

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.20.005

## 微塑料在城市排水系统中的迁移和扩散

刘佳奇<sup>1,2</sup>, 张勇<sup>1,3,4</sup>, 胡定成<sup>5</sup>, 张滢<sup>5</sup>, 杨丽丽<sup>1,3</sup>, 肖逸凡<sup>1,3</sup>,  
李灿<sup>1,3</sup>

(1. 安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 环境污染控制与废弃物资源化利用安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601; 4. 安徽省生态文明研究院, 安徽 合肥 230601; 5. 中国市政工程西北设计研究院有限公司 安徽分公司, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 微塑料作为一种常见的环境污染物,由于其体积小、分布广、吸附能力强等特点受到广泛关注。排水系统作为城市污(废)水的主要收集去除路径,对微塑料的扩散和集中处理发挥着重要作用。然而,受限于城镇排水系统的最大排水能力及管网老化等各种问题,包括微塑料在内的许多水体污染物未能得到及时的截留和富集便直接排入水体,这种现象在暴雨天气尤为显著。为此,概述了微塑料在排水系统中的分布及扩散情况,总结了微塑料对城市排水系统的影响,并对未来研究人员建立标准化的采样、分析、定量单位等进行了展望。

**关键词:** 微塑料; 排水系统; 径流; 扩散

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)20-0035-08

## Migration and Diffusion of Microplastics in Urban Drainage Systems

LIU Jia-qi<sup>1,2</sup>, ZHANG Yong<sup>1,3,4</sup>, HU Ding-cheng<sup>5</sup>, ZHANG Ying<sup>5</sup>, YANG Li-li<sup>1,3</sup>,  
XIAO Yi-fan<sup>1,3</sup>, LI Can<sup>1,3</sup>

(1. School of Environment and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Anhui Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Resource Reuse, Hefei 230601, China; 4. Anhui Institute of Ecological Civilization, Hefei 230601, China; 5. Anhui Branch, CSCEC AECOM Consultants Co. Ltd., Hefei 230601, China)

**Abstract:** Microplastics (MPs), as a common environmental pollutant, have attracted extensive attention due to its small size, wide distribution, and strong adsorption capacity. As one of the main ways to remove urban pollutants, the drainage system plays an important role in the collection and centralized treatment of microplastics. However, limited by the maximum drainage capacity of urban drainage systems and the ageing of pipe networks, many pollutants, including microplastics, are discharged directly into natural water bodies without timely interception and control, especially in rainstorm weather. Therefore, this paper provides an overview of how microplastics are distributed and diffused in the

基金项目: 中建市政西北院科技研发课题(XBSZKY2216); 中建股份科技研发课题[CSCEC-2022-K-(36)]; 安徽省重点研发项目(2023t07010002)

通信作者: 张勇 E-mail: ahjzu3404@163.com

drainage system, summarizes the impact of microplastics on urban drainage systems, and the future measures for researchers to establish standardized sampling, analysis and quantitative units are prospected.

**Key words:** microplastics; drainage systems; runoff; diffusion

地表径流是陆地塑料颗粒转移到水体中的重要途径之一,而降雨是形成地表径流最直接、最有效的途径。降雨后径流会冲走地表塑料碎片,随着降雨量的增大,地表径流对土地的侵蚀作用越强,塑料碎片的运输量也越大,这是降雨期间内陆水域微塑料浓度显著变化的原因<sup>[1]</sup>。城市排水系统的种类与微塑料的排放密切相关,在合流制城市排水系统中降雨会影响污水和雨水中微塑料的丰度<sup>[2]</sup>。研究<sup>[3]</sup>发现,降雨期间雨水管道会将塑料垃圾不断输送到水体中,陆地表面上的部分微塑料也可以通过城市雨水管道迁移到淡水环境中,而残留在雨水管道沉积物中的剩余微塑料也可能在下次降雨后释放进入水体。

市政污水处理厂是陆地微塑料进入淡水环境的重要途径之一。Patil等<sup>[4]</sup>调查了印度污水处理厂中微塑料的赋存和丰度情况,在进水中检测到微塑料浓度约为 $(1\ 860\pm265)$ 个/L,出水中微塑料降至 $(148\pm51)$ 个/L,污泥中微塑料的浓度为830个/kg,尽管出水微塑料浓度降低了90%以上,但每天仍向环境释放约 $300\times10^8$ 个塑料微粒,这表明污水处理厂是水体环境中微塑料污染的重要来源之一。因此,研究微塑料从陆地到水体的迁移过程至关重要,城市作为微塑料重要的源和汇,其对微塑料产生和扩散过程的影响不可忽视。为此,重点分析微塑料在排水系统中的来源、分布和扩散规律,总结降水后微塑料在不同区域和雨水系统中的分布情况,并分析当下微塑料研究中存在的问题以及未来的研究方向,以期在水系统中微塑料的控制提供参考。

