

专栏:粮食作物生产安全

微塑料及其复合污染对农作物生长影响的研究进展

郭笑盈^{1a,b}, 王琼^{1a,b}, 豆贝贝^{1a}, 李心棋^{1a}, 王甜甜^{1a}, 师勇强², 王岩^{1a,b}

(1.郑州大学 a.生态与环境学院;b.河南省环境与资源国际联合实验室,郑州 450001;

2.中国农业科学院 棉花研究所,河南 安阳 455000)

摘要:微塑料作为一类新污染物,已被大量研究证实广泛存在于土壤环境中,并对农作物生长及生理性状产生了不良影响,进而威胁粮食安全、危害人类健康。微塑料对农作物生长发育的影响主要包括对农作物种子发芽、幼苗生长和生理指标的毒性效应以及对抗氧化系统的刺激作用。系统总结并梳理了微塑料及其复合污染对农作物生长发育的影响,归纳了微塑料不同性质对农作物产生的毒性效应机制,以期能为农田土壤微塑料污染的生态风险评估及治理防控提供理论依据与科学支撑。

关键词:微塑料;农作物;生长发育;复合污染

中图分类号:X53;X173

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2024)05-0010-09

作为一类新污染物,微塑料(microplastics,MPs)主要指在环境中粒径小于5 mm的微小塑料颗粒^[1-2],部分微塑料粒径可达微米级或纳米级^[3]。微塑料的主要成分包括聚乙烯(polyethylene,PE)、聚苯乙烯(polystyrene,PS)、聚氯乙烯(polyvinyl chloride,PVC)、聚丙烯(polypropylene,PP)、聚酰胺(polyamide,PA)、聚乳酸(polylactic acid,PLA)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate,PET)^[4]等。根据来源,微塑料可分为初生微塑料和次生微塑料两大类,初生微塑料直接来源于生活中含有塑料微珠的日常用品,例如粉底液、洁面膏、肥皂等,次生微塑料则是塑料制品经过光照、高温、风化、水流、化学氧化和生物分解等一系列物理、化学和生物反应而形成的微小塑料碎片或颗粒。微塑料根据其形态结构还可分为颗粒状、碎片状、纤维状和薄膜状。近年来,由于含有微塑料的产品广泛生产和使用以及常规塑料制品大规模生产和大量消费,越来越多的微塑料以及大块塑料经降解形成塑料碎片和颗粒进入环境,对生态系统造成污染。

微塑料在水环境中的积累已引起全世界的广泛关注,而土壤中微塑料污染研究也逐渐成为热点。与水生态环境相比,土壤中微塑料污染情况更加严重。土壤中检测出微塑料的丰度超过海洋中微塑料丰度的4倍^[5]。根据NIZZETTO等^[6]研究,欧洲和北美每年有多达70万t的微塑料进入农田土壤,而近30年中国广泛使用农用塑料薄膜后,农田土壤中存在50~260 kg·ha⁻¹的塑料碎屑^[7]。

收稿日期:2024-01-25;**修回日期:**2024-04-10。

基金项目:国家重点研发计划(2021YFD1700900);河南省科技攻关项目(232102321142);国家自然科学基金(41601524)。

作者简介(通信作者):郭笑盈(1987-),女,河南郑州人,郑州大学副教授,博士,主要从事新型有机污染物环境界面过程, E-mail:xyguo@zzu.edu.cn。

引用本文:郭笑盈,王琼,豆贝贝,等.微塑料及其复合污染对农作物生长影响的研究进展[J].河南师范大学学报(自然科学版),2024,52(5):10-18.(Guo Xiaoying,Wang Qiong,Dou Beibei,et al.Research progress on the impact of microplastics and their combined pollution on crop growth[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2024,52(5):10-18.DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.01.25.0002.)

研究发现,微塑料可通过多种途径进入土壤,包括塑料覆盖、垃圾填埋场倾倒和废水污泥^[8-9]等。微塑料进入土壤后会对动植物和微生物造成影响,最终通过食物链危害到人类健康。近年来的研究表明,土壤微塑料污染对农作物种子发芽率、幼苗生长等均会产生一定程度的影响。当农作物暴露于微塑料环境中,微塑料可聚集在农作物根系表面甚至进入农作物内部(图1)。目前已经研究的农作物主要包括小麦^[10-17]、大豆^[18-21]、玉米^[22-23]、水稻^[24]、蚕豆^[25-26]、绿豆^[27]等农作物,生菜^[28-29]、黄瓜^[23,30-31]、大白菜^[32]、西葫芦^[33]等蔬菜类。研究表明,不同类型、不同粒径、不同质量浓度的微塑料对于农作物的生长发育产生的影响具有显著差异。本文系统梳理总结了土壤微塑料污染对典型农作物造成的影响,深入分析了微塑料对农作物的种子发芽、幼苗生长以及主要生理指标产生的作用,并探讨了微塑料及其复合污染对典型作物产生的复合效应。

