韩伟朋, 杨庆, 刘秀红, 等. 污水处理厂中的微塑料来源研究进展[J]. 净水技术, 2023, 42(4):23-30,150.
HAN W P, YANG Q, LIU X H, et al. Research progress on the sources of microplastics in WWTPs[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4): 23-30,150.

污水处理厂中的微塑料来源研究进展

韩伟朋[1],杨　庆[1,*],刘秀红[2],王亚鑫[1],隋　军[3],汪传新[3]
(1. 北京工业大学环境与能源工程学院,北京　100124;2. 北京工业大学城市建设学部,北京　100124;3. 广东首汇蓝天工程科技有限公司,广东广州　510000)

摘　要　微塑料广泛存在于生态系统中,且由微塑料污染引起的环境问题逐渐引起全球学者的关注。传统的污水处理技术对微塑料虽然有较高的去除率,但仍有大量的微塑料随出水排放到环境当中,污水处理厂也被认为是微塑料进入环境中的重要媒介。为有效减少通过污水处理厂排放到环境中的微塑料,需要对污水处理厂中的微塑料进行源头上的分类。这些来源主要包括个人护理品的使用和衣物洗涤所产生的微塑料,同时汽车轮胎磨损产生的橡胶颗粒也是不可忽视的一大来源。通过对这些来源的特性、影响因素等进行分析,以期实现源头上的微塑料减量控制。

关键词　污水处理厂　微塑料　进水来源　减量　微珠　微纤维
中图分类号: X703　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1009-0177(2023)04-0023-09
DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.04.004

Research Progress on the Sources of Microplastics in WWTPs

HAN Weipeng[1], YANG Qing[1,*], LIU Xiuhong[2], WANG Yaxin[1], SUI Jun[3], WANG Chuanxin[3]
(*1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing　100124, China;*
2. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing　100124, China;
3. Guangdong Shouhui Blue Sky Engineering Technology Co., Ltd., Guangzhou　510000, China)

Abstract　Microplastics has gradually attracted the attention of scholars around the world, which is widely found in ecosystems and has caused serious environmental problems. Although the traditional wastewater treatment technology has a high removal rate of microplastics, a large number of microplastics is still discharged into the environment in the effluent. WWTPs have also been identified as an important vehicle for discharging microplastics into the environment. To effectively reduce the amount of microplastics released into the environment through WWTPs, the various source of microplastics of the WWTPs needs to be explored. And these sources mainly produced by the use of personal care products and clothing washing, at the same time, the rubber particles produced by automobile tire wear is also a major source that can't be ignored. The characteristics and influencing factors of these various sources are analyzed in order to realize the reduction control of microplastics at the sources.

Keywords　wastewater treatment plant (WWTP)　microplastics　influent source　reduction　microbeads　microfiber

微塑料是在 2004 年由 Thompson 等[1]提出来的,指粒径小于 5 mm 的塑料颗粒,又被称为海洋环境中的 PM2.5,早在 1960 年就有报道称在海洋环境中发现了微塑料。尽管此定义被广泛使用,但仍缺少标准规范。由于对塑料垃圾管理不善以及随意排放,在 2015 年的一篇研究中估算出我国向水环境中排放塑料垃圾的总量可高达 140.5 万~174.2 万 t,其他国家排放数量巨大且也呈不断增长趋势[2]。

微塑料的独特性如密度低、疏水性较强以及在环境中能广泛持久地存在等,使得它与其他常见污染物有很大不同。密度较低的微塑料漂浮在水体当中,而水生生物在摄取食物的过程中不能进行有效

[收稿日期]　2022-08-09
[基金项目]　国家自然科学基金(51978008);广州市产业领军人才集聚工程(CYLJTD-201607)
[作者简介]　韩伟朋(1999—　),女,硕士,研究方向为污水处理厂中的微塑料,E-mail:hanweipeng_xxxx@163.com。
[通信作者]　杨庆(1979—　),男,教授,主要从事污水脱氮除磷以及 N_2O 减排方面的研究,E-mail:yangqing@bjut.edu.cn。

区分,从而将污染物转移到水生食物链中,并进一步在食物链中富集,对水生生物产生危害。而进入自然环境中的微塑料可以被生物摄入并沿食物链运输,最终进入人体。此外,人类也可以通过皮肤接触、呼吸等途径将微塑料摄入体内。Valavanidis 等[3]研究表明,进入人体的微塑料颗粒可与免疫细胞相互作用而引发炎症,也可能形成恶性细胞而造成癌症等。因此,需要开发出有效的微塑料去除方法,以减少进入生态系统和食物链中的微塑料。微塑料具有较强的疏水性,可以吸附其他污染物如重金属、抗生素等而成为污染物进入其他环境的载体,导致生物放大作用。Brahney 等[4]研究表明,在海拔较高的地区可能会有更多的微塑料并通过大气运输在全球范围内循环。