## 1 方法论

使用Web of Science数据库,使用关键词组合包括“微塑料(microplastics)+排水(drainage)”“暴雨(storm)”“降雨(rain)”“径流(run off)”“管道(pipe)”,得到如图1所示的近6年论文数量变化趋势。可以看出,相关论文数量逐年递增,微塑料在城镇排水系统中的扩散逐渐受到关注。筛选范围

包括城市排水系统中微塑料的分布、降水后水体中微塑料浓度变化,以及雨水处理系统中微塑料的去除效果。

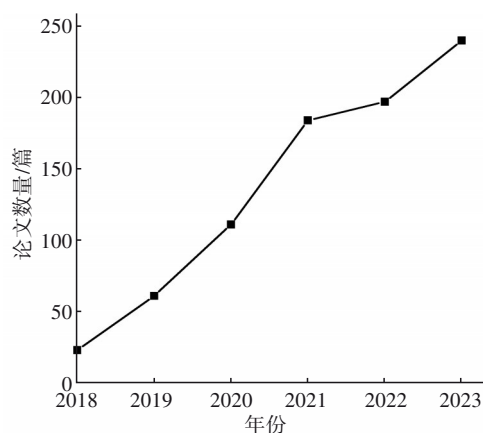


图1 微塑料与排水系统相关论文数量

Fig.1 Number of papers related to microplastics and drainage systems

## 2 排水系统中微塑料的来源

现代城市排水系统主要用来处理和排除市政污水及雨水,除了雨水和污水管网外,还包括蓄水池、污水处理厂等设施。随着城市化进程的加快和人口的增长,排水管网不断扩大,污水和沉积物量不断增加,可能导致水体中微塑料丰度和数量的急剧变化。随着公众对微塑料危害的认识不断加深,有必要溯源微塑料的来源和种类。

### 2.1 直接来源

城市排水系统中的微塑料一方面来自家庭、公共场所等排放的生活污水;另一方面来自工业企业排放的污(废)水。通过对污水厂进水的分析,微塑料直接来源包含初级和次级微塑料,初级微塑料包括洗面奶、牙膏等个人洗护产品中直接释放的微小塑料颗粒;次级微塑料指较大的塑料制品受到外界作用后不断分裂破解所形成的塑料颗粒,包括衣物洗涤过程中产生的纺织纤维,如聚酯、尼龙和醋酸纤维等<sup>[5]</sup>。与此同时,在污水厂检测到的微塑料种类还包括聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚氯乙烯

(PVC)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚酰胺(PA)以及其他类型。图2为排水系统中常见的微塑料类型和分布情况,其中微塑料形态包括碎片、颗粒、纤维、薄膜和泡沫等,颜色有透明、白色、黑色、蓝色、红色等,各地不同的生活和消费习惯将会影响污水中微塑料的类型和浓度。

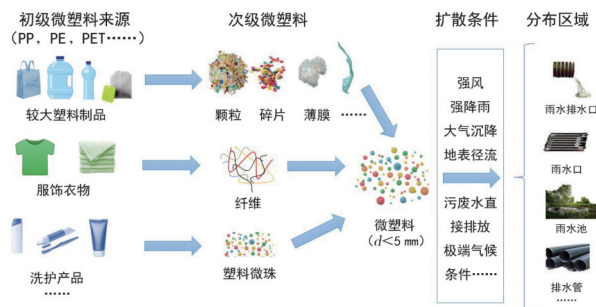


图2 排水系统中常见微塑料的类型和分布

Fig.2 Types and distribution of common microplastics in drainage systems

## 2.2 潜在来源

排水系统中的微塑料除了由人类直接排放外,还来自陆地降水产生的地表径流。Bauer-Civello等<sup>[6]</sup>发现,城市雨水径流在促进微塑料向淡水迁移方面发挥了重要作用。地面上的大量污染物经由地表径流进入水体中,其中,来自污水、污泥、轮胎、建筑材料、人造草皮、老化垃圾中的塑料颗粒也会被一同挟带进入水体<sup>[7]</sup>。与此同时,He等<sup>[8]</sup>的研究报告称,垃圾填埋场也是微塑料的潜在来源,我国填埋场渗滤液中微塑料的含量为0.42~24.58个/L。Shen等<sup>[9]</sup>在垃圾焚烧发电厂的底灰中检测出微塑料,并通过实验发现在外部降水的影响下,底灰中的微塑料溶解显著。微塑料进入环境后通过下渗或地表径流不断转移,扩大了污染范围。此外,Bigalke等<sup>[10]</sup>在农业排水中也检测出微塑料,表明土壤中的微塑料也会向下迁移至排水管道。同时,农业生产中微塑料的污染主要来自污泥堆肥、废水灌溉、地面覆盖薄膜、聚合物包膜肥料和农药以及大气沉降<sup>[11]</sup>。

