



农业环境科学学报

Journal of Agro-Environment Science

ISSN 1672-2043, CN 12-1347/S

《农业环境科学学报》网络首发论文

题目：土壤微塑料影响植物生长的因素与机制研究进展
作者：陈欣，郭薇，李济之，迟光宇
收稿日期：2023-04-13
网络首发日期：2023-07-19
引用格式：陈欣，郭薇，李济之，迟光宇. 土壤微塑料影响植物生长的因素与机制研究进展[J/OL]. 农业环境科学学报.
<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/12.1347.S.20230718.1426.006.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

土壤微塑料影响植物生长的因素与机制研究进展

陈欣¹, 郭薇^{1,2}, 李济之^{1,2}, 迟光宇^{1*}

(1.中国科学院沈阳应用生态研究所, 污染生态与环境工程重点实验室, 沈阳 110016; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土壤中的微塑料可通过多种方式影响植物生长, 在植物体内积累, 并最终通过食物链进入人体, 厘清微塑料对植物生长的影响及机制, 有助于系统掌握其在土壤-植物体系中的环境行为。微塑料的赋存状态和理化特征均可影响其对植物的作用效果, 本文从粒径、形状、浓度、种类、塑料添加剂和老化程度等方面, 梳理了土壤微塑料影响植物生长的主要因素及作用机制, 并对未来研究的重点内容提出展望, 以期为进一步明晰微塑料对土壤生态系统的影响提供参考。

关键词: 土壤; 微塑料; 植物; 影响因素; 作用机制

doi:10.11654/jaes.2023-0288

Research progress on the influencing factors and mechanisms of soil microplastics on plant growth

CHEN Xin¹, GUO Wei^{1,2}, LI Jizhi^{1,2}, CHI Guangyu^{1*}

(1.Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Microplastics in soil can affect plant growth in a variety of ways, accumulate in plants, and eventually enter the human body via the food chain. Clarifying the mechanisms and main factors whereby microplastics influence plant growth can contribute to a systematic understanding of their environmental behavior in soil-plant systems. Both the occurrence state and physicochemical characteristics of microplastics can influence their effects on plants. In this paper, from the perspectives of particle size, shape, concentration, and type; plastic additives; and aging degree of microplastics, we review the main factors and mechanisms underlying the effects of soil microplastics on plant growth. The key direction of future research is proposed, which will provide a reference for further clarifying the impact of microplastics on soil ecosystems.

Keywords: soil; microplastics; plant; influencing factor; mechanism of action

塑料作为一种被广泛应用的有机合成聚合物材料, 为我们生活提供便利的同时, 也带来了后续的环境问题。据估算, 到 2050 年, 将有大约 12 000 万 t 塑料垃圾被埋入垃圾填埋场或自然环境中^[1], 塑料垃圾进入到环境后会逐渐破碎变成微塑料(< 5 mm), 导致其在土壤和水体中的丰度逐年递增^[2-3]。2015 年的第二届联合国环境大会已将微塑料污染列为环境与生态领域的第二大科学问题^[3]。目前, 人们对水体中微塑料的认识已较为系统^[4-6], 土壤微塑料逐步成为新的研究热点^[7-8]。2012 年 Rillig 首次提出微塑料会影响土壤理化性质^[9], 引起了人们对土壤微塑料的关注, 后续研究表明微塑料可被植物吸收并积累^[10-11], 最终通过食物链进

收稿日期: 2023-04-13

作者简介: 陈欣 (1968—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 研究员, 研究方向为农业生态。E-mail: chenxin@iae.ac.cn

*通信作者: 迟光宇, E-mail: chigy@iae.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (NSFC) - 山东联合基金重点项目 (U2106214)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (NSFC) and Shandong Joint Fund Key Project (U2106214)

入人体。厘清微塑料对植物生长的影响及其机制，有助于系统掌握其在土壤-植物体系中的环境行为。

微塑料进入土壤后，可通过改变土壤环境、与根系互作及在植物体内运移影响植物生长^[4,12-13]。在上述过程中，微塑料的赋存状态和理化特征均可影响其对植物的作用效果^[14]。基于现有研究进展，从粒径、形状、浓度、种类、塑料添加剂、微塑料吸附性能和老化程度等方面，梳理了土壤微塑料影响植物生长的主要因素及作用机制，并对未来研究的重点内容提出展望，以期为进一步明晰微塑料对土壤生态系统的影响提供参考。

