

城镇污水处理厂中微塑料的研究进展

彭丽花

广东环境保护工程职业学院环境工程学院, 广东 佛山

收稿日期: 2022年11月13日; 录用日期: 2022年12月12日; 发布日期: 2022年12月27日

摘要

微塑料是最近广泛关注的污染物物之一, 城镇污水处理厂因排放量大而成为微塑料进入自然环境中的一个重要通道。通过调研国内外城镇污水处理厂对微塑料的研究现状, 分析污水处理厂中微塑料的来源和污染特征, 综述不同污水处理厂微塑料去除与归趋及其对各级处理工艺去除效率研究, 为开展国内污水处理厂中微塑料污染研究与控制工作提供借鉴。

关键词

微塑料, 城镇污水处理厂, 混凝沉淀, MBR

Research Progress of Microplastics in Urban Sewage Treatment Plants

Lihua Peng

School of Environmental Engineering, Guangdong Polytechnic of Environmental Protection Engineering, Foshan Guangdong

Received: Nov. 13th, 2022; accepted: Dec. 12th, 2022; published: Dec. 27th, 2022

Abstract

Microplastics are one of the pollutants that have recently attracted widespread attention. Urban sewage treatment plants have become important channels for microplastics to enter the natural environment because of their large emissions. By investigating the research status of microplastics in urban sewage treatment plants at home and abroad, analyzing the source and pollution characteristics of microplastics in sewage treatment plants, the removal and trend of microplastics in different wastewater treatment plants and the removal efficiency of different treatment processes are reviewed, which provides a reference for the research and control of microplastic pollution in domestic sewage treatment plants.

Keywords

Microplastics, Town Sewage Treatment Plant, Coagulation Precipitation, MBR

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

2004年, Thompson等[1]将粒径小于5 mm的塑料颗粒或纤维颗粒定义为微塑料, 因它体积小、比表面积大则具有很强的吸附能力, 对于环境中的持久性有机污染物和重金属类污染物质更容易吸附。且它进入自然环境后具有很强的稳定性和持久性, 会持续存在几百甚至上千年。目前在土壤中、流域水体中和海洋中都可以见到微塑料的踪影。微塑料进入自然水体后会随着水流运动迁移至全球各地, 甚至在人迹罕至的南极都有发现。2020年11月, Cell中一篇论文指出, 世界之巅、人类的圣洁之地的珠峰顶上存在着大量难以清除的微塑料污染。虽然目前微塑料对于人类健康影响还没有明确的结论, 但普遍认为微塑料对人体具有潜在的危害。例如, 微塑料能够在人体内迁移并积累, 塑料纤维可以穿透肺深部, 过多接触会使得呼吸系统易出现症状, 甚至增加癌症发病率。2022年 Ragusa Antonio [2]用显微拉曼光谱仪分析了从34名妇女身上采集的母乳样本, 首次在34个样本中发现了26个样品被MPs污染了, 因此微塑料对人类的危害可能被严重低估, 我们需要引起高度重视。Wu Di [3]对接受心血管外科手术的患者进行了筛查, 并收集了26个血栓16个含有87个鉴定出的颗粒, 大小在2.1~26.0 μm之间, 表明微粒暴露的风险被低估, 迫切需要重新评估其对人类的健康影响。

据Plastics Europe [4]发布的报告显示, 2020年全球共生产了近 3.67×10^8 t塑料。2020年我国塑料制品产量达7603.2万吨。研究发现, 城镇污水处理厂虽然能去除大部分的微塑料污染物, 但因排放量大, 这使得污水处理厂是微塑料进入环境的重要来源之一。以微塑料为主题在中国知网上搜索共计2166篇, 而以污水处理厂中微塑料的相关研究共计86篇。因城镇污水处理厂微塑料排放量巨大、潜在环境危害大, 近年来逐渐引起人们的广泛关注, 因此研究污水处理厂中微塑料的迁移和污染特征对微塑料的污染控制显得尤为重要。

