

述评与讨论

污水处理厂中微塑料的来源与分析方法

康佩颖¹, 嵇斌¹, 卫婷¹, 赵亚乾^{1,2}

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 爱尔兰都柏林大学土木工程系 Dooge 水研究中心, 爱尔兰)

摘要: 微塑料(Microplastics, 粒径 <5 mm)是人类生活生产活动中不可避免产生的一种新兴污染物质,在环境中被大量检出,来源主要包括个人护理产品的使用、洗衣过程微纤维释放、雨水径流带入等。污水处理厂作为微塑料的汇与源,在微塑料的物质流动中扮演着重要角色。伴随着污水处理厂中污水处理的工艺流程,微塑料的分布、性质也发生了改变。然而,目前还未建立关于污水和污泥中微塑料分析研究方法的标准与规范。为此,汇总了污水处理厂中微塑料的取样、预处理、检测鉴定方法,概述了污水处理厂对微塑料的去除效果及其归趋,并提出了目前存在的问题和未来的发展方向。

关键词: 微塑料; 来源; 污水处理厂; 分析方法; 去除效果

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)22-0029-08

Overview of Sources and Analysis Methods of Microplastics in Wastewater Treatment Plants

KANG Pei-ying¹, JI Bin¹, WEI Ting¹, ZHAO Ya-qian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Dooge Centre for Water Resources Research, School of Civil Engineering, University College Dublin, Ireland)

Abstract: Microplastics (MPs) are defined as plastic smaller than 5 mm in diameter. As an emerging pollutant derived from the human daily life and industry activities, it has been widely detected in ecosystem. MPs are considered to be from the personal care and cosmetic product, synthetic fibers during washing, and urban rainwater off. Wastewater treatment plants (WWTPs) play a special role in the mass flow of MPs because it is not only one of the important point sources of MPs released into environment, but also a way of collecting and removing MPs from wastewater. During the wastewater treatment process, the manner and characteristics of the MPs have also changed. However, the standard analytical methods of MPs have not been established in worldwide. This review summarizes the updated studies of MPs behavior in WWTPs, which include sampling, sample pretreatment and MPs identification and characterization. Emphasis was placed on various MPs analyzing methodologies in the literature. The removal effect of MPs in WWTPs was also briefly summarized. Furthermore, the existing problems and future perspectives were discussed.

Key words: microplastics; source; wastewater treatment plants; analytical methods; removal effect

微塑料(Microplastics)是指直径 $<5\text{ mm}$ 的塑料碎片,可分为初生和次生微塑料。初生微塑料主要为小尺寸生产的细微塑料,例如个人护理产品中的微珠和用于成型的塑料粉等;而次级微塑料则是由较大的塑料颗粒破碎而成。近年来,微塑料污染情况日趋严峻,在海洋、淡水、沉积物和陆地等自然环境以及饮用水、海鲜、食盐等食品中被广泛检出,可以说微塑料早已深入人类生活的方方面面^[1]。微塑料具有体积微小、表面疏水易于生长附着生物膜的特性,极易在环境中迁移,且易被生物误食,通过生物链累积效应最终进入到人类体内,危及人类健康^[2]。在微塑料的物质流动过程中,污水处理厂扮演着特殊的角色,它既是人类产生的微塑料排入自然环境中的源头之一,也是重要的削减和控制水体中微塑料负荷和研究其处理技术与方法的场所。因此,污水处理厂中的微塑料来源与归趋的研究至关重要,而这些研究必须基于准确、可靠的微塑料分析方法。

海洋水体中微塑料污染是当前全球研究热点,污水处理厂中微塑料的研究也逐渐升温^[3-6],然而不同地区的研究结果却难以横向比较。重要原因之一是在取样、预处理、检测方法和误差控制等方面的差异;其次,污水处理厂中微塑料的性质受到污水来源、处理工艺、气候等多方面影响,难以控制变量;加之各研究中微塑料浓度单位(MPs/L、mg/L、MPs/g等)不统一。目前国内外缺少统一的、多实验室验证的污水处理厂微塑料研究方法。建立和完善污水处理厂中微塑料的标准化分析方法,有助于提高各研究结果的可比性和相关性分析,进一步揭示污水处理厂在微塑料物质流中的角色定位,有利于更好地采取科学方法控制微塑料污染。

