

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

邢薇¹, 刘梦瑶¹, 李 岷², 魏凡钦², 左剑恶^{2*} (1.北京交通大学土木建筑工程学院, 水中典型污染物控制与水质保障北京市重点实验室, 北京 100044; 2.清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084)

摘要: 污水处理厂排放是微塑料进入自然环境的重要途径之一, 本研究对北京某下沉式三级污水处理厂八个工艺单元中微塑料的赋存特征和去除效能进行全流程分析。研究表明该厂赋存微塑料主要形态为纤维, 主要成分为聚丙烯、聚酯和聚乙烯, 尺寸 $\leq 500\mu\text{m}$ 的微塑料影响最为显著。该厂对微塑料的整体去除率为 91.7%, 主要依靠沉淀和截留过滤去除。双层平流沉淀池(二沉池)的去除效能最高, 而生化处理单元没有明显去除效果。整体上, 微塑料呈现从污水向污泥迁移的趋势。该厂最终出水中微塑料浓度为 1.3n/L, 成分为聚酯纤维, 出水排放没有引起周边受纳水体中微塑料浓度升高, 但干扰了下游地表水体中微塑料的成分。深度处理单元是降低受纳水体微塑料污染风险的重要保障。

关键词: 微塑料; 污水处理厂; 赋存特征; 三级处理; 聚酯纤维

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)03-1140-08

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. XING Wei¹, LIU Meng-yao¹, LI Di², WEI Fan-qin², ZUO Jian-e^{2*}

(1.Beijing Key Laboratory of Aqueous Typical Pollutants Control and Water Quality Safeguard, School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2.State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2021,41(3): 1140~1147

Abstract: The effluents from wastewater treatment plants (WWTPs) is one of the important pathways for microplastics entering natural environments. This study analysed the occurrence characteristics and removal efficiencies of microplastics in eight processes of an underground tertiary WWTP in Beijing. The results showed that microplastics in this WWTP were mainly in form of fiber, with major compositions of polypropylene, polyester and polyethylene and the primary size $\leq 500\mu\text{m}$. The overall removal efficiency of microplastics in this WWTP was 91.7%, which mainly benefits from interception, filtration and sedimentation units. Among all the processes, the double-deck horizontal sedimentation tank (the secondary sedimentation tank) showed the highest removal efficiency of microplastics, and biochemical treatment processes did not present significant removal efficiency. As a whole, the microplastics showed a migration trend from wastewater to sludge. In the effluent of this WWTP, the microplastic concentration was 1.3n/L with the composition of polyester fiber. The effluent discharge did not increase the microplastic concentrations in surrounding water body, but affected the microplastic compositions in downstream surface water. The results indicate that advanced treatment processes are necessary guarantees to control the pollution risk of microplastics in surrounding water.

Key words: microplastics; wastewater treatment plant; occurrence characteristics; tertiary treatment; polyester fiber

塑料污染是公认的世界性环境问题之一。尺寸小于 5mm 的塑料微粒和化学纤维被称作微塑料^[1], 微塑料的持久性和稳定性很强, 且比表面积大、吸附能力强, 易成为持久性有机物、重金属和病原菌的载体, 进入食物链后将产生危害人类健康的风险^[2-4]。

微塑料研究起源于海洋环境领域。目前已证实微塑料在海洋中广泛存在^[5-6], 据估计海洋表层水中的微塑料赋存量约为 7000~35000t^[7]。在河道入海口处, 研究发现其微塑料浓度明显高于海水样品, 从而证明河流是海洋微塑料污染的重要来源之一^[8]。近年来, 污水处理厂中微塑料污染问题同样引起了研

究者关注。Mintenig 等^[9]对德国 12 个城市污水处理厂的出水微塑料污染进行了研究, 发现污水处理厂每年向环境排放 $9 \times 10^7 \sim 4 \times 10^9$ n(个)微塑料。还有研究者对污水处理厂出水及附近水域中的微塑料浓度进行对比分析, 证实污水处理厂排放是微塑料进入自然环境的一个重要途径^[10-13]。如 Estahbanati 等^[14]在美国新泽西州的 Raritan 河分析了四个主要城市污水处理厂上游和下游的微塑料浓度, 发现原生微

收稿日期: 2020-07-23

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-007)

* 责任作者, 教授, jiane.zuo@tsinghua.edu.cn

塑料(指生产时尺寸即小于 5mm,常用于个人护理品添加)的浓度在下游显著增加,表明生活污水是地表水微塑料污染的重要来源.同时,人们也致力于研究污水处理厂中微塑料的整体去除效果.国外研究表明污水处理厂可以有效截留微塑料,截留率可达 90%以上^[15-17].Ziajahromi 等^[18]发现在澳大利亚,二级和三级污水处理厂对于微塑料的去除率分别为 66.7%和 90.4%.Talvitie 等^[19]发现芬兰某三级污水处理厂中,微塑料的去除率可高达 99%以上.