2. 微塑料的来源

城镇污水处理厂中的微塑料来源广泛, 受到服务人口数量及地区、管网建设、当地居民生活习惯、家庭穿衣习惯、污水处理厂工艺流程设计等多种因素的影响。城镇污水处理厂微塑料的来源有原生微塑料和次生微塑料两种类型, 原生微塑料是以微塑料以约4 μm~1 mm的粒径加入在洗面奶、牙膏、沐浴露和磨砂膏等相关洗护用品中和服装织布的纤维以及塑料成型的原材料塑料粒子等; Carr等[5]发现类似于牙膏配方中的蓝色聚乙烯颗粒在污水处理厂内不同工艺段出水中均存在, Napper等[6]发现商家把164~327 μm聚乙烯微珠添加到化妆品中, 据估算, 一次使用可释放4594~94,500个微珠。为了控制这一污染源, 加拿大、法国、新西兰等国家已出台相关法律禁止在个人护理产品中加入塑料微珠, 但目前中国还没有出台相关禁令。Browne等人研究发现衣物经过单次清洗后产生的纤维量可达到100个/L以上, 因此家用洗衣机排放的污水中也成含有大量的纤维类微塑料[7]。Napper [6]等研究表明, 洗衣机每洗一次6 kg合成织物, 排放的污水中含有 1.38×10^5 个涤纶与棉混纺、 4.96×10^5 个涤纶、 7.28×10^5 个腈纶, 产

生大量的“超细纤维微塑料颗粒”；芬兰家用洗衣机的聚酯和棉微纤维的年排放量估计为 411 t [8]。次生微塑料是指我们生活中或工业过程中所使用的塑料制品经过长时间暴露，在日光照射光解、水文风化、生化等作用下分解而成，这类微塑料来源广泛，如我们日常使用的塑料袋、塑料餐盒、薄膜等风化光解、塑胶轮胎制品磨损等产生塑料颗粒，受雨水径流流入到市政管网汇至城镇污水处理厂中。Magni 等[9]在意大利某污水处理厂进水中检测出丙烯腈-丁二烯(丁腈橡胶)，且比比例高达 40%，该塑料应用于油封垫片、套管等汽车零部件的制造。Lee 等[10]发现在雨季污水厂会出现的黑色微塑料，并判断可能是轮胎碎片经过雨水冲刷带入至污水厂中。

3. 不同污水处理厂微塑料去除与归趋

虽然污水处理厂对微塑料有很大的削减和控制作用，但由于其排放量大，污水处理厂依然是重要的微塑料排放源。Murphy [11]等估算出苏格兰某城市污水处理厂每天约排入 6.5×10^7 个 MPs 至受纳水体中；Sutton 等[12]对美国旧金山湾的 8 个污水处理厂中的微塑料进行估算，发现每天约 5600 万个 $125 \mu\text{m}$ 的塑料微粒排入至受纳水域；Lares 等[13]发现位于芬兰米凯利某城市污水处理厂每天从中排放至水体中的微塑料达到 1 千万个($>250 \mu\text{m}$)；Mintenig 等[14]研究表明，在德国的污水处理厂每年排放的微塑料可达 5 万亿个($>500 \mu\text{m}$)，这些微塑料的排放足以对自然环境产生不可预估的影响。汪文玲[15]对厦门某污水处理厂的微塑料排放量进行了估算，每日排放到海洋中的微塑料个数为 8.48×10^4 个；宣立强[16]对哈尔滨两个污水处理厂的污水排放量进行了统计其排放的微塑料均为 1.47×10^6 个；刘俊勇[17]对钦州 2 个污水处理厂微塑料排放量统计约 $(3.9 \pm 0.6) \times 10^6 \text{ n/L}$ 和 $(3.2 \pm 1.6) \times 10^6 \text{ n/L}$ ；贾其隆[18]对上海 2 个污水处理厂中的微塑料排放量进行统计约有 3.06×10^{11} 个 MPs；从以上数据可知城镇污水处理厂微塑料的排放量非常大，是水体、土壤等环境中的主要来源之一。因此，对城镇污水处理厂中的微塑料进行统计和分析是非常必要。