微塑料的分析主要包括取样、预处理和检测鉴定3个主要部分,目前各个研究分析方法不尽相同,缺乏统一、规范的操作流程。概述了污水处理厂中微塑料的主要来源,汇总了国内外污水处理厂微塑料分析方法,归纳了污水处理厂对微塑料的去除特征,以期为建立和完善污水处理厂微塑料分析方法体系提供一定的借鉴和参考。

1 污水厂中微塑料的主要来源

1.1 个人护理产品

为了加强个人护理产品(如洗面奶、沐浴露、美白牙膏等)的功效,通常会掺入细小的塑料颗粒,其

中微珠状的初生微塑料被认为是污水处理厂微塑料的来源之一,但是其在污水处理厂中微塑料的贡献占比一直存在争议。白濛雨等^[7]在对上海某污水处理厂微塑料形状划分中,未发现严格规则形状塑料微珠。Liu等^[8]提出个人护理产品中的微珠多为聚乙烯(PE),在污水处理厂中检测到的其他成分的塑料微珠来源可能并非个人护理产品,这进一步降低了塑料微珠在来源中的占比。Cheung等^[9]对9种磨砂洗面奶提取塑料微珠发现其主要形状并不规则,这一性质可能会造成污水处理厂微塑料的来源误判,但作者还提出我国大陆由于使用磨砂洗面奶每年约释放 2.097×10^{14} 个塑料微珠进入环境,其中超过80%来自污水排放。据此也有学者认为我国大陆的污水排放量和磨砂洗面奶使用率被错误估计,因而过多估算了我国大陆的微塑料排放量^[7]。为了控制这一污染源,已经有一些国家(如加拿大、法国、新西兰等)出台相关法律禁止在个人护理产品中加入塑料微珠,但目前中国还没有相关禁令。

1.2 洗衣微纤维泄漏

一些研究认为,微纤维(Microfiber)是污水处理厂主要微塑料污染类型,并推断其主要来自洗衣过程中的纤维泄漏^[10-11]。在家庭常规的合成纤维衣物、地毯或其他纺织品洗涤时,会释放出大量的微纤维进入市政污水中,其类型主要包括聚酰胺(PA)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、PE等。洗衣过程释放的微纤维量受到水硬度、水温、衣物新旧程度等因素影响,而洗涤剂尤其是粉末洗涤剂的使用会大幅增加微纤维的释放^[12]。Schmiedgruber等^[13]设计了一种微纤维示踪剂,帮助了解污水处理厂中微纤维的流动,对研究微纤维的去除机理和取样方法有一定意义。洗衣过程中释放的纤维量难以控制和估算,但其数量不容忽视,同时纤维具有高长宽比,易从水处理过程中泄漏,在控制微塑料污染时需要提高对微纤维的关注。

1.3 雨水径流带入

雨水冲刷灰尘带入微塑料是常常被忽视的来源之一。橡胶轮胎磨损等形成的次生微塑料,可随降雨径流进入污水处理厂。Magni等^[14]通过对意大利某污水处理厂取样发现,进水中丙烯腈-丁二烯(丁腈橡胶)占比达到40%,该塑料被广泛用于汽车零部件如油封垫片、套管等制造。Lee等^[15]研究表明,与一年的其他时间相比,在雨季污水厂发现了更多

的黑色微塑料,并判断其来源为轮胎碎片经过雨水冲刷带入。

图1表明了污水处理厂中微塑料的来源及其归趋。

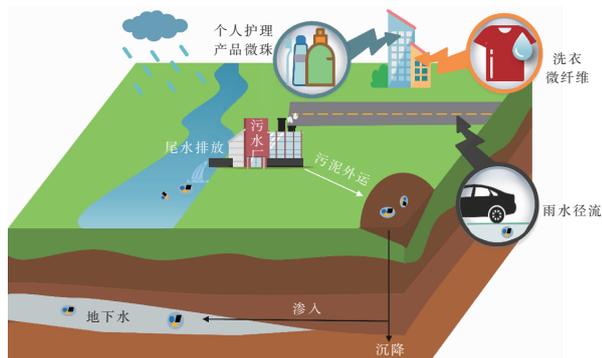


图1 污水厂中微塑料来源与归趋

Fig. 1 Transport and fate of microplastics in wastewater treatment plants

污水处理厂中的微塑料来源广泛,受到服务人口及地区、管网建设、当地居民用水习惯、家庭洗衣习惯、污水处理厂参数等多种因素的影响。Talvitie等^[16]对比分析了芬兰不同地区的4座污水处理厂微塑料类型,差异颇大,不存在占绝对优势的某种塑料材质或形状。污水处理厂的微塑料来源难以查清,建立清晰的微塑料物质流动链任重道远,了解微塑料来源更便于控制微塑料的污染,从源头削减污染总量。

