

张超, 高梅, 刘加强, 等. 聚苯乙烯微塑料和双酚 A 对诸葛菜的复合效应[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(2): 300-313.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.02.009

聚苯乙烯微塑料和双酚 A 对诸葛菜的复合效应

张超¹, 高梅², 刘加强³, 肖裕杰³, 周硕¹, 陈焯欣¹, 蒋非凡³, 张艺滢³,
伊琳娜·维琴科娃⁴

(1. 徐州工程学院设计学院, 江苏 徐州 221000; 2. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250014; 3. 徐州工程学院环境工程学院, 江苏 徐州 221000; 4. 圣彼得堡国立电子技术大学, 圣彼得堡 191023)

摘要: 双酚 A (BPA) 和聚苯乙烯微塑料 (PS-MPs) 是环境中的新污染物。PS-MPs 可作为 BPA 的载体, 通过影响 BPA 的生物利用度和降解过程, 对植物生长产生复合效应。本研究设置未添加 BPA 和 PS-MPs 的对照 (CK)、BPA 处理以及 BPA 与不同质量分数 PS-MPs 的复合处理, 分析诸葛菜的生长指标、光合参数、可渗透调节物质含量、次生代谢物含量的变化。结果表明, PS-MPs 对 BPA 的吸附符合 Freundlich 模型。此外, PS-MPs 质量分数是驱动 pH 值变化的主要影响因子。相较于 CK, BPA 处理的株高和根长显著减少了 41.03%、49.21%, 同时导致可溶性糖含量和类黄酮含量分别显著降低 28.06% 和 59.46%。与 BPA 处理相比, 添加 0.1% PS-MPs 通过增强光合色素含量、促进次生代谢物积累, 一定程度上缓解了 BPA 的毒性。而添加 5.0% PS-MPs 显著加剧根系结构损伤, 诱导根部 BPA 含量升高 75.00%, 同时促使类黄酮含量增加, 最终协同强化了 BPA 的生物毒性。本研究结果表明, PS-MPs 的质量分数是调控 BPA 植物毒性的关键因素, 低质量分数的 PS-MPs 具有缓解效应, 而高质量分数的 PS-MPs 则呈现协同毒性。本研究结果可以为复合污染生态风险的评估提供理论依据。

关键词: 聚苯乙烯微塑料 (PS-MPs); 双酚 A (BPA); 诸葛菜; 吸附行为; 复合毒性

中图分类号: X5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2026)02-0300-14

Combined effects of polystyrene microplastics and bisphenol A on *Orychophragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz

ZHANG Chao¹, GAO Mei², LIU Jiaqiang³, XIAO Yujie³, ZHOU Shuo¹, CHEN Yexin¹, JIANG Feifan³,
ZHANG Yiyong³, VEZHENKOVA Irina⁴

(1. School of Design, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221000, China; 2. Shuifa Planning and Design Co., Ltd., Jinan 250014, China;
3. School of Environmental Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221000, China; 4. Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",
Saint Petersburg 191023, Russia)

Abstract: Bisphenol A (BPA) and polystyrene microplastics (PS-MPs) are emerging contaminants in the environment. PS-MPs can serve as carriers for BPA, exerting combined effects on plant growth by influencing the bioavailability and degradation processes of BPA. In this study, a control (CK) without the addition of BPA and PS-MPs, a BPA treatment, and combined treatments of BPA with different mass fractions of PS-MPs were established. Changes in the growth indicators, photosynthetic parameters, osmoregulatory substance contents, and secondary metabolite contents of *Orychophragmus violaceus* were analyzed. The results showed that the adsorption of BPA by PS-MPs conformed to the Freundlich model. Furthermore, the mass fraction of PS-MPs was the main factor driving changes in pH value. Compared with CK, the BPA treatment significantly reduced plant height

收稿日期: 2025-11-11

基金项目: 徐州市重点研发计划(社会发展)项目(KC23322)

作者简介: 张超(1987-), 男, 江苏徐州人, 博士, 讲师, 主要从事植物毒理学研究。(E-mail) 281706480@qq.com

通讯作者: 高梅, (E-mail) 563624217@qq.com

mus violaceus were analyzed. The results showed that the adsorption of BPA by PS-MPs conformed to the Freundlich model. Furthermore, the mass fraction of PS-MPs was the main factor driving changes in pH value. Compared with CK, the BPA treatment significantly reduced plant height

and root length by 41.03% and 49.21%, respectively, and also led to decreases in soluble sugar content and flavonoid content by 28.06% and 59.46%, respectively. Compared with the BPA treatment, the addition of 0.1% PS-MPs partially alleviated the toxicity of BPA by enhancing photosynthetic pigment contents and promoting the accumulation of secondary metabolites. Conversely, the addition of 5.0% PS-MPs significantly exacerbated root structure damage, induced a 75.00% increase in BPA content in the roots, and concurrently promoted flavonoid accumulation, ultimately synergistically enhancing the biotoxicity of BPA. The results of this study indicated that the mass fraction of PS-MPs was a key factor regulating the phytotoxicity of BPA. Low mass fractions of PS-MPs exerted a mitigating effect, while high mass fractions exhibited synergistic toxicity. These findings can provide a theoretical basis for the ecological risk assessment of combined pollution.

Key words: polystyrene microplastics (PS-MPs); bisphenol A (BPA); *Orychophragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz; adsorption behavior; combined toxicity

双酚 A (BPA) 是一种人工合成的内分泌干扰物, 作为制造聚碳酸酯塑料和环氧树脂的原料, 在工业中被广泛使用。BPA 在极低剂量 (1 ng/L) 下便能干扰内分泌系统, 具有致癌性、生殖毒性与发育胚胎毒性^[1]。BPA 因其高产量、难降解等特性, 经废水等途径释放至多种环境介质中, 在全球河流、湖泊、土壤及室内外空气等环境中广泛分布^[2]。聚苯乙烯微塑料 (PS-MPs) 指粒径小于 5 mm 的聚苯乙烯塑料颗粒或碎片, 是环境中微塑料的主要类型之一, 主要来源于聚苯乙烯制品 (快餐盒、泡沫包装、一次性餐具) 的物理磨损与光化学降解^[3]。PS-MPs 具有高疏水性与较大的比表面积, 可有效吸附 BPA, 进而影响有机污染物在环境中的迁移与生物有效性。例如, 李珍等^[4]指出土壤中 PS-MPs 对 BPA 表现出较强的吸附能力, 是一种理想的 BPA 吸附剂, 可使 BPA 在自然环境中广泛迁移。另外, PS-MPs 可作为有机污染物载体, 通过影响有机污染物的生物利用度和降解过程, 对植物生长产生复合效应^[5]。例如, Zhang 等^[6]发现, 抗生素对药用植物半夏的影响机制受 PS-MPs 含量调控。蒋永锋等^[7]指出 PS-MPs 与非处方药 (OTC) 的复合处理对玉米生长的毒性作用强于单一处理, 表现出一定程度的协同作用。已有研究结果表明, PS-MPs 与 BPA 因长期低剂量暴露对生态系统构成潜在威胁^[4,8-9], 但二者复合污染在植物系统中的生态风险研究仍待深入, 其对植物生理产生的协同或拮抗效应尚需深入阐明。

当前关于新污染物的研究多聚焦于其生态毒理效应^[8-10], 而对其生态修复方面的关注则严重不足, 特别是植物对污染物的耐受效应与机制, 相关研究仍极为匮乏。诸葛菜 [*Orychophragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz] 因对环境污染具有高度的耐受性和显著的修复潜力而备受关注。诸葛菜不仅能够

富集 Cd、Cu、Pb、Zn 等多种重金属, 还对石油烃、硝基苯等有机污染物表现出耐受乃至降解能力^[10-12]。然而, 目前尚不确定 PS-MPs 和 BPA 的复合效应是协同还是拮抗, 以及复合污染对诸葛菜的生长影响是否强于单一污染等问题。

本研究拟通过诸葛菜盆栽试验, 探究单一 BPA 处理及 BPA 与不同质量分数 (0.1%、1.0%、5.0%) 的 PS-MPs 复合处理对诸葛菜的影响, 通过分析 PS-MPs 对 BPA 的吸附行为、BPA 在诸葛菜体内的转运与积累过程, 并系统测定根系细胞损伤、植株表型、光合特性、氧化应激水平及次生代谢产物等响应指标, 综合评估复合污染的毒性效应, 旨在揭示 BPA 对诸葛菜的毒害作用机制, 明确 PS-MPs 的质量分数对 BPA 毒性的调控作用及作用机制, 并探讨诸葛菜对复合胁迫的耐受性, 以期理解城市观赏植物对新污染物胁迫的耐受机制提供新视角, 也为植物在环境污染胁迫下的生态响应策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料制备

