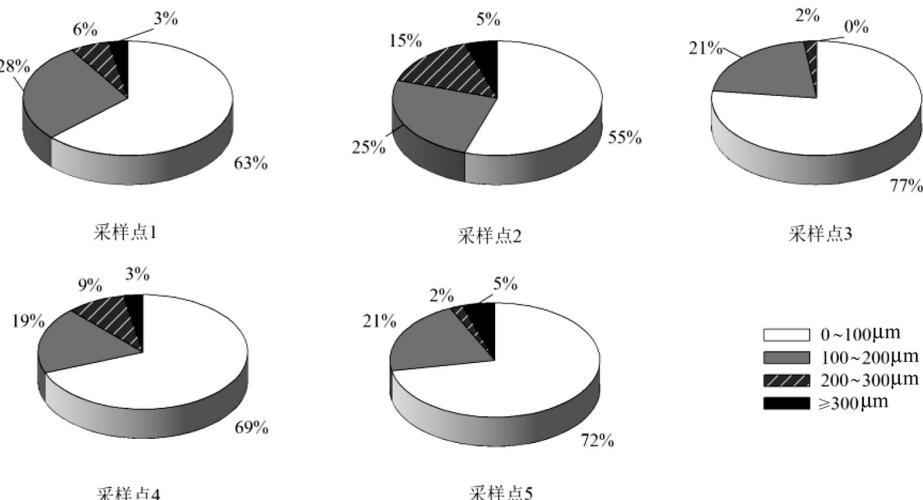


图5 通惠河微塑料粒径分布特征

Fig.5 The size distribution characteristics of microplastics in Tonghui River

2.5 微塑料形状特征

目前,微塑料的形状分为颗粒、碎片、纤维、薄膜和泡沫 5 种类型^[40-41],且有关微塑料形状的判别常采用立体显微镜进行鉴定。虽然 LDIR 的检测报告中包含宽度、高度、圆度和硬度等信息,但只能凭此对微塑料的形状做粗略的判断。研究发现,依据检测报告中圆度和硬度两个指标可初步区分颗粒、纤维和薄膜 3 种形状^[39]。

基于圆度和硬度两项指标,本研究结果表明通惠河微塑料形状以薄膜为主,颗粒次之,纤维最少,三者占比依次为 67.59%、22.69% 和 9.72% (图 6)。此外,

各采样点的微塑料形状特征与总体形状特征基本一致,但稍有区别。具体表现为,采样点 3 中薄膜占比最高(81.40%),纤维含量最低(4.65%)。采样点 1 薄膜占比较采样点 3 稍低,为 75.61%。采样点 2、4、5 的微塑料形状类似,薄膜占比均在 40%~65% 间,颗粒类微塑料占比介于 20%~45% 间。

总之,尽管激光红外成像系统(Agilent 8700LDIR)作为一种新型化学成像系统,可以高效、更加准确地检测出聚合物类型、粒径和丰度,但运用其对微塑料形状特征进行表征仍较有难度,所得结论还需进一步验证,相关研究仍有待深入。

2.6 微塑料风险评估

前期研究主要对6类常见微塑料——PA、PVC、PET、PS、PP、PE进行了危险指数的统计,暂未给出其余类型如PC、PU、PHA等的危险指数得分情况。且本研究中这6类微塑料占比高达72.51%,是通惠河下游主要的微塑料类型。因此本文根据已报道的PA、PVC、PET、PS、PP、PE6类微塑料的危险指数得分,采用潜在生态风险指数法对通惠河进行微塑料风险评估。

评估结果显示,通惠河水体的PERI值范围为

786.24~23358.27,主要归属于风险等级危险和非常危险。其中采样点1、3、5处于非常危险的状态,其对应PERI值依次为23358.27,6822.56,4550.53,采样点2、4的PERI值分别为786.24和815.79,其对应风险等级为危险(表1)。整体看来,通惠河受微塑料污染较为严重,存在的风险也较高,可能与研究水样水质较差且塑料废弃物聚集有关,由此也反应了人类活动来源微塑料进入水体后,可能带来较大的环境影响与生态风险,迫切需要开展塑料垃圾的源头管控。

