不同类型微塑料对黄芩生长生理及代谢的影响

高雅楠, 王论言, 李欣雨, 贾向前, 张彦龙, 刘洋

引用本文:
高雅楠, 王论言, 李欣雨, 等. 不同类型微塑料对黄芩生长生理及代谢的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(8): 2120–2133.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2024–0920

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

聚苯乙烯微球对菜心种子及幼苗的毒性效应

黄献培, 向垒, 郭静婕, 潘一峰, 陈逸平, 李彦文, 莫测辉

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 926–933 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–1473

微塑料与铅复合污染对水稻幼苗根系生长和氧化应激的影响

刘玲, 洪婷婷, 胡倩男, 谢瑞丽, 周颖, 王玲, 汪承润

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2623–2633 https://doi.org/10.11654/jaes.2021–0523

微塑料在菲降解过程中对融合菌株F14的影响

周昌鑫, 侯彬, 郭学涛, 高乔, 刘怡暄, 卢静

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 364–370 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–0910

微塑料和镉及其复合对水稻种子萌发的影响

王泽正, 杨亮, 李婕, 付东东, 胡维薇, 范正权, 彭丽成

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 44–53 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–0560

水土环境中微塑料对磷的吸附行为

李旺, 祖波, 冉典容, 黄银权, 李嘉雯

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1758–1764 https://doi.org/10.11654/jaes.2021–0284

高雅楠, 王论言, 李欣雨, 等. 不同类型微塑料对黄芩生长生理及代谢的影响[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(8): 2120-2133.
GAO Y N, WANG L Y, LI X Y, et al. Effects of different types of microplastics on physiology and metabolism of *Scutellaria baicalensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(8): 2120-2133.

开放科学 OSID

不同类型微塑料对黄芩生长生理及代谢的影响

高雅楠[1], 王论言[1], 李欣雨[1], 贾向前[1,2], 张彦龙[1,2*], 刘洋[1,2*]

(1.黑龙江大学生命科学学院, 农业微生物技术教育部工程研究中心,黑龙江省寒地生态修复与资源利用重点实验室, 黑龙江省普通高校微生物重点实验室, 哈尔滨 150080; 2.黑龙江勃利经济开发区管理委员会博士后科研工作站, 黑龙江 勃利 154500)

摘 要:为解析微塑料对中药材黄芩(*Scutellaria baicalensis*)植株的生长影响及其毒理学响应,通过营养液培养的方式,检测了添加微塑料浓度为500 mg·L^{-1}、粒径为10 μm左右的聚苯乙烯微塑料(PS-MPs)、聚乙烯微塑料(PE-MPs)及聚丙烯微塑料(PP-MPs)营养液对黄芩植株生长状况、抗氧化酶活性的影响,并进一步探究了不同类型微塑料对黄芩植株的毒性作用。结果表明:PE-MPs对黄芩生长的影响相对较小,而PS-MPs和PP-MPs的影响更为显著。PS-MPs处理导致光合色素含量降低。抗氧化酶活性方面,PS-MPs和PE-MPs处理导致酶活性显著提升,PP-MPs处理影响较小。代谢层面上,PS-MPs和PP-MPs影响显著,主要影响半乳糖代谢、甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢等途径,而PE-MPs主要影响糖代谢和TCA循环。此外,PP-MPs对黄芩根中汉黄芩素和黄芩素的影响最为显著,对黄芩苷和汉黄芩苷的影响相对较小。研究结果表明,不同类型微塑料对黄芩生长和代谢的影响存在差异,其中PS-MPs和PP-MPs主要影响黄芩植株的生长,而PE-MPs的影响比较小。PE-MPs主要影响黄芩植株的糖代谢和TCA循环,而PS-MPs和PP-MPs则主要影响TCA循环、半乳糖代谢、甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢,并且对黄芩植株的主要化合物的含量也产生一定的影响。

关键词:微塑料;黄芩;生理响应;氧化应激;代谢产物

中图分类号:X503.233 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2025)08-2120-14 doi:10.11654/jaes.2024-0920

Effects of different types of microplastics on physiology and metabolism of *Scutellaria baicalensis*

GAO Yanan[1], WANG Lunyan[1], LI Xinyu[1], JIA Xiangqian[1,2], ZHANG Yanlong[1,2*], LIU Yang[1,2*]

(1.Engineering Research Center of Agricultural Microbiology Technology, Ministry of Education & Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Ecological Restoration and Resource Utilization for Cold Region & Key Laboratory of Microbiology, College of Heilongjiang Province & School of Life Sciences, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; 2.Post-Doctoral Scientific Research Workstation of Heilongjiang Boli Economic Development Zone Management Committee, Boli 154500, China)

Abstract: To analyze the effects of microplastics on the growth of *Scutellaria baicalensis* plants, a traditional Chinese medicine, and their toxicological responses. The effects of adding microplastics of polystyrene microplastics (PS-MPs), polyethylene microplastics (PE-MPs) and polypropylene microplastics (PP-MPs) with a concentration of 500 mg·L^{-1} and a particle size of about 10 μm on the growth and antioxidant enzyme activities of *S. baicalensis* plants were examined in nutrient solution cultures and the toxic effects of the different microplastics on the *S. baicalensis* plants were further investigated. The toxic effects of different types of microplastics on *S. baicalensis* plants were further investigated. The results showed that the effect of PE-MPs on the growth of *S. baicalensis* was relatively small, while the effects of PS-MPs and PP-MPs were more significant. In terms of photosynthetic pigment content, PS-MPs led to a significant decrease. At

收稿日期:2024-10-28 **录用日期**:2024-12-30

作者简介:高雅楠(1998—),女,内蒙古呼和浩特人,硕士研究生,研究方向为天然药物化学。E-mail:gyn2789@163.com

***通信作者**:张彦龙 E-mail:ylzhanghd@163.com; 刘洋 E-mail:2021103@hlju.edu.cn

基金项目:黑龙江省自然科学基金(YQ2023C037);国家自然科学基金青年科学基金(32301299)

Project supported: Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China (YQ2023C037); Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (32301299)

the antioxidant enzyme activity level, PS-MPs and PE-MPs treatments significantly increased, while PP-MPs treatment had less effect. At the metabolic level, PS-MPs and PP-MPs microplastics had significant effects, mainly affecting the pathways of galactose metabolism, glycine, serine, and threonine metabolism, whereas PE-MPs mainly affected sugar metabolism and TCA cycle. In addition, PP-MPs had the most significant effect on baicalein and baicalein in *S. baicalensis* roots, and relatively little effect on baicalein and baicalin. The results indicate that the impacts of various types of microplastics on the growth and metabolism of *S. baicalensis* differ, with PS-MPs and PP-MPs primarily influencing the growth of *S. baicalensis* plants, while PE-MPs exert a relatively minor effect. PE-MPs predominantly impact the sugar metabolism and the TCA cycle in *S. baicalensis* plants, while PS-MPs and PP-MPs predominantly affect the TCA cycle, galactose metabolism, as well as the metabolism of glycine, serine, and threonine. Additionally, they influence the content of major compounds within *S. baicalensis* plants.

Keywords: microplastics; *Scutellaria baicalensis*; physiological response; oxidative stress; metabolites

微塑料(MPs)是指一类粒径小于5 mm,主要以纤维、微球、颗粒、薄膜、碎片等多种形态存在的塑料。环境中常见的MPs包括聚乙烯(PE)、聚苯乙烯(PS)、聚丙烯(PP)和聚氯乙烯(PVC)[1]等。这些MPs普遍存在于海洋和湖泊等水生环境以及道路和农田等陆生环境中。MPs因粒径小、分布广、疏水性强、易被生物摄取且难以降解的特点,在生物体内能长期积累并迁移,从而对生态系统和人类健康造成一定的危害。大量塑料产品的出现使塑料污染成为全球环境污染相关研究的一项重要内容。Mai等[2]合理预测出2010—2050年全球海洋的河流塑料垃圾积累量将增加到500万t。尤其集中在海洋生态系统和陆地生态系统,塑料垃圾约占海洋垃圾中的60%~80%[3]。农业土壤是陆地环境中MPs的重要储存场所。据研究显示,在高污染地区,MPs污染率可高达土壤容重的7%[4]。MPs在降解时释放的污染物与土壤中的污染物能进行化学作用,从而引起土壤pH、电导率、有机物等的变化,影响土壤微生物群落[5],并导致植物的表型特征及生理生化过程也有一定程度的改变。

我国作为塑料产品的生产和应用大国,在不同类型的土壤中均可以检测到MPs,且形态各异,来源广泛。一项关于武汉郊区3种不同土地利用类型(耕地、林地及空地)的土壤MPs污染调查结果显示,林地土壤(410 000个·kg^{-1})的MPs丰度显著高于耕地(160 000个·kg^{-1})及空地(120 000个·kg^{-1}),主要类型有PE、PP及PS[6]。相关研究表明,当土壤MPs的含量为0.1%时被确定为MPs污染上限[7]。残留在土壤中的MPs,会影响土壤结构、植物根系生长以及水分和养分的吸收;同时,土壤中的MPs可以通过堵塞种子孔隙,并在根、茎和叶中聚集和积累,直接对植物本身产生影响[7]。研究发现:微米级和纳米级的PE-MPs和可生物降解地膜(PBT)塑料残留物对小麦地上和地下部分的生长都有负面影响,并影响其营养和生殖[8];另有研究报道23 μm PE-MPs对西红柿和辣椒幼苗的生长有明显的抑制效应[9]。纳米和亚微米级塑料甚至可以跨越一些生物屏障,包括一些植物的高选择性生物膜和表皮[10]。研究发现,PE-MPs在提高辣椒根系长度、提高植株中碳含量的同时,导致辣椒植株的株高与产量下降[11]。PS-MPs影响大蒜光合色素含量并产生氧化胁迫效应[12]。另有研究发现,PS-MPs和PP-MPs还影响了番茄植株中一些重要的代谢途径,包括TCA循环和谷胱甘肽代谢[13]。综上,MPs能够显著影响作物生长、光合色素含量、作物产量和植物的代谢途径。其影响程度与MPs的种类和含量密切相关。因此,全面了解MPs对植物的影响对于确保食品安全至关重要。