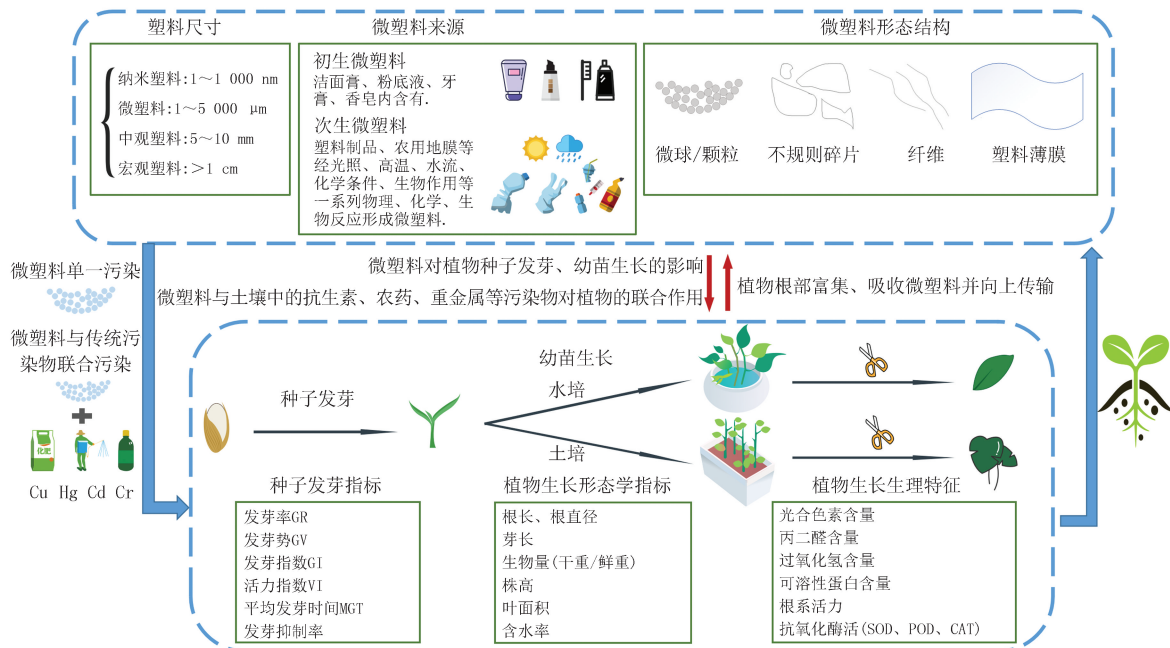


图1 微塑料对农作物的影响机制

Fig. 1 Effect mechanism of microplastics on crops

1 微塑料对典型农作物种子发芽的影响

1.1 微塑料的类型对种子发芽的影响

不同类型微塑料对农作物种子发芽及生长发育影响如表1所示。研究发现,线性低密度聚乙烯(linear low density polyethylene, LLDPE)在质量浓度低于 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时抑制小麦发芽,而质量浓度高于 $1\ 000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 培养条件下则促进小麦种子发芽^[10]。而高密度聚乙烯(high density polyethylene, HDPE)对小麦种子平均发芽产生了显著的抑制作用,并且抑制率高于PP和PLA^[12];常规PE对玉米和黄瓜种子发芽存在显著毒性^[23]。聚苯乙烯纳米塑料(polystyrene nanoplastics, PS-NPs)显著降低了大豆种子的发芽率^[18], PS-NPs($>200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)还显著降低菠菜种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数^[34]。PVC对生菜的发芽率也呈现出了显著的抑制作用^[28]。因此,农田环境中微塑料污染对典型农作物的种子发芽情况均产生了较为显著的抑制作用。

1.2 微塑料的粒径对种子发芽的影响

粒径在纳米尺度的微塑料对农作物种子发芽表现出了显著的负效应。研究表明,粒径为20和100 nm的PS-NPs可以吸附于大豆种皮表面从而降低大豆种子吸收水分的速率进而抑制种子活力^[18]。而粒径在微米尺度的微塑料颗粒则对典型农作物的种子发芽率产生了不同的影响作用。粒径分别为13、58、178 μm的PE对玉米和黄瓜种子发芽表现出了显著毒性,这种毒性随PE粒径增大而逐渐增强^[23]。而粒径范围为106~150 μm和550~800 μm的HDPE在所设的暴露浓度下,对绿豆的发芽率并未表现出抑制作用,在一定质量

分数时($0.1\sim 1\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)甚至表现出了刺激作用^[27].粒径为 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 的 HDPE、PP 和 PLA 均对小麦种子发芽率产生了明显的抑制作用,并且抑制作用分别强于相应材质粒径为 150 和 $4\ 000\ \mu\text{m}$ 微塑料^[12].生菜无论是在水培还是土培条件下,粒径为 $15\ \mu\text{m}$ 的 PVC 对发芽率呈现出了强烈的抑制作用^[28].因此,粒径特征对农作物种子发芽表现出的抑制效应具有差异性特征.

