

袁洁, 吴晓晴, 石琨, 等. 丛枝菌根真菌对甘薯生物量、养分吸收和根系分泌物的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(11): 2073-2082.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.11.011

丛枝菌根真菌对甘薯生物量、养分吸收和根系分泌物的影响

袁洁¹, 吴晓晴^{1,3}, 石琨^{1,2}, 王磊¹, 纪程¹, 钟月华¹, 冯冰¹, 朱国鹏², 孙丽¹, 汪吉东¹, 张永春¹

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部江苏耕地保育科学观测实验站, 江苏 南京 210014; 2.海南大学园艺学院, 海南 海口 570228; 3.南京农业大学, 江苏 南京 210095)

摘要: 为探究丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)对甘薯生长发育的影响,本研究在低钾(K0)和高钾(K1)土壤中,分别接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉(*Claroideoglomus etunicatum*),测定甘薯生物量和氮、磷、钾吸收量、根系分泌物。结果表明,丛枝菌根真菌能够显著提高甘薯根系干重和根系氮、磷、钾吸收量($P<0.05$),根系丛枝菌根真菌定殖率与根系氮、磷、钾吸收量呈极显著正相关($P<0.01$)。丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉对甘薯根系分泌物中脂质和类脂分子、有机杂环化合物影响明显。在低钾土壤中,丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉主要影响宿主植物膜转运蛋白、矿物质吸收;在高钾土壤中,丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉主要影响宿主植物的植物激素合成、植物次级代谢产物合成。甘薯丛枝菌根真菌定殖率、甘薯根系氮、磷、钾吸收量与环烯醚萜苷 Caryoptosidic acid、6-反式-白三烯 B₄、白三烯 B₄、2-羟基-4-甲基戊酸、网脉碱、L-阿糖醇、托品酸、橙皮素、坎松醇 F 的相关性较强,这些代谢物可能在丛枝菌根真菌定殖甘薯根系过程中发挥关键作用。本研究有助于解析丛枝菌根真菌的促生作用及其在生态系统中的潜在生态功能,为丛枝菌根真菌在甘薯生产中的应用提供理论依据。

关键词: 甘薯; 丛枝菌根真菌; 根系分泌物; 非靶向代谢组

中图分类号: S154.3; S531 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)11-2073-10

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on biomass, nutrient uptake and root exudates of *Ipomoea batatas* L.

YUAN Jie¹, WU Xiaoqing^{1,3}, SHI Kun^{1,2}, WANG Lei¹, JI Cheng¹, ZHONG Yuehua¹, FENG Bing¹, ZHU Guopeng², SUN Li¹, WANG Jidong¹, ZHANG Yongchun¹

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Jiangsu), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 2. College of Horticulture, Hainan University, Haikou 570228, China; 3. Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

收稿日期: 2024-07-05

基金项目: 江苏省农业科学院资环所青年联合创新项目[ZCX(2022)21]

作者简介: 袁洁(1990-), 女, 江苏如东人, 博士, 助理研究员, 研究方向为甘薯根际微生态。(E-mail) yuanjie@jaas.ac.cn

通讯作者: 汪吉东, (E-mail) jdwang66@163.com; 张永春, (E-mail) zhang66@sina.com

Abstract: To explore the impact of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on the growth and development of *Ipomoea batatas* L., *Claroideoglomus etunicatum* (a kind of AMF) was inoculated respectively in low-potassium (K0) and high-potassium (K1) soils, and the biomass, uptake amounts of nitrogen, phosphorus, potassium and root exudates of *Ipomoea batatas* L. were measured in

this study. The results showed that arbuscular mycorrhizal fungi could significantly increase the dry weight of *Ipomoea batatas* L. roots and the nitrogen, phosphorus and potassium uptake amounts of the roots ($P < 0.05$). There was an extremely significant positive correlation between the colonization rate of arbuscular mycorrhizal fungi in the roots and the nitrogen, phosphorus and potassium uptake amounts of the roots ($P < 0.01$). *Claroideoglomus etunicatum*, the arbuscular mycorrhizal fungus, had a significant impact on lipid and lipid-like molecules and organic heterocyclic compounds in the root exudates of *Ipomoea batatas* L.. In low-potassium soil, *Claroideoglomus etunicatum* mainly affected the membrane transport proteins and mineral absorption of the host plants; in high-potassium soil, it mainly influenced the synthesis of plant hormones and the synthesis of plant secondary metabolites of the host plants. The colonization rate of arbuscular mycorrhizal fungi in *Ipomoea batatas* L., as well as the nitrogen, phosphorus and potassium uptake amounts of sweet potato roots, had a relatively strong correlation with Caryoptosidic acid, 6-trans-leukotriene B₄, leukotriene B₄, 2-hydroxy-4-methylvaleric acid, reticuline, L-arabitol, tropic acid, hesperetin and kanzonol F. These metabolites may play a key role in the process of arbuscular mycorrhizal fungi colonizing the roots of *Ipomoea batatas* L.. This study is helpful for analyzing the growth-promoting effect of arbuscular mycorrhizal fungi and its potential ecological functions in the ecosystem, and provides a theoretical basis for the application of arbuscular mycorrhizal fungi in *Ipomoea batatas* L. production.