黄芩(*Scutellaria baicalensis*)是一种唇形科多年生植物,因其治疗特性而在世界各地广泛种植[14]。医学研究证明黄芩具有清热解毒、祛火、凉血、安胎的功效,根部入药可辅助治疗肺炎、咳嗽、咯血等。黄芩的药理作用及临床应用非常广泛,有文献记载:黄芩中黄酮类化合物是黄芩中含量最多、最主要的药用有效成分之一[15]。目前,黄芩的栽培主要集中在肥沃、排水良好的沙壤土、壤土及林地中。作为农田生态系统的一部分,黄芩种植地也可能面临类似的微塑料污染问题,需要关注和研究。本研究旨在考察黄芩幼苗对PS-MPs、PE-MPs和PP-MPs胁迫的毒性诱导和生物反应,揭示MPs对其生理机能和代谢产物的综合影响。本研究的结果将有助于评估PS-MPs、PE-MPs和PP-MPs对药用植物的毒理学影响。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试黄芩种子购自河北省安国市中药材基地。PS-MPs、PE-MPs和PP-MPs均购自东莞市樟木头瑞祥高分子材料有限公司,研究选择的实验材料的粒径

约10 μm。使用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM,JSM-7500F,JEOL,日本)对MPs的形态进行了表征,并分析了它们的尺寸。傅立叶变换红外光谱(FT-IR,Nexus 670光谱仪,美国Nicolet公司)用于确定MPs的结构和组成。使用Zeta测量仪(MS 2000,莫尔文仪器公司,英国)评估了塑料悬浮液的Zeta电位。MPs的形态和粒度特征见图1。

1.2 水培实验

黄芩幼苗培养过程如下:将大小一致的种子用75%的乙醇消毒1 min,再用蒸馏水反复冲洗3~4次,直至无酒精味残留,挑选种形饱满、大小一致泡发的种子,然后放置在湿润的纱布上,置于25 ℃黑暗处加速发芽。然后将发芽的种子移栽到蛭石中,在温室中培养40 d,选择生长稳定的植株,用去离子水洗去根部附着的基质。将清洗后的黄芩幼苗种植在植物水培盒中,每盒25株。在试验前期,分别选择了两种粒径(10、200 μm)的PS-MPs,并设置了10、100、500、1 000 mg·L^{-1} 4个浓度对黄芩进行预实验处理,研究结果发现,粒径10 μm、500 mg·L^{-1}浓度下MPs对黄芩的生长状态和抗氧化酶活性影响比较大,但又不完全致死,可以很好地探究MPs对黄芩的影响及其响应机制。基于预实验的研究结果,本实验分别设置对照(不添加MPs)和浓度为500 mg·L^{-1}的PS-MPs、PE-MPs和PP-MPs 4个处理,将微塑料粉末悬浮在营养液中,超声机100 Hz超声30 min,制成均一的微塑料悬浮液。每个处理设置3个重复,所有水培盒均置于昼夜温度为26 ℃/21 ℃、光照强度为6 000 lx、昼夜光周期为16 h/8 h的生长室中。处理14 d后,对黄芩植株进行破坏性采样,用去离子水仔细清洗收获的黄芩幼苗,分离幼苗并测量根和叶的生理参数及测定黄芩各指标。

1.3 测定方法

采用直尺(精确到0.1 cm)、游标卡尺(精确到0.01 cm)对黄芩植株的根长、根粗、株高、地上部分长进行测定;用天平(精确到0.000 1 g)称量鲜质量后,将其置于105 ℃的烘箱中杀青30 min,冷却到70 ℃烘干至质量恒定,称其干质量。取新鲜干净的黄芩叶片,去中脉,剪碎混匀,称取剪碎的新鲜样品0.5 g,用乙醇提取,设置紫外分光光度计波长为470、665 nm和649 nm以测定类胡萝卜素、叶绿素a和叶绿素b的吸光度,并计算含量[16];用硫代巴比妥酸(TBA)比色法[17]测定黄芩植株丙二醛(MDA)含量。采用Tiryaki等[18]描述的方法测定过氧化氢(H_2O_2)含量。用氮蓝四唑(NBT)光还原法[16]测定黄芩植株超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚显色法[19]测定黄芩植株过氧化物酶(POD)活性;过氧化氢酶(CAT)活性采用过氧化氢分解法测定;抗坏血酸过氧化物酶(APx)采用紫外分光光度法测定[20]。

参考Liu等[21]的方法,精确称取0.010 0 g鲜样,加内标60 μL(L-2-氯-苯丙氨酸,0.3 mg·mL^{-1})、甲醇540 μL,冰箱冷冻2 min(-80 ℃),研磨后超声30 min,加氯仿300 μL、水600 μL,超声30 min,14 000 r·min^{-1}离心10 min,取上清液700 μL,用离心浓缩仪挥干,加甲氧胺盐酸吡啶溶液(15 mg·mL^{-1})200 μL,振荡培养箱中肟化90 min(37 ℃),加BSTFA(含1% TMCS)200 μL,正己烷40 μL,反应60 min(70 ℃),静置30 min(室温)后进行GC-MS代谢组学分析。

参考Liu等[21]的方法,称取0.500 0 g鲜样,放入研磨机中研磨(60 Hz,2 min),利用3 mL 70%甲醇在40 ℃超声提取30 min,过滤,滤渣加入70%甲醇3 mL再次40 ℃超声提取30 min,6 000 r·min^{-1}离心10 min,吸取上清液,两次上清液合并,挥干。用1 mL 70%质谱甲醇复溶(超声10 min),12 000 r·min^{-1}离心10 min,吸取上清液,随后用于UPLC-MS色谱质谱分析。

1.4 统计分析

GC-MS数据使用软件(Agilent GC-MS 5975)进行分析,UPLC-MS数据使用MassLynx 4.1版本进行分析。试验测定的指标均以平均值±标准偏差(Mean±SD)表示,数据的差异显著性通过软件SPSS 17.0用单因素方差分析(One-way ANOVA)中的Duncan多重比较检验法($P<0.05$),使用Origin 2021和ImageJ软件进行绘图和图片处理。

2 结果与分析

2.1 MPs的形态和粒径表征

根据扫描电子显微镜(SEM)图像,PS-MPs和PE-MPs的表面相对光滑且呈球形和椭圆形(图1a、1b);然而,PP-MPs则是带有锋利边缘的不规则块状物(图1c),这意味着与光滑表面的PE-MPs和PS-MPs相比,锋利边缘的PP-MPs会产生更大的影响[22]。根据粒径分布直方图可以发现PS-MPs、PE-MPs和PP-MPs平均粒径分别为(8.45±2.37)、(10.16±2.18)μm和(9.82±2.36)μm(图1d~图1f)。有研究表明,聚苯乙烯的单体是苯乙烯(C_8H_8),其分子结构中包含一个苯环和一个乙烯基(—CH═CH_2),在3 100~3 000 cm^{-1}范围内有5个特征的吸收带,这与苯环上的C—H

键的伸缩振动有关;在1 600、1 580、1 500、1 450 cm^{-1}的吸收带与苯环的骨架振动有关。聚乙烯的单体是乙烯(C_2H_4),乙烯也可以视为一对相互连接的亚甲基(CH_2),在2 900~3 000 cm^{-1}区域内,主要由聚乙烯链上的C—H键的伸缩振动引起。在1 460~1 470 cm^{-1}区域内,与聚乙烯链上的C—H键的弯曲振动有关;在720~730 cm^{-1}区域内,与聚乙烯链上的C—H键的摆动振动有关。聚丙烯的单体是丙烯(C_3H_6),化学结构为CH_2═$CHCH_3$,在3 000~2 850 cm^{-1}和1 450~1 375 cm^{-1}之间,主要由聚丙烯链上的C—H键的伸缩振动引起;在900~850 cm^{-1}之间,与聚丙烯链上的C—C键的环对称伸缩振动有关;在730~720 cm^{-1}之间,与聚丙烯链上的C—H键的异构化有关[23]。这些吸收峰是聚合物分子结构中特定化学键和官能团振动的直接体现。根据以上研究使用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)对样品进行识别和分析以确认微塑料类型(图1g~图1i)。实验中测得的Zeta电位显示,PS-MPs的绝对值为(15.70±0.60),PE-MPs的绝对值为(12.47±0.65),PP-MPs的绝对值为(18.70±0.62),这表明各个微塑料的团聚作用差异显著,有研究证明Zeta电位的绝对值越小,表明其静电排斥越小,越不稳定,更容易团聚在一起,这可能会降低MPs对植物的影响[24]。

2.2 MPs对黄芩生长状况的影响

不同类型MPs处理下,黄芩植株的根粗、根长、株高、地上部分长以及鲜质量和干质量的变化情况如图2所示。在3种MPs处理下,黄芩植株的根粗和株高与对照相比有显著性差异,MPs对其根粗和株高的生长表现为明显的抑制作用;而对于黄芩的根长则显示为

