

聚苯乙烯微塑料在玉米种子萌发与幼苗生长过程中的吸收转运特征及毒害机制*

杨昌浪, 惠亚云, 李文杉, 王鹏洋, 赵泽瑛, 熊友才[†]

(兰州大学生态学院, 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 为探究聚苯乙烯微塑料 (PS-MPs) 在梯度浓度与多粒径谱系中的内吞转运行为及生理毒性机制, 以玉米为模式植物, 设计种子萌发与水培胁迫实验, 外源投加荧光标记 PS-MPs, 系统评估其对种子萌发和幼苗生长发育的抑制作用, 并阐明其毒性作用机制。结果表明, 玉米种子萌发及幼苗生长进程受微塑料胁迫的强度, 呈现显著的浓度梯度效应与粒径依赖性规律。在种子萌发期, 通过激光共聚焦电子显微镜观测发现, PS-MPs 荧光微球主要聚集在胚根的根毛区域。此外, 部分微球穿透了根表皮进入皮层组织, 甚至抵达了负责水分和养分运输的木质部导管。这种在关键输导组织中的存在, 干扰了种子的萌发过程并引发了氧化损伤。在幼苗时期, 低浓度 (20 mg·L⁻¹) 的 PS-MPs 荧光微球促进发芽, 而中高浓度 (50 和 100 mg·L⁻¹) 则抑制发芽。本研究证实了微塑料可被玉米吸收并向地上部转运, 初步揭示了微塑料在玉米中的吸收和转移特征, 进一步阐明了微塑料对玉米的毒害机理, 为深入了解微塑料在植物中的迁移转化规律提供了重要的实验基础, 也为评估其对农业生态和食品安全的影响提供了科学依据。

关键词: 微塑料; 荧光标记; 浓度/粒径效应; 吸收转运

中图分类号: S154.4 **文献标志码:** A

Characteristics and Mechanism of Polystyrene Microplastic Uptake and Transport in Maize Seeds and Seedlings

YANG Changlang, HUI Yayun, LI Wenshan, WANG Pengyang, ZHAO Zeying, Xiong Youcai[†]

(State Key Laboratory of Herbage Innovation and Grassland Agro-ecosystems, College of Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to investigate the absorption and transport characteristics and mechanism of microplastics of different concentrations and particle sizes in maize seeds and seedlings. 【Method】 Maize was used as the test material and fluorescent-labelled polystyrene microplastics (PS-MPs) microspheres were added to the seeds during germination and to the seedlings during hydroponic exposure. This platform quantified growth-suppressive impacts of the test compound on germinative capacity and early seedling establishment, and clarified its mechanism of action. 【Result】 The effects of microplastics on the germination of maize seeds and the growth of seedlings exhibited significant dependence on concentration and particle size. At the seed germination stage, when examined using laser confocal electron microscopy, it was found that PS-MPs fluorescent microspheres were enriched at the position of the root hairs on the embryonic root. Furthermore, some of the microspheres penetrated the root epidermis and entered the cortical tissue, ultimately reaching the xylem vessels that are responsible for transporting water and nutrients. Their presence in these critical conductive tissues disrupted the seed germination

*国家重点研发计划项目 (2024YFC3713900) 资助 Supported by the National Key Research and Development Programme of China (No. 2024YFC3713900)

通讯作者 Corresponding author, E-mail: xiongy@lzu.edu.cn

作者: 杨昌浪 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向是农田土壤中微塑料的降解。 E-mail: yclzu150@163.com

收稿日期: 2025-08-15; 收到修改稿日期: 2025-11-10; 网络首发日期 (www.cnki.net):

process and induced oxidative damage. This experiment demonstrated that low concentrations ($20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) of fluorescent PS-MPs promoted germination, whereas medium-to-high concentrations (50 and $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) inhibited it. 【Conclusion】 This study verified the internalization and shootward translocation of microplastics in maize plants and provided preliminary insights into the absorption and translocation characteristics of microplastics within maize plants. It also shed light on the toxic mechanisms of microplastics on maize, providing a vital experimental basis for understanding the migration and transformation patterns of microplastics within plants, thus providing scientific evidence with which to assess the impact of microplastics on agricultural ecosystems and food safety.

Key words: Microplastics; Fluorescent labelling; Concentration/particle size effect; Absorption translocation

近年来,植物与微塑料(MPs)的相互作用机制成为环境科学领域的研究热点,在“十四五”污染防治中备受关注^[1]。尤其在植物对微塑料的吸收途径及土壤微塑料对氮素循环的调控作用方面取得显著进展。研究表明,植物可通过叶片^[2]和根系吸收微塑料^[3-4],且微塑料的类型、粒径等特性通过改变土壤氮转化过程深刻影响植物氮吸收效率^[5]。植物叶片可通过气孔主动吸收大气中的微塑料颗粒。南开大学团队 2025 年研究证实,聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)和聚苯乙烯(PS)等微塑料能通过气孔进入叶片,经质外体途径迁移至维管组织并积累于腺毛中,脱落酸(ABA)处理关闭气孔后,吸收效率可降低 86%^[2]。野外调查显示,露天种植蔬菜的微塑料浓度显著高于温室蔬菜,且外层叶片浓度高于新生叶片,表明微塑料随暴露时间累积^[2]。大气污染水平、叶片生长周期与微塑料积累量呈正相关,巴黎、上海等城市大气中每立方米微塑料颗粒可达数百至数千个,直接影响植物吸收量^[2]。土壤中的微塑料可通过根系表皮细胞间隙或质膜进入植物体内。研究^[6]发现,纳米级微塑料($<100 \text{ nm}$)更易穿透根系细胞壁,而微米级颗粒($1\sim 10 \mu\text{m}$)主要通过根毛损伤部位入侵。通过使用共聚焦激光扫描显微镜,Liu 等^[7]能够验证水稻幼苗对 MP 的吸收,在水稻幼苗的根、茎和叶中发现了 MP 微球。此外,Nizzetto 等^[8]报道称,苹果中存在 $2.17 \mu\text{m}$ 大小的 MP,胡萝卜中存在 $1.51 \mu\text{m}$ 大小的 MP。此外,研究^[9]发现不同植物对微塑料的吸收能力存在显著差异,例如,小麦根系对聚乙烯(PE)微塑料的吸收量是玉米的 2.3 倍,这与根系分泌物(如有机酸)改变微塑料表面电荷有关。

