

水源与饮用水保障

张山风, 高乐, 刘朵, 等. 微塑料在某水厂水源与处理工艺中的时空分布[J]. 净水技术, 2024, 43(2):62-69.

ZHANG S F, GAO L, LIU D, et al. Spatiotemporal distribution of microplastics in water source and treatment process of a WTP[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(2):62-69.

微塑料在某水厂水源与处理工艺中的时空分布

张山风*, 高乐, 刘朵, 蔡佳男, 王建华

(北京市自来水集团有限责任公司, 北京市供水水质工程技术研究中心, 北京 100012)

摘要 微塑料通常是指粒径小于 5 mm、不溶于水并持久存在的塑料固体微粒。文中采集了水厂处理工艺中的样品, 检测其中的微塑料, 根据检测结果, 从净水工艺、不同水源、不同时期 3 方面进行了对比分析。结果表明, 原水中的微塑料含量规律为枯水期多于丰水期, 本地水库水源多于“南水北调”水源, 主要受到人类活动和季节特性影响。水厂工艺对微塑料有较好去除效果, 其中混凝沉淀的处理效果最好, 但混凝剂、消毒剂和滤料可能存在引入微塑料污染的风险, 有待进一步研究对其进行验证。在 20~500 μm 粒径内, “南水北调”水源中的微塑料粒径主要集中在 20~50 μm , 大于 100 μm 的微塑料颗粒极少; 疑似由净水药剂引入的微塑料粒径主要是 20~50 μm 。所检测的不同水源、不同时期采集的原水样品中均出现了聚丁二酸丁二醇酯 (PBS)、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 和聚酰胺 (PA), 在研究微塑料去除方法时应重点关注这 3 种成分的微塑料; PBS 微塑料含量远大于其他组分, 且其更容易被净水工艺去除; 当水源地存在捕鱼活动时, PA 微塑料含量可能会大幅增加。

关键词 微塑料 水厂 水处理工艺 水库水源 南水北调工程

中图分类号: TU991 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)02-0062-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.02.007

Spatiotemporal Distribution of Microplastics in Water Source and Treatment Process of a WTP

ZHANG Shanfeng*, GAO Le, LIU Duo, CAI Jianan, WANG Jianhua

(Beijing Waterworks Group Co., Ltd., Beijing Water Supply and Water Quality Engineering Technology Research Center, Beijing 100012, China)

Abstract Microplastics usually refer to plastic solid particles with a particle size of less than 5 mm, insoluble in water, and persistent. This study collected samples from the water treatment process of the water treatment plant (WTP) and detected microplastics. Based on the detection results, a comparative analysis was conducted from three aspects: water purification process, different water sources, and different periods. The following conclusions had been drawn, the regularity of microplastic content in raw water was the dry season was more than the wet season, and the local reservoir water source was more than the South-to-North Water Diversion Project water source. Mainly influenced by human activities and seasonal characteristics. The water purification plant process of WTP had a good removal effect on microplastics, among which coagulation sedimentation had the best treatment effect. However, coagulants, disinfectants, and filter materials would pose a risk of introducing microplastics pollution, and further research was needed to verify their effectiveness. Within the range of 20~500 μm in particle size, the microplastic particle size in the water sources of the South-to-North Water Diversion Project was mainly concentrated in 20~50 μm , with very few microplastic particles larger than 100 μm ; The particle size of microplastics suspected to be introduced by water purification agents was mainly 20~50 μm . Polybutylene succinate (PBS), polyethylene terephthalate (PET), and polyamide (PA) were found in the raw water samples collected at different

[收稿日期] 2023-06-14

[通信作者] 张山风(1993—), 男, 研究方向为微污染水源藻类防控技术研究, E-mail: 18810751189@163.com。

water sources and periods in this study. When studying microplastic removal methods, special attention should be paid to the microplastics of these three components. The content of PBS microplastics was much higher than other components, and it was more easily removed by water purification processes. When there was fishing activity in the water source area, the content of PA microplastics may significantly increase.

Keywords microplastics water treatment plant (WTP) water treatment process reservoir water source the South-to-North Water Diversion Project

微塑料被定义为粒径小于 5 mm 的塑料颗粒^[1],有很多研究调查了微塑料在水体中的分布情况。孙晓楠等^[2]通过总结相关文献,发现我国自然水体的微塑料平均丰度为(3 604.2 ± 5 926.4)个/m³,我国城市水体的微塑料平均丰度为(7 722.6 ± 9 505.7)个/m³,进一步分析数据发现我国地表水体的微塑料污染情况受到周围地区社会经济发展情况的影响显著;葛琦等^[3]在查阅了相关文献后发现微塑料已经在世界各地的各类水体中被广泛检出;González-Pleiter 等^[4]在南极洲也检测到了存在于淡水介质中的微塑料。由此可见,微塑料已经广泛存在于水环境中。

