

论述与研究

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 07. 001

邯郸市不同污水处理厂进水微塑料赋存特征及去除

李凯铭¹, 齐杰¹, 孟鑫^{1,2}

(1. 河北工程大学 河北省水污染控制与水生态修复技术创新中心, 河北 邯郸 056038;

2. 河北工程大学 污水处理及资源化利用河北省工程研究中心, 河北 邯郸 056038)

摘要: 以邯郸市两座采用不同工艺的污水处理厂为研究对象,考察了进水中微塑料(MPs)的丰度特征以及各处理单元对不同形状、粒径、颜色和类型的微塑料的去除效果。采用密度浮选和消解分离提取MPs,经体视显微镜观察并结合傅里叶变换显微红外光谱仪获得其赋存特征。结果表明,进水中的微塑料主要为纤维状,优势粒径集中在0~0.5 mm,聚合物类型主要为聚丙烯(PP)和聚乙烯(PE)。两座污水处理厂对微塑料的总去除率分别为 $(83.62\pm 1.59)\%$ 和 $(93.20\pm 2.17)\%$,去除能力存在一定差异,这可能与采用的处理工艺不同有关。此外,纤维状MPs的去除难度最大;随MPs粒径降低,去除难度增加;颜色不是影响MPs去除效果的因素。

关键词: 污水处理厂; 微塑料; 赋存特征; 去除效果

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)07-0001-07

Occurrence Characteristics and Removal Patterns of Microplastics in the Influent of Different Wastewater Treatment Plants in Handan City

LI Kai-ming¹, QI Jie¹, MENG Xin^{1,2}

(1. Hebei Technology Innovation Center of Water Pollution Control and Water Ecological Remediation, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Engineering Research Center for Sewage Treatment and Resource Utilization, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: This study took two wastewater treatment plants (WWTPs) with different processes in Handan, China, as the research subjects, aiming to explore the abundance characteristics of microplastics (MPs) in their influent and the removal effects of different treatment units on microplastics of various shapes, sizes, colors, and types. Density flotation and dissolution separation were used to extract MPs, which were observed under a stereomicroscope and analyzed for their occurrence characteristics using a Fourier transform microscopic infrared spectrometer. The results indicated that the microplastics in the influent were mainly fibrous, with the dominant particle size of 0–0.5 mm, and the main polymer types were polypropylene (PP) and polyethylene (PE). The total removal rates of microplastics by the two WWTPs were $(83.62\pm 1.59)\%$ and $(93.20\pm 2.17)\%$, respectively. There was a difference in the removal ability of microplastics between two WWTPs, which was related to their different treatment processes. Fibrous MPs were the most difficult to remove; as the size of MPs decreased, the difficulty of removal

基金项目: 河北省科技厅中央引导地方科技发展资金资助项目(236Z3603G); 河北省高校青年基金资助项目(QN2022075)

通信作者: 孟鑫 E-mail: xinmeng@rcees.ac.cn

increased; color was not a factor affecting the removal of MPs.

Key words: wastewater treatment plant; microplastics; occurrence characteristics; removal efficiency

粒径小于5 mm的塑料或化学纤维被称为微塑料(MPs)^[1],其广泛存在于江流、河流、湖泊及大气中^[2-4]。目前在人体中也检测到微塑料的存在^[5],微塑料会对生物体的消化、呼吸、生殖和代谢等功能构成严重威胁。据统计,全球每年生产约 3×10^8 t塑料,但仅有21%的塑料垃圾被回收,其余79%则均进入了环境中^[6]。

近年来,对城市污水处理厂(WWTP)中MPs分布的研究逐渐增多,许多国家和地区的WWTP中发现MPs的研究证实了污水处理厂是MPs从城市水系统进入自然环境的关键入口之一^[7-9]。根据目前对污水处理厂MPs的研究,不同来源的MPs去除率均高于90%,表明大多数MPs都能被有效去除。但不同污水处理厂的去除效果存在差异,如北京某污水处理厂的一级、二级、三级处理对MPs的去除率分别为27.1%、70.8%和91.7%^[10],而上海某污水处理厂的去率分别为49.72%、12.92%和0.78%^[11]。