研究[3]调查证明,污水处理厂是微塑料进入水生生态环境中的一个重要点源。在城镇生活区中,人们在生活中使用护理品和洗涤衣物导致释放出来的微珠和纤维等微塑料通过下水管道进入污水处理厂。许多学者在污水处理厂的出水和污泥中均检测到了微塑料的存在,城镇生活污水的大量排放使得微塑料在环境中大量累积成为可能。Acharya 等[5]表明,下水管道和污水处理厂被认为是向环境中释放纺织纤维的主要途径,在污水处理厂出水中有(0.05±0.024)颗/L 微塑料排放进入河流湖泊中。虽然污水处理厂对微塑料有较高的去除效率,但污水处理厂处理排放大量废水,仍有数百万 t/d 的微塑料被释放到环境中,通过污水处理厂造成的微塑料环境污染不容小觑。

本文综述了进入污水处理厂中微塑料的主要来源,并对微塑料的类型、微塑料排放的影响因素等进行了概述。通过具体分析微珠在不同产品中的功能特性、微塑料纤维在家庭洗涤过程中的释放影响因素,以在根本上解释释放到环境中微塑料的特性,从而为实现微塑料源头减量提供可能。

1　污水处理厂中的微塑料特性

对污水处理厂中的微塑料进行特征分析,可以在一定程度上确定进入污水处理厂中微塑料的来源。污水处理厂所服务地区的人口数、经济情况、污水来源、居民的生活习惯以及市政管道等都会影响到汇入污水处理厂中的微塑料数量。一般来说,所服务地区的人口数、面积等越大,进入污水处理厂中的微塑料量越多。北京市高碑店污水处理厂的服务人口数为 24 万,检测到微塑料平均含量是 6.5 颗/L[6],粒径<1 mm,形状以纤维状、薄膜状为主;厦门市作以港口和旅游闻名的典型沿海城市,通过在服务 350 万人的二级污水处理厂中采样,检测到各处理单元中微塑料的平均含量以及进水中的微塑料数量分别为 12.0 颗/L 和 6.55 颗/L[7],粒径为 0.045~0.15 mm,颜色以透明色为主,白色、黑色次之;Ziajahromi 等[8]对悉尼污水处理厂采样,检测到微塑料的含量为 2.2 颗/L,其中聚丙烯和聚对苯二甲酸乙二醇酯居多;Mason 等[9]检测到服务于美国纽约中心的污水处理厂进水中微塑料的平均含量为 0.013 5 颗/L,形态以碎片状和纤维状居多。悉尼及美国纽约中心的污水处理厂中微塑料浓度较低,体现了不同的服务区域面积和人口等对污水处理厂中微塑料数量的影响。

1.1　微塑料类型

污水处理厂中存在的微塑料类型与居民的日常消费习惯一致。进入污水处理厂中的微塑料聚合物类型主要有聚乙烯、聚氯烯、聚氯乙烯、涤纶、聚酰胺(尼龙)等,不同类型微塑料在日常生活中的使用场景以及在污水处理厂中的丰度如表 1 所示。但不同污水处理厂中的微塑料特性也不尽相同。

表 1　污水处理厂中常见的微塑料类型存在丰度及日常使用场景

Tab. 1　Abundance and Daily Use Scenarios of Common Types of Microplastics in WWTPs

微塑料类型	相对丰度	使用场景
聚对苯二甲酸乙二酯	高	涤纶、纤维、塑料瓶等制品的加工原料,化纤衣物制作、水瓶等
聚乙烯	中	日常护理清洁产品、食品包装、饮用水瓶
聚丙烯	中	塑料、水瓶盖、食品包装,如一次性热饮杯等
聚苯乙烯	中	餐饮盒、淋雨材料、建筑绝缘材料
丙烯酸	中	建材、涂料等工业部门
聚酰胺(尼龙)	低	合成纺织纤维、塑料袋、包装袋、工业用布、地毯
聚氯乙烯	低	电线、电缆、医用管材等

由表 2 可知,污水处理厂废水的来源主要是生活污水,部分接收工业废水或雨水。陈瑀等[10]发现以处理生活污水为主的典型三级污水处理厂进水中主要包含聚酰胺(尼龙)、聚氯乙烯和聚丙烯酸等塑料类型,其中聚酰胺(尼龙)占比高达 71.43%,主要来自日常生活中对衣物、车辆的清洗。邱博文[11]对主要接收生活污水的集美污水处理厂进行采样分析,发现聚酰胺浓度最高,是最主要的微塑料类型,聚乙烯和聚丙烯次之。聚乙烯、聚丙烯来可能来自于衣物洗涤废水,但聚酰胺用途广泛,所以推测污水厂进水中可能含有工业废水。Yang 等[6]在北京高碑店污水处理厂中检测到 18 种微塑料类型,聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚苯乙烯和聚丙烯 3 种微塑料占总量的 70%以上,其中,聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚苯乙烯是检测到的洗涤废水中微塑料纤维的主要成分,这也进一步证实进入污水处理厂中的微塑料主要来自生活污水。但其他类型的微塑料存在说明该污水处理厂进水中含有其他来源。Gies 等[12]检测到收集生活污水和雨水的污水处理厂进水中微塑料主要包括聚苯乙烯、纤维素、聚丙烯、聚酰胺(尼龙)和聚苯乙烯等,同时提出了雨水可能会携带特定的微塑料类型进入污水处理厂。据报道,美国城市的综合下水道数据显示出很高的微塑料浓度[8]。

总体而言,不同的污水处理厂接收的废水虽然来源存在一定的差异,但微塑料的类型仍保持有一定的相似性,主要是生活中被广泛使用的聚乙烯、聚苯乙烯等(表 2),以生活废水中的微塑料为主。