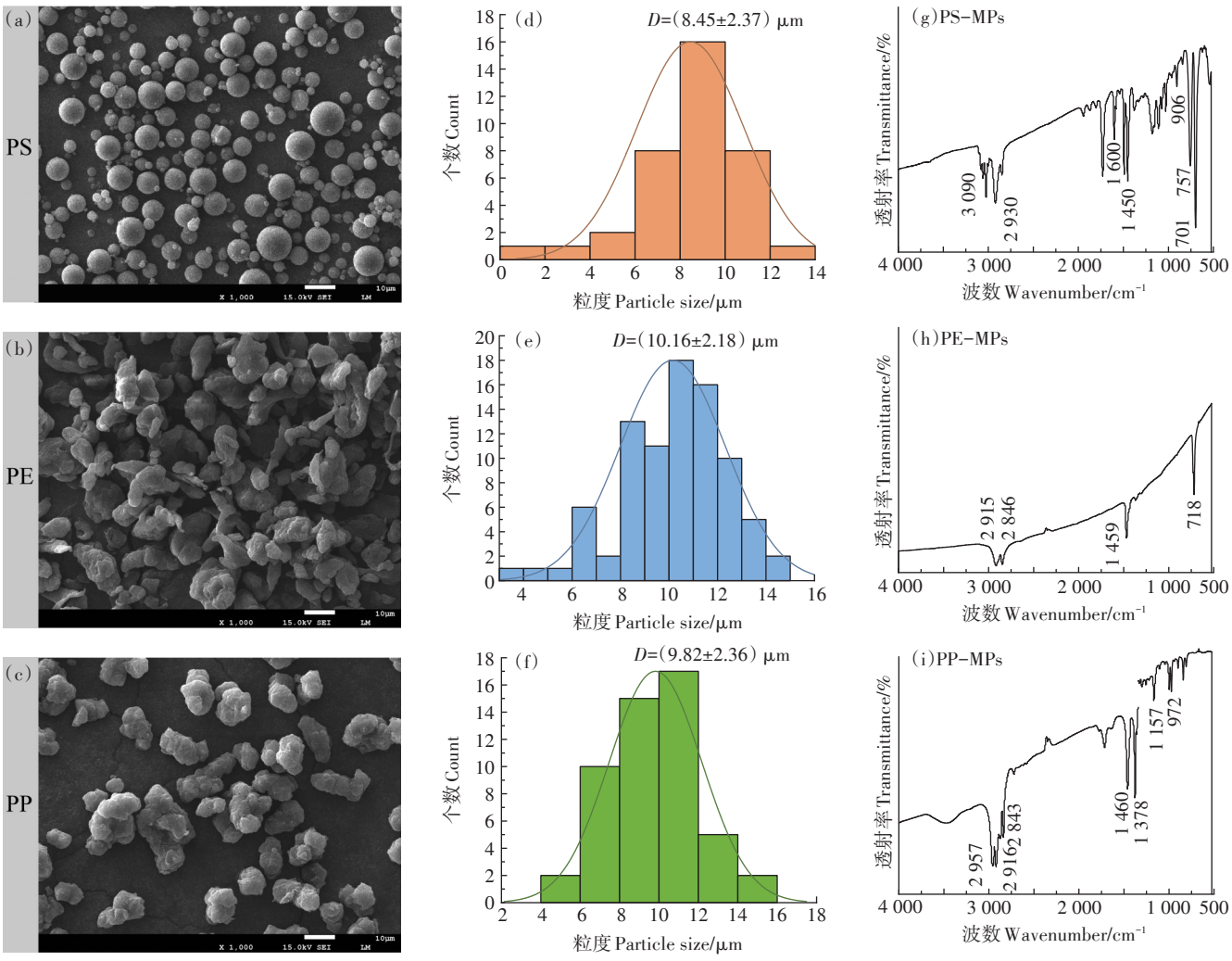


图1 PS-MPs、PE-MPs和PP-MPs的扫描电子显微镜(SEM)图像(a~c)、粒度分布(d~f)和合成的傅立叶红外光谱(FT-IR)图像(g~i)

Figure 1 Scanning electron microscopy(SEM) images(a-c),particle size distribution(d-f),and fourier infrared spectroscopy (FT-IR) image(g-i) of MPs synthesized from PE-MPs,PS-MPs,and PP-MPs

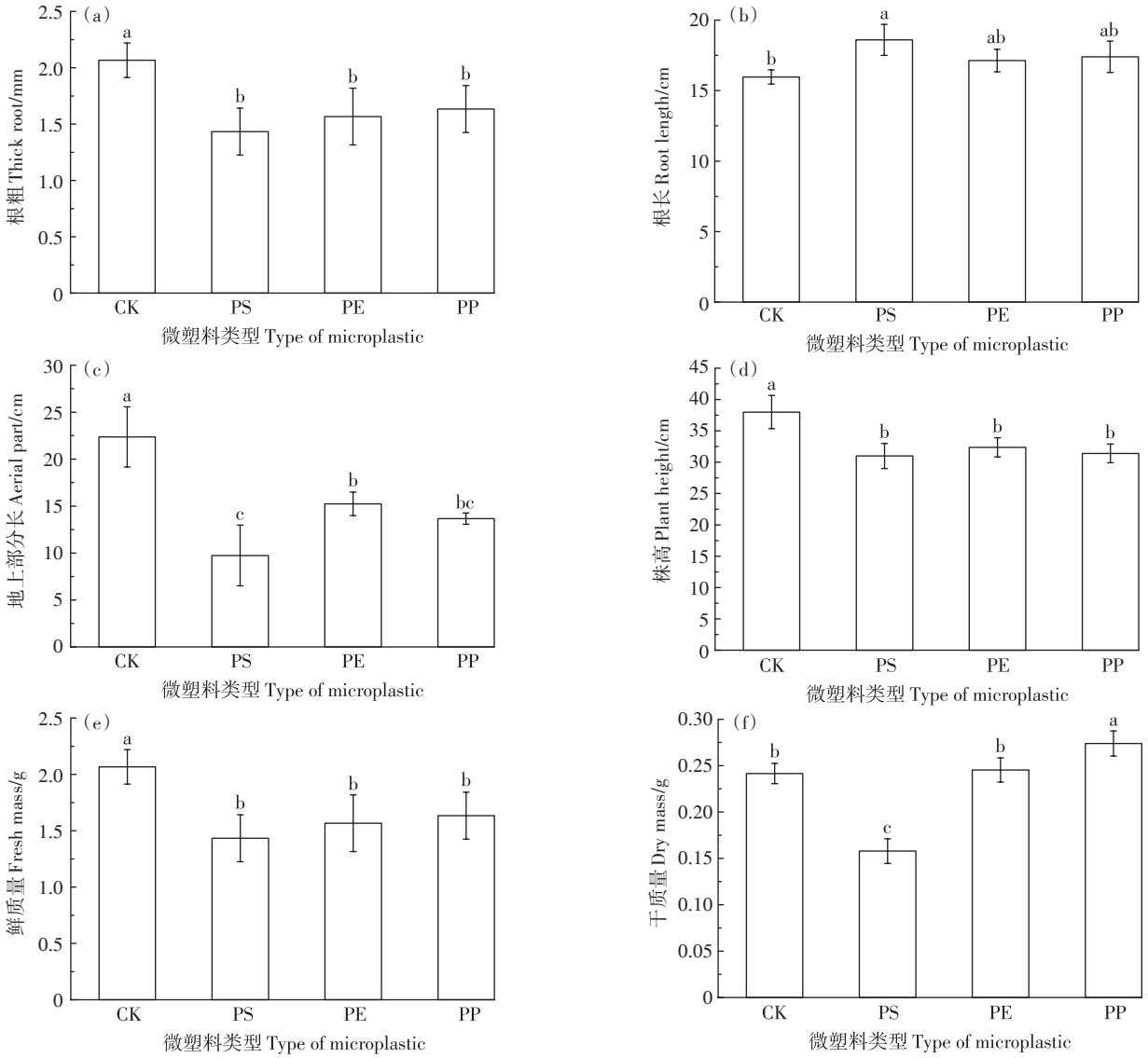
促进作用，尤其是PS-MPs处理下有显著的促进作用（$P<0.05$），但PE-MPs和PP-MPs处理下，其促进效果不显著（图2b）。研究发现MPs在促进黄芩根长生长的同时也抑制了其地上部分的生长，导致其株高显著低于对照组（图2c、图2d）。黄芩的鲜质量和干质量也因MPs类型的不同产生显著差异。从图2e、图2f中可以看出，MPs处理对植株鲜质量有明显的抑制作用。在PS-MPs处理下干质量显著降低，在PP-MPs处理下干质量增加，而PE-MPs处理下其变化不显著，说明黄芩的含水量因MPs不同产生差异。

2.3 MPs对黄芩叶片光合色素含量的影响

图3为黄芩叶片中光合色素含量的变化情况。结果显示，在3种MPs处理下，黄芩叶片的光合色素含量有显著差异。与对照组相比，PS-MPs显著抑制了黄芩叶片的光合色素合成，而PE-MPs和PP-MPs处理对其光合色素的合成有促进作用。在PS-MPs处理下，叶绿素a、叶绿素b和叶绿素总量的合成受到了显著抑制，而在PE-MPs和PP-MPs处理下，其含量又有增加。

2.4 MPs对黄芩叶与根中抗氧化酶活性的影响

MPs对黄芩叶和根中H_2O_2含量的影响如图4a所示。在叶中，PS-MPs和PE-MPs处理下H_2O_2含量与空白对照相比明显增加，而PP-MPs处理下，H_2O_2含量无显著变化；在根中，H_2O_2含量只在PE-MPs处理



不同小写字母表示不同处理组之间存在显著差异（$P<0.05$），下同。
Different lowercase letters indicate significant differences among different treatment groups（$P<0.05$）. The same below.