本试验所用 BPA 纯度为 98%, 购自上海麦克林生化科技股份有限公司; 粒径 10 μm 的 PS-MPs 由东莞市凯萱塑胶科技有限公司提供。供试的诸葛菜种子为同一批次, 实测发芽率为 92.5%, 选取大小均一、饱满无损伤的种子进行表面灭菌处理: 在室温 (25 $^{\circ}\text{C}$) 条件下, 将种子浸泡于 10% 次氯酸钠溶液中 15 min, 随后用灭菌水反复冲洗 3 次, 每次冲洗持续 1 min, 以完全去除残留的消毒剂; 最后置于无菌滤纸上吸干水分备用^[7,13]。

1.2 土壤样品的制备

试验中的土壤均从徐州工程学院校园收集。土壤的主要性质如下: 土壤 pH 值为 7.6, 土壤容重为

1.2 g/cm³, 土壤孔隙率为 45.6%, 含水率为 48.7%。在收集过程中, 去除石头和植物等杂质, 过 5 目(4 mm)筛子, 自然晾干后备用。

1.3 试验设计

参考前期研究结果^[6-7,14], 设定 BPA 含量为 2 mg/L, PS-MPs 的质量分数为 0.1%、1.0% 和 5.0%, 共设 5 个处理(每个处理 5 次重复):(1)未添加双酚 A 和聚苯乙烯微塑料的对照(CK);(2)添加双酚 A 的处理(BPA);(3)添加双酚 A 和 0.1% 聚苯乙烯微塑料的处理(BPA+PS-MPs0.1);(4)添加双酚 A 和 1.0% 聚苯乙烯微塑料的处理(BPA+PS-MPs1.0);(5)添加双酚 A 和 5.0% 聚苯乙烯微塑料的处理(BPA+PS-MPs5.0)。将 BPA 溶于乙醇, 均匀喷施于土壤表面, 将 PS-MPs 超声分散后与土壤混匀备用。

1.4 盆栽试验

将种子均匀置于土培发芽盒中, 每 7 d 随机调换发芽盒位置以减少系统误差。待诸葛菜幼苗长出真叶后, 选取生长状态一致的植株移栽至圆形钵(直径: 8.8 cm, 高: 7.2 cm)中, 在钵中装入 100 g 含有 BPA、PS-MPs 的土壤, 每钵种植 5 株诸葛菜。将播种好的钵放入人工气候培养箱中, 培养条件为: 恒温 25 °C、相对湿度 55%~65%、12 h 光照/12 h 黑暗。盆栽试验周期为 60 d, 在 60 d 时采集诸葛菜幼苗植株并分离地上部分与根部, 用于后续生理指标测定。

1.5 吸附试验

吸附动力学试验: 称取 5 g 土壤样品置于 50 mL 离心管中, PS-MPs 质量分数分别设置为 0.1%、1.0%、5.0%; 加入由超纯水配制的 BPA 储备液(100 mg/L)中, 密封后用恒温振荡器[(25±1) °C、150 r/min]振荡。分别于 1 h、4 h、8 h、12 h、24 h、48 h、72 h 取样, 立即经 0.45 μm 水系滤膜过滤, 每个样品设 3 次独立重复。取出的离心管经 4 000 r/min 离心 5 min 后, 上清液通过 0.22 μm 滤膜过滤, 转移至新离心管待处理。吸附动力学数据采用准一级动力学模型、准二级动力学模型进行拟合^[15]。

吸附等温试验: 固定 PS-MPs 的投加量(0.1 g/L、1.0 g/L、5.0 g/L), 再加入 100 mL 初始质量浓度分别为 1 400 ng/mL、2 800 ng/mL、4 200 ng/mL、5 600 ng/mL 和 7 000 ng/mL 的 BPA。初始质量浓度的设置主要根据前期的研究经验, 同时结合所研究地区实际土壤中 BPA 的含量范围(816~3 885 ng/g)进行设置^[5,15]。以 400 r/min 的速度振荡 24 h, 经 0.22 μm

水相滤膜过滤、稀释后, 测定 BPA 含量。为研究温度对 PS-MPs 吸附 BPA 效率的影响, 吸附等温试验在 25 °C 条件下进行。采用 Freundlich 和 Langmuir 模型证明 BPA 和 PS-MPs 在吸附平衡时的相互作用^[4]。

pH 值对土壤中 PS-MPs 吸附 BPA 的影响: 加入 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液和 0.1 mol/L 盐酸溶液将 pH 值调整为 2、4、6、8 和 10, 重复等温吸附试验, 以测定 pH 值对 PS-MP 吸附 BPA 的影响^[4]。

1.6 BPA 含量的测定

用去离子水清洗诸葛菜地上部分及根部, 自然风干后称质量、筛分; 分析前于 -30 °C 冰箱保存待测。取 2 g 根部和 2 g 地上部分, 用滤纸包好后放入索氏提取器, 以 220.0 mL 正己烷为提取液提取 12 h。提取液经无水硫酸钠过滤脱水后, 用旋转蒸发器(50 °C)和氮气仪(50 °C)浓缩至 1.0 mL, 经 2 μm 有机滤膜过滤, 转移至 1.5 mL 棕色样品瓶, 上机测试或于 -30 °C 保存。采用气相色谱质谱联用仪分析样品, 计算公式如下:

$$C = \frac{(A_s - A_b) \times V \times DF}{R \times m} \quad (1)$$

式中 C 为样品中双酚 A 含量 (ng/g); A_s 为样品峰面积; A_b 为空白峰面积; V 为最终提取液总体积 (mL); DF 为稀释因子; R 为标准曲线斜率; m 为样品质量 (g)。

1.7 转运系数

转运系数 (TF) 可以反映 BPA 在植株不同组织或器官间的迁移分配能力, 定义为地上部分 BPA 含量与根部 BPA 含量的比值, 计算公式如下:

$$TF = \frac{C_s}{C_r} \quad (2)$$

式中 TF 为转运系数; C_s 为地上部分双酚 A 的含量 (μg/kg); C_r 为根部双酚 A 的含量 (μg/kg)。

1.8 诸葛菜生长指标与生理生化指标的测定

采用电子天平测定诸葛菜地上部分鲜质量及根质量, 用金属直尺测量株高。利用叶面积仪 (YMJ-CHA3, 购自浙江托普云农科技股份有限公司) 测定叶面积。随后将叶片在 105 °C 下杀青 15 min, 转入 85 °C 烘干箱中烘至恒质量, 使用电子天平称量叶片干质量, 计算叶干物质含量, 叶干物质含量 = 叶干质量/叶鲜质量。使用根系扫描仪 (LA-S, 购自杭州万深检测科技有限公司) 对诸葛菜根系进行扫描成像, 并利用 WinRhizo 3b 软件分析图像, 获得根长、

根直径等指标的数据。采用氯化三苯基四氮唑法^[1]测定根系活力。叶绿素含量参照 Gao 等^[16]的方法测定:取新鲜叶片,以无水丙酮和超纯水(1:1,体积比)的混合液提取叶绿素,用紫外分光光度计检测。叶绿素荧光参数采用脉冲调制式荧光成像系统[购自世联博研(北京)科技有限公司]测定,测定前叶片需经 20 min 暗适应,测定的具体参数为:最大光化学效率(F_v/F_m)、单位反应中心吸收的光能(ABS/RC)、光合性能指数($PI Inst$)。

根系细胞活性鉴定:对诸葛菜根部用 10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的碘化丙啶(PI)进行染色,制片后在激光共聚焦显微镜[购自徕卡显微系统(上海)贸易有限公司]下观察,PI 染色后观察的激发光波长为 561 nm,发射光波长为 600~670 nm,呈红色荧光。采用电位法^[17]测定根际土壤 pH 值。参照 Li 等^[18]方法,测定过氧化氢酶(CAT)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、丙二醛(MDA)含量,检测试剂盒购于南京建成生物工程研究所。可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝染色法^[9]进行比色测定,可溶性糖含量通过苯酚比色法^[19]测定,脯氨酸含量通过茚三酮显色法^[20]测定。根据 Zhang 等^[21]的方法测

定总酚、类黄酮和生物碱的含量。

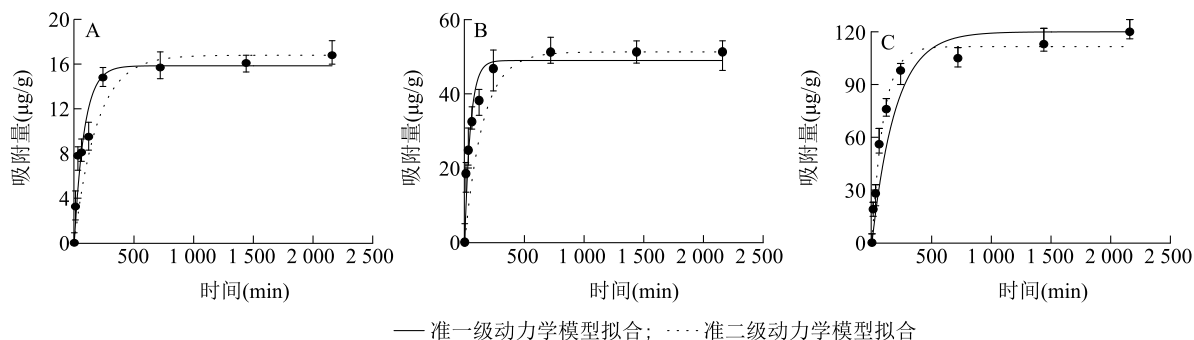
1.9 数据统计与分析

本研究采用 SPSS 27.0 软件进行数据分析。试验数据以“平均值 \pm 标准差”的形式表示,每组试验设 5 次重复。通过单因素方差分析(One-way ANOVA)检验不同处理间的差异显著性,显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。采用皮尔逊(Pearson)相关系数分析进行变量间的相关性检验。所有图表使用 Origin 2021 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 PS-MPs 与 BPA 的相互作用

