

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.037; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.037.

齐张蓉, 刘慧, 王为木, 等. 降雨—径流对水土环境中微塑料的赋存特征及迁移机制的研究进展[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 407-413.

Qi Zhangrong, Liu Hui, Wang Weimu, et al. Effects of rainfall-runoff on the occurrence characteristics and migration behavior of microplastics in soil and water environments[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 407-413.

降雨—径流对水土环境中微塑料的赋存特征及迁移机制的研究进展

齐张蓉^{1,2}, 刘慧^{1,2}, 王为木^{1,2}, 董姝楠^{1,2}, 张晓瑾^{1,2}

(1.河海大学 农业科学与工程学院, 南京 210098;

2.江苏省农业水土资源高效利用与固碳减排工程研究中心, 南京 210098)

摘要:[目的]揭示水土环境中降雨—径流微塑料的赋存特征和迁移规律, 阐明微塑料在降雨—径流过程中的迁移机制, 解析微塑料对水土环境以及生物的危害, 分析目前的研究不足及方向, 为水土环境微塑料污染管控提供理论支持和科学指导, 并为系统开展降雨—径流中微塑料的环境行为研究提供理论支撑。[方法]基于国内外有关降雨—径流对水土环境中微塑料环境行为影响的文献资料, 利用 VOS viewer 软件进行关键词可视化分析, 并对降雨—径流中微塑料的来源, 水土环境中微塑料的赋存特征, 降雨—径流中微塑料在水环境中的迁移机制及其影响因素进行归纳分析。[结果](1) 水土环境中微塑料的形状主要以纤维和碎片为主, 其赋存特征受到自身密度、粒径等的影响, 不同水土环境中降雨特征及污染源的不同, 导致微塑料的赋存特征存在一定差异;(2) 降雨—径流中的微塑料主要来源于地面和大气微塑料;(3) 水环境中微塑料的迁移主要受重力、水动力、降雨量等因素的影响, 具有很高的运移性, 易随降雨—径流迁移;(4) 土壤中微塑料的迁移受降雨、生物扰动、微塑料自身性质和土壤理化性质(有机质、孔隙率、电导率和 pH 值)等因素的影响, 其中降雨强度、时间、频次对微塑料在土壤中迁移的深度、浓度影响较大。[结论]降雨会冲走悬浮在大气中的微塑料, 降低人类摄入的风险性, 但微塑料会通过降雨—径流进入水土环境中增加潜在的环境风险。目前, 微塑料在降雨—径流中的迁移研究正处于起步阶段, 仍需深入研究揭示其具体机制和影响因素。

关键词:降雨—径流; 微塑料; 水土环境; 赋存; 迁移机制

中图分类号:X522; X53

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2025)02-0407-07

Effects of rainfall-runoff on the occurrence characteristics and migration behavior of microplastics in soil and water environments

Qi Zhangrong^{1,2}, Liu Hui^{1,2}, Wang Weimu^{1,2}, Dong Shunan^{1,2}, Zhang Xiaojin^{1,2}

(1.College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University,

Nanjing 210098, China 2.Research Center for Efficient Utilization of Agricultural Water and Land Resources and Carbon Sequestration and Emission Reduction, Nanjing 210098, China)

Abstract: [Objective] The aims of this review are to investigate the occurrence and migration of microplastics (MPs) in rainfall-runoff processes within aquatic and terrestrial environments, to clarify the mechanisms driving MPs migration during these events, to evaluate their impacts on ecosystems and organisms, to identify research gaps, and to provide theoretical and scientific guidance for pollution mitigation. [Methods] A review of literature on the environmental behavior of MPs under rainfall-runoff conditions was conducted, with keyword visualization analysis performed using VOSviewer. This analysis covered the sources of MPs in rainfall-runoff, their occurrence in aquatic and terrestrial environments, and their migration mechanisms and

收稿日期:2024-05-26

修回日期:2024-07-11

接受日期:2024-08-03

资助项目:国家自然科学基金面上项目“降雨侵蚀过程对农田土壤中微塑料迁移的驱动机制”(42277001)