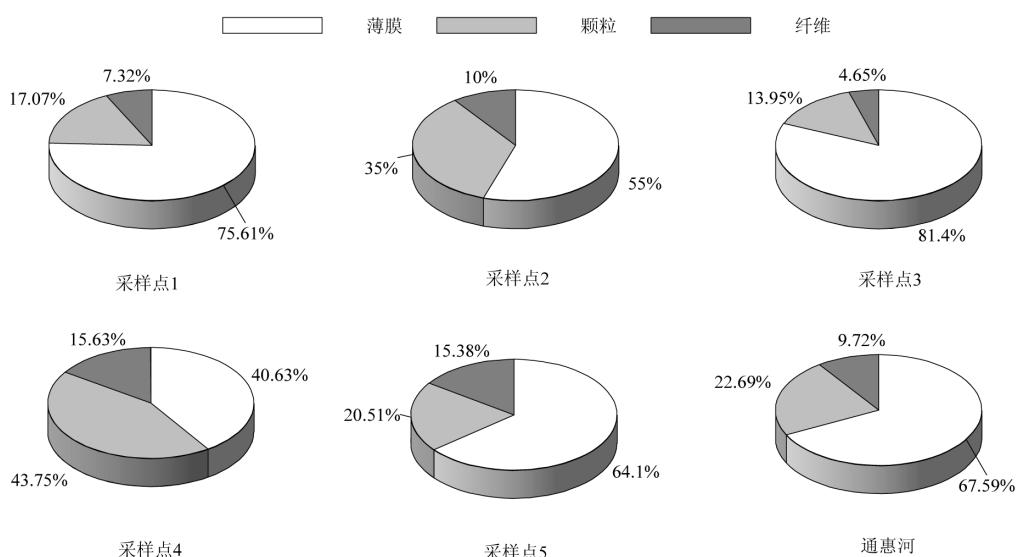


图6 通惠河微塑料形状分布

Fig.6 The shape distribution of microplastics in Tonghui River

表1 通惠河微塑料风险评估

Table 1 Risk assessment of microplastics in Tonghui River

样本	危害指数	采样点1	采样点2	采样点3	采样点4	采样点5
E_{PA}	50	37.59	30.08	48.87	56.39	37.59
E_{PVC}	10001	23310.60	751.95	6767.59	751.95	4511.73
E_{PET}	4	2.41	0.90	1.50	1.80	1.20
E_{PS}	30	6.77	2.26	4.51	4.51	0.00
E_{PP}	1	0.08	0.23	0.08	0.30	0.00
E_{PE}	11	0.83	0.83	0.00	0.83	0.00
PERI		23358.27	786.24	6822.56	815.79	4550.53
风险等级		非常危险	危险	非常危险	危险	非常危险

研究发现PVC类型微塑料对应的 E 值偏高,属于危险和非常危险风险等级,其余类型微塑料的 E 值均小于150,属于低风险等级(表1)。基于此,本研究推测PVC可能是引起通惠河水生态系统微塑料风险加剧的主要微塑料类型。前人的研究结果也显示,汜水河水体中PVC的 E 值均在1200以上,属于非常

危险等级,且个别点位风险指数甚至超过了非常危险等级下限的4倍^[35]。其研究结果与本文检出PVC风险较其余类型微塑料带来的风险偏高的结论基本一致。因此,加强PVC类型塑料制品的源头管控,对降低微塑料对水生态系统的生态风险和影响,维护水体环境安全有着重要意义。

3 讨论

3.1 通惠河常见微塑料来源解析

PBS是生物可降解塑料,其常被用作环保塑料袋、化妆品瓶、一次性医疗用品、缓冲带绿化用网或用膜等等。本研究LDIR检出报告分析结果显示,采样点1、3、5的PBS含量均较高。结合实地调研结果,采样点1和采样点3岸边缓冲带上有大量塑料袋、化妆棉、口罩等塑料废弃物堆积,推断PBS可