基于以上分析,为探究北方内陆城市污水处理厂中微塑料的赋存情况、形状与粒径对去除效能的影响,以及各处理单元的去除效能,以邯郸市采用不同工艺的两座污水处理厂为研究对象,对其微塑料的分布特征及全流程去除效能进行了系统分析。该研究填补了北方内陆城市污水处理厂微塑料去除特征的空白,明确了不同处理工艺对微塑料的去除贡献,为华北地区污水处理厂微塑料污染控制提供了基础数据和科学依据,对我国城市污水处理厂微塑料污染特征研究也具有一定借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 采样地点

邯郸市东污水处理厂(DWWTP)由一期工程和扩建工程于2016年合并而成。其中一期工程为我国首座采用三沟式氧化沟工艺建设的二级污水处理厂,设计总处理规模为 10×10^4 m³/d。一期工程在2018年新建了 6×10^4 m³/d再生水配套工程,以高效沉淀池+V型滤池作为深度处理工艺。扩建工程生化处理为新建改良型氧化沟工艺,原Multiflo高效沉淀池+生物滤池作为深度处理工艺,改造后出水水

质符合国家一级A标准。当前,该厂合并后的处理能力为 16×10^4 m³/d,主要收集主城区东南部46 km²服务范围内的城镇生活污水,服务人口约73万人。

邯郸市西污水处理厂(XWWTP)包含一期工程和二期工程。一期工程采用改良型推流式氧化沟工艺,建设规模为 10×10^4 m³/d,其中生活污水约占65%,工业废水约占35%。二期工程采用A²O+反硝化滤池工艺。该厂位于邯郸市主城区西北部,担负着京广铁路以西,环路以内和京广铁路以东、沁河以北、滏阳河以西、北环路以南范围约50 km²的生活污水处理任务。

1.2 样品采集与处理

选择邯郸东污水处理厂扩建工程和西污水处理厂二期工程两条生产线,各设置了4个采样点(见图1),用于分析一、二、三级处理前后微塑料的赋存与去除特征。考虑到瞬时样品代表性较差,因此采用了时间混合样,在2023年5月13日和11月20日的9:00、14:00和19:00分别在各采样点采集1 L水样,以3 L水样混合作为最终水样。

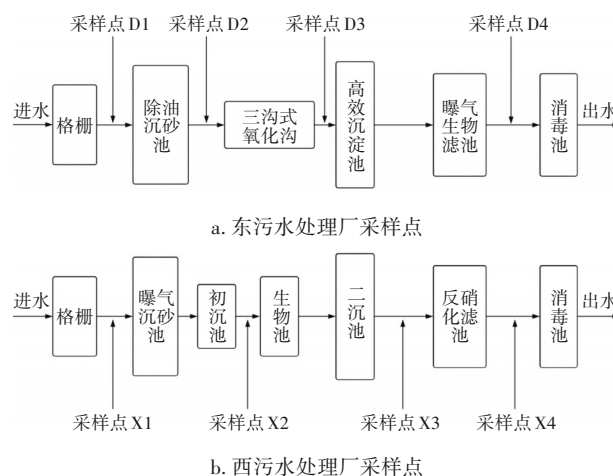


图1 工艺流程及取样点分布

Fig.1 Process flow and sampling points distribution

污水厂所采集的微塑料样品表面会吸附有机质及无机杂质,需进行消解浮选处理,并保证在处理时不会对微塑料形状、粒径等产生影响。实验中样品处理使用真空泵,首先将水样通过0.45 μm乙酸硝酸纤维滤膜过滤,用100 mL过氧化氢(30%)冲

洗到烧杯中,放置于水浴锅中于60℃下水浴加热3 h进行消解,之后室温静置12 h。消解之后是密度分离,采用ZnCl₂浮选MPs,样品在饱和ZnCl₂中静置6 h,收集上清液100 mL,之后补充100 mL浮选液再静置6 h,再次收集上清液100 mL,将上清液用真空泵抽滤到0.45 μm乙酸硝酸纤维滤膜上,置于干净的培养皿中在烘箱中烘干,便于进一步观察鉴定。

