

南淝河中微塑料的分布特征及来源

汪新亮, 李珊珊, 王宁, 李玉成, 程桦

(安徽大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: [目的] 研究流经城市河流中微塑料的污染情况, 探索水体微塑料来源, 旨在为微塑料污染防控积累基础资料, 并为控制和治理提供科学依据。[方法] 于2019年3月份采集安徽省合肥市南淝河水和沉积物样, 通过密度浮选、体式显微镜与傅里叶红外光谱仪等研究了微塑料的分布特征及其来源规律。[结果] 南淝河水和沉积物样品中普遍存在发泡、纤维、颗粒和碎片4类的微塑料颗粒, 丰度分布规律基本一致, 均集中在河流中游、人口密集段, 表明河流中微塑料残留受人为影响较大。在水与沉积物中, 微塑料粒径分布都表现出随着微塑料粒径增大, 含量随之减少的规律; 纤维类微塑料占比最大, 泡沫类微塑料占比最少, 表明其主要来源于人们的日常活动与污水处理厂的排放。按颜色分, 彩色与透明比例大, 黑色与白色占比较少。水样中碎片类高于颗粒类, 沉积物中相反。傅里叶红外光谱仪分析表明, 颗粒类和纤维类微塑料为聚乙烯, 碎片类为聚丙烯, 发泡类为聚苯乙烯。[结论] 微塑料普遍存在河流水体与沉积物中, 污染状况处于一个较高水平, 主要来源于人们的日常活动与污水处理厂的排放。

关键词: 微塑料; 南淝河; 密度浮选; 合肥市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)05-0201-08

中图分类号: X52

文献参数: 汪新亮, 李珊珊, 王宁, 等. 南淝河中微塑料的分布特征及来源[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 201-208. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.030; Wang Xinliang, Li Shanshan, Wang Ning, et al. Distribution characteristics and sources of microplastics in Nanfei River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 201-208.

Distribution Characteristics and Sources of Microplastics in Nanfei River

Wang Xinliang, Li Shanshan, Wang Ning, Li Yucheng, Cheng Hua

(School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: [Objective] The distribution and sources of microplastic pollution in the Nanfei River as it flows through cities were studied in order to not only accumulate basic data for microplastic pollution prevention, but also provide a scientific basis for the control and treatment of microplastics. [Methods] The water and sediment samples from the Nanfei River, located in Hefei City, Anhui Province, were collected during March 2019, and the distribution and sources of microplastics in these samples were studied by density flotation, stereomicroscope identification, and Fourier infrared spectroscopy. [Results] Four types of microplastic particles (foams, fibers, particles, and fragments) were common in the water and sediment samples from the Nanfei River. The abundance distribution was basically similar for all types of microplastics, with all types more concentrated in the densely populated middle reaches of the river, indicating that microplastic pollution in the river was greatly affected by human activities. The particle size distribution of microplastics in the water and sediment samples showed that the abundance of microplastics decreased as the particle size increased. Fiber microplastics accounted for the largest proportion of microplastics observed, and foam microplastics accounted for the least, indicating that the microplastics were mainly derived from people's daily domestic activities and sewage treatment plant discharges. Regarding the color of the microplastics, the

收稿日期: 2020-05-30

修回日期: 2020-07-15

资助项目: 国家科技重大专项课题项目“水源涵养和生态保育清洁小流域技术综合集成应用推广”(2017ZX07603-002); 安徽大学博士启动基金(12333190121)。

第一作者: 汪新亮(1993—), 男(汉族), 安徽省宣城市人, 硕士研究生, 主研究方向为水污染防治。Email: 773742956@qq.com。

通讯作者: 王宁(1971—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 博士, 副教授, 主要从事环境化学研究。Email: ningwang0001@163.com。

largest proportion of microplastics were colored or transparent, whereas black and white microplastics accounted for less. In contrast to sediments, the abundance of microplastic fragments was higher than that of microplastic particles in the water samples. The results of the Fourier infrared spectrometry showed that the particle and fiber microplastics were polyethylene, the fragments were polypropylene, and the foam microplastics were polystyrene. [Conclusion] Microplastics were widespread in river water and sediments at high levels, and were mainly derived from people’s daily activities and discharges from sewage treatment plants.

Keywords: microplastics; Nanfei River; density flotation; Hefei City

随着工业的发展,塑料被广泛应用于日常生活的各个领域。由于塑料废弃物的不合理处置和难降解性,大量的塑料垃圾进入环境并造成了严重的污染^[1]。环境中的塑料废弃物在长期的物理、化学和生物等过程中,缓慢破碎及降解成了直径小于 5 mm 的微塑料颗粒。这些微塑料存在于地表水、沉积物、土壤及微生物中^[2]。由于其难降解,直径小,比表面积大的特点,微塑料会吸附环境中难降解有机物、重金属等污染物,形成一个个污染球体,并在环境中迁移,通过食物链富集,对生态环境及人类健康造成巨大的威胁^[3]。因此,环境中的微塑料作为一种新型污染物受到了高度关注。