Key words: sweet potato *Ipomoea batatas* L.; arbuscular mycorrhizal fungi; root exudates; non-targeted metabolomics

甘薯 (*Ipomoea batatas* L.) 是全球重要的食品、饲料和工业原料作物,也是中国重要的粮食和能源作物^[1]。甘薯分枝结薯期(栽后 30 d)是根系生长发育的关键时期,对甘薯产量具有重要影响^[2]。丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)能与超过 80% 的陆生植物根系形成共生关系,显著提升宿主植物养分吸收效率、促进根系生长发育,其在农业生产中的应用价值已被广泛认可^[3]。研究结果表明,丛枝菌根真菌能定殖于甘薯根系,促进甘薯光合作用,优化甘薯根系形态,调控甘薯对养分的吸收利用,最终提升甘薯产量^[2,4-7]。此外,钾元素在甘薯根系生长和养分吸收中发挥重要作用。已有研究结果表明,施钾、接种丛枝菌根真菌及两者相互作用均会显著影响甘薯根系生长和养分吸收,而无论是否施钾,接种丛枝菌根真菌均能够促进甘薯根系生长和养分吸收^[6-7]。因此,接种丛枝菌根真菌是促进甘薯养分吸收和根系生长的有效手段^[8]。

根系分泌物在根系与土壤环境互作过程中发挥重要作用,其作用备受关注^[9]。根系分泌物包括大分子有机物(如糖类、氨基酸、酶类等)、小分子有机物(有机酸、酚酸类、黄酮类等)、甾醇类、生长因子、核苷酸等^[10]。研究结果表明,丛枝菌根真菌可通过促进植物根系分泌磷酸酶直接活化土壤养分^[11],并显著增加黄花蒿根系分

泌物中可溶性糖、可溶性蛋白、有机酸、游离氨基酸的含量,促进植物对养分的吸收和生物量的积累^[12-13]。此外,丛枝菌根真菌能够调控棉花^[14]、青蒿^[15]、玉米^[16]等植物根系分泌物的释放,进而提高植物抗性、缓解连作障碍、促进植物生长和对养分的吸收。钾水平会影响大豆根系分泌物的释放^[17],施钾可促进油菜根系分泌有机酸从而缓解干旱胁迫^[18]。然而,目前关于甘薯根系分泌物的研究相对较少,特别是在不同钾水平下丛枝菌根真菌调控甘薯根系分泌物的机制尚未阐明。

本研究拟在低钾和高钾土壤中,分别接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉(*Claroideoglomus etunicatum*),探究丛枝菌根真菌对甘薯生物量及氮、磷、钾吸收量和根系分泌物的影响,为丛枝菌根真菌在甘薯栽培中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试甘薯品种为徐薯 28^[7]。供试丛枝菌根真菌为幼套近明球囊霉(*C. etunicatum*),将三叶草作为宿主植物进行丛枝菌根真菌室内盆栽扩繁^[7],每 10 g 菌剂含孢子 57 个。供试土壤取自江苏姜堰张甸镇国家甘薯产业技术体系“生态与土壤管理岗位”甘薯种植示范基地(32°6'N, 120°3'E),土质为

沙质潮土。低钾土壤(K0)碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为49 mg/kg、23 mg/kg、66 mg/kg, pH 值为7.13;高钾土壤(K1)碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为52 mg/kg、19 mg/kg、106 mg/kg, pH 值为7.13^[7]。

1.2 盆栽试验设计

本试验于2022年5月至6月份在江苏省农业科学院农业资源与环境研究所试验基地(32°4'N, 118°52'E)进行,在低钾土壤(K0)和高钾土壤(K1)中分别接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉(AMF)。试验共设置4个处理/对照,分别为低钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉处理(K0AMF)、低钾土壤对照(K0NAMF)、高钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉处理(K1AMF)、高钾土壤对照(K1NAMF),每个处理设置3个重复。处理每盆接种400个丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉孢子(70 g 菌剂);对照每盆接种等量灭活丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉及接种物滤液^[2,7]。每盆装7 kg 土壤,移栽1株甘薯苗,管理方法参照常规田间管理进行^[2,7]。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 根系定殖率测定 在分枝结薯期采集甘薯根系样品,取样方式为破坏性取样。取新鲜根系,利用墨水醋染法染色,利用显微镜观察并测定丛枝菌根真菌侵染率^[7]。

1.3.2 生物量测定 测定甘薯地上部分和根系鲜重,杀青后于75℃烘干至恒重,测定甘薯地上部分和根系干重^[7]。

1.3.3 植株养分测定 植株样品用硫酸-过氧化氢消煮并定容^[19],用凯氏定氮法测定植株氮含量,用钼锑抗比色法测定植株磷含量,用火焰光度计测定植株钾含量。

计算植株地上部分和根系的养分吸收量^[20],公式如下:

地上部分养分(氮/磷/钾)吸收量=地上部分干重×地上部分养分(氮/磷/钾)含量;