2 微塑料取样

2.1 污水取样

自然水体水域宽阔、固体污染物含量低,微塑料采样多采用拖网取样、抓斗采集等方法,而污水中污染物复杂且难以接近水处理构筑物,因此容器收集、泵采过筛、自动采样器取样等方法更为适宜。表1汇总了污水处理厂微塑料的取样方法。

表1 污水处理厂微塑料取样方法

Tab. 1 Sampling methods of microplastics in wastewater treatment plants

国家/城市	取样方法	取样量/L	粒径范围/ μm	参考文献
中国厦门	结合流量计,泵采过四级筛	26 ~ 120	>43	[3]
中国北京	玻璃瓶收集	30	50 ~ 5 000	[4]
土耳其阿达那	采样器取水	5	>55	[5]
中国上海	容器收集	4	125 ~ 4 250	[7]
中国武汉	不锈钢桶取水,过筛	20	>47	[8]
意大利	钢桶表面取水,过三级筛	30	63 ~ 5 000	[14]
韩国	取水过筛	进水:10 出水:100	>106	[15]
中国厦门	结合流量计,泵采过四级筛	不定	>43	[17]
加拿大温哥华	采样器取水,小体积容器收集,大体积过筛	进水:1 其他:30	>63	[18]
澳大利亚悉尼	自制四级筛	3 ~ 200	>25	[19]

容器收集简单易行,能较好地保持污水中微塑料原状态,然而在采样量较大时,不易携带运输,采样量过小,采集的样品代表性不强^[20]。泵采过筛是指采用一定孔径的筛网过滤污水,以截留微塑料为样品,筛网的最小孔径决定了所采集的微塑料样品的最小尺寸。此方法能够大幅减少样品体积,并获得足量样品,然而目前各研究中最小的筛孔直径(20 ~ 100 μm)并不统一。大孔径会丢失部分样品,而小孔径则容易快速堵塞。为缓解堵塞问题,多级筛网取水的采样装置被广泛使用^[10, 17, 21]。自动采样器操作较为简单,但单次取样量往往较少,代表性存疑,但考虑微塑料时空变化的长时间连续取样时,

宜采用自动取样器降低工作量^[21]。总体而言,在污水处理厂入口处,杂质和微塑料含量双高的条件下,若采用筛网过滤,极易造成短时间内筛网堵塞,故适宜采用容器收集;而在出水处,尤其是对于大粒径微塑料的研究,适宜采用筛网过滤增大采样量。

2.2 污泥取样

污水处理厂中污泥的取样主要是在污泥处理构筑物单元采集5 ~ 20 g的污泥样品直接收集在洁净玻璃瓶中,然后冷藏保存。多数研究是采集原污泥^[7, 10],部分研究以脱水污泥为取样对象^[22]。但需要注意的是,在污泥处理过程中,其中的微塑料可能随着污泥的脱水处理流失、小块微塑料降解或者大

块塑料破碎产生次生微塑料而影响污泥中微塑料的含量^[11,23]。

3 预处理方法

微塑料样品中含有大量有机、无机等非塑料成分,影响微塑料的鉴定,样品须进行预处理,预处理方法主要包括消解和分离。图2对文献中预处理方法的使用频率进行了汇总。对样品进行预处理之后,可以采用离心或过滤方法提取微塑料,以便于下一步检测。

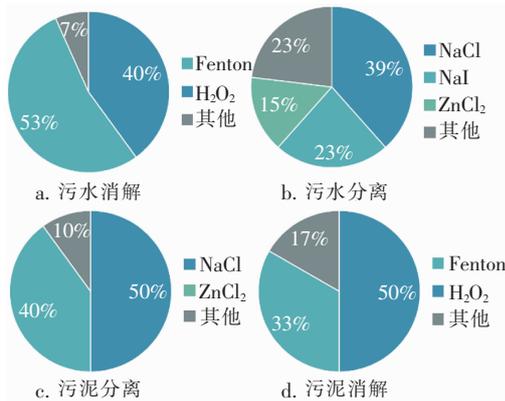


图2 污水处理厂微塑料分析的预处理方法

Fig. 2 Pretreatment methods of microplastics analysis in wastewater treatment plants