中国目前对于微塑料的研究大多集中在海洋区域,大陆近海^[4-8]及香港^[9-11]、台湾地区^[12-13]都进行了微塑料的调查,取得较为全面的数据。罗雅丹等^[14]研究了青岛市近岸 4 个典型海水浴场中微塑料丰度分布,发现海水和沉积物中都有大量的微塑料,海水中有 8 种塑料类型,沉积物中有 6 种,源解析表明其主要来源于包装业、纺织业和旅游业。内陆水域的微塑料污染情况也受到了一些关注。Zhang 等^[15]对西藏北部四大湖的湖岸沉积物中微塑料进行分析,发现在人类活动很少的偏远地区也存在着大量的微塑料,形态特征显示其主要来源于日常使用塑料制品的分解。Gong 等^[16]研究了三峡库区地表水中微塑料的赋存和分布规律,发现微塑料由聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS)制成,并且在长江干流中距离三峡大坝的越近,丰度越大。鉴于流经城市的河流中微塑料分布和贡献状况研究严重缺乏,其中微塑料的来源、分布和迁移所起的作用仍不明确。因此,本文试图通过合肥市内河——南淝河的微塑料的分布

特征及其来源研究,为微塑料污染防控积累基础资料,并为控制和治理提供科学依据。

1 研究区概况

南淝河系巢湖的主要入湖河流之一,也是巢湖污染的重要输入河流。该河流发源于大潜山南麓将军岭,主河道全长约为 70 km,流域面积为 1 640 km²。南淝河流经董铺水库从合肥市主城区后汇入巢湖。南淝河为合肥市主要纳污河流与航运河道,其污染对于合肥市的可持续发展有着重要的意义,日益严重的污染对于沿河区域的经济与环境的可持续发展产生较为严重的影响,弄清该河流微塑料污染情况以便为微塑料污染防控积累基础资料,并为控制和治理提供科学依据。本文研究区域为董铺水库到汇入巢湖河段,该区域流经地段土地利用多样,上游主要以林草植被覆盖为主,中游主要为合肥市主城区与工业园区,人口密度高,下游以农田为主。

2 材料与方法

2.1 样品采集

2019 年 3 月,从南淝河董铺水库出水口到南淝河入巢湖口设置 11 个采样点位(具体坐标见表 1),采集南淝河水样及沉积物样。采样点基本均匀分布,兼顾污水排放口及支流汇入口。

每点用水样采集桶采集 20 L 表层水样品,经 32 μm 的不锈钢滤网过滤^[17],用超纯水将钢筛上的截留物冲进玻璃瓶中保存。每样进行 3 个平行试验。每点于河滩选取 3 个 50×50 cm 的正方形,不锈钢铲采集表层 5 cm 内沉积物^[15]。将 3 个样混合装入样品袋中,室内 50 ℃烘干。

表 1 采样点具体坐标点位

| 位置 | 采样点 | | | | | | | | | | |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 经度 | 117. 21 | 117. 22 | 117. 25 | 117. 29 | 117. 29 | 117. 31 | 117. 33 | 117. 37 | 117. 4 | 117. 42 | 117. 39 |
| 纬度 | 31. 88 | 31. 88 | 31. 87 | 31. 87 | 31. 86 | 31. 84 | 31. 84 | 31. 81 | 31. 79 | 31. 76 | 31. 71 |

2.2 水样及沉积物中微塑料提取

将装有微塑料水样的玻璃瓶剧烈震荡 2~3 min,

真空泵抽滤水样,滤膜为直径 50 mm,孔径 5. 0 μm 的混合纤维素滤膜(下文所用滤膜相同),纯水冲洗玻

璃瓶 3 次,重复上述抽滤过程。抽滤后的滤膜放入烧杯中,并加入 $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HNO}_3 (1:3)^{[18]}$ 的混合溶液进行消解,消解完全后再进行抽滤,将滤膜放入培养皿中,低温烘干,以备观察。

沉积物中微塑料采用饱和氯化钠密度浮选法来提取^[19],将装有 200 g 干重的沉积物样烧杯($n=3$)置于 40 ℃ 的恒温水浴锅中,加入饱和氯化钠溶液(40 ℃, 1.36 g/cm³),玻棒搅拌 1~2 min,锡纸封口后静置 12 h,用孔径为 45 μm,直径为 50 mm 的混合纤维素滤膜过滤上清液,重复上述悬浮步骤 3 次。抽滤后的滤膜放入烧杯中,并加入 $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HNO}_3 (1:3)^{[18]}$ 的混合溶液进行消解,消解完全后再进行抽滤,将滤膜放入培养皿中,低温烘干备观。

2.3 微塑料定量定性分析

将抽滤后的滤膜放入体式显微镜(Leica M165 FC,德国)下观察,对微塑料颗粒拍照计数,统计微塑料颜色与形状并且挑出微塑料。选典型微塑料用红外光谱仪(Vertex 80+Hyperion 2000)进行成分鉴定,Nano Measurer 1.2 测量粒径。水样中微塑料颗粒的统计单位为个/m³,沉积物为个/kg。

2.4 实验室质控

为保证试验数据质量,避免样品污染,试验人员全程穿戴棉质试验服以及丁晴手套;所用器具用超纯水冲洗 3 遍并烘干;锡箔纸遮盖敞口容器;保持工作台整洁干净。

采用加标回收法保证试验方法有效性:测定时向沉积物样中标准加入 50 个自制微塑料颗粒,设有 3 个平行,同步试验,测得微塑料颗粒回收率为 95.6%。表明该试验过程控制很好,试验数据可靠,监测结果用于后期统计分析。