在我国,目前污水处理厂中微塑料相关研究仍处于起步阶段.2018 年,白濛雨等^[20]首次报道了我国某污水处理厂中微塑料的进、出水浓度和去除率.随后,Long 等^[21]和汪文玲等^[22]对厦门 7 个污水处理厂中微塑料的浓度、特征和去除效果进行了研究,结果表明微塑料去除率可达 79.3%~97.8%,其中在厦门筓筓污水处理厂中,一级和二级处理阶段对微塑料的去除率分别为 35.99%和 80.97%.陈瑀等^[23]对南京市某污水处理厂的进水、二级出水和三级出水中的微塑料进行分析,发现污水处理厂对微塑料的整体去除效能为 78.57%.此外,Li 等^[24]分析了来自我国 28 个污水处理厂的 79 个污泥样本,在这些样品中微塑料的浓度为 $(1.60\sim56.4)\times10^3\text{ n/kg}$ 干污泥.

可以看出,在现阶段研究者主要分析污水处理厂的微塑料排放量以及整个水厂或处理阶段对微塑料的整体去除率.然而,选用不同工艺会对微塑料在污水处理厂中的去除率产生显著影响,有必要在各个工艺单元中开展微塑料相关研究,但目前报道仍然很少.Talvitie 等^[25]对芬兰 4 个采用不同深度处理工艺的城市污水处理厂进行对比研究,发现膜生物反应器(MBR)、快速砂滤、溶气气浮和盘式过滤器技术对微塑料的去除率分别为 99%、97%、95%和 40%~98.5%,但该研究仅针对深度处理工艺开展.对污水处理厂全工艺流程中的微塑料赋存特征及不同处理单元对微塑料的去除效能开展深入研究,有助于全面解析污水处理厂对微塑料的截留和排放问题.

本研究在北京市某三级污水处理厂,对进水、八个工艺单元出水以及最终排泥中微塑料的形态、尺寸和成分进行检测分析,深入讨论了污水处理厂各工艺单元中微塑料的赋存特征,并明确了全流程中微塑料的去除效能,对于分析污水处理厂治理微塑

料污染的能力具有重要意义.此外,对该厂上、下游河道中微塑料的浓度及成分进行检测,解析污水处理厂微塑料排放对周边河道的影响,为分析河道微塑料污染源头,综合治理水环境微塑料污染问题奠定基础.

1 材料与方法

1.1 北京市某三级污水处理厂概况

该污水处理厂地处北京市城市副中心通州区,采用下沉式形式,一级处理工艺主要包括粗格栅、细格栅和膜格栅,二级处理主要包括三级 AO 工艺和双层平流沉淀池,深度处理采用高效沉淀池和超滤池.该厂出水标准执行北京市地方标准 B 级,水质可以达到地表 IV 类水标准.该污水处理厂服务人口 70 万人,日处理量 $18\times10^4\text{ t}$,出水中 $8\times10^4\text{ t}$ 作为再生水利用,其余 $10\times10^4\text{ t}$ 作为河道补给水排放^[26].

1.2 采样

本研究在该污水处理厂内共设 9 个水样采样点和 1 个泥样采样点;在出水入河口上、下游河道各设 2 个采样点;共计 14 个样品点位.采样点位置如表 1 所示.

表 1 采样点设置
Table 1 Sampling Point Setting

来源	样品编号	采样点位置
北京某三级污水处理厂	W1	污水厂进水
	W2	粗格栅出水
	W3	细格栅出水
	W4	膜格栅出水
	W5	三级 AO 第三个厌氧池内
	W6	三级 AO 第三个好氧池内
	W7	双层平流沉淀池出水
	W8	高效沉淀池出水
	W9	超滤池出水(即污水厂出水)
污水处理厂周边河道	S1	最终排泥
	U1	出水口上游约 500m 处
	U2	出水口上游约 50m 处
	D1	出水口下游约 1000m 处
	D2	出水口下游约 2000m 处

在采集样品时考虑到瞬时样品的代表性较差,因此在每个采样点均重复采样 3 次,但因样品量多,后续微塑料检测工作量大,因此将每个采样点 3 次采集的样品混合均匀后,再进行微塑料检测.在污水处理厂水样采样点,于 08:00、16:00、24:00 分别采

集 1L 样品, 再将 3L 样品混合均匀进行微塑料检测. 污泥采样点设置在污泥外运车间, 直接用锡纸袋从最终排泥口抓取样品. 在河道采样点, 采水器在不触碰岸沿、不接触河底的条件下, 取河道中部水倒入蓝盖瓶中.

1.3 预处理

将样品分为三类进行预处理. 对于一般水样, 用 600 目不锈钢滤膜进行抽滤后, 固相转移至用锡纸封口的烧杯中, 加入 30% 的 H_2O_2 溶液静置消解 3d; 消解后再次抽滤, 并在饱和 ZnCl_2 溶液中进行浮选, 重复 3 次. 对于污泥样品, 首先置于 80°C 烘箱中烘干, 之后再按照上述方法消解 7d 并浮选. 对于生化池样品, 取泥水混合样, 首先静置沉淀 24h 进行泥水分离; 上层液体按照一般水样进行处理; 下层泥水混合物在 9000r/min 离心 10min; 将离心管内液体进行抽滤, 将滤膜上的固体同离心管内泥样合并, 再消解 7d 并浮选.