能与该类废弃物风化释放有关。前期也有学者指出个人护理品、个人洗漱用品等是其研究流域微塑料的重要来源之一^[42],与本文结果一致。采样点5靠近垃圾处理站,垃圾处理中产生的微塑料颗粒可能会随着大气沉降、风力输送等方式^[42]进入水体中,导致PBS含量稍高,因此生活垃圾可能是其重要的微塑料来源。综上,通惠河沿河PBS微塑料可能主要与河岸垃圾有关。

根据2017年Plastics Europe统计数据显示,PVC在全球塑料生产量中排在第三位,其应用亦非常广泛。据悉,由于PVC独特的物理化学性质,PVC塑料被广泛用于各种工业产品和生活日用品^[43],比如生产食品包装袋、电线电缆、管道和建筑材料等方面。但由于PVC具有一定的毒性和致癌性,近年PVC使用量已大大减少^[44]。尽管PVC使用量呈现一定的下降趋势,但由于大部分PVC塑料被随意丢弃,当前在环境中仍然可以广泛检出不同尺寸的PVC塑料残体^[6-43],这与本研究得出的在北京市典型城市河流——通惠河中仍可以检测到较高含量的PVC的结论一致。通惠河是典型的再生水体,其沿岸设有多个排污口,推测PVC极有可能源于排污管道老化产生,并随污水排放进入通惠河中。此外,园艺软管的制造也离不开PVC。实地调研结果显示,近年来,随着宜居城市的建设,通惠河沿岸新建了许多主题公园,园艺软管使用数量也随之增加,PVC可能在园艺软管的使用过程中因磨损产生微塑料颗粒,并随地表径流或地下水渗滤液进入水体中。

除PBS和PVC外,通惠河水体中PA含量也相对较高。有研究表明PA在食品包装行业、渔业用具等应用均较广泛^[46]。此外,有研究表明污水处理厂的污水和污泥中薄膜状微塑料的主要成分也是PA^[47]。实地观测结果显示,采样点1附近频繁有垂钓等渔业活动。因此,PA可能与流域渔业活动有关。前期学者也指出对刘家峡水库微塑料可能来源于破碎渔网^[34]。此外,PBS、PVC均属于高密度聚合物,其在水中沉降作用明显,而本研究检测到表层水中其丰度仍较高,推测在通惠河周边土壤和沉积物中可能存在更高丰度的PBS、PVC微塑料,有关该两种类型微塑料带来的影响不容小觑。

有学者认为轮胎与地面摩擦后的残留物——合成橡胶(Rubber)^[48]可随雨水冲刷等方式进入水体

中,成为水环境微塑料的主要来源之一^[49]。为反应通惠河水体中微塑料受轮胎摩擦的影响,本研究通过匹配度调控,对激光红外成像系统检出微塑料类型进行了深入解析。探究结果显示,在匹配度为85%的情况下,未测出Rubber的存在;将匹配度调至70%,Rubber检出率仍不超过6.0%,表明轮胎磨损可能不是通惠河微塑料污染的主要来源。本研究所选采样点多位于城郊地区,车流量不大且采样点附近行车道多有车速限制,产生磨损相对较少。此外,轮胎磨损产生的微塑料颗粒较大,密度较高,其产生颗粒易沉降而进入沉积物、土壤等水体微塑料的汇中^[49],也使之难以在表层水中检出。但是本研究未涉及土壤、沉积物中微塑料的检测,也缺少交通密集地带的水体微塑料样品对比,无法提供直接证据,建议后续研究可增设沉积物、土壤样品的采集,为通惠河微塑料的垂向分布提供支撑数据。河流微塑料的来源不仅包括周边塑料垃圾,还与水系干流、支流的微塑料分布密切,总之,河流中微塑料来源涉及面广且体量大^[34],是一个复杂而广泛的环境问题,该问题的解决可能更有赖于从源头上进行塑料制品的管控和塑料垃圾的回收。最后,尽管通惠河沿河水质日益改善,沿河微塑料污染仍较严重,因此建议将微塑料丰度纳入水环境质量评价体系,合理协同水质治理以避免微塑料污染二次引入。