Table 1. Comparative study on removal efficiency of microplastics in domestic wastewater treatment plants

表 1. 国内污水处理厂微塑料去除效能对比研究

地区	服务人口 (万)或水量 (万 m^3/d)	进水丰度	出水丰度	去除效率 %	一级处理	二级处理	处理工艺
厦门 [15]	120/26	1.703 个/L	0.324 个/L	80.97	35.99%	70.28%	格栅 + 沉淀 + 生物滤池
上海 [18]	355.76/-	226.27 个·L ⁻¹	17.22 个·L ⁻¹	63.25	旋流沉砂 + 初沉 46.48%	AO + 二沉 13.02%	旋流沉砂 + 初沉 + A2O
上海 [18]	293/-	226.27 个·L ⁻¹	12.21 个·L ⁻¹	59.84	曝气沉砂 (33.8 ± 3.9)%	A2O 工艺 58.6%	曝气沉砂 + AO
南京 [19]	72/30	4.2 n/L	0.9 n/L	78.57	格栅、曝气沉砂	Unitank 61.9%	三级处理(UNITANK 池 + BAF 工艺 + 纤维转盘滤池)
北京 [20]	70/18	16.0 n/L	1.3 n/L	91.7	曝气沉砂池和膜格栅, 27.1%	三级 AO 串联和双层平流沉淀池 60.0%	三级 AO 串联和双层平流沉淀池 + 高效沉淀池 + 超滤
哈尔滨 [16]	76/-	290.87 个·L ⁻¹	58.67 个·L ⁻¹	77.48	占比整个工艺的 78.39%	14.68、20.92	旋流 + 初沉 + 多段 AO-MBBR 工艺或 CASS-MBBR 工艺

Continued

哈尔滨 [16]	95/-	260.53 个·L ⁻¹	45.13 个·L ⁻¹	84.48	占比整个工艺的 80.28%	13.11	旋流 + 平流 + 混凝 + 曝气生物滤池
钦州 [17]	3 万 m ³ /d	(1.80 ± 0.35) n/L	(0.13 ± 0.02) n/L	92.4	33.8%	A2O 58.6%	A2O 工艺
钦州 [17]	8 万 m ³ /d	(0.15 ± 0.05) n/L	(0.04 ± 0.02) n/L	71.7	36.1%	CAST 工艺 35.6%	CAST 工艺

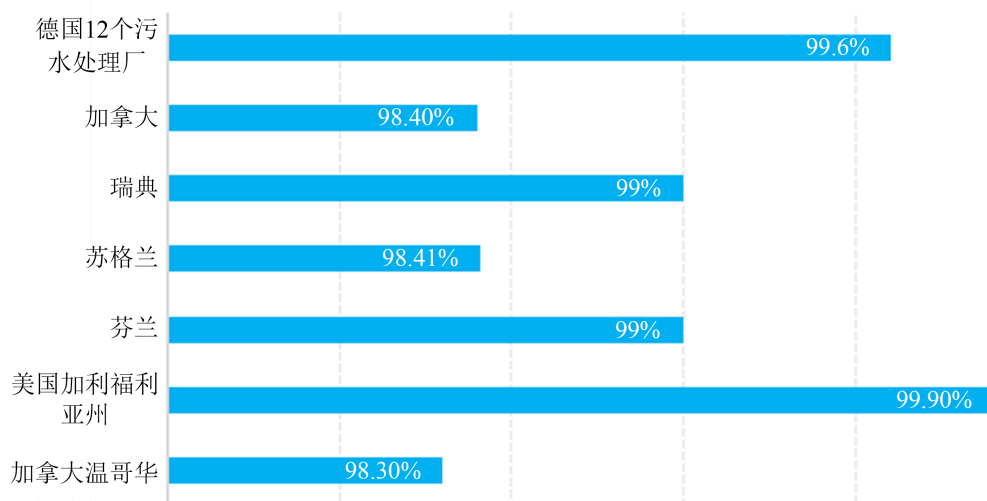


Figure 1. Comparative study on removal efficiency of microplastics in foreign wastewater treatment plants