第一作者:齐张蓉(2000—),女,河南濮阳人,硕士研究生,研究方向为新型污染环境生态效应。E-mail:qzr0929hhu@163.com

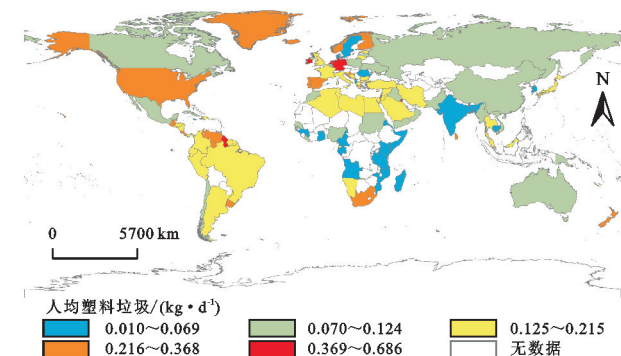
通信作者:刘慧(1972—),女,山东烟台人,副教授,硕士生导师,研究方向为新型污染物在环境中迁移转化行为。E-mail:liuhui@hhu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

influencing factors in aquatic systems. [Results] (1) MPs in aquatic and terrestrial environments are predominantly fibers and fragments, with their characteristics influenced by factors such as density, particle size, rainfall patterns, and pollution sources. (2) MPs in rainfall-runoff primarily originate from terrestrial surfaces and atmospheric deposition. (3) In aquatic systems, MPs transport is governed by gravity, hydrodynamics, and precipitation intensity, resulting in high mobility with rainfall-runoff. (4) In soil, MPs movement is affected by precipitation, bioturbation, and soil physicochemical properties (e.g., organic matter, porosity, conductivity, pH). Rainfall intensity, duration, and frequency significantly influence MPs penetration depth and concentration. [Conclusion] While rainfall can reduce airborne MPs exposure, it can also increase ecological risks by facilitating MPs entry into soil and water via runoff. Further research is needed to elucidate the specific mechanisms and factors influencing MPs migration in rainfall-runoff contexts.

Keywords: rainfall; microplastics; soil and water environment; occurrence; migration mechanism

塑料是全球范围内生产量和使用量最大的人工合成材料,由于其易制造、强度高和柔韧性以及出色的防水性,自 1950 年开始生产并被广泛使用。全球塑料年产量从 1950 年的 170 万 t 增加到 2020 年的 3.68 亿 t,预计到 2040 年塑料垃圾量将达到 670 亿 t。而由于人类密集的生产活动和不恰当使用,同时缺乏妥善的回收和处理机制,环境中塑料废弃物持续增加,全球人均塑料垃圾产生量已经达到一个较高的水平(图 1)。预计到 2050 年,约有 120 亿 t 塑料垃圾被直接释放到垃圾填埋场或自然环境中。经过一系列风化、磨损、生物降解、紫外线照射等物理、化学作用,塑料破碎分解成粒径小于 5 mm 的碎屑,并被定义为微塑料(Microplastics, MPs)。因其尺寸小、质量轻、分布广、化学性质稳定,微塑料被广泛认为是一种新型环境污染物。目前,微塑料在水体、土壤、空气、人类的血液和胎盘中出现,甚至会通过食物网积累,最终威胁人类身体健康^[1-3]。



注:基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2016)4616 号标准地图制作,底图无修改。

图 1 2021 年人均塑料垃圾产生量数据来源

Fig. 1 Plastic waste generation per capita, 2021 Data Source

降雨—径流是微塑料及其他污染物进入水土环境的重要途径,包括降雨直接输送、雨水管道运输、强降雨过程中形成的径流等。降雨能有效清除大气环境中的微塑料,导致水土环境中微塑料逐渐积累加剧

污染。在中国上海,每年估计有 333.5 t 的微塑料通过降雨流入附近河流,导致河流污染。微塑料随降雨径流进入土壤,会造成土壤中微塑料富集,削弱土壤的保水性能,影响土壤理化性质,改变土壤生物多样性,抑制植物的生长^[4-8]。

目前的综述性文章大多重点阐述水土环境中微塑料的来源及其生态效应,而对降雨—径流影响下微塑料的迁移机制阐述不够充分。基于此,本文从降雨—径流中微塑料赋存特征,水土环境中微塑料的迁移行为及其影响入手进行综述,旨在深入认识降雨作用下微塑料的迁移机制,以期评估微塑料污染的水土生态环境效应,为微塑料污染管控提供较全面的理论依据。