图2 不同类型MPs对黄芩生长状况的影响

Figure 2 Effects of different types of microplastics on the growth of *S. baicalensis*

下显著增加。对比黄芩根和叶片中的H_2O_2含量发现,叶片中的H_2O_2含量明显高于根中H_2O_2含量。MPs对黄芩叶和根中MDA含量的影响如图4b所示,从图中可以发现,与对照组相比,3种MPs处理下叶和根中的MDA含量显著增加,在叶中,PS-MPs和PP-MPs处理下MDA含量高于PE-MPs处理;而在根中,PE-MPs处理下MDA含量显著高于PS-MPs和PP-MPs处理。

从图4c可以看出,3种MPs处理对黄芩叶中SOD活性都有显著影响,其活性都呈现出显著上升的趋势。其中,PE-MPs、PP-MPs处理下促进作用最为明显,而PS-MPs的促进作用次之。在根中,PS-MPs和PP-MPs处理下,SOD活性与对照相比降低。可见,MPs处理能够显著提高黄芩叶中SOD的活性,从而有效地调节植物细胞内的氧化胁迫;而根中SOD活性变化趋势不明显。MPs对黄芩叶和根中POD活性的影响如图4d所示。在叶中,PS-MPs与PE-MPs处理下POD活性与对照组相比有显著变化,而在PP-MPs处理下,POD的活性变化不显著。在PS-MPs的处理下,POD的活性受到显著的抑制作用,而在PE-MPs处理下,POD的活性表现为显著的促进作用。在根中,PE-MPs处理使得POD活性显著下降。以上研究结果表明,不同聚合物类型微塑料对植物的不同部位产生的影响存在差异。

MPs对黄芩叶和根中CAT活性的影响如图4e所示。从图中可知,在叶中,与对照组相比,PS-MPs处理下,CAT的活性增加,但不显著;而PE-MPs处理下,CAT的活性显著降低;在根中,PS-MPs、PE-MPs处理使得CAT的活性显著增加。MPs对黄芩叶和根中APx活性的影响如图4f所示。在叶与根中,与对照组相比,PS-MPs和PE-MPs处理下,APx活性无显著变化;PP-MPs处理下,APx活性显著增高,表现为明显的促进作用。

综上,黄芩的抗氧化酶活性对不同MPs的胁迫产生不同的响应,且黄芩的不同部位其抗氧化酶活性存在明显差异,这可能与不同部位的生理功能、所处环境以及合成和积累的代谢产物有关。叶片作为光合作用的主要器官,可能需要更高水平的抗氧化酶来应对光合作过程中产生的活性氧,而根部则可能更侧重于抵抗MPs胁迫产生的氧化应激。

2.5 MPs对黄芩叶和根中初级代谢物的影响

为研究PS-MPs、PE-MPs和PP-MPs对黄芩叶和根中代谢物和代谢途径的影响,利用气相色谱-质谱(GC-MS)平台,通过与NIST质谱数据库进行比对。在黄芩叶中共检测出31种初级代谢物,根中检测出32种,主要涵盖糖类、有机酸、氨基酸、醇类和其他化合物。为评估不同样本之间的总体代谢差异,对黄芩叶和根中代谢物的峰面积进行了PCA分析。结果显示组内的重复样本变化不大,但在组与组之间有着明显的分离趋势。在叶中,两个轴分别解释了对照组

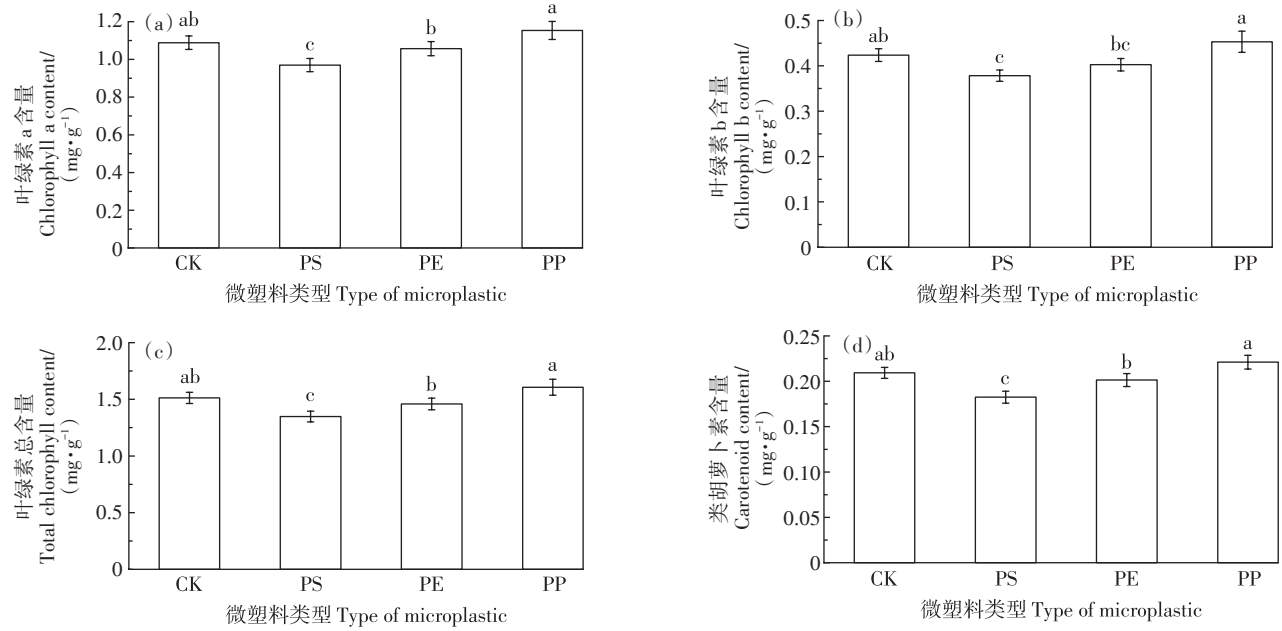


图3 不同类型MPs对黄芩叶片中光合色素含量的影响

Figure 3 Effects of different types of microplastics on photosynthetic pigment content in leaves of *S. baicalensis*

(CK)和处理组之间差异的18.1%和17.4%(图5a)。在根中,两个轴分别解释了对照组(CK)和处理组之间差异的21.6%和26.5%(图5b),各组之间显示出显著的空间分离。对黄芩叶中31种和根中32种黄芩代谢物进行了聚类热图分析(图5c~图5d)。这些结果表明,PS-MPs、PE-MPs和PP-MPs胁迫下黄芩的代谢物发生了显著变化。

为了更深入地了解PS-MPs、PE-MPs和PP-MPs胁迫后黄芩代谢过程的变化,采用OPLS-DA模型中的VIP值(投影变量重要性)(VIP≥1),结合t检验结果的P值(P≤0.05)对所有代谢物进行VIP值统计,共有17个(叶)和21个(根)代谢物的VIP分数大于1.0。这些化合物主要负责分离,并用于随后的代谢途径分析(图6)。主要分析的代谢途径包括半乳糖代谢,柠檬酸循环(TCA循环),甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢,以及苯丙氨酸代谢(图6)。研究发现在应对PS-MPs、PE-MPs和PP-MPs胁迫的过程中,在黄芩叶中,参与糖代谢的产物,如半乳糖醇、D-木糖、D-葡萄糖酸的表达上调;在黄芩根中,L-鼠李糖、D-木糖、D-半乳糖、D-果糖和肌醇的表达上调。值得注意的是,积极参与TCA循环的代谢物,包括丁酸、烟酸、琥珀酸和柠檬酸在MPs的影响下表现出下调趋势。研究还发现在黄

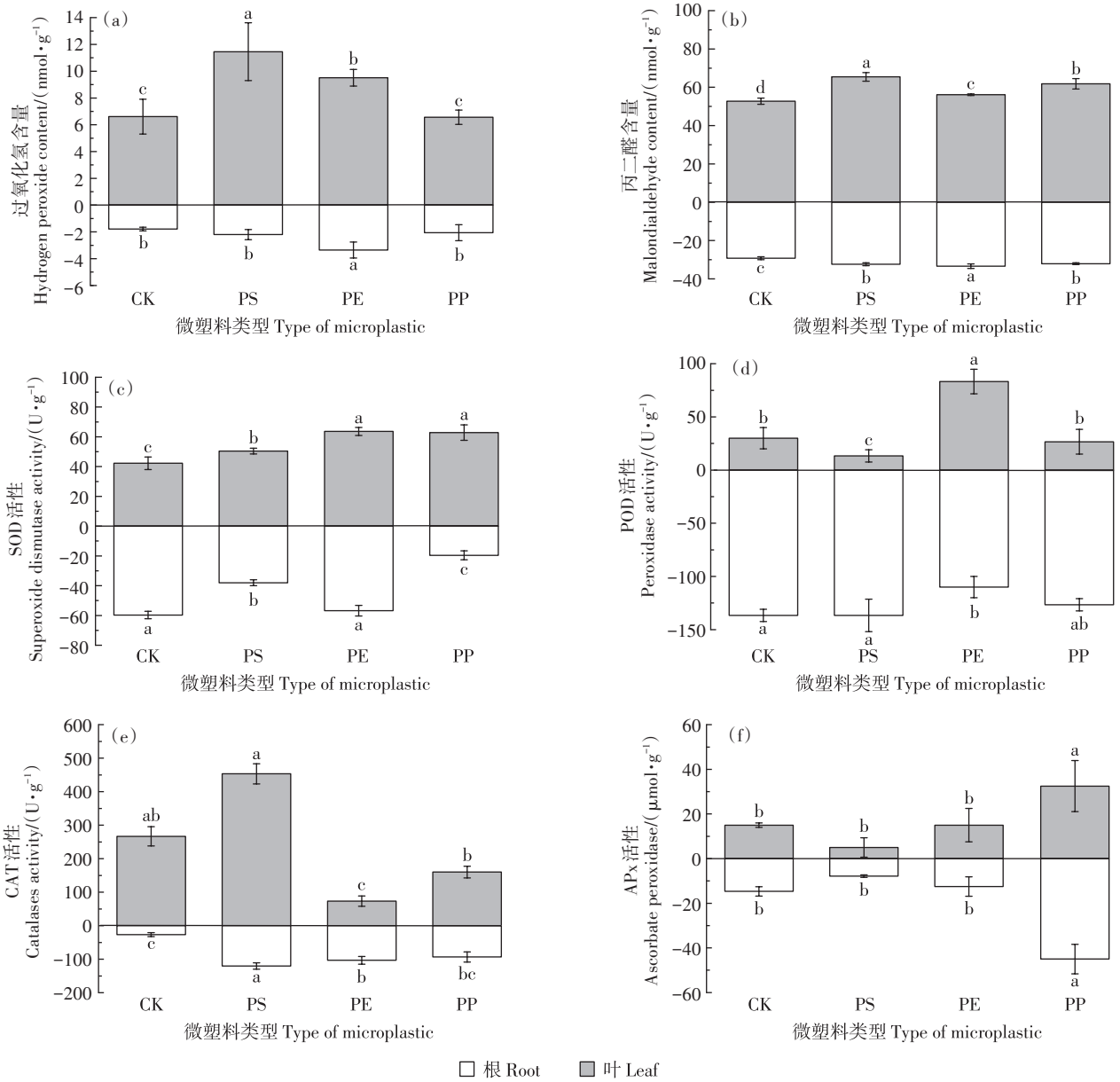


图4 不同类型MPs对黄芩叶和根中抗氧化酶系统的影响

Figure 4 Effects of different types of microplastics on antioxidant enzyme systems in leaves and roots of *S. baicalensis*