为阐明 PS-MPs 对 BPA 的吸附行为,采用准一级、准二级动力学模型对吸附动力学数据进行拟合,其拟合曲线如图 1 所示,拟合参数如表 1 所示。结果表明,不同质量分数的 PS-MPs 对 BPA 的吸附在 0~500 min(初始阶段)增长速率较快,500~1 500 min 缓慢增长,1 500 min 后达到平衡。准二级动力学模型的拟合度优于准一级动力学模型。



A: 聚苯乙烯微塑料质量分数为 0.1%; B: 聚苯乙烯微塑料质量分数为 1.0%; C: 聚苯乙烯微塑料质量分数为 5.0%。

图 1 吸附动力学拟合

Fig.1 Adsorption kinetics fitting

表 1 吸附动力学拟合参数

Table 1 Fitting parameters of the adsorption kinetics

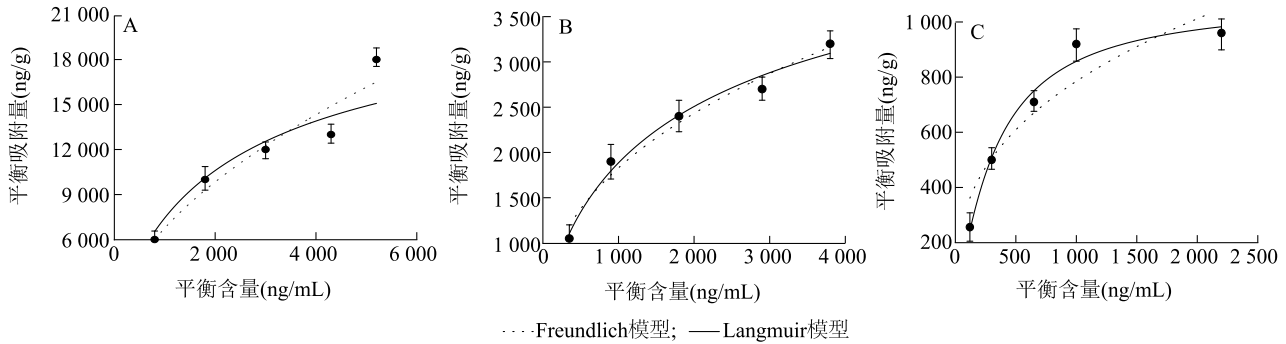
聚苯乙烯微塑料的质量分数(%)	准一级动力学模型		准二级动力学模型	
	平衡吸附量($\mu\text{g}/\text{g}$)	决定系数	平衡吸附量($\mu\text{g}/\text{g}$)	决定系数
0.1	11.50	0.91	16.80	0.97
1.0	48.96	0.96	51.30	0.99
5.0	111.58	0.95	120.00	0.98

分别采用 Langmuir 模型和 Freundlich 模型对吸附等温数据进行拟合,其拟合曲线如图 2 所示,拟合参数如表 2 所示。结果表明, Freundlich 模型[决定

系数(R^2) = 0.95~0.98]的拟合效果明显优于 Langmuir 模型(R^2 = 0.90~0.92)。当 PS-MPs 的质量分数为 0.1%时,吸附系数较大,吸附效能更优;当 PS-

MPs 的质量分数为 1.0% 和 5.0% 时, 吸附系数明显降低, PS-MPs 吸附能力变弱。5.0% PS-MPs 处理下的吸附强度 ($1/n$) 值最小, 而 0.1% PS-MPs 处理下

的 $1/n$ 值最大, 说明 0.1% PS-MPs 的吸附能力尚未达到饱和, 而 5.0% PS-MPs 的吸附能力已趋于饱和。



A: 聚苯乙烯微塑料质量分数为 0.1%; B: 聚苯乙烯微塑料质量分数为 1.0%; C: 聚苯乙烯微塑料质量分数为 5.0%。

图 2 吸附等温线拟合曲线

Fig.2 Fitting curves for the adsorption isotherms

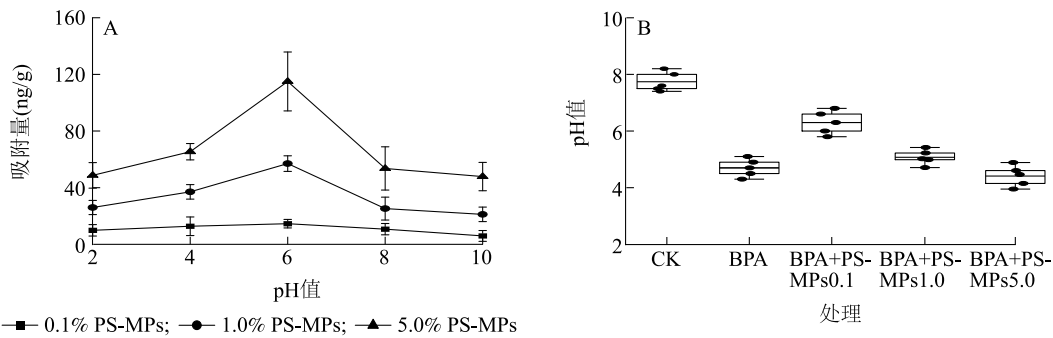
表 2 吸附等温参数

Table 2 Adsorption isotherm parameters

聚苯乙烯微塑料的质量分数 (%)	Freundlich 模型			Langmuir 模型	
	吸附系数 ($\mu\text{g/g}$)	吸附强度	决定系数	最大吸附容量 ($\mu\text{g/g}$)	决定系数
0.1	160.62	0.89	0.97	0.82	0.90
1.0	107.58	0.54	0.95	38.16	0.91
5.0	62.58	0.36	0.98	119.67	0.92

由图 3A 可知, 当 pH 值为 6 时, 不同质量分数的 PS-MPs 对 BPA 的吸附量均达到最高, 此时 PS-MPs 表面电荷趋近于零, 静电吸引力最大而斥力最小。该吸附过程进一步影响植物根际环境, 与 CK

相比, BPA 处理的 pH 值下降至 4.77。与 BPA 处理相比, BPA+PS-MPs0.1 处理和 BPA+PS-MPs1.0 处理的 pH 值分别上升至 6.32、5.63 (图 3B)。



PS-MPs, 聚苯乙烯微塑料。CK: 未添加双酚 A 和聚苯乙烯微塑料的对照; BPA: 添加双酚 A 的处理; BPA+PS-MPs0.1: 添加双酚 A 和 0.1% 聚苯乙烯微塑料的处理; BPA+PS-MPs1.0: 添加双酚 A 和 1.0% 聚苯乙烯微塑料的处理; BPA+PS-MPs5.0: 添加双酚 A 和 5.0% 聚苯乙烯微塑料的处理。

图 3 pH 值对聚苯乙烯微塑料吸附双酚 A 的影响

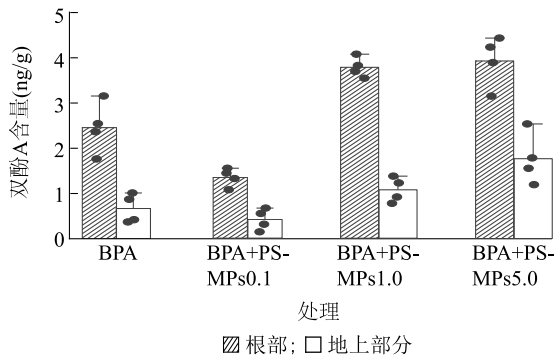
Fig.3 Effects of pH value on the adsorption of bisphenol A (BPA) by polystyrene microplastics (PS-MPs)

2.2 BPA 在诸葛菜中的转运与累积

图 4 显示, 所有处理中诸葛菜根部 BPA 含量均

显著高于地上部分 ($P < 0.05$)。与 BPA 处理相比, BPA+PS-MPs0.1 处理下诸葛菜根部 BPA 含量显著

下降了 39.73%,而 BPA+PS-MPs5.0 处理下诸葛菜根部 BPA 含量显著上升了 75.00%,随着 PS-MPs 质量分数的增加,根部 BPA 含量总体呈先降低后升高的趋势。

