



移动扫码阅读

陈浩.城市水生态环境中微塑料污染的来源与风险[J].能源环境保护, 2021, 35(1): 6-12.

CHEN Hao. Sources and risks of microplastic pollution in urban aquatic ecological environment[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(1): 6-12.

城市水生态环境中微塑料污染的来源与风险

陈 浩

(上海环境保护有限公司, 上海 200233)

摘要: 阐述了陆域水体环境微塑料污染的研究现状, 探讨了污水厂尾水排放、排水系统溢流等微塑料污染来源, 概括了微塑料所能构成的生态风险。分析认为: 城市水生态环境是陆域环境微塑料的主要输出地, 明确其微塑料污染的来源与风险是实现微塑料污染有效管控的关键。

关键词: 微塑料; 污染; 城市; 水生态环境; 风险

中图分类号: X511

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2021)01-0006-07

Sources and risks of microplastic pollution in urban aquatic ecological environment

CHEN Hao

(Shanghai Environmental Protection Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: The Research Status of microplastic pollution in terrestrial water environment was described. The microplastic pollution sources such as tail water from wastewater treatment plant (WWTP) and overflow of drainage systems were discussed. Then the ecological risks caused by microplastics were summarized. Analysis shows that urban aquatic ecological environment is the main source of microplastics in terrestrial environment. The key to achieve the effective control of microplastic pollution is identifying the source and risk of microplastic pollution in urban water ecological environment.

Key Words: Microplastics; Pollution; Urban area; Aquatic ecological environment; Risk

0 引言

微塑料 (Microplastics) 通常是指粒径小于 5 mm 的人造塑料聚合物产品 (初级微塑料) 以及由塑料产品破碎风华形成的残体物 (二级微塑料)。自上世纪 50 年代以来, 全世界的塑料产量呈现指数性增长。至 2018 年, 全球塑料产量更是接近了 3.6 亿吨, 其中我国的塑料产品贡献了全世界产量的 30%。随着全球性塑料生产过剩的出现, 加之塑料废弃物的低效处理处置, 微塑料在全世界绝大多数的水生和陆域系统中均被发现, 成为全球范围内关于新兴污染物研究的重要焦点之一。2015 年, 在德国举行的七国集团领导人峰会上, 各国政府通过发布联合宣言承认并警告了微塑料污

染对全球生态系统及人类健康构成的风险。迄今为止, 微塑料污染已被广泛认为是与气候变化同等重要的环境问题之一, 并且是一个在近中期阶段可能会影响到人类保护生物多样性能力的新兴问题。

自 2010 年以来, 陆域系统尤其是陆域水体中普遍发生的微塑料污染, 得到了各国政府和全球科学家的强烈关注。就此而言, 约 80% 的海洋微塑料被认为是来源于陆域系统^[1-2]。Jambeck 与 Lebreton 等人^[3-4]在 2015 年和 2017 年分别展开的评估研究显示, 共计 115~241 万吨塑料废物已通过陆域河流被输送进入海洋。预计在未来几十年内, 这一数字将持续增长。陆域水体系统中已被报道的高负荷微塑料污染, 凸显了全面了解其发

收稿日期: 2020-11-16; 责任编辑: 蒋雯婷

作者简介: 陈浩 (1987-), 男, 浙江宁波人, 工程师, 主要从事城市水体及排水管网污染物的科学理论与监控技术研究。

E-mail: chen hao_722@163.com

生、来源及风险的紧迫性。城市水生态环境作为陆域水体系统的重要组成部分,其微塑料污染格局的空间异质性与代表性,为理解微塑料污染的发生与传播,并实现可能的管控减排,提供了一个系统性的框架。

本文综述了陆域水体环境微塑料污染研究的兴起与发展,探讨了城市水生态环境的微塑料污染概况、主要来源以及微塑料的生态风险。

1 陆域水体环境微塑料污染研究的兴起与发展

塑料产品包括 PE (聚乙烯, polyethylene)、PET (聚对苯二甲酸乙二醇酯, polyethylene terephthalate) 及 PP (聚丙烯, polypropylene) 等聚合物材质,因其轻巧耐用、价格低廉等优势被广泛应用于包装、物流、医疗、化妆品等几乎全部的生产生活领域。然而,塑料工业的超体量发展同步带来了一系列的环境问题。大量的塑料废弃物被不当处置或低效回收,并通过各种途径进入河流和海洋等水生态环境,加之塑料本身的难降解性,使得塑料废弃物在这些环境中快速大量累积。