图 1. 国外污水处理厂微塑料去除效能对比研究

根据图 1 和表 1 可知国内不同的污水处理厂微塑料进水浓度差异很大，估计和当地居民使用塑料制品的习惯有关。国外污水处理厂去除率相比较于国内污水处理厂来说要高，经过二级或三级处理都可达到 98% 以上；国内污水处理厂对微塑料的去除率为 59.84%~92.4% 之间，对于微塑料的去除总体还有待提高的空间。国内污水处理厂的去除率最低达 59.84%，可能和检测手段对微塑料的确认存在一定的偏差。对于国内污水处理厂来说，A2O 工艺的去除效率最高，但是该工艺在文献中并没详细提到三级处理的工艺具体是什么？(图 2)其次三级 AO 串联和双层平流沉淀池+高效沉淀池+超滤去除率为 91.7%。对于污水处理工艺中的一级处理效率约在 27.3%~46.48%，有研究表明[18]污水处理厂一级处理工艺对 MPs 的去除率约占整个处理工艺的 70%~80%，是去除微塑料的主要力量。

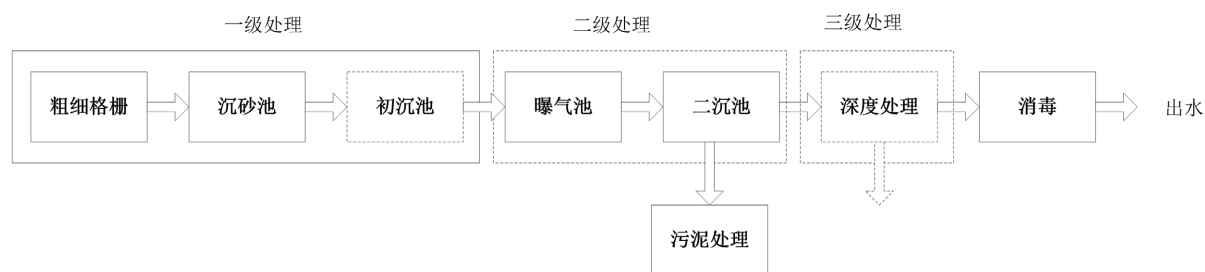


Figure 2. Process flow chart of sewage treatment plant

图 2. 污水处理厂工艺流程图

4. 微塑料在城镇污水处理厂的污染特征

Browne 等[7]从污水处理厂中排放的每升污水有 67%的聚酯纤维(PES)、17%的聚丙烯酸(PAA)和 16%的聚酰胺(PA), 这比例于海洋中的微塑料比例相对比较一致, 这从另一个角度证实污水处理厂中的微塑料是进入环境的重要通道。

Table 2. Pollution characteristics of microplastics in foreign wastewater treatment plants

表 2. 国外污水处理厂中微塑料的污染特征[21]

地区	尺寸(μm)	形状	类型	主要聚合物成分	纤维所占比例%
芬兰	<250 250~500	纤维、颗粒	PES、PE、PA	82.8%	79, 11, 4
荷兰	10~5000	纤维、薄片、小球	-	61.9%	-
英国	≥ 11	纤维、薄片、微珠、碎片	PES、醇酸树脂、PA	18.5%	27, 25, 14
澳大利亚	25~500	纤维、颗粒	PE、PET、PS	56%	42, 36, 15
瑞典	≥ 300	纤维、碎片、薄膜	PET、PE、PP	70%	-
德国	>500	纤维、颗粒	PEST、PA、PP	99%	73, 17, 9

Table 3. Pollution characteristics of microplastics in domestic wastewater treatment plants