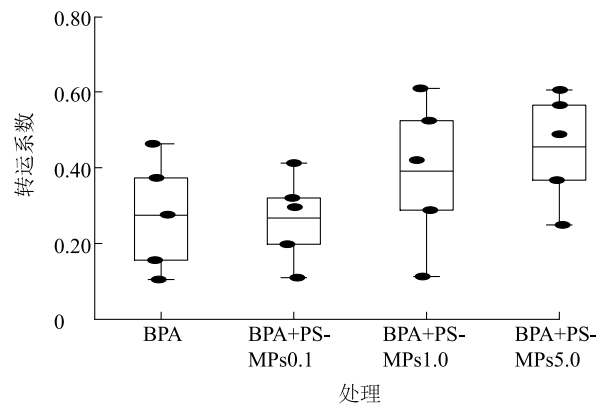


BPA:添加双酚 A 的处理;BPA+PS-MPs0.1:添加双酚 A 和 0.1% 聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs1.0:添加双酚 A 和 1.0% 聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs5.0:添加双酚 A 和 5.0% 聚苯乙烯微塑料的处理。

图 4 双酚 A 在诸葛菜中的转运与累积

Fig.4 Translocation and accumulation of bisphenol A (BPA) in *Orychophragmus violaceus*

图 5 显示,不同处理下 BPA 的转运系数为 0.25~0.48,均小于 1.00。与 BPA 处理相比,BPA+PS-MPs1.0 处理和 BPA+PS-MPs5.0 处理下 BPA 的转运系数明显提高。总体上,随着 PS-MPs 质量分数的升高,转运效应更为明显。



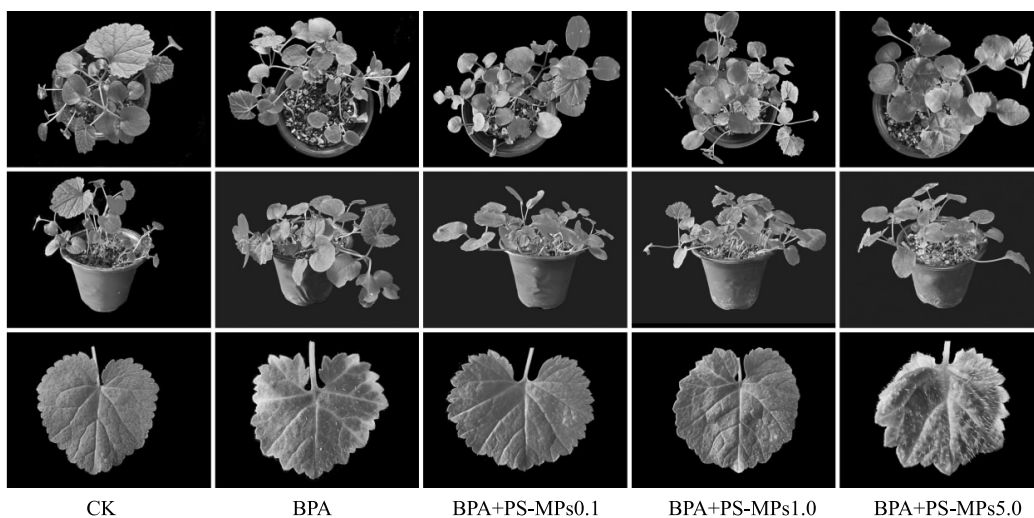
BPA:添加双酚 A 的处理;BPA+PS-MPs0.1:添加双酚 A 和 0.1% 聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs1.0:添加双酚 A 和 1.0% 聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs5.0:添加双酚 A 和 5.0% 聚苯乙烯微塑料的处理。

图 5 不同处理下诸葛菜中双酚 A 的转运系数

Fig.5 Translocation factors of bisphenol A in *Orychophragmus violaceus* under different treatments

2.3 PS-MPs 和 BPA 对诸葛菜表型参数的影响

图 6 显示,不同处理对诸葛菜生长的影响存在明显差异。与 CK 相比,BPA 处理显著抑制了植株生长,并引发叶片黄化、皱缩等。添加适量的 PS-MPs 对 BPA 的植物毒性具有一定的调节作用。添加低质量分数 PS-MPs(0.1%PS-MPs)的处理可部分缓解 BPA 引起的毒害表型,而添加高质量分数 PS-MPs(5.0%PS-MPs)的处理则进一步加剧了叶片损伤程度。



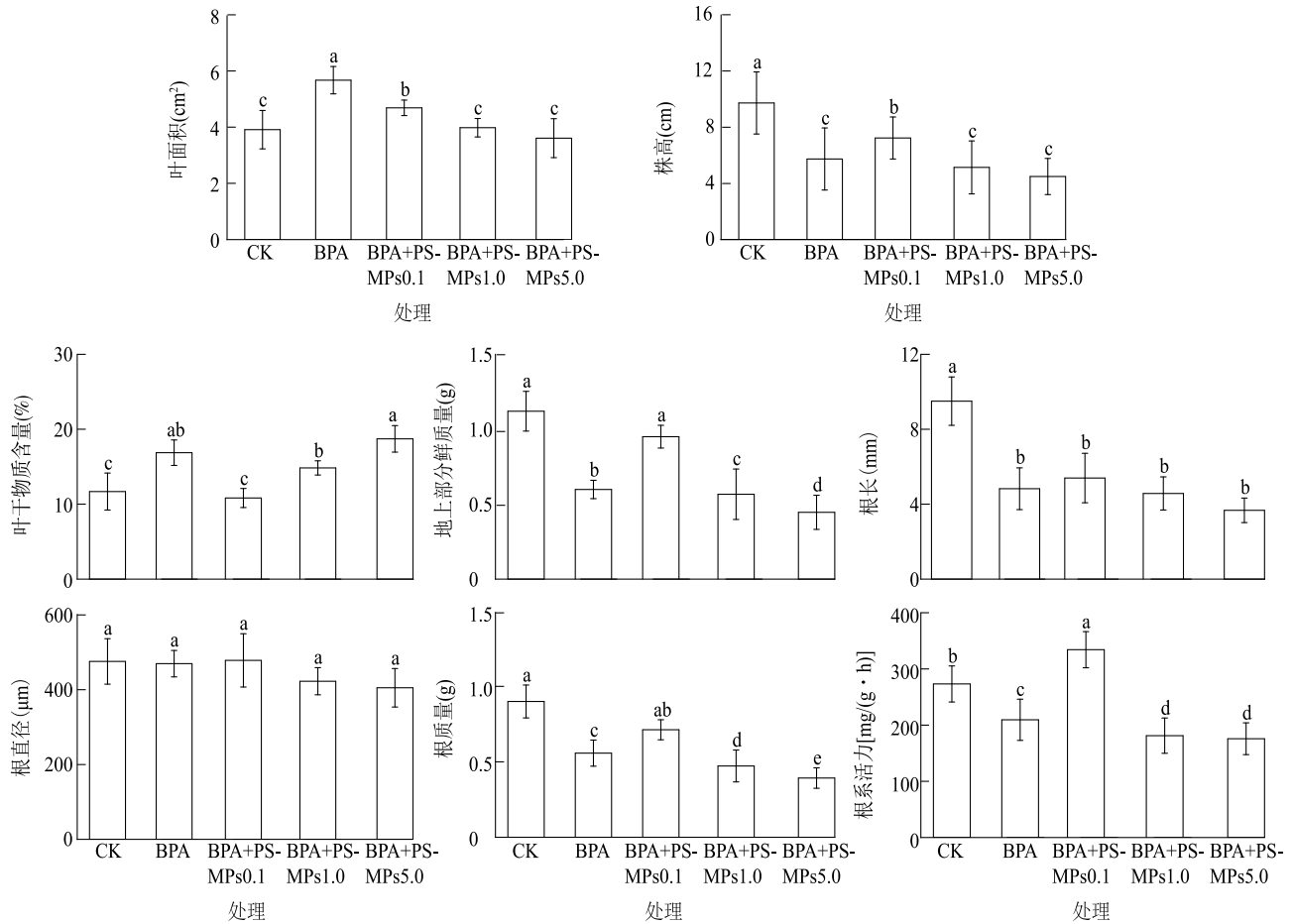
CK:未添加双酚 A 和聚苯乙烯微塑料的对照;BPA:添加双酚 A 的处理;BPA+PS-MPs0.1:添加双酚 A 和 0.1% 聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs1.0:添加双酚 A 和 1.0% 聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs5.0:添加双酚 A 和 5.0% 聚苯乙烯微塑料的处理。

图 6 双酚 A 和不同质量分数的聚苯乙烯微塑料对诸葛菜表型的影响

Fig.6 Effects of bisphenol A and different mass fractions of polystyrene microplastics on the phenotype of *Orychophragmus violaceus*

图 7 显示,与 CK 相比,BPA 处理使诸葛菜的株高、地上部分鲜质量、根长、根质量、根系活力分别显著降低 41.03%、46.59%、49.21%、49.17%、23.33% ($P < 0.05$),叶面积和叶干物质含量则分别显著增加 45.00%、44.39% ($P < 0.05$)。与 BPA 处理相比,BPA+

PS-MPs0.1 处理使株高、地上部分鲜质量、根质量、根系活力分别显著增加 26.09%、48.85%、33.88%、40.55% ($P < 0.05$),而 BPA + PS-MPs1.0、BPA + PS-MPs5.0 处理则使根质量、根系活力显著降低 ($P < 0.05$),且降幅随 PS-MPs 质量分数升高而增大。