生长在农田土壤中的作物接触微塑料后会富集,国外学者在多种蔬菜和水果中检测到微塑料,人类可能受其影响^[10]。有科学家在妇女胎盘和婴儿粪便中发现微塑料^[11-12],这表明微塑料已存在于人体内。纳米粒子对植物有毒性作用^[13],与纳米颗粒相似,纳米微塑料也可抑制玉米生长等^[14]。鉴于 MP 对生态环境和人类健康的严重威胁,迫切需要深入研究微塑料的生物积累性,这不仅有助于拓展对微塑料生态风险的科学认知,也为制定相应环境管理策略提供科学依据。因此,本研究采用玉米为实验材料,通过微观组织成像与宏观生理表型,设计种子萌发协同水培暴露实验,系统探究荧光标记 PS-MPs 在浓度-粒径双因子调控下的植物吸收路径、转运模式及分子机制,系统评估其对种子萌发、幼苗生长发育的抑制作用,并阐明其毒性作用机制。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试玉米品种为“沈单 16”(Zea mays L.),种子源自甘肃省农业科学院;试验采用天津大鹅科技有限公司提供的单分散红色聚苯乙烯荧光微球(PS-MPs),其核心物理化学参数如下:激发/发射波长分别为 $620 \text{ nm}/680 \text{ nm}$,粒径梯度涵盖 100 、 500 、 $1\,000$ 及 $5\,000 \text{ nm}$,密度 $1.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;微球以 $25 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 固体含量单分散于去离子水体系,折射率 1.60,变异系数(CV) 3%~5%,粒子密度达 $1.46\times 10^8 \text{ g}^{-1}$ ($3.64\times 10^7 \text{ mL}^{-1}$),于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 暗环境保存有效期大于等于 12 个月。

1.2 试验方法

试验一：以玉米种子为对象，探究不同浓度（0、20、50、100 mg·L⁻¹，粒径固定 100 nm）与粒径（100、500、1 000、5 000 nm，浓度固定 100 mg·L⁻¹）的 PS-MPs 荧光微球于种子萌发阶段的吸收、转运规律及调控机制。实验采用标准化流程：均质种子经 40 g·kg⁻¹ NaClO 表面灭菌后，于含 5 mL PS-MPs 悬浮液的培养皿（25 °C 黑暗条件）中培养 5 d，以对照组发芽率大于 90% 为终止阈值，同步记录发芽率（GP）、根长及芽长。

试验二：以三叶一心期玉米幼苗为对象，探究不同粒径不同添加方式的 PS-MPs 荧光微球在 100 mg·L⁻¹ 浓度条件下对幼苗吸收行为及体内转运特征的作用研究。幼苗经珍珠岩预培养后转移至含 PS-MPs 的霍格兰（Hoagland）营养液，设置不同粒径的不同添加方式（0、100+5 000、100、5 000 nm）为变量，每处理 3 次重复，培养周期 14 d（每 7 天更换营养液），严格控制光照（14 h·d⁻¹，300 μmol·m⁻²·s⁻¹）、温度（25 °C±2 °C）及湿度（60%~70%）。

1.3 指标测定方法

1.3.1 PS-MPs 荧光微球在玉米种子和幼苗中的吸收与转运 完成发芽及水培暴露试验后，依次清洗胚根、玉米根茎叶并干燥。取新鲜胚根根尖及根、茎、叶样本，将经酒精消毒的样品切割为 5 mm 小段，在 60 g·kg⁻¹ 琼脂中包埋后于 4 °C 冷藏过夜，随后使用振动切片机切制 80 μm 的半薄切片，封片后使用激光共聚焦电镜（LCSM，TCSP8，莱卡，德国）观察，设置红光（激发 620 nm/发射 680 nm）与绿光（激发 488 nm/发射 518 nm）双通道荧光检测。每个样品重复 5 次，成像数据经 LASAF 软件分析处理。

1.3.2 萌发指标 玉米种子萌发标准为胚根大于等于 2 mm，每日记录各处理发芽数，5 d 后终止试验。统计发芽率（GP=发芽数/总数×100%），测定根长、芽长，终止后取出种子铺于吸水纸，吸干表面水分。

1.3.3 抗氧化酶活性及丙二醛含量 所有指标均通过试剂盒进行测定，试剂盒购自 Solarbio 公司。其中，过氧化氢酶（CAT）对应的货号为 BC0200，超氧化物歧化酶（SOD）为 BC0170，过氧化物酶（POD）为 BC0090，丙二醛（MDA）为 BC0020。试剂的配制及保存严格遵循试剂盒说明书的要求，且所有试剂的保存条件均为 4 °C。

1.3.4 叶绿素含量的测定 取水培条件下生长的植株，选取生理状态一致的成熟叶片，用蒸馏水冲洗干净后，用滤纸吸干表面水分。准确称取 0.1 g 鲜样，置于 10 mL 离心管中，加入 10 mL 按体积比为 2:1 配制的丙酮-乙醇混合提取液，于避光环境中静置 24 h，直至叶片完全脱色。以 758 g·kg⁻¹ 丙酮溶液作为空白对照进行调零，使用分光光度计（Lambda 950+Refle，美国）分别测定提取液在 663 nm 和 645 nm 波长处的吸光值（ A_{663} 和 A_{645} ），按比尔-朗伯特（Lambert-Beer）定律计算：

$$\text{叶绿素 a}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) = (12.7 \times A_{663} - 2.69 \times A_{645}) \times \frac{v}{1\,000 \times w} \quad (1)$$

$$\text{叶绿素 b}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) = (22.9 \times A_{645} - 4.68 \times A_{663}) \times \frac{v}{1\,000 \times w} \quad (2)$$

$$\text{总叶绿素}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) = (8.02 \times A_{663} + 20.21 \times A_{645}) \times \frac{v}{1\,000 \times w} \quad (3)$$

式中，V 为提取液体积（10 mL），W 为鲜样质量（0.1 g），单位换算后结果以 mg·g⁻¹ 鲜样质量表示。每处理重复测定，数据经三次验证确保准确性。

1.3.5 可溶性糖含量的测定 取水培玉米成熟叶片洗净后称取 0.2 g 鲜样，剪碎后加入 10 mL 蒸馏水，密封离心管沸水浴 10 min，冷却后 5 000 g 离心 10 min，取上清液重复沸水浴离心步骤。合并上清液定容至 10 mL，取 1 mL 加入 1 mL 蒽酮乙酸乙酯及 5 mL 浓硫酸显色，混匀后于 485 nm 比色，同步以蔗糖标准曲线计算可溶性糖含量（mg·g⁻¹ 鲜物质质量）。步骤包括两次热提取、离心纯化及显色反应，确保数据精确性。

1.3.6 超氧阴离子和过氧化氢测定 所有测定均使用 Solarbio 公司的试剂盒, 其中超氧阴离子 (O_2^-) 试剂盒货号为 BC1290, 过氧化氢 (H_2O_2) 试剂盒货号为 BC3595; 试剂的配制与保存均严格按照试剂盒说明书操作, 保存温度均为 4 °C。