微塑料的潜在来源还包括排水设施本身,随着城市防洪和排水需求的增加,排水系统规模不断扩大,排水设施使用的大量塑料制品也会释放微塑料。Liu等<sup>[12]</sup>发现,随着老化时间的增加,塑料设施表面会出现裂缝、褶皱和孔洞,微塑料的释放量随老化时间的增加而增大,并呈现出明显的线性关系

( $r^2>0.91$ )。

## 3 微塑料在排水系统中的扩散

### 3.1 微塑料在排水管网中的扩散

#### 3.1.1 管网中微塑料的释放

城镇排水管网是收集污水和排除雨水的重要基础设施,然而,这些设施使用了各种塑料材料,包括聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)、聚碳酸酯(PC)、聚苯乙烯(PS)、聚丁烯(PB)、聚丙烯(PP)和丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)等。随着使用寿命的延长,塑料制品不可避免地会发生老化,而老化过程会导致塑料表面物理结构和化学特性的变化,与原始塑料颗粒产生的次级微塑料相比,老化塑料管道材料释放的微塑料丰度增加更为明显<sup>[13]</sup>。表1为不同物理化学因素对塑料管道释放微塑料的原理及作用结果<sup>[12-15]</sup>。

表1 管道释放微塑料的影响因素

Tab.1 Influencing factors of microplastics released from pipelines

| 塑料材质                | 影响因子      | 原理                   | 作用结果                       |
|---------------------|-----------|----------------------|----------------------------|
| HDPE, PP, PE        | UV辐射、水力冲刷 | 含氧官能团形成后导致碳键断裂       | 表面粗糙度、裂缝、褶皱、孔洞增加,最终导致微塑料释放 |
| PP, HDPE, PVC       | 活性氧诱导老化   | 老化过程中生成含氧官能团,导致碳键断裂  | 表面锐度、孔洞、裂缝增加,微塑料脱落和释放      |
| LDPE, HDPE, PP, PVC | 臭氧        | 暴露于臭氧后监测到羰基形成而导致管道老化 | 表面裂纹不断扩展、管道碎裂,进而导致微塑料释放    |
| PVC                 | 机械磨损      | 拉曼光谱成像可视化微/纳米塑料      | 微/纳米塑料释放                   |

根据Lin等<sup>[16]</sup>的研究,光老化是聚合物在吸收紫外线辐射后产生的光氧化和热氧化作用,会使塑料管道表面形态发生变化(如裂纹、褶皱和突起),同时也会改变塑料管道材料官能团、疏水性和吸附特性等化学特性。Liu等<sup>[12]</sup>在对塑料雨水设施(雨水管、检查井、雨水蓄水模块)的研究中发现,活性氧在诱导管道老化及随后的微塑料释放行为中发挥着重要作用,管道老化过程中会生成含氧官能团,使碳链断裂,导致微塑料的剥落和释放。同时,管网中的高速水流也会助力微塑料的破碎和释放<sup>[14]</sup>。Li等<sup>[17]</sup>将微塑料经过污水管网的硫化作用和曝气池生物处理后,发现其对镉的吸附能力高于原始微塑料,这主要是由于微塑料上含氧基团增

多。这些发现都为微塑料的老化及其理化特性的改变提供了新的研究方向。

在工业生产中,塑化剂因其可以增加塑料的韧性而被广泛应用在塑料制品中。聚氯乙烯管材在我国应用广泛,邻苯二甲酸二丁酯(DBP)是PVC材料中的一种典型增塑剂,Ye等<sup>[18]</sup>研究发现光照、较小的碎片和高温都可以加速DBP的释放速率并增加DBP的迁移量,其中温度的影响最为显著。塑料雨水排水设施通常会利用回收的塑料产品,在生产过程中通过添加各种改性剂(如碳酸钙、三聚氰胺和硅胶等)来增强抗应力,使得微塑料的释放行为相较于纯塑料颗粒的释放更为复杂<sup>[14]</sup>。与此同时,管道中含有的各种增塑剂也可能会沥出并进一步污染环境。