CK:未添加双酚 A 和聚苯乙烯微塑料的对照;BPA:添加双酚 A 的处理;BPA+PS-MPs0.1:添加双酚 A 和 0.1% 聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs1.0:添加双酚 A 和 1.0% 聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs5.0:添加双酚 A 和 5.0% 聚苯乙烯微塑料的处理。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 7 双酚 A 和不同质量分数的聚苯乙烯微塑料对诸葛菜生长指标的影响

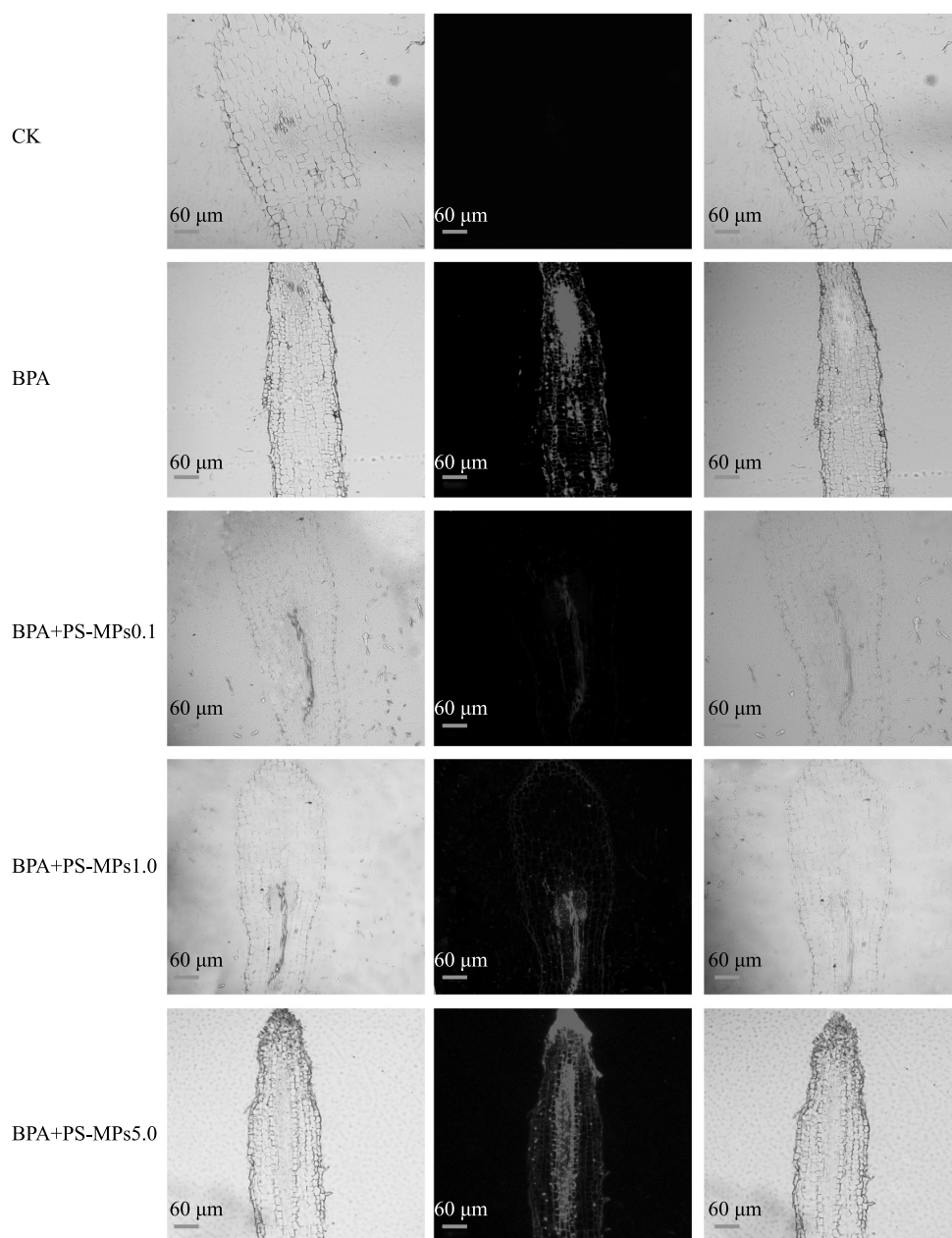
Fig.7 Effects of bisphenol A and different mass fractions of polystyrene microplastics on the growth indicators of *Orychophragmus violaceus*

碘化丙啶 (PI) 染色结果 (图 8) 显示,BPA 处理、BPA+PS-MPs0.1 处理、BPA+PS-MPs1.0 处理、BPA+PS-MPs5.0 处理下的诸葛菜根系荧光强度均高于 CK,表明根系细胞受到明显损伤。BPA 处理和 BPA+PS-MPs5.0 处理的荧光强度高于 BPA+PS-MPs0.1 处理和 BPA+PS-MPs1.0 处理。

2.4 PS-MPs 和 BPA 对诸葛菜光合参数与氧化应激的影响

图 9 显示,与 CK 相比,BPA 处理使诸葛菜光合

色素含量显著下降,其中叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量分别降低 18.09%、16.76%和 17.54% ($P < 0.05$)。然而,BPA 与 PS-MPs 复合处理的光合色素含量较单一 BPA 处理总体提高,且增幅总体随 PS-MPs 质量分数的升高呈降低趋势。此外,BPA 处理使光合系统受到明显抑制,与 CK 相比,BPA 处理的最大光化学效率 (F_v/F_m) 和光合性能指数 ($PI Ins$) 分别显著下降 38.47% 和 36.24% ($P < 0.05$),同时单位反应中心吸收的光能 (ABS/RC) 显著提



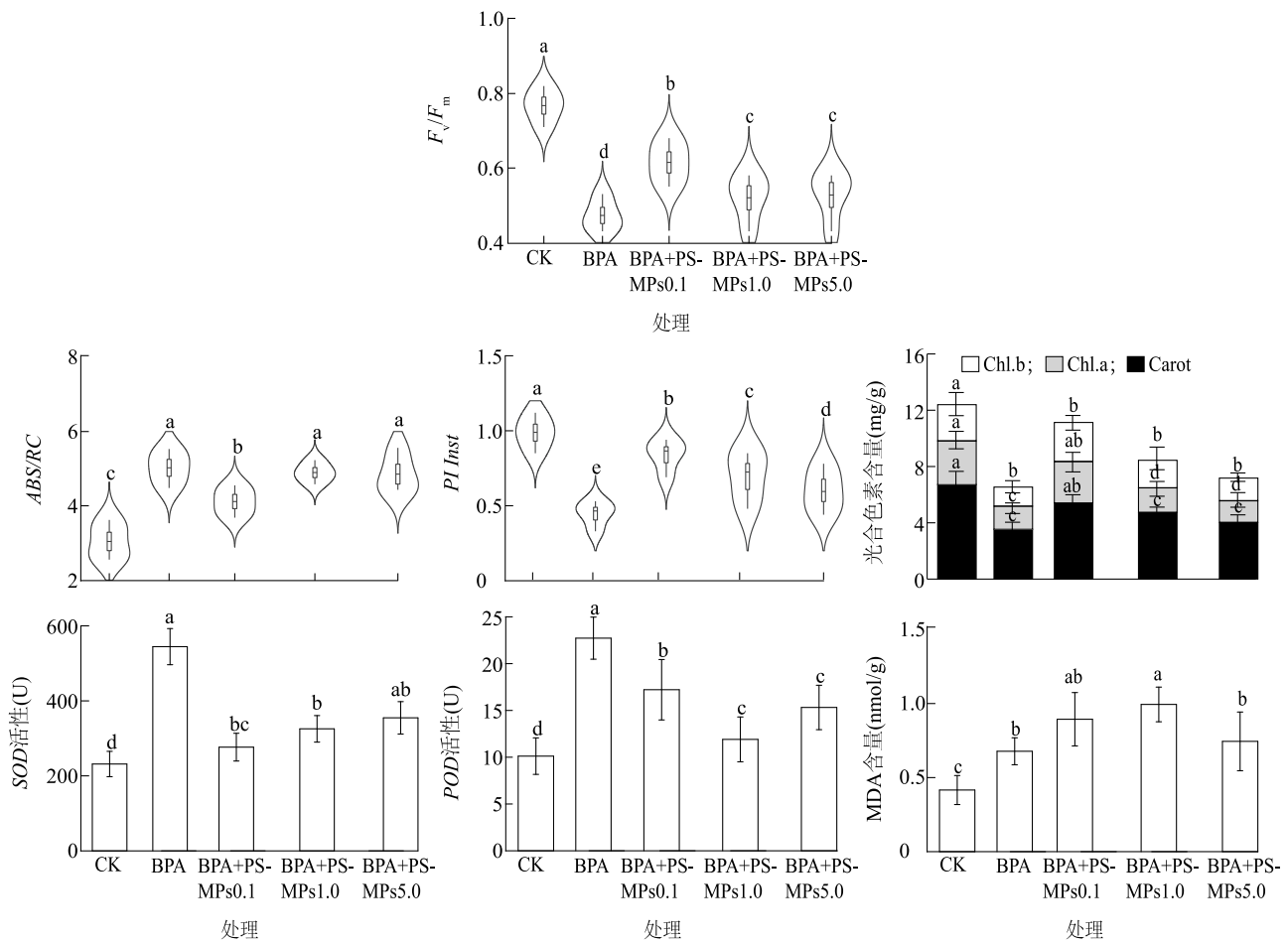
CK:未添加双酚 A 和聚苯乙烯微塑料的对照;BPA:添加双酚 A 的处理;BPA+PS-MPs0.1:添加双酚 A 和 0.1% 聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs1.0:添加双酚 A 和 1.0% 聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs5.0:添加双酚 A 和 5.0% 聚苯乙烯微塑料的处理。