1 微塑料粒径的影响

土壤中微塑料的粒径会影响植物对其吸收和转运。研究发现，高分子量或大尺寸的微塑料颗粒不能穿透细胞壁，而粒径较小的微塑料易被根系吸收并在植物体内运移^[15-16]，李连祯等^[17]研究发现，粒径较大的聚苯乙烯(PS)微球(1 μm)不易通过生菜根细胞间隙和质外体进入根系皮层和中柱，难以被根部吸收，而粒径较小的聚苯乙烯微球(0.2 μm)可被根部吸收并运移至茎中积累。一般情况下，纳米级和少数微米级的塑料颗粒都可穿透植物根系表皮进入植物体，并能在蒸腾拉力的作用下，通过导管随水和养分运输至地上部位^[4,18]。进入植物体的微塑料的富集部位与其粒径和植物种类有关，如表 1 所示，100 nm 的 PS 可被小麦根尖吸收，通过木质部从根部向上运输到叶片，并在叶片中积累^[15]；Liu 等^[16]也发现纳米和微米级的微塑料(80 nm 和 1 μm)均可被水稻根部吸收，随后转移到地上部分，并在茎、叶中积累，质外体转运可能是主要途径。粒径较大的微塑料也可通过影响土壤结构和水分运输，干扰植物吸水。如 Wang 等^[19]研究表明，大粒径微塑料的添加可以提高土壤大孔隙比例，降低土壤持水性。

不同粒径的微塑料对植物的伤害机制也有所区别。粒径较大的微塑料不易进入植物体内，但容易导致根系磨损，并可以粘附在根表并在皮层中积累，抑制水和营养物质的吸收^[15-20]。如 Bosker 等^[20]通过使用荧光标记示踪技术，证明了微塑料可以通过粘附在气孔表面来减缓或完全抑制水分吸收，对种子萌发产生负面影响。粒径较小的微塑料可以直接被根系吸收，并在植物体内积累，阻塞细胞壁孔或胞间通道，影响水分和养分的运移^[11,21-22]。Jiang 等^[22]研究表明，100 nm PS 可以积聚在蚕豆根中，阻塞细胞连接或细胞壁孔以运输营养物质，因此其比 5 μm PS 具有更高的基因毒性和损伤能力。Li 等^[10]也研究发现，100 nm PS 可被黄瓜根系吸收，然后通过根压力和蒸腾张力运输到叶片中^[22-24]，破坏叶片组织中的细胞器。与大颗粒微塑料相比，较小粒径的微塑料比表面积大^[25]，吸附其他污染物的能力更强^[20,25-26]。如聚乙烯(PE)因疏水作用拥有较强的吸附能力，但纳米级 PS 对污染物的吸附能力可能超过微米级的 PE，表明尺寸效应可能比疏水相互作用更有效^[27-29]。

表 1 不同粒径微塑料在植物体内的富集特征

Table 1 Enrichment characteristics of microplastics with different particle sizes in plants

种类	粒径	植物	富集部位	参考文献
Type	Size	Plant	Enrichment site	References
PE	3 μm	玉米	根部	[30]
	244 nm	生菜	根部	[31]
	244 nm	小麦	根部	[31]
	100 nm	黄瓜	根部细胞间隙	[21]
PS	100 nm	蚕豆	根尖细胞	[22]
	200 nm、2 μm	小麦	茎和叶	[17]

100 nm	小麦	根、芽木质部和叶脉	[15]
80 nm、1 μm	水稻	根、茎和叶	[16]

2 微塑料形状的影响

常见的微塑料大致分为纤维状、薄膜状、颗粒状、珠子状、碎片状,各种形状微塑料对土壤结构的影响不同,对植物生长的影响也有所差异。纤维状微塑料具有吸附能力强、比表面积大等特点^[32],同时容易缠绕土壤颗粒,进而促进团聚体的形成,产生土壤大孔隙^[33],这可以减小根系生长阻力。如 Lozano 等^[34]针对干旱土壤的研究表明,纤维状微塑料添加可促进土壤团聚体的形成,间接提高土壤保水性,缓解干旱程度,增加根直径和根组织密度。Lozano 等^[35]研究发现,纤维状微塑料还可增加土壤大孔隙率和通气量,减小根系生长阻力,提高水分有效性,促进根系对水分及养分的吸收。薄膜状微塑料也可增加土壤大孔隙,这虽可为根系生长提供空间,但也会促进水分蒸发,降低土壤保水性。如 Wan 等^[36]研究发现,薄膜状微塑料可为水流创造通道,显著提高土壤水分蒸发速率,降低土壤保水性而引起干裂,这可能会导致植物缺水。

不规则形状的微塑料颗粒较难进入植物体,但与光滑的微塑料颗粒相比,其可能对根部的损伤程度更大^[32,37-40]。如连加攀等^[41]通过电镜扫描观察到,相比于乙烯-乙酸乙酯共聚物(EVA)和聚甲基丙烯酸甲酯(EMMA),线型低密度聚乙烯(LLDPE)具有更多的不规则边缘,对植物根系的损伤作用更强;Lian 等^[42]研究也发现,1%的PE对植物根部生长无明显影响,但相同浓度条件下,具有更多尖锐边缘的聚乳酸(PLA)则可显著减少植物的根长。目前,微塑料添加实验大多使用合成的光滑微塑料颗粒,而土壤中的微塑料形状多不规则,对植物有更强的损伤作用,这也是造成现有研究中添加试验与田间覆膜试验结果差异的重要原因。