环境中的微塑料能够在水力、风力等作用下发生迁移,并最终赋存于水体和土壤中。刘超等^[5]总结了相关文献发现,微塑料由人类生活用品、垃圾、基础设施等释放进入环境后,存在多种迁移途径。在水体环境中,微塑料非常容易随雨水径流迁移,雨水径流直接或间接将微塑料送至河流,进而随支流汇入干流,最终进入海洋。与此同时,部分微塑料在水环境中发生老化、分解并逐渐沉降,从而进入其他介质中。在土壤介质中,微塑料可直接从城市垃圾、农用物品中释放进入土壤,也可以通过地表径流、大气沉降等方式进入土壤。

水环境中的微塑料会被生物摄入体内并随食物链传递。赵培强等^[6]基于全球鱼类相关文献分析发现,大部分地区的半数以上鱼类受到了微塑料污染。在微塑料对鱼类毒性效应的研究中,还存在微塑料经食物链传递后进入鱼类体内的研究。周刚等^[7]在对比相关文献时也发现,水环境中的微塑料容易被水中的生物吞噬,并沿食物链富集,微塑料也可以被微生物定殖,并随其长距离迁移。

北方某市的自来水以“南水北调”水与本地水共同作为水源,已有研究调查了相关水体的微塑料分布情况。李丹文^[8]研究了作为南水北调工程起点的丹江口水库中微塑料分布情况,该研究对比了

不同采样时期与采样点深度对微塑料分布产生的影响,汛期库区水体平均微塑料丰度为(7.205 ± 4.438)个/L,非汛期库区水体微塑料平均丰度为(8.228 ± 4.687)个/L,均以小于 0.5 mm 尺寸的微塑料为主,且越小尺寸的微塑料占比越大;何文宣等^[9]研究了北京密云水库中的微塑料空间分布情况,水库表层水体中微塑料平均丰度为(6.83 ± 1.87)个/L,其中小于等于 0.5 mm 的聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)占比最高,并分析了微塑料的主要来源与其进入水库的途径。

水厂的常规工艺对 10 μm 以上的微塑料有良好的去除效果。孙晓晨等^[10]总结了相关文献发现,水厂混凝沉淀工艺对微塑料的总体去除率在 40.5%~62.0%,其中大粒径(大于 50 μm)与纤维状的微塑料更容易被混凝沉淀去除,各水厂去除率的差异可能由水质、微塑料浓度与种类、水厂处理条件等造成。过滤工艺对微塑料的去除效果会受过滤介质和微塑料本身性质的影响,同时不同研究中过滤工艺的进水微塑料情况受前置工艺影响较大,对微塑料的整体去除率在 29.0%~51.1%,其中石英砂滤料对 50 μm 以上的微塑料去除效果优于 50 μm 以下的微塑料。在臭氧-活性炭工艺中,微塑料去除率在 38.7%~60.9%,其中臭氧处理部分可能出现负去除率,推测原因为水流的剪切力作用使微塑料破碎或微塑料表面附着的有机物被氧化导致其重新暴露在水中,从整体去除效果上看,臭氧-活性炭工艺对小粒径和球状微塑料的去除效果更好。

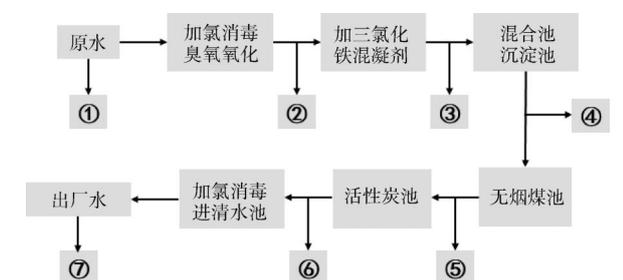
本研究通过检测北方某水厂中采集的样品,分析净水工艺对微塑料的影响,以及不同水源、不同时期的水厂原水中微塑料分布情况。

1 材料与amp;方法

1.1 样品采集方法

采样地点位于北方某水厂中,该水厂以“南水北调”水(以下简称“南水”)与本地水库水共同作为水源,于不同时期共进行了 3 次采样,研究期间水源

进行过两次切换,水厂工艺流程与采样点位置如图 1 所示。



注:①—原水;②—预氧化出水;③—混凝进水;④—沉淀池出水;
⑤—煤池出水;⑥—炭池出水;⑦—出厂水。

图 1 水厂工艺流程与水质采样点位置

Fig. 1 Process Flow and Water Quality Sampling Points

Location of WTP

于 2021 年 7 月(第一次采样,夏季丰水期,原水为南水)采集了全部采样点的样品,分别于 2021 年 12 月(第二次采样,冬季枯水期,原水为本地水库水)和 2022 年 3 月(第三次采样,春季枯水期,原水为南水)采集了原水、炭池出水、出厂水的样品。

