

污水厂中微塑料的污染及迁移特征研究进展

许霞¹,侯青桐¹,薛银刚^{1,2*},蹇云¹,王利平¹ (1.常州大学环境与安全工程学院,江苏 常州 213164; 2.常州市环境监测中心,江苏 常州 213001)

摘要: 合成聚合物的广泛使用和持久性污染使得微塑料(<5mm)成为近年来受到广泛关注的一种新型污染物,污水的大量排放是淡水和海洋环境微塑料的主要来源之一,而污水处理厂也成为微塑料进入淡水与海洋环境的一个重要途径.通过系统调研,追溯污水处理厂中微塑料的来源,综述污水处理厂中微塑料的迁移和污染特征的研究进展,分析国内外污水处理厂中微塑料的特征和去除效果的差异性,为开展国内污水处理厂中微塑料污染研究与监督工作提供参考,并展望未来污水处理厂工艺的发展及改进方向.

关键词: 微塑料; 污水处理厂; 污染; 迁移

中图分类号: X708 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2018)11-4393-08

Research progress on the transference and pollution characteristics of microplastics in wastewater treatment plants. XU Xia¹, HOU Qing-tong¹, XUE Yin-gang^{1,2*}, JIAN Yun¹, WANG Li-ping¹ (1.School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2.Changzhou Environmental Monitoring Center, Changzhou 213001, China). *China Environmental Science*, 2018,38(11): 4393~4400

Abstract: Due to the widespread use and persistent contamination of synthetic polymers, microplastic (<5mm) has been got more and more attention in recent years as a new type of pollutants. The discharge of sewage was one of the main sources of microplastic in freshwater and marine environment, so the sewage treatment plants also became an important path for microplastic to enter into fresh water and marine environment. The source of microplastic was investigated systematically, the research progress in the transport and pollution characteristics of microplastic in wastewater treatment plants was reviewed, and the differences of microplastic pollution in wastewater treatment plants at home and abroad in recent years were compared. It would provide reference for the research and supervision of microplastic pollution in domestic sewage treatment plants and look forward to the future development and improvement direction of wastewater treatment process.

Key words: microplastics; wastewater treatment plants; pollution; transference

塑料颗粒或纤维尺寸粒径小于 5mm 的被称为微塑料^[1].微塑料具有体积小、比表面积大和吸附能力强等特点,更易吸附环境中的多氯联苯(PCBs)和多环芳烃(PAHs)等持久性有机污染物和重金属^[2-3],由于微塑料具有很强的稳定性和持久性,在环境中可以持续几百甚至上千年^[4],且易被环境中不同营养级的生物误食,对生态系统带来的影响比大塑料垃圾更为严重^[5-7],一旦进入食物链将对人类的健康构成威胁^[8].2014 年《Nature》和《Science》连续报道微塑料的研究进展,并呼吁人们关注微塑料的污染和危害^[9-11].近日,联合国环境规划署正式公布 2018 世界环境日主题为“塑战速决”,呼吁世界各国齐心协力对抗一次性塑料污染问题.微塑料污染已成为与全球气候变化、臭氧耗竭和海洋酸化并列的重大全球环境问题,成为各国政府、学者和公众的关注热点.

经 Web of Science 检索显示,截至 2017 年,微塑

料相关的研究论文已达 918 篇,近 5a 来一直呈指数增长,涉及多地区和多环境介质中微塑料的污染调查、毒理学等.研究发现,在海洋系统中依靠海洋洋流运动使得微塑料遍布全球,各大洲的海岸线^[12-14]以及南大西洋群岛^[15]、南极岛屿^[16]和北极^[17]等偏远地区,甚至在深海的栖息地^[18]均检出了不同丰度和粒径的微塑料,而且在河流和湖泊等淡水水域也普遍存在^[19-23],甚至在贻贝^[24-25]、浮游生物^[5,26]、鱼和鸟^[27-29]等生物体内,以及食盐^[30]、自来水和瓶装矿泉水^[31]中均有微塑料的检出.

近年来,关于污水厂中微塑料的研究逐渐增多,多国研究学者通过对本地区污水处理厂出水与附近水域中微塑料丰度的研究得出了相同的结论,污

收稿日期: 2018-04-03

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(21607017);江苏省环境监测基金资助项目(1702);污染控制与资源化研究国家重点实验室开放基金资助项目(PCRRF17036)

* 责任作者,高级工程师, yzxyg@126.com

水处理厂是微塑料进入环境的一个重要途径^[32-35].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.