3 微塑料浓度的影响

微塑料浓度会影响其对植物的作用效果,较低浓度的微塑料可能会促进植物生长。如表2所示,与无微塑料添加相比,0.1%和0.5%的PLA提高了玉米株高、根体积和面积,0.5%和1%的聚氯乙烯(PVC)可增加生菜根的总长度、表面积、体积和直径。高浓度的微塑料多会抑制植物的生长,如刘晓红等^[43]研究发现,PE会抑制黄瓜的生长和萌发,且抑制作用会随微塑料浓度升高而增强。这可能因为较高浓度的微塑料,会诱导植物氧化应激产生更多的活性氧(ROS),加剧组织和细胞氧化损伤,从而抑制植物根的发育;另一方面,随PE质量分数增加,积累在植物根系的微塑料逐渐增多,阻碍水分养分的吸收,抑制了作物的生长^[20,30,43]。在有些情况下,浓度较高的微塑料也有可能促进植物的养分吸收,如Liu 等^[44]研究发现,5%的PVC则可通过影响根系分泌物,改变小麦的养分获取策略,迫使小麦在狭窄的根区有效地获取可用的养分,从而促进了小麦的生长。浓度也会影响微塑料对土壤结构的作用效果,造成植物对微塑料不同浓度的响应差异,如Lozano 等^[35]研究发现,随着微塑料浓度的增加,茎和根质量的下降可能是由于薄膜状微塑料创造了更多的水运动通道,增加了土壤蒸发速率,导致植物缺水。

微塑料浓度对植物的影响效果也与实验条件有关。如表2所示,Shi 等^[45]通过水培试验研究发现,中低浓度的微塑料(10、100、500 mg L⁻¹)对西红柿种子萌发有抑制作用,而在高浓度下(1 000 mg L⁻¹)抑制作用降低;连加攀等^[41]研究也发现,在水培实验下,低中浓度微塑料(500 mg L⁻¹)处理的小麦各项发芽指标均显著降低,高浓度下(1 000 mg L⁻¹)的各项指标有所回升。高浓度微塑料对植物萌发的抑制作用减弱,这是因为培养液中的微塑料容易相互团聚而减少其与种子的接触,降低胁迫程度^[46-47]。

表 2 微塑料浓度对植物生理指标的影响

Table 2 Effects of microplastics concentration on plant physiological indexes

种类	浓度	培育方式	植物	指标	效果	参考文献
Type	Concentration	Culture method	Plant	Index	Effect	References
PE	0、0.1%、0.5%、 1%、2%	土培	玉米	株高、根体 积、根面积	0.1%和0.5%的PE显著增加株 高、根体积和面积, 1%和2% 无显著影响	[43]
PLA	0.1%、1%、 10%	土培	玉米	生物量、叶 片叶绿素 含量	10%PLA降低植株生物量和 叶片叶绿素含量	[48]
PVC	0.5%、1%、2%	土培	生菜	根系生长 指标	0.5%和1%的PVC显著增加了 根的总长度、表面积、体积和 直径 2%无显著影响	[49]
PS、PE、PP	10、100、500、 1 000 mg L ⁻¹	水培	西红 柿	发芽势、发 芽指数、活 力指数	10、100、500 mg L ⁻¹ 下发芽势、 发芽指数、活力指数均下降, 1 000 mg L ⁻¹ 各项指标有所回 升	[45]
LLDPE	10、100、500、 1 000 mg L ⁻¹	水培	小麦	发芽指数、 活力指数、 发芽势	10、100、500 mg L ⁻¹ 各项发 芽指标均有所降低, 10、100 mg L ⁻¹ 下对发芽势有促进作 用, 在 1 000 mg L ⁻¹ 下各项指 标略有回升, 发芽指数甚至有 所提高	[41]

4 微塑料种类的影响

土壤中不同种类的微塑料由于微观结构、结晶度、所含化学添加剂种类以及表面性能等方面的差异,对植物作用效果有所区别。其中结晶度代表了塑料的脆弱程度,结晶度越高塑料越脆弱,易形成小颗粒被植物吸收^[50]。如 PLA 是一种半结晶聚合物,在室温下具有较低的强度和硬度,在破碎过程中由于断裂韧性和脆性较低容易形成粘连而形成片状和块状颗粒^[51-52],因此可能具有更强的机械损伤作用。此外,由于不同种微塑料在其聚合物单体性质方面差异较大,它们的分子相互作用也有所不同,如脂肪族 PE 只可通过非特异性范德华相互作用与污染物复合,而芳香族 PS 也可以通过 π - π 相互作用^[4,53]。

由于传统农膜在土壤中难以降解,回收后也不易处理,可降解地膜的使用逐渐受到关注,而可降解地膜对植物的负面影响可能更强^[54-56]。张彦等^[56]通过对比可降解微塑料 PLA 和难降解微塑料高密度聚乙烯(HDPE)及聚丙烯(PP)发现,PLA 对小麦幼苗生长的抑制作用强于后两者,且随植物生长抑制作用逐渐增强,这可能是由于 PLA 被降解后更易被植物吸收。同时,可降解塑料中含有的塑化剂较多^[14,55],塑性高、易产生尖锐边缘^[42],这均会对植物造成伤害^[57-58]。此外,可降解地膜可作为潜在碳源被微生物利用,进而影响微生物群落特征,改变养分循环过程,同时可降解地膜的降解产物也会影响植物代谢过程。如 Michaela 等^[59]最新研究表明,与低密度聚乙烯(LDPE)相比,可降解的 PLA 可作为潜在碳源被微生物利用,进而影响植物-土壤氮分配过程,PLA 降解后的乳酸,可通过影响丙酮酸代谢,干扰氨基酸的合成。

