

南京市污水处理厂中微塑料的赋存特征

陈 瑀^{1,2}, 张 宴³, 苏良湖¹, 赵 欣¹, 卜元卿¹, 李 辉⁴, 张圣虎^{1*}, 李 江^{2**} (生态环境部南京环境科学研究院, 江苏 南京 210042; 2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 南京大学环境学院, 江苏 南京 210023; 4. 北京百灵天地环保科技股份有限公司, 北京 100045)

摘要: 以南京市某污水处理厂及下游入江口作为研究对象, 对其中微塑料的赋存特征进行研究. 结果表明, 污水处理厂进水中微塑料以尼龙材质为主(71.43%), 颜色以黑色为主(54.76%), 形状以纤维状为主(38.10%), 尺寸以 50~500 μm 为主(69.05%), 丰度为 4.2n/L(个/L), 二级处理后污水中微塑料丰度为 1.6n/L, 出水微塑料丰度为 0.9n/L, 污水处理厂处理工艺对微塑料的去除效率为 78.57%. 入江口处污染负荷指数为 50.99, 处于较低水平, 由于污水处理厂出水持续排入, 微塑料造成的生态风险仍不可忽视. 本文研究结果为改进污水处理厂中微塑料去除工艺设计提供了基础数据.

关键词: 微塑料; 污水处理厂; 赋存特征; 去除效率

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)09-3835-07

Occurrence characteristics of microplastics in Nanjing urban wastewater treatment plant. CHEN Yu^{1,2}, ZHANG Yan³, SU Liang-hu¹, ZHAO Xin¹, BU Yuan-qin¹, LI Hui⁴, ZHANG Sheng-hu^{1*}, LI Jiang^{2**} (1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Beijing Larkworld Environmental Technology Incorporated Company, Beijing 100045, China). *China Environmental Science*, 2020, 40(9): 3835~3841

Abstract: The occurrence characteristic of microplastics in one wastewater treatment plant and its downstream inlet in Nanjing was investigated in this study. The results showed that the microplastics in the influent water had the following characteristics: 71.43% was made of nylon, the dominant color was the black (54.76%), fibres accounted for 38.10%, and the particle size was mainly in the range of 50~500 μm (69.05%). The abundance of microplastics in influent water, secondary treated sewage and effluent water of wastewater treatment plant were 4.2n/L, 1.6n/L and 0.9n/L, respectively. The removal efficiency of microplastics in this treatment plant was 78.57%. Despite the low pollution load index (50.99) at the river entrance, the potential ecological risks caused by microplastics released from the waste water treatment plant could not be ignored due to the continuous discharge of effluent. The results could provide reference data for the improvement of design on microplastic removal processes in wastewater treatment plants.

Key words: microplastics; wastewater treatment plants; occurrence characteristic; removal rate

塑料作为一种材料被广泛用于人类的日常生活与生产, 据统计, 2018 年世界塑料制品产量达到 3.59 亿 t, 而中国作为世界上最大的塑料生产国, 塑料生产比重占世界塑料生产比重的 30%^[1]. 废弃的塑料制品在环境中难以被降解, 随之而来产生的各种环境问题在近些年受到广泛关注^[2]. 其中, 微塑料作为塑料在使用、废弃过程中产生的一种新型污染物, 在 2010 年就被欧洲学术界和政府列为需要重点关注的全球性问题^[3]. 微塑料最早出现于 Thompson 等^[4]对水柱和沉积物中微小塑料颗粒的描述, 通常将粒径小于 5mm 的塑料颗粒定义为微塑料^[5]. 目前研究发现, 微塑料在天然水体^[6]、沉积物^[7]、污水处理厂^[8]、水生生物体^[9]等均有检出. 由于粒径小, 水生生物可以在不同营养水平食物网中摄入微塑料^[10], 现有研究表明, 微塑料对水生生物体有潜在的危害

作用^[11-12]. 因此对微塑料的相关研究十分必要.