3.1 消解

为便于后续鉴定,需要去除微塑料表面负载的有机物,所采用的方法是消解,主要包括碱消解、酸消解、氧化消解以及酶消解。低浓度酸碱消解液对有机物的消解效果并不理想,而高浓度消解液对低耐酸碱的微塑料样品[如PA、PET、聚苯乙烯(PS)等]存在不同程度的破坏^[24-25]。酶消解是具有靶向性的消解方法,价格昂贵且处理时间长,但对微塑料样品的破坏性低,不会产生有害气体。对于纤维素等易被误判为微纤维又难以去除的非塑料,可以采用酶降解去除这一误差源。在污水与污泥的预处理中,最常用的是氧化消解,常用试剂为过氧化氢(H₂O₂)溶液和Fenton试剂。Tagg等^[26]采用30%的H₂O₂处理废水样品7d后,有机物含量降低了83%。然而H₂O₂会使一些塑料颜色改变,且存在试剂耗费大、处理时间长等缺陷,不适用于大批量的样品处理。Fenton试剂是H₂O₂消解的进阶方法,省时高效,对药品剂量要求小。Tagg等^[27]在离心管中用Fenton试剂处理0.01g微塑料10min(室温),而后用水和乙醇溶液清洗后检测,结果表明消解效

果较好,对样品破坏小。值得注意的是,两种消解过程都会产生泡沫,在加热提高消解效率时,需注意避免液体沸腾、泡沫溢出时带走部分微塑料而影响结果准确性。除了运用单种消解方式之外,还可以采用组合消解方式。Mintenig等^[28]采用酶与H₂O₂消解组合方式对污水进行预处理,得到了较好的消解效果,然而此方案耗时长(>13d)。

3.2 分离

微塑料的分离有助于去除无机物的干扰,并方便进一步鉴定微塑料特征。常用密度分离对微塑料进行浮选,常见浮选液包括饱和NaCl溶液(密度为1.2g/mL)、NaI溶液(密度为1.49~1.8g/mL)和ZnCl₂溶液(密度为1.6~2g/mL)。NaCl廉价易得,对环境无污染,但密度较小,对于高密度塑料如聚氯乙烯(PVC,密度为1.14~1.56g/mL)和PET(密度为1.32~1.41g/mL)的浮选效果较差,需要多次浮选以提高回收率^[29]。相对密度较大的NaI和ZnCl₂有良好的回收率,能分离污水中大部分微塑料,但ZnCl₂有毒且价格昂贵,NaI会污染纤维过滤膜,发生染色反应,影响后续检测^[30]。此外,一些新兴分离方法也得到了利用,Gies等^[18]利用微塑料的亲油性,采用油分离污水中的微塑料。Crichton等^[31]研究发现油萃取的微塑料总回收率为(96.1±7.4)%,且价格低廉。然而,油萃取需要使用洗涤剂 and 乙醇对样品进行洗涤,去除表面油残留,多出的洗涤步骤可能会造成微塑料的流失。

4 检测与鉴别

4.1 物理性质检测

视觉检测法是检测微塑料的基本方法,主要包括直接目检法和光学显微镜法。该方法简单直观,操作方便,能够粗略去除样品中的非塑料物质,并依据微塑料的颜色、形状等物理性质进行简单分类。但容易受到操作人的主观影响,漏检或重复计数,或者将玻璃、沙子、天然纤维等误判为微塑料而影响结果。Hidalgo-Ruz等^[32]基于傅里叶变换红外光谱(FTIR)表征发现,直接目检法的误差率高达70%。在Liu等^[8]研究中,显微镜确认的398个疑似微塑料颗粒中有74个通过拉曼光谱分析被证实为非塑料物质,其中大部分是透明或白色的。扫描电子显微镜是在基础视觉检测方法上发展而来,分辨率更高,能够得到微塑料表面的风化情况,但是对样品制备要求高,较少应用。视觉检测作为一种必要方法,