芩叶中参与甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢途径的丝氨酸表达下调，而缬氨酸的表达有所上调。

2.6 MPs 对黄芩根中主要活性化合物的影响

研究发现，黄芩中含有大量活性物质，其中大部分是黄酮类化合物[25]。其根部含有约 100 种不同类型的黄酮类化合物，包括黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷和汉黄芩素等[26]。这些化学成分是黄芩发挥药理作用的物质基础。为了进一步探究 MPs 对黄芩中主要活性化合物含量的影响，使用 UPLC-MS 色谱质谱测得黄芩根中 4 种主要化合物的含量，结果如图 7 所示。从图中可以发现，在 PS-MPs、PE-MPs 的处理下，黄芩苷的含量与对照组相比显著降低，分别减少了 20.38%、26.96%（图 7a）。在 3 种 MPs 的处理下，黄芩素的含量显著降低，与对照相比 PS-MPs、PE-MPs 和 PP-MPs 处理下分别减少了 36.10%、32.95% 和 33.81%；而 PP-MPs 与 PS-MPs 和 PE-MPs 相比，对黄芩素含量的影响最大（图 7b）。汉黄芩苷的含量在 PE-MPs 和 PP-MPs 处理下，较对照显著下降了 35.95%、89.57%，而 PS-MPs 对汉黄芩苷的含量影响相对较小。在 3 种 MPs 的处理下，汉黄芩素含量的变化与黄芩素含量变化趋势相一致，与对照组相比，PS-MPs、PE-MPs 和 PP-MPs 处理下分别减少了

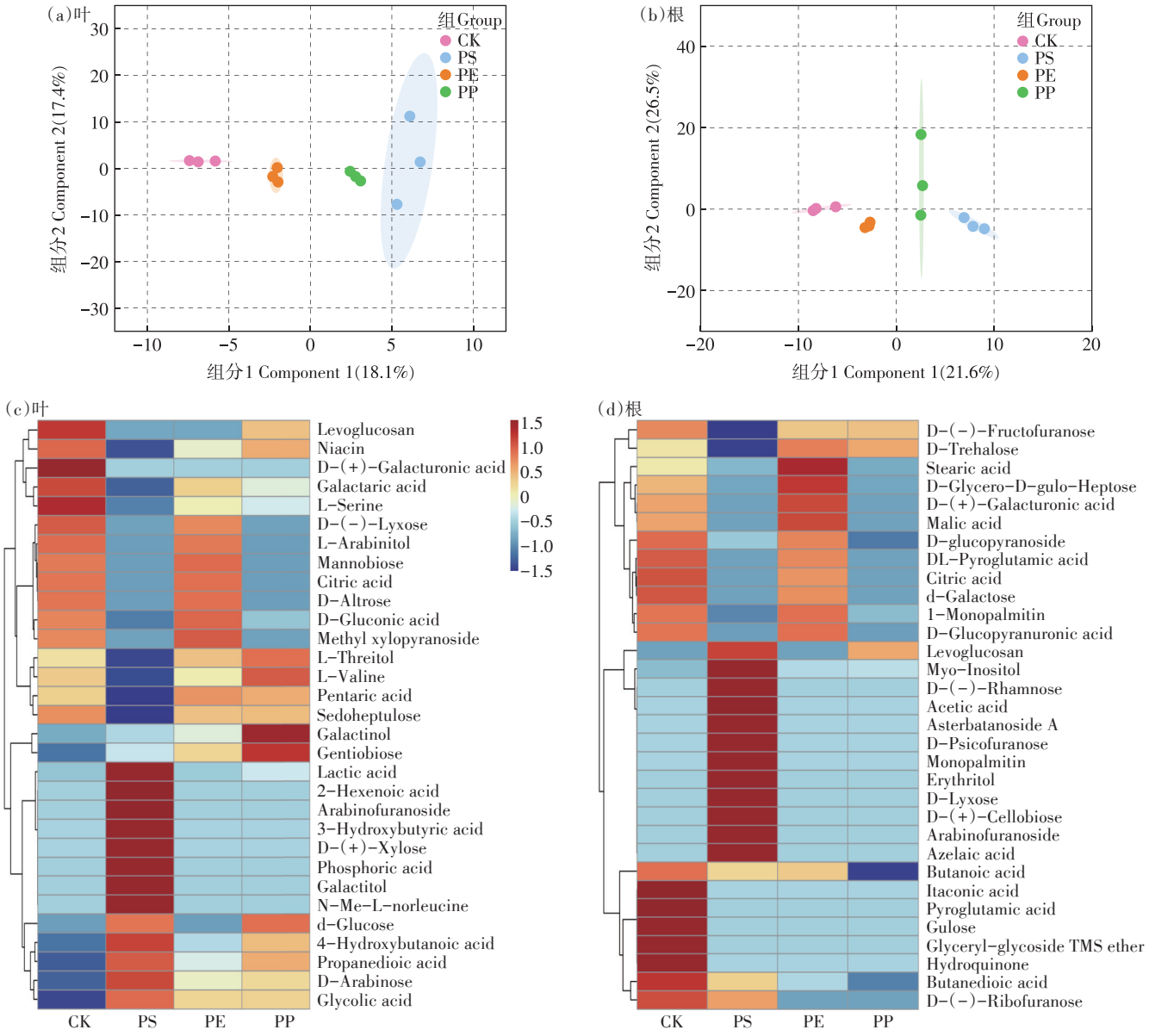
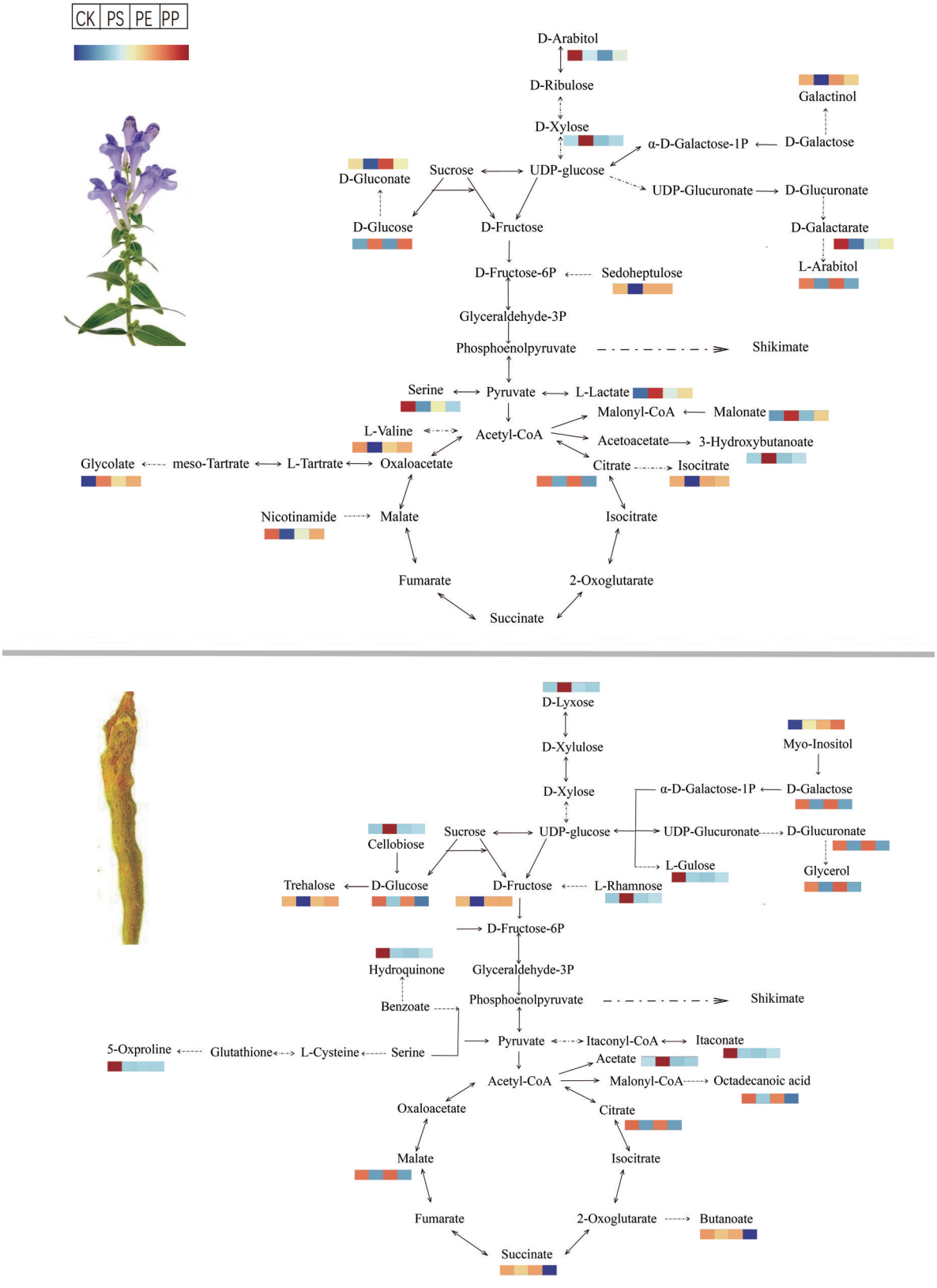


图 5　不同类型 MPs 对黄芩叶和根中初级代谢物的影响

Figure 5　Effects of different types of microplastics on *S. baicalensis* on primary metabolites in leaves and roots of *S. baicalensis*



对3个平行样化合物峰面积取平均值，将数据进行归一化处理后，完成连锁层次聚类，红色表示高丰度，蓝色表示低丰度。

The average peak area of the three parallel samples was calculated, and the data was normalized before performing hierarchical clustering. Red indicates high abundance, and blue indicates low abundance.