1.4 检测

带有样品的滤膜自然风干后, 利用三目体视显微镜(SZN71, SDPTOP, 中国), 在 40 倍条件下观测. 通过目镜直接观测微塑料的形态和颜色, 通过 Toup View 软件(ToupTek Photonics, 中国)对微塑料进行拍照和尺寸测量, 并记录每一个微粒的编号、形态、颜色、尺寸以实现计数. 观测时采用蛇形扫描方式对整张滤膜进行完整观测, 以最大程度地保证没有遗漏. 对微塑料的形态主要分为纤维、碎片、薄膜、颗粒和小球五种, 尺寸测量以 μm 为单位.

在显微镜观察条件下将每个待检测微粒从滤膜上挑出, 放置在金刚石压池上, 压平后利用傅里叶变换红外光谱仪(Spectrum 400, PerkinElmer, 美国)的红外显微系统(Spotlight 400, PerkinElmer, 美国)进行扫描检测. 扫描波长范围在 750~4000nm, 选用透射模式, 每个样品扫描 16 次以减少干扰. 测得样品图谱通过 Spectrum 软件(PerkinElmer, 美国), 与 Sadtler 光谱数据库(Bio-Rad, 美国)进行比对分析. 所有微粒检测完毕后, 将显微镜调至 20 倍, 对全视野下是否仍有微粒残留进行复核, 如有遗漏则补充转移和计数.

1.5 实验质控

为防止实验过程中引入其他微塑料对实验造成干扰, 本实验采样及操作过程中避免接触塑料制品. 采样器、滤膜及实验过程中用于转移样品的各类

工具都选用不锈钢材质, 所有容器选用玻璃、陶瓷材质, 所有采样用蓝盖瓶均用锡纸密封住瓶口后再拧紧瓶盖. 预处理过程中所有敞口容器均用锡纸密封容器口, 烘干时均用锡纸密封容器盖, 带有样品的滤膜分装在玻璃培养皿中. 所有样品在转移过程中, 采用超纯水或对应溶液反复冲洗 3 次以转移全部样品. 在显微红外法检测过程中, 为检验对比软件和标准谱库的误差, 首先检测了已知成分的标准聚乙烯样品, 结果显示图谱相似度为 97.2%, 系统误差为 2.8%, 表明误差较小.

2 结果与讨论

2.1 污水处理厂不同工艺单元中微塑料特征分析

2.1.1 微塑料浓度及去除率分析 对该污水处理厂中九个水样(表征八个工艺单元、三个处理阶段)进行分析, 计算各工艺单元和处理阶段对微塑料的去除率及各工艺单元处理后微塑料累积去除率, 结果如表 2 所示.

表 2 不同工艺单元和处理阶段的微塑料去除率
Table 2 Microplastic Removal Efficiency in Different Treatment Processes and Stages

样品编号	工艺单元	微塑料浓度(n/L)	单元去除率(%)	处理阶段	阶段去除率(%)	累积去除率** (%)
W1	污水厂进水	16.0	—			0.0
W2	粗格栅	13.3	16.7	一级处理	27.1	16.7
W3	细格栅	21.7	-62.5			-35.4
W4	膜格栅	11.7	46.2			27.1
W5	厌氧池	32.7	-180.0	二级处理	60.0	-104.2
W6	好氧池	33.3	-2.0			-108.3
W7	平流沉淀池	4.7	86.0			70.8
W8	高效沉淀池	2.0	57.1	深度处理	71.4	87.5
W9	超滤池	1.3	33.3			91.7

“—”表示去除率为负, 即在此处理单元微塑料没有去除反而有所增加.

$$\text{*单元去除率} = \frac{\text{上一单元微塑料浓度} - \text{本单元微塑料浓度}}{\text{上一单元微塑料浓度}} \times 100\%$$

$$\text{**累积去除率} = \frac{\text{污水厂进水微塑料浓度} - \text{本单元微塑料浓度}}{\text{污水厂进水微塑料浓度}} \times 100\%$$

该厂一级处理阶段对微塑料的去除率为 27.1%. 其中粗格栅对微塑料的去除率仅为 16.7%, 主要是因为粗格栅间隙较大(15mm), 对微塑料的拦截作用有限. 在细格栅单元, 微塑料的浓度有所增加, 这可能是因为细格栅(间隙为 3mm)对尺寸较小的微塑料不

能起到明显的拦截作用,而尺寸较大的塑料可能在机械剪切力的作用下被破碎为微塑料.膜格栅是一种精细过滤装置,网格间隙在 1mm 以下,主要用于去除细小的纤维和毛发^[27],它是一级处理中最主要的微塑料处理单元,单元去除率达 46.2%.

在二级处理中,根据膜格栅出水浓度计算微塑料的整体阶段去除率为 60.0%,根据污水厂进水浓度计算微塑料累积去除率为 70.8%.值得注意的是,在厌氧池中,微塑料浓度明显增加,达到了进水的两倍.在好氧池中,微塑料浓度与厌氧池内基本相同.可见,微塑料并不会在生化处理阶段得到去除.分析微塑料浓度增加的主要原因,可能是由于活性污泥中存在微塑料,而本研究中厌氧池和好氧池样品为泥水混合样,回流污泥导致了生化池中微塑料浓度比进水更高,造成了微塑料累积.在平流沉淀池(二沉池)中,微塑料单元去除率达到了 86%,在所有八个工艺单元中最高,其主要依靠沉淀,通过泥水分离过程将微塑料大量去除.