1.4 数据统计与分析

本研究采用 Excel 2017 进行数据整理与初步统计; SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析 (One Way-ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 多重比较分析, 检验不同浓度和粒径的 PS-MPs 荧光微塑料对玉米种子萌发和幼苗生长发育的差异; 并使用 Origin Pro 2021 软件完成图表的制作。

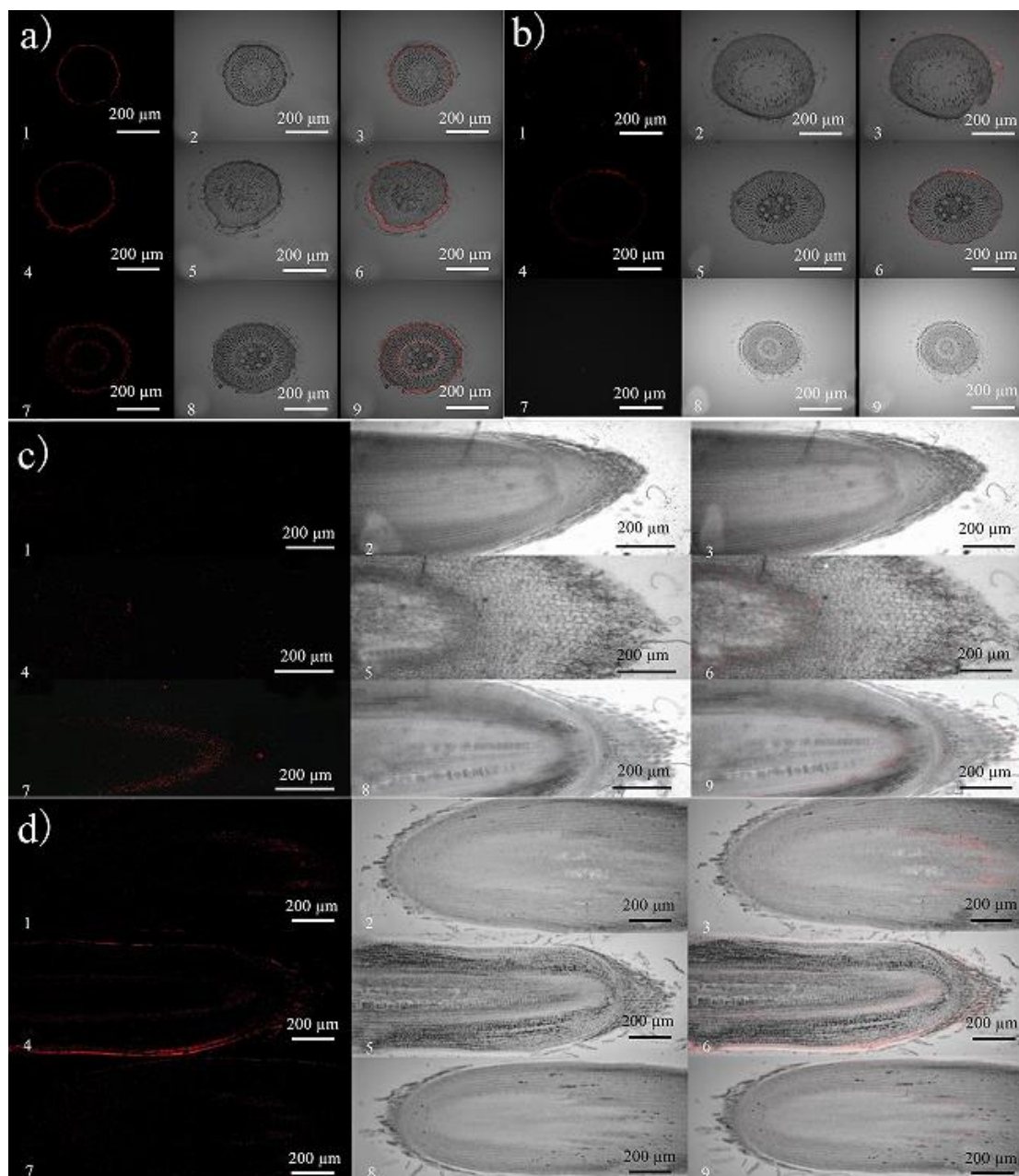
2 结果

2.1 不同浓度和粒径的 PS-MPs 荧光微球对玉米胚根的影响

如图 1a 所示, 在不同浓度的 PS-MPs (100 nm) 荧光微球处理下, 玉米胚根根尖的横切图显示, 随着 PS-MPs 荧光微球浓度的增加, 胚根中的荧光强度逐渐增强。当 PS-MPs 荧光微球浓度为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 荧光信号较弱, 且主要分布于皮层和根毛; $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 暴露组中, PS-MPs 荧光微球呈现皮层薄壁组织与根毛区高密度富集, 并发生韧皮部筛管低频侵染; $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 暴露组荧光强度达浓度依赖性峰值, 至木质部导管。

如图 1b 所示, 在 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度条件下, 不同粒径的 PS-MPs 荧光微球被胚根吸收的数量及其荧光强度表现出明显差异: PS-MPs 的吸收量和荧光强度随粒径减小而增加, 且不同粒径的微球在根部的定位存在空间差异。随着粒径减小, 玉米胚根对 PS-MPs 荧光微球的吸收量增多, 对应的荧光信号也更强。其中, 500 nm 的微球主要富集于根毛区域, 而 1 000 nm 的微球则多分布在根毛与表皮部位。

如图 1c、图 1d 所示, 纵切面观察显示, 不同浓度和粒径的 PS-MPs 荧光微球在玉米胚根中的分布位置和荧光强度存在差异。PS-MPs 荧光微球的根部迁移能力受浓度与粒径协同调控: 在 20 、 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, PS-MPs 局限于皮层; 浓度升至 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 可抵达中柱。在 500 nm 粒径时可到达表皮并向中柱有限渗透; 1 000 nm 粒径则主要积累于根冠及表皮, 无法深入内部组织。



注：图 a)、图 c) 中 1~3 为 20 mg·L⁻¹ 组的明场显微构象、荧光信号分布及共定位整合视图；4~6 为 50 mg·L⁻¹ 组的明场拓扑、荧光强度场及重叠可视化影像；7~9 为 100 mg·L⁻¹ 组的明场、荧光和重叠图像。图 b)、图 d) 中 1~3 为 500 nm 粒径组的明场、荧光和重叠图像；4~6 为 1 000 nm 粒径组的明场、荧光和重叠图像；7~9 为 5 000 nm 粒径组的明场、荧光和重叠图像。Note: In figures a) and c), images 1-3 show the bright field, fluorescence, and overlap images of the 20 mg·L⁻¹ group, images 4-6 show the bright field, fluorescence, and overlap images of the 50 mg·L⁻¹ group, and images 7-9 show the bright field, fluorescence, and overlap images of the 100 mg·L⁻¹ group. In figures b) and d), 1-3 show the bright field, fluorescence, and overlap images for the 500 nm particle size group, 4-6 show the images for the 1 000 nm group, and 7-9 show the images for the 5 000 nm group.