根系养分(氮/磷/钾)吸收量=根系干重×根系养分(氮/磷/钾)含量。

1.3.4 根系分泌物的提取与检测

1.3.4.1 根系分泌物提取^[21-22] 从盆中取出整株甘薯,甘薯根系用流动自来水冲洗,再用无菌蒸馏水洗涤。将甘薯放入装有无菌双蒸水的玻璃容器

中培养24 h,根系避光。将含有根系分泌物的溶液用直径为0.22 μm的水系滤膜过滤,冷冻干燥,保存于-20℃冰箱。称取0.02 g干燥根系分泌物,加入1 mL含75%甲醇的提取液(含同位素标记内标),经研磨、超声、静置、离心后,获得上清液。

1.3.4.2 根系分泌物非靶向代谢组分析^[21-22]

采用超高效液相色谱仪(Vanquish, Thermo Fisher Scientific)进行液相色谱-串联质谱法(LC-MS/MS)分析。色谱柱为Acquity UPLC HSS T3液相色谱柱(2.1 mm×100.0 mm, 1.8 μm, Waters);流动相A为水相(含5 mmol/L乙酸铵和5 mmol/L乙酸),流动相B为乙腈,进样体积为2 μL,样品盘温度为4℃。利用Orbitrap Exploris 120质谱仪采集一级、二级质谱数据。另取等量所有样品的上清液混合成质控样本(QC),用于评价质谱系统稳定性。对代谢物原始数据进行格式转换、峰识别和积分,获得每个代谢物的注释信息,利用KEGG数据库对代谢物进行功能注释分析^[21,23]。

1.4 数据处理与分析

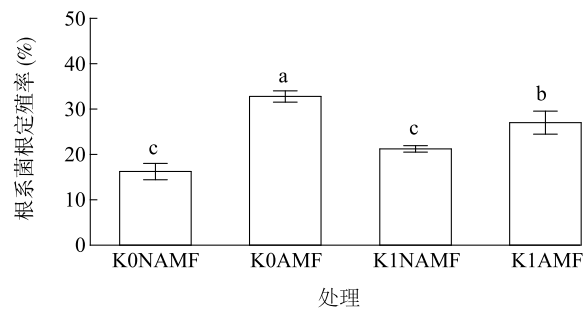
利用t检验对2组数据进行差异显著性分析。利用单因素方差分析(One-way ANOVA)对多组数据进行差异显著性检验,通过Turkey's法对组间差异进行分析^[2,7,19]。代谢物数据采用主成分分析(PCA)和正交偏最小二乘法-判别分析(OPLS-DA)进行分析^[24-26]。初步筛选变量投影重要性(VIP)>1的代谢物^[25-26],进一步结合t检验、单变量分析的P值、代谢物含量的差异倍数(Fold change, FC)筛选差异显著的代谢物,log₂FC>0表示代谢物含量增加,log₂FC<0表示代谢物含量减少^[25-26]。利用KEGG数据库对筛选得到的差异代谢物进行富集分析^[25-26],利用Origin2021进行皮尔森相关性分析,并利用Adobe illustrator 2023处理图片。

2 结果与分析

2.1 丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉对甘薯根系丛枝菌根真菌定殖率、生物量和养分吸收的影响

如图1所示,接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉的K0AMF处理和K1AMF处理甘薯根系丛枝菌根真菌定殖率显著高于K0NAMF对照和K1NAMF对照。如表1所示,和K0NAMF对照相比,K0AMF

处理甘薯根系干重显著提高 165% ($P<0.05$), 根系氮吸收量显著提高 124% ($P<0.05$), 根系磷吸收量显著提高 165% ($P<0.05$), 根系钾吸收量显著提高 209% ($P<0.05$)。和 K1AMF 对照相比, K1AMF 处理甘薯根系干重显著提高 89% ($P<0.05$), 根系氮吸收量显著提高 71% ($P<0.05$), 根系磷吸收量显著提高 86% ($P<0.05$), 根系钾吸收量显著提高 102% ($P<0.05$)。如表 2 所示, 甘薯根系氮吸收量、磷吸收量和钾吸收量与甘薯根系丛枝菌根真菌定殖率呈极显著正相关 ($P<0.01$)。综上, 接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉能够显著提高甘薯生物量, 促进甘薯根系对氮、磷、钾养分的吸收。



KOAMF: 低钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉处理; KONAMF: 低钾土壤对照; K1AMF: 高钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉处理; K1NAMF: 高钾土壤对照。图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 1 甘薯根系丛枝菌根真菌定殖率

Fig.1 Colonization rate of arbuscular mycorrhizal fungi in *Ipomoea batatas* L.