在排水管网中,除了管道老化和增塑剂所释放的微塑料外,管道在使用过程中内壁所累积的污垢也会对微塑料的扩散产生重要影响,在输配水管网中也有类似现象。然而,目前对排水管网中管垢与微塑料之间相互作用的研究还有所欠缺。管垢对PS微塑料的吸附以物理吸附为主,主要的吸附机理为范德华力、静电相互作用、氢键和孔隙填充。除微塑料外,Pan等<sup>[19]</sup>发现管垢具有多孔结构和相对较高的比表面积,并富含能够吸附重金属的物质,促进污染物的积累。同时,研究还发现腐殖酸会加速管垢中有机物和金属的溶解。在实际下水道系统中,管道中管垢随着时间的增加不断累积增厚,其吸附成分变得复杂多样,严重时不仅加剧水体污染,而且使管径缩小、排水阻力增大。排水管网中微塑料的释放和扩散如图3所示。

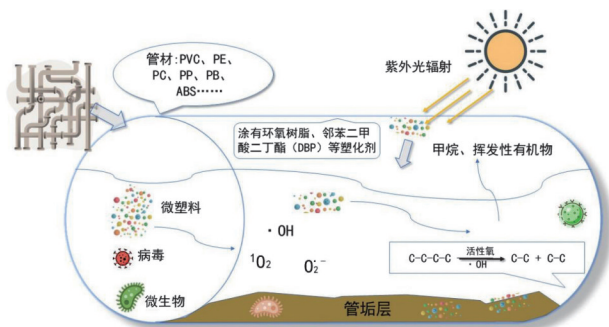


图3 排水管网中微塑料的扩散

Fig.3 Diffusion of microplastics in drainage networks

由图3可以看出,排水管网中的微塑料在迁移过程中会受到活性氧的破坏,导致碳键断裂,同时

也会受到管道内管垢吸附作用的综合影响。

### 3.1.2 微塑料在排水管网中的迁移

我国很多城市的排水管道使用时间已超过30年,有些甚至超过50年,污水管道的结构损坏、腐蚀和堵塞等问题日益突出,存在污水直接排放、河水和湖水倒灌、外部水渗入和污水溢流以及污水渗入地下水等问题。因此,污水中的微塑料会借助市政排水管网扩散到城市的各个角落,尤其是城市周边水体和地下水。同时,城市排水系统中一系列的非点源污染物会产生复杂的相互作用,微塑料在其中的影响不可忽视。综上,微塑料通过排水管网在城市中的迁移和扩散值得深入调查。研究人员应通过建立微塑料在城市排水系统和各类水体污染物中的迁移和扩散模型,并根据其扩散规律确定完善的处理措施。

### 3.2 微塑料在雨水系统中的扩散

#### 3.2.1 气候对微塑料扩散的影响

微塑料因质量轻、体积小得以在气候条件发生变化时迅速扩散,降雨时尤为明显。气候条件的变化会对微塑料的迁移产生重要的影响。图4为全球部分地区降雨过程中微塑料浓度范围。可以看出,各地检测到的微塑料浓度差异显著,分析认为可能是采样时间、采样方式、检测方法、降水量大小、地区经济发展状况等因素造成的。



图4 全球部分地区降雨后微塑料浓度

Fig.4 Microplastic concentration after rainfall in some regions of the world

目前,对降雨过程中微塑料浓度的研究主要集中在一些经济较为发达的地区,因此有必要深入调查其成因及对环境的影响。Hitchcock等<sup>[20]</sup>对澳大利亚库克斯河河口水体中的微塑料含量进行分析,发现暴雨前后河水中微塑料丰度从400个/m<sup>3</sup>增加到17383个/m<sup>3</sup>,微塑料丰度相较于暴雨前高出40

多倍。强降雨会使排水管网和污水厂的处理能力过载,使得污水不经任何处理直接溢流入河,导致河水微塑料浓度增大。另外,酸雨也会同微塑料对环境产生一定的影响。Liu 等<sup>[21]</sup>研究发现,在 10%PE 微塑料和酸雨的共同作用下,土壤总氮含量明显降低,对土壤生态系统产生了一定影响。垃圾焚烧厂底灰可能是微塑料和重金属的来源,重金属吸附在微塑料表面,酸雨很容易将重金属从底灰中溶解出来,并随着渗滤液进入水环境<sup>[21]</sup>。在干旱和半干旱地区,Abbasi 等<sup>[22]</sup>发现沙尘暴可能是微塑料运输和重新分配的重要途径。不仅如此,微塑料还可以借助风和雨输送到世界上任何地方。Brahney 等<sup>[23]</sup>发现,即使在美国的一些偏远地区,微塑料也会同降雨一起落入地面,该现象被形象地称为“塑料雨”。