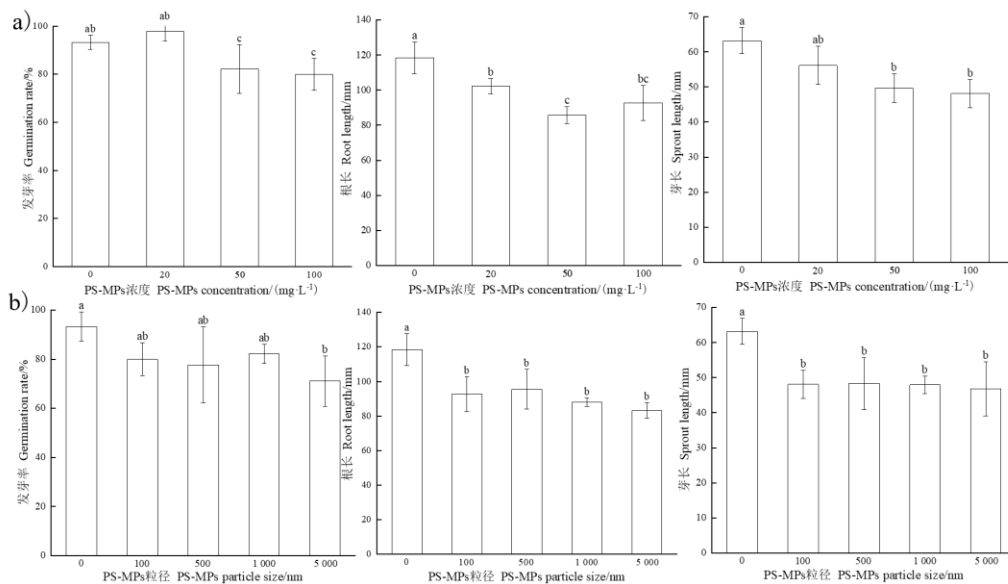
图 1 在不同浓度 (20、50、100 mg·L⁻¹) 和不同粒径 (500、1 000、5 000 nm) 聚苯乙烯微塑料 (PS-MPs) 荧光微球处理 5 d 后，胚根根尖横切面和纵切面的激光共聚焦显微镜 (LCSM) 图像

Fig. 1 Laser confocal scanning microscope (LCSM) images of transverse and longitudinal sections of hypocotyl root tips after five days of treatment with polystyrene microplastics (PS-MPs) fluorescent microspheres at different concentrations (20, 50, and 100 mg·L⁻¹) and sizes (500, 1 000 and 5 000 nm)

2.2 玉米种子萌发指标在不同浓度与粒径的PS-MPs荧光微球处理下的响应

图2量化了100 nm粒径PS-MPs荧光微球的浓度梯度及100 mg·L⁻¹浓度下不同粒径PS-MPs对玉米种子萌发的影响。如图2a, 20 mg·L⁻¹浓度对发芽率无显著影响, 而50和100 mg·L⁻¹浓度显著抑制发芽率。所有浓度处理均显著降低根长, 且50 mg·L⁻¹的影响最为显著; 在芽长方面, 50和100 mg·L⁻¹显著抑制芽长, 而20 mg·L⁻¹对芽长无显著影响。

如图2b, 在不同粒径处理下, 5 000 nm的PS-MPs荧光微球显著抑制发芽率, 其他粒径与对照虽无显著性差异, 但整体上发芽率有所下降。此外, 各粒径处理均显著降低根长和芽长。



注: 不同小写字母表示其在 $P < 0.05$ 水平存在显著差异。下同。Note: Different lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 level of significance. The same below.

图2 玉米种子萌发阶段对梯度暴露PS-MPs的粒径选择性响应特征 (a. PS-MPs剂量梯度对玉米种子萌发的干扰; b. 玉米种子对梯度粒径PS-MPs的响应)

Fig. 2 Size-selective response characteristics of maize seed germination to a gradient exposure of PS-MPs (a. Disruption of maize seed germination by a gradient of PS-MP doses; b. Response of maize seeds to PS-MPs of different sizes)

2.3 PS-MPs荧光微球对玉米抗逆性的影响

图3a表征了粒径100 nm的PS-MPs荧光微球在浓度梯度暴露下对玉米种子抗氧化酶系统及丙二醛(MDA)含量的影响。结果表明, CAT与POD活性均呈现显著的浓度依赖性, 其强度与PS-MPs处理浓度呈显著正相关。SOD活性方面, 20 mg·L⁻¹组与对照组无显著差异, 而在50和100 mg·L⁻¹组中, SOD活性分别显著提高了78.26%和38.49%。MDA含量在20 mg·L⁻¹处理下与对照组无显著差异, 但在50和100 mg·L⁻¹处理下呈显著变化, 其中50 mg·L⁻¹显著降低了MDA含量, 而100 mg·L⁻¹则显著提高了MDA含量。

图3b与图4a展示了100 mg·L⁻¹剂量下, 多粒径PS-MPs荧光颗粒引发的玉米种子萌发期至幼苗生长阶段抗氧化酶协同响应及丙二醛MDA膜脂过氧化表征。其中图3b显示, 大粒径PS-MPs(5 000 nm)激活SOD、POD协同防御机制, 而小粒径(100 nm)特异性增强CAT清除效率, 较对照组增加61.68%, 5 000 nm则瓦解其活性; 中小粒径(100、500、1 000 nm)通过膜脂过氧化加剧, 导致MDA累积, 5 000 nm处理组与对照组无显著差异。图4a显示对于玉米幼苗, 不同添加方式均能显著影响SOD酶活性, 其中仅添加100 nm处理时SOD

活性最高, 较对照组提升 94.63%; 混合添加 100 nm 和 5 000 nm 时, SOD 酶活性较仅添加 5 000 nm 组增加 14.77%; 所有处理均显著降低了 CAT 酶活性; POD 酶活性在仅添加 100 nm 组中达到最高值, 较对照组增加 23.43%; 混合添加 100 nm 和 5 000 nm 时, POD 活性同样显著增强; MDA 含量在仅添加 100 nm 处理下最高, 较对照组增加 40.82%; 混合添加 100 nm 和 5 000 nm 时, MDA 含量也显著高于对照组。