1.3 样品鉴定

首先对MPs定量,将载有微塑料的滤膜置于载物台上,利用体式显微镜连续变倍观测微塑料形态、粒径等表观特征,通过显微镜附带软件拍照测量并记录。接着对MPs进行定性分析,将已挑选出的待测样品置于研钵中,加入适量干燥后光谱纯KBr研磨10 min,使用SPECAC红外压片机压片。最后置于IRAffinity-1S红外光谱仪进行扫描,将输出图谱与内置标准图谱做对比,命中率70%以上视为成功。

1.4 实验质控

为确保实验结果准确可靠,在样品采集、实验分析整个过程中,均穿着棉质实验服,佩戴手套。实验过程中均使用玻璃或不锈钢仪器,并提前用超纯水润洗三次。中途等待实验阶段均用锡纸将敞口容器包裹或玻璃皿覆盖,避免空气中的微塑料导致的实验误差。同时设置空白对照组,采用与样品预处理相同的方法对超纯水进行处理,经检测未发现微塑料成分。

2 结果与讨论

2.1 污水厂对微塑料的去除

经测定,DWWTP和XWWTP进水中的微塑料丰度分别为(49.5±13.44)和(52.5±6.36)个/L,出水中的丰度分别为(8±1.41)和(3.5±0.71)个/L,去除率分别为(83.62±1.59)%和(93.20±2.17)%。两座污水处理厂对微塑料的去除率存在差异可能与工艺和操作参数不同有关^[12]。表1展示了国内外部分城市污水处理厂进出水微塑料丰度与去除效果的比较。总体而言,中国城市污水处理厂的微塑料去除率差异很大,与韩国、瑞典和芬兰等国相比,去除率超过90%的地区较少,中国城市污水处理厂的微塑料去除率仍有很大的提升空间。与国内外其他研究相比,邯郸两座污水处理厂进水中的微塑料丰度和去除率处于中等水平。

表1 国内外污水处理厂进出水MPs丰度的比较

Tab.1 Comparison of influent and effluent MPs concentrations in domestic and international wastewater treatment plants

研究区域	处理能力/ (m ³ ·d ⁻¹)	进水丰度/ (个·L ⁻¹)	出水丰度/ (个·L ⁻¹)	去除率/%
长沙 ^[13]	1 000	36.2~141.5	1.3~42.5	76.9~98.2
合肥 ^[14]	10×10 ⁴	101.9±17.6	18.2±3.6	87.7
贵阳 ^[15]	—	32.5±1.0	8.8±5.1	73.0
南京 ^[16]	15×10 ⁴	10.30	0.24	97.7
哈尔滨 ^[17]	60×10 ⁴	126.0±14.0	30.6±7.8	75.7
郑州 ^[18]	30×10 ⁴	16.0	2.9	81.9
泰国 ^[19]	15.7×10 ⁴	26.6±11.8	14.8±4.6	44.6
意大利 ^[20]	1.8×10 ⁴	3.64	0.52	86.0
韩国 ^[21]	1.3×10 ⁴	6 960	132	98.1
伊朗 ^[22]	28×10 ⁴	9.2	0.84	90.9
芬兰 ^[23]	—	6.9	0.005	99.9
加拿大 ^[24]	18×10 ⁴	31.1±6.7	0.5±0.2	98.3

2.2 进水微塑料特征

2.2.1 微塑料形状分布特征

关于形状分布,两座污水厂有着类似的变化规律。对于XWWTP而言,纤维形态的MPs丰度最高,为(34±5.66)个/L,占比为64.8%;其次是碎片状MPs,丰度为(12.5±0.71)个/L,占比为23.8%;最后是薄膜状和颗粒状MPs,丰度和占比分别为(3.5±2.12)、(2.5±2.12)个/L和6.7%、4.7%。对于DWWTP,纤维、碎片、薄膜和颗粒状MPs丰度分别为(29±9.90)、(13.5±2.12)、(4±0)、(3±1.41)个/L,占比分别为58.6%、27.3%、8.1%和6.0%,其中纤维状MPs丰度最高,与XWWTP接近。