本文通过文献调研,追溯污水处理厂中微塑料的来源,综述微塑料的污染特征及微塑料在污水处理工艺中的迁移与归趋,为我国开展污水处理厂中微塑料的污染特征、毒理和风险评估研究及微塑料的污染控制工作提供参考,并展望未来污水处理厂工艺的发展及改进方向.

1 污水处理中微塑料的来源

水环境中微塑料的来源可以分为初级来源和次级来源^[36],初级来源是指由工业活动所产生的微米级塑料,如牙膏和洗面奶中的塑料微珠;次级来源是由于塑料垃圾在环境中经过物理、化学风化作用而产生破碎、分解.不同于在海洋、河流和湖泊中大型废弃物分解而成的次生微塑料,在污水处理过程中,直接造成塑料垃圾逐渐分解的过程几乎不存在^[37].污水处理厂中微塑料主要来源于生活污水和工业废水.

1.1 生活污水

生活污水中涉及的微塑料主要来源于两个途径:个人护理品及化妆品的使用和纺织衣物的清洗.

1.1.1 个人护理和化妆品 塑料微珠常被作为清洗剂用在如洗面奶、沐浴露和牙膏等个人护理品和眼线笔、唇彩和防晒霜等化妆品中^[38],并且由于其使皮肤光滑且伤害更小,而逐步替代了浮石和胡桃壳等天然材料,尺寸介于 $4\mu\text{m}$ ~ 1mm 之间^[39].2016 年香港贸易发展局对包括北京、上海、广州在内的中国 16 个主要城市进行市场调研,受调查的男性 and 女性年龄在 20~45 岁之间,92% 以上的女性受访者 ($N=2400$) 和 86% 以上的男性受访者 ($N=800$) 日常生活中均使用洗面奶^[40].Napper 等^[41]研究指出,每次使用面部清洁剂时,将有 4594~94500 个微珠释放到污水中.Rochman 等^[42]估计在美国仅处理过的污水就会导致每天 80 亿微珠的排放. Carr 等^[37]发现在污水处理厂内不同工艺段出水中鉴定的大多数微塑料具有类似于牙膏配方中存在的蓝色聚乙烯颗粒. Chang 等^[43]发现面部清洁剂中的微珠多为白色和不透明的,与海洋中常见的微塑料类型相一致,这些颜色与浮游生物相似,容易被鱼类误食,进而通过食物

链传递到更高的营养级.

值得注意的是经常添加在洗面奶、面部磨砂或去角质产品中能强化清洗和去角质功能的聚乙烯微粒已被确认为是水体中微塑料污染的来源之一^[44].此外,现有的污水处理工艺尽管非常有效,但由于塑料微珠粒径小,较易通过污水处理中 6mm 的粗格栅或 1.5~6mm 的细格栅,甚至无法被其它污水处理系统去除从而随出水进入淡水和海洋,而被拦截的微珠则进入污泥中,随污泥的资源化利用可能再次进入环境.劳伦特五大湖^[45]和香港沿海水域^[40]的研究证实来自于洗面奶的微塑料能“逃避”污水处理工艺直接进入河道.

1.1.2 纺织纤维 纤维是微塑料的一种主要类型,近年来在海洋、海滩、沉积物、地表水、地下水甚至是如极地冰川均被发现其存在^[46].而这些纤维主要来源于日常衣物、地毯等纺织品的清洗,Browne 等人研究发现衣物经过单次清洗,污水中的纤维量可达到 100 个/L 以上,因此家用洗衣机也成为了“微塑料”污染的一个主要源头^[47].2016 年 Napper 等^[48]发现使用洗衣机每洗一次 6kg 合成织物,可能产生大量的“超细纤维”,其中涤纶与棉混纺、涤纶、腈纶分别脱落 1.38×10^5 个、 4.96×10^5 个和 7.28×10^5 个,这些纤维由于尺寸较小,大部分都可以通过污水处理厂处理后释放到河流和海洋中.此外在窗帘、地毯的清洁过程中也会使这些细小的纤维进入下水道或空气中^[49-51].

此外,纤维在印染过程就有超过 10000 种化学物质参与,这些化学物质被用于保存、加工、着色等,尽管不是所有的物质成分被认为是有毒的,但在纺织品使用、磨损甚至洗涤过程中这些化学物质都可能进入环境,例如壬基酚乙氧基化物,与水接触后,会分解形成壬基酚,这是一种持久性的有毒物质^[46];除了自身带有的毒性外,微纤维与环境中大量存在的多氯联苯、双酚 A 等持久性有机污染物结合,易于聚集形成一个有机污染体,随着水中微纤维的迁移,这些污染物会到达更加偏远的地区,加剧了对环境和生物的危害^[52].