### 3.2.2 降雨期间微塑料的扩散

城市地表径流和雨季排水系统溢流在形成水污染方面起着关键作用,研究发现微塑料动力学中的首次冲洗现象,根据 Cho 等<sup>[24]</sup>在韩国龟尾市的研究,大多数微塑料(约占 40%)在径流初期(占总径流时间的 19%~37%)被输送至污水处理厂,而在径流后期,较大粒径和较大质量颗粒的比例增加,同时雨水径流产生的微塑料排放量显著高于同一地区污水厂排放量。Chen 等<sup>[25]</sup>在上海也发现同样现象,雨水水体中的微塑料年负荷量约为污水处理厂排放量的 6 倍。

由于各地降水后水样中微塑料浓度差异较大,因此,分别对比了微塑料浓度相近的中国(北京、武汉)和北美(美国旧金山、加拿大卡尔加里)4 座城市降雨后地表径流中微塑料大小、形态、颜色和种类,结果如图 5 所示。

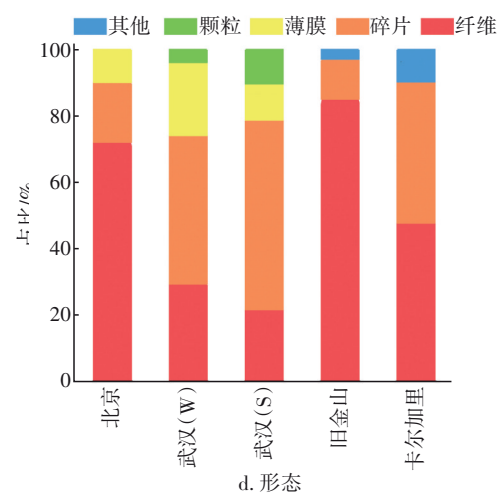
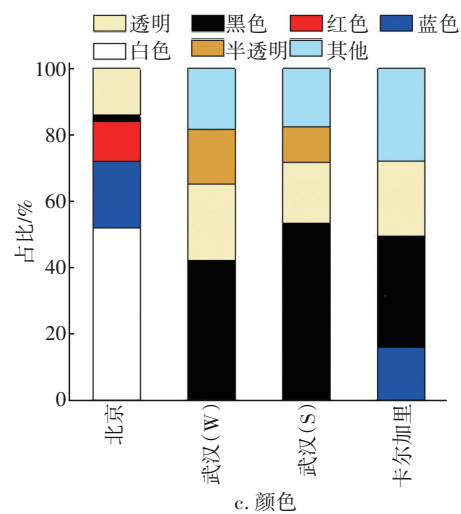
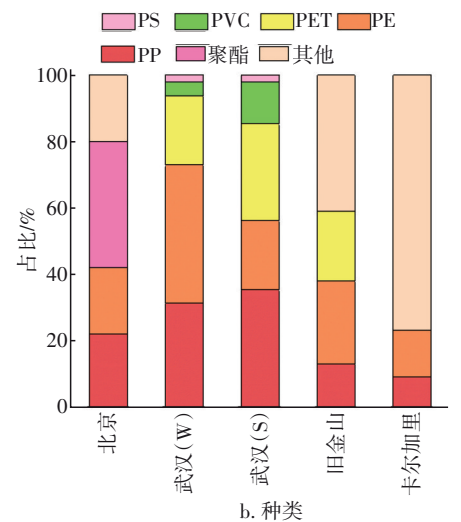
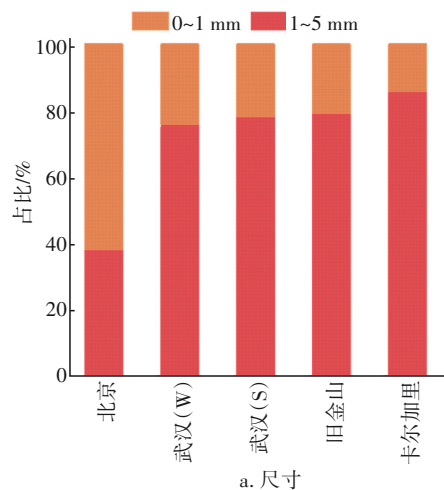