表 3. 国内污水处理厂中微塑料的污染特征

地区	尺寸(μm)	形状	类型	主要聚合物成分比例	颜色	微塑料统计	微塑料提取
上海[18]	80~5000	线状、片状、颗粒状	PET、PA、PE、PP	51.84%、18.33%、13.92%	无色、蓝色、黑色、红色、棕色、其他	高速摄像机 + 傅立叶红外显微成像光谱仪	碱消解 + 0.45 μm 滤膜
上海[18]	80~5000	线状、片状、颗粒状	PET、PA、PE、PP	53.11%、16.27%、15.49%、8.18%	无色、蓝色、黑色、红色、棕色、其他	高速摄像机 + 傅立叶红外显微成像光谱仪	碱消解 + 0.45 μm 滤膜
钦州[17]	250~500	纤维、碎片	PP、PE、PET	-	-	立式光学显微镜 + 傅里叶变换显微红外光谱仪	0.45 μm 玻璃纤维滤膜 + Fenton 试剂
北京[20]	40~500	纤维、薄膜、碎片、颗粒	PP、PES、PE	74.7%、13.4%、8.7%、3.0%、0.2%	透明、蓝色、黄色、红色、绿色、黑色、白色	三目体视显微镜 + 傅里叶变换红外法检测	H_2O_2 消解 + 抽滤 + ZnCl_2 浮选
南京[19]	50~2000	纤维、碎片、薄片、棒状	PA、PVC、PAA	71.43%、16.67%、4.76%	黑色、红色、蓝色、绿色、透明	NikonS MZ1000 体式显微镜测量 + 拉曼光谱	0.22 μm 硝酸纤维滤膜 + 湿式消解 (H_2O_2 和 FeSO_4)
厦门[15]	63~125	纤维、颗粒、碎片	PP、PS、PE	23.15%、17.42%、10.9%	无色、白色、蓝色、黑色、红色、其他	体视显微镜 + 拉曼光谱分析	90 $^\circ\text{C}$ 烘干 + Fenton 消解 + 和 NaCl 溶液密度分离

Continued

哈尔滨 [16]	38~270	碎片、薄膜、纤维	PP、PS、PE、其他	33.45%, 28.71%, 22.65%, 2.41%	无色、白色、蓝色、黑色、红色	体视显微镜 + 拉曼光谱分析	饱和的氯化锌溶液密度浮选 + KOH 消解 + 滤膜抽滤
哈尔滨 [16]	38~270	碎片、薄膜、纤维	PP、PS、PE、其他	35.89%, 29.12%, 18.58%, 16.41%	无色、白色、蓝色、黑色、红色、其他	体视显微镜 + 拉曼光谱分析	饱和的氯化锌溶液密度浮选 + KOH 消解 + 滤膜抽滤

对近几年中国污水处理厂调查发现,微塑料的提取主要是通过过滤、消解来进行预处理,从上表 2、表 3 可知消解主要通过 H_2O_2 、fenton 试剂和碱进行,对微塑料的统计主要是通过数码显微镜 + 傅里叶红外光谱仪或数码显微镜+拉曼光谱分析来确定微塑料的丰度。傅里叶红外光谱是利用微塑料对光的吸收,通过化学键和官能团的震动鉴别种类;拉曼光谱分析是利用光的散射,检测激光激活的分子震动鉴别种类;两种方法在对微塑料的鉴别过程中都不会破坏样品。污水处理厂微塑料的颜色并没有呈现出相应的规律,其颜色的来源主要和当地居民使用的塑料类型有关。微塑料的形状主要为纤维状、颗粒状、薄膜状、碎片和棒状,其中颗粒状和小球状多属于初生塑料;纤维状、薄膜状和棒状属于次生微塑料。纤维状的微塑料在污水处理厂仍占最大比例。洗涤衣物产生过程中产生的纤维通过管网汇入到污水处理厂中,大部分纤维尺寸比较细小且一般难于沉降,经过处理工艺后还仍会残留在水体中;但像尼龙、涤纶和丙烯酸等密度较大的纤维在水处理过程中会沉淀从而积聚在污泥中。而污泥中的微塑料可能会进入到土壤通过食物链的作用进入到人体中。