1 微塑料研究关键词文献可视化分析

为了解降雨影响下微塑料的赋存和迁移机制,对中、英文文献进行检索分析。在 CNKI 数据库进行中文文献检索。检索条件为:主题=“微塑料”AND“降雨”OR“雨水”,发表时间为“2015—2024”,检索文献类型包括学术期刊和学位论文。共检索到文献 72 篇,其中出现 3 次及以上的关键词共 32 个。以此为数据源,利用 VOS viewer 进行可视化分析,如图 2 所示。

在 Web of science 数据库中进行英文文献检索,检索条件为:theme=[microplastics * AND ((rainfall *) OR (stormwater *))],检索年限为“2015—2024”,检索文献类型包括 Article(论文)和 Review(评论)。共检索到文献 188 篇,利用 Zotero 软件排除与论文题目不符的文章,保留 172 篇,其中出现 15 次及以上的关键词共 53 个。以此为数据源,利用 VOS viewer 进行可视化分析,如图 3 所示。

基于 VOS viewer 的可视化分析,“共现关键词”是揭示研究领域主要内容的重要方式,其出现的频率越高,表明研究成果越多,热点越高。节点的较大圆圈表示该领域是热点;圆圈离中心越近,表明研究的重要性

越大;节点圆越大表示两者之间的联系越紧密;连接节点的线越粗,表示同时出现在文献中的次数就越多。不同颜色的节点代表不同的聚类组。在降雨影响下微塑料研究领域获得 3 个主要关键词集群(边缘类别被删除):(1) 降雨影响下微塑料的赋存特征,如种类、形态、颜色等;(2) 降雨—径流对微塑料的迁移、沉降等环境行为的影响;(3) 降雨—径流中微塑料的污染特征及生态风险等。然而,关于迁移机制的研究明显缺乏。了解微塑料的迁移规律和影响,对准确评价环境风险,制定有效的微塑料防治措施具有重要意义。

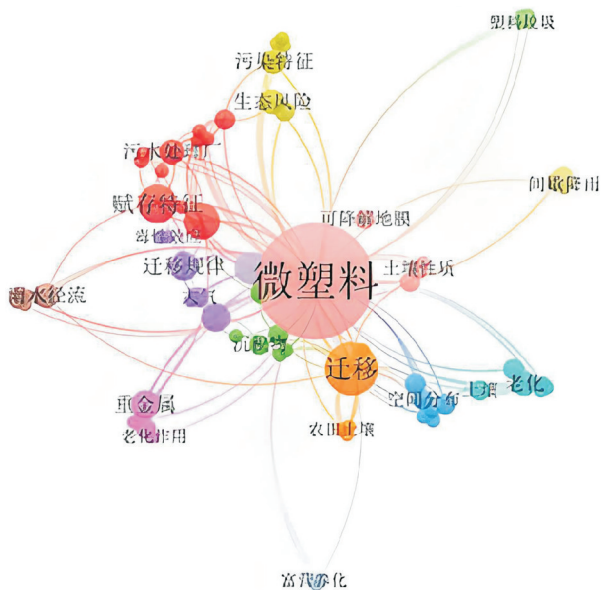


图 2 基于 CNKI 数据库的关键词聚类结果

Fig. 2 Co-occurrence graph of keywords based on CNKI database

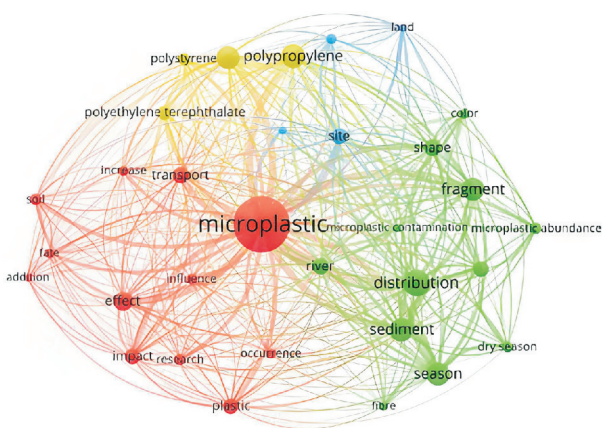


图 3 基于 Web of Science 数据库的关键词聚类结果

Fig. 3 Co-occurrence graph of keywords based on Web of Science database

2 降雨—径流中微塑料的来源

降雨—径流中的微塑料主要来源于地面和大气微塑料。研究表明,降雨是形成地表径流的最直接和最有效的方式,也被认为是大气微塑料沉降的积极驱

动因素。降雨径流会将地表塑料垃圾冲入水体环境中。降雨期间的初始雨水可以清除地表累积的高达约 85% 的微塑料颗粒,也就意味着大量的地面微塑料会在降雨后进入降雨—径流之中。而且与低强度降雨相比,高强度的自然降雨造成了微塑料较高的流动性。有研究表明径流中微塑料的浓度与降雨强度成正比,但也有人认为微塑料的浓度与累积降雨成反比。但不可忽视的是,地面微塑料仍然是径流微塑料的主要来源。