表 2 我国不同地区部分污水处理厂的微塑料分布特性

Tab. 2 Characteristics of Microplastics Distribution in WWTPs in Different Regions at Home

污水厂	废水收集来源	类型	粒径/mm	颜色	形状	参考文献
哈尔滨 A、B 污水处理厂	生活污水、工业废水	聚丙烯、聚苯乙烯、聚乙烯	0.15~0.27; 0.038~0.074	无色、白、蓝、黑、红	碎片状、发泡状、薄膜状、纤维状等	[13]
杭州某污水处理厂	-	-	0.5~1;>1; 0.098~0.2	黑、蓝、红	纤维状、碎片状、薄膜状等	[14]
南京某污水处理厂	生活污水	尼龙、聚氯乙烯、聚丙烯酸以及其他	0.05~0.5	黑、白、红、蓝、绿、透明	纤维状、棒状、薄片状、碎片状、纤维状等	[10]
扬州汤汪污水处理厂	生活污水	聚丙烯、聚乙烯、聚苯乙烯、聚酰胺、聚氯乙烯	-	-	纤维状、球状、碎片状、颗粒状	[15]
厦门集美污水处理厂	生活污水	聚酰胺、聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯	0.045~0.074; 0.074~0.15	透明、白、黑蓝、红、黄	纤维状、碎片状、球状、薄膜状	[11]
上海某污水处理厂	-	聚丙烯、聚乙烯、聚氯乙烯、人造丝、聚酰胺	0.355~1	透明、黄棕、蓝、红、黄、黑	纤维状、碎片状、球状、块状	[16]
郑州某污水处理厂	生活污水、雨水	聚乙烯、聚丙烯、聚酰胺、聚对苯二甲酸乙二醇酯	0.08~0.55; 0.55~1.7	黑、红、蓝、白	纤维状、碎片状	[17]
北京某污水处理厂	生活污水	聚丙烯、聚酯和聚乙烯、聚苯乙烯等	≤0.5; 0.5~1	-	纤维状、薄膜状、碎片状、颗粒状	[18]
镇江污水处理厂	-	聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯	0.02~0.1; 0.1~0.5; >0.5	透明、彩色、黑	纤维状、颗粒状、不规则形状	[19]

注:"-"表示文献中没有提及。

1.2 物理特征

进入污水处理厂的微塑料粒径分布在 25~1 000 μm,颜色有白、蓝、红、绿、黑等,形状有纤维状、薄膜状、杆状、颗粒状、片状、泡沫状等,其中纤维状所占的比例最高,但不同污水处理厂之间略有差别。宣立强等[13]发现,哈尔滨市以处理生活污水为主的污水处理厂进水中,粒径为 0.15~0.27 mm 的微塑料占比最大,颜色以无色、白色为主,也有蓝色、黑色、红色等,形状有碎片状、发泡状、纤维状、薄膜状等。叶李嘉等[14]在研究杭州市的污水处理厂中微塑料过程中,粒径为 0.5~1、>1、0.098~0.2 mm 的微塑料分别占比为 57.5%、25%、4.5%,颜色以黑色为主,形状以纤维状、碎片状、薄膜状等为主。Ziajahromi 等[8]发现悉尼的一座污水处理厂中进水微塑料的最小粒径是 25 μm,形状以纤维状和颗粒状为主,分别占比为 80%和 20%。Gies 等[12]发现加

拿大温哥华的污水处理厂中微塑料形态虽较为多样,但仍以纤维状、碎片状为主,其占比能达到64%、28.1%。Long 等[7]在对我国沿海城市的一座污水处理厂的调查中发现,白色和透明色是微塑料的主要颜色,颗粒状是其主要形态,然后是碎片和纤维,此外发现进水中微塑料浓度与悬浮物浓度成一定的正相关关系。

微塑料的物理表征不仅可以用于鉴定,对污水处理厂中的微塑料来源解析也有辅助作用。根据颜色、形态等可以推测出其大致来源:如污水处理厂中白色薄膜可能是日常生活中的塑料包装袋或包装盒等在环境中经过磨损破碎成小的微塑料薄膜;颗粒状或圆球状的可能来源于牙膏、磨砂膏等个人护理品;纤维则可能来自于衣物洗涤过程中合成纺织纤维的释放。如表 2 所示,污水处理厂中的微塑料颜色多以透明色、白色为主,这与日常生活中常用的塑料颜色相符。同时也说明了进入污水处理厂中的微塑料来源与所服务地区居民的生活、使用习惯息息相关。因此,明晰污水处理厂中微塑料的基本特征很重要。

2　污水处理厂中微塑料的主要来源

环境中的微塑料来源可分为初生微塑料和次生微塑料[20]。初生微塑料是指用于生产面部和身体清洁产品、去角质和身体磨砂膏等个人护理品或化妆品等,直接投加并使用的粒径小于 5 mm 的塑料颗粒。而次生微塑料是指环境中的大粒径塑料碎片,在经过光化学分解、生物降解或机械风化磨损过程而破碎、分解成的粒径小于 5 mm 的塑料碎片。次生微塑料通常以碎片或纤维的形式出现。