5 微塑料老化程度的影响

微塑料进入环境后会发物理、化学、生物等老化作用，此过程不仅会改变微塑料的粒径、表面粗糙度、结晶度等物理特性，也会改变化学键，增加表面含氧官能团。随着微塑料的老化，所含的添加剂会逐渐释于土壤中，抑制植物的生长^[60-62]，添加剂在土壤中会随时间降解^[62]。如 Pflugmacher 等^[60]研究表明，原始微塑料和短期老化(80 天)对行菜的发芽以及幼苗生长毒害作用最强，后期负面效应逐渐减弱，这是由于微塑料浸出的双酚 A(阻燃剂)是主要引起应激反应的物质，后期抑制作用的减弱可能是由于阻燃剂的分解；Esterhuizen 等^[61]也研究发现，微塑料在原始状态下对于黑麦草的发芽和生长抑制作用最强，老化后的微塑料抑制作用减弱，从聚合物中释放的化学物质可能是导致观察到的发芽和生长受到抑制的原因。同时，相比于原始微塑料，老化后的微塑料对植物代谢的干扰可能更强，如黄道芬^[63]研究表明，与原始微塑料相比，老化微塑料对菠菜种子萌发和幼苗生长的影响更大，原始微塑料仅诱导了植物的积极的防御反应，但没有显著影响代谢通路，而老化微塑料扰乱了根的氮代谢。

老化微塑料对其他污染物有更强的亲和力，对植物产生更大的危害^[64]。如表 3 所示，老化后微塑料表面的物理化学性质如微观结构、比表面积和表面官能团有所改变，导致微塑料的载体作用增强，对植物的毒害作用可能会增强。如 Mao 等^[50]研究表明，与原始 PS 相比，UV 老化后的 PS 表面出现了更多的小裂纹，表面粗糙程度增加，表面积增大，进而为污染物提供更多的污染物吸附位点，提高微塑料的运载能力，促进污染物的迁移，因此对于植物的毒害作用也就更强。老化也会增强微塑料的 $\pi-\pi$ 作用，使其对有机污染物的吸附能力大于原始微塑料，对植物产生更强的负面影响^[10,65]。

表 3 老化对微塑料吸附性能的影响

Table 3 Effects of aging on adsorption properties of microplastics

种类	污染物	老化方式	老化对吸附的影响	参考文献
Type	Contaminant	Aging method	Effects of aging on adsorption	References
PE	Pb、Cu、Cd、 Ni、Zn	自然老化	老化后的 PE 对与重金属的吸附效率更强	[66]
PS	Pb、Cu、Cd、 Ni、Zn	UV 处理	老化后的 PS 对重金属的吸附效率显著增加，且吸附量随老化时间的延长而增加	[50]
	Cu、Cd	UV 处理	老化 PS 对 Cu、Cd 的吸附能力分别比原始 PS 分别高 101.6%和 185.0%	[67]
HDPE	PAHs	UV 处理/人工风化	老化后的 HDPE 增强了微塑料对 PAHs 的吸附	[10]
PE、PP	Zn	介质阻挡放电(DBD) 等离子体老化处理	老化后的 PE 和 PP 对 Zn 的吸附容量分别提高 22.7%和 14.8%	[68]

6 塑料添加剂的影响

塑料生产过程中为了提高其强度和韧性会额外添加有机/无机添加剂，包括塑化剂、抗氧化剂、阻燃剂、光稳定剂、抗静电剂、热稳定剂和颜料等^[69]，这些添加剂大多数不与聚合物化学结合，在土壤中缓慢释放^[70]，对植物的生长产生负面影响^[58,71-72]。如表 4 所示，塑化剂和阻燃剂在塑料生产过程中使用最多，约有 10%~70%添加塑化剂^[73]，3%~25%添加阻燃剂^[69]，而目前关于微塑料添加剂对植物影响的研究也主要集中在上述两类。

塑化剂的代表型化合物是邻苯二甲酸酯类，属于一类塑料软化剂，可干扰植物生理过程、危害植物健康^[41,57-58]。Gao 等^[74]研究发现，邻苯二甲酸二丁酯(DBP)和邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)胁迫下植物所释放的 ROS 会破坏叶绿体结构，减少叶绿素含量、使光合速