3 结果与分析

3.1 南淝河中微塑料的丰度

在南淝河水样与沉积物中所观察到的微塑料丰度分布如图 1 所示。水样中微塑料的丰度为 833.3~4 200 个/m³,平均丰度为 2 012.1 个/m³。其中 4 号点位丰度最高,为 4 200 个/m³。3 号点位微塑料丰度最小,为 833.3 个/m³。由图 1 可知,水样中微塑料集中在南淝河中游段。

4 号点位处在板桥河汇水口,附近为居民集中区,受人为影响严重。板桥河流域存在北城与蔡田铺两个污水处理厂,并且板桥河周边人口密集,受人为影响严重,有可能微塑料的激增与板桥河的输入有关。但相对于 9,10 号点位分别处于二十埠河和店埠河汇水口处,这两点微塑料丰度较低,可能是因为这两个点位处于农业种植区,附近有一大圩生态农业旅游景区,污染较少,并且采样时间为 3 月份,农耕活动少,污染物排放也会减少。二十埠河与店埠河流域同样存在污水处理厂,由于该流域的污水处理厂尾水排放量较少,从而微塑料的排放也较少。南淝河作为合肥市主要的纳污河流,在中游段存在污水排放,比如王小郢污水处理厂排放口在 7 号点位上游附近,7 号点位的微塑料丰度有明显的升高迹象,这说明微塑料丰度有可能受污水处理厂排放的影响。并且中游段经过市中心,人口密集,可能受人为活动的影响。南淝河上游与下游,微塑料丰度相对较少,但最下游 11 号点位丰度较高,是因为该点处的微塑料基本为纤维类,该微塑料质量较轻,易受水流影响,被带入表层水,再从上游通过水流作用集中在了河口附近,从而使得该点表层水微塑料丰度增高。

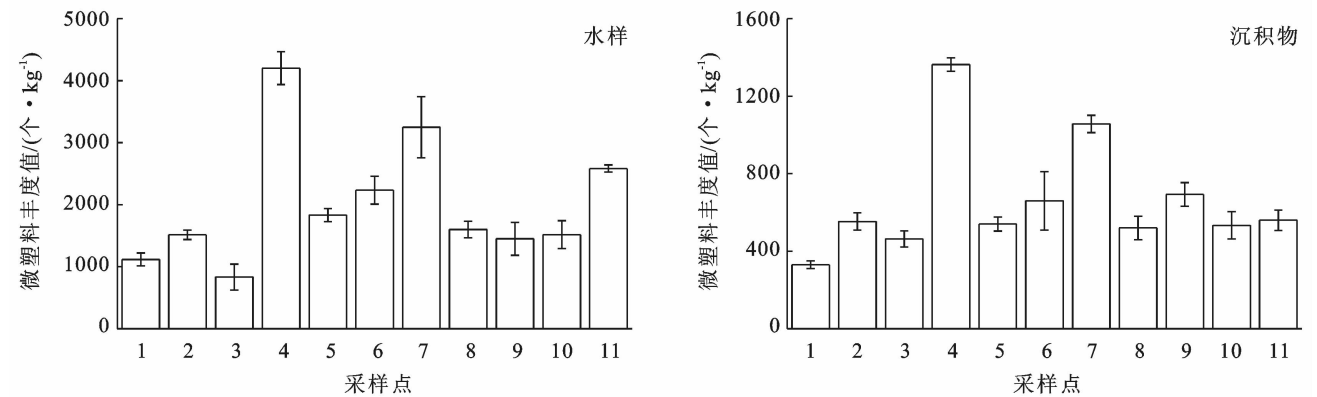


图 1 南淝河各点水样及沉积物中微塑料丰度

沉积物中微塑料的平均丰度为 661.2 个/kg。最高为 4 号点位,达到 1 363.3 个/kg,最低为 1 号点位,为 330 个/kg。沉积物中微塑料丰度分布与水样

类似,同样集中在南淝河中游段,其中 4 号点位与 7 号点位微塑料丰度最高,一是由于支流输入、污水处理厂以及人为活动的影响,二是两点处的沉积物样含

砂较多,砂砾可以携带微塑料以沉积物的形式积累^[1],从而微塑料丰度增高。而南淝河下游微塑料丰度高于南淝河上游,可能是因为南淝河上游及中游水体中的微塑料通过水体流动聚集到下游,并且下游河道宽阔,水流缓慢,从而也便于微塑料的沉降。

目前对于内陆河流的微塑料研究较少,其中 Jiang 等^[2]人对青藏高原河流微塑料的研究发现其表层水与沉积物中丰度分别为 483~967 个/m³ 和 65~195 个/kg, Wang 等^[20]人对汉江与长江(武汉段)的研究,其表层水丰度分别为 2 600~3 200 个/m³ 和 1 450~4 000 个/m³,鄱阳湖五河流域入湖口沉积物的微塑料丰度平均值约为 1 105 个/kg^[21]。对比发现,南淝河污染状况处于一个较高水平。由于采样时间为 3 月份,南淝河处于枯水期,缺少其他时期的数据,根据余厚平^[21]与龙邹霞等^[22]人的研究,在枯水期微塑料的浓度大于丰水期与平水期,由于降雨减少,进入河流的塑料垃圾也随之变少,这样有利于塑料垃圾在水面与河滩上进行降解,再加上南淝河补水大部分来自于污水处理厂,从而导致微塑料丰度升高。所以南淝河实际微塑料丰度低于本研究所监测的丰度。