1.2 工业废水

工业生产过程中产生的微米级塑料也是环境中微塑料的来源之一.包括大块塑料在制造、使用以及保存等全生命周期过程中产生的磨损,比如汽车

轮胎的磨损^[36],以及纺织印染厂中衣物的制造和印染过程中产生的微纤维.这些微塑料随着工业废水进入污水厂处理后最终汇入淡水河流和海洋.目前对工业废水中微塑料的研究还较缺乏.

2 微塑料在污水处理厂中的污染特征

表 1 国内外污水处理厂中微塑料的污染特征

Table 1 The pollution characteristics of microplastics from wastewater treatment plants at home and abroad

国家	尺寸(μm)	类型	主要聚合物组分	纤维所占比例 (%)	各组分所占比例 (%)	检出量/鉴定量 (个)	来源
芬兰	20~300 ≥300	纤维、碎片、薄膜	PES 、PE、PP	48.5	63、29、6	134/752	[53]
芬兰	<250 250~5000 >5000	纤维、颗粒	PES、PE、 PA	82.8	79、11、4	—	[54]
美国	125~355 >355	纤维、碎片、小球、薄膜	—	46 80	—	—	[34]
荷兰	10~5000	纤维、薄片、小球	—	61.9	—	—	[55]
英国	≥11	纤维、薄片、微珠、碎片	PES、醇酸树脂、尼龙	18.5	27、25、14	303/303	[35]
澳大利亚	25~500	纤维、颗粒	PET、PE	80	80、20	12/117	[56]
澳大利亚	25~500	纤维、颗粒	PET、PE、尼龙	66	33、24、20	97/129	[56]
澳大利亚	25~500	纤维、颗粒	PE、PET、PS	56	42、36、15	81/257	[56]
瑞典	≥300	纤维、碎片、薄膜	PET、PE、PP	70	—	—	[33]
德国	>500	纤维、颗粒	PEST、PA、PP	99	73、17、9	—	[57]
德国	<500	颗粒	PE、PVAL、PA	—	40、16、8	—	[57]
中国	125~5000	纤维状、非纤维状	人造丝、合成革、PES	58	26、26、12	185/443	[58]

注:鉴定量为总鉴定个数,检出量为鉴定为微塑料的个数.

环境中的微塑料根据粒径、形状、颜色、类型和高聚物组分等有不同的分类方式,表 1 显示了国内外污水处理厂中检测到的微塑料尺寸、类型和组分的基本情况.

2.1 微塑料的类型

根据污水处理厂中微塑料的形貌观察,按其形状不同,其类型主要呈现为微纤维、微型塑料碎片、塑料颗粒、薄膜、塑料小球,其多属于初生微塑料.纤维是水体、沉积物和生物体中检出的最普遍的微塑料类型^[47,59-61],在污水处理厂检出的微塑料中,纤维仍占最大比例^[32-34,56-57].

纤维可分为天然纤维和合成纤维.天然纤维主要有棉、羊毛、蚕丝、竹和人造丝等^[49];合成纤维主要由聚酯组成,其次是丙烯酸、聚酰胺和聚丙烯^[47,56-57].洗涤衣物产生的纤维通过污水收集管道转移到污水处理厂中^[48],大部分纤维尺寸小且较轻,经过污水处理工艺后还残留于水体中;另一方面,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.研究发现作为肥料的污泥会再次将纤维带入土壤,从而通过无脊椎动物的摄入进入食物链中^[62],此外在雨水径流的作用

下有可能将土壤中的微塑料带入水体中^[63].河流在输送微纤维方面起着至关重要的作用,其可将纤维输送至海洋、地下水甚至更偏远的地方^[64-65].Lusher 等^[66-67]在东北大西洋的地下水域和挪威的表层水中检出的微塑料中有 95%属于微纤维,同样,Fischer 等^[61]在西北太平洋的深海沉积物中也发现了大量的纤维.因此,微塑料能通过污水的排放和污泥的利用重新回到环境中.

此外,微塑料的类型还与使用的筛网孔径大小有关.Mason 等^[34]的研究显示用 0.355mm 的筛网截留的较大微塑料中纤维占 80%,其次为碎片(14%)、薄膜 (3%)、泡沫 (2%) 和小球 (1%),而在 0.125~0.355mm 之间截留的较小微塑料中纤维和碎片所占比例较为接近,分别为 46%和 44%、其次为薄膜(6%)、泡沫(3%)和小球(1%),因此,筛网孔径的不同也使截留的微塑料类型分布比例有较大差异性.