在深度处理阶段,微塑料阶段去除率达 71.4%,累积去除率达 91.7%.在高效沉淀池中,投加 PAC 和 PAM 进行絮凝以进一步提高水质,根据结果可推测微塑料会被包裹进絮凝物中,随着沉淀作用得以去除.超滤膜由于孔径在 nm 范围,绝大部分微塑料都会被截留,但本研究中由于微塑料浓度在进入超滤池时已经很低(仅为 2.0n/L),且以纤维形态为主,超滤池的微塑料单元去除率并没有表现为很高数值,在 2.1.2 一节中将进一步深入分析.

总体来看,在八个工艺单元中,粗格栅、膜格栅、平流沉淀池、高效沉淀池和超滤池均对微塑料起到了去除作用.由于好氧池内的微塑料浓度并没有比厌氧池内降低,由此证实微塑料并不会在好氧池内发生生物降解.污水处理厂内微塑料的去除主要依靠沉淀和截留过滤等物理作用.其中,一级处理对微塑料的去除效果十分有限,二沉池和深度处理单元对微塑料的去除效果尤为显著.在现有研究中,并没有深入讨论二级处理中生化池和二沉池等不同工艺单元对微塑料的去除效果,而深度处理对微塑料的去除效能仍存在一定争议.有研究认为深度处理并不会对微塑料起到明显去除作用^[10,28],但也有研究表示深度处理对微塑料去除效果十分显著^[25,29-30].这主要是因为,不同污水处理厂的深度处理采用的

工艺各不相同,目前研究显示 MBR 工艺对微塑料的去除效果最好,单元去除率可达 99% 以上^[25,30].本研究结果表明,深度处理中的高效沉淀池和超滤池对于微塑料也具有明显去除效果,在微塑料较低浓度下仍起到了安全保障作用.此外,并不是所有污水处理单元均会对微塑料产生去除作用,污水处理厂内部是否会在运行过程中产生次生微塑料,仍是后续研究中值得探讨的一个问题.

2.1.2 微塑料形态特征分析 该污水处理厂 9 个水样采样点中共检出纤维、薄膜、碎片和颗粒四种不同形态的微塑料,未检出小球形态微塑料.其中纤维为长丝形态,截面积很小;薄膜为平面形态,柔软可卷曲;碎片为平面形态,形状不规则且质地较硬;颗粒呈立体且不规则状.每种形态在显微镜下的典型照片如图 1 所示.

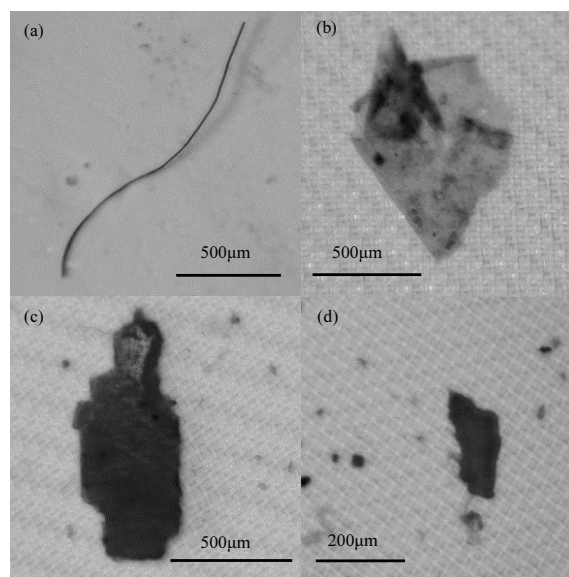


图 1 四种微塑料形态特征($\times 40$)

Fig.1 Four Morphological Characteristics of Microplastics

图 a 纤维;图 b 薄膜;图 c 碎片;图 d 颗粒

在所有污水处理厂样品中,纤维形态占比最高,其次为薄膜、碎片和颗粒形态.各样品中微塑料的形态分布如图 2 所示.可以看出,纤维形态分布最广,在 9 个样品中均有检出,而颗粒形态仅在两个生化池中被检出.

在细格栅处,碎片形态的微塑料被完全去除,但纤维和薄膜形态的有所增加,可推测这两种形态的微塑料有可能在机械作用下产生.在生化池中,薄膜和碎片形态的微塑料也有明显上升,且检出了颗粒

微塑料,这可能是受到了回流活性污泥的影响.在超滤池出水中,除了纤维形态的微塑料,其他形态均得以完全去除,这是因为超滤膜孔径小于检测的微塑料粒径,但纤维形态的微塑料尺寸是以纤维长度测量统计的,纤维微塑料横截面很小,部分纤维在竖直状态下可能通过超滤膜而无法被截留.综上所述,纤维形态的微塑料是该污水处理厂中占比最多、分布最广且最难以去除的微塑料形态.在其他研究中也报道称污水处理厂出水中纤维形态的微塑料浓度可以达到自然水体的 25 倍^[11].可见,如果能够进一步提高污水处理厂对纤维类微塑料的去除效果,将更有效地降低出水中的微塑料浓度,有助于实现水环境中微塑料的污染控制.