图 5 不同地区降雨后微塑料分布情况对比

Fig.5 Comparison of microplastic distribution after rainfall in different regions

由图 5(a)可以看出,降雨后采集样本中微塑料的大小主要集中在 0~1 mm 之间,其中美国旧金山

山<sup>[26]</sup>和加拿大卡尔加里<sup>[27]</sup>的水样中125~250  $\mu\text{m}$ 的微塑料浓度最高,小尺寸微塑料比例高,很可能是因为大的塑料碎片不断破碎老化而分解成较小的碎片或颗粒。从图5(b)可以发现,各地样本中均监测到PP、PE两种类型的微塑料,PP通常用于制作日常生活中的盆、桶、玩具和塑料配件,以及日常使用的食品袋和食品标签,常接触的PE聚合物是生活中使用的一次性塑料袋和包装袋,PE和PP微塑料的来源可能是日常使用的塑料制品的分解。然而,从图5(c)可以看出,各地样本中微塑料的颜色没有表现出显著的规律性,很可能是各地生活和消费习惯不同所致。在微塑料形态方面,由图5(d)可以看出,各地均发现纤维和碎片占比最高,纤维通常来自服装、毯子和其他生活产品的脱落或断裂,碎片通常来自生活中塑料制品的破裂。在武汉的沉积物样本中监测到的微塑料碎片比例较高<sup>[28]</sup>,因碎片

相比于纤维具有更高的密度,所以易沉降在管道底部。Zhang等<sup>[29]</sup>对北京海淀区降雨时的微塑料进行了研究,发现居民区主干道雨水径流中微塑料平均丰度最高,办公区最低。同样,在武汉、旧金山也发现居住区和商业街的微塑料浓度更高。

不同国家和地区降雨后微塑料丰度变化情况如表2所示,大部分地区均检测出PP、PE、PET微塑料,主要存在形式为碎片、纤维、薄膜等,可以看出这类塑料制品与人类生活用品紧密相关。然而,由于采样方法和检测手段的不同,在不同地区监测到的微塑料浓度有较大差异,并且浓度单位也存在一定的差异。此外,初级和次级微塑料在城市排水系统的迁移过程中会与水体中污染物相互作用,因此有必要提取雨水中微塑料吸附的重金属和有机污染物,对其净化并分析,以了解其在环境中的污染特性。

表2 各地降雨后微塑料丰度的变化

Tab.2 Change of microplastic abundance after rainfall in different regions

| 地点   | 采样点        | 采样方法       | 微塑料浓度/(个 $\cdot\text{L}^{-1}$ )                                                    | 主要材质        | 主要存在形式     | 颜色       | 监测方法                 |
|------|------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------------|----------|----------------------|
| 中国北京 | 海淀区雨水管道    | 手动采样       | 1.6~29.6                                                                           | PET, PP, PE | 细微、薄膜、碎片   | 白、透明、蓝   | OM, $\mu$ -FTIR      |
| 中国上海 | 苏州河泵站、河道出口 | 自动采样器+手动采样 | (130 $\pm$ 30)~(8 500 $\pm$ 1 241)                                                 | PET, PP, PE | 颗粒、纤维      |          | OM, ATR, $\mu$ -FTIR |
| 中国武汉 | 洪山区        | 手动采样       | 水样:(2.75 $\pm$ 0.76)~(19.04 $\pm$ 2.96)<br>沉积物:(6.0 $\pm$ 1.63)~(27.33 $\pm$ 4.64) | PE, PP, PET | 碎片、纤维、薄膜   | 黑、透明、半透明 | OM, Ram              |
| 韩国   | 龟尾市雨水排水口   | 自动采样器      | 54~639                                                                             | PP, PVC, PE | 碎片、纤维、薄膜   | 红、白、透明   | $\mu$ -FTIR          |
| 美国   | 旧金山湾区      | 手动取样       | 1.1~24.6                                                                           | PE, PET, PP | 纤维、橡胶碎片、颗粒 |          | OM, Ram, $\mu$ -FTIR |
| 加拿大  | 卡尔加里       | 自动采样器      | 0.7~200.4                                                                          | PE, PP      | 纤维、碎片      | 黑、透明、蓝   | OM, Ram              |
| 瑞士   | Seeland    | 手动采样       | 10.5 $\pm$ 9.5                                                                     | PA, PE      | 薄膜、碎片      |          | $\mu$ -FTIR          |