图6 不同类型MPs胁迫下黄芩叶和根中的代谢途径分析

Figure 6 Analysis of metabolic pathways in leaves and roots of *S. baicalensis* under different types of microplastics

77.46%、71.98%和87.28%。

3 讨论

3.1 黄芩生长状况对MPs的响应

植物的根粗、根长、鲜质量、干质量和株高是植物生长状态的直接体现,也是衡量植物是否生长良好的重要指标。有研究发现,不同类型的MPs因其粒径大小及形状不同可被植物根系直接吸收进入植物体[27],进而对植物的生长产生影响,主要体现在根系和地上部的生长发育受到抑制。本研究发现,3种类型的MPs处理都显著抑制了黄芩的根粗和株高,而对根长则表现为促进作用(图2),这与刘莹莹等[28]的研究中一定浓度下高密度聚乙烯(HDPE)微塑料对绿豆生长有刺激作用的结论相一致,而这种刺激作用具有不定向性。有研究发现,PE-MPs可以显著提高辣椒的根长,但不影响辣椒的株高[11]。另有研究发现,纳米和亚微米级的塑料颗粒可以通过根裂缝进入植物[29],在本试验过程中选用的3种MPs虽然粒径大小相一致,但形状有明显的不同。从扫描电镜可以看出,PS-MPs表现为光滑的球形,而PE-MPs和PP-MPs则表现为粗糙的椭圆形和不规则的形状,根据Zeta电位值可以发现它们在水溶液中的团聚作用也有显著差异。虽然3种类型的MPs处理都显著抑制了黄芩根粗和株高,而对根长则表现为促进作用;但与PE与PP相比,PS对黄芩的根长、根粗的影响更显著,而形成这种明显差异的原因极有可能和其MPs的形状和表面光滑程度有关。

3.2 黄芩叶片光合色素含量对MPs的响应

光合作用是植物体的一项重要生理功能,在植物生长发育过程中发挥着极其重要的作用,而叶绿素含量是决定光合作用强度的关键因素[30]。研究发现,在PS-MPs、PE-MPs处理下,叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总量及类胡萝卜素含量下降(图3);这与Li等[31]的研究结果相吻合,即100 nm的PS-NPs处理下黄瓜叶片中叶绿素a、叶绿素b及类胡萝卜素含量显著下降。叶绿素含量的稳定是由叶绿体中参与叶绿素合成代谢和分解代谢过程的相对速率决定的[32]。叶绿体自身代谢紊乱或其活性氧积累都会使叶绿素含量降低[33]。PS-MPs、PE-MPs胁迫可能扰乱了叶绿素的代谢过程,从而使得叶片中的叶绿素含量下降。而在PP-MPs处理下,叶绿素含量相比对照组增加,与PS-MPs和PE-MPs产生相反的影响,这可能与非生物胁迫诱导植物叶片面积皱缩有关[34]。此外,叶绿素与叶绿体蛋白之间的结合在逆境胁迫下会逐渐松弛,使得

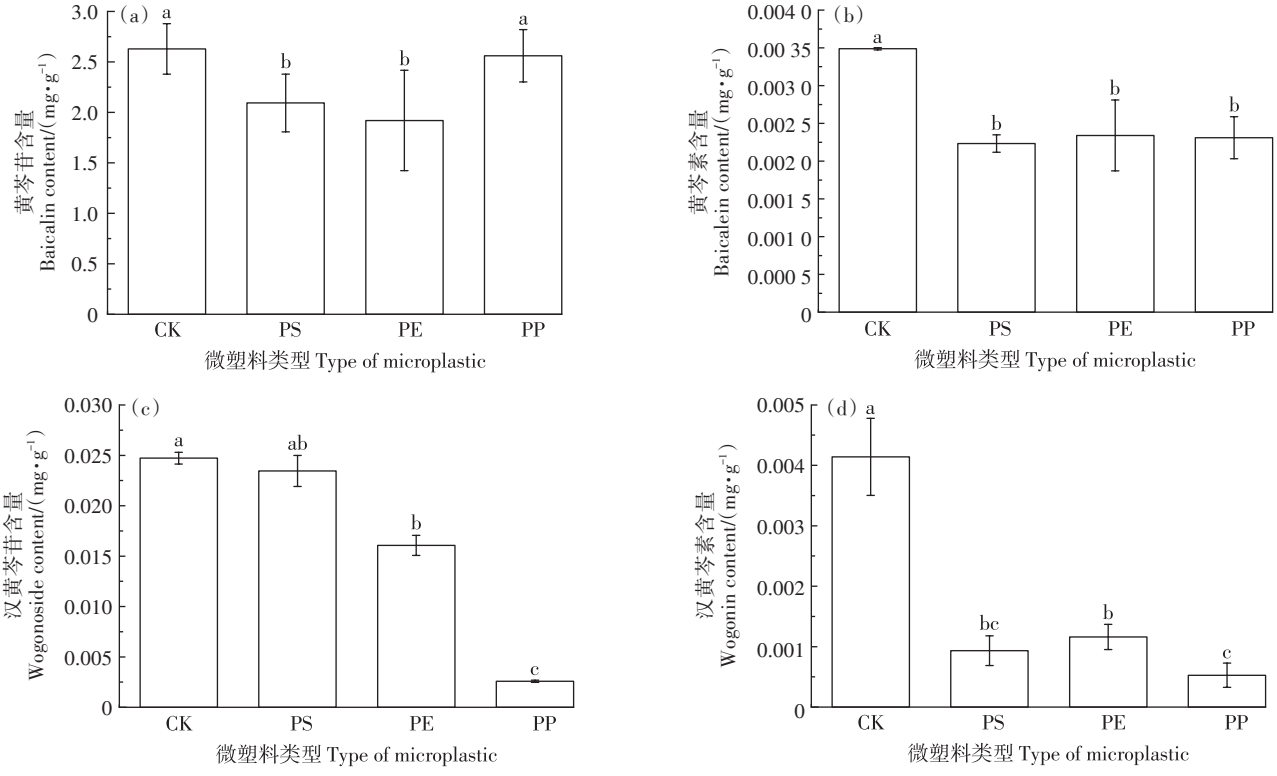


图7 不同类型MPs对黄芩根中主要活性化合物的影响

Figure 7 Effects of different types of microplastics on the main active compounds in *S. baicalensis* roots

叶绿素易被提取,进而提高了叶绿素的含量[35]。研究表明,MPs对植物生长的影响可能会因其类型和大小的不同而产生差异;并且,当MPs的类型发生变化时,植物会根据不同的反应来调整它们自身的形态和生理功能以应对这种胁迫。因此,不同类型的MPs对植物生长的影响机制仍有待进一步研究。

3.3 黄芩抗氧化酶系统对MPs的响应

H_2O_2是生物体中普遍存在的活性氧分子,其主要由POD、CAT和APx等酶催化降解。H_2O_2是重要的活性氧之一,也是活性氧相互转化的枢纽。研究发现,PS-MPs、PE-MPs处理下H_2O_2含量显著增加(图4a),说明在MPs处理下黄芩植株受到胁迫,激发了活性氧的产生;而PP-MPs处理对黄芩植株的影响相对较小。MDA作为膜质过氧化作用强弱的一个重要指标,其含量的多少可以间接反映出细胞的氧化损伤情况。当膜质过氧化作用达到一定程度时,MDA含量会显著增加[36]。本试验结果显示,在3种MPs处理下,黄芩植株的MDA含量都显著增加(图4b),说明MPs处理下植物机体内膜质过氧化程度较明显,植物自身细胞受到氧自由基的攻击程度大。

前期研究发现,MPs污染可能会导致植物释放过多的活性氧(ROS)。ROS是一种重要的生物胁迫应答机制,当ROS水平过高时,会引起细胞内氧化还原平衡失调,对植物的正常生长有一定影响。当植物体内的ROS发生波动时,植物体内的防御系统会被启动,能帮助细胞抵抗自由基的攻击,免受侵害。其中抗氧化酶系统可以通过消除自由基来保护细胞免受损害,是一种重要的防御机制。研究表明,植物中的MDA、H_2O_2、SOD、CAT及APx等能够很好地反映植物对MPs胁迫的响应机制[37]。当植物体内的活性氧超出其抗氧化酶活性,就会引起植物细胞的过氧化反应,使植物生长代谢受到影响。本研究发现,500 mg·L^{-1}浓度3种MPs处理下,黄芩叶中测得的SOD的活性都明显增加,而在根中的变化则较小(图4c)。这与植物本身所处的环境有直接的关系,在本研究中,MPs直接接触黄芩根部,因此对其造成的胁迫明显高于叶。当这种胁迫超出SOD本身的防御能力之后,会使得SOD的活性降低。SOD是植物抗氧化系统中的首要防线,在应对植物氧化过程中起着至关重要的作用。在植物体内,SOD可以催化超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)生成H_2O_2和O_2,SOD活性增加说明植物机体应对MPs胁迫启动了抗氧化系统的运转。