每个采样点采集 3 个平行样,使用 2 L 玻璃样品瓶与金属取水器,经润洗后取满,带回实验室进行预处理。采样与预处理过程中,试验人员穿着棉质试验服,佩戴丁腈手套,试验用具尽量避免使用塑料制品,并在试验前用纯水清洗干净。

1.2 样品预处理方法

取一定量样品在真空抽滤装置上用 10 μm 不锈钢滤膜抽滤,将滤膜放入 50 mL 30%过氧化氢溶液中,在 65 $^{\circ}\text{C}$ 下避光振荡消解 24 h。消解后的液体用 10 μm 不锈钢滤膜抽滤,将滤膜放入甲酸钾浮选液中超声 30 min 使微塑料从滤膜上脱落后取出滤膜。含有微塑料的浮选液静置 12 h 后,每 2 h 对其进行密度浮选,共 3 次。将浮选完成的液体用 10 μm 不锈钢滤膜抽滤,将滤膜放入 100 mL 30%过氧化氢溶液中再次消解 24 h,以去除残留的浮选液。消解后的液体用 10 μm 不锈钢滤膜抽滤,将滤膜放入 15 mL 无水乙醇中超声 30 min 使微塑料被洗入乙醇中,取出滤膜,使用氮吹仪吹脱乙醇进行浓缩,当乙醇余量很少时密封冷藏保存,等待上机检测。

1.3 样品检测方法

使用安捷伦 8700LDIR 型激光红外成像系统检测预处理完毕的样品,该仪器利用自动识别技术与

红外光谱技术,可以扫描并识别样品中粒径在 20~500 μm 的微塑料颗粒,并检测得到微塑料的数量、成分与粒径。样品的检测时间受样品中颗粒数量影响,颗粒越多,耗时越长。本研究中用此仪器检测每个样品的平均用时约为 7 h。

由于本研究所用仪器仅能检测 20~500 μm 的颗粒,在样品预处理过程中选用 10 μm 的滤膜进行过滤,且文中仅讨论粒径为 20~500 μm 的微塑料分布情况。因此,受检测手段的限制,本研究检测得到的微塑料丰度数据较真实值低。

目前最常见的微塑料检测方法为红外光谱法与拉曼光谱法,红外光谱法可用于检测粒径为 20 μm 以上的颗粒,拉曼光谱法可检测粒径大于 1 μm 的颗粒,而表面增强拉曼光谱法可检测 1~100 nm 的纳米微塑料,若要检测全部小粒径的微塑料则需要用裂解气相色谱-质谱法或液相色谱法,得出微塑料在样品中的质量浓度。但后两种方法的缺点是必须用分级过滤的方法来筛选不同粒径的微塑料颗粒,无法获得单个颗粒的粒径与形状信息,并且可以检测的微塑料种类少于前两种方法^[11-13]。

2 结果与讨论

2.1 全工艺流程中样品检测结果

2.1.1 微塑料丰度

如图 2 所示,2021 年 7 月夏季丰水期采样(第一次采样),原水为南水,采集了全工艺流程的水样。从检测结果中可以看出,每个采样点 3 个平行样的检测结果偏差较大。采样点为水厂内的水渠、滤池或专用取样口,基本可以排除采样深度产生的影响,推测是微塑料本身的性质造成的。微塑料因其种类繁多、形态各异而导致其在水体中的分布不

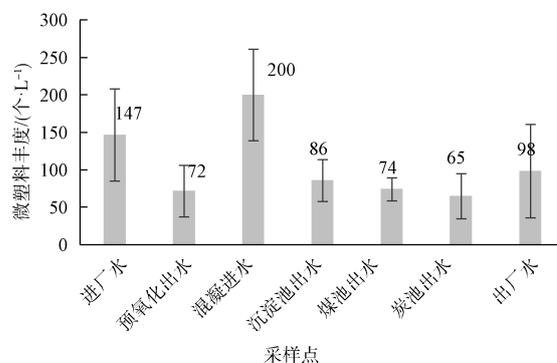


图 2 2021 年 7 月微塑料丰度检测结果

Fig. 2 Abundance Testing Results of Microplastics in July 2021

均匀,故难以保证样品检测结果的稳定性,采样时必须多采集平行样使检测结果更具参考性。

预氧化出水的样品为原水经过预臭氧和预加氯消毒后的水样,预氧化工艺的去除率约为 51%,由于臭氧和加氯之间没有可进行采样的点位,故微塑料减少的原因未能确定。由于未见研究表明次氯酸钠会对微塑料产生去除效果,推测产生此现象是臭氧氧化工艺造成的。研究^[10]表明臭氧氧化可能会造成微塑料丰度增加,其原因是水流的剪切力作用使微塑料破碎或微塑料表面附着的有机物被氧化导致其重新暴露在水中进而被检测到,但在本研究中微塑料丰度下降明显,这与文献中的现象有较大差异,推测产生这种现象的原因是部分微塑料颗粒受到臭氧工艺影响而破碎,粒径变小。而本研究所用检测方法仅能检测 20~500 μm 的样品,破碎后的微塑料颗粒过小,未能被检测到,所以产生了微塑料丰度大幅下降的结果。