微塑料污染问题的发现起源于海洋环境的研究。2004 年, Thompson 等人^[5]首次报道了在英国海岸沙滩发现的微塑料颗粒与纤维,并在《Science》杂志上提出了“微塑料”一词,用以描述海洋中微小的塑料粒子。至 2010 年后, Claessens^[6]及 Eriksen 等人^[7]在大西洋和太平洋中也相继发现了微塑料粒子。2014 年的一项评估调查表明,全球海洋中可能漂浮着 7 000~35 000 吨的塑料垃圾^[8]。据统计,全球每年向海洋排放 480~1 270 万吨^[9]塑料垃圾,尺寸从微米到米不等^[10]。随着全球微塑料污染研究的不断深入,陆域环境被认为是海洋微塑料的主要来源。据估计,2010 年全球 192 个沿海国家共产生了 2.75 亿吨塑料垃圾,其中约有 2.5%~6.6% 的塑料垃圾进入海洋^[11]。这意味着超过 95% 的塑料垃圾被留在陆域环境中,被回收、处理、焚烧或丢弃^[12]。2010 年后,随着研究调查的拓展,亚马逊河^[13]、长江^[14]、泰晤士河^[15]、多瑙河^[16]及莱茵河^[17]等世界主要河流的表层水和沉积物中均发现了微塑料的存在,与这些河流关联的河口海岸带往往是微塑料污染的热点区域。亚马逊河口的调查显示^[13],在该水域 14 种共 26 个鱼类样本的胃肠中取出了共计 228 个微塑料颗粒,包含了 PE 及 PA

(聚酰胺, polyamide) 等多种聚合物类型。对泰晤士河展开的现场调查则在河床上拦截到了共计 8 490 件水下塑料物品^[15]。此外,包括安大略湖^[18]、鄱阳湖^[19]、密歇根湖^[20]、日内瓦湖^[21]及青海湖^[22]等在内的主要内陆湖泊中也都发现了微塑料污染。密歇根湖的评测数据甚至展示了水域内巨大的微塑料污染负荷^[20],即大约有 10 亿个塑料颗粒漂浮于湖区表面,丰度平均为 17 276 个/km²。

我国陆域水体环境的微塑料污染在不同区域间的分布则有着显著差异。2018 年, Di 等人^[23]的调查显示,我国三峡水库表层水及沉积物中的微塑料丰度分别达到了 1 597~12 611 个/m³和 25~300 个/kg(湿重)。青海湖表层水中微塑料的丰度为 0.05×10⁵~7.58×10⁵ 个/km²,湖岸沉积物中微塑料丰度为 50~1 292 个/m²,鱼类样品中微塑料丰度为 2~15 个/只,聚合物类型主要为 PE 与 PP^[22]。此外,2014 年的调查表明,我国长江口地表水微塑料的丰度为 500~10 200 个/m³,远高于东海海水的 0.03~0.455 个/m³^[14]。相比之下,长江口沉积物中的微塑料丰度则达到了 20~340 个/kg(干重)^[24]。在洞庭湖及其支流展开的几乎为水域全覆盖的采样监测显示,该区域表层水的微塑料丰度达到了 0.62~4.31 个/m²,沉积物微塑料丰度则为 21~52 个/100 g(干重)^[25]。Su^[26]等人在 2015 年调查了太湖水域的微塑料污染水平,利用浮游生物网收集样本的微塑料丰度达到 0.01×10⁶~6.8×10⁶ 个/km²,地表水为 3.4~25.8 个/L,沉积物则为 11.0~234.6 个/kg(干重)。该研究显示常见的微塑料为 PE、PET 及 PP 等。

从现有研究数据来看,陆域水体环境的微塑料污染相较海洋环境明显更为严重。然而,就研究数量而言,陆域水体微塑料研究所涉及的区域仍然仅占全球陆域水体总量的小部分,且远少于对海洋环境的研究。