2.2.2 微塑料粒径分布特征

粒径分布分析结果表明,XWWTP中的微塑料以小粒径为主,0~0.5 mm和0.5~1 mm的微塑料丰度分别为(29.5±4.95)、(15.5±0.71)个/L,分别占总量的56.2%和29.6%;大粒径MPs(1~5 mm)的丰度最低,丰度为(7.5±0.71)个/L,占比为14.2%。在采用氧化沟工艺的DWWTP中,0~0.5、0.5~1、1~5 mm的MPs丰度分别为(18±7.07)、(17±5.66)、(14.5±0.71)个/L,分别占总量的36.4%、34.4%、29.2%。两座污水厂的MPs粒径分布相似,其中小粒径MPs(0~0.5 mm)的丰度最高。

2.2.3 微塑料颜色分布特征

进水中微塑料的颜色分布如图2所示。对于

XWWTP,透明、黑色、黄色、白色和蓝色MPs占比分别为51.4%、21.0%、15.2%、7.6%和4.8%,即透明MPs占比超过了总量的一半,比彩色MPs更为普遍。在DWWTP中,MPs颜色更为丰富,一共检测到7种颜色的MPs,分别为透明(25.3%)、蓝色(21.3%)、绿色(16.2%)、红色(13.1%)、黄色(12.1%)、黑色(7%)和白色(5%),依然为透明MPs占比最高。

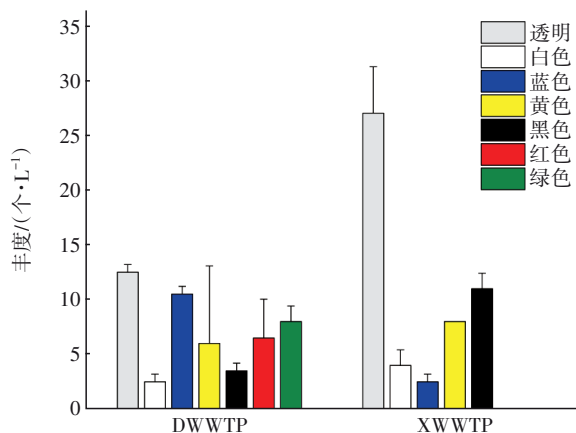


图2 进水中微塑料颜色丰度特征

Fig.2 Color abundance characteristics of microplastics in influent

2.2.4 微塑料材质分布特征

图3给出了两座污水处理厂进水MPs的材质分布。在傅里叶红外光谱仪中共检测出了9种不同材质的MPs。XWWTP进水中的MPs材质主要为聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP),占比分别为37.1%、33.3%;其余的为聚酯(PET)、PE-PP、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)、乙烯-丙烯酸共聚物(EAA)、苯乙烯异戊二烯共聚物(SIS)、尼龙(PA),占比分别为12.4%、4.8%、2.9%、2.9%、2.8%、1.9%和1.9%。

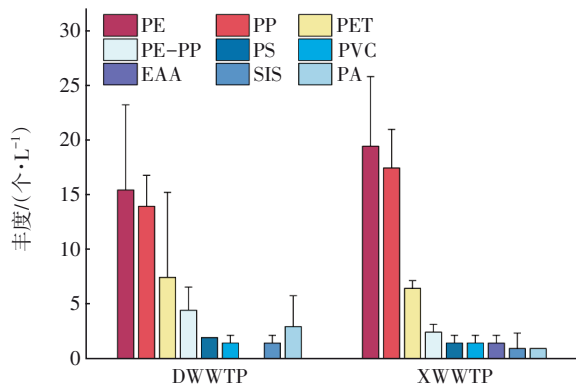


图3 进水中微塑料材质分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of microplastic materials in influent

在DWWTP中,PE和PP也分别以31.3%和28.3%的比例占据主导地位,PET、PE-PP、PS、PVC、SIS、PA分别占进水MPs总量的15.2%、9.1%、4.0%、3.0%、3.0%和6.1%。一方面,我国聚乙烯的生产和消费在过去五年中一直在增加,此外,聚乙烯和聚丙烯是最常见的通用塑料,常用于制造一次性塑料制品(如塑料袋、矿泉水瓶、一次性餐具等)以及家用产品,在使用过程中,这些塑料容易产生二次微塑料并进入水体,因而在污水处理厂等水环境中的检出丰度较高。