表 1 接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉对甘薯生物量和养分吸收的影响

Table 1 Impact of inoculating arbuscular mycorrhizal fungi *Claroideoglomus etunicatum* on *Ipomoea batatas* L. biomass and nutrient uptake

处理	KONAMF	KOAMF	K1NAMF	K1AMF
地上部分干重(g/株)	5.91±0.79a	4.83±0.43a	5.59±0.06a	5.97±0.12a
根干重(g/株)	1.44±0.06d	3.83±0.13b	2.49±0.20c	4.70±0.28a
地上部分含氮量(g/kg)	37.15±0.80a	38.34±1.50a	40.96±0.93a	37.79±1.09a
地上部分含磷量(g/kg)	0.94±0.04ab	0.84±0.03b	1.00±0.00a	0.92±0.02ab
地上部分含钾量(g/kg)	32.97±0.69b	33.22±0.36b	36.96±0.82a	34.60±0.46ab
根系含氮量(g/kg)	27.35±2.22a	23.01±1.03a	26.60±1.09a	23.97±0.37a
根系含磷量(g/kg)	1.07±0.12a	1.07±0.09a	1.09±0.03a	1.08±0.03a
根系含钾量(g/kg)	23.93±0.42b	27.83±0.07a	25.98±0.99ab	27.94±0.38a
地上部分氮吸收量(mg/株)	218.17±25.13a	183.78±9.22a	229.05±3.88a	225.22±3.21a
地上部分磷吸收量(mg/株)	5.51±0.60a	4.06±0.43a	5.57±0.04a	5.50±0.05a
地上部分钾吸收量(mg/株)	195.84±29.48a	160.03±12.39a	206.64±2.60a	206.36±1.49a
根系氮吸收量(mg/株)	39.27±3.03c	88.00±4.61b	65.91±3.70b	112.73±7.54a
根系磷吸收量(mg/株)	1.54±0.19c	4.08±0.32a	2.71±0.14b	5.04±0.19a
根系钾吸收量(mg/株)	34.43±1.22c	106.50±3.59a	65.06±7.32b	131.33±7.98a

KOAMF: 低钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉处理; KONAMF: 低钾土壤对照; K1AMF: 高钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉处理; K1NAMF: 高钾土壤对照。同一行数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 2 甘薯根系丛枝菌根真菌定殖率、生物量和养分吸收相关性分析

Table 2 Correlation analysis of colonization rate, biomass and nutrient uptake of arbuscular mycorrhizal fungi in *Ipomoea batatas* L. roots

指标	相关系数			
	根系干重	根系氮吸收量	根系磷吸收量	根系钾吸收量
根系丛枝菌根真菌定殖率	0.687 *	0.733 **	0.746 **	0.798 **
根系干重		0.892 ***	0.889 ***	0.918 ***
根系氮吸收量			0.986 ***	0.979 ***
根系磷吸收量				0.979 ***

* 表示相关性显著 ($P<0.05$); ** 表示相关性极显著 ($P<0.01$); *** 表示相关性极显著 ($P<0.001$)。

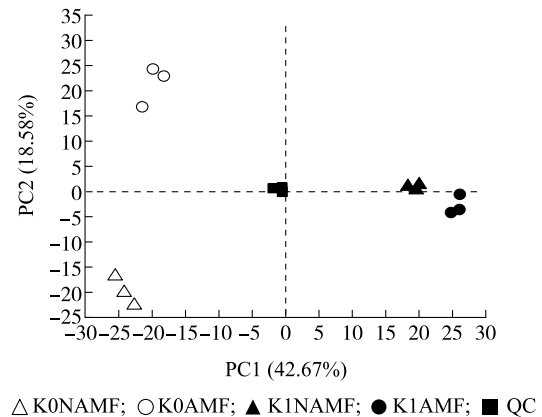
2.2 代谢组数据质控

利用液相色谱-串联质谱法(LC-MS/MS)获得甘薯根系分泌物,并进行主成分分析。如图2所示,以4个处理的混合样品作为质控样品(QC),质控样品聚集在一起表明数据可信度较高^[25-26]。第1主成分轴(PC1)、第2主成分轴(PC2)的解释率分别为42.7%和18.6%。在PC2轴上,KOAMF处理和KONAMF对照分别分布在正半轴和负半轴;在PC1轴上,K1NAMF对照和K1AMF处理明显聚为2组。表明在低钾或高钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉均能够显著影响甘薯根系分泌物。

2.3 丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉对甘薯根系分泌物中化合物总量的影响

如图3所示,甘薯根系分泌物总量为1 287种,包含15类化合物,其中脂质和类脂分子(451种)、有机杂环化合物(187种)、有机酸及其衍生物(165种)、有机氧化合物(133种)、苯环型化合物(122种)和苯丙类和聚酮类(96种)数量较多,是甘薯根

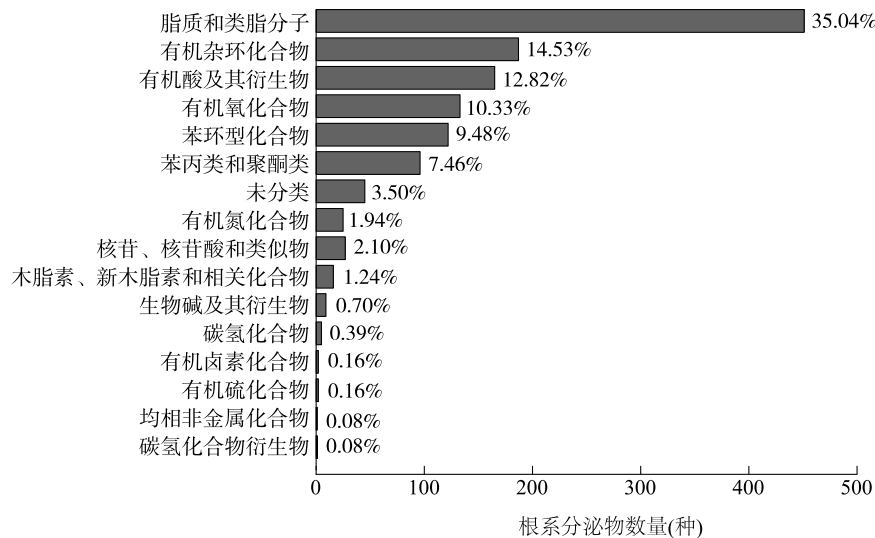
系分泌物的主要组分。



KOAMF:低钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉处理; KONAMF:低钾土壤对照;K1AMF:高钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉处理;K1NAMF:高钾土壤对照。QC:质控样本。