在混凝进水中微塑料丰度大幅增加,此采样点与预氧化出水采样点之间仅存在“投加混凝剂”这一步处理工艺,微塑料丰度的上涨极有可能来源于投加的三氯化铁混凝剂。同时,出厂水中的微塑料丰度高于炭池出水,这两个采样点之间也仅存在“加入消毒剂并进入清水池”这一步,说明净水药剂很可能会引入微塑料污染。混凝剂、消毒剂等净水药剂在生产过程中很可能存在塑料制品的参与,在药剂运输与储存时也可能使用了塑料容器,甚至制造药剂时所用的水中也可能已经存在微塑料,但在本研究中没有对净水药剂进行检测,故此推论有待进一步研究加以证实。

混凝沉淀工艺对微塑料有明显去除效果,去除率为 57%,这与文献中的现象相似^[10,14-15]。无烟煤与活性炭对微塑料的去除效果均较差,分别约为 14%和 12%。混凝进水与出厂水两处的微塑料丰度异常增加,导致整体工艺的微塑料去除率仅有约 33%,若仅计算混凝沉淀、无烟煤、活性炭对微塑料去除效果,去除率可达约 68%。由此可见,在没有引入外部微塑料污染的情况下,常规净水工艺可以较为有效地去除微塑料。

2.1.2 微塑料粒径

如图 3 所示,水厂中微塑料粒径以 20~50 μm 为主,占比为 58%~86%,且所有样品中绝大多数微塑料的粒径都小于 100 μm,可见对于净水处理而

言,应将研究重点放在粒径 100 μm 以下的颗粒上。

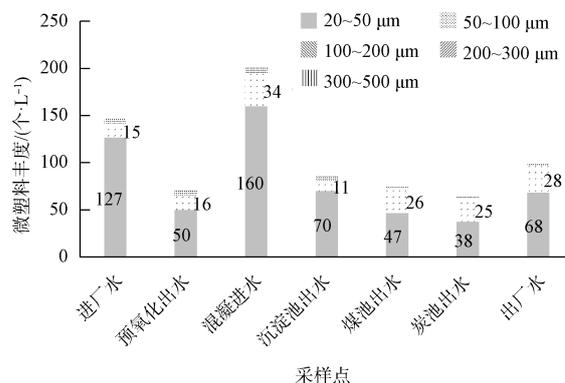


图 3 2021 年 7 月微塑料粒径检测结果

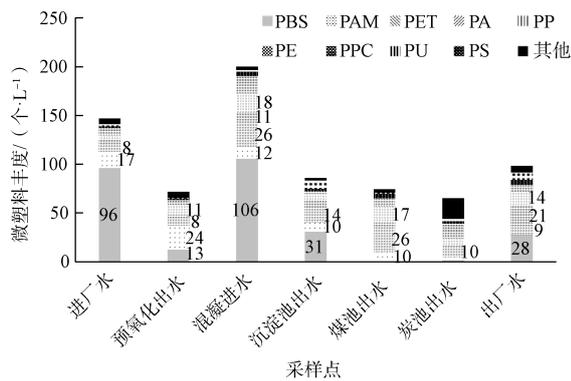
Fig. 3 Results of Microplastic Particle Size Testing in July 2021

图 3 中可以看到,20~50 μm 粒径的微塑料受净水工艺影响更加明显,在预氧化出水处的微塑料丰度下降原因可能与前文所做的推测相同。混凝沉淀工艺对 20~50 μm 和 50~100 μm 微塑料的去除率分别约为 56%和 68%,对粒径较大的微塑料去除效果更好,这与文献^[10]中的现象一致。在煤池与炭池中对 20~50 μm 的微塑料去除效果优于 50~100 μm 的微塑料,且在煤池中 50~100 μm 的微塑料增多。目前无法确定出现此现象的原因,微塑料的来源可能包括滤料中的微塑料析出,但这部分微塑料是滤料截留后再析出的,或是类似于净水药剂,在制造过程中就引入了微塑料,还需要进一步研究。另外,在混凝进水与出厂水中,疑似由净水药剂引入的微塑料主要粒径为 20~50 μm。