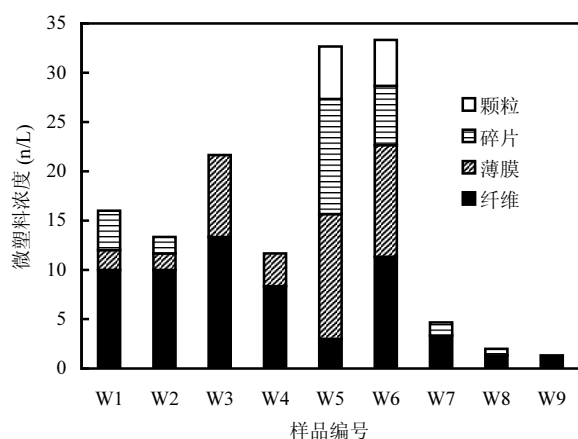


图2 不同工艺单元中的微塑料形态分布
Fig.2 Morphological Distribution of Microplastics in Different Processes

2.1.3 微塑料粒径分布特征分析 该污水处理厂中检出微塑料的尺寸范围在 40~4160 μm ,为了方便与其他文献进行对比^[31],按照四个尺寸区间进行了细分,各样品中微塑料的尺寸分布如图3所示.在该厂整体赋存的微塑料中,尺寸大于 1000 μm 的占比约为 20%,芬兰某城市污水处理厂的研究结果同样显示该厂大部分微塑料尺寸<1000 μm ^[29],与本研究结果一致.

图中可以看出,尺寸大于 1000 μm 的微塑料在膜格栅处得到了有效截留,但在生化池中又被再次检出,这与回流污泥中存在较高比例的大尺寸微塑料有关.尺寸 $\leq 300\mu\text{m}$ 和 300~500 μm 的微塑料在该污水处理厂不同工艺单元中分布最广,在 9 个样品中均有检出.在进水中,尺寸 $\leq 500\mu\text{m}$ 的微塑料占比达

到了 62.5%,这与国内相关研究结果相符合,但国内其他水厂中尺寸在 300 μm 以下的微塑料比例相对更高^[20-22].在深度处理阶段,主要存留尺寸 $\leq 500\mu\text{m}$ 的微塑料,可见小尺寸微塑料更难以被有效去除.由于尺寸较小时微塑料的污染特征更加明显,因此,本研究结果表明污水处理厂中的微塑料控制应重点关注 $\leq 500\mu\text{m}$ 的小尺寸微塑料.

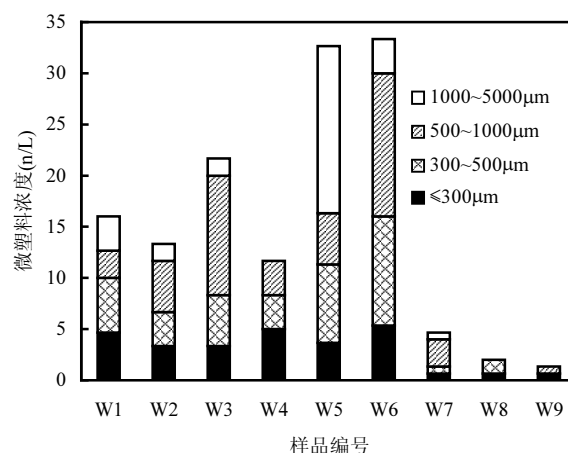


图3 不同工艺单元中微塑料的尺寸分布
Fig.3 Size Distribution of Microplastics in Different Processes

2.1.4 不同工艺单元中微塑料的主要成分 在水样采样点共检测出 11 种微塑料成分,其在样品中的分布情况如图4所示.

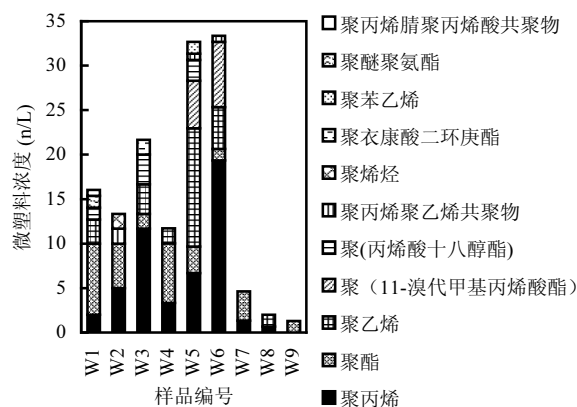


图4 不同工艺单元中微塑料主要成分分布
Fig.4 Composition Distribution of Microplastics in Different Processes

可以看出,含量最多的微塑料成分为聚丙烯、聚酯和聚乙烯,与其他研究结果基本一致^[18-19,21].这三

类微塑料不仅含量高,而且在污水处理厂各工艺单元中分布广泛,特别是在进水中占比约 80%,是污水处理厂中微塑料污染的主要成分。聚丙烯和聚乙烯是最常用的塑料材料,经常被用于制作一次性塑料制品(如塑料袋、矿泉水瓶、一次性餐具等)以及生活家居用品、塑料管材等^[29-30],在使用过程中很可能会产生次生微塑料进入水体,在湖水和污水处理厂等水环境中作为占比很高的微塑料成份得以检出^[29-30]。聚酯是衣物等纺织品的常用材料,主要以纤维态存在,而洗衣污水是生活污水的重要组成部分^[31],在其他污水处理厂中也有检出大量的聚酯纤维类物质^[19-20,22]。