推荐作为辅助手段,采用直接目检法借助镊子等判断颜色、硬度,首先去除大块、非塑料杂质,再将光学显微镜与光谱检测结合,确认疑似微塑料成分,以降低工作量,提高准确率。

4.2 化学性质检测

微塑料的化学性质主要采用 FTIR 和拉曼光谱检测。传统 FTIR 需要人工确定分析点,只能单次单个分析,费时耗力,还可能遗漏小粒径微塑料,试验数据缺乏准确性。FTIR 中衰减全反射模式适用于大粒径、不规则形状微塑料的鉴定^[7]。目前最常采用的技术是配有成像系统的显微 FTIR (μ -FTIR),可以鉴定粒径 $>20 \mu\text{m}$ 的微塑料,并根据样品透光度、厚度、形状等选择透射模式或者反射模式。该技术对样品制备要求较简单,可对采样膜上的样品直接分析,同步获得样品光谱和成像^[33]。Tagg 等^[26]提出了基于焦平面阵列的 FTIR 改进技术,使用污水处理厂经过 H_2O_2 预处理后废水进行验证,总识别率达到 98.33%,此技术可以实现整张滤膜成像,提高了鉴定效率。拉曼光谱作为另一种无损光谱鉴定方法,使用单色光源,可鉴定的粒径 ($>1 \mu\text{m}$) 更小,且不受样品厚度、形状的限制^[34],可以作为 FTIR 的补充。与 μ -FTIR 同理,拉曼光谱也可结合显微镜应用 (μ -Raman),但拉曼光谱容易受到荧光影响降低准确率。与光谱法相比,热降解方法是一种更为省时的选择,能获得样品的聚合物信息以及其中添加剂的成分和含量,但作为一种破坏性方法,无法提供样品外在特征和具体数量,极少应用于污水处理厂微塑料检测。

5 误差控制

5.1 分析过程污染

微塑料误差来源之一是分析过程污染。在采样、样品处理和检测过程中可能会带入水或空气中的微塑料,引起误差。因此在采样时,应采用非塑料材质收集样品,尽量减少样品与空气的接触时间。分析过程中,要求实验者身穿纯棉实验服,佩戴橡胶手套,保持工作台清洁,所用试剂提前过滤,所有器皿采用超纯水润洗,不使用时加盖铝箔,还可设置阴性对照组,去除背景微塑料浓度。分析过程中的另一误差源是微塑料流失,包括筛分时微纤维和小粒径微塑料泄漏、密度高于浮选液的微塑料遗留、粘在器皿内壁或随处理液体流出等,这要求实验者在操作时谨慎小心,选择合适的分析方法,也可设置加标

对照组,计算样品回收率进行质量控制。

5.2 误判误差

另一个误差来源是非塑料误判,是指将玻璃、砂石、天然纤维等误认为微塑料,影响结果,尤其是人造丝、棉、麻、动物毛等天然纤维由于其形状特征往往被误判为微纤维。人造丝是由纤维素构成的常见干扰物,温和的预处理方法往往难以消解,而强酸强碱又会对微塑料造成破坏,在此类误差源较多的情况下,可以有针对性地采用纤维素酶进行消解。对样品染色以分辨塑料与非塑料是一种简单廉价的方法。Ziajahromi 等^[19]发现孟加拉玫瑰染色剂能够将棉纤维染为粉色,而对 PE 和聚酯纤维没有影响。但是该染色剂对纤维素的染色效果并不明显,还可能导致 PS 和 PVC 碎片的颜色轻微改变^[24]。此外,还可以利用尼罗红染色并借助荧光显微镜辨别,Raju 等^[35]将其用于污水处理厂出水以及污泥中的微塑料检测,并用傅里叶变换红外光谱表征。但尼罗红对 PVC、PET 以及微纤维的染色效果较差,难以鉴别^[30]。

6 污水厂去除效果与分析方法

总体而言,污水处理厂能够有效去除污水中的微塑料,且去除率与污水处理厂采用的处理工艺以及运行负荷紧密相关^[17]。表 2 汇总了部分国内外污水处理厂对微塑料的去除效果。

微塑料的去除与污水的 SS 指标存在关联性,在 Xu 等^[36]的研究中,SS 与微塑料去除率呈正相关,而其他指标还未发现相关性。从微塑料形态特征上,Talvitie 等^[16]发现 0.02 ~ 0.1 mm 尺寸范围的微塑料去除率最高,推测原因可能是粒径小且更易被污泥吸附去除。然而,Liu 等^[8]研究发现小粒径(0.02 ~ 0.3 mm)微塑料在不同的处理工艺出水微塑料中占比逐渐增大,表明在处理过程中可能存在微塑料的次生过程;Lv 等^[10]也得到了相似结论,氧化沟系统对微塑料的质量去除率为 97% 时,数量去除率只有 53.6%,可见污水处理厂对极小尺寸微塑料去除率并不理想。值得注意的是,微塑料虽然从污水中得到了一定的去除,但被富集在污泥中,尤其是高密度的大尺寸微塑料,成为了另一种环境释放源。Magni 等^[14]通过对意大利某污水处理厂微塑料排放研究指出,虽然污水中微塑料去除率达到了 84%,但活性污泥中微塑料数量达到 (113 ± 57) MPs/g,相当于该污水处理厂每排放 30 t 污泥中约含有