3.2 基于微塑料形状的来源解析

研究表明,薄膜状微塑料主要来源于塑料薄膜等农业活动,纤维状微塑料主要来源于渔业活动和洗涤业务,而颗粒状的微塑料来源复杂,与生活污水中塑料微珠、雨水冲刷道路、塑料制品(如塑料瓶、塑料袋和塑料包装纸等等)破碎降解等有关^[44-46]。

本研究结果表明,通惠河水体中微塑料形状以薄膜状微塑料和颗粒状微塑料占主导,而纤维状微塑料较少见,反应通惠河沿河微塑料来源复杂。实地调研结果显示,两岸鲜有农业用地,但薄膜状微塑料污染较颗粒状和纤维状微塑料污染严重,推测其可能与两岸绿化带上的塑料薄膜风化脱落有关。实地调研记录显示,多处采样点缓冲带上均有观察到绿色塑料防护网。

目前有关运用激光红外成像系统表征微塑料形状的研究仍有待深入,未来更为具体和详细的分析方法和标准,有助于进一步解析和验证有关微塑

料形状表征的结论。

3.3 基于微塑料粒径的来源解析

该研究结果显示,通惠河中小粒径微塑料占主导地位,推测微塑料的来源之一可能是高碑店污水处理厂出水。实地调研结果显示,目前高碑店污水处理厂未设置拦截微塑料的构筑物,现有处理技术仅能去除大粒径的微塑料粒子,微小塑料难以去除,且极易随出水排出^[46]。此外,研究段属于受水库影响较大的河段,采样点上游地区大量水源由高碑店水库经大坝流至通惠河中下游,导致采样点附近的上游地区水流较快,且大坝口快速流动易形成湍流环境,因此推测水体中较大粒径的塑料可能被机械破碎成小粒径微塑料,成为通惠河微塑料的来源之一。前期学者对无定河上游流域水体中微塑料的赋存现状、来源分析及风险评估研究中指出水流冲击会将大碎片塑料破碎形成小碎片颗粒^[42],与本文推测较为一致。

3.4 经济社会活动和水文对微塑料来源的影响

密集的经济社会活动也可能导致微塑料丰度的增加。近年来,通惠河沿岸大力推进城市化进程,高楼林立,人口密度增加,其在一定程度上可能加剧了通惠河中微塑料含量的增加。再者,通惠河水面较窄,地势平坦而水流较缓,水量较少等水文特征使得微塑料容易富集而不易稀释,显示出较高的污染丰度。已有研究表明小型城市河流可能具有更高程度的微塑料污染^[51]。

综上,通惠河中微塑料来源可能主要与污水处理厂出水、生活污水排放以及岸边未经妥善处置的塑料制品等因素相关。

4 结论

4.1 通惠河表层水中微塑料污染丰度较高,平均丰度为(21.6±10.5)个/L;识别到的16种微塑料类型中PA、PVC、PBS三种类型微塑料丰度最高;通惠河沿河微塑料以小粒径为主,其中粒径<200μm的微塑料占比高达91.20%;微塑料形状则主要以薄膜状和颗粒状为主。

4.2 来源解析结果表明,通惠河沿岸生活垃圾的破碎风化、排污管道的老化、污水处理厂出水中的微塑料残留等等可能是导致表层水体微塑料丰度偏高的原因。

4.3 潜在生态风险指数表明,通惠河下游微塑料PERI值处于危险和非常危险等级,整体风险水平偏高,可能与采样点水质较差、塑料废弃物聚集有关。此外,PVC类型微塑料对应的E值偏高,属于危险和非常危险风险等级,其余类型均属于低风险等级,因此PVC可能是引起通惠河水生态系统微塑料风险加剧的主要微塑料类型,建议相关部门加强对人为源塑料,尤其是PVC塑料的源头管控。