表 1 微塑料对农作物生长的影响

Tab. 1 Effects of microplastics on crops growth

农作物名称 (培养方法)	微塑料种类 (粒径)	微塑料质量浓度 或质量分数	生长发育影响	生理生化功能影响
小麦 ^[10] (水培)	EVA ($1.5\ \mu\text{m}$)、LLDPE ($11.3\ \mu\text{m}$)、PMMA($1.4\ \mu\text{m}$)	0、10、100、 500、 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	3 种微塑料联合暴露时,低中质量浓度 ($<500\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)抑制小麦发芽.LLDPE 为 $10\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时明显抑制小麦根长.	
小麦 ^[11] (水培)	PS($100\ \text{nm}$ 、 $5\ \mu\text{m}$)	0、10、20、 50、100、 $200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,小麦根、茎受到显著抑制.	
小麦 ^[11] (土培)	PS($100\ \text{nm}$ 、 $5\ \mu\text{m}$)	0、1、10、50、 $100\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$100\ \text{nm}$ 下随质量分数增大,根长先降后升、株 高先升后降; $5\ \mu\text{m}$ 下,根长和株高均先降后升.	随 PS 含量的增加,光合色素、 可溶性蛋白含量先升后降, SOD 活性下降、CAT 先降后升.
小麦 ^[12] (土培)	PP、HDPE、PLA (150 、 $1\ 000$ 、 $4\ 000\ \mu\text{m}$)	0、0.1、0.5、 $1\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	平均发芽抑制率由大到小为 HDPE、PLA、 PP,中粒径($1\ 000\ \mu\text{m}$)和中质量分数下 ($0.5\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)抑制作用最大.幼苗生长抑制 率由大到小为:PLA、HDPE、PP.	
小麦 ^[13] (水培)	PS[(87.8 ± 8.6) nm]	0、0.01、 0.1、1.0、 $10\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	所有质量浓度均显著促进小麦的根伸长, 0.1 和 $1.0\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ PS 显著增加小麦地上部 和根生物量.	PS 显著增加叶绿素含量.PS 增强了净光合作用、气孔导 度、蒸腾作用,且在 $0\sim 0.1\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时随质量浓度升高而增加.
小麦 ^[17] (土培)	PS($5\ \mu\text{m}$)、PS($70\ \text{nm}$)、 DMF(—)	0、10、 $100\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (PS) 0、1%(DMF)	仅有 DMF 时,株高降低了 26%.PS 和 DMF 均存在时,株高与 PS 用量成正比.	
大豆 ^[18] (水培)	PS-NPs(20 、 $100\ \text{nm}$)	0、50、100、 200、500、 $1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	两种粒径 PS 对幼苗生长的抑制作用在 $200\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时达到最大.	
大豆 ^[19] (土培)	PVC($<15\ \mu\text{m}$)	0.054(对照)、 0.54、1.62、 $2.70\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	出苗后第 7 天所有质量分数下处理的叶面 积显著降低;第 14 天所有处理的株高均显 著降低.	出苗第 21 天最高质量分数下 的根系活力和最低质量分数 下的叶绿素含量显著降低; PVC 含量升高,抗氧化酶活 升高.
大豆 ^[21] (土培)	PE($20\sim 50\ \mu\text{m}$)、PLA ($20\sim 60\ \mu\text{m}$)	0、 0.1%、 1%	0.1% PE 和 1% PLA 显著增加芽长;0.1% PLA 显著减少根长;0.1% PE 显著增加根 鲜质量.	0.1% PLA 减少叶绿素含量; PE、0.1% PLA 显著降低 POD 活性;所有处理显著提 高 CAT 活性;PLA 减少可溶 性蛋白和 H_2O_2 含量.
玉米 ^[22] (土培)	PP (< 20 、 $250\sim 500$ 、 $>500\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$)	0、0.5%、 1%、2%	最小粒径和中粒径(1%、2% PP)减少地上 生物量和株高,根表面积和根体积随质量分 数的增加先增后减.	

续表

农作物名称 (培养方法)	微塑料种类 (粒径)	微塑料质量浓度 或质量分数	生长发育影响	生理生化功能影响
玉米、 黄瓜 ^[23] (土培)	PE(13,58,178 μm)	0,0.1%、 0.5%、1%、 2%	PE对玉米和黄瓜种子发芽和幼苗生长存在显著毒性,随粒径和质量分数的增大而增强.	
蚕豆 ^[25] (土培)	PE(50~100 μm)	0,10,100、 500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下根尖相对伸长率、株高、根长和生物量明显升高,而100、500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下则显著降低.	净光合速率呈低浓度促进,中高浓度抑制;PS II实际光化学效率呈中高质量分数抑制.
蚕豆 ^[26] (水培)	PS(5 μm 、100 nm)	0,10,50、 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	5 μm PS显著抑制蚕豆生长,而100 nm PS仅在最高质量浓度(100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)下明显抑制.	5 μm PS显著增加根尖SOD和POD活性,显著降低CAT活性和生物量;100 nm PS在最高质量浓度下抑制蚕豆生长.
绿豆 ^[27] (砂培)	HDPE(550~880、106~ 150,23~38 μm)	0,0.1、 1,10、 100 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	小粒径(23~38 μm)的HDPE对幼苗生长表现出明显的毒性效应.	
生菜 ^[28] (水培、 土培)	PVC(150,15 μm)	水培0,1%、 10%;土培0、 1%、10%	小粒径高质量分数(10%)的PVC对发芽率、根长、芽长和鲜质量的抑制作用最显著.	小粒径高质量分数(10%)PVC严重抑制生菜的叶绿素含量.
黄瓜 ^[30] (土培)	PVC(100 nm~18 μm 、 >18~150 μm)	0,1%	小粒径PVC显著减少了黄瓜总根长.	大粒径PVC显著增加根系活力;两种粒径PVC均显著增强SOD活性,降低类胡萝卜素含量.
黄瓜 ^[31] (水培)	PS(100,300,500、 700 nm)	50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	300 nm的PS显著降低黄瓜的生物量.	100 nm PS显著降低叶片的荧光参数、叶绿素和可溶性糖含量,700 nm PS显著增加叶片中丙二醛、脯氨酸和 H_2O_2 的含量.
大白菜 ^[32] (水培)	PS(50~80 nm)、 PS-NH ₂ (55~90 nm)	0,1,10、 100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	PS和PS-NH ₂ 对胚根的伸长没有明显影响.	PS-NH ₂ 显著降低Chl a、Chl b和类胡萝卜素含量,PS在最低质量浓度下显著降低Chl a含量.
西葫芦 ^[33] (土培)	PP、PE、PVC、PET(40~ 50 μm)	0,0.02%、 0.1%、 0.2%	PVC最大程度降低了叶面积,PP和PVC显著减少了生物量.	PVC和PE显著降低叶片的光合效率和叶绿素含量,抑制强度呈剂量依赖型增长.