2 城市水生态环境的微塑料污染现状

城市是一个跨越广泛土地利用梯度的大规模汇水区,经历了相当巨大的人为影响,已被公认为是微塑料污染的重点区域。作为陆域环境微塑料的主要输出地,关于城市微塑料污染发生、现状及传播的研究是实现全球性微塑料污染管控的关键内容之一。2015 年, Dris 等人^[27]即提出了微塑料污染的研究应更多地关注受人类活动影响严重的

区域,尤其是城市。在此之后,城市水生态环境微塑料污染的研究在全球范围内得到了进一步的发展。2017 年,Wang 等人^[28]对长江武汉段和汉江武汉段的研究显示,这些水体环境的微塑料丰度分别达到了 $2\,516.7 \pm 911.7$ 和 $2\,933 \pm 305.5$ 个/ m^3 ,远高于其他地区河流的污染状况。其团队的调查还显示,武汉市内 20 个湖泊的表层水微塑料丰度处于 $1\,660.0 \pm 639.1$ 至 $8\,925 \pm 1\,591$ 个/ m^3 之间。Zhao 等人^[29]在 2015 年对闽江、椒江及曲江等城市河流的调查数据表明,这些河流及其河口表层水的微塑料赋存量分别达到了 $1\,245.8 \pm 531.5$ 个/ m^3 、 $1\,170.8 \pm 953.1$ 个/ m^3 、 955.6 ± 848.7 个/ m^3 和 680.0 ± 284.6 个/ m^3 。2018 年上海市河流的调查则显示城市河道沉积物的微塑料平均丰度为 802 个/kg(干重)^[30]。另一方面,赵等人^[31]对上海市区及市郊河道的对比调查进一步表明,这些河道沉积物的微塑料平均丰度(以湿重计)达到了 $1\,575.5 \pm 758.4$ 个/kg。其中,上海市中心城区苏州河的沉积物微塑料丰度更是高达 $6\,233.4 \pm 1\,890.4$ 个/kg^[32]。这些持续近 5 年的调查结果警示了我国城市水生态环境中严峻的微塑料污染状况。

同样是发展中国家,Lahens 等人^[33]对越南西贡市市区河道的监测显示,在市政措施相对低效、环境污染严重的区域,塑料纤维和碎片分别高达 $172\,000 \sim 519\,000$ 个/ m^3 和 $10 \sim 223$ 个/ m^3 。Dris 等人^[27]对巴黎市区河道表层水的调查则显示其微塑料污染明显不如比西贡市严重,但仍然不容乐观($3 \sim 108$ 个/ m^3)。Wagner 等人以德国莱比锡市为例,通过模型估算得出 2016 年整个流域的塑料输出总量为 3.0×10^6 个/年^[34]。

当前的研究进一步证明,受人类活动影响大的城市水生态环境面临更高的微塑料污染风险。2011 年,Moore 等人^[35]的调查显示,区域水体的微塑料丰度与其与城市中心的距离存在明显的关联性。这在武汉市湖泊水体微塑料污染的调查中也得到了证明,即靠近于市中心的北湖中微塑料丰度显示最高,而远离市中心的武湖中微塑料丰度最低^[28]。此外,Luo 等人^[30]的研究指出,上海市市域水体中的微塑料丰度比长江出海口潮滩中检测到的微塑料丰度高了 1~2 个数量级。

总体上,全球范围内城市水生态环境所承受的实际微塑料污染状况以及未来面临的污染风险预压力是不容乐观的。但是,现有研究对城市水生态环境微塑料污染展开的聚焦调查仍然十分稀

缺。不同城市区域的水环境质量会因城市化发展进程、区域下垫面使用规划、流域污染管控政策力度、人口密度等因素而呈现显著的差异性。因此,对城市水生态环境微塑料污染的来源及风险的比较调查尤为重要。

3 城市水生态环境微塑料污染的主要来源

在城市环境中,微塑料的来源与传播途径存在区域差异性,涉及众多人类活动的影响,导致整体的污染格局具有很大的空间异质性。明晰城市水生态环境微塑料污染的来源,为系统地理解微塑料污染的发生和传播规律,并通过构建自上而下的环境措施与环境政策以实现可能的管控减排,提供了一个颇具代表性的框架。