微塑料具有区域甚至全球范围可运输的特征,在大气传播过程中表现出更大的流动性,同时大气环境中的微塑料粒径小、易迁移,其运动状态易受降雨影响而发生改变,因此降雨会影响微塑料的赋存状态、迁移路径甚至是环境行为。例如,纤维状微塑料在降雨过程中容易被夹带,而薄膜表面积较大,则适合长距离的大气输送。图 4 展示了在大气环境中微塑料随降雨发生沉降的过程,地面微塑料在光照、微生物分解等外力作用下碎片化,被风力输送到大气中,并通过大气干湿沉降重新回到地面,通过径流进入水土环境,随后在生物等的影响下发生迁移。

微塑料总大气沉降量与累积降雨量之间具有显著相关性,降雨能够在一定程度上促进大气微塑料的沉降。且降雨对大气中的微塑料具有有效的清洁能力。微塑料在大气沉降可分为干沉降(微塑料自身未速度沉降)和湿沉降(降水冲刷而沉降的过程)。且微塑料在大气环境中的环境行为受地区气候的影响。例如,在热带气候地区越南,大气沉积通量随降雨量和风力强度或风向变化而随时间变化,微塑料的沉积以湿沉积为主。但是半干旱地区伊朗的旱季比雨季沉积量更大,微塑料的沉积以干沉积为主。据推测,这是由于降雨的冲刷作用,会抑制局部区域地面灰尘和微塑料的再悬浮^[9-11]。



图 4 大气环境中微塑料随降雨发生沉降

Fig. 4 Microplastics in the atmosphere settle with rainfall

3 水土环境中降雨—径流微塑料的赋存特征

在雨水管道、雨水排污口和排水系统等位点进行

采样,分析城市降雨—径流中水体或沉积物中微塑料赋存特征,可以发现,样品中的微塑料在成分、形状、密度和粒径等方面存在明显差异(表 1,表 2)。降雨—径流中微塑料成分主要以聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)为主。PE 通常用于包装材料和工业应用,而 PP 通常用于户外装备帐篷和防水服装。其形状主要以纤维、碎片为主,所含比例高于薄膜。纤维状微塑料多由人造纤维衣物、毛毯及其他塑胶制品在生产或使用过程中产生,而碎片状微塑料多在塑胶废弃物的风化、降解,磨损过程中产生。薄膜状 MPs 的低比例可归因于它们在大气中的丰度相对较低或表面积较大,这有利于其在大气中进行长距离的输送。纤维和碎片微塑料在大气环境中普遍存在,且很容易被降雨夹带^[12-15]。

在微塑料密度方面,PP 和 PE 等低密度聚合物常通过径流向下游迁移而不是聚集到沉积物中,而 PET,PU 等高密度聚合物常见于沉积物样品中。在微塑料粒径方面,微塑料在受到降雨冲刷时,受浮力的影响下,细小颗粒易随降雨—径流运移到周围环境中,而粗大颗粒则难悬浮运移。并且在水土环境中,小粒径微塑料比例高,这可能是因为大的塑料碎片在雨水击溅作用下不断破碎老化,分解成较小的碎片或颗粒。

在降雨影响下,水体中微塑料丰度比沉积物的变化范围更大,这表明水体更易受降雨影响。此外,水体和沉积物样品中的微塑料表现出不同特征,其差异可归因于水体代表微塑料在径流中的短期情况,而沉积物反映了微塑料的长期积累。

表 1 中国部分地区降雨—径流中微塑料的赋存情况
Table 1 Accumulation of microplastics in rainwater runoff in some regions of China