率降低,其中 DBP 的影响高于 DEHP 进入植物体内的塑化剂也会对果实品质有影响,如 DBP 可通过抑制植物的代谢和呼吸作用,显著降低辣椒中的维生素 C 和辣椒素含量以及黄瓜的有机酸、维生素 C、可溶性蛋白和可溶性糖的含量^[57-58]。常青等^[75]研究也发现,高浓度的 DEHP 胁迫激发植物产生更多的细胞活性氧自由基,这些自由基在攻击碱基的同时也可作用于 DNA 脱氧核苷酸骨架或其他细胞成分,通过链式反应,形成更多的活性基团,继续攻击 DNA,导致染色体断裂、丢失和微核等,造成遗传损伤。此外,塑化剂也可以通过改变土壤养分循环过程影响植物生长。Zhu 等^[76]研究发现,添加 DBP 塑化剂的 PVC 可显著影响 NH_4^+ 、 NO_3^- 、脲酶等氮循环参数,且作用效果随塑化剂浓度升高而提升,这可能缘于塑化剂改变了土壤氮循环微生物的群落特征^[77]。

阻燃剂可以增加高分子聚合物如塑料、橡胶、纤维等耐燃性,常见的阻燃剂有溴化阻燃剂、多溴联苯醚、六溴环十二烷和四溴双酚 A。阻燃剂半衰期长,在环境中存在稳定,不易被降解,具有亲脂性和生物累积性,可沿食物链逐级放大,最终对人类健康产生潜在的威胁^[78]。土壤中的阻燃剂会被植物根部吸收^[79],如多溴联苯醚(PBDEs)容易被植物吸收,但进入植物体内的 PBDEs 主要累积在根部不易向上迁移,枝条中的 PBDEs 主要来自从空气中叶面吸收^[80]。植物对阻燃剂的吸收和迁移可能与其疏水性和分子量有关,如与四溴联苯醚(BDE-47)相比,疏水性和分子量更低的三溴联苯醚(BDE-28)更容易在枝条中积累和运移^[81]。

表 4 塑料添加剂的作用、代表性化合物及添加比例

Table 4 The effects of plastic additives, representative of the compound and added in proportion

添加剂种类 Additive type	作用 Effect	代表性化合物 Representative compound	塑料种类 Plastic type	添加比例 Appending proportion
抗氧化剂	延缓或抑制塑料因光、热、辐射以及金属杂质的作用发生的氧化降解	酚类化合物、有机亚磷酸酯	PE、PP	0.05%~3%
阻燃剂	增加高分子聚合物如塑料、橡胶、纤维等的耐燃性	多溴联苯醚、六溴环十二烷、四溴双酚 A 等	PS、PP	12%~18%
塑化剂	减少剪切、提高最终塑料薄膜产品的抗冲击性,改善聚合物薄膜的柔韧性、耐久性和拉伸性,同时降低聚合物分子链的结晶度	邻苯二甲酸酯类、己二酸酯类、亚磷酸酯类	PVC	10%~70%

7 研究展望

关于土壤微塑料污染对植物的影响,未来需关注以下几个问题:

1)目前大多数试验都是微塑料添加试验,田间覆膜试验较少。添加试验使用的微塑料多为合成的光滑颗粒,而土壤中的微塑料形状不规则,对植物的损伤作用更强;此外,添加试验的微塑料浓度总体偏高,上述原因使得添加试验与田间覆膜试验结果存在差异,限制了部分研究结果的实用性。

2)现有土壤微塑料研究结果大多是描述性的,其对植物的影响过程尚不完全清晰。未来还应基于微塑料自身性质,进一步研究其对植物的影响机制,系统了解微塑料粒径、形状、种类、浓度以及老化程度等因素对作用效果的影响。