点源污水的排放通常包括污水厂(WWTPs)的尾水排放和排水系统的溢流(包括旱天及雨天溢流),是城市水生态环境最主要的污染源。就这一点而言,微塑料污染同样不例外,尤其是微塑料颗粒和纤维。在城市区域,即使大部分的生活污水都能够被 WWTPs 收集和处理,但由于处理工艺和去除效率方面的原因,通常处理后的出水仍含有少量微塑料。考虑到持续大量的尾水排放,WWTPs 仍会向受纳水体释放相当数量的微塑料粒子。Mason 等人^[36]对美国 WWTPs 出水的评估显示,每天约有 $30 \sim 230$ 亿(平均 130 亿)个微塑料粒子排放到该国的水体环境中。Murphy 等人^[37]对英国格拉斯哥市一个服务 60 万人的二级 WWTP 的微塑料排放量估算,每天约有 6.5×10^7 个微塑料粒子被排入受纳水体。迄今为止,在 WWTPs 的进水和出水中已检测到 30 多种微塑料聚合物,其中最常见的为 PET($4\% \sim 35\%$)、PA(聚酰胺, $3\% \sim 30\%$)、PE($4\% \sim 51\%$)和 PES(聚酯, $28\% \sim 89\%$)^[38],但不同 WWTPs 进出水的微塑料浓度存在较大差异,聚合物的类型也各不相同。PE、PET、PA 被广泛用于服装制造业。PE 不仅用于生产个人护理用品,如磨砂洗面奶、牙膏等,也用作食品包装膜和水瓶等的原材料。生活污水中通常是纤维状微塑料的占比最高,它们可能主要来自家用洗衣机的洗涤过程^[39]。值得注意的是,根据已有数据的统计^[37,40-41],我国 WWTPs 对微塑料的处理效率普遍偏低,而欧洲地区 WWTPs 的处理效率基本都在 90% 以上。贾等人^[42]对上海市两个大型 WWTPs 的监测显示,其对微塑料的去除率仅为 60% 左右,且去除过程主

要发生在物理阶段。此外,相当大的一部分污水微塑料将以 WWTP 剩余污泥的形式被保留和处置。对剩余污泥回收处理的不当管理,将使其成为陆地微塑料的重要来源,2015 年我国重新进入环境的剩余污泥微塑料的平均数量估计为 1.56×10^{14} 个/年^[43-44]。

考虑到排水管网溢流的年排放量十分巨大,特别是在我国的南方地区,是城市水生态环境微塑料污染的重要来源(见图 1)。明确排水管网溢流与城市水生态环境微塑料污染的联系,将为微塑料在城市环境中的迁移分布提供重要的数据支撑。陈等人^[32]对上海市排水系统展开的大规模

调查估算显示,市域排水系统溢流的微塑料年排放量达到了 8.50×10^{14} 个/年,几乎是通过本地 WWTPs 尾水排放的 6 倍,高于法国巴黎大区合流制系统溢流微塑料(纤维)年排量 2 个数量级($4 \times 10^{12} \sim 5 \times 10^{12}$ 个/年)^[27]。因此,排水系统溢流对水生态环境微塑料负荷的贡献完全不亚于通常受到更多关注的 WWTPs 尾水排放。这些溢流污水中出现的高比例的有毒塑料成分,包括 PE 和 PP^[45],进一步表明排水系统溢流可能对受纳水体生态及公众健康构成风险。相较于其他污染源的研究,城市排水系统溢流所能构成的微塑料污染风险仍是未知的。