地理分布	研究城市(地区)	微塑料成分	粒径和形貌	丰度	文献参考
华北地区	北京(海淀区)	PP;PET	粒径:50~5000 μm 形状:碎片 41.2%、纤维 35.3%	1.6~29.6 n/L	[18-19]
	北京(清河)	PET;PS;PE	粒径:50~5000 μm:碎片占 63%、纤维占 33%、薄膜 4%	0.095 n L~3.71 n/L	
华中地区	武汉	PE;PP	粒径:37~250 μm 形状:纤维颗粒	2.75±0.76~19.04±2.96 n (100 g)	[20-21]
	武汉(东湖)	N.g	粒径:<2 mm 占 80%形状:纤维、透明碎片	7.4~29.6 n/L	
华南地区	香港(维多利亚港)	PE;PP	粒径:54~1000 μm 形状:纤维、碎片	590~10816 n/L	[17]
	马鞍山市	PET;PP	粒径:150~5000 μm 形状:纤维、碎片、薄膜粒径:40~	80~2610 n/kg	
华东地区	上海(苏州河)	PP;PE	5000 μm 形状:纤维、碎片、薄膜	3612.6 n/L	[13-14]
	上海(黄浦江)	PET	粒径:80~5000 μm 形状:纤维	26.2±9.6~14.1±5.1 n/L	

注:N.g 表示文献中数据缺失。

表 2 国外部分地区降雨—径流中微塑料的赋存情况
Table 2 Accumulation of microplastics in rainwater runoff of foreign cities

国家(城市/地区)	微塑料成分	粒径和形貌	丰度/(n · L ⁻¹)	文献参考
加拿大(卡尔加里)	N.g	粒径:0.037~0.25 mm 形状:纤维、颗粒	0.7~200.4	[7]
加拿大(大多伦多地区)	N.g	粒径:0.704~106 mm 形状:纤维 42%、碎片 21%	186±173	[5]
美国(旧金山)	PE;PET	粒径:125~5000 μm 形状:纤维、碎片	1.1~24.6	[8]
墨西哥(蒂华纳)	PE;PS	粒径:>25 μm 形状:纤维、碎片	88~275	[9]
韩国(首尔)	PP;PET	粒径:>20 μm 形状:纤维、碎片	179	[10]
法国(巴黎)	PE;PP;PS	粒径:100~5000 μm	3~129	[11]
澳大利亚(墨尔本)	PET	粒径:6~4600 μm 形状:纤维	16	[16]
瑞典(哥德堡)	轮胎磨损颗粒(TWP)	粒径:10~100 μm 形状:碎片、颗粒	1500~6000	[12]

注:N.g 表示文献中数据缺失。

4 降雨—径流中微塑料在水环境中的迁移机制及其影响

4.1 降雨—径流中的微塑料在水环境的迁移机制

水环境中微塑料的迁移主要受重力、水动力、降雨量等因素的影响,具有很高的运移性,容易随降雨—径流迁移。研究表明,与基流相比,美国密苏里州喀斯特地区 MPs(>125 μm)的丰度、种类在洪水期间显著增加,这是因为在高水流量的降雨期间,MPs 可能通过重力作用使得沉积物的微塑料再悬浮

向河流中运移。然而,当水环境中的 MPs 浓度很低时,雨季降水可以起到稀释作用,减少向地下水系统的输送。

此外,降雨冲刷产生的河流水力会导致河流中位于沉积物表面的微塑料沿水流方向迁移,还能将沉积物中微塑料碎片重新悬浮,增加水环境中微塑料的丰度。降雨会将水和沉积物中的微塑料从上游迁移到下游。因为河流上游往往坡度陡、流速快,而下游河段则坡度缓、流速慢,伴随雨水的冲刷作用,微塑料迁移至下游地区。Xia 等^[22]研究了中国凉水河沉积物中微

塑料的发生和季节变化,揭示了在雨季,河流流速加快,增强水流运动过程,促进了河床沉积物中较小微塑料的积累。Baldwin 等^[23]也得出相似的结论,即降雨期间加强的河流水动力导致微塑料碎片在沉积物中的重新悬浮,从而促进地表水中微塑料浓度升高。

水环境中微塑料含量与降雨量之间存在着显著的相关关系。例如,澳大利亚库克斯河强降雨后,河流中微塑料含量提高了 40 多倍,且微塑料浓度的变化与前 5 d 平均降雨量呈正相关^[24]。此外,在非降雨期间,东湖地表水微塑料丰度为 5.84 ± 2.95 个/L。然而,在降雨期间和降雨后,MPs 丰度显著增加,分别为每升 8.27 ± 5.65 个和 7.60 ± 4.04 个($p < 0.05$)。这种现象可归因于大气沉降和降雨径流输送到湖泊的 MPs 数量的增加。