图2 甘薯根系分泌物主成分分析

Fig.2 Principal component analysis of *Ipomoea batatas* L. root exudates



图中百分数为分泌物数量占总数的比例。

图3 甘薯根系分泌物种类和数量

Fig.3 Species and quantity of root exudates of *Ipomoea batatas* L.

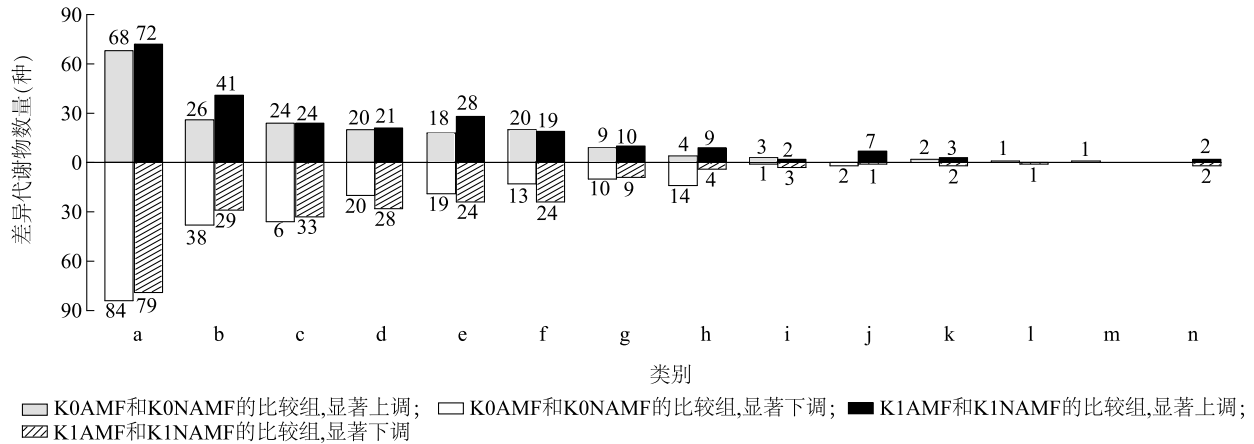
2.4 甘薯根系分泌物中差异代谢物的鉴定及分析

对甘薯根系分泌物进行 OPLS-DA^[24-25],结果表明,KOAMF 处理和 KONAMF 对照的甘薯根系分泌物存在较大差异,K1AMF 处理和 K1NAMF 对照的甘薯根系分泌物存在较大差异。基于 *t* 检验筛选出 KOAMF 和 KONAMF 的比较组、K1AMF 和 K1NAMF 的比较组的差异代谢物。如图4所示,差异代谢物

可分为14类,其中脂质和类脂分子数量最多。相较于 KONAMF 对照,KOAMF 处理甘薯根系分泌物中有196种代谢物含量显著上升($P < 0.05$),237种代谢物含量显著下降($P < 0.05$),含量上升代谢物数量显著低于含量下降代谢物数量。相较于 K1NAMF 对照,K1AMF 处理甘薯根系分泌物中有238种代谢物含量显著上升($P < 0.05$),239种代谢物含量显著

下降 ($P < 0.05$), 含量上升代谢物数量和含量下降代谢物数量接近。K1AMF 和 K1NAMF 的比较组中含量上升的代谢物数量显著高于 KOAMF 和 KONAMF

的比较组。丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉对甘薯根系分泌物中脂质和类脂分子、有机杂环化合物、有机酸及其衍生物影响明显。



a: 脂质和类脂分子; b: 有机杂环化合物; c: 有机酸及其衍生物; d: 有机氧化合物; e: 苯环型化合物; f: 苯基丙烷和聚酮; g: 其他; h: 核苷、核苷酸和类似物; i: 有机氮化合物; j: 木脂素、新木脂素和相关化合物; k: 碳水化合物及其衍生物; l: 有机卤素化合物; m: 有机硫化物; n: 生物碱及其衍生物。KOAMF: 低钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉处理; KONAMF: 低钾土壤对照; K1AMF: 高钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉处理; K1NAMF: 高钾土壤对照。横坐标上方数据表示上调代谢物数量; 横坐标下方数据表示下调代谢物数量。