污水处理厂中微塑料的来源受当地经济发展水平、污水厂所处的地理位置、服务地区、人口数以及是否采取雨污分流等市政措施的影响。Tang 等[21]研究表明,生活污水中的聚乙烯、聚丙烯是污水处理厂中微塑料的主要类型,洗衣废水中的微塑料丰度远高于牙膏和洗面奶。Fendall 等[22]指出污水处理厂中的大部分微塑料来源于个人护理品中的微珠和纺织衣物洗涤时释放的纤维。Carr 等[23]研究表明,存在的不规则形状的塑料碎片和微塑料可能来源于日常的塑料磨损以及牙膏等个人护理品,这些微珠是被人为添加到个人护理品中的初生微塑料。研究者们[24-25]认为,大量纤维的存在可能是洗衣机洗涤过程中排放出来的。所以污水处理厂中微塑料的来源主要包括个人清洁产品的使用、洗衣过程中的释放以及轮胎磨损(图 1)。个人护理品和洗衣废水中的微塑料都是初生微塑料,但也有学者[26]认为洗衣释放出的纤维是由于受到多种力的作用而形成的微塑料,应属于次生微塑料。白濛雨等[16]发现橡胶轮胎磨损、灰尘以及雨水冲刷是人们忽视的微塑料进入污水处理厂的其他来源。此外,轮胎的磨损等也可以通过降雨、地表径流由下水道进入污水处理厂,以及固体废弃物在填埋过程中也会有塑料颗粒分解成微塑料渗透进入污水中[27]。

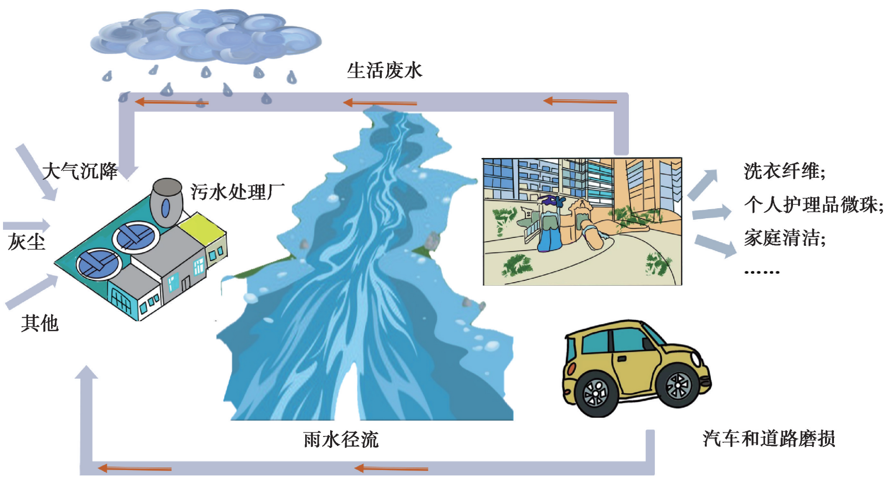

图 1　污水处理厂中微塑料的来源与归趋

Fig. 1　Sources and Attribution of Microplastics in WWTPs

2.1 个人护理品和化妆品

进入污水处理厂中的微塑料的一大来源是个人护理品和化妆品的使用,这些产品主要包括生活中使用的洗面奶、牙膏、磨砂膏、去角质产品等。在这些产品中塑料微珠被广泛添加,以用作清洁剂或去角质剂[21,28-29]。Tang 等[21]研究发现,洗面奶中主要有纤维、碎片和微珠,微珠占主要成分,磨砂类产品中含有大量微珠,但牙膏中的微珠含量很少,这与 Cheung 等[28]的观点一致。添加到个人护理品中的微珠主要类型是聚乙烯[18,29-31]。Kalčikova 等[31]通过对比不同的面部清洁产品和身体清洁产品,证实了添加的微塑料微珠大多数是聚乙烯,它们都具有较低的比表面积和更结构化的微珠形态。Cheung 等[28]在所购买的面部清洁产品中发现,微珠通常由聚乙烯或低密度聚乙烯制成,但在其他品牌中也检测到了蜡和聚氯乙烯的成分。Tang 等[21]也在其研究购买的产品中发现了添加的微珠有聚丙烯和乙烯-乙烯酯共聚物的成分,这与先前得到产品中添加的主要是聚乙烯微珠结论不同。

产品中微珠粒径总体小于 0.5 mm,平均直径在 60~800 μm,微珠的尺寸分布也反映了这种特殊类型的初生微塑料的均质生产[21]。Ding 等[30]购买的样品中微珠粒径分布广泛,表明这与产品功能、消费者需求以及产品种类有一定的联系。在产品中添加不同大小、形状的微珠具有不同的用途:如用肥皂、沐浴乳等清洁脸部和身体的废旧角质时,在洗面奶中添加的较小粒径微珠是为了产生轻微的摩擦作用[31];在磨砂膏等身体产品中添加较大粒径微珠是为了身体清洁中产生较大的摩擦作用[22];而在牙膏中为了有更轻微的摩擦清洁效果,添加的是尺寸小 100 倍的更小微珠[30],同时也有在产品中起装饰作用的蓝色微珠[23],且微珠的形状大多不规则,以提供更好的耐磨性[31]。微珠颜色大多为白色和透明,不同类型的护理品中微珠的添加量也不相同,磨砂产品中微珠的数量是氨基酸洗面奶和泡沫洗面奶的 4~10 倍,且产品中微珠的数量随品牌的不同变化也很大[21]。