注:—表示文章中未提及.

1.3 微塑料的用量对种子发芽的影响

研究表明^[10,12],中高浓度的微塑料对典型农作物产生了较强的抑制作用,而低浓度微塑料则对部分农作物的种子发芽率起到了一定的促进作用.针对3种微塑料(乙烯-乙酸乙酯共聚物(EVA)、LLDPE和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA))对小麦生长进行研究,结果表明,EVA、LLDPE和PMMA单独处理均对小麦种子的发芽势、发芽指数和活力指数的影响表现为低质量浓度(10和100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)促进,中质量浓度(500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)抑制,高质量浓度(1 000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)同样产生抑制作用但相较中质量浓度有所降低;当3种微塑料联合暴露时,低中质量浓度微塑料(<500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)对小麦种子发芽表现出较强的抑制作用(抑制率为2.86%~20%)^[10].PP、HDPE和PLA在中质量浓度(500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时对小麦种子发芽的抑制作用最大,而低(10 $\text{mg} \cdot$

L^{-1})或高($1\ 000\ mg \cdot L^{-1}$)质量浓度时对小麦种子发芽的抑制作用有所减弱^[12].

2 微塑料对农作物幼苗生长的影响

2.1 微塑料对农作物根系的影响

研究报道,0.1% PE 显著增加了大豆的根系鲜质量^[21],低质量分数 PE($10\ mg \cdot kg^{-1}$)对蚕豆根系的根尖相对伸长率和根长也产生了显著的促进作用,而高质量分数下(100 和 $500\ mg \cdot kg^{-1}$)则呈显著抑制作用^[25].PS 在低质量浓度($<10\ mg \cdot L^{-1}$)时也显著促进小麦的根长^[13],而在高质量浓度($200\ mg \cdot L^{-1}$)时对小麦的根具有抑制作用^[11].HDPE 对绿豆的根长和根鲜质量具有抑制作用^[27].PP 对玉米根表面积和根体积的影响表现为随浓度的增加先增后减,对根系则表现为小粒径($<20\ \mu m$)抑制、大粒径($500\sim 1\ 000\ \mu m$)促进^[22].PS 和 PS-NH₂(氨基改性的 PS)对白菜胚根的伸长没有明显影响^[32].PVC 能显著抑制大豆的根鲜质量^[19],对生菜^[28]和黄瓜^[30]的根长也具有显著的抑制作用.0.1% PLA 对大豆根长具有显著的抑制作用^[21].总体上,较低浓度的微塑料能够对农作物根系生长产生一定的促进作用,而高浓度则通常表现出抑制作用.

2.2 微塑料对农作物株高和叶面积的影响

研究表明,PE 对蚕豆株高的作用表现为低质量浓度促进,高质量浓度抑制^[25].0.1% PE 能显著增加大豆芽长^[21].随着粒径的减小和质量分数的增加,微塑料对玉米株高的抑制呈显著递增趋势^[22].粒径 $100\ nm$ 的 PS 对小麦株高的抑制效果表现为随质量浓度升高时先升后降,而粒径小于 $5\ \mu m$ 的 PS 随质量浓度升高小麦株高则先降后升^[11].二甲基甲酰胺(dimethylacetamide,DMF)对小麦的株高具有抑制作用,而当 DMF 与 PS 共存时,小麦株高和 PS 质量分数呈正相关,表明 PS 的存在显著降低了 DMF 对小麦株高的抑制作用^[17].小麦暴露于中、低质量分数的 PS 中,其茎长先降低后升高,而在高质量分数下其茎长则被显著抑制^[11].PVC 对大豆株高、大豆幼苗叶面积以及西葫芦的叶面积均表现出显著抑制作用^[19,33].而 1% PLA 对大豆芽长则表现出了促进作用^[21].由聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯(poly(butylene adipate-co-terephthalate),PBAT)和 PLA 组成的可生物降解微塑料尽管对大豆叶面积、茎径具有负面影响,但对大豆株高具有促进作用^[35].