图 8 双酚 A 与不同质量分数的聚苯乙烯微塑料对诸葛菜根系细胞活性的影响

Fig.8 Effects of bisphenol A and different mass fractions of polystyrene microplastics on the root cell viability of *Orychophragmus violaceus*

高 34.04% ($P < 0.05$)。在 BPA 与 PS-MPs 的复合处理下,部分光合功能得到恢复,与 BPA 处理相比,BPA+PS-MPs0.1 处理、BPA+PS-MPs1.0 处理和 BPA+PS-MPs5.0 处理的 F_v/F_m 分别提高 30.16%、10.05% 和 11.64% ($P < 0.05$), PI_{Inst} 分别显著提高 87.71%、55.31% 和 34.64% ($P < 0.05$), BPA+PS-MPs0.1 处理的 ABS/RC 显著降低

18.07% ($P < 0.05$)。与 CK 相比,BPA 处理使超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、丙二醛 (MDA) 含量分别显著提升了 135.10%、50.30% ($P < 0.05$)。与 BPA 处理相比,BPA 与 PS-MPs 的复合处理显著降低了过氧化物酶 (POD) 活性。此外,BPA+PS-MPs1.0 处理下 MDA 含量较 BPA 处理显著提高 ($P < 0.05$)。



F_v/F_m :最大光化学效率; ABS/RC :单位反应中心吸收的光能; $PI Inst$:光合性能指数;Chl.a:叶绿素 a;Chl.b:叶绿素 b;Carot:类胡萝卜素; SOD :超氧化物歧化酶; POD :过氧化物酶;MDA:丙二醛。CK:未添加双酚 A 和聚苯乙烯微塑料的对照;BPA:添加双酚 A 的处理;BPA+PS-MPs0.1:添加双酚 A 和 0.1% 聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs1.0:添加双酚 A 和 1.0% 聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs5.0:添加双酚 A 和 5.0% 聚苯乙烯微塑料的处理。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 9 双酚 A 与不同质量分数的聚苯乙烯微塑料对诸葛菜光合作用和氧化应激响应

Fig.9 Effects of bisphenol A and different mass fractions of polystyrene microplastics on the photosynthesis and oxidative stress responses of *Orychophragmus violaceus*

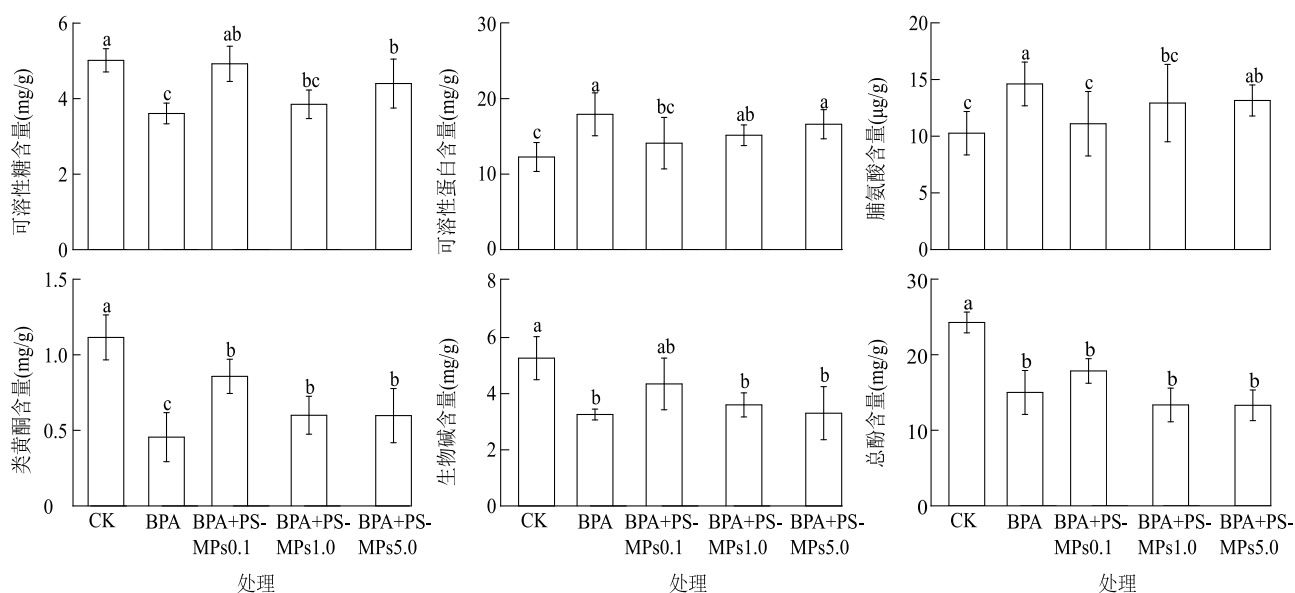
2.5 PS-MPs 和 BPA 对诸葛菜渗透调节物质与次生代谢物的影响

图 10 显示,与 CK 相比,BPA 处理使可溶性糖含量显著降低 28.06% ($P < 0.05$),而可溶性蛋白含量和脯氨酸含量分别显著上升 46.13% 和 42.29% ($P < 0.05$)。与 BPA 处理相比,BPA+PS-MPs0.1 处理下可溶性糖含量显著增加了 36.45% ($P < 0.05$),可溶性蛋白含量显著降低了 21.33% ($P < 0.05$),脯氨酸含量显著降低了 24.01% ($P < 0.05$)。与 CK 相比,BPA 处理的类黄酮含量、生物碱含量、总酚含量分别显著降低了 59.46%、38.13%、50.67% ($P < 0.05$),而 BPA 和 PS-MPs 复合处理的类黄酮含量

显著高于 BPA 处理。

2.6 相关性分析

表 3 显示,根部 BPA 含量与脯氨酸含量、总酚含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与 POD 活性、 SOD 活性呈显著正相关 ($P < 0.05$),与叶干物质含量、根长、株高、可溶性蛋白含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$),与根系活力、根直径呈显著负相关 ($P < 0.05$)。株高与叶绿素总量、可溶性糖含量、 F_v/F_m 、根直径呈显著正相关 ($P < 0.05$),与类黄酮含量、生物碱含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。地上部分鲜质量与叶绿素总量、根长呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与类黄酮含量、生物碱含量呈显著负相关 ($P <$



CK:未添加双酚 A 和聚苯乙烯微塑料的对照;BPA:添加双酚 A 的处理;BPA+PS-MPs0.1:添加双酚 A 和 0.1%聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs1.0:添加双酚 A 和 1.0%聚苯乙烯微塑料的处理;BPA+PS-MPs5.0:添加双酚 A 和 5.0%聚苯乙烯微塑料的处理。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 10 双酚 A 与不同质量分数的聚苯乙烯微塑料对诸葛菜渗透调节物质与次生代谢物的影响

Fig.10 Effects of bisphenol A and different mass fractions of polystyrene microplastics on osmoregulatory substances and secondary metabolites in *Orychophragmus violaceus*

0.05)。叶面积与根长、叶绿素总量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量呈显著正相关 ($P < 0.05$),与生物碱含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。叶绿素总量与可溶性糖含量呈显著正相关 ($P < 0.05$),与 *POD* 活性、*SOD* 活性、类黄酮含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

3.1 PS-MPs 与 BPA 相互作用对诸葛菜的影响

本研究结合吸附动力学、吸附等温线及根际 pH 值分析,揭示了 BPA 与 PS-MPs 的相互作用机制。结果表明,PS-MPs 对 BPA 的吸附行为符合准二级动力学模型与 Freundlich 模型,说明这个吸附是以化学吸附为主的多层非均匀吸附。PS-MPs 的质量分数是调控吸附容量与饱和特性的关键因素,该结果与胡雅琪等^[5]的研究结果一致。本研究发现,PS-MPs 通过吸附 BPA 减轻了对植物的胁迫,从而降低根系有机酸的分泌量,导致根际 pH 值升高,这与 Li 等^[13]的研究结果一致。植物通过产生多种根际分泌物应对环境胁迫,其中有机酸分泌是抵抗非生物胁迫的有效机制。