图 4b 分别显示了 PS-MPs 荧光微球对玉米幼苗叶片超氧阴离子(O_2^-)和过氧化氢(H_2O_2)含量的影响。结果表明, 除 5 000 nm 处理外, 所有处理均显著诱导玉米幼苗叶片超氧阴离子(O_2^-)水平升高 ($P<0.05$), 其中仅添加 100 nm PS-MPs 组诱导 O_2^- 累积峰值, 较对照组显著增加 79.32%; 100 nm+5 000 nm 混合组的 O_2^- 含量与 5000 nm 单一处理组无显著差异。对于 H_2O_2 而言, 所有处理均使 H_2O_2 含量显著升高 ($P<0.05$), 其中仅添加 100 nm PS-MPs 时, H_2O_2 含量最高, 较对照组增加了 36.96%; 混合添加 100 nm+5 000 nm 时, H_2O_2 含量相比单独添加 5 000 nm PS-MPs 组增加了 9%。

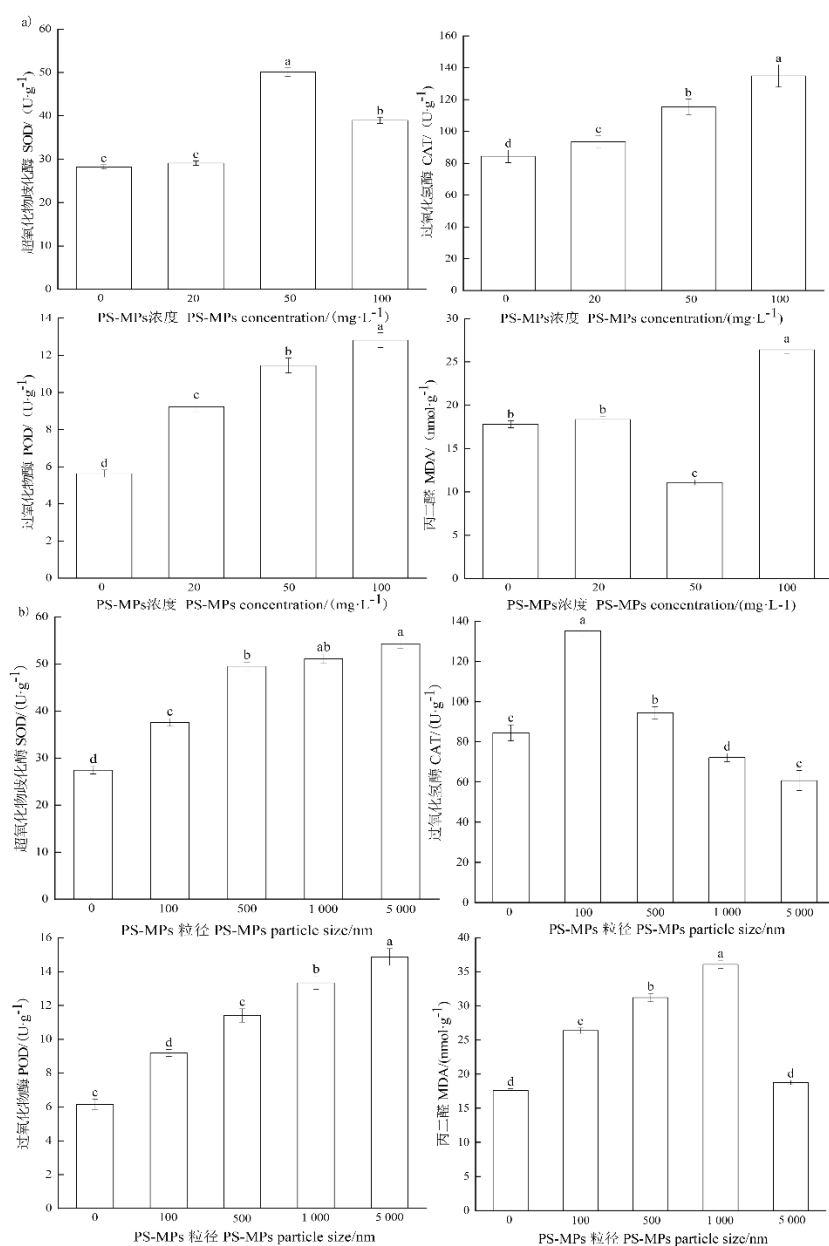


图 3 不同浓度 PS-MPs (0、20、50、100 mg·L⁻¹) (a) 和不同粒径 PS-MPs (0、100、500、1 000 和 5 000

nm) (b) 暴露下对玉米胚根超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT)、过氧化物酶 (POD) 活性及丙二醛 (MDA) 含量的影响

Fig. 3 Effects of different PS-MP concentrations (0, 20, 50, 100 mg·L⁻¹) (a) and different PS-MP particle sizes (0, 100, 500, 1 000, and 5 000 nm) (b) exposure on the activity of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), and peroxidase (POD) and the content of malondialdehyde (MDA) in maize radicle