2.3 微塑料对农作物生物量的影响

研究结果显示,PE 在低质量浓度下对蚕豆的生物量表现出促进作用,而在高质量浓度时表现为抑制作用^[25].PP 可显著减少玉米的地上生物量^[22]和西葫芦的生物量^[33].小粒径的纳米级 PS($<100\ nm$)可以显著促进小麦的生物量^[13],而微米级 PS($5\ \mu m$)对蚕豆^[26]和黄瓜的生物量具有显著抑制作用^[31].PVC 对生菜的生物量表现为小粒径($15\ \mu m$)抑制,大粒径($150\ \mu m$)促进^[28].PVC 对西葫芦的生物量则表现出显著的抑制作用^[33].由 PBAT 和 PLA 组成的可生物降解微塑料对大豆的生物量具有负向影响^[35].

3 微塑料对农作物生理生化功能的影响

3.1 微塑料对农作物光合性能的影响

不同类型的微塑料对农作物生理生化功能的影响见表 1.对于光合色素,有研究表明 PE 显著降低了西葫芦叶片的光合效率和叶绿素含量,抑制强度呈剂量依赖型增长^[33].蚕豆在土培条件下,净光合速率受 PE 的影响表现为低质量浓度促进,中高质量浓度抑制^[25].小麦在土培条件下,在 $0\sim 50\ mg \cdot kg^{-1}$ 条件下随着 PS 质量分数升高光合色素的含量升高^[11,13].黄瓜在水培条件下, $100\ nm$ PS 显著降低了叶片的叶绿素含量^[31].大白菜在水培条件下,PS-NH₂ 显著降低叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)和类胡萝卜素含量,PS 在最低质量浓度下显著降低 Chl a 含量^[32].对于光合速率,PS 增强了小麦在水培条件下的净光合作用、气孔导度、蒸腾作用,且在 $0\sim 0.1\ mg \cdot L^{-1}$ 范围内随 PS 质量浓度升高而增强^[13].生菜在土培条件下,小粒径($15\ \mu m$)高含量(10%,质量分数)PVC 严重了抑制生菜的叶绿素含量^[28].黄瓜在土培条件下, $100\ nm\sim 18\ \mu m$ 、 $18\sim 150\ \mu m$ 两种粒径 PVC 均降低了类胡萝卜素含量^[30].PVC 对土培西葫芦的叶片的光合效率和叶绿素含量具有显著抑制作用,抑制强度呈剂量依赖型增长^[33].大豆在土培条件下,0.1% PLA 会减少叶绿素含量^[21].

3.2 微塑料对农作物抗氧化性能的影响

研究发现,PE和PLA均显著降低了大豆中过氧化物酶(peroxidase,POD)的活性,但对过氧化氢酶(catalase,CAT)活性具有显著提高作用^[21].小麦超氧化物歧化酶(superoxide dismutase,SOD)的活性随着PS质量浓度的增加而下降,而CAT活性则随着PS质量浓度增加呈现先降低后升高的趋势^[11].粒径为5 μm 的PS可以显著增加蚕豆根尖SOD和POD活性,显著降低CAT活性^[26].单一PS-NPs胁迫($>400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)能显著抑制菠菜幼苗SOD的活性,而对POD的活性表现为“低促高抑”的作用规律^[34].当PVC的含量升高时,大豆的抗氧化酶活也升高^[19].PVC对黄瓜SOD活性同样具有显著增强作用^[30].

3.3 微塑料对农作物其他功能的影响

有研究表明,PS对小麦可溶性蛋白的影响表现为随PS含量的升高,可溶性蛋白含量先升后降^[11].100 nm PS对黄瓜叶片的可溶性糖含量具有显著抑制作用,700 nm PS显著增加黄瓜叶片中丙二醛、脯氨酸和 H_2O_2 的含量^[31].当PS-NPs质量浓度大于 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时对菠菜幼苗可溶性蛋白的含量具有明显增加的作用^[34].PVC对大豆根系活力具有抑制作用^[19].大粒径(100 nm~50 μm)PVC可以显著增加黄瓜的根系活力^[30].PLA对大豆可溶性蛋白和 H_2O_2 含量表现为负作用^[21].

4 微塑料复合污染对农作物的影响

4.1 微塑料与重金属复合污染对农作物的影响

微塑料与重金属共同作用于农作物生长时,产生了不同影响.研究发现,粒径小于150 μm 的PVC能够缓解镉污染对黄瓜根系活力的影响,粒径小于18 μm 的PVC可以显著改善镉污染对黄瓜叶片类胡萝卜素的影响,粒径为18~150 μm 的PVC可以改善镉污染对黄瓜叶片丙二醛的影响^[30].MPs和Cd在低质量浓度时对种子萌发和生长特性表现出协同作用^[36].此外,研究发现高质量浓度MPs与高质量浓度Cd复合污染对水稻种子发芽与根系生长并未产生显著影响,而单一MPs或Cd污染时均对种子发芽有负面影响^[24].此外,还有研究表明,与单一污染处理相比,MPs-Cd复合污染对小麦种子发芽势、活力指数、芽长和生物量的影响基本表现为拮抗作用^[37],即两者复合在一定程度上降低了单一污染物的毒性,表明微塑料和重金属复合污染可能会比单独作用对农作物的毒害作用减弱.