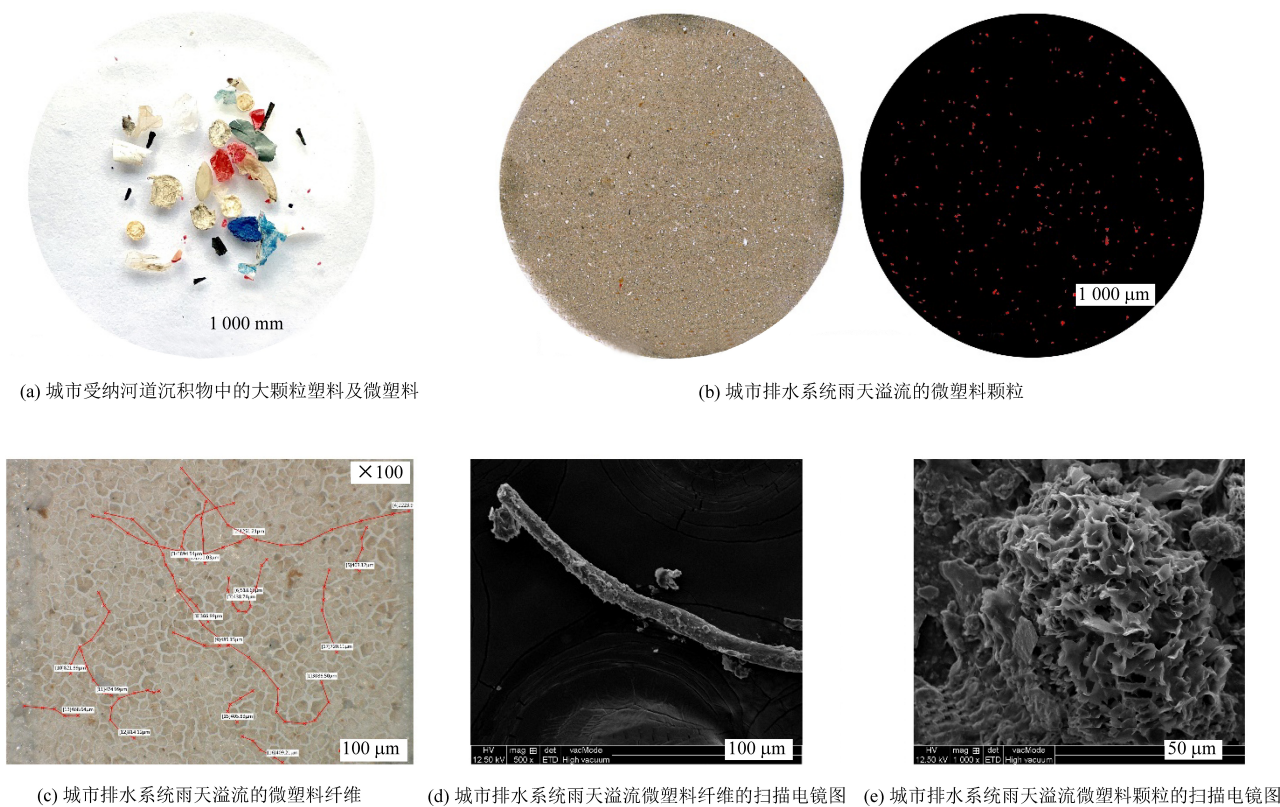


图 1 城市排水系统溢流的微塑料^[40]

Fig.1 Microplastics in overflow of urban drainage systems^[40]

此外,由地表径流及大气沉降所构成的面源污染也是城市水生态环境微塑料污染的来源之一,尤其是在水体点源污染得到较大程度治理的区域。Moore 等人^[46]以洛杉矶市雨水系统附近的河口水域为监测对象,显示暴雨过后水体中直径小于 4.75 mm 的塑料垃圾从 10 个/ m^3 增加到了 60 个/ m^3 ,说明强降雨会显著提高城市水体中的微塑料丰度。Cheung 等人^[47]的研究指出,经过 3 天的降雨后,香港一条河流中的微塑料丰度几乎是同一地区沿海海面上观测到的微塑料丰度的两倍。此外,Yonkos 等人^[48]对美国切萨皮克湾四条

河流的研究显示,有三条河流在降雨后出现了最高的微塑料丰度。Cai 等人^[49]在东莞市的大气沉降物中也观察到了纤维和非纤维微塑料,其丰度范围为 31 ± 8 至 43 ± 4 个/($m^2 \cdot d$)。

4 微塑料污染的生态风险

微塑料的生态效应包括生物摄取^[50]、污染物吸附积累^[51]、微生物及病原体定殖^[52]等,由此造成的生态风险随着在不同环境领域均发现大量微塑料而被逐渐认知和重视。微塑料可通过多种机制对生物体乃至生态环境形成风险或实际危害。