4.2 降雨—径流中微塑料对水环境的影响

大气中飘浮着大量的微塑料,这些微塑料附着在雨滴上直接进入水环境中。微塑料不仅可释放出有毒成分,还可吸附其他污染物形成复合污染物,加剧对水环境的危害性。研究表明,富集在微塑料表面的某些污染物的浓度可能比原环境浓度高数百倍。同时降雨—径流中的微塑料成分比城市污(废)水和排污管道中更复杂,例如微塑料能携带大气中的污染物质通过降雨沉降水体,可能导致水体富营养化,或导致水环境中铅和铁等重金属的污染。同时,降雨影响地表水中微塑料的丰度,例如,降雨容易将城市道路表面的塑料垃圾带入陆地水环境,导致表面水环境具有较高的微塑料丰度。降雨也可以通过淋洗作用,将土壤中的微塑料冲刷到河流、湖泊等陆地水体中,并由于其疏水性和难降解性而长期存在,进一步造成环境污染。

如果水生生物误食微塑料,会在生物体中滞留、积累,从而减少其对养分的吸收,影响其活性,严重时还会造成水生生物的死亡。例如,当鱼类摄入并积累微塑料时,会导致其运动、肠道损伤和代谢特征的变化。还有研究表明水螅暴露于微塑料中可显著减少食物摄入量;而一些线虫食用的微塑料颗粒积累后可引起肠道损伤,且微塑料粒径越小,危害越大^[25-26]。

5 降雨—径流中微塑料在土壤环境中的迁移机制及其影响

5.1 降雨径流中的微塑料在土壤环境的迁移机制

微塑料在土壤中的迁移行为受降雨、生物扰动、微塑料自身性质和土壤理化性质(如有机质、孔隙率、电导率和 pH 值)等因素的影响。其中,降雨的强度、时间、频次等会影响微塑料在土壤中迁移的深度、浓

度等。在室内模拟人工降雨的试验研究表明,当雨强较大时,大多数微塑料会向下迁移并集中于深层土壤;且降雨时间越久,土壤微塑料流失浓度越高。强降雨可以产生和释放大量的微塑料,如暴雨可导致地膜破裂,使更多的塑料污染物进入土壤环境,且暴雨期间沉积物中的微塑料含量高于小雨。此外,持续降雨会加剧微塑料从土壤中释放。Ma 等^[27]在研究降雨径流下草地坡地中微塑料的迁移特征中发现,短期降雨下,微塑料垂向和纵向迁移量很小,但随着模拟降雨的频次增加,微塑料的迁移量也逐渐增加。

在微观尺度上,虽然胶体的大小和性质与微塑料不同,但土壤胶体的运输机制为微塑料的研究提供参考。在土壤中植物根系、土壤动物活动、人类扰动等外界因素影响下形成大孔隙,一般来说,当孔隙空间小于胶体粒径时,胶体保留在土壤孔隙内;如果土壤孔隙大于微塑料粒径,可能导致土壤表层的胶体在降雨下通过大孔隙流垂向迁移。Edwin 等^[28]研究胶体示踪剂在部分饱和大孔隙土壤中大规模入渗过程中的流动和输运现象中发现,施用于土壤表面的胶体可以在短时间(1 h)的强降雨事件后达到浅层地下水位。极端降雨可能会加剧这种情况。在宏观尺度上,降雨可以通过水动力作用促进微塑料在土壤中迁移。降雨形成地表径流造成土壤侵蚀,土壤侵蚀多以土壤孔隙中的优先流流失,土壤中的微塑料特别是小粒径的微塑料容易随优先流进行垂向迁移。

干湿循环能提高微塑料在土壤中的迁移率。研究发现,干湿循环后微塑料的穿透深度显著增加,且向下迁移距离主要由微塑料的亲水(疏水)性主导。这是因为亲水性基团由于氢键的存在增加了与水的接近性,从而促进微塑料通过优先流路径向下迁移。O'Connor 等^[29]发现干湿循环增强了微塑料在土壤渗流带的孔隙空间途径,能够加速微塑料的垂直扩散。Gao 等^[30]发现,干湿循环的频次增加,微塑料在土壤中的垂向迁移增强。以上现象原因在于干湿交替能产生土壤裂隙,土壤裂隙中的孔隙水能带动微塑料进行迁移。此外,干湿交替还会引起土壤颗粒的收缩和膨胀,改变土壤孔隙结构,从而提高微塑料的迁移速率;损坏微塑料的结构,从而形成小尺寸的微塑料,向更深处的土壤迁移。