从表 2 和表 3 可知污水处理厂中微塑料的种类有很多,主要有 PET (聚对苯二甲酸乙二醇酯)、PA (聚酰胺)、PE (聚乙烯)、PP (聚丙烯)、PVC (聚氯乙烯)、PAA (聚丙烯酸)等。Talvitie 等[22]对芬兰 4 个城市污水处理厂 13 个样品的研究发现聚酯纤维 PES 含量约为 60%,占主导地位,聚乙烯 PE、聚丙烯酸酯、聚氯乙烯 PVC、聚苯乙烯 PS 和聚丙烯的含量分别为:14%、7%、5%、4%和 3%。同时检测了污水处理厂的纤维的具体含量,发现天然纤维(棉、亚麻、羊毛、聚酯类和丙烯酸纤维分别占 66%、33%和 1%。

5. 污泥中微塑料的迁移

污泥中的微塑料主要来源于沉淀、沉砂等工序。H.A.等人[23]发现荷兰七个污水处理厂污泥中的微塑料 72%的微塑料被截留在污泥中。Talvitie 等[22]调查发现芬兰的污水处理厂离心后的干污泥中微塑料浓度为(160.7~212.7)个/g;在芬兰米凯利某城市污水处理厂,每天从污泥中排除的微塑料高达 4.6 亿个,活性污泥中检出的微塑料浓度为(18~27.2)个/g,消化污泥中(160.7~142.2~199.6)个/g。Mintenig 等[14]报道了在德国 12 个污水处理厂中干污泥微塑料浓度为 24 个/g。Li 等[24]调查了中国 28 个污水处理厂中的 79 个污泥样品的微塑料,结果表明污泥样品中的微塑料平均丰度为 $(22.7 \pm 12.1) \times 10^3$ n/kg(干污泥)。刘俊勇[17]在对钦州两个污水处理厂中经过 A2O 工艺和 CASS 工艺后,污泥中微塑料丰度分别为 (533.3 ± 66.7) n/kg、 (181.8 ± 43.7) n/kg;汪文玲[15]在对厦门污水处理厂中微塑料的研究中表明,经格栅 + 沉淀处理后污泥微塑料浓度为 2.14×10^3 个/kg,经生物滤池处理后污泥中微塑料浓度为 6.62×10^3 个/kg。贾其隆[18]等研究表明污水处理厂中最终有 $(38.82\% \pm 1.55\%)$ 的 MPs 随出水进入到自然水体,剩余 $(61.18\% \pm 1.55\%)$ 的 MPs 进入到污泥中。可见微塑料中含有大量的微塑料,污泥中的微塑料可能会通过堆肥、填埋等重新进入到土壤或水体中。

6. 污水中微塑料去除技术

在城镇污水处理厂中，目前我们采用工艺控制的指标主要有 COD、BOD、氨氮、TP 等，但是并没有涉及到微塑料的指标控制，但其对生态风险的影响越来越收到研究者们关注，因此采用何种微塑料的去除技术值得我们去研究。

6.1. 混凝沉淀

王月[25]等对聚苯乙烯微塑料颗粒进行混凝沉淀研究，发现聚合氯化铝对微塑料的去除率高达 88.9%，且混凝过程中微塑料的形状没有被改变；许龙[26]等对饮用水厂进水中的微塑料进行研究，通过混凝沉淀工艺可去除 40% 的微塑料，主要可去除尺寸 $> 10 \mu\text{m}$ 以及纤维状的微塑料 Wang [27]等发现混凝沉淀工艺对微塑料的去除主要受微塑料的尺寸和形状影响，对于大于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒，粒径越大去除效果越好，混凝-沉淀单元的去除率越好；