微珠在日常生活中用途广泛且没有明确禁止添加,所以在城镇生活废水中能检测到大量微珠。Fendall 等[22]估计,每个家庭每天或每周至少使用一种含有微珠的清洁产品。2012 年 30 多个欧洲国家的微珠排放量为 20~300 t,相当于北海塑料碎片排放量的 0.1% ~ 1.5%(质量分数)。Anagonsti 等[29]在文章中提到,每年人均使用的化妆品中微塑料质量有 8 g,同样,在美国个人护理品中每人每年微珠的平均使用量为 1 g,使用数量令人震惊。使用后部分微珠通过下水管道进入污水处理厂中,成为污水处理厂中微塑料的主要来源。

2.2 合成纺织品的洗涤废水

污水处理厂中微塑料的另一大来源是衣物洗涤排放出来的洗涤纤维。城镇污水中纺织纤维主要来源于磨损或变质的服装、家用或户外纺织品。在洗涤过程中,超细纤维从纺织服装中大量释放出来,经由市政管道进入污水处理厂中(图 1)。Tian 等[32]在污水处理厂的进出水中均检测到了微塑料纤维的存在。衣物洗涤排放出来的纤维包括聚合纤维和天然纤维,但聚合纤维占大多数。聚合纤维是最主要的洗涤纤维,是污水处理厂中纤维微塑料的典型标志。在污水处理厂进水中微纤维的主要成分有聚酯、丙烯酸和聚酰胺[4,26],但 Velzeboer 等[33]分析表明洗衣废水占污水处理厂中聚对苯二甲酸类聚合物的 50%,聚合纤维中的聚对苯二甲酸类是洗涤纤维的主要成分。其他学者检测到合成纤维(如涤纶和尼龙)在洗涤时也会被释放。此外,湿巾、拖把等家庭常用产品材质也是聚酯纤维,所以家庭清洁也可能会增加排放到污水处理厂中的聚酯纤维[32]。但以家庭洗涤作为微塑料释放源的研究较少,且方法也缺少标准化。

在洗涤过程中,机械作用和化学作用都会作用于纤维基团上,削弱纤维的结构使分子量逐渐受损、聚合度降低。棉和纤维的例子均表明,当它们变湿膨胀时有利于吸纳并通过物理力量将纤维释放出来[26]。如图 2 所示,在日常洗涤时的操作条件,如手洗、机洗、洗涤剂、柔顺剂的使用,以及洗涤温度、衣物新旧程度、洗涤次数、硬水或软水洗涤等都会影响纤维的释放,但这些因素之间是否会相互影响,仍需详细参数下的深度探究。此外,聚酯类织物在洗涤过程中纤维的释放也取决于纱线和针距[24,34-35]。Browne 等[36]认为,织物类型显著影响洗衣过程中微纤维的释放。Tian 等[32]在试验过程中发现,纤维的释放量并没有随着用水量的增加而增加,但对于聚酯纤维衣物,随着洗涤次数的增加其纤维微塑料的释放速率逐渐下降。在洗涤过程中旧衣物会比新衣物、机洗会比手洗释放出更多的微塑料纤维[24,32],

脱下的微塑料纤维的丰度与洗衣废水中释放的聚酯浓度成显著正相关,且机洗的强搅动作用会导致机洗释放出的纤维长度短于手洗。Napper 等[24]的试验表明,洗涤剂和柔顺剂使用后洗涤过程中会释放出更多的纤维。但 Acharya 等[5]在文章中提到微塑料纤维的释放并不受洗涤剂影响,即使剂量增加也无影响;而柔顺剂的使用使纤维的释放量减少了35%。而 Falco 等[34]发现洗涤剂的使用会增加超细纤维的释放,这是由于洗涤剂中的无机物在洗涤过程中与合成纤维织物发生摩擦,这与前面两位学者的结果存在差异。而对于洗涤剂是否真正存在影响,则需要在标准化的条件下进行深度探究。此外洗涤剂的 pH、高温等都会促使织物表面水解释放纤维。各种影响因素之间相互作用复杂,具体的机理还需深一步的探究。

在洗涤中,大量合成和天然纤维从纺织服装中释放出来,其中在滚筒干燥过程中纤维的释放量是实际洗涤过程中的 3.65 倍[5]。Napper 等[24]估计每 6 kg 的洗涤负荷可释放超过 70 万根超细纤维,每年有 100~600 t 的纤维经由洗衣房和手洗释放到环境中。在水力负荷较高的多雨天气或污泥膨胀水平增高时,纤维的排放量将更高[37]。纤维物品使用量的增多,导致进入污水处理厂中纤维数量增多,污水处理厂对微塑料纤维的去除率较低也导致大量的纤维被排放到环境中。此外,Masura 等[38]表明,厕纸的使用对污水中大量的纤维素纤维做出了一定的贡献。Carney 等[35]发现,聚苯类织物在洗涤过程中释放纤维量最多,且纤维的释放量还取决于纱线和针距,这与 Stark 等[37]所表达的观点一致。