2.1.3 微塑料组分

如图 4 所示,样品中微塑料优势组分为聚丁二酸丁二醇酯(PBS)、聚丙烯酰胺(PAM)、PET、聚酰胺(PA)、聚丙烯(PP)。

PBS 微塑料在水厂工艺中的丰度变化最大,预氧化、混凝沉淀和煤滤工艺均对 PBS 微塑料有很好的去除效果。PBS 是一种生物可降解塑料,但降解速度通常以天为单位,故无需考虑其在水处理过程中降解的可能性。原水中的 PBS 占比达到 65%,这可能与人类活动有很大关系,通过不同方法制造或加入不同添加剂的 PBS 应用十分广泛,应用范围包括一次性餐具、包装袋、日用品、农用材料、医用材料等。当今社会越发关注环境保护,PBS 作为一种性能优异的新型可降解材料而被广泛使用,可能导致水中的 PBS 微塑料含量多于其他组分。另外,在可



注:PE—聚乙烯;PPC—聚甲基乙撑碳酸酯;PU—聚氨基甲酸酯;PS—聚苯乙烯。

图4 2021年7月微塑料组分检测结果

Fig. 4 Test Results of Microplastic Components in July 2021

能引入了微塑料污染的混凝进水与出厂水样品中, PBS 微塑料也明显增加,这代表在混凝剂与消毒剂中可能也含有较多此种微塑料。鉴于 PBS 广泛的用途,在混凝剂的制造过程中引入的可能性较大,例如产品的容器、原材料的包装袋、制造用水等都可能其污染源。

本试验测得的 PAM 微塑料不溶于水,在经过预处理后依旧保持固体状态,所以此 PAM 微塑料与水处理中常用的 PAM 助凝剂为不同物质。PAM 微塑料在样品中含量不多,其在工艺中的变化也不明显。

PET 可纺成聚酯纤维,即涤纶,应用范围包括饮料瓶、产品包装、绝缘膜、电器插座、开关、多种电子电器零件、汽车零件、机械工业齿轮及叶片等。PET 微塑料在原水中含量很少,而在加入混凝剂与经过煤池时含量明显增加,此现象增加了混凝剂与煤滤料中含有微塑料的可能性,PET 可能是在作为容器或包装袋时脱落进入其中的。

PA 是最早工业化的合成纤维,俗称尼龙,产品种类繁多,应用范围包括衣物、医疗用品、捕鱼工具、缆绳、帐篷、电器零件、汽车零件、机械设备的耐磨部件等。原水中 PA 微塑料的含量很低,普遍认为其主要来源为洗衣废水与捕鱼工具^[2,7]。其中,洗衣废水会先经过污水处理后再排放进入环境,而捕鱼工具脱落的 PA 会直接进入环境中。可以观察到在混凝进水与出厂水处 PA 微塑料有少量增加,这可能是从混凝剂与消毒剂中引入的微塑料污染。

PP 在合成树脂一类中产量仅次于 PE,近年来随着我国的经济快速增长,PP 的需求量也不断增

加,生产规模也随之增长,应用范围包括口罩、食品及产品包装、家用物品、汽车零件、化工原料、建筑管材等。PP 是口罩过滤材料的主要成分之一^[16],近年的疫情导致口罩使用量剧增,口罩被随意丢弃而进入环境的可能性增加,这可能是 PP 微塑料产生的原因之一。PP 微塑料在混凝进水、煤池出水和出厂水中均有少量增加,与 PET 和 PA 类似,也可能是从混凝剂、消毒剂和煤滤料中引入的。

综上,PBS、PET、PA 和 PP 4 种成分的微塑料值得进一步关注,因为其存在从外部引入的风险,其中 PBS 含量远高于其他成分,但同时也更容易被净水工艺去除。

2.2 不同水源的比较

2021 年 12 月冬季枯水期采样(第二次采样)的原水为本地水库水,2022 年 3 月春季枯水期采样(第三次采样)的原水为南水,对比这两次的检测结果以研究不同水源产生的影响。

2.2.1 微塑料丰度

如图 5 所示,不同水源微塑料丰度差异极大,南水水源的进厂水微塑料含量为(244±41)个/L,本地水库水源的进厂水微塑料含量为(449±241)个/L。推测造成水库水的微塑料丰度高于南水的原因有两种:其一是 2021 年 10 月—2022 年 3 月为本地水库的捕鱼期^[9],捕鱼工具是微塑料污染的其中一种主要来源;其二是 2021 年夏季发生的洪水灾害,部分洪水因泄洪进入水库,洪水中携带有大量从地表冲刷至水体中的塑料制品,可能导致水中微塑料的增多。在水源不同的情况下,水厂净水工艺对微塑料去除效率相近,冬季和春季分别约为 69% 和 78%。