本研究发现,在 BPA、BPA+PS-MPs0.1、BPA+PS-MPs1.0、BPA+PS-MPs5.0 处理中,随着 PS-MPs 质量分数的增加,根部 BPA 含量呈先降低后升高趋势。低质量分数的 PS-MPs 通过吸附根际 BPA,减少其有效性;而中高质量分数的 PS-MPs 则因破坏根系膜结构,加剧 BPA 在根中累积^[6]。该结果与玉米等作物中 BPA 主要累积于根系的研究结果^[5,8]一致。本研究发现,诸葛菜中 BPA 的转运系数范围为 0.25~0.48,说明 BPA 在诸葛菜体内迁移能力有限,主要滞留于根部,有利于降低其环境扩散风险^[22]。PS-MPs 易在根系表面富集,通过破坏根部组织完整性及改变膜转运功能,增强 BPA 的吸收^[14]。这种根系结构变化可能进一步提升 BPA 进入细胞的能力,并促进其向上转运至地上部分。

3.2 PS-MPs 和 BPA 对诸葛菜生长的影响

研究表明,BPA 和 PS-MPs 均能影响植物生长^[1-2]。本研究中,与对照相比,BPA 处理显著降低了诸葛菜的株高、地上部分鲜质量、根长、根质量及根系活力。其原因可能在于 BPA 干扰植物代谢过程、抑制细胞分裂与伸长,并造成氧化损伤与膜系统不稳定,从而抑制植株生长并削弱根系吸收功

表 3 不同指标之间的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between different indicators

指标	叶面积	株高	地上部分鲜质量	叶干物质含量	根质量	根长	根系活力	根直径	MDA 含量	POD 活性	SOD 活性	F_v/F_m	叶绿素总量	可溶性糖含量	可溶性蛋白含量	脯氨酸含量	类黄酮含量	总酚含量	生物碱含量	根部 BPA 含量	
叶面积	1.000																				
株高	-0.416	1.000																			
地上部分鲜质量	-0.346	0.361	1.000																		
叶干物质含量	-0.139	-0.447	-0.096	1.000																	
根质量	-0.070	-0.073	0.302	-0.262	1.000																
根长	0.522*	0.388	0.639**	-0.416	0.428	1.000															
根系活力	-0.175	0.490	0.209	-0.761**	0.405	0.371	1.000														
根直径	-0.477	0.590*	0.236	-0.216	0.181	0.414	0.348	1.000													
MDA 含量	0.314	-0.209	-0.006	0.088	-0.092	-0.131	-0.136	-0.179	1.000												
POD 活性	0.038	-0.137	-0.312	-0.253	0.375	-0.108	0.288	-0.192	-0.081	1.000											
SOD 活性	-0.066	0.121	0.258	0.274	-0.604*	-0.037	-0.450	-0.122	0.295	-0.528*	1.000										
F_v/F_m	0.336	0.597*	-0.496	0.344	0.272	-0.235	-0.374	-0.070	0.291	0.074	-0.307	1.000									
叶绿素总量	0.354*	0.303*	0.277**	-0.381	0.223	0.075	0.238	-0.395	0.455	-0.508*	-0.108*	0.216	1.000								
可溶性糖含量	0.282*	0.469*	0.747*	-0.461	0.033	0.097	0.477	0.083	-0.202	0.507*	-0.085	-0.595*	0.511*	1.000							
可溶性蛋白含量	0.526*	0.471	-0.004	-0.124	-0.060	0.155	0.510*	0.648**	-0.401	0.022	-0.163	-0.308	-0.204	0.357	1.000						
脯氨酸含量	0.548*	0.585*	0.323	-0.226	0.088	0.475	0.422	0.733**	-0.256	-0.227	0.023	-0.298	-0.320	0.230	0.714**	1.000					
类黄酮含量	-0.327	-0.760*	-0.359*	0.200	-0.047	0.256	0.034	0.245	-0.832*	-0.403	-0.145	-0.183	-0.643*	-0.156	0.323	0.233	1.000				
总酚含量	-0.231	0.181	-0.319	-0.499*	0.253	0.181	0.559*	0.244	-0.412	0.384	-0.417	0.003	0.182	0.303	0.449	0.506*	-0.172	1.000			
生物碱含量	-0.380*	-0.492*	-0.382*	-0.421	0.106	0.219	0.443	0.515*	-0.522*	0.209	-0.247	-0.265	-0.096	0.275	0.485	0.217	0.068	0.420	1.000		
根部 BPA 含量	0.274	-0.659**	-0.153	-0.706**	-0.084	-0.441**	-0.800*	-0.546*	0.141	0.751*	0.472*	0.407	-0.063	-0.420	-0.636**	0.785**	-0.054	0.625**	-0.391	1.000	

F_v/F_m : 最大光化学效率; SOD: 超氧化物歧化酶; POD: 过氧化物酶; MDA: 丙二醛; BPA: 双酚 A。* 表示显著相关($P < 0.05$); ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。

能^[13]。在 PS-MPs 和 BPA 的复合处理下,低质量分数的 PS-MPs 可缓解 BPA 对植物生物量的抑制,这可能是由于 PS-MPs 对 BPA 的吸附作用,降低了植物根系对 BPA 的吸收^[22]。然而,中高质量分数的 PS-MPs 与 BPA 复合处理则表现出协同抑制效应,其原因可能在于较高质量分数 PS-MPs 对 BPA 的吸附趋于饱和,并诱发额外的胁迫效应^[23-24]。相关性分析结果表明,株高、叶面积、地上部分鲜质量与叶绿素总量呈显著或极显著正相关,这说明 BPA 和 PS-MPs 对诸葛菜生物量的影响机制可能涉及光合色素含量的变化。此外,根系形态对 BPA 吸收具有显著影响。根长、根系活力、根直径与根部 BPA 含量呈负相关。这可能是由于细根的比表面积大、根毛密集,更易吸附和吸收 BPA;粗根则因表皮角质化形成物理阻碍^[25]。进一步分析发现,株高、地上部分鲜质量与类黄酮含量、生物碱含量呈显著负相关,而与可溶性糖含量呈显著正相关,该结果与 Zhao 等^[26]的研究结果相符。中高质量分数的 PS-MPs 加剧了 BPA 积累,迫使植物将更多资源投入抗氧化物质合成,导致可溶性糖消耗与生长被抑制。

3.3 PS-MPs 和 BPA 对诸葛菜光合作用及氧化应激的影响

光合作用作为一种重要的生理过程,对植物生长和能量生产至关重要。本研究结果显示,与 CK 相比,BPA 处理显著降低了诸葛菜叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量,这与 Ahmadabadi 等^[27]的研究结果一致,这可能是由于 BPA 破坏光系统,降低光合电子传递速率,进而抑制光合色素合成。与 BPA 处理相比,PS-MPs 与 BPA 复合处理整体上增加了光合色素含量。我们推测,PS-MPs 通过吸附土壤中的 BPA,降低了环境中或植物体内 BPA 的有效含量,从而缓解了 BPA 对光合色素合成的抑制作用。叶绿素荧光参数常被用于反映非生物胁迫下的光合能力。在本研究中,与 CK 相比,BPA 处理显著降低 F_v/F_m 、 $PI Inst$,表明作物的光能转化效率受到抑制^[28]。与 BPA 处理相比,PS-MPs 与 BPA 复合处理提高了 F_v/F_m 、 $PI Inst$,说明 PS-MPs 可能通过调节叶片净光合速率,在一定程度上缓解 BPA 胁迫对光合作用的破坏。Li 等^[13]验证了这一推测,他们发现 PS-MPs 能够影响水稻的净光合速率。

非生物胁迫会破坏植物细胞的活性氧(ROS)代谢平衡,引发氧化应激。本研究中,BPA 处理及

BPA 与 PS-MPs 复合处理均显著提高了 *SOD* 和 *POD* 的活性,并导致 MDA 含量上升,表明细胞可能发生了膜脂过氧化。*SOD* 和 *POD* 作为关键的抗氧化酶,分别负责清除超氧阴离子和 H_2O_2 ,其活性升高是植物应对氧化胁迫的典型生理响应^[29]。相关性分析结果表明,*SOD* 和 *POD* 的活性均与根部 BPA 含量呈显著正相关,这与 Zhang 等^[14]的研究结果一致,BPA 积累导致线粒体 ROS 水平升高,进而上调抗氧化酶基因表达并增强其活性。此外,PS-MPs 不仅可以作为 BPA 的载体,促进根际的 BPA 富集,还可以通过物理摩擦破坏膜结构,加剧 ROS 生成,引发 *SOD* 和 *POD* 的活性协同升高^[22]。