注: OM为光学显微镜; $\mu$ -FTIR为显微傅里叶变换红外光谱;ATR为衰减全反射法;Ram为拉曼光谱。

### 3.2.3 雨水设施对微塑料的影响

城市雨水设施对截留微塑料等污染物也发挥了重要作用,Liu等<sup>[30]</sup>对丹麦日德兰半岛北部雨水滞留池采样发现,池中的沉积物可以捕获部分微塑料,并阻止它们向下游输送。同样,Smyth等<sup>[31]</sup>对降雨后加拿大多伦多等地生物滞留池的研究发现,沉积物中微塑料浓度中值在106~5 000  $\mu\text{m}$ 范围内降低了84%,其在过滤微塑料和防止其扩散方面非常有效。Werbowski等<sup>[26]</sup>对旧金山湾雨水花园的研究发现,其滞留的微塑料浓度为1.1~24.6个/L。不同

地区的雨水设施对微塑料均有截留作用,整体而言,生物滞留池和雨水花园对微塑料的截留效果更为显著。Stang等<sup>[32]</sup>研究发现,生物滞留池对微塑料的去除率为84%~96%,而湿地和雨水滞留池对微塑料的去除率分别为28%~55%和85%~99%,其中生物滞留池对纤维状微塑料的去除效果并不明显。由于目前数据有限,未来需要更多的研究。与此同时,由于研究者所使用的研究方法和检测手段存在差异,不同雨水设施之间仍然存在一定差别。因此,未来研究人员应通过建立标准化的采样、分析、

定量单位等措施,增强世界各地和各类设施微塑料污染情况的可比性。

#### 4 结语

排水系统中微塑料的直接来源包括居民排放的生活污水和工业企业排放的生产废水,潜在来源包括地表径流对微塑料的迁移以及塑料排水设施自然老化释放的微塑料;在排水管网中,因管道老化、塑化剂的使用以及管垢的积累导致微塑料扩散到城市的各个角落,给城市周围水体及地下水带来潜在的危害;同时,强降雨天气也会对微塑料的迁移产生重要影响,世界各地在降水后均监测到微塑料的存在,雨水设施对微塑料的截留发挥了重要的作用。基于以上对排水系统中微塑料的调查与分析,未来的研究应注重以下几个方面:

① 建立标准化的采样、分析、定量单位等措施,进而更好地对比世界各地微塑料浓度和各类雨水设施微塑料污染情况。

② 目前对微塑料的研究主要集中在其种类、数量、颜色、分布等方面的监测上,未来应对其挟带的污染物以及毒理学影响进行必要的提取和分析,了解该污染物在环境中的污染特性并改进其处理工艺。

③ 排水管网中管垢及各类非点源污染物同微塑料之间的关系有待深入调查,城市中各类海绵设施对降雨后微塑料的截留和处理效果有待进一步研究。

④ 建立微塑料在城市排水系统和各类水体污染物中的迁移和扩散模型,并根据微塑料扩散规律制定更加完善的处理措施。

#### 参考文献:

- [1] XIA W L, RAO Q Y, DENG X W, *et al.* Rainfall is a significant environmental factor of microplastic pollution in inland waters[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 732: 139065.
- [2] CAO Y R, WANG Q, RUAN Y F, *et al.* Intra-day microplastic variations in wastewater: a case study of a sewage treatment plant in Hong Kong [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 160: 111535.
- [3] SANG W J, CHEN Z Y, MEI L J, *et al.* The abundance and characteristics of microplastics in rainwater pipelines in Wuhan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755(Part 2): 142606.
- [4] PATIL S, KAMDI P, CHAKRABORTY S, *et al.* Characterization and removal of microplastics in a sewage treatment plant from urban Nagpur, India [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(1): 47.
- [5] YANG L B, QIAO F, LEI K, *et al.* Microfiber release from different fabrics during washing [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 136–143.
- [6] BAUER-CIVIELLO A, CRITCHELL K, HOOGENBOOM M, *et al.* Input of plastic debris in an urban tropical river system [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 144: 235–242.
- [7] BAILEY K, SIPPS K, SABA G K, *et al.* Quantification and composition of microplastics in the Raritan Hudson Estuary: comparison to pathways of entry and implications for fate [J]. *Chemosphere*, 2021, 272: 129886.
- [8] HE P J, CHEN L Y, SHAO L M, *et al.* Municipal solid waste (MSW) landfill: a source of microplastics? – Evidence of microplastics in landfill leachate [J]. *Water Research*, 2019, 159: 38–45.
- [9] SHEN M C, HU T, HUANG W, *et al.* Can incineration completely eliminate plastic wastes? An investigation of microplastics and heavy metals in the bottom ash and fly ash from an incineration plant [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 779: 146528.
- [10] BIGALKE M, FIEBER M, FOETISCH A, *et al.* Microplastics in agricultural drainage water: a link between terrestrial and aquatic microplastic pollution [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806(Part 4): 150709.
- [11] KUMAR M, XIONG X N, HE M J, *et al.* Microplastics as pollutants in agricultural soils [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265(Part A): 114980.
- [12] LIU C, ZHANG X R, LIU J F, *et al.* Ageing characteristics and microplastic release behavior from rainwater facilities under ROS oxidation [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 866: 161397.
- [13] ZHANG X Y, LIN T, WANG X X. Investigation of microplastics release behavior from ozone-exposed plastic pipe materials [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 296: 118758.
- [14] ZHANG X R, LIU C, LIU J F, *et al.* Release of microplastics from typical rainwater facilities during aging process [J]. *Science of the Total Environment*,