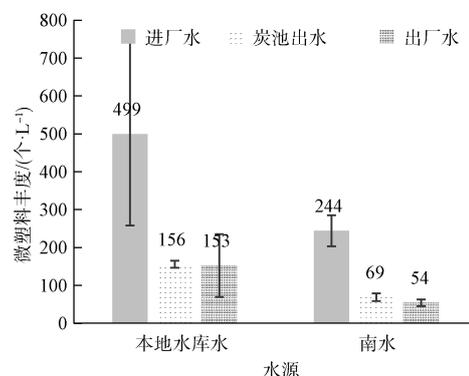


图5 不同水源微塑料丰度对比

Fig. 5 Comparison of Microplastic Abundance in Different Water Sources

2.2.2 微塑料组分

如图 6 所示,南水的微塑料优势组分为 PBS、PET 和 PA;本地水库水的微塑料优势组分为 PBS、PET、PA 和 PP。可以观察到,水库水中 PA 含量明显高于南水,推测是因为采样时正处于水库的捕鱼期,且 PA 为渔网的主要组成材料,脱落进入水中的可能性较高,加之长江与“南水北调”干渠均禁止捕鱼,故产生了如此明显的差异。两次采样原水中 PBS 含量均较多,且净水工艺对其去除效果较好,这与第一次采样的结果一致。

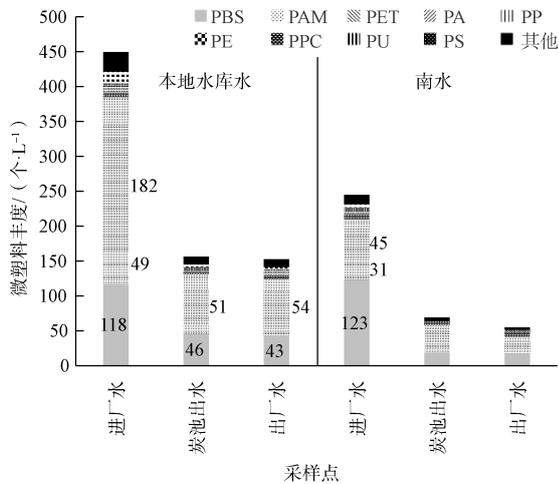


图 6 不同水源微塑料组分对比

Fig. 6 Comparison of Microplastic Components in Different Water Sources

2.3 丰水期与枯水期的比较

2021 年 7 月夏季丰水期采样(第一次采样)和 2022 年 3 月春季枯水期采样(第三次采样)的原水均为南水,对比这两次的检测结果以研究丰水期与枯水期产生的影响。

2.3.1 微塑料丰度

如图 7 所示,第一次采样的丰水期样品中进厂水微塑料丰度为 (147 ± 62) 个/L,第三次采样的枯水期样品中进厂水微塑料丰度为 (244 ± 41) 个/L,枯水期微塑料丰度高于丰水期,此现象与国内外的一些淡水河流微塑料研究一致^[17-19]。此现象产生的原因推测为受到春季桃花汛影响,地表径流增大,更多地表的塑料制品进入水体环境(桃花汛期间因冰凌融化或降雨,会造成一过性污染水平增高)。

在第一次采样中,出厂水中微塑料丰度相比炭池出水有小幅增加,可能是从次氯酸钠消毒剂中引

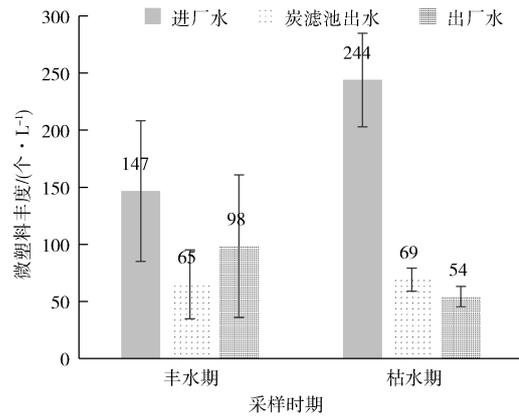


图 7 不同时期微塑料丰度对比

Fig. 7 Comparison of Microplastic Abundance in Different Periods

入的微塑料污染。但从图 5 中可以看到,在第二次与第三次采样中出厂水微塑料丰度与炭池出水基本持平,这与第一次采样中的现象不一致。由于本研究未对消毒剂进行检测,所以消毒剂中含有微塑料的推论还有待进一步研究证实。