3.2 南淝河中微塑料的粒径分布

南淝河水样与沉积物中微塑料粒径分布见图 2。

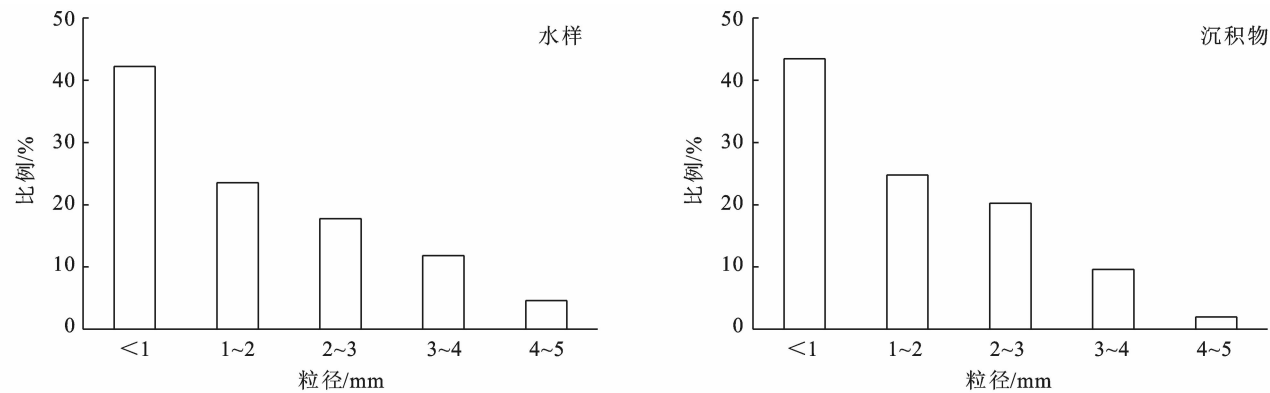


图 2 南淝河水样及沉积物中微塑料粒径分布

3.3 南淝河微塑料的类型分布

如图 3 所示,对微塑料形态进行显微镜分析,发现本研究中所检出的微塑料有 4 类:发泡类(a)、纤维类(b)、颗粒类(c)与碎片类(d)。该结果与余厚平等^[21]在鄱阳湖五河流域入湖口沉积物中调查到的发泡类,纤维类,颗粒类,碎片类的结果一致。与 Zhang 等^[16]人在三峡大坝水样中发现的薄膜类,线状类,发泡类与碎片类结果相似。

南淝河沉积物与水样中微塑料类型比例见图 4。

水样与沉积物样各粒径所占比例大致相同,从高到低依次顺序为:<1,1~2,2~3,3~4,4~5 mm。水样与沉积物中微塑料粒径分布所占比例最大为<1 mm,分别为 42.24%与 43.46%,所占比例最少为 4~5 mm,分别为 4.59%,1.98%。这表明微塑料粒径分布在水样与沉积物中都遵循随着微塑料粒径的增大,含量随之减少的规律。这一结果与 Tang 等人^[23]的研究结果一致。微塑料的粒径主要集中在较小尺寸,可能是因为污水处理厂的微塑料主要小于 0.5 mm^[24],另一个原因可能是大块的微塑料逐渐裂解成小粒径的微塑料^[16]。

微塑料在水流作用下与河床或河岸摩擦等机械作用导致微塑料更快的破碎分解^[25],在微塑料粒径不断变小的过程中,比表面积增大,微生物更易附着,从而可以降解微塑料。南淝河在枯水期水流缓慢,浮于水表面的微塑料能较长时间的与外环境接触,通过紫外线光照以及微生物的作用而缓慢分解或降解。而河滩在枯水期裸露面积增多,其微塑料也同样在自然环境下老化并被缓慢降解,这一过程也会使微塑料的粒径变小。

在环境中采取的样品会随着采样方法的不同,会存在粒径下限,本研究中采用 32 μm 的滤网过滤水样,统计的粒径下限为 32 μm。

水样与沉积物中主要类型是纤维,分别为 55.2%和 57.3%。纤维类微塑料多为细长型为主,也有部分卷曲,水样与沉积物中微塑料类型所占比例最少为泡沫,分别为 5.49%和 5.09%。泡沫类以白色为主,粒径较大。颗粒类与碎片类微塑料在水样与沉积物中分布情况相反,水样中碎片类高于颗粒类;而沉积物中碎片类低于颗粒类。碎片类与颗粒类形状各异,颜色多样。其中碎片类经过老化等原因,极易破碎。