2.2 微塑料的组分

污水处理厂中微塑料的种类主要有聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)、聚丙烯(PP)、聚酯(PES)、聚酰胺(PA)、聚对苯二甲酸乙二酯(PET)、尼龙、丙烯

腈-苯乙烯共聚物(SAN)、聚氨酯(PU)、聚氯乙烯(PVC)、聚丙烯酸酯(PEA)、醇酸树脂(ALK)、聚苯乙烯(PPO)、乙烯基乙烯、醋酸纤维素(EVA)和丙烯酸酰胺^[68].Talvitie 等^[68]对芬兰 4 个城市污水处理厂 13 个样品的研究发现聚酯占主导地位,约占样品的 60%,其次是聚乙烯(14%)、聚丙烯酸酯(7%)、聚氯乙烯(5%)、聚苯乙烯(4%)和聚丙烯(3%).同时对污水处理厂的纤维进行了检测,发现 66%属于天然纤维(棉、亚麻、羊毛),聚酯类和丙烯酸纤维分别占 33%和 1%^[53].

3 微塑料在污水处理厂中的迁移特征

受纳水体中微塑料的来源有很多,包括暴雨径流、乱抛垃圾和大气沉降等,有研究认为与污水处理厂并不一定存在直接的联系^[50,54].而 Browne 等^[47]从处理厂排出的污水中采集了微塑料,并检测了污泥

处置场地沉积物中微塑料的丰度.平均而言,每升出水含有一个微塑料颗粒,包括聚酯(67%)、丙烯酸(17%)和聚酰胺(16%),与海岸线中观察到的微塑料比例类似,这进一步证实污水处理系统作为微塑料进入环境的通道作用和相关性.

3.1 污水处理工艺流程

城市污水处理一般分为三级^[34],图 1 为生活污水处理的基本流程图,主要分成污水处理(液相)和污泥处理(固相)两部分,其中污水处理一般经过三级处理后排放至地表水体.一级处理为机械处理,通过截留、沉降等物理方式去除污水中的悬浮物质;二级处理为生物处理,通过活性污泥、生物膜法等生物处理方式去除水中胶体和溶解态有机污染物;三级处理是对污水的深度处理,通过物理化学技术进一步去除水中的悬浮物质、无机盐和其它污染物质.

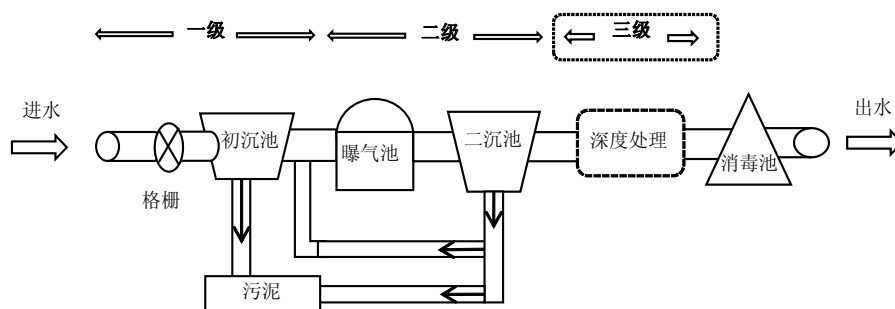


图 1 城市生活污水处理工艺流程

Fig.1 Process of a typical municipal wastewater treatment

3.2 液相中微塑料的迁移

Talvitie 等^[53]发现在污水处理过程中,微塑料容易絮团附着在砂砾中,并在初次沉淀过程中被有效拦截,在一级处理和活性污泥法二级处理后,对污水中微塑料的截留能力超过 99.0%.Carr 等^[37]对美国南加利福尼亚州的 7 个不同三级处理的污水厂和 1 个二级处理的污水厂出水进行观测发现在三级污水处理厂的出水中几乎没有检测到微塑料,这些塑料污染物在格栅和沉淀过程中得到了有效去除,而在下游的二级污水处理厂预计每排出 1.14×10^3 L 污水就排出 1 个微塑料,这相当于微塑料总排放量为 0.93×10^6 个/d.Murphy 等^[35]的研究发现,在苏格兰格拉斯哥某大型二级污水处理厂中,一级处理去除了 78%的微塑料,而二级处理则去除了 20%,出水中微

塑料的去除率达 98.4%.