3.4×10^7 个微塑料。

污水处理过程中不同处理工艺单元对微塑料去除效果存在较大的差异^[37],但这也可能与微塑料的采集与分析方法有关。通常一级处理(沉砂池、曝气沉砂池、气浮池、混凝等)可取得较好的去除效果^[38],但由于该阶段污水中无机物含量较高,采集

容器易堵塞,实际采样体积较小,缺乏代表性。采用活性污泥法为二级处理工艺时,大尺寸微塑料更易被污泥包裹沉淀^[8]。现有研究中并未开展不同采集深度下微塑料的去除研究。三级处理时,若采用膜滤或快滤池工艺,则与筛网采集方法原理相同,可能造成微塑料的“伪去除”。

表2 国内外污水厂微塑料去除效果

Tab.2 Removal performance of microplastics in domestic and foreign wastewater treatment plants

国家/城市	处理级别	平均进水个数/ (个·L ⁻¹)	平均出水个数/ (个·L ⁻¹)	平均去除率/%	污水厂排放个数/ (个·d ⁻¹)	污泥中平均含量	参考文献
中国厦门	二级	1.703	0.324	80.97	8.48×10^4	78.73 MPs/L(初级污泥) 149.12 MPs/L(二级污泥)	[3]
中国北京	三级	12.03	0.59	95.16	0.59×10^9	—	[4]
中国上海		117	52	55.60	1.456×10^8	180 n/50 g(湿质量)	[7]
中国武汉	二级	79.9	28.4	64.40	—	240.3 n/g	[8]
意大利	三级	2.5	0.4	84.00	1.6×10^8	—	[14]
芬兰米凯莉	二级	6.9	0.05	99.90	—	—	[16]
加拿大温哥华 (疑似微塑料)	二级	31.1	0.5	98.30	$(1 \sim 3) \times 10^8$	14.9 MPs/g(初级污泥) 4.4 MPs/g(二级污泥)	[18]

7 结语与展望

微塑料污染问题日趋严峻,污水处理厂承纳了多种来源的微塑料,在污水处理过程中能有效拦截和去除部分微塑料。但污水和污泥中残留、富集的微塑料使污水处理厂仍然成为微塑料进入自然环境的重要节点,应当加强研究与管控。准确、可靠的分析方法是一切研究的基础,但针对污水处理厂微塑料的研究检测方法还缺少统一规范的操作标准,评价体系并不完善。

目前的研究方法易受到实验人员的主观和操作影响,微塑料丰度的表述大多为单位体积或单位质量中所含微塑料数量(MPs/L、MPs/g等),这需要在分析检测过程中清点微塑料的个数,无疑增加了工作量和误判几率。然而各类微塑料的密度、大小、质量不尽相同,采用单位体积所含微塑料的质量单位(mg/L)无法准确描述微塑料污染情况。目前亟待科学统一的丰度单位表述,有利于各研究间的结果对比和参考。取样处理时筛网孔径不定,造成了不同微塑料研究的样本区间不同,使得各试验缺少参考性。划分微塑料粒径大小时,数值区间不同,增加了不同结果分析对比难度。另外,当采用光谱分析时,光谱库中往往是纯净的标准光谱,而实际分析中虽经清洗、消解,样品仍含有一定的杂质,需要建立更加完善的光谱图库体系,提高鉴定精确性。此外

极其微小粒径微塑料的识别率还不高,亟待更有效的鉴别手段,确保微塑料丰度的准确度。因此有必要开发一种准确、简单、高效的方法体系用于分析污水处理厂污水和污泥中多来源、多类型、多粒径的微塑料。该方法体系需建立在污水处理厂实际环境下,并有完善的质量保证体系。