3)关于微塑料的副产物如塑化剂、阻燃剂等对植物的影响效果和作用机制的关注较少,且对于塑化剂等降解产物对植物影响机制尚不明确,在此方面未来还需深入探索。

4)土壤中微塑料的种类繁多、形态各异,其对植物的影响机制较为复杂,作用效果受到诸多因素的调控,未来在探究微塑料对植物影响时,还需综合考量各种因素协同作用。

参考文献

- [1] GEYER R, JAMBECK J R, LAW K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science Advances*, 2017, 3: e1700782.
- [2] HORTON A A, WALTON A, SPURGEON D J, et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 127-141.
- [3] HUANG Y, LIU Q, JIA W Q, et al. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 114096.
- [4] LIU G, ZHU Z, YANG Y, et al. Sorption behavior and mechanism of hydrophilic organic chemicals to virgin and aged microplastics in freshwater and seawater[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 246: 26-33.
- [5] VERDÚ I, GONZÁLEZ-PLEITER M, LEGANÉS F, et al. Microplastics can act as vector of the biocide triclosan exerting damage to freshwater microalgae[J]. *Chemosphere*, 2021, 266: 129193.
- [6] WANG Y, WANG X J, LI Y, et al. Effects of exposure of polyethylene microplastics to air, water and soil on their adsorption behaviors for copper and tetracycline[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 404: 126412.
- [7] KUMAR A, MISHRA S, PANDEY R, et al. Microplastics in terrestrial ecosystems: Un-ignorable impacts on soil characteristics, nutrient storage and its cycling[J]. *Trac-Trends in Analytical Chemistry*, 2023, 158: 116869.
- [8] SURENDRAN U, JAYAKUMAR M, RAJA P, et al. Microplastics in terrestrial ecosystem: Sources and migration in soil environment[J]. *Chemosphere*, 2023, 318: 137946.
- [9] RILLIG M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46: 6453-6454.
- [10] LI Z X, LI Q F, LI R J, et al. Physiological responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to microplastic pollution[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 30306-30314.
- [11] SUN X D, YUAN X Z, JIA Y B, et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15: 755-760.
- [12] HUFFER T, METZELDER F, SIGMUND G, et al. Polyethylene microplastics influence the transport of organic contaminants in soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 242-247.
- [13] CHEN L Y, HAN L F, FENG Y F, et al. Soil structures and immobilization of typical contaminants in soils in response to diverse microplastics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 438: 129555.
- [14] LIAN J P, WU J N, XIONG H X, et al. Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 385: 121620.
- [15] 邓爱琴, 赵保卫, 朱正钰, 等. 土壤中微塑料的来源与其生态毒理效应研究进展[J]. *环境化学*, 2023, 42(2): 345-357. DENG A Q, ZHAO B W, ZHU Z Y, et al. Research progress on sources and ecotoxicological effects of microplastics in soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(2): 345-357.
- [16] LIU Y Y, GUO R, ZHANG S W, et al. Uptake and l of nano/microplastics by rice seedlings: Evidence from a hydroponic experiment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 421: 126700.
- [17] 李连祯, 周倩, 骆永明, 等. 食用蔬菜能吸收和积累微塑料[J]. *科学通报*, 2019, 64(09): 928-934. LI L Z, ZHOU Q, Yin N, et al. Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant (in Chinese)[J]. *China Science Bulletin*, 2019, 64: 928-934.
- [18] 刘鑫蓓, 董旭晟, 解志红, 等. 土壤中微塑料的生态效应与生物降解[J]. *土壤学报*, 2022, 59(2): 349-363. LIU X B, DONG X S, XIE Z H, et al. Ecological Effects and biodegradation of microplastics in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(2): 349-363.
- [19] WANG Z C, NI J X, ZHANG B W, et al. Simulation study to determine the influence of polyvinyl chloride

- microplastics on the soil water characteristic curve[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(5): 983-989.
- [20] BOSKER T, BOUWMAN L J, BRUN N R, et al. Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant *Lepidium sativum*[J]. *Chemosphere*, 2019, 226: 774-781.
- [21] LI Z X, LI Q F, LI R J, et al. The distribution and impact of polystyrene nanoplastics on cucumber plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 16042-16053.
- [22] JIANG X F, CHEN H, LIAO Y C, et al. Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant *Vicia faba*[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 250: 831-838.
- [23] LI X N, SONG Y, BIAN Y R, et al. Insights into the mechanisms underlying efficient rhizodegradation of PAHs in biochar-amended soil: From microbial communities to soil metabolomics[J]. *Environment International*, 2020, 144: 105995.
- [24] LU L L, TIAN S K, YANG X E, et al. Enhanced root-to-shoot translocation of cadmium in the hyperaccumulating ecotype of *Sedum alfredii*[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2008, 59: 3203-3213.
- [25] ZHANG G S, LIU Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642:12-20.
- [26] PEHLIVAN N, GEDIK K. Particle size-dependent biomolecular footprints of interactive microplastics in maize[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 277: 116772.
- [27] WU J N, LIU W T, ZEB A, et al. Polystyrene microplastic interaction with *Oryza sativa*: toxicity and metabolic mechanism[J]. *Environmental Science-Nano*, 2021, 8: 3699-3710.
- [28] VELZEBOER I, KWADIJK C, KOELMANS A A. Strong sorption of PCBs to nanoplastics, microplastics, carbon nanotubes, and Fullerenes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48: 4869-4876.
- [29] WANG F, ZHANG X, NEAL A L, et al. Evolution of the transport properties of soil aggregates and their relationship with soil organic carbon following land use changes[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215: 105226.
- [30] URBINA M A, CORREA F, ABURTO F, et al. Adsorption of polyethylene microbeads and physiological effects on hydroponic maize[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 1402126.
- [31] Luo Y, Li L, Feng Y, et al. Quantitative tracing of uptake and transport of submicrometre plastics in crop plants using lanthanide chelates as a dual-functional tracer[J]. *Nature Nanotechnology*, 2022, 17, 424-431.
- [32] WANG Z C, NI J X, ZHANG B W, et al. Simulation study to determine the influence of polyvinyl chloride microplastics on the soil water characteristic curve[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(5): 983-989.
- [33] ZHANG G S, ZHANG F X, LI X T, et al. Effects of polyester microfibers on soil physical properties: Perception from a field and a pot experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 670: 1-7.
- [34] LOZANO Y M, RILLIG M C. Effects of microplastic fibers and drought on plant communities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54: 6166-6173.
- [35] LOZANO Y M, LEHNERT T, LINCK L T, et al. Microplastic shape concentration and polymer type affect soil properties and plant biomass[J]. *Frontiers of Plant Science*, 2021, 12: 616645.
- [36] WAN Y, WU C, XUE Q, et al. Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 576-582.
- [37] KALCIKOVA G, GOTVAJN A Z, KLADNIK A, et al. Impact of polyethylene microbeads on the floating freshwater plant duckweed *Lemna minor*[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 230: 1108-1115.
- [38] MATEOS-CARDENAS A, SCOTT D T, SEITMAGANBETOVA G, et al. Polyethylene microplastics adhere to *Lemna minor* (L), yet have no effects on plant growth or feeding by *Gammarus duebeni* (Lillj.)[J]. *Science*

of the Total Environment, 2019, 689: 413-421.