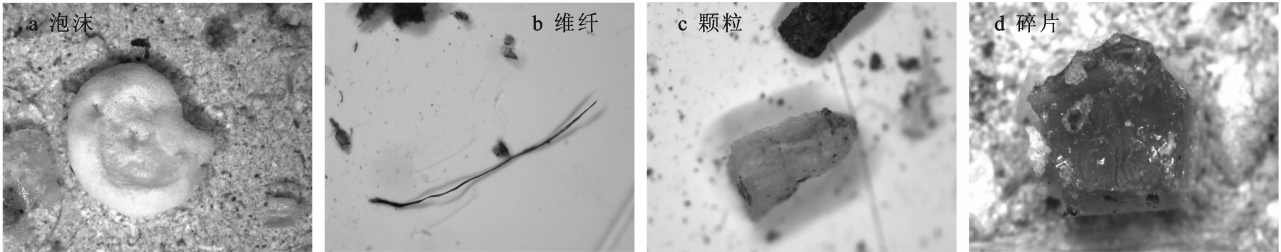


图 3 南淝河微塑料颗粒类型

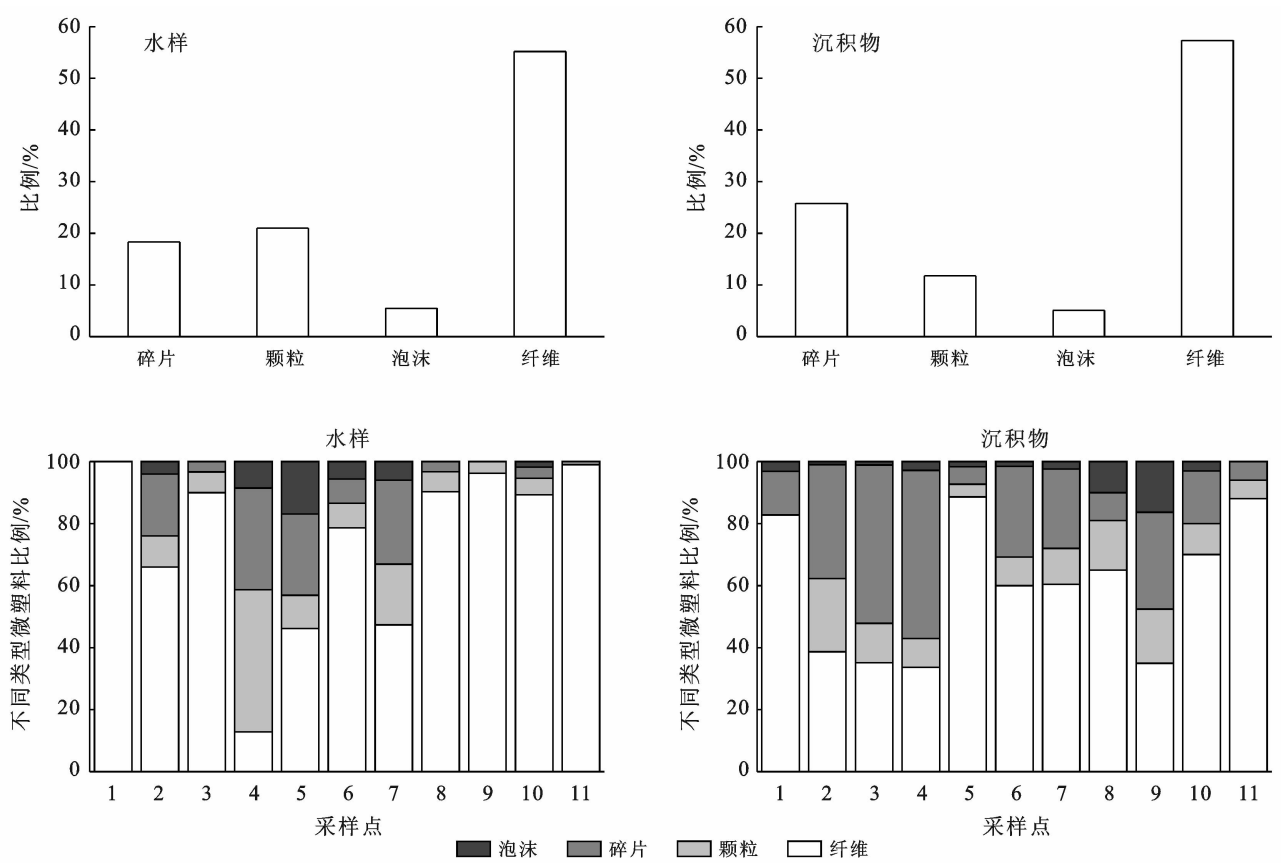


图 4 南淝河微塑料类型构成

3.4 南淝河微塑料的颜色分布

将观察到微塑料的颜色分为 4 类:透明、白色、黑色和彩色,其在水样与沉积物中的分布见图 5。两者分布差异不大,彩色和透明占主要部分,水样中分别为 43.35%和 28.09%,沉积物中分别为 40.65%和 35.46%。而水样中占比最少为白色,为 12.27%,沉积物中占比最少为黑色,为 11.01%。这是因为生活塑料制品主要由彩色为主,而南淝河经过人口密集的区域,生活垃圾相对较多,从而陆源塑料垃圾会进入河流,分解成微塑料,造成污染。微塑料颜色会受环境影响,在经过光照与氧化下,彩色微塑料颗粒会转变成透明微塑料颗粒。并且透明类塑料袋与食品包装袋众多,经过风化,裂解成微塑料,导致透明微塑料占比较多。

有研究表明,染色塑料颗粒表面含有更多的有害元素^[26]如镉、铅、铜等重金属,并在一系列环境作用下会释放到环境中。此外,微塑料的摄入情况受到塑料颜色的影响,水生生物更容易摄食颜色鲜艳微塑料颗粒^[5],从而在生物体中富集,危害人类健康。