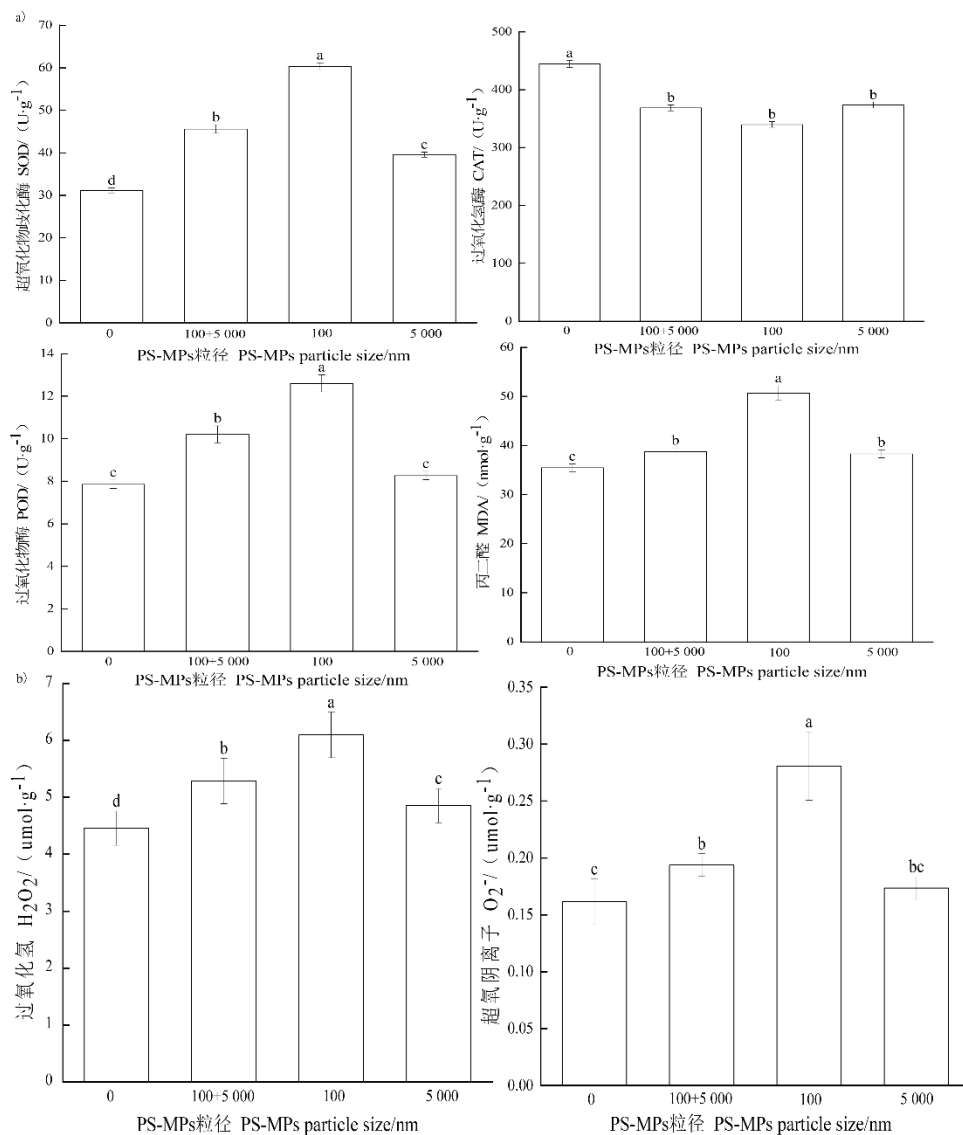


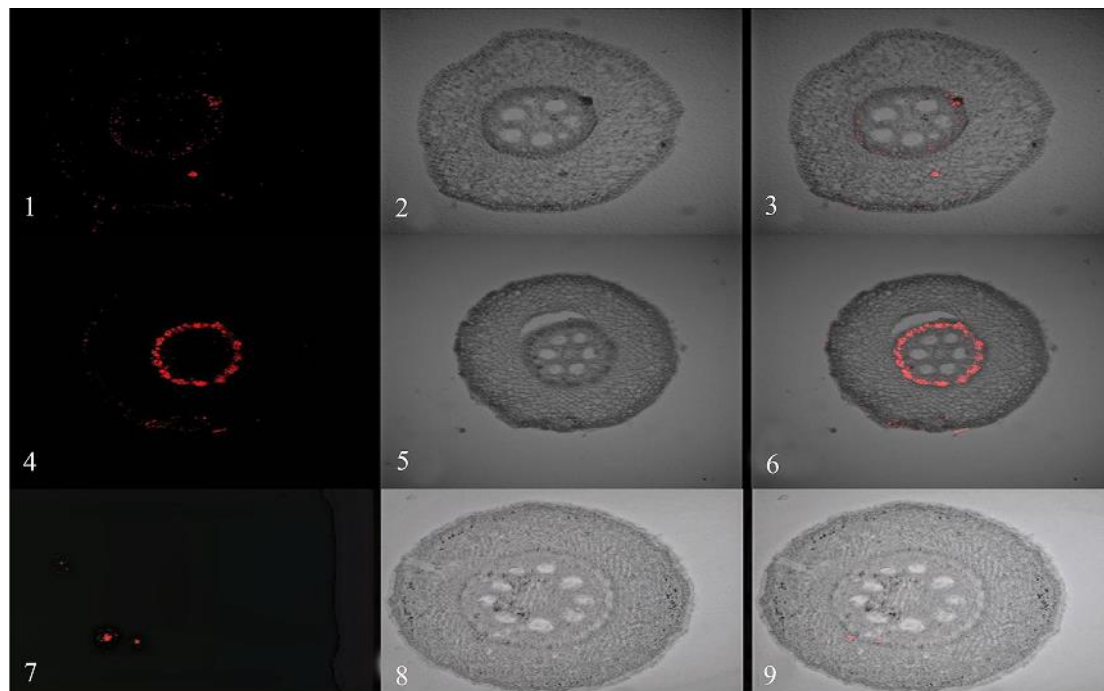
图 4 多粒径 PS-MPs (0、100+5 000、100、5 000 nm) 暴露对玉米幼苗 SOD、CAT、POD 活性与 MDA 含量的影响 (a) 和过氧化氢 (H₂O₂) 与超氧阴离子 (O₂⁻) 积累水平的影响 (b)

Fig. 4 Effects of multi-size PS-MPs (0, 100 + 5,000, 100, and 5,000 nm) on SOD, CAT, POD activity, and MDA content in maize seedlings (a) and the accumulation levels of hydrogen peroxide (H₂O₂) and superoxide anion (O₂⁻) (b)

2.4 玉米幼苗对 PS-MPs 荧光微球的吸收和转运

图 5 展示了在不同添加方式下, 不同粒径 PS-MPs 荧光微球在玉米幼苗根系横切面的分布情况。在所有处理组中均可观察到红色荧光信号, 在 100 nm PS-MPs 暴露下, 荧光强度达到峰值, 并特异性聚集在维管束系统的木质部导管中; 而 100 与 5 000 nm 粒径共暴露处理