参考文献:

- [1] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made [J]. *Science Advances*, 2017,3(7):e1700782.
- [2] Peng L, Fu D, Qi H, et al. Micro- and nano-plastics in marine environment: Source, distribution and threats ——A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,698:134254.
- [3] İlkan Ö, Sedat G. Investigation on the microfiber release under controlled washings from the knitted fabrics produced by recycled and virgin polyester yarns [J]. *The Journal of The Textile Institute*, 2021, 112(2):264–272.
- [4] 周倩,章海波,李远,等.海岸环境中微塑料污染及其生态效应研究进展 [J]. *科学通报*, 2015,60(33):3210–3220.
Zhou Q, Zhang H B, Li Y, et al. Progress on microplastics pollution and its ecological effects in the coastal environment [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015,60(33):3210–3220.
- [5] Chris W, Erik V S, Denise H B. Threat of plastic pollution to seabirds is global, pervasive, and increasing [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015,112(38):11899–11904.
- [6] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at Sea: Where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004,304(5672):838–838.
- [7] 郝若男,史小红,刘禹,等.乌梁素海水体微塑料空间分布规律及影响因素 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(7):3316–3324.
Hao R, Shi X, Liu Y, et al. Spatial distribution and influencing factors of microplastics in water of Ulansuhai [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(7):3316–3324.
- [8] 刘治君,杨凌肖,王琼,等.微塑料在陆地水环境中的迁移转化与环境效应 [J]. *环境科学与技术*, 2018,41(4):59–65.
Liu Z J, Yang L X, Wang Q, et al. Migration and transformation of microplastics in terrestrial waters and effects on eco-environment [J]. *Environmental Science and Technology*, 2018,41(4):59–65.
- [9] 骆永明,施华宏,涂晨,等.环境中微塑料研究进展与展望 [J]. *科学通报*, 2021,66(13):1547–1562.
Luo Y M, Shi H H, Tu C, et al. Research progress and prospects of microplastics in the environment [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021,66(13):1547–1562.
- [10] Leslie H A, van Velzen M J M, Brandsma S H, et al. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood [J]. *Environment international*, 2022,163:107199.
- [11] Jenner L C, Rotchell J M, Bennett R T, et al. Detection of microplastics in human lung tissue using μFTIR spectroscopy [J].