厌氧池中检出的微塑料种类最为丰富,出现了进水中没有检测到的微塑料成分,如聚(11-溴代甲基丙烯酸酯),由于活性污泥回流,可能引入新的微塑料成分,将在 2.2 一节中进行讨论,但也不能排除在污水处理工艺单元中产生了新的微塑料类型。

在该厂最终出水中,仅有聚酯类物质,对其去除困难主要由于其形态几乎均为纤维状,污水处理厂最后一道保障超滤膜对纤维形态微塑料的去除效果不够理想。

2.2 污水处理厂最终排泥中的微塑料特征分析

经检测,该污水处理厂最终排泥中的微塑料含量为 $7.0 \times 10^3 \text{ n/kg}$ 干污泥,其特征分析如图 5 所示。

该污水处理厂污泥中检测出纤维、薄膜和碎片三种形态的微塑料。不同于该厂污水样品中纤维形态占比最高,也不同于其他污泥样品研究中纤维微塑料占比达到 60%以上^[24,34],在该污泥样品中薄膜形态占据了主导地位。分析原因,一方面在该厂污水样品中,薄膜形态的微塑料占比仅次于纤维,另一方面薄膜形态的微塑料去除率在该厂达到了 100%,而纤维微塑料仍在出水中残留,所以薄膜微塑料在污泥中占比最高是合理的。

在最终排泥中,尺寸在 500~1000 μm 的微塑料含量占据主导地位,而尺寸 $\leq 500\mu\text{m}$ 的微塑料含量仅占 14.3%,这说明尺寸 $\leq 500\mu\text{m}$ 的微塑料相对于大粒径微塑料更不容易通过沉淀和截留过滤作用从水中迁移至污泥。

在最终排泥中共检测出 6 种微塑料,其中含量最多的为聚乙烯,此外还检测出聚酯、聚(11-溴代甲基丙烯酸酯)、聚苯乙烯、聚丙烯聚乙

烯共聚物。该厂污泥主要由二级处理中的平流沉淀池排泥和深度处理中的高效沉淀池排泥组成,污泥中的微塑料成分与生化池和沉淀池基本对应。但该污水处理厂中含量最多的聚丙烯未被检出,可能是由于微塑料在污泥中分布不均匀造成的。

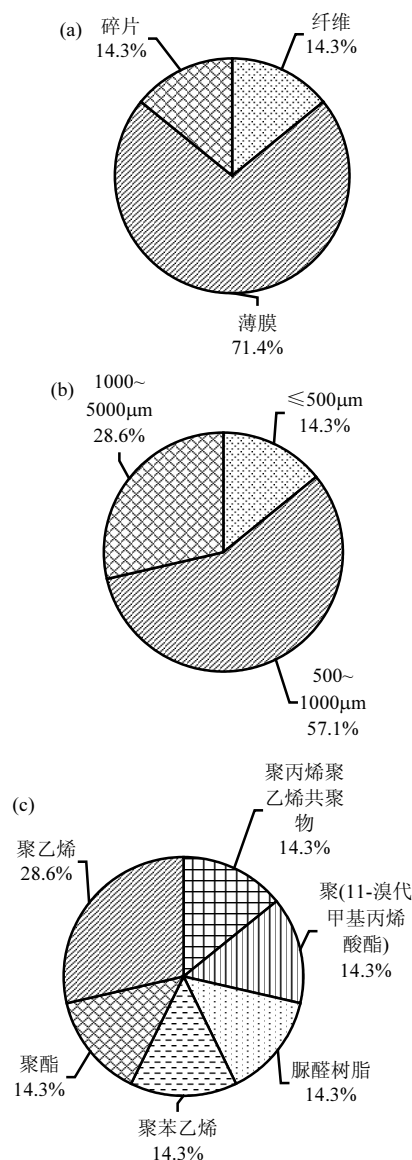


图 5 最终排泥中微塑料的形态、尺寸与主要成分特征
Fig.5 Morphology, Size and Composition of Microplastics in the Sludge Sample

2.3 污水处理厂中微塑料的平衡分析

该污水处理厂中微塑料当日平衡如图 6 所示。该污水处理厂日处理污水量为 $18 \times 10^4 \text{ t}$,根据浓度计算,每日有 $28.8 \times 10^8 \text{ n}$ 微塑料随进水进入该厂;每日排放出水 $10 \times 10^4 \text{ t}$ 作为河道补给水,相应排放 $1.3 \times 10^8 \text{ n}$ 微塑料至地表水体;此外,每日排放再生回用水

$8 \times 10^4 \text{ t}$, 相应应有 $1.0 \times 10^8 \text{ n}$ 微塑料进入回用水系统。该厂一级、二级和深度处理每日分别截留微塑料 7.7×10^8 , 12.6×10^8 和 $6.2 \times 10^8 \text{ n}$, 其中大部分被截留在厂内, 另一部分随污泥外排。通过每日外运污泥量 200 t (含水率约 80%), 可计算出该厂每日将有 $2.8 \times 10^8 \text{ n}$ 微塑料随着污泥外排。可见, 尽管最终出水和最终排泥中微塑料的浓度并不是很高, 但由于污水处理厂日处理量和日排放量较大, 每日向自然环境中排放共计 $4.1 \times 10^8 \text{ n}$ 微塑料, 对于环境造成微塑料污染的风险依旧不容忽视。