由于污水厂污水类型和工艺的不同^[69],以及水样采集、分离、鉴定方法的不统一,不同污水处理厂中微塑料的浓度和去除效果存在一定的差异,如表 2 所示.首先,采样时间对微塑料的去除效果有一定影响,同一个污水厂中,微塑料的数量会随时间而变化^[55].Talvitie 等人的研究表明晚上(10p.m. - 7a.m.)微塑料的浓度相比于白天(7a.m. - 10p.m.)要较低,且傍晚浓度上升,要高于下午时段^[53].同时,Miller 等^[70]发现季节变化也可能是导致微塑料浓度差异的一个重要影响因素,微纤维的污染水平在寒冷的月份,其数量会增长高达 700%^[47].其次,处理工艺的不同对微塑料去除也会产生较大差异.Talvitie 等人的研究显示 MBR 对一级工艺出水中微

塑料的去除率高达 99.9%,而快速砂滤池、溶解气浮法及盘式过滤器对二级工艺出水中微塑料的去除率分别可达 97%、95%和 40%~98%,虽然 MBR 处理的一级污水中微塑料浓度要高于其它三种工艺处理的二级污水,但 MBR 处理后的污水中微塑料的浓度是最低的^[68];Lares 等^[54]比较了 MBR 工艺和 CAS 工艺,发现 MBR 技术对微塑料的去除率也高达 99.4%,MBR 对微塑料的高效去除率与其小孔径过滤器有关.由此可知采用先进合理的处理技术和工艺,可以有效减少微塑料的排放.再次,在采样方法上一般分为容器采集^[35,54,58]和过滤装置采集^[53,57,68].当样本量较低时,难以确定微塑料的浓度外推是否正确,如上海某污水处理厂中微塑料的去除率只有 55.6%^[58],与其它污水厂差异较大,也可能是因为采样量仅为 4L 的原因.最后,样品分析及鉴定方法同样也会对研究结果产生差异.在一些研究中并没有利用 FTIR 或拉曼分析对聚合物进行鉴定,而是仅采用目检法进行分析^[34,71],这种方法不仅繁杂且误差较大.此外,鉴定的成功率也是一大问题,Leslie 等^[55]发现一些黑色和透明色的纤维无法被 FTIR 识别,且分别占计数颗粒的 37.4%和 9.9%;Ziajahromi 等^[56]在澳大利亚 3 个污水厂中的研究发现,在所鉴定的 503 个粒子中仅有 190 个被鉴定为微塑料.而在 Talvitie 等^[53]鉴定的 752 个颗粒中,成功被识别的颗粒仅占 18%.

表 2 污水处理厂中微塑料的丰度及去除效率
Table 2 Abundance and removal efficiency of microplastics
in wastewater treatment plants

采样点	进水(个/L)	出水(个/L)	去除率(%)	来源
德国 12 个污水处理厂	5	0.02	99.6	[57]
悉尼三级污水处理厂	2.2	0.21	90	[56]
悉尼二级污水处理厂	1.44	0.48	66.7	[56]
俄罗斯污水处理厂	627	23	96.9	[46]
法国污水处理厂	260~320	14~50	83~95	[49]
瑞典某污水处理厂	15	8.3×10^{-3}	99.9	[33]
芬兰某污水处理厂	57.6	1.0	98.3	[54]
美国 17 个污水处理厂	—	0.05	—	[34]
美国南加利福尼亚州 三级处理厂	0.88	8.8×10^{-4}	99.9	[37]
苏格兰格拉斯哥二级 处理厂	15.6	0.25	98.4	[35]
上海某污水处理厂	117	52	55.6	[58]

大部分的污水处理厂对微塑料的去除效率都

很高,基本都在 90%以上.虽然污水处理厂的每升出水中微塑料的含量较少,但较大的日处理量使得排放至环境中的微塑料数量是不容忽视的^[35,47].Sutton 等^[72]发现,在美国旧金山湾的 8 个污水处理厂中每天共排放 5600 万个塑料微粒($\geq125\mu\text{m}$);Lares 等^[54]研究结果显示,位于芬兰米凯利某城市污水处理厂每天从废水中排出的微塑料达到 1 千万个($>250\mu\text{m}$);Mintenig 等^[57]报道称在德国的污水处理厂,一年排出的微塑料可达 5 万亿个($>500\mu\text{m}$),这些微塑料的排放足以对淡水及海洋环境产生一定的影响.