研究发现, 污水处理厂是微塑料进入环境的重要来源^[13]. Park 等^[14]对韩国 50 个污水处理厂中的微塑料进行了调查, 结果表明其中 31 个污水处理厂对微塑料的去除效率为 98.7%~99.99%; Mintenig 等^[15]对德国下萨克森州 12 个污水处理厂废水中的微塑料进行了调查, 结果表明这 12 个污水处理厂排入水体中微塑料的总量为 $9 \times 10^7 \sim 4 \times 10^9$ n/a, 其中一个三级污水处理厂对微塑料的去除率可达 97%; 白濛雨等^[16]对上海市某污水处理厂的研究结果表明, 污水处理厂对微塑料的去除率为 55.6%, 每日出水中微

收稿日期: 2020-02-16

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0800705); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(GYZX190203)

* 责任作者, 张圣虎, 副研究员, zsh@nies.org; 李江, 教授, jli82@gzu.edu.cn

塑料含量为 1456 亿个;Lv 等^[17]对无锡某污水处理厂的研究结果表明,污水处理厂两套并行工艺对微塑料具有较高的去除,其中 MBR 系统对微塑料的去除率为 99.5%,氧化沟系统对微塑料的去除率为 97%。以上研究表明,虽然大部分污水处理厂对微塑料处理效能较高,但由于其出水水量大,故仍有许多微塑料通过污水处理厂出水进入到环境中。此外,相关研究表明,污水处理厂废水中含有一定量的持久性有机污染物(POPs)^[18]、重金属^[19]、耐药基因^[20]等污染物质,而微塑料可作为载体对这些污染物进行吸附富集^[21-22],因而将可能进一步增加微塑料对水生生物的潜在风险。目前国内对微塑料的相关研究尚处于起步阶段,对不同地区污水处理厂中微塑料的赋存特征及处理效能的研究相对较少。本研究选取南京市典型污水处理厂作为研究对象,对微塑料的赋存变化进行研究,以期对污水处理厂中微塑料去除的工艺改进提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究选取南京市典型三级污水处理厂,如图 1 所示,该污水处理厂主体工艺为 Unitank,深度处理采用“高效沉淀池+BAF 曝气生物滤池+纤维转盘滤池”,出水经过加氯消毒后排放。污水处理厂日处理能力 30 万 m³/d,服务范围内包括居民区、商业区、医院、学校等功能区,总服务面积约 54km²,总服务人口约 72 万人,处理污水类型为生活污水。污水处理厂出水下游 1000m 处为长江入江口。如图 1 所示,根据现场情况,在厂内设置 3 个采样点,另外在入江口处设置 1 个采样点。每个采样点分别在 3 个时段(08:00~10:00,11:00~13:00 和 14:00~16:00)进行采样,每次采集水样 4L,将每个点采集的水样混匀后取 10L 带回实验室,放至 4℃冰箱内保存。由于污水处理厂采样限制,并未设置平行样品。