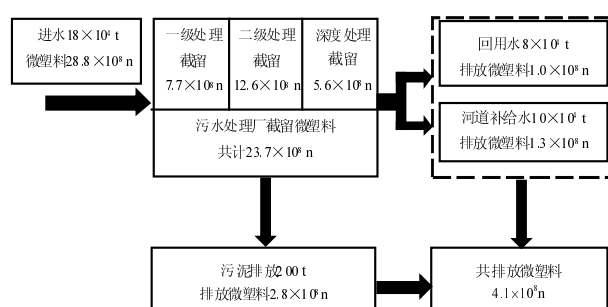


图6 污水处理厂中微塑料的每日平衡量

Fig.6 Daily Balance of Microplastics in the WWTP

2.4 污水处理厂微塑料排放对周边河道影响分析

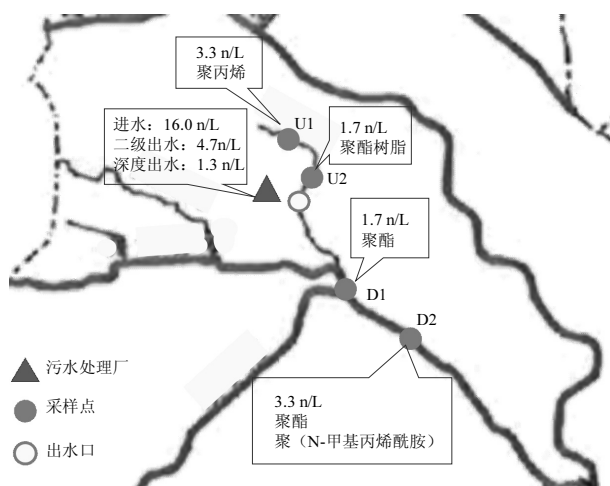


图7 受纳地表水中微塑料浓度及成分

Fig.7 Concentrations and Types of Microplastics in Receiving Surface Water

该污水处理厂周边受纳水体中微塑料浓度及主要成分如图7所示。可以看出, 该厂附近河道水检测到的微塑料浓度范围在 1.7~3.3 n/L, 而污水处理厂出水中微塑料浓度仅为 1.3 n/L, 略低于附近河道水中微塑料浓度本底值。从浓度方面考虑, 经过深度处理后, 该厂出水排放并没有造成河道水微塑料浓度

在下游大幅增加。但需要指出, 污水处理厂二级出水中微塑料浓度为 4.7 n/L, 若生活污水在二级处理后直接排放, 可能造成受纳水体中微塑料浓度的持续升高, 该厂深度处理工艺单元对于降低受纳水体中微塑料污染风险起到了重要的安全保障作用。

从微塑料成分方面进行分析, 发现在污水处理厂出水口下游的两个位置 D1 和 D2 处都检测到了聚酯纤维, 而上游中却并未检出。聚酯纤维正是该厂出水中残存的微塑料成分, 由此可见污水处理厂排放的微塑料可使自然水体中微塑料污染受到干扰, 成分增加。更深层的讨论需要通过大量多次采集相关样品, 在开展微塑料检测后进行溯源分析, 有待进一步研究。

3 结论

3.1 该厂对微塑料的整体去除率为 91.7%; 一级、二级和深度处理阶段对微塑料的去除率分别为 27.1%、60.0% 和 71.4%, 三级污水处理厂对除纤维以外的微塑料的除去效果接近 100%。

3.2 微塑料在污水处理厂中的去除主要依靠沉淀和截留过滤作用, 所有工艺单元中, 平流沉淀池的单元去除率最高, 为 86.0%; 微塑料在生化处理单元没有被去除, 整体呈现出从污水向污泥迁移的趋势。

3.3 该厂出水中的微塑料浓度为 1.3 n/L, 排放形态为纤维、成分为聚酯、尺寸大部分 $< 500 \mu\text{m}$; 出水排放没有引起下游河道水中微塑料浓度升高, 深度处理阶段是降低受纳水体微塑料污染风险的重要安全保障。

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, 2004, 304(5672): 838.
- [2] Brennecke D, Duarte B, Paiva F, et al. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, 178: 189–195.
- [3] Barnes D K A, Walters A, Gonçalves L. Macroplastics at sea around Antarctica [J]. Marine Environmental Research, 2010, 70(2): 250–252.
- [4] 丁剑楠, 张闪闪, 邹华, 等. 淡水环境中微塑料的赋存、来源和生态毒理效应研究进展 [J]. 生态环境学报, 2017, (9): 1619–1626. Ding Jiannan, Zhang Shanshan, Zou Hua, et al. 2017. Occurrence, source and ecotoxicological effect of microplastics in freshwater environment [J]. Ecology and Environmental Sciences, 26(9): 1619–1626.
- [5] Goldstein M C, Rosenberg M, Cheng L. Increased oceanic microplastic debris enhances oviposition in an endemic pelagic insect [J]. Biology Letters, 2012, 8(5): 817–820.
- [6] 王佳佳, 赵娜娜, 李金惠. 中国海洋微塑料污染现状与防治建议 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(7): 3056–3063. Wang J J, Zhao N N, Li J H, et al. Current situation of marine microplastics pollution and prevention proposals in China [J]. China