与此相反,WANG等^[38]则研究发现,与微塑料单独存在相比,微塑料PE和PLA与Cd共存时使玉米的生物量显著降低,高质量浓度PLA与Cd共存时,显著降低玉米叶片的光合色素含量.这表明微塑料与Cd复合污染会产生协同作用,加重污染.顾馨悦等^[39]的研究还发现,原始和老化的微塑料与重金属联合会农作物产生不同的作用,原始的PVC微塑料($5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 水培质量浓度和 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土培质量分数)不影响Cd对小麦的毒性效应,而老化后的PVC微塑料与低质量浓度Cd会发生对小麦根生长的协同抑制作用,老化微塑料与Cd的协同效应可能是由于老化微塑料可以提高Cd在小麦体内的生物富集量,从而提高了Cd的生物可利用性.DONG等^[40]研究发现两种尺寸的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)(即PMMA纳米塑料和PMMA微塑料)和As(V)联合处理下油菜的发芽指数、生物量、根长和芽长均低于As(V)或PMMANPs单一处理.DONG等^[41]的研究表明聚四氟乙烯聚四氟乙烯(PTFE)和PS会加剧大米中As(III)的毒性.综上所述,重金属和微塑料二者共同作用的结果也可能是加重对农作物的影响,微塑料与重金属复合污染对不同类型植物的影响结果呈多样性.

4.2 微塑料与有机物复合污染对植物的影响

土壤体系中除了微塑料与重金属的复合污染外,还存在微塑料与有机物的复合污染.有研究发现微塑料与有机物联合能够提升植物的抗氧化作用,例如YU等^[42]发现PS和草甘膦通过增加抗氧化酶(包括SOD、抗坏血酸过氧化物酶(ascorbateperoxidase,APS)和CAT)活性,来激活植物的抗氧化防御系统,以应对氧化应激.但此研究也发现,微塑料与草甘膦联合作用,可能会影响植物的生长,例如当槐叶萍暴露于高质量浓度的草甘膦($15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和微塑料($25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)时,观察到植物黄叶百分比增加.此外,常士毫^[28]研究发现PVC与抗生素环丙沙星CIP有协同作用.在PVC与CIP复合污染处理条件下,生菜种子的发芽率、根长与芽长都低于各单一污染处理;小粒径高含量的PVC与高质量浓度CIP处理的毒害最为严重,此处理下生菜

的根长、芽长均显著低于对照处理.TIAN等^[43]研究发现,与微塑料的结合减轻了芘在水稻幼苗中的植物毒性,原因是微塑料对芘的吸附减弱了芘从细胞壁转移至细胞器。

5 结论与展望

土壤环境中存在的大量微塑料会对土壤农作物产生各种影响,进而通过农作物危害到人类健康,因此微塑料对于土壤农作物的生态毒性等不良影响不容小觑.本文通过对相关研究进行系统性梳理,分析了不同化学组成、粒径、用量微塑料对农作物的种子发芽、植株生长以及生理指标的影响作用,并综述了微塑料与重金属及有机污染物复合污染对典型农作物毒害效应.未来对于微塑料的相关研究可从以下方面展开:

(1)目前已有的关于微塑料对农作物影响的研究大部分是基于实验室水培、土培或砂培条件,选用了人工配置的简单化营养液,且试验周期较短,然而真实的土壤环境更为复杂,因此后续研究可针对真实土壤环境开展较长期的大规模暴露实验.

(2)可针对微塑料化学组成、粒径、用量等多个因素之间对于农作物种子发芽、植株生长等方面产生的交互作用展开研究.

(3)加强微塑料与其他新污染物比如抗生素、增塑剂等复合污染的研究,更加全面探究多种新污染物对于土壤生态系统的联合影响机制.

(4)目前关于植物是否能富集和吸收微塑料以及吸收的机制等相关研究还不够全面,未来可基于此进行深入研究,以期通过植物治理土壤微塑料污染提供一种有效思路.