- 2022, 813: 152674.
- [15] LUO Y L, AL AMIN M, GIBSON C T, *et al.* Raman imaging of microplastics and nanoplastics generated by cutting PVC pipe [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 298: 118857.
- [16] LIN J L, YAN D Y, FU J W, *et al.* Ultraviolet-C and vacuum ultraviolet inducing surface degradation of microplastics [J]. *Water Research*, 2020, 186: 116360.
- [17] LI X W, LI M, MEI Q Q, *et al.* Aging microplastics in wastewater pipeline networks and treatment processes: physicochemical characteristics and Cd adsorption [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 797: 148940.
- [18] YE X Y, WANG P Y, WU Y C, *et al.* Microplastic acts as a vector for contaminants: the release behavior of dibutyl phthalate from polyvinyl chloride pipe fragments in water phase [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(33): 42082–42091.
- [19] PAN L L, LI G W, LI J L, *et al.* Heavy metal enrichment in drinking water pipe scales and speciation change with water parameters [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806(Part 2): 150549.
- [20] HITCHCOCK J N. Storm events as key moments of microplastic contamination in aquatic ecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 734: 139436.
- [21] LIU Z Q, LIU Z X, WU L Z, *et al.* Effect of polyethylene microplastics and acid rain on the agricultural soil ecosystem in southern China [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 303: 119094.
- [22] ABBASI S, REZAEI M, AHMADI F, *et al.* Atmospheric transport of microplastics during a dust storm [J]. *Chemosphere*, 2022, 292: 133456.
- [23] BRAHNEY J, HALLERUD M, HEIM E, *et al.* Plastic rain in protected areas of the United States [J]. *Science*, 2020, 368(6496): 1257–1260.
- [24] CHO Y N, SHIM W J, HA S Y, *et al.* Microplastic emission characteristics of stormwater runoff in an urban area: intra-event variability and influencing factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 866: 161318.
- [25] CHEN H, JIA Q L, 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.
- [26] WERBOWSKI L M, GILBREATH A N, MUNNO K, *et al.* Urban stormwater runoff: a major pathway for anthropogenic particles, black rubbery fragments, and other types of microplastics to urban receiving waters [J]. *ACS ES&T Water*, 2021, 1(6): 1420–1428.
- [27] ROSS M S, LOUTAN A, GROENEVELD T, *et al.* Estimated discharge of microplastics via urban stormwater during individual rain events [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11: 1090267.
- [28] SANG W J, CHEN Z Y, MEI L J, *et al.* The abundance and characteristics of microplastics in rainwater pipelines in Wuhan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755(Part 2): 142606.
- [29] ZHANG J J, DING W C, ZOU G Y, *et al.* Urban pipeline rainwater runoff is an important pathway for land-based microplastics transport to inland surface water: a case study in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 861: 160619.
- [30] LIU F, VIANELLO A, VOLLERTSEN J. Retention of microplastics in sediments of urban and highway stormwater retention ponds [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 255(Part 2): 113335.
- [31] SMYTH K, DRAKE J, LI Y R, *et al.* Bioretention cells remove microplastics from urban stormwater [J]. *Water Research*, 2021, 191: 116785.
- [32] STANG C, MOHAMED B A, LI L Y. Microplastic removal from urban stormwater: current treatments and research gaps [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 317: 115510.

作者简介: 刘佳奇(1999–), 男, 山西吕梁人, 博士研究生, 主要从事水处理方向的研究工作。

E-mail: lj6797@163.com

收稿日期: 2023-05-29

修回日期: 2025-01-23

(编辑: 丁彩娟)