2.3.2 微塑料组分

如图 8 所示,南水丰水期微塑料优势组分为 PBS、PAM、PET 和 PA;南水枯水期微塑料优势组分为 PBS、PET 和 PA。可以观察到枯水期南水原水中的 PA 占比明显多于丰水期,但长江及“南水北调”干渠均禁止捕鱼,故可以排除该时期 PA 来自捕鱼工具引入的可能性,推测其来源更可能为春季降雨增加造成的地表径流带入。

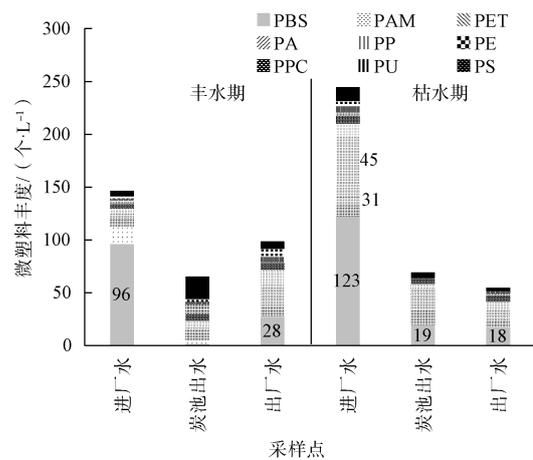


图 8 不同时期微塑料组分对比

Fig. 8 Comparison of Microplastic Components in Different Periods

3 结论与展望

3.1 结论

(1)原水中的微塑料含量规律为枯水期多于丰水期,本地水库水源多于南水水源,主要受到人类活动和季节特性影响。

(2)净水厂工艺对微塑料有较好去除效果,其中混凝沉淀的处理效果最好,但混凝剂、消毒剂和滤料可能存在引入微塑料污染的风险,有待进一步研究对其进行验证。

(3)在 20~500 μm 粒径内,“南水北调”水源中的微塑料粒径主要集中在 20~50 μm ,大于 100 μm 的微塑料颗粒极少;疑似由净水药剂引入的微塑料粒径主要为 20~50 μm 。

(4)本研究所检测的不同水源、不同时期采集的原水样品中均出现了 PBS、PET 和 PA,在研究微塑料去除方法时应重点关注这 3 种成分的微塑料;PBS 微塑料含量远大于其他组分,且其更容易被净水工艺去除;当水源地存在捕鱼活动时,PA 微塑料含量可能会大幅增加。

3.2 展望

现在由于没有统一的方法,各个研究之间数据的可比性较差,有必要建立一个微塑料采样与检测的标准方法。从本研究中也可看出,微塑料在水中的分布很不均匀,同一采样点的 3 个平行样之间检测结果差异可能比较大,可见微塑料的采样方法还有待改进。

参考文献

- [1] HIRAI H, TAKADA H, OGATA Y, et al. Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8): 1683-1692.
- [2] 孙晓楠,陈浩,贾其隆,等. 我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估[J]. *环境科学*, 2022, 43(11): 5040-5052.
- SUN X N, CHEN H, JIA Q L, et al. Ecological risk assessment of microplastics occurring in surface water of terrestrial water systems across China[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(11): 5040-5052.
- [3] 葛琦,周志文,刘慧婷. 天然水体中微塑料的来源、分布及毒性效应[J]. *环境保护与循环经济*, 2022, 42(2): 55-59.
- GE Q, ZHOU Z W, LIU H T. Source, distribution, and toxic effects of microplastics in natural water bodies [J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2022, 42(2): 55-59.
- [4] GONZÁLEZ-PLEITER M, EDO C, VELÁZQUEZ D, et al. First detection of microplastics in the freshwater of an Antarctic Specially Protected Area[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 161: 111811. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111811.
- [5] 刘超,张晓然,刘俊峰,等. 塑料制品中微塑料的释放行为及在环境中的迁移规律研究进展[J]. *环境工程*, 2022, 40(5): 205-217.
- LIU C, ZHANG X R, LIU J F, et al. Release of microplastics from plastic products and their environmental transport behaviors: A review[J]. *Environmental Engineering*, 2022, 40(5): 205-217.
- [6] 赵培强,吴志丰,董四君,等. 基于文献计量方法的微塑料在鱼体中的污染现状及毒性效应研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2022, 17(2): 43-63.
- ZHAO P Q, WU Z F, DONG S J, et al. Research progress of contamination and toxic effects of microplastics in fish based on a statistical analysis of patterns of publications[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, 17(2): 43-63.
- [7] 周刚,徐晨焱,沈忱思,等. 微塑料在淀山湖水环境的污染分布、组成特征和生态风险[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(4): 214-224.
- ZHOU G, XU C Y, SHEN C S, et al. Distribution, composition and ecological risks of microplastics in surface water of the Dianshan Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(4): 214-224.
- [8] 李丹文. 丹江口水库微塑料的时空分布特征及生态风险评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- LI D W. Spatial and temporal distribution characteristics and ecological risk assessment of microplastics in Danjiangkou reservoir [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [9] 何文宣,李垒,李久义,等. 密云水库中微塑料的污染特征及生态风险评估[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(12): 122-135.
- HE W X, LI L, LI J Y, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of microplastics in the Miyun reservoir [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(12): 122-135.
- [10] 孙晓晨,易琳雅,汪楠,等. 微塑料在饮用水中的去除研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(6): 211-218.
- SUN X C, YI L Y, WANG N, et al. Research progress on the removal of microplastics in drinking water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(6): 211-218.
- [11] 姚情璐,杨超,翟宇辉,等. 环境水体中微塑料分析方法研究进展[J]. *净水技术*, 2022, 41(10): 23-28, 75.
- YAO Q L, YANG C, ZHAI Y H, et al. Research progress on analytical methods of microplastics in environmental water body [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(10): 23-28, 75.