POD可以用来反映植物生长发育特征、体内代谢状态和对外部环境的适应性,是一种适应性酶;同时,POD可以将H_2O_2歧化为H_2O和O_2。在本研究中,叶中的POD活性在PS-MPs的处理下受到明显的抑制作用,在PE-MPs处理下,POD的活性表现为显著的促进作用;而在根中,PE-MPs处理使得POD活性显著下降。PP-MPs处理下,POD活性变化不显著(图4d)。研究发现5 μm的PS-MPs在高浓度下能够显著降低小麦叶片中的POD活性[30],而5 μm的PS-MPs(10、50、100 mg·L^{-1})能使蚕豆中POD活性显著升高[31]。结果表明,不同类型和浓度的MPs对不同种类植物的POD活性的影响存在差异。

CAT可以将H_2O_2催化为H_2O和O_2,对光呼吸和脂肪酸β-氧化过程中产生的H_2O_2有很强的催化作用。研究发现,叶中的CAT活性在PS-MPs处理下增加,而在PE-MPs处理下CAT的活性显著降低,可能是PE-MPs突破了黄芩植株自身抵抗作用,抑制了植物体内某些蛋白质分子的合成,导致酶活性丧失;在根中,PS-MPs、PE-MPs和PP-MPs处理使得CAT的活性增加(图4e)。有研究表明,当大豆根部暴露于PE-MPs和PLA-MPs 49 d后,叶片中的POD活性下降,而CAT活性显著增加[38]。为了避免外部应激引起的氧化损伤,植物通过一系列抗氧化酶进行防御[39]。不同MPs处理下CAT活性有一定程度的降低或升高。APx是叶绿体中清除H_2O_2的关键酶,也是抗坏血酸代谢的重要抗氧化酶。研究发现PP-MPs处理下,APx的活性显著增高,表现为明显的促进作用(图4f)。由此推测,黄芩通过提高自身抗氧化能力,从而减少ROS水平,以缓解逆境胁迫。然而,一些研究表明微纳米塑料增加[40]或者对植物抗氧化酶活性没有造成显著影响[41]。MPs诱导的抗氧化防御系统可能因植物种类及MPs类型、大小和浓度而异[42]。

3.4 黄芩叶和根中初级代谢物对MPs的响应

MPs能够导致一些氨基酸水平的显著变化,其中包括但不限于丝氨酸、缬氨酸及苯丙氨酸。氨基酸不仅是蛋白质合成的主要成分,也在植物的许多生理代谢中起着关键作用[43]。黄芩中的代谢途径在不同类型的MPs处理和对照组(CK)之间表现出显著差异,PS-MPs和PP-MPs处理显著改变了半乳糖代谢、甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢及TCA循环,而PE-MPs处理只显著改变了糖代谢和TCA循环(图5)。有研究表明,纳米级的聚苯乙烯能够影响水稻地上部分和地下部分代谢物的积累,而这些代谢物则主要用于参与TCA循环以及氨基酸的合成[44]。同时,有研究发现

与PE-MPs相比,PS-MPs和PP-MPs暴露对番茄植物的代谢重编程影响更大,主要包括TCA循环和谷胱甘肽代谢[13],这一发现与本试验的结果一致。

糖类化合物在植物的应激响应防御和能量代谢中扮演着非常重要的角色,而糖醇是植物中的节能化合物[45]。氧化应激可以增加基于糖分解的相关能量代谢[46]。Li等[47]研究发现PS-MPs和邻苯二甲酸二丁酯(DBP)通过影响蒲公英中半乳糖代谢途径,诱导糖代谢和积累的改变。在黄芩植株中参与糖代谢的D-木糖、L-鼠李糖、D-半乳糖、D-果糖、D-葡萄糖酸、半乳糖醇和肌醇化合物表达上调(图5),肌醇和糖醇在植物的渗透调节过程中起着至关重要的作用。本研究结果显示,半乳糖和肌醇的表达水平升高,表明黄芩对不同MPs产生了应激反应。

植物的氮和碳代谢并不是独立存在的,而是由三羧酸(TCA)循环所联系。在黄芩根中积极参与TCA循环的代谢物(包括丁酸、烟酸、琥珀酸和柠檬酸)在MPs的影响下表现出下调趋势。这表明MPs暴露扰乱了TCA循环。TCA循环包含许多生物合成中间体,是与能量利用相关的关键代谢途径[48]。相比于根,黄芩叶中的代谢物在这一过程中几乎不受影响。Lian等[49]对小麦叶片进行了类似的观察,发现在PS和重金属联合暴露下,乌头酸、苹果酸和柠檬酸水平升高。而本研究结果显示不同类型MPs对黄芩中的代谢物产生了显著影响,这可能改变了黄芩中的糖代谢和三羧酸循环,从而为植物的抗氧化防御系统内维持平衡提供了材料和能量。

3.5 黄芩根中主要活性化合物对MPs的响应

黄芩根作为主要的药用部分,主要含有黄酮类化合物,尤其是黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷和汉黄芩素是其药理活性的物质基础,这些活性物质的含量可被用于评价药用植物黄芩的品质[50]。黄芩苷的合成源于苯丙氨酸代谢途径,经过苯丙氨酸代谢形成肉桂酸骨架的前体[51]。在肉桂酸-CoA连接酶的催化下,肉桂酸转化为肉桂酰-CoA。随后,肉桂酰-CoA在肉桂酸4-羟化酶的催化下生成肉桂酸。通过各种酶系统的协调作用,肉桂酸进一步转化为黄芩苷。黄芩苷则是黄芩素与葡萄糖糖基化的产物[52]。在细胞质中,黄芩苷在葡萄糖基转移酶的介导下进行糖基化,形成黄芩素;而黄芩素在8-O甲基转移酶和黄芩素-7-O葡萄糖基转移酶的作用下形成汉黄芩素,后生成汉黄芩苷。研究表明,受MPs影响最大的化合物是汉黄芩素和黄芩素,其次是黄芩苷和汉黄芩苷。PP-MPs对黄芩根中主要化合物的影响明显大于PS-MPs和PE-MPs(图6)。MPs处理显著影响了黄芩根中主要化合物含量的积累。

综上,MPs对黄芩生长的影响因类型而异。PS-MPs和PP-MPs对黄芩生长的影响较为显著,而PE-MPs的影响相对较小。这可能与它们的物理特性(如粒径、形状)和化学性质(如表面活性)有关。黄芩对MPs胁迫表现出部位差异,PS-MPs和PE-MPs处理显著提升了抗氧化酶活性,而PP-MPs处理的影响相对较小。这说明不同类型MPs可能通过不同的机制影响植物的抗氧化系统,进而影响植物对环境胁迫的响应。同时,MPs胁迫在植物代谢层面上引发了代谢重编程,PS-MPs和PP-MPs的影响较为显著。PE-MPs主要影响糖代谢和TCA循环,而PS-MPs和PP-MPs则影响半乳糖代谢、甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢等关键途径。MPs胁迫可以影响植物的代谢途径,也可能改变植物的生长发育和次生代谢。MPs尤其是PP-MPs对黄芩根中汉黄芩素和黄芩素的影响最为显著,而对黄芩苷和汉黄芩苷的影响则相对较小。了解不同类型MPs对黄芩等药用植物的影响,有助于评估MPs污染的潜在风险,可以开发出减少MPs对植物影响的策略,从而保护和提高农作物和药用植物的产量和质量。

4 结论

(1)聚苯乙烯(PS)、聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)微塑料因类型不同而对黄芩的生长影响不同,其中PE-MPs对黄芩生长的影响相对较小,PS-MPs和PP-MPs的影响则更为显著。

(2)PS-MPs处理导致光合色素含量显著降低。在抗氧化酶活性方面,黄芩对MPs胁迫表现出部位差异,PS-MPs和PE-MPs处理显著提升了抗氧化酶活性,而PP-MPs处理的影响相对较小。

(3)MPs污染在植物代谢层面上引发了代谢重编程,其中PS-MPs和PP-MPs的影响较为显著,与生理生化反应研究结果一致。PE-MPs主要影响糖代谢和TCA循环,而PS-MPs和PP-MPs则影响半乳糖代谢及甘氨酸、丝氨酸和苏氨酸代谢等关键途径。

(4)MPs尤其是PP-MPs对黄芩根中汉黄芩素和黄芩素这两种化合物的影响显著,而对黄芩苷和汉黄芩苷的影响则相对较小。此外,与PS-MPs和PE-MPs相比,PP-MPs对黄芩根中主要化合物含量的影响更为明显。

参考文献：

[1] YADAV S, GUPTA E, PATEL A, et al. Unravelling the emerging threats of microplastics to agroecosystems[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2022, 21(3):771-798.

[2] MAI L, SUN X F, XIA L L, et al. Global riverine plastic outflows[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(16):10049-10056.

[3] 程芳, 姜启英, 阚丽萍, 等. 微塑料污染防治的建构研究[J]. 核安全, 2020, 19(6):142-146. CHENG F, JIANG Q Y, KAN L P, et al. Research on the construction of microplastic pollution prevention and control[J]. *Nuclear Safety*, 2020, 19(6):142-146.

[4] DE SOUZA, MACHADO A A, LAU C W, KLOAS W, et al. Microplastics can change soil properties and affect plant performance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(10):6044-6052.