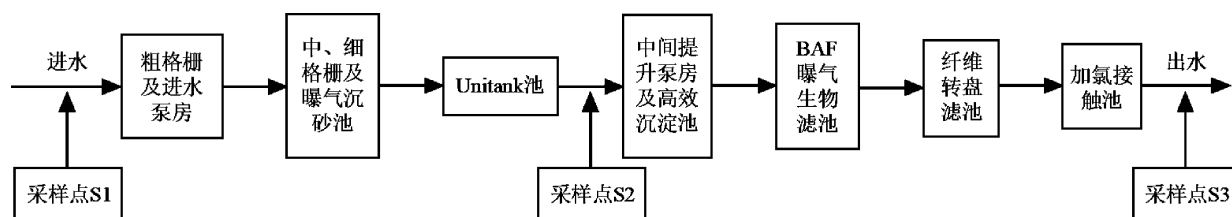


图 1 污水处理厂工艺流程图及采样点设置

Fig.1 Flow chart and sampling points setting of wastewater treatment plant

1.2 样品处理及检测

参照 Yan^[23]建立的方法,用 0.22μm 硝酸纤维滤膜对 10L 水样进行富集,然后将滤膜置于用超纯水清洗过的烧杯中,加少量超纯水浸没滤膜,超声 20min。样品处理采用湿式消解法,即向超声后的样品中加入 30~50mL(根据样品中有机物的含量而定)30%(质量分数)的 H₂O₂ 和 20g/L FeSO₄(H₂O₂ 与 FeSO₄ 体积比为 1:2.5),并于 40℃ 条件下消化 5h。将消解结束后的样品抽滤到滤膜上,用 NaI 溶液将膜上的物质洗脱,进行密度分离。洗脱后的溶液再次抽滤,将得到的滤膜存放在玻璃培养皿中。使用 NikonS MZ1000 体式显微镜测量,显微镜设置为×10 和×80,使用 DT2000 软件(vers.2.0)对图像进行拍照。在 200~1050nm 的波数范围内用拉曼光谱(Renishaw, inVia-Reflex)对待测颗粒进行光谱性质变化分析。根据谱图对比判断待测颗粒是否为微塑料。按照文献

[24]对微塑料进行形状、颜色等的划分。空间分辨率测量为小于 0.5μm。

1.3 质量控制

采样及实验过程中参与人员穿着棉质服装及实验服,采样及保存样品所用的器皿皆为玻璃材质,且使用前需使用超纯水清洗 3 次。实验全程在关闭门窗的条件下进行,尽量减少大气沉降对实验造成的干扰。在实验开始时以超纯水做空白对照,与实验样品一同进行处理。在空白实验中未检测到微塑料。微塑料回收率为 97.78%。

1.4 风险评估

根据已有研究对水体中微塑料的评估方法^[25-26,28],采用污染负荷指数(PLI)对微塑料进行风险评估,该方法最先用于河口污染水平的评价,后推广用于微塑料的风险评估。计算公式如下:

$$CF_i = C_i / C_{0i} \quad (1)$$

$$PLI = \sqrt{CF_i} \quad (2)$$

式中: CF_i 为微塑料的浓度因子; C_i 为微塑料的检测浓度, n/L; C_{0i} 为现有研究中微塑料的最小平均浓度, n/L; 根据 Isobe 等^[27]的研究, 取 5×10^{-4} n/L.

2 结果与讨论

2.1 污水处理厂进水微塑料含量

污水处理厂进水可以反映出该区域市政排水系统的污染状况, 因此对进水中微塑料的分析可以初步了解区域内微塑料的污染状况. 根据对检测结果的统计, 该污水处理厂进水的微塑料丰度为 4.2 n/L. 在贾其隆等^[28]对上海市服务人口 293 万的三级城市污水处理厂的研究中, 进水微塑料丰度为 (171.89 ± 62.98) n/L; 而 Murphy 等^[29]对英国格拉斯哥服务人口 65 万的污水处理厂的研究表明, 进水微塑料丰度为 (15.70 ± 5.23) n/L. 可以发现, 污水处理厂进水微塑料丰度与污水处理厂服务人口、城市发展水平等因素有关, 这与 Yonkos 等^[30]

的研究结果一致.

由图 2a 可知, 污水处理厂进水中主要检出了尼龙(PA), 聚氯乙烯(PVC), 聚丙烯酸(PAA). 不同材质微塑料分别占比为: PA(71.43%)>PVC(16.67%)>PAA(4.76%). 相关研究表明, PA 材料广泛应用于生活的各个领域, 包括纺织品、电气电子部件、汽车部件、薄膜等方面^[31], 因此 PA 可能来自于日常生活中对衣物、车辆等的清洗. PVC 作为常见的管材而广泛使用^[32]. PAA 作为常用的涂层材料, 广泛应用于汽车涂层、木材防腐等方面^[33].

由图 2b 可知, 污水处理厂进水中不同颜色微塑料分别占比为: 黑色(54.76%)>红色(14.29%)>蓝色(9.52%)>绿色(7.14%)>透明(2.38%). 其中, 占比最大的是黑色, 而现有研究结果中微塑料颜色以白色和透明为主^[34-36], 这可能与地区塑料制品使用习惯有关. 此外, 有研究发现, 捕食者更容易摄入与食物颜色相近的微塑料^[37]. 因此, 不同颜色微塑料对生物体的毒理研究有必要进一步开展.