3.3 固相中微塑料的迁移

除了污水厂的出水中含有微塑料,污泥中夹带的微塑料也是其进入环境的一种方式,因为很大一部分污泥会被制成肥料并用于土壤或以其他方式填埋^[73].Magnusson 等^[33]在瑞典的污水处理厂中发现,污泥中微塑料浓度约为 (16.7 ± 1.96) 个/ $\text{g}(\geq300\mu\text{m})$;Talvitie 等^[32]在芬兰的污水处理厂离心后的干污泥中检出微塑料浓度为 (186.7 ± 26.0) 个/ g ;Mintenig 等^[57]报道了在德国 12 个污水处理厂中,每克干污泥含有 24 个微塑料颗粒.在芬兰米凯利某城市污水处理厂,活性污泥中检出的微塑料浓度为 (23.0 ± 4.2) 个/ g ,消化污泥中 (170.9 ± 28.7) 个/ g ,每天从污泥中排出的微塑料高达 4.6 亿个^[68].在北美,Zubris 等^[63]发现污泥中微纤维长时间暴露于土壤后,仍可以保持其原有特征.而在国内,白濛雨等人^[58]的最新研究结果显示污泥中微塑料的含量达到 180 个/50g(湿重),脱水后的污泥主要用于绿化及填埋场覆盖土.由此可见污泥也是将微塑料重新带入环境中的一个重要途径.Murphy 等^[35]通过对比污水和污泥中的微塑料发现,污泥中微塑料尺寸要大于污水,这说明污水中去除的部分较大颗粒被截留在了污泥中.此外,研究结果显示进水中悬浮固体(SS)的浓度可以有效地估计污泥中微塑料的浓度^[33].

由于方法学上的差异(采样、鉴定)和污水的季节性变化,不同采样点得到的数据会有较大的差异,但通过国内外污水处理厂的分析证实污水处理厂是微塑料进入淡水和海洋的一个重要途径.除非减少微塑料的生产和使用或对污水处理设施进行有效改进,否则随着人口增长,通过污水向环境释放的微塑料依然会持续增加.

4 结语

4.1 加强生活污水和工业废水中微塑料的源解析.当前微塑料在污水处理厂中的污染研究还集中在国外一些较大城市,并且多为生活污水,国内相关研究还很少,因此亟需了解国内城镇生活污水处理厂和工业废水对微塑料排放的贡献率,研究不同类型污水处理厂污水中微塑料的污染特征并进行源解析,预测排放量,为污染控制提供支撑.

4.2 亟需建立污水污泥中微塑料标准分析方法.由于目前还没有标准方法来测定污水污泥中微塑料的丰度、类型等,因此国外各污水处理厂中微塑料采样、分离、鉴定方法的不同使得数据结果存在较大的差异,因此亟需建立标准化的采样、分析方法,精确统计微塑料的数量,针对一些超细纤维和透明状的微塑料难以识别的问题,需要采取更优的鉴别手段,避免低估或高估微塑料的丰度.

4.3 研究污水处理工艺对微塑料去除的影响.污水处理厂工艺的不同,其对微塑料的去除结果也有较大的差异.目前,即使是国外先进的污水处理厂也无法全部去除微塑料,因此针对新型微塑料污染在污水和污泥中的迁移特征,污水和污泥处理工艺也需要相应地进一步改进和提升.