- Environmental Science, 2019,39(7):3056–3063.
- [7] Cózar A, Echevarría F, González-Gordillo J I, et al. Plastic debris in the open ocean [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014,111(28):10239–10244.
- [8] Zhao S, Zhu L, Wang T, 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.
- [9] Mintenig S M, Int-Veen I, Löder M G J, et al. Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging [J]. Water Research, 2017,108:365–372.
- [10] 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.
- [11] Talvitie J, Heinonen M, Pääkkönen J P, et al. Do wastewater treatment plants act as a potential point source of microplastics? Preliminary study in the coastal Gulf of Finland, Baltic Sea [J]. Water Science and Technology, 2015,72(9):1495–1504.
- [12] Magnusson K, Norén F. Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant [J]. IVL Swedish Environmental Research Institute, 2014,C55:22.
- [13] Murphy F, Ewins C, Carbonnier F, et al. Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment [J]. Environmental Science and Technology, 2016,50(11):5800–5808.
- [14] Estahbanati S, Fahrenfeld N L. Influence of wastewater treatment plant discharges on microplastic concentrations in surface water[J]. Chemosphere, 2016,162:277–284.
- [15] Prata J C. Microplastics in wastewater: State of the knowledge on sources, fate and solutions [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018,129(1): 262–265.
- [16] Li J, Liu H, Paul Chen J. Microplastics in freshwater systems: A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection [Z] (2018).
- [17] 许 霞,侯青桐,薛银刚,等.污水厂中微塑料的污染及迁移特征研究进展 [J]. 中国环境科学, 2018,38(11):4393–4400.
- Xu X , Hou Q T , Xue Y G , et al. Research progress on the transference and pollution characteristics of microplastics in wastewater treatment plants [J]. China Environmental Science, 2018, 38(11):4393–4400.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 白濛雨,赵世焱,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.
- [21] 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.
- [22] 汪文玲,龙邹霞,余兴光,等.厦门市筴筴污水处理厂中微塑料的特征研究 [J]. 海洋环境科学, 2019,2:205–210.
- Wang W L, Long Z X, Yu X G, et al. Microplastics characteristic in Yundang Wastewater Treatment Plant of Xiamen [J]. Marine Environmental Science, 2019,2:205–210.
- [23] 陈 瑀,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, Su L H, et al. Occurrence characteristics of microplastics in Nanjing urban wastewater treatment plant. [J]. China Environmental Science, 2020,40(9):3835–3841.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 侯 锋,王凯军,邵彦青,等.北京碧水下沉式再生水厂升级改造及生态综合体建设 [J]. 中国给水排水, 2017,33(10):54–58.
- Hou F, Wang K J, Shao Y Q, et al. Upgrading project of Bishui Underground Wastewater Treatment Plant and ecological complex construction [J]. China Water & Wastewater, 2017,33(10):54–58.
- [27] 高 颖,王 冰,李学义.膜格栅——用于保护膜生物反应器的精细过滤装置 [C]. 全国城镇污水处理及污泥处理处置技术高级研讨会论文集, 132–138.
- Gao Y, Wang B, Li X Y. Membrane grid—a fine filtration device used to protect the membrane bioreactor [C]/National Advanced Seminar on Urban Sewage Treatment and Sludge Treatment Technology, 132–138.
- [28] Carr S A, Liu J, Tesoro A G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants [J]. Water Research, 2016, 91:174–182.
- [29] Lares M, Ncibi M C, Sillanpää M, et al. Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR technology [J]. Water Research, 2018,133:236–246.
- [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 and Technology, 2016,2(6):1064–1073.
- [31] 李小伟,纪艳艳,梅庆庆,等.污水处理厂污水和污泥中微塑料的研究展望 [J]. 净水技术, 2019,38(7):13–22,84.
- Li X W, Ji Y Y, Mei Q Q, et al. Review of microplastics in wastewater and sludge of wastewater treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2019,38(7):13–2,84.
- [32] Sruthy S, Ramasamy E V. Microplastic pollution in Vembanad Lake, Kerala, India: The first report of microplastics in lake and estuarine sediments in India [J]. Environmental Pollution, 2017,222:315–322.
- [33] Browne M A, Crump P, Niven S J, et al. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: Sources and sinks [J]. Environmental Science and Technology, 2011,45(21):9175–9179.
- [34] Mahon A M, O’Connell B, Healy M G, et al. Microplastics in sewage sludge: Effects of treatment [J]. Environmental Science and Technology, 2017,51(2):810–818.
- 致谢:** 本研究的采样工作及污水处理厂相关调研工作由信开水环境投资有限公司庞洪涛博士和李朋博士协助完成,在此表示感谢!
- 作者简介:** 邢 薇(1982-),女,陕西西安人,副教授,博士,主要从事水污染治理与修复技术的研究.发表论文 30 余篇.