组中，荧光信号强度仅次于峰值组，扩散至木质部导管与皮层薄壁组织；而 5 000 nm 组荧光信号最弱，空间分布局限在皮层区域。



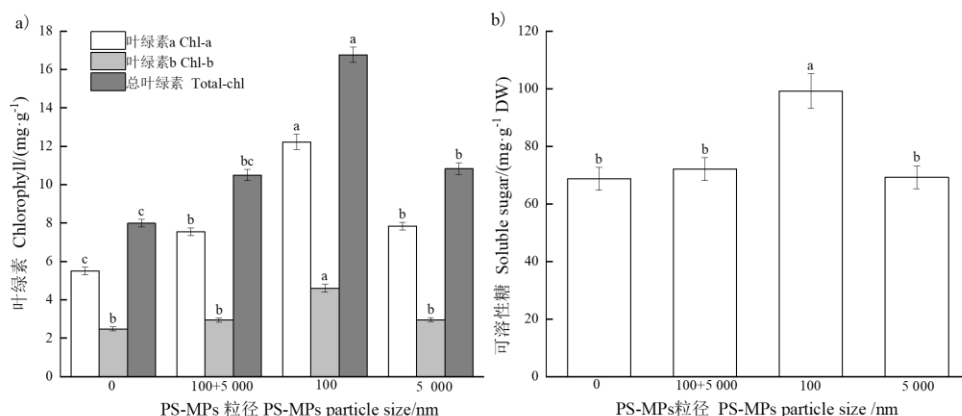
注：1~3：表征 100 nm+5 000 nm 混合粒径暴露组的明场显微构象、荧光信号分布及共定位整合视图；4~6：解析 100 nm 暴露下的明场拓扑、荧光强度场及重叠可视化影像；7~9：呈现 5 000 nm 暴露的明场、荧光及重叠图谱。Note: 1-3: Bright-field microscopic configuration, fluorescence signal distribution and colocalisation composite view, characterising the exposure group of mixed particles with sizes ranging 100 nm+5 000 nm; 4-6: Analysis of bright-field topology, fluorescence intensity field and overlay visualisation images, under an exposure of 100 nm; 7-9: Presentation of bright-field, fluorescence and overlay maps, for an exposure of 5 000 nm.

图 5 玉米幼苗暴露于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 不同粒径 PS-MPs 荧光微球 14 d 后根尖的 LCSM 图像

Fig. 5 LCSM images of maize root tips after 14 days of exposure to fluorescent microspheres of $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ PS-MPs with varying particle sizes

2.5 PS-MPs 荧光微球对玉米幼苗叶绿素代谢与可溶性糖含量的影响

图6a所示，PS-MPs荧光微球暴露后，玉米幼苗叶片叶绿素a含量在不同添加方式下均呈显著上升 ($P<0.05$)，增幅分别为37.64%、124.44%、43.55%，且组间差异显著；叶绿素b仅于100 nm暴露下特异性激增85.07% ($P<0.05$)，其余处理无显著波动。叶绿素总量在100 nm与5 000 nm处理下均显著提升 ($P<0.05$)，混合组则维持稳态。图6b进一步表明，可溶性糖含量于100 nm暴露下显著上升44.81% ($P<0.05$)。



注：实验结果中同一指标图柱上不同小写字母表示其在 $P < 0.05$ 水平存在显著差异。Note: Different lowercase letters on the bars of the same indicator in the experimental results indicate significant differences at the 0.05 level of significance.

图 6 不同粒径 PS-MPs (0、100+5 000、100、5 000 nm) 暴露下对玉米幼苗叶绿素代谢 (a) 和可溶性糖含量 (b) 的影响

Fig. 6 The effects of exposure to PS-MPs of different sizes (0, 100+5 000, 100, 5 000 nm) on the metabolism of chlorophyll (a) and the content of soluble sugars (b) in maize seedlings

3 讨论

在研究微塑料对植物毒性影响时，常把发芽率作为重要的标志物^[15]。也有研究发现，菜心种子发芽率随着 PS-MPs 荧光微球浓度的增加抑制作用增强，PS-MPs 荧光微球粒径越大对种子发芽的抑制作用越强，PS-MPs 粒径越小则抑制能力越弱^[16]。在对玉米种子萌发的影响方面，本研究发现不同浓度和粒径的 PS-MPs 荧光微球表现出不同的作用：20 mg·L⁻¹ 低浓度暴露显著激发萌发，而 50 与 100 mg·L⁻¹ 中高浓度则抑制发芽（图 2a）。原因可能是中高浓度微球在木质部导管内形成物理性占位屏障，直接阻碍水分及矿质营养输导系统，最终导致萌发动能衰竭^[17]。不同粒径的 PS-MPs 荧光微球对发芽率也有影响，与对照组相比大粒径（5 000 nm）对发芽率有显著抑制作用（图 2b）。这可能是由于大粒径微塑料对种子萌发过程中的生理活动阻碍更大。研究证实，微塑料通过黏液多糖氢键作用优先吸附于种子表皮、胚根及根毛区，形成多重表面覆盖层^[18]。本研究揭示了梯度浓度与多粒径 PS-MPs 荧光颗粒对玉米种子根系伸长生长的速率及胚轴伸长的显著阻滞效应。原因是 PS-MPs 荧光微球大多数团聚在种子胚根和根毛的表面，影响了水分的吸收^[19]。水分是种子萌发和幼苗生长的关键因素，水分吸收受阻必然会抑制种子的萌发和幼苗的生长。

氧化损伤的代谢扰动强度被纳入多污染物生态风险分级体系^[20]。植物为了应对微塑料诱导的氧化应激反应，体内 SOD、CAT 及 POD 活性增幅与自由基清除效能呈正相关，其酶活性水平可作为量化外界胁迫强度的关键生物标志物^[21]。在本研究中发现，20 mg·L⁻¹ 的 PS-MPs 荧光微球对玉米胚根 SOD 活性无显著影响，而 50 和 100 mg·L⁻¹ 的处理下均显著增加了 SOD 酶活性，且 SOD 活性随粒径增大而增强（图 3a，图 3b）。这可能是因为在中高浓度微塑料胁迫下，植物体内产生氧化应激，SOD 作为抗氧化防御系统的第一道屏障被激活^[22]。在不同浓度处理下，玉米胚根的 POD 和 CAT 活性与浓度呈正相关，随着浓度的升高而增强（图 3a）；在不同粒径处理下，CAT 活性随粒径的增大而下降，POD 活性随粒径的增大而增强（图 3b）。这与 Zhang 等^[23]实验结果一致，SOD 活性和 CAT 活性随微塑料浓度梯度升高

而增强,MDA 含量与活性氧(ROS)水平也显著上升。微塑料粒径梯度差异通过调控 H_2O_2 累积过量(图 4b)时,特异性激活 POD 与 CAT 的协同清除通路,其活性变异系数直接表征氧化应激强度粒径效应。其结果与 Jiang 等^[24]的结果一致,推测可能是由于抗氧化防御系统衰竭所致,超出了自身调节能力的阈值。