- Science of the Total Environment, 2022,831:154907.
- [12] 陈 瑛,张 宴,苏良湖,等.南京城市污水处理厂中微塑料的赋存特征 [J]. 中国环境科学, 2020,40(9):3835–3841.
Chen Y, Zhang Y, Suliang L, et al. Occurrence characteristics of microplastics in Nanjing urban wastewater treatment plant [J]. China Environmental Science, 2020,40(9):3835–3841.
- [13] 陈兴兴,刘 敏,陈 澄.淡水环境中微塑料污染研究进展 [J]. 化工进展, 2020,39(8):3333–3343.
Chen X X, Liu M, Chen Y. Microplastics pollution in freshwater environment [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020,39(8):3333–3343.
- [14] Li J, Liu H, Chen J P. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection [J]. Water Research, 2018,137:362–374.
- [15] Wang Y, Zhou B, Chen H, et al. Distribution, biological effects and biofilms of microplastics in freshwater systems—a review [J]. Chemosphere, 2022:134370.
- [16] Egessa R, Nankabirwa A, Basooma R, et al. Occurrence, distribution and size relationships of plastic debris along shores and sediment of northern Lake Victoria [J]. Environmental Pollution, 2020,257:113442.
- [17] 余厚平,廖远鑫,简敏菲,等.鄱阳湖五河流域入湖口沉积物中微塑料的赋存特征 [J]. 环境化学, 2019,38(8):1842–1849.
Yu H P, Liao Y X, Jian M F, et al. Occurrence of microplastics in the sediments of the five rivers estuaries in Poyang Lake Basin [J]. Environmental Chemistry, 2019,38(8):1842–1849.
- [18] Xiong X, Zhang K, Chen X, et al. Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake—Qinghai Lake [J]. Environmental pollution, 2018,235:899–906.
- [19] Wang W, Yuan W, Chen Y, et al. Microplastics in surface waters of Dongting Lake and Hong Lake, China [J]. Science of the Total Environment, 2018,633:539–545.
- [20] 韩丽花,李巧玲,徐 笠,等.大辽河沉积物中微塑料的污染特征 [J]. 中国环境科学, 2020,40(4):1649–1658.
Han L, Li Q, Xu L, et al. Pollution characteristics of microplastics in sediments of the Daliao River [J]. China environmental science, 2020, 40(4):1649–1658.
- [21] 曹 炯,甄 育,史宸宁,等.海盐中微塑料的研究进展 [J]. 自然杂志, 2021,43(4):259–266.
Cao J, Zhen Y, Shi C N, et al. Research advances in microplastics in sea salt [J]. Chinese Journal of Nature, 2021,43(4):259–266.
- [22] Scircle A, Cizdziel J V, Tisinger L, et al. Occurrence of Microplastic Pollution at Oyster Reefs and Other Coastal Sites in the Mississippi Sound, USA: Impacts of Freshwater Inflows from Flooding [J]. Toxics, 2020,8(2):35.
- [23] 韩金龙,杨兰琴,王培京,等.北京通惠河底泥重金属风险评价及溯源 [J]. 人民黄河, 2022,44(4):107–111.
Han J L, Yang L Q, Wang P J, et al. Risk assessment and tracing of heavy metals in the sediment of the Tonghui River in Beijing [J]. Yellow River, 2022,44(4):107–111.
- [24] 张 亭.通惠河水环境综合治理工程技术探讨 [J]. 中国水利, 2016,(22):33–34.
Zhang T. Discussion on the Comprehensive Management Engineering Technology of the Tonghui River Water Environment [J]. China Water Resources, 2016,(22):33–34.
- [25] 国家环境保护总局.水和废水分析监测方法(第四版) [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002:105–271.
State Environmental Protection Administration. Water and Wastewater Analysis and Monitoring Methods (Fourth Edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:105–271.
- [26] HJ 636—2012 水质-总氮的测定-碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: [S].
HJ 636—2012 Water quality-Determination of total nitrogen-Alkaline potassium persulfate digestion UV spectrophotometric method [S].
- [27] HJ 671—2013 水质-总磷的测定-流动注射-钼酸铵分光光度法 [S].
HJ 671—2013 Water quality-Determination of total phosphorus-Flow injection Analysis (FIA) and Ammonium molybdate spectrophotometry [S].
- [28] HJ 535—2009 水质-氨氮的测定-纳式试剂分光光度法 [S].
HJ 535—2009 Water quality-Determination of ammonia nitrogen-Nessler's reagent spectrophotometry [S].
- [29] GB 11892—89 水质-高锰酸盐指数的测定 [S].
GB 11892—89 Water quality-Determination of permanganate index [S].
- [30] 吴岳玲,李世龙,邱小琼,等.清水河流域水质综合分析与评价 [J]. 环境监测管理与技术, 2021,33(2):40–45.
Wu Y L, Li S L, Qiu X C, et al. Analysis and Assessment of Water Quality in Qingshuihe River Basin [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2021,33(2):40–45.
- [31] Everaert G, Cauwenberghes L V, Rijcke M D, et al. Risk assessment of microplastics in the ocean: Modelling approach and first conclusions [J]. Environmental Pollution, 2018,242(Pt B):1930–1938.
- [32] Lithner D, Larsson Å, Dave G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition [J]. Science of the Total Environment, 2011,409(18): 3309–3324.
- [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(1–4): 566–575.
- [34] 周添红,张佳倩,闵 茜,等.刘家峡水库微塑料的赋存特征及其风险评估 [J]. 中国环境科学, 2023,43(11):6007–6015.
Zhou T, Zhang J, Min R, et al. Occurrence characteristics and risk assessment of microplastics in surface water of Liujiaxia Reservoir [J]. China Environmental Science. 2023,43(11):6007–6015.
- [35] 白蒙雨,赵世烨,彭谷雨,等.城市污水处理过程中微塑料赋存特征 [J]. 中国环境科学, 2018,38(5):1734–1743.
Bai M Y, Zhao S Y, Peng G Y, et al. Occurrence, characteristics of microplastic during urban sewage treatment process [J]. China Environmental Science, 2018,38(5):1734–1743.
- [36] Kai Y, Dongxu W, Hongjing Z, et al. Microplastics pollution and risk assessment in water bodies of two nature reserves in Jilin Province: Correlation analysis with the degree of human activity [J]. The Science of the total environment, 2021,799:149390.
- [37] Adrián L-R, Jose A, Verónica F-G, et al. A reliable method for the isolation and characterization of microplastics in fish gastrointestinal