5.2 降雨—径流中微塑料对土壤环境的影响

降雨—径流中的微塑料进入土壤环境后,会对土壤理化性质、微生物群落结构和植物生长等产生不同程度的影响。一方面,随降雨进入土壤环境中的微塑料会削弱土壤保水能力。另一方面,在塑料生产过程中,经常添加各种有毒的可浸出添加剂来改变聚合物

材料性能,从而对生物造成危害。此外,许多有机污染物和金属可以利用塑料聚合物的特性吸附在微塑料上,会增加这些污染物的潜在暴露风险。微塑料能为微生物生长提供更多的生长附着点,甚至可以提高微生物的丰度。但同时,微塑料能影响微生物的活性、反硝化过程和土壤氮循环过程,大多数情况会对土壤生物造成毒害作用。

微塑料对农田土壤中的作物危害不可忽视。研究表明,微塑料在土壤—作物系统中的长期存在和迁移可以显著地影响作物整个生命周期的生长或产量,甚至包括萌发和组织发育过程。微塑料的毒性可以抑制水稻、小麦等作物的生长,甚至引起生长异常,从而降低总产量。在作物不同的生长阶段,不同特点的微塑料毒性(即聚合物类型、浓度、大小、形态和风化状态)也存在差异。研究发现,微塑料在作物种子和根上的积累和吸附是它们毒害作用的第一步。土壤中积累的微塑料还可以附着在萌发的稻粒表面,对种子囊孔造成物理屏障,从而阻碍萌发过程中的水分和营养摄入,这会直接影响到植物的生长过程。此外,微塑料可以通过大气沉积附着在作物气孔中,从而影响光合作用和蒸腾作用。

6 研究展望

研究表明,降雨会冲走悬浮在大气中的微塑料,降低人类摄入的可能性,但微塑料会通过降雨径流进入水土环境中增加潜在环境风险。目前,微塑料在降雨—径流中的迁移机制和影响研究正处于起步阶段,仍需要深入研究来揭示其具体机制和影响因素。未来关于降雨影响下微塑料的环境行为的研究可注重以下几个方面:

(1) 微塑料在水土环境中的迁移具有复杂性,不同地区和环境条件下的降雨特征也存在差异。准确监测和定量微塑料的迁移和转化仍然具有一定的困难。需要建立统一手段和标准化程序,在水文和气象科学研究方法的帮助下,通过基于对单次或多次降雨事件的调查,确定微塑料的源和汇、迁移距离和传输媒介,提高监测的准确性和规范性。

(2) 微塑料丰度变化受降雨影响显著,但缺少降雨对微塑料丰度变化的具体微观机理的研究,还未深入探讨能够显著引发微塑料赋存量改变的降雨或者其他气候条件临界值。建议在研究中考考虑降雨强度、频率等及其他气象因素(例如风速和风向)变化时对微塑料丰度的影响,重点讨论其内在机制。

(3) 目前关于微塑料的来源、途径、行为的研究越来越多。然而,关于微塑料通过非点源进入水土环

境的研究仍然有限,降雨径流是非点源污染的重要途径,如何在雨水进入水土环境前采取措施进行防控和通过各种手段减少降雨径流对生态系统的影响,防范土壤侵蚀造成的微塑料迁移造成污染,还有待进一步研究。研究者可以对来自非点源的微塑料进行持续监测,同时考虑土地利用模式和降雨特征,以了解微塑料在从陆地环境向水生环境迁移过程,还可以建立微塑料在城市排水系统或各类水土环境污染物的迁移和扩散模型,并根据微塑料迁移规律制定源头防治和治理措施。

参考文献(References):