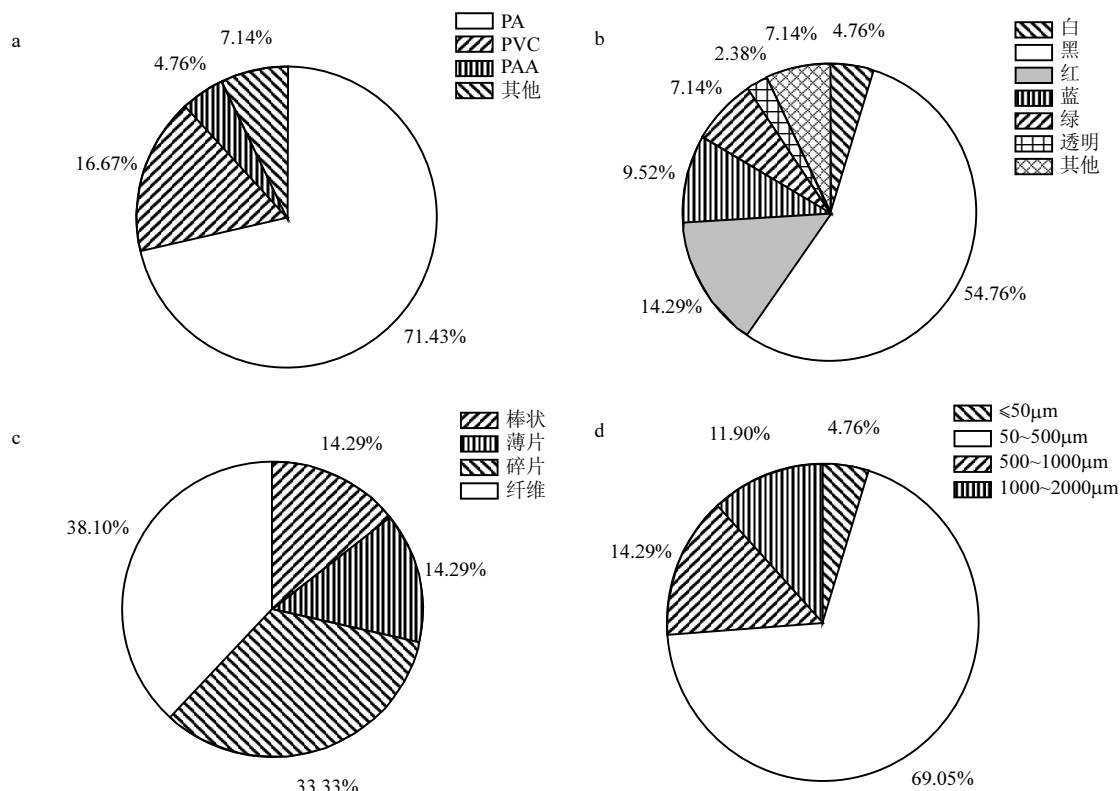


图 2 污水处理厂进水中微塑料的赋存特征

Fig.2 Occurrence characteristics of microplastics in wastewater treatment plant

PA 为尼龙; PVC 为聚氯乙烯; PAA 为聚丙烯酸

由图 2c 可知, 污水处理厂进水中微塑料形状包括纤维状、碎片状、薄片状和棒状. 进水中不同形状微塑

料分别占比为: 纤维(38.10%)>碎片(33.33%)>薄片(14.29%)=棒状(14.29%). 其中, 碎片和纤维占比相对较

高,可能是由于在洗衣机的使用过程中产生了大量纤维状微塑料.在日常生活中个人护理用品的使用会产生大量塑料微珠,而在污水处理厂进水中并未检出,可能的原因是大多数塑料微珠形状并不规则,常将其划分为碎片^[38].

由图 2d 可知,污水处理厂进水中不同尺寸微塑料分别占比为:50~500 μm (69.05%)>500~1000 μm (14.29%)>1000~2000 μm (11.90%)>小于 50 μm (4.76%).其中,占比最高的是尺寸在 50~500 μm 的微塑料,这与 Conley 等^[39]对污水处理厂进水中微塑料尺寸的研究类似,可能是由于大粒径的微塑料在迁移过程中逐渐破碎成较小颗粒的微塑料^[40],而小于 50 μm 的微塑料可能在生化处理过程中更容易被吸附去除,有待于进一步研究.