参 考 文 献

- [1] LAW K L, THOMPSON R C. Microplastics in the seas[J]. *Science*, 2014, 345(6193): 144-145.
- [2] GEYER R, JAMBECK J R, LAW K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science Advances*, 2017, 3(7): e1700782.
- [3] 吴为, 张敏, 缪明, 等. 土壤环境中微塑料的发生、来源及影响研究进展[J]. *湖南生态科学学报*, 2021, 8(3): 90-98.
WU W, ZHANG M, MIAO M, et al. Microplastics in soil environment: occurrences, sources and impact[J]. *Journal of Hunan Ecological Science*, 2021, 8(3): 90-98.
- [4] ANDRADY A L. Microplastics in the marine environment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(8): 1596-1605.
- [5] 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]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 586: 127-141.
- [6] NIZZETTO L, FUTTER M, LANGAAS S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(20): 10777-10779.
- [7] LIU E K, HE W Q, YAN C R. 'White revolution' to 'white pollution'—agricultural plastic film mulch in China[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(9): 091001.
- [8] 汤庆峰, 高峡, 李琴梅, 等. 农田土壤微塑料污染研究现状与问题思考[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(15): 72-78.
TANG Q F, GAO X, LI Q M, et al. Research Status and Existing problems of Microplastic Pollution in Farmland Soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(15): 72-78.
- [9] 李瑞静, 赵亚菲, 耿佳慧, 等. 农田土壤微塑料污染及其对植物的影响研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(6): 681-688.
LI R J, ZHAO Y F, GENG J H, et al. Research progress of microplastics pollution and its effect on plant ecosystem in farmland[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(6): 681-688.
- [10] 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.
- [11] 廖苑辰, 娜依孜古丽·加合甫别克, 李梅, 等. 微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(10): 4661-4667.
LIAO Y C, NAZYGUL J, LI M, et al. Effects of microplastics on the growth, physiology, and biochemical characteristics of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10): 4661-4667.
- [12] 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 (*Triticum aestivum* L.) [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(8): 3867-3877.
- [13] 连加攀. 聚苯乙烯纳米塑料 (PSNPs) 对小麦单一及镉联合毒性研究[D]. 天津: 南开大学, 2020.
LIAN J P. Single and combined toxicity of polystyrene nanoplastics (PSNPs) and cadmium to wheat (*Triticum aestivum* L.) [D]. Tianjin:

- Nankai University,2020.
- [14] TAYLOR S E,PEARCE C I,SANGUINET K A,et al.Polystyrene nano-and microplastic accumulation at Arabidopsis and wheat root cap cells,but no evidence for uptake into roots[J].Environmental Science:Nano,2020,7(7):1942-1953.
- [15] QI Y L,OSSOWICKI A,YANG X M,et al.Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties[J].Journal of Hazardous Materials,2020,387:121711.
- [16] QI Y L,YANG X M,PELAEZ A M,et al.Macro-and micro-plastics in soil-plant system:effects of plastic mulch film residues on wheat (*Triticum aestivum*)growth[J].The Science of the Total Environment,2018,645:1048-1056.
- [17] REN X W,WANG L,TANG J C,et al.Combined effects of degradable film fragments and micro/nanoplastics on growth of wheat seedling and rhizosphere microbes[J].Environmental Pollution,2022,294:118516.
- [18] 吴佳妮,杨天志,连加攀,等.聚苯乙烯纳米塑料(PSNPs)对大豆(*Glycine max*)种子发芽和幼苗生长的影响[J].环境科学学报,2020,40(12):4581-4589.
- WU J N,YANG T Z,LIAN J P,et al.Effects of polystyrene nanoplastics(PSNPs)on seed germination and seedling growth of soybean (*Glycine max*)[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2020,40(12):4581-4589.
- [19] 安菁,刘欢语,郑艳,等.土壤微塑料残留对大豆幼苗生长及生理生化特征的影响[J].四川农业大学学报,2021,39(1):41-46.
- AN J,LIU H Y,ZHENG Y,et al.Effects of soil microplastics residue on soybean seedlings growth and the physiological and biochemical characteristics[J].Journal of Sichuan Agricultural University,2021,39(1):41-46.
- [20] ASLI S,NEUMANN P M.Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport[J].Plant,Cell & Environment,2009,32(5):577-584.
- [21] 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.
- [22] 吾兰·恩特马克.外源添加微塑料对土壤性质和玉米生长的影响研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2021.
- WULAN E.Study on the effect of adding microplastics on soil properties and corn growth[D].Yangling:Northwest A&F University, 2021.
- [23] 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.
- [24] 王泽正,杨亮,李婕,等.微塑料和镉及其复合对水稻种子萌发的影响[J].农业环境科学学报,2021,40(1):44-53.
- WANG Z Z,YANG L,LI J,et al.Single and combined effects of microplastics and cadmium on the germination characteristics of rice seeds[J].Journal of Agro-Environment Science,2021,40(1):44-53.
- [25] 叶子琪,蒋小峰,汤其阳,等.聚乙烯微塑料对蚕豆幼苗的毒性效应[J].南京大学学报(自然科学),2021,57(3):385-392.
- YE Z Q,JIANG X F,TANG Q Y,et al.Toxic effects of polyethylene microplastics on higher plant *Vicia faba*[J].Journal of Nanjing University(Natural Science),2021,57(3):385-392.
- [26] 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.
- [27] 刘莹莹,张旗,崔文智,等.聚乙烯微塑料对绿豆发芽的毒性研究[J].环境与发展,2019,31(5):123-125.
- LIU Y Y,ZHANG Q,CUI W Z,et al.Toxicity of polyethylene microplastics to seed germination of mung bean[J].Environment and Development,2019,31(5):123-125.
- [28] 常士毫.微塑料与环丙沙星单一和复合污染对生菜生长的影响[D].佛山:佛山科学技术学院,2020.
- CHANG S H.Effects of microplastic and ciprofloxacin single and compound contamination on lettuce growth[D].Foshan:Foshan University,2020.
- [29] 李连祯,周倩,尹娜,等.食用蔬菜能吸收和积累微塑料[J].科学通报,2019,64(9):928-934.
- LI L Z,ZHOU Q,YIN N,et al.Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant[J].Chinese Science Bulletin,2019,64(9): 928-934.
- [30] 李贞霞,李庆飞,李瑞静,等.黄瓜幼苗对微塑料和镉污染的生理响应[J].农业环境科学学报,2020,39(5):973-981.
- LI Z X,LI Q F,LI R J,et al.Physiological response of cucumber seedlings to microplastics and cadmium[J].Journal of Agro-Environment Science,2020,39(5):973-981.
- [31] LI Z X,LI R J,LI Q F,et al.Physiological response of cucumber (*Cucumis sativus* L.)leaves to polystyrene nanoplastics pollution[J].Chemosphere,2020,255:127041.
- [32] ZHANG H,LIANG J,LUO Y,et al.Comparative effects of polystyrene nanoplastics with different surface charge on seedling establishment of Chinese cabbage(*Brassica rapa* L.)[J].Chemosphere,2022,292:133403.
- [33] COLZI I,RENNAL,BIANCHI E,et al.Impact of microplastics on growth,photosynthesis and essential elements in *Cucurbita pepo* L.