- [39] MACHADO A A D, KLOAS W, ZARFL C, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24: 1405-1416.
- [40] BOOTS B, RUSSELL C W, GREEN D S. Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53: 11496-11506.
- [41] 连加攀, 沈玫玫, 刘维涛. 微塑料对小麦种子发芽及幼苗生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(4): 737-745. LIAN J P, SHEN M M, LIU W T. Effects of microplastics on wheat seed germination and seedling growth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 737-745.
- [42] LIAN Y H, LIU W T, SHI R Y, et al. Effects of polyethylene and polylactic acid microplastics on plant growth and bacterial community in the soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 435: 129057.
- [43] 刘晓红, 刘柳青青, 栗敏, 等. 不同粒径的聚乙烯微塑料对玉米和黄瓜种子发芽和幼苗生长的影响[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(6): 1263-1271. LIU X H, LIU L Q Q, LI M, et al. Effects of polyethylene microplastics with different particle sizes on seed germination and seedling growth of maize and cucumber [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(6): 1263-1271.
- [44] LIU Y H, XIAO M L, SHAHBAZ M, et al. Microplastics in soil can increase nutrient uptake by wheat[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 438: 129547.
- [45] SHI R Y, LIU W T, LIAN Y H, et al. Phytotoxicity of polystyrene, polyethylene and polypropylene microplastics on tomato (*Lycopersicon esculentum* L.)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 317: 115441.
- [46] COLE M, LINDEQUE P, HALSBAND C, et al. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62: 2588-2597.
- [47] ALIMI O S, BUDARZ J F, HERNANDEZ L M, et al. Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition and enhanced contaminant transport[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52: 1704-1724.
- [48] WANG F Y, ZHANG X Q, ZHANG S Q, et al. Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil[J]. *Chemosphere*, 2020, 254: 126791.
- [49] LI Z X, LI Q F, LI R J, et al. Physiological responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to microplastic pollution[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 30306-30314.
- [50] MAO R F, LANG M F, Yu X Q, et al. Aging mechanism of microplastics with UV irradiation and its effects on the adsorption of heavy metals[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 393: 122515.
- [51] 廉宇航, 刘维涛, 史瑞滢, 等. 聚乙烯和聚乳酸微塑料对大豆生长和生理生化及代谢的影响[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2894-2903. LIAN Y H, LIU W T, SHI R Y, et al. Impact of polyethylene and polylactic acid microplastics on growth, physio-biochemistry and metabolism in soybean (*Glycine max*)[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6): 2894-2903.
- [52] MONTES M L I, CYRAS V P, MANFRED L B, et al. Fracture evaluation of plasticized polylactic acid/poly (3-HYDROXYBUTYRATE) blends for commodities replacement in packaging applications[J]. *Polymer Testing*, 2020, 84: 106375.
- [53] HUFFER T, HOFMANN T. Sorption of non-polar organic compounds by micro-sized plastic particles in aqueous solution[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 214: 194-201.
- [54] ROUILLON C, BUSSIÈRE P O, DESNOUX E, et al. Is carbonyl index a quantitative probe to monitor polypropylene photodegradation?[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, 128: 200-208.
- [55] QIN M, CHEN C Y, SONG B, et al. A review of biodegradable plastics to biodegradable microplastics: Another ecological threat to soil environments?[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 312: 127816.