图 4 甘薯根系分泌物的差异代谢物数量

Fig.4 Quantity of differential metabolites in *Ipomoea batatas* L. root exudates

2.5 甘薯根系分泌物中差异代谢物的物富集分析

如图 5 所示, 对显著差异代谢物进行 KEGG 富集分析。在低钾和高钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉均会显著影响甘薯根系苯丙氨酸代谢和蛋白质消化和吸收 ($P < 0.05$)。在低钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉显著影响甘薯 ABC 转运蛋白、氨酰-tRNA 生物合成、嘌呤代谢、矿物质吸收; 在高钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉显著影响甘薯色氨酸代谢、萜类和类固醇生物合成、萜类骨架生物合成、植物激素生物合成、玉米素生物合成。以上结果说明, 在低钾土壤中, 丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉主要通过影响宿主植物膜转运蛋白、矿物质吸收从而调控植物的生长; 在高钾土壤中, 丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉主要通过影响宿主植物植物激素合成、植物次级代谢产物合成从而调控植物的生长。

2.6 关键差异代谢物及其与甘薯产量养分吸收相关性分析

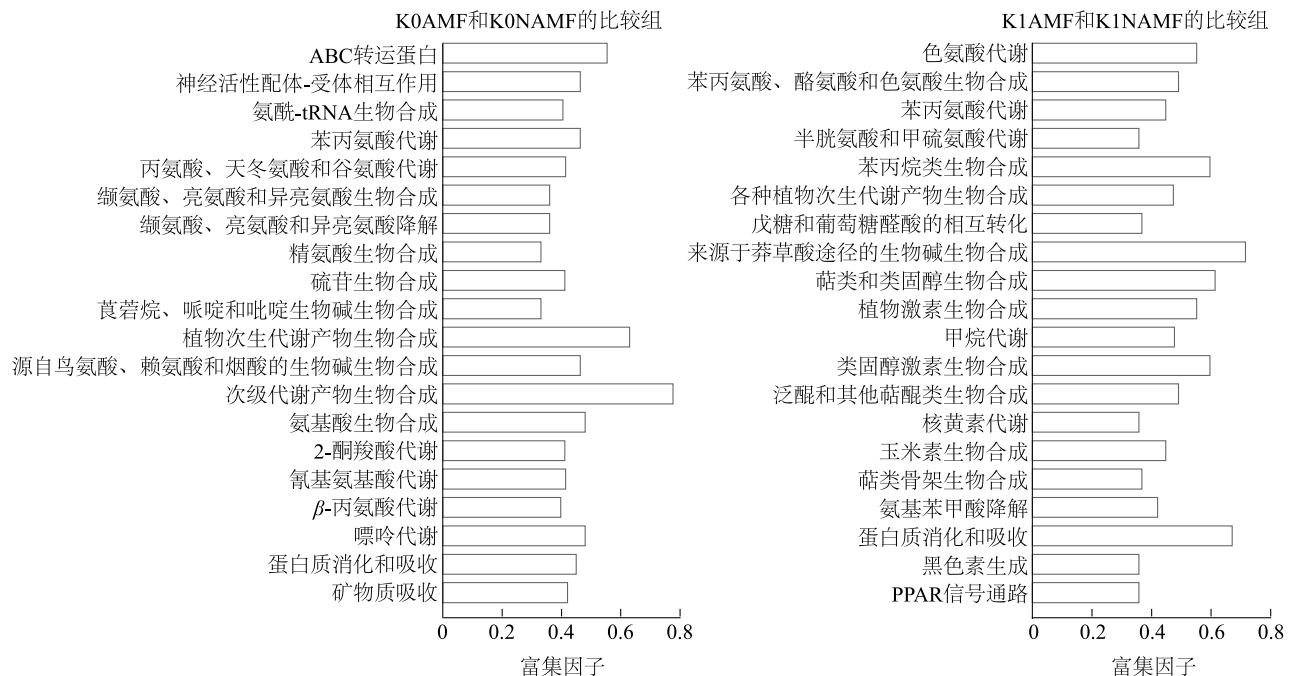
如图 6 所示, KOAMF 和 KONAMF 的比较组、K1AMF 和 K1NAMF 的比较组 2 个比较组含量上升的相同代谢物有 38 种, 其中脂质和类脂分子数量最多 (13 种); 含量下降的共同代谢物有 35 种, 其中脂质

和类脂分子数量最多 (12 种)。在这 73 种代谢物中, 甘薯根系干重与 6-反式-白三烯 B₄、白三烯 B₄、丙酸香芹酯、4,8,12,15-十八碳四烯酸、5-过氧二十碳四烯酸、8-异前列腺素 F2 α 、L-阿糖醇、乙酰亮氨酸、托品酸、橙皮素、对羟基苯丙酸呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与环烯醚萜苷 Caryoptosidic acid、网脉碱、坎松醇 F 呈极显著正相关 ($P < 0.001$)。甘薯丛枝菌根真菌定殖率和甘薯根系氮、磷、钾吸收量与环烯醚萜苷 Caryoptosidic acid、6-反式-白三烯 B₄、白三烯 B₄、2-羟基-4-甲基戊酸、网脉碱、L-阿糖醇、托品酸、橙皮素、坎松醇 F 间的相关性较强, 这些代谢物可能是甘薯响应丛枝菌根真菌接种的关键代谢物, 在丛枝菌根真菌定殖甘薯根系过程中发挥重要作用。