- [J].Journal of Hazardous Materials,2022,423(Pt B):127238.
- [34] 郭琳琳,刘盼,王晶晶,等.纳米塑料与盐胁迫对菠菜种子和幼苗的毒性效应[J].农业环境科学学报,2023,42(6):1257-1266.
GUO L L,LIU P,WANG J J,et al.Toxicity of the combination of nanoplastics and salt stress on seeds and seedlings of *Spinacia oleracea* L[J].Journal of Agro-Environment Science,2023,42(6):1257-1266.
- [35] LI B T,HUANG S,WANG H M,et al.Effects of plastic particles on germination and growth of soybean(*Glycine max*):a pot experiment under field condition[J].Environmental Pollution,2021,272:116418.
- [36] 张志琴.微塑料-重金属复合污染对土壤微环境及植物生长的影响研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2023.
ZHANG Z Q.Effects of microplastics-heavy metal combined pollution on soil microenvironment and plant growth[D].Yangling:North-west A&F University,2023.
- [37] 王晓晶,杨毅哲,曹阳,等.微塑料与镉及其复合对小麦种子发芽的影响[J].农业环境科学学报,2023,42(2):263-273.
WANG X J,YANG Y Z,CAO Y,et al.Effect of microplastics,cadmium,and their combination on wheat seed germination[J].Journal of Agro-Environment Science,2023,42(2):263-273.
- [38] 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.
- [39] 顾馨悦,徐修媛,咸泽禹,等.老化聚氯乙烯微塑料与镉对小麦的联合毒性[J].环境化学,2021,40(9):2633-2639.
GU X Y,XU X Y,XIAN Z Y,et al.Joint toxicity of aged polyvinyl chloride microplastics and cadmium to the wheat plant[J].Environmental Chemistry,2021,40(9):2633-2639.
- [40] DONG R Y,LIU R L,XU Y M,et al.Single and joint toxicity of polymethyl methacrylate microplastics and As(V) on rapeseed(*Brassia campestris* L.)[J].Chemosphere,2022,291(Pt 3):133066.
- [41] DONG Y M,GAO M L,SONG Z G,et al.Microplastic particles increase arsenic toxicity to rice seedlings[J].Environmental Pollution,2020,259:113892.
- [42] YU H W,PENG J F,CAO X F,et al.Effects of microplastics and glyphosate on growth rate,morphological plasticity,photosynthesis,and oxidative stress in the aquatic species *Salvinia cucullata* [J].Environmental Pollution,2021,279:116900.
- [43] TIAN L L,MA L Y,CHEN X L,et al.Insights into the accumulation,distribution and toxicity of pyrene associated with microplastics in rice(*Oryza sativa* L.)seedlings[J].Chemosphere,2023,311:136988.

Research progress on the impact of microplastics and their combined pollution on crop growth

Guo Xiaoying^{1a,b}, Wang Qiong^{1a,b}, Dou Beibei^{1a}, Li Xinqi^{1a},
Wang Tiantian^{1a}, Shi Yongqiang², Wang Yan^{1a,b}

(1. a. College of Ecology and Environment; b. International Joint Laboratory of Environment and Resources, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Institute of Cotton Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Anyang 455000, China)

Abstract: As a new type of pollutant, microplastics widely present in soil environment, causing adverse effects on crops, posing a threat to food security and endangering human health. The effects of microplastics on crop growth and development mainly include toxic effects on seed germination, seedling growth, and physiological indicators, as well as simulative effects on the antioxidant system. This paper systematically analyzed the impact of microplastics and their combined pollution with other substances on crop growth and development, providing scientific bases and theoretical references for risk assessment and control of microplastics pollution in farmland soil.

Keywords: microplastics; crops; growth and development; combined pollution

[责任编辑 赵晓华 陈留院]