2.3 污水厂不同单元对微塑料的去除

在整个工艺流程中,MPs的丰度和去除率都发生了很大的变化(见表2)。总体上看,两座污水处理厂沿程的MPs丰度均呈现下降趋势。对于三级处理污水厂而言,其出水MPs丰度的差异主要是各级处理所采用的工艺不同所致^[15]。

表2 各采样点MPs的丰度及去除率

Tab.2 Abundance and removal rate of MPs at each sampling point

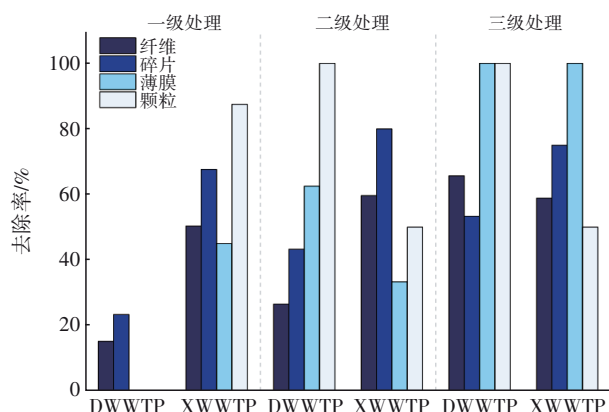
采样点	DWWTP		XWWTP	
	丰度/ (个·L ⁻¹)	去除率/%	丰度/ (个·L ⁻¹)	去除率/%
D2/X2	42±12.73	15.53±2.79	23.5±2.12	55.15±1.40
D3/X3	23±2.83	43.67±10.34	9.5±2.12	59.82±5.40
D4/X4	8±1.41	65.33±1.89	3.5±0.71	61.36±16.07

经过一级处理后,XWWTP对MPs的去除率达到了(55.15±1.40)%,而DWWTP的去除率只有(15.53±2.79)%,XWWTP的一级处理包含格栅、沉砂池和初沉池,而DWWTP只有格栅和沉砂池,研究表明拥有初沉池的处理工艺对MPs的去除效果更好^[25]。XWWTP和DWWTP的二级处理对MPs的去除率分别为(59.82±5.40)%和(43.67±10.34)%。XWWTP的二级处理采用AAO工艺,DWWTP采用氧化沟工艺,AAO和氧化沟工艺是两种截然不同的生物处理方法,因此对MPs的去除率也有所差异。AAO工艺通过让污水流经厌氧、缺氧、好氧池达到去除有机物的效果,氧化沟中污水和活性污泥在曝气渠道中不断循环流动,造成明显的浓度梯度,从而实现硝化和反硝化作用,但氧化沟中没有明显的沉淀区域,因此不能很好地去除MPs。两座污水处理厂的一级和二级处理对MPs的去除率差异较大,但三级处理的去除率相差较小。DWWTP的三级处

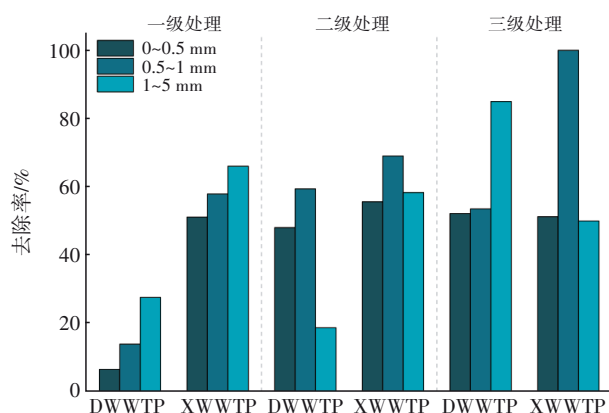
理系统在面对高丰度的MPs污染时,展现出了卓越的去除能力,其独特的高效沉淀池设计对MPs的去除起到积极效果。XWWTP的三级处理仅依赖反硝化滤池,导致其对MPs的削减量相对较低,但去除率与DWWTP相近。