3 讨论

3.1 丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉对甘薯根系生物量和养分吸收的影响

丛枝菌根真菌能够与大多数陆生植物建立共生体系, 有效促进宿主植物根系生长和养分吸收, 在农业生产中具有重要作用^[3,27-31]。研究结果表明, 丛枝菌根真菌通过促进植物根系的生长获取所需的碳源, 同时帮助植物从土壤中吸收更多的养分, 促进植



KOAMF:低钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉处理;KONAMF:低钾土壤对照;K1AMF:高钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉处理;K1NAMF:高钾土壤对照。

图5 甘薯根系分泌物的差异代谢物富集分析

Fig.5 Enrichment analysis of differential metabolites in *Ipomoea batatas* L. root exudates

物的生长和发育^[32-33]。荟萃分析结果表明,与丛枝菌根真菌共生后的植物地上部分、根系和全株生物量分别增加 36.3%、28.5%、29.7%,全株对氮、磷、钾的吸收量分别增加 22.1%、36.3%和 18.5%^[32]。丛枝菌根真菌对植物根系生长的促进作用受到多个因素的综合影响,包括植物根系特征、植物对丛枝菌根真菌的依赖度、土壤特性等^[34-35]。在甘薯中,多株丛枝菌根真菌已被证实能够在根系定殖,并对甘薯生物量的提升有不同程度的促进作用^[8,36-38]。前期研究结果表明,丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉能够显著增加甘薯根系干重、根体积、根表面积、根平均直径等,从而提高收获期块根产量^[6-7]。

本研究中,接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉能够显著提高甘薯根系丛枝菌根真菌定殖率及甘薯根系干重、氮吸收量、磷吸收量和钾吸收量,且甘薯根系丛枝菌根真菌定殖率与根系干重、氮吸收量、磷吸收量和钾吸收量呈显著或极显著正相关,表明丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉能够有效地促进甘薯根系生长和对养分的吸收。

3.2 丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉对甘薯根系分泌物数量和代谢途径的影响

根系分泌物在植物生长和养分吸收中的作用受到

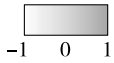
广泛关注^[16]。本研究发现,接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉显著影响了甘薯根系分泌物的数量。K1AMF和K1NAMF的比较组(高钾土壤)中含量上升的代谢物数量显著高于KOAMF和KONAMF的比较组(低钾土壤)。表明在高钾条件下,丛枝菌根真菌能够促进甘薯根系释放更多分泌物促进甘薯根系生长。

在低钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉显著影响甘薯ABC转运蛋白、氨酰-tRNA生物合成、嘌呤代谢、矿物质吸收;在高钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉显著影响甘薯色氨酸代谢、萜类和类固醇生物合成、萜类骨架生物合成、植物激素生物合成、玉米素生物合成。表明在低钾土壤中,丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉主要通过影响宿主植物膜转运蛋白、矿物质吸收从而调控植物的生长;在高钾土壤中,丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉主要通过影响宿主植物的植物激素合成、植物次级代谢产物合成从而调控植物的生长。

3.3 丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉对甘薯根系分泌物组成和功能影响

本研究发现,接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉对甘薯根系分泌物中脂质和类脂分子、有机杂环