当前的污水处理厂对微塑料去除的研究多为宏观处理效果调查,微塑料在水处理构筑物中的去除机理尚不明确。未来应进一步探究采用多种示踪手段分析各类型微塑料在污水处理过程中的分布、转运和降解规律,结合精确的分析方法,以获取更多可靠的定量数据。

污水处理厂中微塑料的研究大多集中在沿海或发达城市,缺少内陆、非发达地区污水处理厂的调查与研究,未来的研究应更加全面地考察不同地理位置、污水处理工艺下微塑料的削减与管控。

参考文献:

- [1] 李道季. 海洋微塑料污染状况及其应对措施建议[J]. 环境科学研究, 2019, 32(2): 197-202.
Li Daoji. Research advance and countermeasures on marine microplastic pollution [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(2): 197-202 (in Chinese).
- [2] 徐擎擎, 张弢, 邹亚丹, 等. 微塑料与有机污染物的相

- 互作用研究进展[J]. 生态毒理学报,2018,13(1):40-49.
- Xu Qingqing, Zhang Ge, Zou Yadan, *et al.* Interactions between microplastics and organic pollutants: Current status and knowledge gaps [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*,2018,13(1):40-49(in Chinese).
- [3] 汪文玲,龙邹霞,余兴光,等. 厦门市筼筴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.
- Wang Wenling, Long Zouxia, Yu Xingguang, *et al.* Microplastics characteristic in Yundang wastewater treatment plant of Xiamen [J]. *Marine Environment Science*,2019,38(2):205-210(in Chinese).
- [4] Yang L B, Li K X, Cui S, *et al.* Removal of microplastics in municipal sewage from China's largest water reclamation plant[J]. *Water Res*,2019,155:175-181.
- [5] Gundogdu S, Cevik C, Guzel E, *et al.* Microplastics in municipal wastewater treatment plants in Turkey: A comparison of the influent and secondary effluent concentrations [J]. *Environ Monit Assess*, 2018, 190(11):626.
- [6] Leslie H A, Brandsma S H, van Velzen M J M, *et al.* Microplastics en route: Field measurements in the Dutch river delta and Amsterdam canals, wastewater treatment plants, North Sea sediments and biota[J]. *Environ Int*, 2017,101:133-142.
- [7] 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 Mengyu, Zhao Shiye, Peng Guyu, *et al.* Occurrence, characteristics of microplastic during urban sewage treatment process [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(5):1734-1743(in Chinese).
- [8] Liu X N, Yuan W K, Di M X, *et al.* Transfer and fate of microplastics during the conventional activated sludge process in one wastewater treatment plant of China[J]. *Chem Eng J*,2019,362:176-182.
- [9] Cheung P K, Fok L. Characterisation of plastic microbeads in facial scrubs and their estimated emissions in mainland China[J]. *Water Res*,2017,122:53-61.
- [10] Lv X, Dong Q, Zuo Z, *et al.* Microplastics in a municipal wastewater treatment plant: Fate, dynamic distribution, removal efficiencies, and control strategies [J]. *J Clean Prod*,2019,225:579-586.
- [11] Li X, Chen L, Mei Q, *et al.* Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China [J]. *Water Res*,2018,142:75-85.
- [12] De Falco F, Gullo M P, Gentile G, *et al.* Evaluation of microplastic release caused by textile washing processes of synthetic fabrics [J]. *Environ Pollut*, 2018, 236:916-925.
- [13] Schmiedgruber M, Hufenus R, Mitrano D M. Mechanistic understanding of microplastic fiber fate and sampling strategies: Synthesis and utility of metal doped polyester fibers[J]. *Water Res*,2019,155:423-430.
- [14] Magni S, Binelli A, Pittura L, *et al.* The fate of microplastics in an Italian wastewater treatment plant [J]. *Sci Total Environ*,2019,652:602-610.
- [15] Lee H, Kim Y. Treatment characteristics of microplastics at biological sewage treatment facilities in Korea [J]. *Mar Pollut Bull*,2018,137:1-8.
- [16] 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 Res*,2017,123:401-407.
- [17] Long Z X, Pan Z, Wang W L, *et al.* Microplastic abundance, characteristics, and removal in wastewater treatment plants in a coastal city of China [J]. *Water Res*,2019,155:255-265.
- [18] Gies E A, LeNoble J L, Noel M, *et al.* Retention of microplastics in a major secondary wastewater treatment plant in Vancouver, Canada [J]. *Mar Pollut Bull*,2018,133:553-561.
- [19] Ziajehromi 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 Res*,2017,112:93-99.
- [20] Kang P Y, Ji B, Zhao Y Q, *et al.* How can we trace microplastics in wastewater treatment plants: A review of the current knowledge on their analysis approaches [J]. *Sci Total Environ*,2020,745:140943.
- [21] Talvitie J, Mikola A, Setälä O, *et al.* How well is microliter purified from wastewater? A detailed study on the stepwise removal of microliter in a tertiary level wastewater treatment plant [J]. *Water Res*,2017,109:164-172.
- [22] Wisniewska E, Moraczewska-Majkut K, Nocon W. Efficiency of microplastics removal in selected wastewater treatment plants - Preliminary studies [J]. *Des Water Treat*,2018,134:316-323.
- [23] Mahon A M, O'Connell B, Healy M G, *et al.* Microplastics in sewage sludge: Effects of treatment [J].