植物代谢能量需求主要由叶绿体光合磷酸化过程驱动,仅小部分源自线粒体呼吸作用;其中叶绿素密度通过调控光系统 II 量子产额,显著影响光能捕获效率,进而成为表征植株生理状态的关键生物标志物^[25]。本研究揭示,PS-MPs 荧光标记颗粒暴露对玉米幼苗叶绿素代谢通路产生显著干扰:所有暴露组均检测到叶绿素 a 的累积量明显上升;而叶绿素 b 的含量仅在 100 nm 粒径处理中呈现特异性增长;叶绿素总量则在单一添加 100 nm 或 5 000 nm 微塑料的条件下显著升高,混合添加 100 nm+5 000 nm 的处理对其无显著影响(图 6a)。推测微塑料可能通过影响植物的光合作用相关机制,从而改变叶绿素含量。可溶性糖作为渗透调节核心溶质,不仅可保持内稳态的稳定,同时也可维持保护膜的平衡与细胞结构的稳定^[26]。本研究证实,仅在 100 nm PS-MPs 荧光微球暴露条件下,玉米幼苗可溶性糖含量呈现显著波动(图 6b),该现象表明纳米级微球通过非生物胁迫,特异性干扰玉米幼苗生理代谢稳态。可能是特定粒径的微塑料对玉米幼苗的代谢过程产生干扰。高剂量 PS-NPs ($100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 迫使光合产物向可溶性糖分分流,中低剂量导致可溶性糖库容缩减^[27]。

4 结 论

PS-MPs 对玉米种子及幼苗生长的毒性效应呈现显著的浓度与粒径依赖性。LCSM 分析证实,在玉米种子萌发期,PS-MPs 荧光微球特异性定植于胚根根毛区,部分粒径跨表皮迁移至皮层组织,少数进一步侵入木质部导管;该导管作为水分与养分输导的核心通道,其堵塞现象最终引发了萌发受阻及氧化损伤应激。基于水培体系的暴露实验结合 LCSM 表明,在玉米幼苗阶段,PS-MPs 荧光标记微球可经由蒸腾作用产生的拉力驱动,实现由根系向地上组织的主动迁移,在维管组织内形成特异性富集微区,进而构建毒性微环境,最终诱导生长障碍与生理功能失调。综上所述,微塑料对玉米种子及玉米幼苗的影响是多方面的,其原因主要涉及水分和养分输送受阻、氧化应激、影响光合作用相关机制、干扰代谢过程等多个方面。上述影响可能会对玉米的生长和发育产生不利影响,进而影响农业生产。因此,需要更加关注微塑料对农业生态系统的潜在影响,并采取相应的措施来减少微塑料的污染。

参考文献(References)

- [1] Andrady A L. Microplastics in the marine environment[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(8): 1596-1605.
- [2] Li Y, Zhang J J, Xu L, et al. Leaf absorption contributes to accumulation of microplastics in plants[J]. Nature, 2025, 641(8063): 666-673.
- [3] Bai H H, Yang Y Q, Huang Y. Distribution of microplastics and their effects on nutrient absorption in strawberry plants[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 332:113214.
- [4] Li L Z, Luo Y M, Li R J, et al. Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode[J]. Nature Sustainability, 2020, 3(11): 929-937.
- [5] Dan X Q, He M Q, Wen Y H, et al. The size-variation of microplastics alters plant nitrogen uptake by regulating soil gross nitrogen transformation rates[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2025, 210:109934.
- [6] Iqbal S, Li Y J, Xu J C, et al. Smallest microplastics intensify maize yield decline, soil processes and consequent global warming potential[J]. Journal of Hazardous Materials, 2025, 486: 136993.
- [7] Liu Y Y, Guo R, Zhang S W, et al. Uptake and translocation of nano/microplastics by rice seedlings: Evidence from a hydroponic

- experiment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 421: 126700.
- [8] Nizzetto L, Futter M, Langaas S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin[J]? Environmental Science & Technology, 2016, 50(20):10777-10779.
- [9] 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.
- [10] Oliveri Conti G, Ferrante M, Banni M, et al. Micro- and nano-plastics in edible fruit and vegetables. The first diet risks assessment for the general population[J]. Environmental Research, 2020, 187: 109677.
- [11] Ragusa A, Svelato A, Santacroce C, et al. Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta[J]. Environment International, 2021, 146: 106274.
- [12] Yan Z H, Liu Y F, Zhang T, et al. Analysis of microplastics in human feces reveals a correlation between fecal microplastics and inflammatory bowel disease status[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(1): 414-421.
- [13] Ma X M, Geiser-Lee J, Deng Y, et al. Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: Phytotoxicity, uptake and accumulation[J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(16): 3053-3061.
- [14] 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.
- [15] Khalid N, Aqeel M, Noman A. Microplastics could be a threat to plants in terrestrial systems directly or indirectly[J]. Environmental Pollution, 2020, 267: 115653.
- [16] Huang X P, Xiang L, Guo J J, et al. The toxic effects of polystyrene microspheres on Chinese broccoli seeds and seedlings [J]. Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 2021, 40(5): 926-933. [黄献培, 向垒, 郭静婕, 等. 聚苯乙烯微球对菜心种子及幼苗的毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 926-933.]
- [17] Li R J, Tu C, Li L Z, et al. Visual tracking of label-free microplastics in wheat seedlings and their effects on crop growth and physiology[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 456: 131675.
- [18] 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.
- [19] Liang X M, Nie X P, Ying G G, et al. Assessment of toxic effects of triclosan on the swordtail fish (*Xiphophorus helleri*) by a multi-biomarker approach[J]. Chemosphere, 2013, 90(3): 1281-1288.
- [20] 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(9): 755-760.
- [21] Ping L W, Li X X, Zhang C, et al. Oxidative stress and DNA damage induced by DEP exposure in earthworms[J]. Huan Jing Ke Xue, 2018, 39(10): 4825-4833.
- [22] Li Y, Zhang S S, Jiang W S, et al. Cadmium accumulation, activities of antioxidant enzymes, and malondialdehyde (MDA) content in *Pistia stratiotes* L[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(2): 1117-1123.
- [23] Zhang Y, Yang X, Luo Z X, et al. Effects of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on the physiology and molecular metabolism of corn (*Zea mays* L.) seedlings[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150895.
- [24] 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.
- [25] Li Y H, Huang X Y. The effects of heavy metal pollution on plant photosynthesis[J]. Introduction and Consultation, 2006(6): 23-24. [李裕红, 黄小瑜. 重金属污染对植物光合作用的影响[J]. 引进与咨询, 2006(6): 23-24.]
- [26] Moustakas M, Sperdouli I, Kouna T, et al. Exogenous proline induces soluble sugar accumulation and alleviates drought stress effects on photosystem II Functioning of *Arabidopsis thaliana* leaves[J]. Plant Growth Regulation, 2011, 65(2): 315-325.
- [27] Qiu C C, Li G X, Li Q S, et al. Effects of polystyrene nanoplastics on the physiological growth of garlic[J]. Environmental Science, 2022, 43(8): 4387-4393. [邱陈陈, 李国新, 李青松, 等. 聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(8): 4387-4393.]

(责任编辑: 陈荣府)