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):838-838.
- [2] Hirai H, Takada H, Ogata Y, et al. Organic micropollutants in marine plastics debris from the open ocean and remote and urban beaches [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011,62(8):1683-1692.
- [3] 屈沙沙,朱会卷,刘锋平,等.微塑料吸附行为及对生物影响的研究进展 [J]. *环境卫生学杂志*, 2017,7(1):75-78.
- [4] Andrady A L. Microplastics in the marine environment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011,62(8):1596-605.
- [5] Cole M, Lindeque P, Fileman E, et al. Microplastic ingestion by zooplankton [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013,47(12):6646-6655.
- [6] Wright S L, Thompson R C, Galloway T S. The physical impacts of microplastics on marine organisms: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2013b,178:483-492.
- [7] Barnes D K A, Galgani F, Thompson R C, et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments [J]. *Philosophical transactions - Royal Society. Biological sciences*, 2009, 364(1526):1985-1998.
- [8] Gross M. Oceans of plastic waste [J]. *current biology*, 2015,25(3):93-95.
- [9] Marris E. Fate of ocean plastic remains a mystery [J]. *Nature News*, 2014, doi: 10.1038/nature.2014.16508.
- [10] Perkins S. Plastic waste taints the ocean floors [J]. *Nature News*, 2014, doi: 10.1038/nature.2014.16581.
- [11] Law K L, Thompson R C. Microplastic in the seas [J]. *Science*, 2014, 345(6193):144-145.
- [12] Dubaish F, Liebezeit G. Suspended microplastics and black carbon particles in the Jade system, southern North Sea [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2013,224:1-8.
- [13] Collignon A, Hecq J H, Galgani F, et al. Annual variation in neustonic micro-and meso-plastic particles and zooplankton in the Bay of Calvi (Mediterranean-Corsica) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014,79:293-298.
- [14] Desforges J P W, Galbraith M, Dangerfield N, et al. Widespread distribution of microplastics in subsurface seawater in the NE Pacific Ocean [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014,79:94-99.
- [15] Ivar do Sul J A, Costa M F, Barletta M, et al. Pelagic microplastics around an archipelago of the Equatorial Atlantic. *Mar [J]. Pollution Bulletin*, 2013,75:305-309.
- [16] Eriksson C, Burton H, Fitch S, et al. Daily accumulation rates of marine debris on sub-Antarctic island beaches [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013,66:199-208.
- [17] Obbard R W, Sadri S, Wong Y Q, et al. Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice [J]. *Earth's Future*, 2014,2:315-320.
- [18] Van Cauwenberghe L, Janssen C R. Microplastics in bivalves cultured for human consumption [J]. *Environmental Pollution*, 2014,193:65-70.
- [19] Miller R Z, Watts A J R, Winslow B O, et al. Mountains to the sea: River study of plastic and non-plastic microfiber pollution in the northeast USA [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017,124(1):245-251.
- [20] Castañeda R A, Avlijas S, Simard M A, et al. Microplastic pollution in St. Lawrence River sediments [J]. *Journal Canadien Des Sciences Halieutiques Et Aquatiques*, 2014,71(1):21-40.
- [21] Anderson P J, Warrack S, Langen V, et al. Microplastic contamination in Lake Winnipeg, Canada [J]. *Environmental Pollution*, 2017,225:223-231.
- [22] Su L, Xue Y, Li L, et al. Microplastics in Taihu Lake, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016,216:711-719.
- [23] Free C M, Jensen O P, Mason S A, et al. High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014,85(1):156.
- [24] Li J, Qu X, Su L, et al. Microplastics in mussels along the coastal waters of China [J]. *Environmental Pollution*, 2016,214:177-184.
- [25] Pp G E S, Nobre C R, Resaffe P, et al. Leachate from microplastics impairs larval development in brown mussels [J]. *Water Research*, 2016,106:364-370.
- [26] Frias J P, Otero V, Sobral P. Evidence of microplastics in samples of zooplankton from Portuguese coastal waters [J]. *Marine Environmental Research*, 2014,95(4):89.
- [27] Jabeen K, Su L, Li J, et al. Microplastics and mesoplastics in fish from coastal and fresh waters of China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 221:141-149.

- [28] Rochman C M, Hoh E, Kurobe T, et al. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress [J]. *Scientific Reports*, 2013,3(7476):3263.
- [29] Zhao S, Zhu L, Li D. Microscopic anthropogenic litter in terrestrial birds from Shanghai, China: Not only plastics but also natural fibers [J]. *Science of the Total Environment*, 2016,550:1110.
- [30] Yang D, Shi H, Li L, et al. Microplastic pollution in table salts from China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015,49(22):13622.
- [31] Schymanski D, Goldbeck C, Humpf H U, et al. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water [J]. *Water Research*, 2018,129:154.
- [32] 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 & Technology*, 2015,72(9):1495–504.
- [33] Magnusson K, Noren F. Screening of microplastic particles in and down-stream a wastewater treatment plant [C]. IVL Swedish environmental research institute (Retrieved from), 2014.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] Cole M, Lindeque P, Halsband C, et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: a review [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011,62(12):2588–2597.
- [37] Carr S A, Liu J, Tesoro A G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 2016, 91:174.
- [38] Leslie H A. Plastic in Cosmetics: Are we polluting the environment through our personal care: plastic ingredients that contribute to marine microplastic litter [N]. In: *UNEP Plastic in Cosmetics*, 2015,978–92–807–3466–9.
- [39] 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.
- [40] Cheung P K, Fok L. Evidence of microbeads from personal care product contaminating the sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 109(1):582–585.
- [41] 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.
- [42] Rochman C M, Kross S M, Armstrong J B, et al. Scientific evidence supports a ban on microbeads [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015,49(18):10759–10761.
- [43] Chang M. Reducing microplastics from facial exfoliating cleansers in wastewater through treatment versus consumer product decisions [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015,101(1):330–333.
- [44] Lei K, Qiao F, Liu Q, et al. Microplastics releasing from personal care and cosmetic products in China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 123:122–126.
- [45] Eriksen M, Mason S, Wilson S, et al. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian great lakes [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013,77(1/2):177–182.
- [46] Salvador C F, Turra A, Baruaque-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.
- [47] Browne M A, Crump P, Niven S J, et al. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011,45(21):9175–9179.
- [48] Napper I E, Thompson R C. Release of synthetic microplastic plastic fibres from domestic washing machines: Effects of fabric type and washing conditions [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016,112(1/2): 39–45.
- [49] Dris R, Gasperi J, Rocher V, et al. Microplastic contamination in an urban area: a case study in Greater Paris [J]. *Environmental Chemistry*, 2015,12(5):592–599.
- [50] Dris R, Gasperi J, Saad M, et al. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016,104(1/2):290–293.
- [51] Webster T F, Harrad S, Millette J R, et al. Identifying transfer mechanisms and sources of decabromodiphenyl ether (BDE 209) in indoor environments using environmental forensic microscopy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009,43(9):3067–3072.
- [52] Holmes L A, Turner A, Thompson R C. Interactions between trace metals and plastic production pellets under estuarine conditions [J]. *Marine Chemistry*, 2014,167:25–32.
- [53] 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*, 2016,109:164–172.
- [54] 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.
- [55] Leslie H A, Brandsma S H, Velzen M J M V, et al. Microplastics en route: Field measurements in the Dutch river delta and Amsterdam canals, wastewater treatment plants, North Sea sediments and biota [J]. *Environment International*, 2017,101:133–142.
- [56] 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.
- [57] 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*, 2016,108:365.
- [58] 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.
- [59] 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.