- Environ Sci Technol,2017,51(2):810-818.
- [24] Lares M, Ncibi M C, Sillanpaa M, *et al.* Intercomparison study on commonly used methods to determine microplastics in wastewater and sludge samples [J]. Environ Sci Pollut Res, 2019, 26(12):12109-12122.
- [25] Li X W, Chen L B, Ji Y Y, *et al.* Effects of chemical pretreatments on microplastic extraction in sewage sludge and their physicochemical characteristics [J]. Water Res, 2020, 171:115379.
- [26] Tagg A S, Sapp M, Harrison J P, *et al.* Identification and quantification of microplastics in wastewater using focal plane array-based reflectance micro-FT-IR imaging [J]. Anal Chem, 2015, 87(12):6032-6040.
- [27] Tagg A S, Harrison J P, Ju-Nam Y K, *et al.* Fenton's reagent for the rapid and efficient isolation of microplastics from wastewater [J]. Chem Commun, 2017, 53(2):372-375.
- [28] Mintenig S M, Int-Veen I, Loder 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 Res, 2017, 108:365-372.
- [29] Li Q L, Wu J T, Zhao X P, *et al.* Separation and identification of microplastics from soil and sewage sludge [J]. Environ Pollut, 2019, 254:113076.
- [30] Prata J C, da Costa J P, Duarte A C, *et al.* Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review [J]. TrAC Trends Anal Chem, 2019, 110:150-159.
- [31] Crichton E M, Noël M, Gies E A, *et al.* A novel, density-independent and FTIR-compatible approach for the rapid extraction of microplastics from aquatic sediments [J]. Anal Methods, 2017, 9(9):1419-1428.
- [32] Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson R C, *et al.* Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification [J]. Environ Sci Technol, 2012, 46(6):3060-3075.
- [33] 李珊, 张岚, 陈永艳, 等. 饮用水中微塑料检测技术研究进展 [J]. 净水技术, 2019, 38(4):1-8.
Li Shan, Zhang Lan, Chen Yongyan, *et al.* Research progress on detection technology of microplastics in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(4):1-8 (in Chinese).
- [34] Strungaru S A, Jijie R, Nicoara M, *et al.* Micro-(nano) plastics in freshwater ecosystems: Abundance, toxicological impact and quantification methodology [J]. TrAC Trends Anal Chem, 2019, 110:116-128.
- [35] Raju S, Carbery M, Kuttykattil A, *et al.* Improved methodology to determine the fate and transport of microplastics in a secondary wastewater treatment plant [J]. Water Res, 2020, 173:115549.
- [36] Xu X, Hou Q, Xue Y, *et al.* Pollution characteristics and fate of microfibers in the wastewater from textile dyeing wastewater treatment plant [J]. Water Sci Technol, 2018, 78(10):2046-2054.
- [37] 郝晓地, 翟学棚, 吴远远, 等. 微塑料在污水处理过程中的演变与归宿 [J]. 中国给水排水, 2019, 35(8):20-26.
Hao Xiaodi, Zhai Xuepeng, Wu Yuanyuan, *et al.* Evolution and fate of microplastics in sewage treatment [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(8):20-26 (in Chinese).
- [38] Phuong L N, Pramanik B K, Shah K, *et al.* Pathway, classification and removal efficiency of microplastics in wastewater treatment plants [J]. Environ Pollut, 2019, 255:113326.



作者简介:康佩颖(1997-),女,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为人工湿地污水处理。

E-mail: peiyang_kang@163.com

收稿日期:2020-01-04