微塑料本身的高分子聚合物材质即具备化学毒性,如PS(聚苯乙烯,polystyrene)被广泛应用于制作包装和容器材料。现有的研究数据显示,PS会改变生物体内部的血液循环过程,甚至还会影响海洋滤食性动物的生殖作用^[53-54]。微塑料还会对以浮游植物为食的动物造成负面影响,尤其是那些不能辨别食物来源的物种,比如鱼类和贝类。研究表明,鱼类摄入微塑料后会形成虚假的饱腹感,从而减少食物摄入,长期上会造成营养不足甚至死亡^[13]。贝类连续摄入微塑料后会造成体内稳态改变,产生大量免疫蛋白,导致免疫系统失调^[55]。此外,通常为改善塑料性能而加入的化学添加剂的生物毒性更大。例如,邻苯二甲酸盐和聚溴二苯醚是两种用于提高塑料塑性和阻燃性的常用添加剂,也被称为内分泌干扰化合物(EDCs),可在食物链中不断积累^[56]。微塑料的疏水性和巨大的表面积^[57]使其成为多类污染物的良好吸附载体,在特定环境条件下可大量吸附持久性有机污染物^[58]、无机污染物^[59]、金属^[60]和病原体^[61]等。Browne等人^[62]通过将线虫暴露在含有污染物和添加剂的沙子中,发现微塑料会通过表面吸附作用而促进污染物和添加剂转移至生物体组织,损害生物体的生理功能。这些污染物可通过食物链在生物体内部积累,进一步加剧了生物体健康风险与环境生态风险^[63]。

当前,微塑料对人类健康和生态环境的潜在风险越来越受到公众、媒体、政策界和科学界的关注。虽然对于许多化学应激源来说,既定的风险评估已经明确了伤害和影响的可能性,但我们对微塑料风险的理解仍处于早期阶段^[64],尤其是微塑料对人类健康和生态环境的实际风险仍然存在高度的不确定性和未知性^[65]。

5 结语

城市水生态环境作为陆域水体系统的重要组成部分,其微塑料污染格局的空间异质性与代表性,为理解微塑料污染的发生与传播,并实现可能的管控减排,提供了一个系统性的框架。在当前全球性城市化进程不断推进、人口持续增长的情况下,城市水生态环境所面临的微塑料污染风险是十分严峻的。尽管涉及这一重要问题的相关研究在近年来有了长足的发展,但由于城市水生态环境在方方面面牵涉到自然与人为因素的极大复杂性,当前的研究在探索相关问题上仍然处于初

步阶段,其深度与广度依然十分不足。本文综述并探讨了城市水生态环境的微塑料污染概况、污染来源及生态风险,突出了相关研究的重要意义,并为今后关于微塑料溯源与风险评估的研究提供有益的思考。考虑到当前微塑料研究中面临的难点,在未来的发展中,在整合傅里叶显微红外、拉曼光谱、原子力显微及热裂解色谱质谱联用等常规技术的基础上,突破用于鉴定极微尺寸和纳米尺寸微塑料的便捷有效的成像技术及分子化学技术,并同步发展一体化在线监测设备,具有十分重大的意义。此外,在微塑料样品的采集及分离过程中,应进一步建立适用于不同环境场景的成套技术、装备与标准,以实现对这些工作在时间与人力成本上的有效压缩,同时提高质控效果。

参考文献

- [1] ZHANG K, SHI H, PENG J, et al. Microplastic pollution in China's inland water systems: A review of findings, methods, characteristics, effects, and management [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 1641-1653.
- [2] ANDRADY A L. The plastic in microplastics: A review [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 119 (1): 12-22.
- [3] JAMBECK J R, GEYER R, WILCOX C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean [J]. *Science*, 2015, 347 (6223): 768-771.
- [4] LEBRETON L C M, VAN DER ZWET J, DAMSTEEG J W, et al. River plastic emissions to the world's oceans [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15611.
- [5] THOMPSON R C, OLSEN Y, MITCHELL R P, et al. Lost at sea: Where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, 304 (5672): 838.
- [6] CLAESSENS M, DE MEESTER S, VAN LANDUYT L, et al. Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62 (10): 2199-2204.
- [7] ERIKSEN M, MAXIMENKO N, THIEL M, et al. Plastic pollution in the South Pacific subtropical gyre [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 68 (1-2): 71-76.
- [8] COZAR A, ECHEVARRIA F, GONZALEZ-GORDILLO J I, et al. Plastic debris in the open ocean [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111 (28): 10239-10244.
- [9] HAWARD M. Plastic pollution of the world's seas and oceans as a contemporary challenge in ocean governance [J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1): 667.
- [10] RYAN P G, MOORE C J, VAN FRANEKER J A, et al. Monitoring the abundance of plastic debris in the marine environment [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, 364 (1526): 1999-2012.
- [11] JAMBECK J R, GEYER R, WILCOX C, et al. Plastic waste