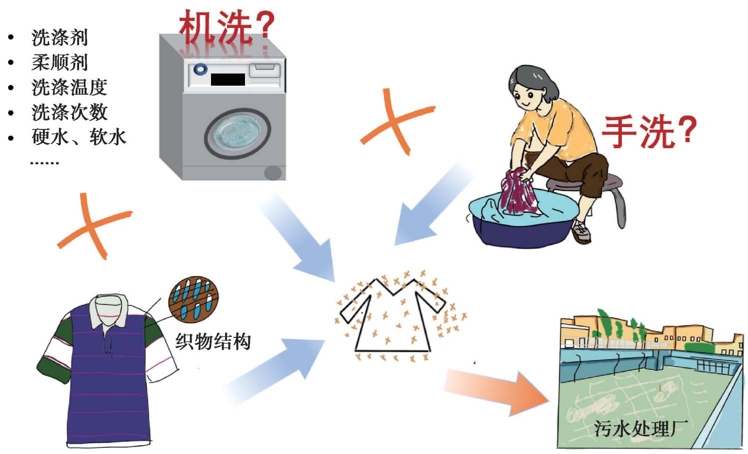

图 2 洗涤过程中微塑料纤维释放的影响因素

Fig. 2 Influencing Factors of Microplastics Release during Washing Process

2.3 其他来源

大气中微塑料的沉降、填埋过程中固体废弃物中微塑料的渗透以及轮胎和道路磨损颗粒都是微塑料进入污水处理厂的其他来源。

Valavanidis 等[3]估计在美国的偏远地区,由于大气中微塑料的沉降,每年可产生的微塑料量相当于 3 亿个塑料水瓶,然后沉积在农田、海洋当中并在全球范围内循环。但这些颗粒成分复杂,仍需进一步寻找它们的来源。

汽车轮胎磨损是向环境中排放微塑料的重要隐秘来源[39-40]。由汽车和道路磨损所产生的微塑料颗粒在环境中的分布如图 3 所示,一部分微塑料颗粒会通过雨水径流等进入到污水处理厂中。同时,Li 等[41]发现雨季污水处理厂中有较多的黑色塑料并判断其是雨水冲刷带入的轮胎碎片。Magni 等[42]研究表明,进入污水处理厂的污水中含有大量共聚聚合物,其中用于生产汽车密封圈、垫圈和管道的丁腈橡胶占微塑料总量的 40%,且常见的聚乙烯塑料也用于汽车零部件的制造。轮胎磨损会极大地促进微塑料进入环境,而且汽车轮胎的排放量远高于飞机轮胎、刹车磨损等其他的微塑料来源[39],这也进一步说明了汽车的轮胎磨损是污水处理厂的另一来源。

汽车轮胎多是由天然橡胶和合成橡胶制成的混合物。除了热性塑料聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯和聚对苯二甲酸乙二醇酯等,橡胶也被认为是一种塑

料[37]。驾驶车辆时,轮胎与道路接触会导致轮胎发生剪切和发热,产生磨损颗粒[39],由于磨损,天然橡胶会慢慢降解和松动[40],进一步导致磨损颗粒的产生,磨损颗粒的粒径为 10~100 μm[39]。此外,Kole 等[39]也表明轮胎的磨损释放也取决于气候、轮胎成分和结构、行驶速度等多种因素。Siegfried 等[40]估计,轮胎和道路磨损颗粒是欧洲河流中的最大微塑料来源,占微塑料总排放负荷的 42%;Versie 等[43]计算得出荷兰轮胎磨损排放进入环境的总量高达 8 768 t,其中在排放到下水道中的 1 337 t(15%)有 814 t 被截留在了污水处理厂中。此外,汽车轮胎磨损颗粒也会被排放到空气和土壤中,空气中的微小粉尘通过湿沉降由雨水径流进一步输送到污水处理厂。

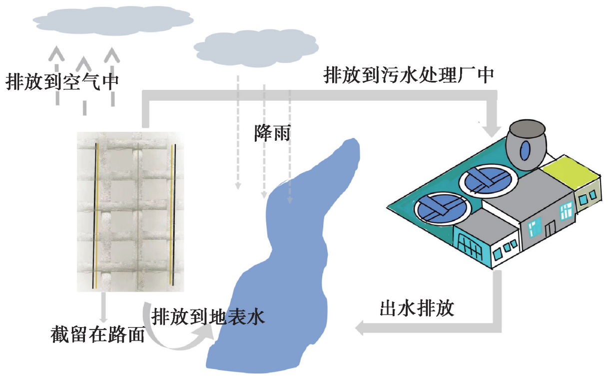

图 3 轮胎和道路磨损产生的微塑料颗粒分布

Fig. 3 Distribution of Microplastic Particles from Tire and Road Wear

3 总结与展望

污水处理厂主要处理生活污水,部分接收工业废水和雨水。进水中微塑料以聚乙烯、聚苯乙烯为主,粒径分布较广,颜色多样,与居民消费习惯一致。但目前对污水处理厂中微塑料来源的具体研究较少,源头仍不清晰。污水处理厂作为微塑料向环境中排放的重要点源,纺织品的洗涤和个人护理品的使用是微塑料的主要来源,同时也应注意轮胎磨损和大气沉降。合成纺织品洗涤所释放的微塑料纤维由洗涤类型、使用者的操作条件、洗涤参数等所决定,所以应尽快阐明不同参数条件下纤维的释放,以明确纤维释放机理。而个人护理品中的微珠或许能够寻找出可替代、无污染的产品。