- tracts using an infrared tunable quantum cascade laser system [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022,178:113591.
- [38] 胡嘉敏,左剑恶,李 頤,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 river water and sediment of urban rivers in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2021,42(11):5275–5283.
- [39] 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.
- [40] Yuan W, Liu X, Wang W, 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.
- [41] Fahrenfeld N L, Arbuckle-Keil G, Beni N N, et al. Source tracking microplastics in the freshwater environment [J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2018,112:248–254.
- [42] 王昱丹,桂维振,邵天杰,等.无定河上游流域水体微塑料污染现状与分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(10):5583–5590.
Wang Y, Gui W, Shao T, et al. Current status, source analysis and risk assessment of microplastics in water bodies of the upper Wuding River Basin [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(10):5583–5590.
- [43] 顾馨悦,徐修媛,咸泽禹,等.老化聚氯乙烯微塑料与镉对小麦的联合毒性 [J]. *环境化学*, 2021,40(9):2633–2639.
Gu X, Xu X, Xian Z, et al. Joint toxicity of aged polyvinyl chloride microplastics and cadmium to the wheat plant [J]. *Environmental Chemistry*, 2021,40(9):2633–2639.
- [44] Luyao D, Zeyu W, Tianjiao G, et al. Pollution characteristics and source analysis of microplastics in the Qiantang River in southeastern China [J]. *Chemosphere*, 2022,293:133576.
- [45] A B M, S G T, C T R. Spatial patterns of plastic debris along Estuarine shorelines [J]. *Environmental science & technology*, 2010,44(9):3404–3409.
- [46] Yan M, Nie H, Xu K, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in the Pearl River along Guangzhou city and Pearl River estuary, China [J]. *Chemosphere*, 2019,217:879–886.
- [47] Li X, Chen L, Mei Q, et al. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China [J]. *Water Research*, 2018,142:75–85.
- [48] Kole P J, Löhr A J, Bellegem F G A J V, et al. Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017,14(10):1265.
- [49] Wagner S, Hüffer T, Klöckner P, et al. Tire wear particles in the aquatic environment—a review on generation, analysis, occurrence, fate and effects [J]. *Water Research*, 2018,139:83–100.
- [50] Kai Z, Xiong X, Hongjuan H, et al. Occurrence and Characteristics of Microplastic Pollution in Xiangxi Bay of Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017,51(7):3794–3801.
- [51] Luo W, Su L, Craig N J, et al. Comparison of microplastic pollution in different water bodies from urban creeks to coastal waters [J]. *Environmental Pollution*, 2018,246:174–182.

作者简介: 刘沙沙(1988-),女,山东菏泽人,讲师,博士,主要从事天然与人为产生的有机质环境行为研究.发表论文 50 余篇.liushasha@ustb.edu.cn.