[5] 刘军, 李振敏, 张君楚, 等. 微塑料污染研究进展[J]. 山东化工, 2022, 51(2):67-70. LIU J, LI Z M, ZHANG J C, et al. Research progress of microplastic pollution[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2022, 51(2):67-70.

[6] ZHOU Y F, LIU X N, WANG J. Characterization of microplastics and the association of heavy metals with microplastics in suburban soil of central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694:133798.

[7] 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.

[8] 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]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645:1048-1056.

[9] 栗敏, 刘强, 曹东东, 等. 不同粒径商品聚乙烯微塑料对2种蔬菜种子发芽和幼苗生长的影响[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(6):419-433. LI M, LIU Q, CAO D D, et al. Effects of different commercial polyethylene microplastics with different particle sizes on seed germination and seedling growth of two vegeta- bles[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, 17(6):419-433.

[10] BANDMANN V, MÜLLER J D, KÖHLER T, et al. Uptake of fluorescent nano beads into BY2-cells involves clathrin-dependent and clathrin-independent endocytosis[J]. *FEBS Letters*, 2012, 586 (20):3626-3632.

[11] 杨国梅, 李娟, 龙健, 等. 聚乙烯微塑料暴露对辣椒生长及产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8):1695-1702. YANG G M, LI J, LONG J, et al. Effects of polyethylene microplastics exposure on growth and yield of *Capsicum annuum* L.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(8):1695-1702.

[12] 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. QIU C C, LI G X, LI Q S, et al. Effects polystyrene nanoplastics (PS-NPS) on the physiology of *Allium sativum* L.[J]. *Environmental Science*, 2022, 43 (8):4387-4393.

[13] SHI R Y, LIU W T, LIAN Y H, et al. Type-dependent effects of microplastics on tomato (*Lycopersicon esculentum* L.): focus on root exudates and metabolic reprogramming[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 859:160025.

[14] SHANG X F, HE X R, HE X Y, et al. The genus Scutellaria an ethnopharmacological and phytochemical review[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2010, 128(2):279-313.

[15] 李艳荣, 潘海峰, 魏红, 等. 中药材黄芩的研究近况[J]. 承德医学院学报, 2009, 26(4):418-420. LI Y R, PAN H F, WEI H, et al. Recent research on *Scutellaria baicalensis*[J]. *Journal of Chengde Medical College*, 2009, 26(4):418-420.

[16] 徐芬芬, 叶利民, 徐卫红, 等. 小白菜叶绿素含量的测定方法比较[J]. 北方园艺, 2010(23):32-34. XU F F, YE L M, XU W H, et al. Comparison of methods of chlorophyll extraction in Chinese cabbage [J]. *Northern Horticulture*, 2010(23):32-34.

[17] 徐亚军, 赵龙飞, 邢鸿福, 等. 内生细菌对盐胁迫下小麦幼苗脯氨酸和丙二醛的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(11):3726-3737. XU Y J, ZHAO L F, XING H F, et al. Effects of endophytic bacteria on proline and malondialdehyde of wheat seedlings under salt stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11):3726-3737.

[18] TIRYAKI D, AYDIN İ, ATICI Ö. Psychrotolerant bacteria isolated from the leaf apoplast of cold-adapted wild plants improve the cold resistance of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under low temperature[J]. *Cryobiology*, 2019, 86:111-119.

[19] 徐东, 赵建, 黄汉昌, 等. 改良的黄嘌呤氧化酶法测定动植物组织中SOD比活力[J]. 食品科学, 2011, 32(6):237-241. XU D, ZHAO J, HUANG H C, et al. Determination of SOD specific activity in animal and plant tissues by improved xanthine oxidase method[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 32(6):237-241.

[20] 郑有飞, 胡程达, 吴荣军, 等. 臭氧胁迫对冬小麦光合作用、膜脂过氧化和抗氧化系统的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(7):1643-1651. ZHENG Y F, HU C D, WU R J, et al. Effects of ozone stress upon winter wheat photosynthesis, lipid peroxidation and antioxidant systems[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(7):1643-1651.

[21] LIU J, LIU Y, WANG Y, et al. The integration of GC-MS and LC-MS to assay the metabolomics profiling in *Panax ginseng* and *Panax quinquefolius* reveals a tissue- and species-specific connectivity of primary metabolites and ginsenosides accumulation[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2017, 135:176-185.

[22] KALČÍKOVÁ G, ANDREJA Ž G, KLADNIK A, et al. Impact of polyethylene microbeads on the floating freshwater plant duckweed Lemna minor[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 230:1108-1115.

[23] CYSEWSKI P, SHYICHUK A. A first principle characterization of polyethylene, poly (propylene) and polystyrene macroradicals properties[J]. *Macromolecular Theory and Simulations*, 2006, 15(4): 331-338.

[24] LIAN, J P, WU J N, XIONG H X, et al. Impact of polystyrene nanoplastics (PS-NPs) on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 385:121620.

[25] ZHAO T T, TANG H L, XIE L, et al. *Scutellaria baicalensis* Georgi. (Lamiaceae): a review of its traditional uses, botany, phytochemistry, pharmacology and toxicology[J]. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2019, 71(9):1353-1369.

[26] UDREA A-M, MERNEA M, BUIU C, et al. *Scutellaria baicalensis* flavones as potent drugs against acute respiratory injury during SARS-

CoV-2 infection: structural biology approaches[J]. *Processes*, 2020, 8(11): 1468.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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: 929-937.

[30] 张传玲, 江红生, 李长江, 等. 纳米银与镉的复合毒性对拟南芥根系形态及叶片生理指标的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(5): 1951-1960. ZHANG C L, JIANG H S, LI C J, et al. Effects of Ag NPs and cadmium on root morphology and leaves physiological indexes of *Arabidopsis thaliana*. [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(5): 1951-1960.

[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]WANG P, RICHTER A S, KLEEBERG J R W, et al. Post-translational coordination of chlorophyll biosynthesis and breakdown by BCMs maintains chlorophyll homeostasis during leaf development [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1254.

[33] LI J M, HU L P, ZHANG L, et al. Exogenous spermidine is enhancing tomato tolerance to salinity-alkalinity stress by regulating chloroplast antioxidant system and chlorophyll metabolism[J]. *BMC Plant Biology*, 2015, 15: 303.

[34] 李芳兰, 包维楷, 吴宁. 白刺花幼苗对不同强度干旱胁迫的形态与生理响应[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5406-5416. LI F L, BAO W K, WU N. Morphological and physiological responses of current *Sophora davidii* seedlings to drought stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(10): 5406-5416.

[35] 韩艺, 赵继发, 蔡璨, 等. 光捕获叶绿素 a/b 结合蛋白基因在植物逆境胁迫中的研究进展[J]. 高师理 科学刊, 2023, 43(6): 79-83. HAN Y, ZHAO J F, CAI C, et al. Research progress of light-harvesting chlorophyll a/b-binding protein genes in plant stresses[J]. *Journal of Science of Teachers' College and University*, 2023, 43(6): 79-83.

[36] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(12): 909-930.

[37] ZHAO Q, MA C X, WHITE J C, et al. Quantitative evaluation of multi-wall carbon nanotube uptake by terrestrial plants[J]. *Carbon*, 2017, 114: 661-670.

[38] 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.

[39] ZHOU Q, HU X. Systemic stress and recovery patterns of rice roots in response to graphene oxide nanosheets[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(4): 2022-2030.

[40] 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.

[41] ZEB A, LIU W T, MENG L Z, et al. Effects of polyester microfibers (PMFs) and cadmium on lettuce (*Lactuca sativa*) and the rhizospheric microbial communities: a study involving physio-biochemical properties and metabolomic profiles[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127405.

[42] LI J, YU S, YU Y, et al. Effects of microplastics on higher plants: a review[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2022, 109(2): 241-265.

[43] LIAN J D, LIU W T, MENG L Z, et al. Foliar-applied polystyrene nanoplastics (PSNPs) reduce the growth and nutritional quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 280: 116978.

[44] OUYANG X X, MA J, FENG B C, et al. Effects of nanoplastics on the growth, transcription, and metabolism of rice (*Oryza sativa* L.) and synergistic effects in the presence of iron plaque and humic acid[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 363: 125246.

[45] SASSE J, MARTINOIA E, NORTHEN T. Feed your friends: do plant exudates shape the root microbiome[J]. *Trends in Plant Science*, 2018, 23(1): 25-41.

[46] WU B Y, ZHU L Z, LE X C. Metabolomics analysis of TiO_2 nanoparticles induced toxicological effects on rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 230: 302-310.

[47] LI X F, ZHANG Y, WANG J X, et al. Revealing the metabolomics and biometrics underlying phytotoxicity mechanisms for polystyrene nanoplastics and dibutyl phthalate in dandelion (*Taraxacum officinale*)[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 905: 167071.

[48] HUANG X N, CERVANTES-AVILÉS P, LI W W, et al. Drilling into the metabolomics to enhance insight on corn and wheat responses to molybdenum trioxide nanoparticles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(20): 13452-13464.

[49] LIAN J, WU J, ZEB A, et al. Do polystyrene nanoplastics affect the toxicity of cadmium to wheat(*Triticum aestivum* L.)?[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263: 114498.

[50] WANG Z L, WANG S, KUANG Y, et al. A comprehensive review on phytochemistry, pharmacology, and flavonoid biosynthesis of *Scutellaria baicalensis*[J]. *Pharmaceutical Biology*, 2018, 56(1): 465-484.

[51] WANG X, XIE L, LONG J Y, et al. Therapeutic effect of baicalin on inflammatory bowel disease:a review[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2022, 283: 114749.

[52] KIM Y S, KIM Y B, KIM Y, et al. Overexpression of cinnamate 4-hydroxylase and 4-coumaroyl CoA ligase prompted flavone accumulation in *Scutellaria baicalensis* hairy roots[J]. *Natural Product Communications*, 2014, 9(6): 803-807.

(责任编辑:宋潇)