3.5 南淝河微塑料的组成成分

对南淝河中检出的碎片类、纤维类、发泡类和颗粒类这 4 类微塑料进行红外光谱分析,以确定各类型的微塑料组成成分。典型微塑料样品红外光谱见图 6。对比标准图谱及峰值数据,确认颗粒类和纤维类主要成分为聚乙烯,碎片类为聚丙烯,发泡类为聚苯乙烯。本研究仅挑选不同类型微塑料颗粒其中之一进行红外鉴定,不能代表相应类型中全部微塑料的聚合物成分。

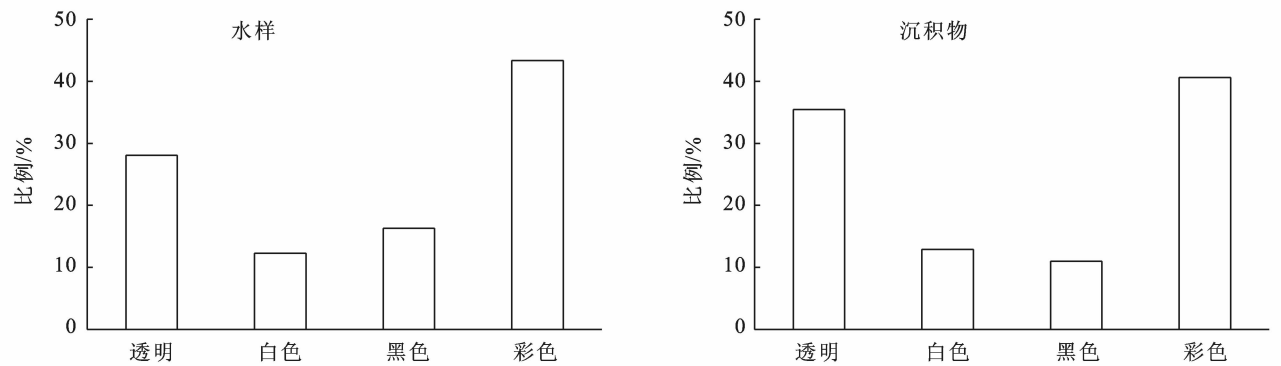


图 5 南淝河水样及沉积物中微塑料颜色分布

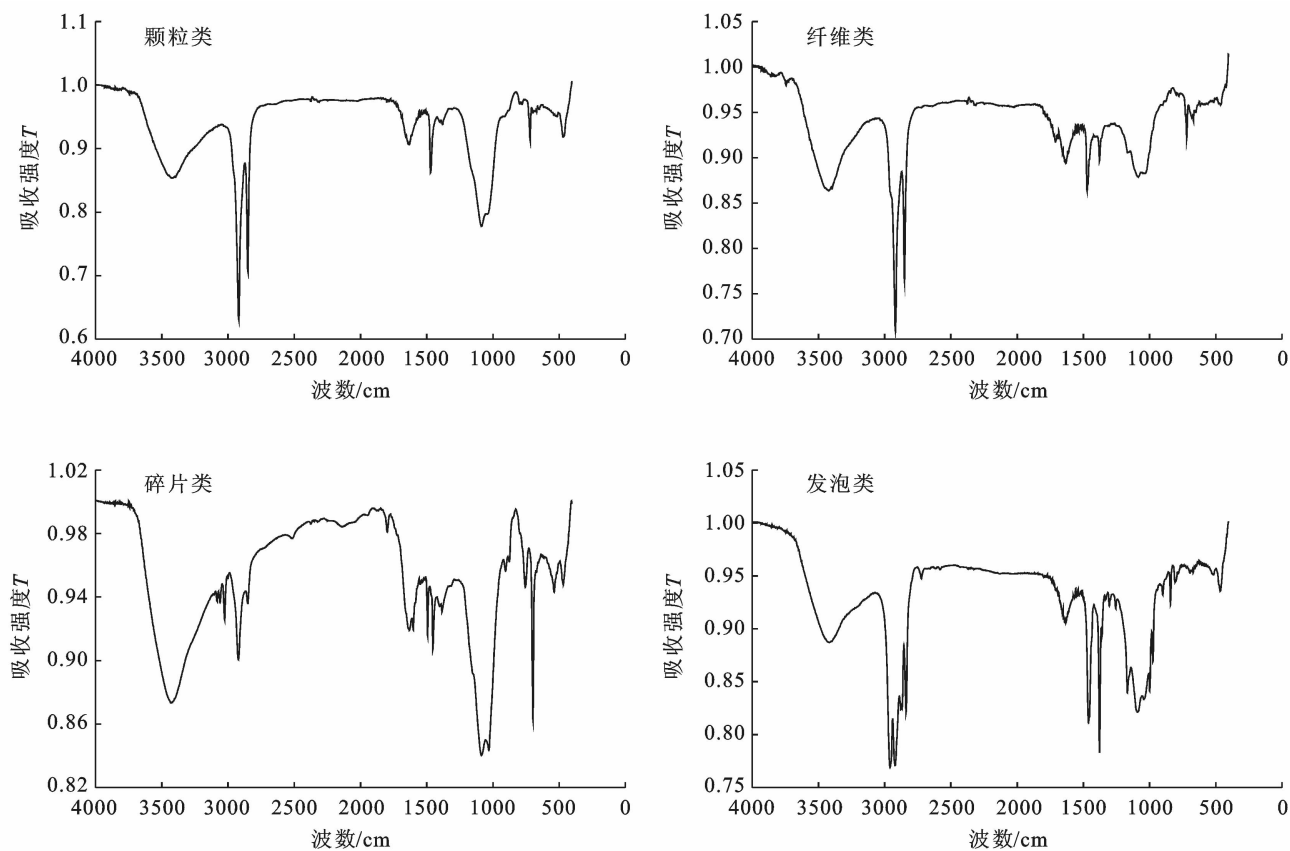


图 6 4 种类型微塑料红外光谱

3.6 南淝河微塑料的来源

南淝河作为合肥市主要的涉水景观与航行河道，并且也是主要的纳污河流，同时南淝河也会接收来自各支流的水源。从微塑料丰度分布来看，4 号点位与 7 号点位丰度最高。其中 4 号点位位于老城区，与上游与下游点位对比，人口较为稠密，说明人为活动有可能带来微塑料的污染。同时 4 号点位也是板桥河汇水口下游附近，微塑料也有可能来源于板桥河的输送。而 7 号点位上游附近存在王小郢污水处理厂，7 号点位的微塑料丰度值激增，说明微塑料可能来源于污水处理厂，并且 7 号点位为船舶停靠点，渔民的日常生活也会产生塑料垃圾，也会造成微塑料污染。

从微塑料的类型来看，本研究发现 4 种不同类型的微塑料，分别为纤维类，泡沫类，颗粒类与碎片类。据相关文献得知，其中纤维类微塑料主要来源于纺织行业^[27-28]，而生活污水中含有大量衣物纤维，例如洗衣废水随着管网进入污水处理厂，而一般的污水处理厂出水中纤维类微塑料占比较大^[29-30]，从而进入河流，引起污染。此外，纤维类微塑料的潜在来源有大气沉降与地表径流等^[27]。由于纤维类微塑料较轻，易悬浮于空气中，随着气流运动沉降于河流中引起污染。雨水的冲刷也会带来陆地上纤维类微塑料流入河流。泡沫类微塑料主要来源于南淝河的渔民活动，而渔船会将大块泡沫绑于船底或船侧以增加浮力，泡