2.2 污水处理厂对微塑料的去除效能

现有污水处理厂处理工艺主要针对常规的理化指标,如 COD、总氮、总磷等设计的,并未对去除微塑料而设置专门的处理工艺.因此,分析现有污水处理厂对微塑料的去除效能十分必要.对城北污水处理厂内采样点微塑料丰度进行统计,Unitank 出水中微塑料丰度为 1.6n/L,污水处理厂出水中微塑料

丰度为 0.9n/L.污水处理厂进水经过二级处理后微塑料的去除效能可达 61.9%,污水处理厂整体对微塑料的去除效能可达 78.57%.

由图 3a 可知,在二级处理后,不同粒径的微塑料仍都存在于污水中,粒径 $\leq 50\mu\text{m}$ 的微塑料的占比由 5%提高到 6%,粒径在 1000~2000 μm 范围内的微塑料占比由 12%提高到 31%.经过深度处理后,粒径 $\leq 50\mu\text{m}$ 的微塑料和粒径在 1000~2000 μm 范围内的微塑料被完全去除,粒径在 50~500 μm 范围内的微塑料占出水中微塑料的 11%,粒径在 500~1000 μm 范围内的微塑料占出水中微塑料的 89%,这种情况可能是由于较大颗粒的微塑料在污水处理过程中破碎分解,或者是污水处理过程中某些构筑物自然磨损造成的.由图 3b 可知,薄片状微塑料在二级处理后完全去除,纤维状微塑料占比由 38%提高到 69%.经过深度处理后,除纤维状微塑料以外的其他形状微塑料被完全去除.出现这种情况可能是由于污水处理过程中曝气沉砂池对纤维状微塑料沉降效果差,生化处理过程中形成的污泥难以固定纤维状微塑料;另一方面,纤维转盘滤池的滤布在使用过程中也可能逐渐磨损产生少量的纤维状微塑料.

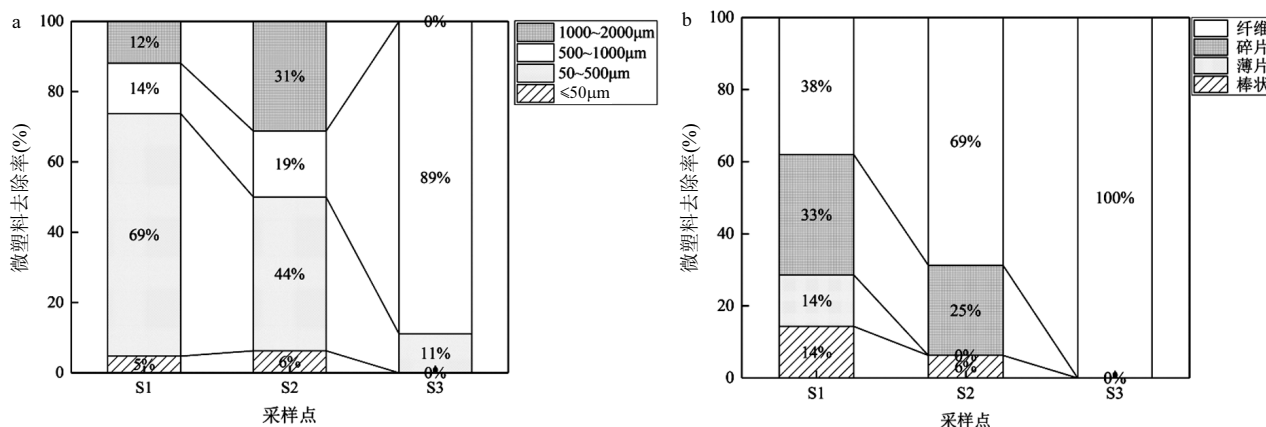


图 3 污水处理厂中微塑料去除情况

Fig.3 Removal rate of different microplastics in wastewater treatment plants

由于污水处理厂进水中微塑料的丰度与污水处理厂服务区域的人口有关,因此就污水处理厂服务人口、污水处理厂微塑料进水丰度与出水丰度、污水处理厂对微塑料的去除效能进行对比(表 1).