2.4 各工段对不同微塑料的去除

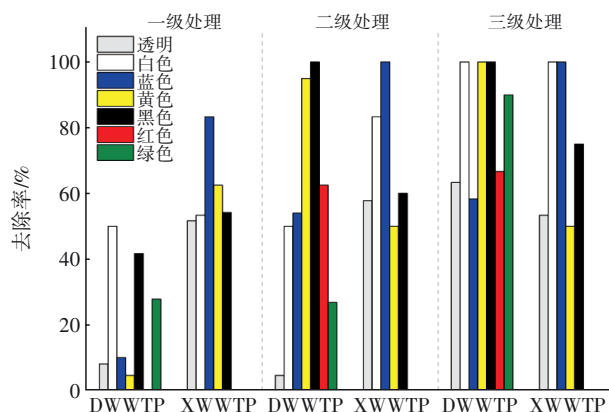
DWWTP和XWWTP各级处理对不同形状、尺寸、颜色及材质MPs的去除效果如图4所示。



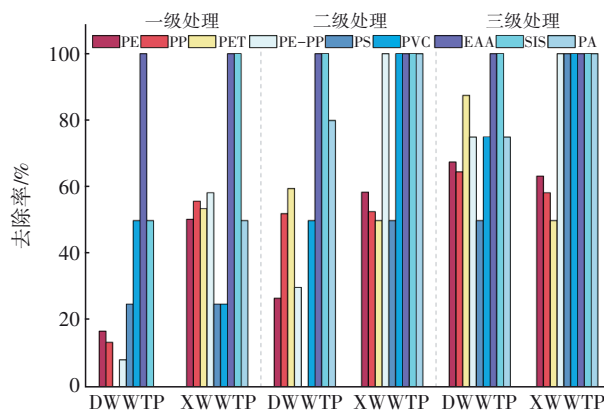
a. 对不同形状MPs的去除



b. 对不同粒径MPs的去除



c. 对不同颜色MPs的去除



d. 对不同材质MPs的去除

图4 各工段对MPs的去除率

Fig.4 Removal rate of MPs in each section

污水厂的三级处理工艺不仅大幅提升了对微塑料的去除效果,还揭示了微塑料物理特性的变化,从而深化了对污水处理厂MPs去除机制的认识。由图4(a)可以看出,去除率最高的是薄膜(两座污水厂均为100.00%),原因可能为薄膜状MPs粒径偏大,容易被滤池截留。其次是对颗粒状MPs的去除效果,DWWTP的去除率为100.00%,XWWTP为50.00%。接着是碎片状MPs,DWWTP去除率为53.33%,XWWTP为75.00%。去除率最低的为纤维状MPs,DWWTP去除率为65.69%,XWWTP为58.89%。大颗粒塑料的破碎可能是造成薄膜和颗粒状MPs的去除率比碎片和纤维高的原因。最终出水中的大粒径颗粒表现出更高的去除效率,见图4(b)。因此,在污水处理的各个阶段,大粒径MPs的破碎容易造成碎片状MPs的增多。同时,纤维状MPs是污水处理厂出水中最丰富的物种。

DWWTP的一级处理对纤维(15.51%)和碎片(22.22%)的去除率相对较低,与XWWTP的去除率(50.00%和68.00%)差异较大。这归因于DWWTP一级处理主要依赖格栅和沉砂池,而XWWTP一级处理则更为全面,包括了格栅、沉砂池和初沉池。

由图4(b)可知,一级处理对大粒径MPs(0.5~1和1~5 mm)的去除率比对小粒径MPs(0~0.5 mm)的高,但在二级处理中不同大小的MPs均被显著去除。在三级处理过程中,XWWTP对0.5~1 mm粒径的MPs展现出了极高的去除率,为100.00%。总体来看,随着MPs粒径的增加,其去除率提高,可以认为污水处理厂总体对1~5 mm的MPs去除效果比小于0.5 mm的好,所以,污水处理厂应重点聚焦去

除小于 0.5 mm 的 MPs。

由图 4(c)可知,两座污水处理厂对不同颜色 MPs 的去除效率并未表现出显著的差异性。因为无论 MPs 的颜色如何,经过污水处理流程后,它们的去除率均稳定保持在 68.00% 以上。这一现象表明颜色变化可能并非污水处理厂中生物污染和 MPs 碎片化现象差异的主要诱因。