MA 等[28]采用常用的铁盐 + 聚丙烯酰胺(PAM)对聚乙烯(PE)微塑料的去除率高达 90.9%，其主要原因是在中性条件下投加阴离子 PAM 后，会形成带正电的铁基高密度絮体，具有强吸附电中和能力，并对微塑料有沉淀网捕作用。后续工艺采用微滤或超滤，可以将这些包含微塑料的絮体有效截留。有研究表明[29]，混凝沉淀工艺可有效去除某水厂原水中的微塑料去除率达 40.5%~54.5%，可几乎完全去除尺寸 $> 10 \mu\text{m}$ 的 MPs；对于 $< 10 \mu\text{m}$ 的 MPs 去除率达 28.3%~47.5%；混凝沉淀对纤维状微塑料更易被去除，去除率达 50.7%~60.6%。

6.2. MBR 工艺

有研究表明比起传统的活性污泥法，膜生物反应器(MBR)法有着更高的去除率，Talvitie 等人[22]的研究表明，对一级处理出水中的微塑料采用 MBR 工艺可去除 99.9% 的微塑料，但对二级工艺出水中微塑料采用快速砂滤池或溶解气浮法的去除率分别可达 97%、95%，采用盘式过滤器处理二级处理出水中的微塑料去除率波动相对较大，约 40%~98%。Lares 等[13]比较了 MBR 工艺和 CAS 工艺对微塑料的去除效果，发现 MBR 技术对微塑料的去除效果优于 CAS 工艺，其对微塑料的去除率也高达 99.4%，并指出 MBR 对微塑料的去除受 MBR 膜的孔径大小影响。

7. 结论

- 1) 我国污水处理厂微塑料的去除效率相比较于国外污水处理厂有进一步提升的空间。
- 2) 微塑料的形状、类型和颜色和当地居民使用微塑料用品有关，并不会呈现一定的规律。
- 3) 微塑料的预处理技术主要采用数码显微镜 + 傅里叶红外光谱仪或数码显微镜 + 拉曼光谱分析。

8. 未来展望

- 1) 我国污水处理厂微塑料的来源相对清晰，期望我国尽快控制其在洗护用品中的使用，并出台相关微塑料控制指标。
- 2) 对于我国城镇污水处理厂中微塑料的去除有一定的提升空间，因污水处理厂排放量巨大，依然有大量的微塑料进入到水域中，因此微塑料的控制技术需开展更深入的研究。对于各污水处理厂中微塑料的去除效率存在比较大的差异，期望能制定微塑料的检测标准和分析方法。
- 3) 目前微塑料对人类健康的影响研究开展得相对较少，期待有更深入的研究。