3.4 PS-MPs 和 BPA 对诸葛菜渗透调节物质、次生代谢物的影响

为应对非生物胁迫,植物通常积累可溶性蛋白与糖类等渗透调节物质,以维持细胞渗透平衡并保护生物大分子及细胞结构^[30]。本研究结果显示,与 CK 相比,BPA 处理导致可溶性糖含量显著下降,而可溶性蛋白与脯氨酸的含量显著上升,说明 BPA 胁迫使植物代谢资源发生重新分配,糖代谢受到抑制,而渗透调节物质合成途径被激活,以缓解 BPA 引发的氧化与渗透胁迫^[30]。值得注意的是,与 BPA 处理相比,BPA+PS-MPs0.1 处理显著提高了可溶性糖含量,同时显著降低了可溶性蛋白、脯氨酸含量。这说明低质量分数 PS-MPs 可能通过吸附 BPA 减轻其生物毒性,缓解 BPA 对糖代谢的抑制,并降低植物对渗透调节物质合成的依赖,反映出整体胁迫程度减轻^[22]。相关性分析结果表明,可溶性糖含量与叶绿素总量呈显著正相关,说明光合作用是糖合成的主要来源^[31]。BPA 和 PS-MPs 的胁迫可能通过破坏叶绿体结构与功能,削弱光能吸收与碳同化效率,从而抑制可溶性糖的积累^[6]。此外,根部 BPA 含量与可溶性蛋白含量呈极显著负相关,而与脯氨酸含量呈极显著正相关。这可能是由于 BPA 积累引发 ROS 增多并破坏渗透稳定,促使植物优先将代谢资源投向脯氨酸等高效抗氧化与渗透调节物质,以在有限资源的条件下维持细胞稳态,减少耗能较高的蛋白质合成^[32]。

植物次生代谢物在抵御氧化胁迫中发挥关键作用。本研究发现,与 CK 相比,BPA 处理显著降低了类黄酮、生物碱、总酚含量,进一步分析发现,类黄酮、生物碱含量与丙二醛含量呈显著负相关,这与吴

艳等^[33]的研究结果一致,在持续胁迫下,维持高活性酶促抗氧化系统能耗较高,而类黄酮与生物碱等次生代谢物稳定性强,可持久发挥抗氧化功能,构成一种代谢经济型防御策略。因此,植物通过由酶促系统主导转向强化非酶促系统,实现抗氧化防御策略的动态转换,得以在能量限制条件下协调生长与达到抗逆的平衡^[6,20,33]。此外,BPA和PS-MPs复合处理的类黄酮含量高于BPA处理。Zhang等^[14]指出,微塑料暴露可能会刺激植物次生代谢物积累。其机制可能涉及PS-MPs通过诱导黄酮类生物合成途径关键基因表达上调,增强植物对污染胁迫的适应性响应。

参考文献:

- [1] ABRAHAM A, CHAKRABORTY P. A review on sources and health impacts of bisphenol A [J]. *Reviews on Environmental Health*, 2020, 35(2): 201-210.
- [2] TORRES-GARCÍA J L, AHUACTZIN-PÉREZ M, FERNÁNDEZ F J, et al. Bisphenol A in the environment and recent advances in biodegradation by fungi [J]. *Chemosphere*, 2022, 303: 134940.
- [3] LI G L, ZHAO X X, IQBAL B, et al. The effect of soil microplastics on *Oryza sativa* L. root growth traits under alien plant invasion [J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11: 1172093.
- [4] 李 珍, 孙丽娜, 范 琪, 等. 土壤中聚乙烯和聚苯乙烯微塑料对多环芳烃的吸附行为和机理分析 [J]. *环境科学学报*, 2022, 42(11): 232-244.
- [5] 胡雅琪, 姜婷婷, 马 蒙, 等. 再生水灌溉双酚 A 和壬基酚在玉米中的分布、转运及影响 [J]. *中国水利水电科学研究院学报 (中英文)*, 2024, 22(6): 570-578.
- [6] ZHANG L L, SHI A Y, YUAN C W, et al. Microplastics impacts the toxicity of antibiotics on *Pinellia ternata*: an exploration of their effects on photosynthesis, oxidative stress homeostasis, secondary metabolism, the AsA-GSH cycle, and metabolomics [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2025, 223: 109883.
- [7] 蒋永锋, 刘水草, 邹东栋, 等. 微塑料 PBAT 和抗生素 OTC 对玉米种子萌发、幼苗生长及其根际土壤微生物群落的影响研究 [J]. *生态毒理学报*, 2025, 20(4): 417-428.
- [8] NOUREDDIN I M, FURUMOTO T, ISHIDA Y, et al. Absorption and metabolism of bisphenol A, a possible endocrine disruptor, in the aquatic edible plant, water *Convolvulus (Ipomoea aquatica)* [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2004, 68(6): 1398-1402.
- [9] BAKIR A, ROWLAND S J, THOMPSON R C. Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 185: 16-23.
- [10] 连加攀, 沈孜孜, 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.
- [11] 徐 倩, 郭尚敬, 魏慧恬, 等. 外源 BABA 对 NaCl 胁迫下二月兰幼苗生长和生理特性的影响 [J]. *北方园艺*, 2020(12): 75-81.
- [12] 姜胜行, 刘一博, 李 威, 等. 二月兰对铜污染的耐受与富集分析 [J]. *上海师范大学学报 (自然科学版)*, 2022, 51(4): 483-491.
- [13] LI Y, QIN W W, XIN X M, et al. Dynamic impact of polyethylene terephthalate nanoplastics on antibiotic resistance and microplastics degradation genes in the rhizosphere of *Oryza sativa* L. [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 487: 137173.
- [14] ZHANG L L, CHENG Y N, QIAN Y G, et al. Phytotoxicity and accumulation of BPS to *Pistia stratiotes* under the influence of microplastics [J]. *Chemosphere*, 2022, 307: 135854.
- [15] 胡 莺, 孙姣霞, 秦 燕. 双酚 A 在消落带土壤中的吸附/解吸及降解行为 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(10): 5705-5713.
- [16] GAO H H, LIU Q, YAN C R, et al. Macro-and/or microplastics as an emerging threat effect crop growth and soil health [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 186: 106549.
- [17] 张巧莉, 吴永波, 蒲可逸. 施加生物炭对盐碱土中桑树幼苗生长、生理及土壤性质的影响 [J]. *植物资源与环境学报*, 2025, 34(5): 33-42.
- [18] LI X, LIU W T, SHI R Y, et al. 6PPD and 6PPD-Q inhibit macrophyte photosynthesis by targeting photosynthetic antenna: multiomics and computational modeling insights [J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(26): 13216-13226.
- [19] 安明哲, 张 岩, 张 好, 等. 枯草芽孢杆菌对盐胁迫下高粱种子萌发、幼苗生长及其生理特性的影响 [J]. *山东农业科学*, 2022, 54(12): 81-90.
- [20] 吴 敏, 张文辉, 周建云, 等. 干旱胁迫对栓皮栎幼苗细根的生长与生理生化指标的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4223-4233.
- [21] ZHANG D, ZHANG L L, YUAN C W, et al. Brassinolide as potential rescue agent for *Pinellia ternata* grown under microplastic condition: insights into their modulatory role on photosynthesis, redox homeostasis, and AsA-GSH cycling [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 470: 134116.
- [22] LI X Y, WANG L H, WANG S M, et al. A preliminary analysis of the effects of bisphenol A on the plant root growth via changes in endogenous plant hormones [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 150: 152-158.
- [23] PANCHAL P, MILLER A J, GIRI J. Organic acids: versatile stress-response roles in plants [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2021, 72(11): 4038-4052.
- [24] MU L, WANG M Y, TANG X, et al. Synergistic effect of arsenate and microplastics and its toxicity mechanism on lettuce [J]. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2025, 7: 924-934.
- [25] QIAN S H, LU H Y, XIONG T T, et al. Bioaccumulation of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in ferns; effect of PFAS molecular structure and plant root characteristics [J]. *Environ-*

- mental Science & Technology, 2023, 57(11):4443-4453.
- [26] ZHAO S W, ZHANG Q R, CHEN X M, et al. Biochar counteracts the negative effects of microplastics on physiological and biochemical characteristics and leaf metabolism in *Zea mays* L. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025, 496:139355.
- [27] AHMADABADI Z, ZAREI M, YASREBI J, et al. The effect of bio/organic fertilizers on the phytotoxicity of sulfadiazine to *Echium amoenum* in a calcareous soil [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 208:111408.
- [28] XIAO H Y, YU H X, FREW A, et al. Microplastics aggravate zinc deficiency-induced inhibition of physiological-biochemical characteristics in apple rootstock *Malus hupehensis* (Pamp.) Rehd seedlings [J]. Emerging Contaminants, 2025, 11(1):100421.
- [29] JIANG Z Z, ZHU H G, ZHU H Y, et al. Exogenous ABA enhances the antioxidant defense system of maize by regulating the AsA-GSH cycle under drought stress [J]. Sustainability, 2022, 14(5):3071.
- [30] WANG M, XIAO Y, LI Y, et al. Optimistic effects of galaxolide and polystyrene microplastic stress on the physio-biochemical characteristics and metabolic profiles of an ornamental plant [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2023, 196:350-360.
- [31] 杨芯芳. 水分处理对枣裂果及品质的影响 [D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2021.
- [32] GAO M L, LIU Y, DONG Y M, et al. Effect of polyethylene particles on dibutyl phthalate toxicity in lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 401:123422.
- [33] 吴艳, 朴美兰, 刘孝良, 等. 抗寒桑经霜前后次生代谢物与抗氧化活性成分的动态变化 [J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(4):110-116.

(责任编辑:王妮)