针对以上问题,提出微塑料污染源的管控对策。(1)加强对工业废水的排放监管、实施雨污分流等措施。

(2)制定出水排放标准。污水处理厂向环境中排放的微塑料数量庞大,在未来可考虑将微塑料纳入污水处理厂出水的排放标准,从而加强对污水处理厂中微塑料的监管。

(3)源头控制。在未来可寻找可替代的绿色材料或加强监管,在源头上减少进入环境中的微塑料。除此之外,还应改进现有的污水处理工艺或研发出新型污水处理工艺,实现不同类型微塑料的有效去除。

污水处理厂进水中的微塑料应该根据其排放源在源头划分,但污水处理厂中微塑料不同来源的定量化仍是一项挑战。同时也应注意环境科学和纺织科学以及化妆品学等交叉学科的探究,在根本上探究来源以及影响因素,从而在源头上减少微塑料的排放。

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. DOI: 10.1126/science.1094559.

[2] JAMBECK J R, GEYER R, WILCOX C, et al. Marine pollution: Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. Science, 2015, 347 (6223): 768-771. DOI: 10.1126/science.1260352.

[3] VALAVANIDIS A, VLACHOGIANNI T. Engineered nanomaterials for pharmaceutical and biomedical products new trends, benefits and opportunities [J]. Journal of Pharmacological Reports, 2016, 4(1): 13-24. DOI: 10.4172/jpr.1000105.

[4] BRAHNEY J, HALLERUD M, HEIM E, et al. Plastic rain in protected areas of the United States[J]. Science, 2020, 368 (6496): 1257-1260. DOI: 10.1126/science.aaz5819.

[5] ACHARYA S, RUMI S S, HU Y, et al. Microfibers from synthetic textiles as a major source of microplastics in the environment: A review[J]. Textile Research Journal, 2021, 91 (17/18): 2136-2156. DOI: 10.1177/0040517521991244.

[6] YANG L, LI K, CUI S, et al. Removal of microplastics in municipal sewage from China's largest water reclamation plant [J]. Water Research, 2019, 155: 175-181. DOI: 10.1016/j.watres.2019.02.046.

[7] 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. DOI: 10.1016/j.watres.2019.02.028.

[8] ZIAJAHROMI S, NEALE P A, RINTOUL L, et al. Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: Development of a

newapproach to sample wastewater-based microplastics [J]. Water Research, 2017, 1(42): 93-99. DOI: 10.1016/j.watres.2017.01.042.

[9] 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. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.08.056.

[10] 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 Environment Science, 2020, 40(9): 3835-3841.

[11] 邱博文. 城市污水处理厂中微塑料的分布特征及微塑料对重金属的吸附作用研究[D]. 温州：温州大学，2020.
QIU B W. Research on the distribution characteristics of microplastics in municipal wastewater treatment plants and the adsorption of microplastics on heavy metals [D]. Wenzhou: Wenzhou University, 2020.

[12] 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. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.06.006.

[13] 宣立强，刘硕，罗爻，等. 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.
XUAN L Q, LIU S, LUO Y, et al. Removal of microplastics in different wastewater treatment processes in Harbin municipal wastewater treatment plants[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(11): 3964-3970.

[14] 叶李嘉，吴南翔，高明，等. 杭州市两污水处理厂进水中微塑料污染水平及特征[J]. 环境与职业医学，2021，38(8)：883-887.
YE L J, WU N X, GAO M, et al. Pollution levels and characteristics of microplastics in influent of two wastewater treatment plants in Hangzhou[J]. Journal of Environmental & Occupational Medicine, 2021, 38(8): 883-887.

[15] 龙彦宇. 微塑料在污水处理过程中的演变机制研究[D]. 扬州：扬州大学，2021.
LONG Y Y. Study on evolution mechanism of microplastics in wastewater treatment process [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.

[16] 白濛雨，赵世烨，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 microplastics during urban sewage treatment process [J]. China Environment Science, 2018, 38(5): 1734-1743.

[17] 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 Research, 2020, 27(29): 36295-36305. DOI: 10.1007/s11356-020-09611-5.

[18] 刑薇. 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 W. Removal efficiency and whole process analysis of microplastics in sewage treatment plant-A case study of a submerged tertiary sewage treatment plant in Beijing[J]. China Environment Science, 2021, 41(3): 1140-1147.

[19] 殷伟庆，解清杰，苏洁. 典型污水处理厂微塑料赋存特征研究[J]. 环境监控与预警，2022，14(2)：63-69.
YIN W Q, XIE Q J, SU J. The occurrence characteristics of microplastics in typical sewage treatment plants [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2022, 14(2): 63-69.

[20] HU Y, GONG M, WANG J, et al. Current research trends on microplastic pollution from wastewater systems: A critical review [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2019, 18(2): 207-230.

[21] TANG N, LIU X, XING W. Microplastics in wastewater treatment plants of Wuhan, Central China: Abundance, removal, and potential source in household wastewater [J]. Science of the Total Environment, 2020, 745: 141026. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141026.

[22] FENDALL L S, SEWELL M A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers [J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(8): 1225-1228. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2009.04.025.

[23] 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. DOI: 10.1016/j.watres.2016.01.002.