- [1] Delangiz N, Aliyar S, Pashapoor N, et al. Can polymer-degrading microorganisms solve the bottleneck of plastics' environmental challenges[J]. *Chemosphere*, 2022, 294:133709.
- [2] 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.
- [3] Kumar R, Verma A, Shome A, et al. Impacts of plastic pollution on ecosystem services, sustainable development goals, and need to focus on circular economy and policy interventions[J]. *Sustainability*, 2021, 13(17):9963.
- [4] Cheung P K, Hung P L, Fok L. River microplastic contamination and dynamics upon a rainfall event in Hong Kong, China[J]. *Environmental Processes*, 2019, 6(1): 253-264.
- [5] Grbić J, Helm P, Athey S, et al. Microplastics entering northwestern Lake Ontario are diverse and linked to urban sources[J]. *Water Research*, 2020, 174:115623.
- [6] 王琬,张少良,刘旭,等.水蚀对黑土微塑料运移和分布影响的初步研究[J].*水土保持研究*, 2024, 31(2):1-10.
Wang W, Zhang S L, Liu X, et al. Preliminary study on the effect of water erosion on the transport and distribution of microplastics in the mollisols[J]. *Research of Soil & Water Conservation*, 2024, 31(2):1-10.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Piñon-Colin T J, Rodriguez-Jimenez R, Rogel-Hernandez E, et al. Microplastics in stormwater runoff in a semiarid region, Tijuana, Mexico[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 704:135411.

- [10] Do T, Park Y, Lim B, et al. Effect of the first-flush phenomenon on the quantification of microplastics in rainwater[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 187: 114559.
- [11] Treilles R, Gasperi J, Gallard A, et al. Microplastics and microfibers in urban runoff from a suburban catchment of Greater Paris[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 287: 117352.
- [12] Allen S, Allen D, Phoenix V R, et al. Atmospheric transport and deposition of microplastics in a remote mountain catchment[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 339-344.
- [13] Niu S P, Wang T T, Xia Y R. Microplastic pollution in sediments of urban rainwater drainage system[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 868: 161673.
- [14] Sun X N, Jia Q L, Ye J F, et al. Real-time variabilities in microplastic abundance and characteristics of urban surface runoff and sewer overflow in wet weather as impacted by land use and storm factors[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 859(Pt 2): 160148.
- [15] 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.
- [16] Monira S, Roychand R, Bhuiyan M A, et al. Identification, classification and quantification of microplastics in road dust and stormwater[J]. *Chemosphere*, 2022, 299: 134389.
- [17] Mak C W, Tsang Y Y, Leung M M L, et al. Microplastics from effluents of sewage treatment works and stormwater discharging into the *Victoria Harbor*, Hong Kong[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 157: 111181.
- [18] 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]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 861: 160619.
- [19] Yuan D, Zhao L, Yan C, et al. Distribution characteristics of microplastics in storm-drain inlet sediments affected by the types of urban functional areas, economic and demographic conditions in southern Beijing [J]. *Environmental Research*, 2023, 220: 115224.
- [20] Xia W L, Rao Q Y, Deng X W, et al. Rainfall is a significant environmental factor of microplastic pollution in inland waters[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 732: 139065.
- [21] Sang W J, Chen Z Y, Mei L J, et al. The abundance and characteristics of microplastics in rainwater pipelines in Wuhan, China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 755(Pt2): 142606.
- [22] Xia F Y, Yao Q W, Zhang J, et al. Effects of seasonal variation and resuspension on microplastics in river sediments[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 286: 117403.
- [23] Baldwin A K, Corsi S R, Mason S A. Plastic debris in 29 great lakes tributaries: Relations to watershed attributes and hydrology[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(19): 10377-10385.
- [24] Hitchcock J N. Storm events as key moments of microplastic contamination in aquatic ecosystems[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 734: 139436.
- [25] Gasperi J, Wright S L, Dris R, et al. Microplastics in air: Are we breathing it in? [J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2018, 1: 1-5.
- [26] Murphy F, Quinn B. The effects of microplastic on freshwater *Hydra attenuata* feeding, morphology & reproduction[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 234: 487-494.
- [27] 马建刚, 王刘雅, 张春涛, 等. 多场次模拟暴雨下 3 种草坪坡地微塑料迁移特征[J]. *水土保持研究*, 2024, 31(3): 108-114.
- Ma J G, Wang L Y, Zhang C T, et al. Migration characteristics of microplastics in three kinds of lawn slope land under multiple simulated rainstorm[J]. *Research on Soil and Water Conservation*, 2024, 31(3): 108-114.
- [28] Cey E E, Rudolph D L, Passmore J. Influence of macroporosity on preferential solute and colloid transport in unsaturated field soils[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, 107(1/2): 45-57.
- [29] O'Connor D, Pan S Z, Shen Z T, et al. Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 527-534.
- [30] Gao J, Pan S Z, Li P F, et al. Vertical migration of microplastics in porous media: Multiple controlling factors under wet-dry cycling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 419: 126413.