- [12] 孙彦敏, 高惠敏, 徐春祥, 等. 环境中微塑料检测技术研究进展[J/OL]. 生态与农村环境学报, 2022; 1-11 (2022-11-25) [2026-06-14]. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0833>.
- SUN Y M, GAO H M, XU C X, et al. Research progress of microplastics detection methods in environment[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022; 1-11 (2022-11-25) [2026-06-14]. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0833>.
- [13] 李红岩, 张海峰, 李洁, 等. 饮用水中微塑料污染研究进展[J]. 净水技术, 2019, 38(7): 7-12.
- LI H Y, ZHANG H F, LI J, et al. Review of microplastics pollution in drinking water[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(7): 7-12.
- [14] 许龙, 王志峰. 某水厂中微塑料的赋存及去除特性[J]. 净水技术, 2020, 39(7): 109-113, 120.
- XU L, WANG Z F. Occurrence and removal of microplastics in a water treatment plant[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(7): 109-113, 120.
- [15] 王赛, 张岚, 陈永艳, 等. 饮用水处理技术去除微塑料的效果及进展[J]. 净水技术, 2021, 40(10): 20-25, 61.
- WANG S, ZHANG L, CHEN Y Y, et al. Effect and progress of microplastics removal in drinking water treatment process[J]. Water Purification Technology, 2021, 40(10): 20-25, 61.
- [16] 周惠林, 杨卫民, 李好义. 医用口罩过滤材料的研究进展[J]. 纺织学报, 2020, 41(8): 158-165.
- ZHOU H L, YANG W M, LI H Y. Research progress of filtering material for medical mask[J]. Journal of Textile Research, 2020, 41(8): 158-165.
- [17] 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: 118116. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118116.
- [18] PRIYANSHA G, MAHUA S, CHAYANIKA R, et al. Spatial and seasonal variation of microplastics and possible sources in the estuarine system from central west coast of India [J]. Environmental Pollution, 2021, 288: 117665. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117665.
- [19] LI S, WANG Y, LIU L, et al. Temporal and spatial distribution of microplastics in a coastal region of the Pearl River Estuary, China[J]. Water, 2021, 13(12): 1618. DOI: 10.3390/W13121618.

(上接第 26 页)

- SUN F, CHEN J N, ZENG S Y. Development and application of a multi-species water quality model for water distribution systems with EPANET-MSX[J]. Environmental Science, 2008(12): 3360-3367.
- [81] 陈国强, 龙天渝. 基于欧拉-拉格朗日分裂法的供水管网多组分水质模拟[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21): 69-74.
- CHEN G Q, LONG T Y. Multicomponent water quality simulation with axial dispersion solved by Eulerian-Lagrangian operator-splitting method in water distribution system[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21): 69-74.
- [82] 周煜杰. 供水管网中灰口铸铁管的管垢特性与管段力学性状初探[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- ZHOU Y J. Brief research on the pipe scales and the mechanical state of cast iron pipes corrosion in water distribution systems [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [83] 翟参. 供水管道小孔漏损分析和数值模拟研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- ZHAI S. Analysis and numerical simulation of small orifice leakage in water supply pipeline [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [84] 胡群芳, 苏航剑, 方宏远, 等. 供水管网大口径管道爆管事件形成机理与精细模拟[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 153-160, 150.
- HU Q F, SU H J, FANG H Y, et al. Dynamic simulation and mechanical analysis of large-diameter water main burst [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(2): 153-160, 150.
- [85] 王丽萍, 张宛静, 赵帅, 等. 竖向荷载作用下承插式球墨铸铁供水管道接口破损试验与数值模拟研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(2): 232-239.
- WANG L P, ZHANG W J, ZHAO S, et al. Experiment and numerical simulation study on socket and spigot joint damage of ductile iron water supply pipeline under vertical loading [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(2): 232-239.