[24] NAPPER I E, BAKIER 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. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.07.029.

[25] GALAFASSI S, NIZZETTO L, VOLTA P. Plastic sources: A survey across scientific and grey literature for their inventory and relative contribution to microplastics pollution in natural environments, with an emphasis on surface water[J]. Science of the Total Environment, 2019, 693: 133499. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.305.

[26] SALADOR C F, TURRA A, BARUQUE-RAMOS J. Synthetic fibers as microplastics in the marine environment: A review from textile perspective with a focus on domestic washings [J]. Science of the Total Environment, 2017, 598: 1116-1129. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.172.

[27] NGO P L, PRAMANIK B K, SHAH K, et al. Pathway, classification and removal efficiency efficiency of microplastics in wastewater treatment plants[J]. Environmental Pollution, 2019, 255: 113326. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113326.

(下转第 150 页)

quality of sewage treatment plants in residential and industrial areas of Qingdao [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(1): 76-81.

[6] 陈晓难, 赵文秀, 李诚. 粉末活性炭在污水处理厂深度处理中的应用[J]. 净水技术, 2020, 39(s1): 129-132.
CHEN X N, ZHAO W X, LI C. Application of powdered activated carbon in advanced treatment of WWTP [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(s1): 129-132.

[7] 陈显峰, 黄开, 赵荣, 等. 基于碳减排理念的 Q 市某污水再生处理厂提标设计与运行[J]. 净水技术. 2022, 41(9): 150-155, 161.
CHEN X F, HUANG K, ZHAO R, et al. Design and operation of upgrading and reconstruction of a wastewater reclamation treatment plant in Q City based on the concept of carbon emission reduction[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(9): 150-155, 161.

(上接第 30 页)

[28] CHEUNG P K, FOK L. Characterisation of plastic microbeads in facial scrubs and their estimated emissions in Mainland China [J]. Water Research, 2017, 122: 53-61. DOI: 10.1016/j.watres.2017.05.053.

[29] ANAGONSTI L, VARVARESOU A, PAVLOUS P, et al. Worldwide actions against plastic pollution from microbeads and microplastics in cosmetics focusing on European policies. Has the issue been handled effectively? [J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 162: 111883. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111883.

[30] DING N, AN D, YIN X, et al. Detection and evaluation of microbeads and other microplastics in wastewater treatment plant samples[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(13): 15878-15887.

[31] KALČIKOVA G, LI B C, SKALAR T, et al. Wastewater treatment plant effluents as source of cosmetic polyethylene microbeads to freshwater[J]. Chemosphere, 2017, 188: 25-31. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.08.131.

[32] TIAN Y J, CHEN Z, ZHANG J Y, et al. An innovative evaluation method based on polymermass detection to evaluate the contribution of microfibers from laundry process to municipal wastewater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 12: 4861. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124861.

[33] VELZEBOER I, KWADIJK C J A F, KOELMANS A A. Strong sorption of PCBs to nanoplastics, microplastics, carbon nanotubes, and fullerenes [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(9): 4869-4876. DOI: 10.1021/es405721v.

[34] FALCO F D, GULLO M P, GENTILE G, et al. Evaluation of microplastic release caused by textile washing processes of synthetic fabrics [J]. Environmental Pollution, 2018, 236: 916-925. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.10.057.

[35] CARNEY A B M, ASTROM L, ROSLUND S, et al. Quantifying shedding of synthetic fibers from textiles; A source of microplastics released into the environment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(2): 1191-1199.

[36] BROWNE M A, CRUMP P, NIVEN S J, et al. Accumulation of microplastic on shorelines woldwide: Sources and sinks [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(21): 9175-9179. DOI: 10.1021/es201811s.

[37] STARK M, 李娜. 微塑料和纺织纤维研究综述[J]. 国际纺织导报, 2018, 46(2): 6-8.
STARK M, LI N. Review of research on microplastics and textile fibers[J]. Melliand China, 2018, 46(2): 6-8.

[38] MASURA J, BAKER J, FOSTER G, et al. Laboratory methods for the analysis of microplastics recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments[EB/OL]. (2015-07-01)[2022-06-25]. https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/10296.

[39] KOLE P J, LOHER A J, VAN B F, et al. Wear and tear of tyres: A stealthy source of microplastics in the environment[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(10): 1265. DOI: 10.3390/ijerph14101265.

[40] SIEGFRIED M, KOELMANS A A, BESSELING E, et al. Export of microplastics from land to sea. A modelling approach [J]. Water Research, 2017, 127: 249-257. DOI: 10.1016/j.watres.2017.10.011.

[41] LI X, CHEN L, JI Y, et al. Effects of chemical pretreatments on microplastic extraction in sewage sludge and their physicochemical characteristics [J]. Water Research, 2019, 171: 115379. DOI: 10.1016/j.watres.2019.115379.

[42] MAGNI S, BINELLI A, PITTURA L, et al. The fate of microplastics in an Italian wastewater treatment plant [J]. Science of the Total Environment, 2019, 652: 602-610. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.269.

[43] VERSIE M. Emissieschattingen diffuse bronnen emissieregistratie-bandenslijtage wegverkeer[EB/OL]. [2022-06-25]. https://adoc.pub/emissieschattingen-diffuse-bronnen-emissieregistratie-versie.html.