由表 1 可得,国外发达地区的污水处理厂对微塑料的处理效能相对较高,最高可达 99.9%;国内污水处理厂最高处理效能可达 80.97%.因此,国内污水

处理厂对微塑料的去除工艺仍有很大提升空间.可以发现,污水处理厂对微塑料的去除效能与污水处理厂对污水的处理程度并无明显联系,可能与污水处理厂使用的处理工艺有关.与本研究研究结果最为接近的是对土耳其亚达那的一座污水处理厂的研^[46],污水处理厂进水微塑料丰度仅相差 0.29n/L,处理效能相差 0.43%.

表 1 国内外污水处理厂微塑料去除效能对比研究

Table 1 Research on the removal efficiency of microplastics in wastewater treatment plants at home and abroad

地区	污水处理厂服务 区域人口(万人)	过滤介质最小孔径 (μm)	微塑料进水丰度 (n/L)	微塑料出水丰度 (n/L)	去除效能(%)	处理程度	参考文献
西班牙喀他赫纳	21	0.45	3.2 ± 0.67	0.31 ± 0.06	90.31	二级处理	[41]
加拿大温哥华	130	1	31.1 ± 6.7	0.5 ± 0.2	98.3	二级处理	[42]
美国南加利福尼亚州	—	20	0.88	8.8×10^{-4}	99.9	三级处理	[43]
芬兰	—	20	6.9	0.05	99	三级处理	[44]
澳大利亚悉尼	15	25	2.2	0.28	87.27	三级处理	[45]
土耳其亚达那	50	55	4.49	0.94	79	三级处理	[46]
朝鲜	24.5	106	13.87	0.28	97.98	二级处理	[47]
中国厦门	120	125	1.703	0.324	80.97	二级处理	[16]
中国无锡	—	25	0.28 ± 0.02	0.05 ± 0.01	82.1	三级处理	[17]
中国上海	355.76	0.45	226.27 ± 83.00	83.16 ± 17.22	63.25	三级处理	[28]
中国南京	72	0.25	4.2	0.9	78.57	三级处理	本研究

注：“—”表示无数据。

2.3 入江口处微塑料赋存特征与风险评估

入江口处微塑料与污水处理厂出水对比如表 2 所示。

入江口处纤维状微塑料的丰度下降了 0.2n/L,但增加了 0.6n/L 污水处理厂出水中未出现的碎片状微塑料;入江口处的 PA 丰度比污水处理厂出水中

PA 的丰度高 0.5n/L;入江口中 50~500 μm 尺寸的微塑料增加了 0.5n/L,500~1000 μm 尺寸的微塑料降低了 0.3n/L,且出现了 0.2n/L 1000~2000 μm 尺寸的微塑料.根据不同表征微塑料的丰度变化,可以推断除水体周围面源污染外,污水处理厂是水体中微塑料的重要来源。

表 2 污水处理厂出水与入江口微塑料丰度(n/L)

Table 2 Characterization of microplastics in effluent of wastewater treatment plant and the water into The Yangtze river(n/L)

位置	形状		材质				尺寸(μm)			微塑料总丰度
	纤维	碎片	PA	PVA	PET	其他	50~500	500~1000	1000~2000	
入江口	0.7	0.6	1.1	0.2	—	—	0.6	0.5	0.2	1.3
出水口	0.9	—	0.6	—	0.2	0.1	0.1	0.8	—	0.9

注：“—”表示未检出。

根据公式(1)和(2)对污水处理厂出水口及入江口处微塑料进行污染负荷评估.其中,污水处理厂出水处微塑料丰度为 0.9n/L,PLI 值为 42.43;入江口处微塑料丰度为 1.3n/L,PLI 值为 50.99.可以看出入江口处 PLI 值明显高于污水处理厂出水处 PLI 值,这一现象可能是由于微塑料的累积效应造成的.对比 Zhao 等^[48]对长江口微塑料的监测数据,对其进行污染负荷指数评估,得到长江口表层水体的 PLI 为 90.96.虽然本研究入江口处 PLI 值相对较低,但由于微塑料污染可能会随着时间推移而累积,因此对微塑料的监测研究仍需持续关注。