沫老化或经过刮蹭,破碎后直接进入河流,成为泡沫类微塑料的重要来源。泡沫类微塑料还有可能来源于一次性饭盒与泡沫包装箱等,这些泡沫垃圾重量较轻,通过风力作用被带入河流,裂解成小碎片,造成污染。碎片类与颗粒类微塑料来源比较广,各类工业、农业以及生活塑料废弃物裂解破碎后均可形成碎片类和颗粒类微塑料^[31],南淝河流经的区域土地利用类型多样,包括工业区,居民区与农业区,工业与居民区都会产生一系列的塑料垃圾,该塑料垃圾经过老化,分解成数个小的塑料颗粒或是碎片,而流经农业区时会受农药瓶与化肥包装袋的影响,从而增加了碎片类与颗粒类微塑料的排入。

4 结论

(1) 南淝河水样与沉积物中普遍存在微塑料颗粒,水样中微塑料的丰度为 833.3~4 200 个/m³,平均丰度为 2 012.1 个/m³。沉积物中微塑料丰度为 330~1 363.3 个/kg,平均丰度为 661.2 个/kg。

(2) 南淝河水样与沉积物中微塑料的粒径分布规律大致相同,占比从高到低依次为<1,1~2,2~3,3~4,4~5 mm,遵循随着微塑料粒径的增大,含量随之减少的规律。

(3) 水样与沉积物中占比最多的微塑料类型为纤维,所占比例最少为泡沫。碎片类与颗粒类分布不同,水样中碎片类高于颗粒类微塑料,沉积物中颗粒类高于碎片类微塑料。

(4) 微塑料颜色种类多样,水样与沉积物中占比较大的为彩色与透明色,黑色和白色占比较少。不同类型微塑料的红外光谱分析表明,颗粒类和纤维类微塑料为聚乙烯,碎片类为聚丙烯,发泡类为聚苯乙烯。不同类型微塑料来源广泛,组成成分也会存在差异。

(5) 微塑料来源广泛,主要来源于污水处理厂尾水的排放以及人类活动的影响。纤维类微塑料源于纺织行业,主要通过生活污水以及污水处理厂排放;碎片类与颗粒类来源广泛,各类工业、农业以及生活塑料废弃物裂解破碎后均可形成碎片类和颗粒类微塑料;泡沫类微塑料主要来源渔民活动和一次性饭盒等生活垃圾。

[参 考 文 献]