由图 4(d)可知,在最终出水中,污水处理厂对 MPs 各主要组分的去除效果都很好,DWWTP 的平均去除率为 77.18%,XWWTP 的平均去除率为 85.74%。在 XWWTP 的一级处理中,EAA 和 SIS 丰度显著降低(均为 100.00%),DWWTP 进水中则未检测到 EAA。两种材质的 MPs 展现出的高去除率与先前的研究结果高度一致,这一发现明确揭示了 MPs 的去除性能主要受到其密度特性的显著影响。聚合物的密度对其在环境流体中漂浮或下沉能力有显著影响,通过物理沉淀方法能够将高密度的 MPs 轻易地从水中去除,从而显著提升去除效率。如同进水一样,最终出水中 PE 和 PP 的丰度依旧最高,三级处理中 XWWTP 对 PE 和 PP 的去除率为 63.33% 和 58.33%,DWWTP 为 67.53% 和 64.58%,因此污水处理厂应聚焦于对 PP、PE 类型的 MPs 的去除。

3 结论

① 邯郸市东污水处理厂进水中的 MPs 丰度低于西污水处理厂。两个污水处理厂进水中的 MPs 均是 0~0.5 mm 的比例最高。检测到的 MPs 主要为碎片和纤维状,以 PP 和 PE 聚合物为主。在两座污水处理厂中,透明、蓝色和黑色是 MPs 的主要颜色。

② 邯郸市东污水处理厂对 MPs 的去除率为 $(83.62 \pm 1.59)\%$,西污水处理厂的去除率为 $(93.20 \pm 2.17)\%$ 。DWWTP 采用高密度沉淀池和 V 型滤池技术进行三级处理,MPs 去除率为 $(65.33 \pm 1.89)\%$,XWWTP 的三级处理采用反硝化滤池,MPs 去除率为 $(61.36 \pm 16.07)\%$,差异不明显,说明高密度沉淀池结合 V 型滤池与单一反硝化滤池对 MPs 的去除效果相似。

③ 污水处理厂对不同颜色微塑料的去除率并未呈现出显著差异。相较于碎片和纤维微塑料,薄膜和颗粒微塑料的去除效果更好,这一现象与大颗粒塑料易于快速破碎的特性紧密相关。

参考文献:

- [1] 项晓方,谢显传,刘振中. 混凝对附着生物膜的微塑料的去除效能[J]. 中国给水排水,2024,40(1):1-7.
XIANG Xiaofang, XIE Xianchuan, LIU Zhenzhong. Effect of coagulation on the removal of microplastics attached to biofilm [J]. China Water & Wastewater, 2024,40(1):1-7(in Chinese).
- [2] ZHANG Z, DENG C, DONG L, *et al.* Microplastic pollution in the Yangtze River Basin: heterogeneity of abundances and characteristics in different environments [J]. Environmental Pollution, 2021, 287:117580.
- [3] WANG Y, HUANG J, ZHU F, *et al.* Airborne microplastics: a review on the occurrence, migration and risks to humans [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 107(4):657-664.
- [4] 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 Ruonan, SHI Xiaohong, LIU Yu, *et al.* Spatial distribution and influencing factors of microplastics in water of Ulansuhai [J]. China Environmental Science, 2022, 42(7): 3316-3324 (in Chinese).
- [5] DU J, ZHOU Q, LI H, *et al.* Environmental distribution, transport and ecotoxicity of microplastics: a review [J]. Journal of Applied Toxicology, 2021, 41(1): 52-64.
- [6] ENDO S, TAKIZAWA R, OKUDA K, *et al.* Concentration of polychlorinated biphenyls (PCBs) in beached resin pellets: variability among individual particles and regional differences [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 50(10): 1103-1114.
- [7] 郝飞麟,沈明卫. 污水厂二沉池运行条件对微塑料截留特性的影响[J]. 中国给水排水, 2024, 40(3): 38-45.
HAO Feilin, SHEN Mingwei. Effect of secondary settling tank operation conditions on retention characteristics of microplastics in wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2024,40(3):38-45(in Chinese).
- [8] 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.
- [9] ZIAJAHROMI S, NEALE P A, RINTOUL L, *et al.* Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: development of a new approach to sample