- inputs from land into the ocean [J]. *Science*, 2015, 347 (6223): 768–771.
- [12] ROCHMAN C M, BROWNE M A, HALPERN B S, et al. Classify plastic waste as hazardous [J]. *Nature*, 2013, 494 (7436): 169–171.
- [13] PEGADO T D S E S, SCHMID K, WINEMILLER K O, et al. First evidence of microplastic ingestion by fishes from the Amazon River estuary [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 133 (Aug.): 814–821.
- [14] 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.
- [15] MORRITT D, STEFANOUDIS P V, PEARCE D, et al. Plastic in the Thames: A river runs through it [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 78 (1–2): 196–200.
- [16] LECHNER A, KECKEIS H, LUMESBERGER-LOISL F, et al. The Danube so colourful: A potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 188: 177–181.
- [17] KLEIN S, WORCH E, KNEPPER T P. Occurrence and spatial distribution of microplastics in river shore sediments of the Rhine–Main Area in Germany [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49 (10): 6070–6076.
- [18] CORCORAN P L, NORRIS T, CECCANESE T, et al. Hidden plastics of Lake Ontario, Canada and their potential preservation in the sediment record [J]. *Environmental Pollution*, 2015, 204 (Sep.): 17–25.
- [19] YUAN W, LIU X, WANG W, et al. Microplastic abundance, distribution and composition in water, sediments, and wild fish from Poyang Lake, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 170: 180–187.
- [20] MASON S A, KAMMIN L, ERIKSEN M, et al. Pelagic plastic pollution within the surface waters of Lake Michigan, USA [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2016, 42 (4): 753–759.
- [21] BOUCHER J, FAURE F, POMPINI O, et al. (Micro) plastic fluxes and stocks in Lake Geneva basin [J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2019, 112: 66–74.
- [22] XIONG X, ZHANG K, CHEN X, et al. Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake—Qinghai Lake [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 899–906.
- [23] DI M, WANG J. Microplastics in surface waters and sediments of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616–617 (Mar.): 1620–1627.
- [24] PENG G, ZHU B, YANG D, et al. Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 225: 283–290.
- [25] HU D, ZHANG Y, SHEN M. Investigation on microplastic pollution of Dongting Lake and its affiliated rivers [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 160: 111555.
- [26] SU L, XUE Y, LI L, et al. Microplastics in Taihu Lake, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 711–719.
- [27] 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.
- [28] WANG W, NDUNGU A W, LI Z, et al. Microplastics pollution in inland freshwaters of China: A case study in urban surface waters of Wuhan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 575: 1369–1374.
- [29] ZHAO S, ZHU L, LI D. Microplastic in three urban estuaries, China [J]. *Environmental Pollution*, 2015, 206 (Nov.): 597–604.
- [30] PENG G, XU P, ZHU B, et al. Microplastics in freshwater river sediments in Shanghai, China: A case study of risk assessment in mega-cities [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 448–456.
- [31] 赵昕, 陈浩, 贾其隆, 等. 城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为 [J]. *环境科学*, 2020, 41 (8): 3612–3620.
- [32] CHEN H, JIA Q, ZHAO X, et al. The occurrence of microplastics in water bodies in urban agglomerations: Impacts of drainage system overflow in wet weather, catchment land-uses, and environmental management practices [J]. *Water Research*, 2020, 183: 116073.
- [33] LAHENS L, STRADY E, KIEU-LE T C, et al. Macroplastic and microplastic contamination assessment of a tropical river (Saigon River, Vietnam) transversed by a developing megacity [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 236: 661–671.
- [34] WAGNER S, KLOCKNER P, STIER B, et al. Relationship between discharge and river plastic concentrations in a rural and an urban catchment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53 (17): 10082–10091.
- [35] MOORE C J, LATTIN G L, ZELLERS A F. Quantity and type of plastic debris flowing from two urban rivers to coastal waters and beaches of Southern California [J]. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 2011, 11 (1): 65–73.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] SUN J, DAI X, WANG Q, et al. Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal [J]. *Water Research*, 2019, 152: 21–37.
- [39] SALVADOR CESA 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.
- [40] LARES M, NCIBI M C, SILLANPAA M, et al. Occurrence, identification and removal of microplastic particles and fibers in conventional activated sludge process and advanced MBR tech-