3 结论

3.1 本研究所选取污水处理厂微塑料进水丰度为

4.2n/L.进水微塑料材质以 PA 为主,占比 71.43%;进水微塑料颜色以黑色为主,占比 54.76%;进水微塑料形状以纤维状为主,占比 38.10%;进水微塑料尺寸在 50~500 μm 范围内丰度最高,占比 69.05%。

3.2 本研究所选取污水处理厂对微塑料的处理效能为 78.57%.其中,二级处理后对微塑料的去除效率可达到 61.9%。

参考文献:

[1] Plastics—the Facts 2019. An analysis of European plastics production, demand and waste data [R]. PlasticsEurope, 2019.

[2] Moharir R V, Kumar S. Challenges associated with plastic waste disposal and allied microbial routes for its effective degradation: A comprehensive review [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,208: 65–76.

- [3] Sutherland W J, Clout M, Côté I M, et al. A horizon scan of global conservation issues for 2010 [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2010,25(1):1-7.
- [4] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004,304(5672):838.
- [5] Arthur C, Baker J, Bamford H. Proceedings of the International research workshop on the occurrence, effects and fate of microplastic marine debris [M]. NOAA Technical Memorandum, 2009:1-49.
- [6] Han M, Niu X, Tang M, et al. Distribution of microplastics in surface water of the lower Yellow River near estuary [J]. *Science of the Total Environment*. 2020,707:135601.
- [7] Wu F, Pennings S C, Tong C, et al. Variation in microplastics composition at small spatial and temporal scales in a tidal flat of the Yangtze Estuary, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 699:134252.
- [8] 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.
- [9] Wang W, Gao H, Jin S, et al. The ecotoxicological effects of microplastics on aquatic food web, from primary producer to human: A review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019,173: 110-117.
- [10] Barnes D K A, Galgani F, Thompson R C, et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009,364(1526):1985-1998.
- [11] Lu Y, Zhang Y, Deng Y, et al. Response to comment on “uptake and accumulation of polystyrene microplastics in zebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver” [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,50(22):12523-12524.
- [12] Qiao R, Deng Y, Zhang S, et al. Accumulation of different shapes of microplastics initiates intestinal injury and gut microbiota dysbiosis in the gut of zebrafish [J]. *Chemosphere*, 2019,236:124334.
- [13] Ziajahromi S, Neale P A, Leusch F D L. Wastewater treatment plant effluent as a source of microplastics: review of the fate, chemical interactions and potential risks to aquatic organisms [J]. *Water Science and Technology*, 2016,74(10):2253-2269.
- [14] Park H, Oh M, Kim P, et al. National reconnaissance survey of microplastics in municipal wastewater treatment plants in Korea [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019,54(3):1503-1512.
- [15] 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.
- [16] 白濛雨,赵世焯,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, Zhao S, Peng G, et al. Occurrence, characteristics of microplastic during urban sewage treatment process [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(5):1734-1743.
- [17] Lv X, Dong Q, Zuo Z, et al. Microplastics in a municipal wastewater treatment plant: Fate, dynamic distribution, removal efficiencies, and control strategies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,225:579-586.
- [18] Song M, Jiang L, Zhang D, et al. Identification of biphenyl-metabolising microbes in activated biosludge using cultivation-independent and -dependent approaches [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018,353:534-541.
- [19] Lember E, Retšnoi V, Pachel K, et al. Combined effect of heavy metals on the activated sludge process [J]. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 2018,65(4):305.
- [20] Eramo A, Morales Medina W R, Fahrenfeld N L. Viability-based quantification of antibiotic resistance genes and human fecal markers in wastewater effluent and receiving waters [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,656:495-502.
- [21] Chua E M, Shimeta J, Nugagoda D, et al. Assimilation of polybrominated diphenyl ethers from microplastics by the marine amphipod, *allorchestes compressa* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014,48(14):8127-8134.
- [22] Nakashima E, Isobe A, Kako S I, et al. Quantification of toxic metals derived from macroplastic litter on Ookushi Beach, Japan [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012,46(18):10099-10105.
- [23] Yan Z, Zhao H, Zhao Y, et al. An efficient method for extracting microplastics from feces of different species [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020,384:121489.
- [24] 赵世焯.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.
- Zhao S. Microplastic Contamination of some key estuaries in China and the approach for analyzing microplastic in marine snow [D]. Shang Hai: East China Normal University, 2017.
- [25] Xu P, Peng G, Su L, et al. Microplastic risk assessment in surface waters: A case study in the Changjiang Estuary, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*. 2018,133:647-654.
- [26] 徐 沛,彭谷雨,朱礼鑫,等.长江口微塑料时空分布及风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(5):2071-2077.
- Xu P, Peng G, Zhu L, et al. Spatial-temporal distribution and pollution load of microplastics in the Changjiang Estuary [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(5):2071- 2077
- [27] Isobe A, Kubo K, Tamura Y, et al. Selective transport of microplastics and mesoplastics by drifting in coastal waters [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014,89(1/2):324-330.
- [28] 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 Q, Chen H, Zhao X, et al. Removal of microplastics by different treatment processes in Shanghai large municipal wastewater treatment plants [J]. *Environmental Science*, 2019,40(9):4105-4112.
- [29] Murphy F, Ewins C, Carbonnier F, et al. Wastewater Treatment Works (WWTW) as a source of microplastics in the aquatic environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,50(11):5800-5808.
- [30] Yonkos L T, Friedel E A, Perez-Reyes A C, et al. Microplastics in four estuarine rivers in the Chesapeake Bay, U.S.A. [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014,48(24):14195-14202.
- [31] 宁 军.2016~2017 年世界塑料工业进展(II) [J]. *塑料工业*, 2018, 46(4):1-19.
- Ning J. Progress of the World's Plastics Industry in 2016~2017 (II) [J]. *China Plastics Industry*, 2018,46(4):1-19.
- [32] 钟晓萍.2017~2018 年世界塑料工业进展(I) [J]. *塑料工业*, 2019,