- wastewater-based microplastics [J]. *Water Research*, 2017, 112:93–99.
- [10] 邢薇, 刘梦瑶, 李頔, 等. 污水处理厂中微塑料的去除效能与全流程分析——以北京某下沉式三级污水处理厂为例[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(3): 1140–1147.
- XING Wei, LIU Mengyao, LI Di, *et al.* Removal efficiency and whole process analysis of microplastics in a wastewater treatment plant: taking an underground tertiary wastewater treatment plant in Beijing as an example [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(3):1140–1147(in Chinese).
- [11] 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 等. 大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除[J]. *环境科学*, 2019, 40(9): 4105–4112.
- JIA Qilong, CHEN Hao, ZHAO Xin, *et al.* Removal of microplastics by different treatment processes in Shanghai large municipal wastewater treatment plants [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9): 4105–4112 (in Chinese).
- [12] LONG Z, PAN Z, WANG W, *et al.* Microplastic abundance, characteristics, and removal in wastewater treatment plants in a coastal city of China [J]. *Water Research*, 2019, 155: 255–265.
- [13] LUO Y, XIE H, XU H, *et al.* Wastewater treatment plant serves as a potentially controllable source of microplastic: association of microplastic removal and operational parameters and water quality data [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 441: 129974.
- [14] MENG X, BAO T, HONG L, *et al.* Occurrence characterization and contamination risk evaluation of microplastics in Hefei's urban wastewater treatment plant [J]. *Water*, 2023, 15(4):686–691.
- [15] ZHANG B, WU Q, GAO S, *et al.* Distribution and removal mechanism of microplastics in urban wastewater plants systems via different processes[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 320:121076.
- [16] YUAN F, ZHAO H, SUN H, *et al.* Abundance, morphology, and removal efficiency of microplastics in two wastewater treatment plants in Nanjing, China [J]. *Environmental Science and Pollution*, 2021, 28(8): 9327–9237.
- [17] JIANG J, WANG X, REN H, *et al.* Investigation and fate of microplastics in wastewater and sludge filter cake from a wastewater treatment plant in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 746:141378.
- [18] REN P, DOU M, WANG C, *et al.* Abundance and removal characteristics of microplastics at a wastewater treatment plant in Zhengzhou [J]. *Environmental Science and Pollution*, 2020, 27(29): 36295–36305.
- [19] TADSUWAN K, BABEL S. Microplastic contamination in a conventional wastewater treatment plant in Thailand [J]. *Waste Management Research*, 2021, 39(5): 754–761.
- [20] PITTURA L, FOGLIA A, AKYOL C, *et al.* Microplastics in real wastewater treatment schemes: comparative assessment and relevant inhibition effects on anaerobic processes [J]. *Chemosphere*, 2021, 262: 128415.
- [21] KWON H J, HIDAYATURRAHMAN H, PEERA S G, *et al.* Elimination of microplastics at different stages in wastewater treatment plants [J]. *Water*, 2022, 14(15): 2404.
- [22] TAKDASTAN A, NIARI M H, BABAEI A, *et al.* Occurrence and distribution of microplastic particles and the concentration of di (2-ethyl hexyl) phthalate (DEHP) in microplastics and wastewater in the wastewater treatment plant [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280:111851.
- [23] TALVITIE J, MIKOLA A, KOISTINEN A, *et al.* Solutions to microplastic pollution: removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies [J]. *Water Research*, 2017, 123:401–407.
- [24] GIES E A, LENOBLE J L, NOEL M, *et al.* Retention of microplastics in a major secondary wastewater treatment plant in Vancouver, Canada [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 133: 553–561.
- [25] COLLIVIGNARELLI M C, MIINO M C, CACCAMO F M, *et al.* Microplastics in sewage sludge: a known but underrated pathway in wastewater treatment plants [J]. *Sustainability*, 2021, 13(22):100–106.

作者简介:李凯铭(1996–),男,河北邯郸人,硕士,主要研究方向为污水处理厂新污染物去除。

E-mail:chyeli@126.com

收稿日期:2025-01-25

修回日期:2025-02-15

(编辑:李德强)