- nology [J]. *Water Research*, 2018, 133: 236–246.
- [41] 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 Research*, 2017, 108: 365–372.
- [42] 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.
- [43] YANG G, ZHANG G, WANG H. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China [J]. *Water Research*, 2015, 78: 60–73.
- [44] LI X, CHEN L, MEI Q, et al. Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China [J]. *Water Research*, 2018, 142 (Oct. 1): 75.
- [45] LEI L, WU S, LU S, et al. Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans* [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619–620: 1–8.
- [46] MOORE C J, MOORE S L, WEISBERG S B, et al. A comparison of neustonic plastic and zooplankton abundance in southern California's coastal waters [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, 44 (10): 1035–1038.
- [47] CHEUNG P K, HUNG P L, FOK L. River microplastic contamination and dynamics upon a rainfall event in Hong Kong, China [J]. *Environmental Processes*, 2018, 6 (1): 253–264.
- [48] 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.
- [49] CAI L, WANG J, PENG J, et al. Characteristic of microplastics in the atmospheric fallout from Dongguan city, China: Preliminary research and first evidence [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24 (32): 24928–24935.
- [50] REMY F, COLLARD F, GILBERT B, et al. When microplastic is not plastic: The ingestion of artificial cellulose fibers by macrofauna living in seagrass macrophytodebris [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49 (18): 11158–11166.
- [51] ANDRADY A L. Microplastics in the marine environment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62 (8): 1596–1605.
- [52] ZETTLER E R, MINCER T J, AMARAL-ZETTLER L A. Life in the "plastisphere": Microbial communities on plastic marine debris [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47 (13): 7137–7146.
- [53] CHEN J, TAN M, NEMMAR A, et al. Quantification of extrapulmonary translocation of intratracheal-instilled particles in vivo in rats: Effect of lipopolysaccharide [J]. *Toxicology*, 2006, 222 (3): 195–201.
- [54] SUSSARELLU R, SUQUET M, THOMAS Y, et al. Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113 (9): 2430–2435.
- [55] DETREE C, GALLARDO-ESCARATE C. Single and repetitive microplastics exposures induce immune system modulation and homeostasis alteration in the edible mussel *Mytilus galloprovincialis* [J]. *Fish Shellfish Immunol*, 2018, 83: 52–60.
- [56] TEUTEN E L, SAQUING J M, KNAPPE D R U, et al. Transport and release of chemicals from plastic to the environment and to wildlife [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, 2009, 364 (1526): 2027–2045.
- [57] OGATA Y, TAKADA H, MIZUKAWA K, et al. International pellet watch: Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58 (10): 1437–1446.
- [58] BAKIR A, ROWLAND S J, THOMPSON R C. Competitive sorption of persistent organic pollutants onto microplastics in the marine environment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64 (12): 2782–2789.
- [59] BAKIR A, ROWLAND S J, THOMPSON R C. Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014, 140: 14–21.
- [60] TURNER A, HOLMES L A. Adsorption of trace metals by microplastic pellets in fresh water [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, 12 (5): 600–610.
- [61] MCCORMICK A, HOELLEIN T J, MASON S A. Microplastic is an abundant and distinct microbial habitat in an urban river [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48 (20): 11863–11871.
- [62] BROWNE M A, NIVEN S J, GALLOWAY T S, et al. Microplastic moves pollutants and additives to worms, reducing functions linked to health and biodiversity [J]. *Current Biology*, 2013, 23 (23): 2388–2392.
- [63] SILVA-CAVALCANTI J S, SILVA J D B, DE FRANCA E J, et al. Microplastics ingestion by a common tropical freshwater fishing resource [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 221 (Feb.): 218–226.
- [64] HALDEN R U. Epistemology of contaminants of emerging concern and literature meta-analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 282: 2–9.
- [65] KOELMANS A A, BESSELING E, FOEKEMA E, et al. Risks of plastic debris: Unravelling fact, opinion, perception, and belief [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51 (20): 11513–11519.