- [56] 张彦, 窦明, 邹磊, 等. 不同微塑料赋存环境对小麦萌发与幼苗生长影响研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(8): 3867-3877. ZHANG Y, DOU M, ZOU L, et al. Effects of different microplastics occurrence environment on seed germination and seedling growth of wheat(*Triticumaestivum* L.)[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(8): 3867-3877.
- [57] YIN R, LIN X G, WANG S G, et al. Effect of DBP/DEHP in vegetable planted soil on the quality of capsicum fruit[J]. *Chemosphere*, 2003, 50: 801-805.
- [58] LIAO C S, YEN J H, WANG Y S. Growth inhibition in Chinese cabbage (*Brassica rapa* var. *chinensis*) growth exposed to di-n-butyl phthalate[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163: 625-631.
- [59] REAY M K, GREENFIELD L M, GRAF M, et al. LDPE and biodegradable PLA-PBAT plastics differentially affect plant-soil nitrogen partitioning and dynamics in a *Hordeum vulgare* mesocosm[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 447: 130825.
- [60] PFLUGMACHER S, TALLINEN S, KIM Y J, et al. Ageing affects microplastic toxicity over time: Effects of aged polycarbonate on germination, growth, and oxidative stress of *Lepidium sativum*[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 790: 148166.
- [61] ESTERHUIZEN M, VIKFORS S, PENTTINEN O P, et al. *Lolium multiflorum* germination and growth affected by virgin, naturally, and artificially aged high-density polyethylene microplastic and leachates[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 964230.
- [62] CHENG Z, SUN H S, SIDHU H, et al. Metabolism of mono-(2-ethylhexyl) phthalate in *Arabidopsis thaliana*: Exploration of metabolic pathways by deuterium labeling[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 114886.
- [63] 黄道芬, 塑料的老化及其对植物的影响评价研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022. HUANG D F, Study on the ageing of plastics and effects evaluation on plants[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022.
- [64] 赵梦婷, 秦艺源, 邱野, 等. 微塑料的环境老化机制及效应研究进展[J]. 环境化学, 2022, 41(8): 1-13. ZHAO M T, QIN Y Y, QIU Y, et al. Environmental aging of microplastic: Processes, mechanisms and implications[J]. *Environmental Chemistry*, 2022, 41(8): 2465-2477.
- [65] TEJEDA-AGREDANO M C, GALLEGO S, VILA J, et al. Influence of the sunflower rhizosphere on the biodegradation of PAHs in soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 57: 830-840.
- [66] FU Q M, TAN X F, YE S J, et al. Mechanism analysis of heavy metal lead captured by natural-aged microplastics[J]. *Chemosphere*, 2021, 270: 128624.
- [67] GAO L, FU D D, ZHAO J J, et al. Microplastics aged in various environmental media exhibited strong sorption to heavy metals in seawater [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 169: 112480.
- [68] 卢伟, 桑稳姣, 李敏, 等. 介质阻挡放电等离子体老化微塑料及对 Zn(II)吸附的影响[J]. 中国环境科学, 2022, 42(8): 3744-3754. LU W, SANG W J, LI M, et al. Dielectric barrier discharge plasma aging of microplastics and its effect on Zn(II) adsorption [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(8): 3744-3754.
- [69] HAHLADAKIS J N, VELIS C A, WEBER R, et al. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 344: 179-199.
- [70] TEUTEN E L, ROWLAND S J, GALLOWAY T S, et al. Potential for plastics to transport hydrophobic contaminants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41: 7759-7764.
- [71] GAO M L, LIU Y, SONG Z G. Effects of polyethylene microplastic on the phytotoxicity of di-n-butyl phthalate in lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *ramosa* Hort)[J]. *Chemosphere*, 2019, 237: 124428.
- [72] STEINMETZ Z, WOLLMANN C, SCHAEFER M, et al. Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation?[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 550:

690-705.

- [73] PRAJAPATI A, NARAYAN VAIDYA A, KUMAR A R. Microplastic properties and their interaction with hydrophobic organic contaminants: a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29: 49490-49512.
- [74] GAO M L, QI Y, DONG Y M, et al. Effects of di-*n*-butyl phthalate and di(2-ethylhexyl) phthalate on the growth, photosynthesis, and chlorophyll fluorescence of wheat seedlings[J]. *Chemosphere*, 2016, 151: 76-83.
- [75] 常青, 郑宇铎, 高娜娜, 等. 邻苯二甲酸二乙基己酯对蚕豆根尖微核及幼苗超氧化物歧化酶的影响[J]. *生态毒理学报*, 2008, 3(6):596-600. CHANG Q, ZHENG Y D, GAO N N, et al. Effects of DEHP on soil dehydrogenase activity and microbial functional diversity[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, 3(6): 596-600.
- [76] ZHU F X, YAN Y Y, DOYLE E, et al. Microplastics altered soil microbiome and nitrogen cycling: The role of phthalate plasticizer[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 427: 127944.
- [77] LU X M, CHEN Y L. Varying characteristics and driving mechanisms of antibiotic resistance genes in farmland soil amended with high-density polyethylene microplastics[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 428: 128196.
- [78] 高玉娟, 谢承劫, 余红, 等. 溴代阻燃剂在土壤中的迁移转化研究进展[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(02): 479-490. GAO Y J, XIE C J, YU H. et al. Research progress on migration and transformation of brominated flame retardants in soil[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(2): 479-490.
- [79] HUANG H, ZHANG S, CHRISTI P. Plant uptake and dissipation of PBDEs in the soils of electronic waste recycling sites[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159: 238-243.
- [80] WANG Y, LUO C, LI J, et al. Influence of plants on the distribution and composition of PBDEs in soils of an e-waste dismantling area: Evidence of the effect of the rhizosphere and selective bioaccumulation[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 186: 104-109.
- [81] SUN J T, LIU J Y, YU M, et al. In vivo metabolism of 2,2',4,4'-tetrabromodiphenylether (BDE-47) in young whole pumpkin plant[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(8): 3701-3707.