- [1] Ding Ling, Mao Ruofan, Guo Xuetao, et al. Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the Northwest of China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 667: 427-434.
- [2] Jiang Changbo, Yin Lingshi, Li Zhiwei, et al. Microplastic pollution in the rivers of the Tibet Plateau [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 91-98.
- [3] Yan Muting, Nie Huayue, Xu Kaihang, 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.
- [4] Zhou Peng, Huang Chuguang, Fang Hongda, et al. The abundance, composition and sources of marine debris in coastal sea waters or beaches around the northern South China Sea (China) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(9): 1998-2007.
- [5] Zhao Shiye, Zhu Lixin, Li Daoji. Characterization of small plastic debris on tourism beaches around the South China Sea [J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2015, 1: 55-62.
- [6] Zhang Weiwei, Ma Xindong, Zhang Zhifeng, et al. Persistent organic pollutants carried on plastic resin pellets from two beaches in China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 99(1/2): 28-34.
- [7] Qiu Qiongquan, Peng Jinping, Yu Xubiao, et al. Occurrence of microplastics in the coastal marine environment: First observation on sediment of China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 98(1/2): 274-280.
- [8] 周倩,章海波,周阳,等. 滨海潮滩土壤中微塑料的分离及其表面微观特征[J]. *科学通报*, 2016, 61(14): 1604-1611.
- [9] Zurcher N A. Small plastic debris on beaches in Hongkong [D]. Hongkong: University of Hongkong, 2009.
- [10] Fok L, Cheung P K. Hongkong: at the Pearl River Estuary: A hotspot of microplastic pollution [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 99(1/2): 112-118.
- [11] Tsang Y Y, Mak C W, Liebich C, et al. Microplastic pollution in the marine waters and sediments of Hongkong [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 115(1): 20-28.
- [12] Kuo Fanjun, Huang H W. Strategy for mitigation of marine debris: Analysis of sources and composition of marine debris in northern Taiwan [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 83(1): 70-78.
- [13] Kunz A, Walther B A, Lowemark L, et al. Distribution and quantity of microplastic on sandy beaches along the Northern Coast of Taiwan [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 111(1): 126-135.
- [14] 罗雅丹,林千惠,贾芳丽,等. 青岛4个海水浴场微塑料的分布特征[J]. *环境科学*, 2019, 40(6): 2631-2638.
- [15] Zhang Kai, Su Jing, Xiong Xiong, et al. Microplastic pollution of lakeshore sediments from remote lakes in Tibet plateau, China [J]. *Environmental Pollution (Barking, Essex)*, 2016, 219: 450-455.

- [16] Zhang Kai, Gong Wen, Lv J, et al. Accumulation of floating microplastics behind the Three Gorges dam [J]. *Environmental Pollution*, 2015,204:117-123.
- [17] 赵世烨. 中国部分河口微塑料的赋存特征及海洋雪中微塑料分析方法研究[D]. 上海:华东师范大学,2017.
- [18] 周倩. 典型滨海潮滩及近海环境中微塑料污染特征与生态风险[D]. 烟台:中国科学院烟台海岸带研究所,2016.
- [19] Nuelle M T, Dekiff J H, Remy D, et al. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 184: 161-169.
- [20] Wang Wenfeng, Ndungu A W, Li Zhen, 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.
- [21] 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.
- [22] 龙邹霞. 厦门湾海洋塑料垃圾和微塑料时空分布及对人类活动响应研究[D]. 武汉:中国地质大学,2019.
- [23] Tang Guowen, Liu Mengyang, Zhou Qian, et al. Microplastics and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Xiamen coastal areas: Implications for anthropogenic impacts [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 634:811-820.
- [24] Mason S A, Garneau D, Sutton R, et al. Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218:1045-1054.
- [25] 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.
- [26] Imhof H K, Laforsch C, Wiesheu A C, et al. Pigments and plastic in limnetic ecosystems: A qualitative and quantitative study on microparticles of different size classes [J]. *Water Research*, 2016, 98:64-74.
- [27] 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.
- [28] Duis K, Coors A. Microplastics in the aquatic and terrestrial environment: Sources (with a specific focus on personal care products), fate and effects [J]. *Environmental Sciences Europe*, 2016, 28(1):1-25.
- [29] Talvitie J, Mikola A, Setälä O, et al. How well is microlitter purified from wastewater? A detailed study on the stepwise removal of microlitter in a tertiary level wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2017, 109:164-172.
- [30] Michielssen M R, Michielssen E R, Ni J, et al. Fate of microplastics and other small anthropogenic litter (SAL) in wastewater treatment plants depends on unit processes employed [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2016, 2(6):1064-1073.
- [31] Andrady A L. The plastic in microplastics: A review [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 119(1):12-22.

(上接第 200 页)

- [13] Liu, Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation[C]// *Proceedings process of soil erosion and its environment effect (vol II)*: 12th international soil conservation organization conference. Tsinghua University Press. Beijing, China, 2002-02: 21-25.
- [14] 殷水清, 章文波, 谢云, 等. 基于高密度站网的中国降雨侵蚀力空间分布[J]. *中国水土保持*, 2013(10): 45-50.
- [15] Wischmeier W H, Mannering J V. Relation of soil properties to its erodibility [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33(1):131-137.
- [16] Sharpley A N, Williams J R, Jones C A, et al. EPIC: Erosion productivity impact calculator [M]. U. S. Department of Agriculture Technical Bulletin, 1990.
- [17] 符素华, 刘宝元, 周贵云, 等. 坡长坡度因子计算工具[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5):105-110.
- [18] 中华人民共和国水利部. 小流域划分及编码规范: SL 653-2013[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2014.
- [19] 李智广, 罗志东. 县域土壤侵蚀严重性评价方法初探: 土壤侵蚀严重指数的定义与应用[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(4):41-43.
- [20] 刘宝元, 郭索彦, 李智广, 等. 中国水力侵蚀抽样调查[J]. *中国水土保持*, 2013(10):26-34.
- [21] 中华人民共和国水利部. 水土保持规划编制规范: SL 335-2014[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2014:3-21, 32-38.