基金项目

2020 年院长基金项目(科研类): 佛山市某污水处理厂中微塑料的性能研究(K620721042304)。

参考文献

- [1] Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., *et al.* (2004) Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *Science*, **304**, 838-838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- [2] Ragusa, A., Notarstefano, V., Svelato, A., *et al.* (2022) Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. *Polymers*, **14**, 2700. <https://doi.org/10.3390/polym14132700>
- [3] Wu, D., Feng, Y.D., Wang, R., *et al.* (2022) Pigment Microparticles and Microplastics Found in Human Thrombi. *Journal of Advanced Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2022.09.004>
- [4] Plastics Europe (2021) Plastics—The Facts. <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021>
- [5] Carr, S.A., Liu, J. and Tesoro, A.G. (2016) Transport and Fate of Microplastic Particles in Wastewater Treatment Plants. *Water Research*, **91**, 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.002>
- [6] Napper, I.E., Bakir, A., Rowland, S.J., *et al.* (2015) Characterisation, Quantity and Sorptive Properties of Microplastics Extracted from Cosmetics. *Marine Pollution Bulletin*, **99**, 178-185. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.029>
- [7] Browne, M.A., Crump, P., Niven, S.J., *et al.* (2011) Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks. *Environmental Science & Technology*, **45**, 9175-9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>
- [8] Sillanp, M. and Sainio, P. (2017) Release of Polyester and Cotton Fibers from Textiles in Machine Washings. *Environmental Science & Pollution Research*, **24**, 19313-19321. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9621-1>
- [9] Magni, S., Binelli, A., Pittura, L., *et al.* (2019) The Fate of Microplastics in an Italian Wastewater Treatment Plant. *Science of the Total Environment*, **652**, 602-610. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.269>
- [10] Lee, H. and Kim, Y. (2018) Treatment Characteristics of Microplastics at Biological Sewage Treatment Facilities in Korea. *Marine Pollution Bulletin*, **137**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.09.050>
- [11] Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., *et al.* (2016) Wastewater Treatment Works (WwTW) as a Source of Microplastics in the Aquatic Environment. *Environmental Science & Technology*, **50**, 5800-5808. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05416>
- [12] Sutton, R., Mason, S.A., Stanek, S.K., *et al.* (2016) Microplastic Contamination in the San Francisco Bay, California, USA. *Marine Pollution Bulletin*, **109**, 230. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.077>
- [13] Lares, M., Ncibi, M.C., Sillanpää, M., *et al.* (2018) Occurrence, Identification and Removal of Microplastic Particles and Fibers in Conventional Activated Sludge Process and Advanced MBR Technology. *Water Research*, **133**, 236-246. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.049>
- [14] Mintenig, S.M., Int-Veen, I., Löder, M.G.J., *et al.* (2016) Identification of Microplastic in Effluents of Waste Water Treatment Plants Using Focal Plane Array-Based Micro-Fourier-Transform Infrared Imaging. *Water Research*, **108**, 365-372. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.015>
- [15] 汪文玲, 龙邹霞, 余兴光, 张继伟, 林辉. 厦门市筲箕污水处理厂中微塑料的特征研究[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(2): 205-210.
- [16] 宣立强, 刘硕, 罗爻, 李昀东, 夏青. 哈尔滨城市污水处理厂不同处理工艺对微塑料的去除[J]. 环境科学学报, 2020, 40(11): 3964-3970.
- [17] 刘俊勇, 谢沅汕, 张清科, 侯晓映, 王华, 钟山, 张漓杉. 城市污水处理厂中微塑料的去除与归趋[J]. 应用化工, 2021, 50(4): 919-923+927.
- [18] 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建锋. 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.
- [19] 陈瑀, 张宴, 苏良湖, 赵欣, 卜元卿, 李辉, 张圣虎, 李江. 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.
- [20] 邢薇, 刘梦瑶, 李頔, 魏凡钦, 左剑悉. 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.
- [21] 许霞, 侯青桐, 薛银刚, 蹇云, 王利平. 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.
- [22] Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., *et al.* (2017) Solutions to Microplastic Pollution—Removal of Microplastics from Wastewater Effluent with Advanced Wastewater Treatment Technologies. *Water Research*, **123**, 401. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.005>
- [23] Leslie, H.A., Brandsma, S.H., Van Velzen, M.J.M., *et al.* (2017) Microplastics en Route: Field Measurements in the Dutch River Delta and Amsterdam Canals, Wastewater Treatment Plants, North Sea Sediments and Biota. *Environment International*, **101**, 133-142. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.01.018>

- [24] Li, X.W., Chen, L.B., Mei, Q.Q., *et al.* (2018) Microplastics in Sewage Sludge from the Wastewater Treatment Plants in China. *Water Research*, **142**, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.034>
- [25] 王月. 混凝-沉淀工艺去除水中微塑料颗粒的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [26] 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.
- [27] Wang, Z., Lin, T. and Chen, W. (2020) Occurrence and Removal of Microplastics in an Advanced Drinking Water Treatment Plant (ADWTP). *Science of the Total Environment*, **700**, Article ID: 134520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134520>
- [28] Ma, B.W., Xue, W.J., Hu, C.Z., *et al.* (2019) Characteristics of Microplastic Removal via Coagulation and Ultrafiltration during Drinking Water Treatment. *Chemical Engineering Journal*, **359**, 159-167. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.155>
- [29] Zhang, C., Chen, X., Wang, J., *et al.* (2017) Toxic Effects of Microplastic on Marine Microalgae *Skeletonema costatum*: Interactions between Microplastic and Algae. *Environmental Pollution*, **220**, 1282-1288. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.005>