- 47(3):1-7.
- Zhong Xiaoping. Progress of the World's Plastics Industry in 2017~2018 (I) [J]. China Plastics Industry, 2019,47(3):1-7.
- [33] 郭俊鑫,吴正环,黎 振,等.丙烯酸树脂及其复合材料热降解动力学研究 [J]. 塑料科技, 2020,48(2):10-15.
- Guo J, Wu Z H, Li Z, et al. Study on thermal degradation kinetics of acrylic resin and its composites [J]. Plastics Science and Technology, 2020,48(2):10-15.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Zhang W, Zhang S, Wang J, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Bohai Sea, China [J]. Environmental Pollution, 2017, 231:541-548.
- [37] Boerger C M, Lattin G L, Moore S L, et al. Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre [J]. Marine Pollution Bulletin, 2010,60(12):2275-2278.
- [38] Napper I E, Bakir A, Rowland S J, et al. Characterisation, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015,99(1/2):178-185.
- [39] Conley K, Clum A, Deepe J, et al. Wastewater treatment plants as a source of microplastics to an urban estuary: Removal efficiencies and loading per capita over one year [J]. Water Research X, 2019,3: 100030.
- [40] Zhang K, Gong W, Lv J, et al. Accumulation of floating microplastics behind the Three Gorges Dam [J]. Environmental Pollution, 2015,204: 117-123.
- [41] Bayo J, Olmos S, López-Castellanos J. Microplastics in an urban wastewater treatment plant: The influence of physicochemical parameters and environmental factors [J]. Chemosphere, 2020,238: 124593.
- [42] Gies E A, Lenoble J L, Noël M, et al. Retention of microplastics in a major secondary wastewater treatment plant in Vancouver, Canada [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018,133:553-561.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] Gündoğdu S, çevik C, Güzel E, et al. Microplastics in municipal wastewater treatment plants in Turkey: a comparison of the influent and secondary effluent concentrations [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018,190(626).
- [47] Lee H, Kim Y. Treatment characteristics of microplastics at biological sewage treatment facilities in Korea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018,137:1-8.
- [48] 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.

作者简介: 陈 瑀(1996-),男,安徽蚌埠人,贵州大学硕士研究生,主要从事污水处理厂中新型污染物的检测分析研究。