- [60] Fischer E K, Paglialonga L, Czech E, et al. Microplastic pollution in lakes and lake shoreline sediments – A case study on Lake Bolsena and Lake Chiusi (central Italy) [J]. *Environmental Pollution*, 2016,213: 648–657.
- [61] Fischer V, Elsner N O, Brenke N, et al. Plastic pollution of the Kuril–Kamchatka Trench area (NW pacific) [J]. *Deep-Sea Research Part II*, 2015,111:399–405.
- [62] Habib D, Locke D C, Cannone L J. Synthetic Fibers as Indicators of Municipal Sewage Sludge, Sludge Products, and Sewage Treatment Plant Effluents [J]. *Water Air & Soil Pollution*, 1998,103(1–4):1–8.
- [63] Zubris K A, Richards B K. Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge [J]. *Environmental Pollution*, 2005,138(2): 201–211.
- [64] Lechner A, Ramler D. The discharge of certain amounts of industrial microplastic from a production plant into the River Danube is permitted by the Austrian legislation [J]. *Environmental Pollution*, 2015,200:159–160.
- [65] Vermaire J C, Pomeroy C, Herczegh S M, et al. Microplastic abundance and distribution in the open water and sediment of the Ottawa River, Canada, and its tributaries [J]. *FACETS*, 2017,2: 301–314.
- [66] Lusher A L, Hernandezmilian G, O'Brien J, et al. Microplastic and macroplastic ingestion by a deep diving, oceanic cetacean: The True's beaked whale *Mesoplodon mirus* [J]. *Environmental Pollution*, 2015, 199:185.
- [67] Lusher A L, Burke A, O'Connor I, et al. Microplastic pollution in the Northeast Atlantic Ocean: Validated and opportunistic sampling [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014,88(1/2):325–333.
- [68] 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.
- [69] Mahon A M, Connell B O, Healy M G, et al. Microplastics in sewage sludge: effects of treatment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017,51(2):810–818.
- [70] Miller R Z, Watts A J R, Winslow B O, et al. Mountains to the sea: River study of plastic and non-plastic microfiber pollution in the northeast USA [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017,124(1):245–251.
- [71] Romeo T, Pietro B, Pedà C, et al. First evidence of presence of plastic debris in stomach of large pelagic fish in the Mediterranean Sea [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015,95(1):358–361.
- [72] Sutton R, Mason S A, Stanek S K, et al. Microplastic contamination in the San Francisco Bay, California, USA [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016,109(1):230.
- [73] Bayo J, Olmos S, Alcolea A et al. Microplastics and microfibers in the sludge of a municipal wastewater treatment plant [J]. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 2016,11(5):812–821.

作者简介: 许 霞 (1982–),女,江苏常州人,副教授,博士,主要从事水污染控制与新技术的研究.发表论文 10 余篇.