皮尔逊相关性



相关性

 $\log_2 FC$

		根系菌根定殖率	地下部分干重	地下部分氮吸收量	地下部分磷吸收量	地下部分钾吸收量	$\log_2 FC$	
							K0AMF和K0NAMF的比较组	K1AMF和K1NAMF的比较组
A	黄体酮	0.168	0.652*	0.664*	0.619*	0.595*	1.41	0.49
	环烯醚萜苷Caryoptosidic acid	0.700*	0.854***	0.894***	0.906***	0.914***	1.25	0.62
	12,13-环氧辛十八烯酸	0.740**	0.244	0.259	0.326	0.383	1.12	0.46
	6-反式-白三烯B ₁	0.706*	0.758**	0.862***	0.896***	0.866***	0.62	0.35
	白三烯B ₁	0.796**	0.741**	0.783**	0.846***	0.823***	0.55	0.23
	丙酸香芹酯	0.324	0.736**	0.761**	0.721**	0.703*	0.48	0.34
	4,8,12,15-十八碳四烯酸	0.362	0.748**	0.825***	0.818**	0.752**	0.46	0.29
	二甲基对映-16 α -贝壳杉烷-17,19-二酸酯	0.232	0.690*	0.744**	0.723**	0.701*	0.42	0.66
	5-过氧二十碳四烯酸	0.355	0.762**	0.784**	0.746**	0.718**	0.39	0.23
	(x)-对-薄荷-1-烯-4-基5-异丙基-2-甲基苯基醚	0.211	0.677*	0.762**	0.724**	0.697*	0.38	0.74
B	2-羟基-4-甲基戊酸	0.748**	0.680*	0.771**	0.820**	0.812**	0.30	0.20
	8-异前列腺素F2 α	0.251	0.731**	0.765**	0.713**	0.687*	0.19	0.33
	磷脂酰胆碱[18:2(9Z,12Z)/14:0]	0.250	-0.141	-0.018	0.068	0.081	0.15	0.95
	癸二酸	-0.193	-0.610*	-0.685*	-0.630*	-0.603*	-0.12	-0.51
	3-羟基-4,9-二甲氧基甾豆素	-0.368	-0.165	-0.253	-0.332	-0.347	-0.22	-0.64
	戊酸丁酯	-0.328	-0.742**	-0.780**	-0.734**	-0.724**	-0.27	-0.80
	己酸	-0.265	-0.708**	-0.766**	-0.726**	-0.708**	-0.30	-1.02
	维生素A酸	-0.556	-0.813**	-0.787**	-0.760**	-0.776**	-0.60	-0.28
	(3S,4S)-3-异丙烯基-4-甲基-4-乙烯基环己酮	-0.377	-0.003	-0.110	-0.198	-0.212	-0.94	-0.68
	商陆酸	-0.541	-0.108	-0.255	-0.321	-0.334	-1.46	-0.62
C	(3 β ,5 α ,9 α ,22E,24R)-5,9-环氧-3-羟基麦角甾-7,22-二烯-6-酮	-0.708**	-0.364	-0.451	-0.532	-0.528	-1.63	-0.51
	5-乙酰氨基戊酸酯	-0.863***	-0.798**	-0.806**	-0.840***	-0.855***	-1.66	-0.70
	α -二形态共轭亚油酸	-0.918***	-0.770**	-0.746**	-0.766**	-0.818**	-2.27	-0.53
	3-羟基-6,8-二甲氧基-7(11)-沙漠烯-12,8-内酯	-0.878***	-0.777**	-0.872***	-0.911***	-0.924***	-2.71	-2.15
	凝血素R3-葡萄糖苷	-0.801**	-0.833***	-0.809**	-0.816**	-0.825***	-5.05	-1.87
	5-羟基-L-色氨酸	0.739**	0.230	0.198	0.244	0.325	5.25	0.25
	二甲基-1,2,3,4-四氢-6,7-异喹啉-2-醇盐酸盐	0.208	0.657*	0.678*	0.624*	0.596*	2.89	0.38
	2,5-二甲基吡嗪	0.267	0.617*	0.735**	0.740**	0.725**	2.24	3.49
	吡啶-2-羧酸	0.891***	0.537	0.595*	0.647*	0.686*	1.66	0.83
	吡啶-3-乙酸	0.229	0.689*	0.714**	0.664*	0.649*	1.21	0.57
D	网脉碱	0.597*	0.860***	0.912***	0.904***	0.900***	1.10	0.62
	2,3,4,5-四氢-6-(5-甲基-2-咪唑基)吡啶	0.172	0.616*	0.719**	0.693*	0.676*	0.85	2.38
	粪卟啉I	0.278	0.676*	0.790**	0.756**	0.749**	0.84	2.01
	黄嘌呤	0.233	0.706*	0.729**	0.693*	0.655*	0.70	0.38
	叶酸	0.093	0.609*	0.604*	0.545	0.521	0.59	0.28
	早熟素II	-0.631*	-0.432	-0.601*	-0.657*	-0.671*	-1.01	-1.25
	3-(3-甲基丁基叉基)-1(3H)-异苯并呋喃酮	-0.646*	-0.447	-0.609*	-0.668*	-0.680*	-1.08	-1.25
	肉豆蔻素	-0.588*	-0.004	-0.052	-0.113	-0.185	-1.44	-0.34
	哌啶	-0.797**	-0.793**	-0.767**	-0.767**	-0.792**	-2.31	-0.59
	沙拉沙星	-0.662*	-0.790**	-0.744**	-0.716**	-0.744**	-2.77	-0.96
E	L-阿糖醇	0.733**	0.818**	0.888***	0.929***	0.935***	1.09	1.05
	2,2,7,7-四甲基-1,6-二氧杂螺[4.4]壬-3-烯	0.162	0.660*	0.698*	0.651*	0.624*	0.28	0.51
	麦芽五糖	-0.701*	-0.438	-0.655*	-0.691*	-0.709**	-0.62	-1.06
	1-苯基-1,3-二十二烷二酮	-0.444	-0.127	-0.180	-0.252	-0.292	-0.69	-0.84
	依莫峰斗菜酮A	-0.878***	-0.786**	-0.829***	-0.883***	-0.882***	-1.18	-0.57
	异考布松	-0.861***	-0.649*	-0.699*	-0.736**	-0.795**	-2.92	-1.15
	4-乙基-2-羟基-3-甲基-2-环戊烯-1-酮	-0.686*	-0.802**	-0.788**	-0.783**	-0.768**	-3.05	-0.52
	乙酰亮氨酸	0.467	0.798**	0.870**	0.854***	0.848***	2.61	1.35
	托品酸	0.815**	0.808**	0.876**	0.903***	0.901***	0.83	0.41
	β -亮氨酸	-0.229	0.125	0.002	-0.064	-0.094	-0.88	-1.42
F	L-全异亮氨酸	-0.792**	-0.809**	-0.788**	-0.781**	-0.804**	-2.28	-0.73
	L-苯丙氨酸	-0.786**	-0.822**	-0.800**	-0.795**	-0.810**	-2.54	-0.57
	L-酪氨酸	-0.776**	-0.837***	-0.820**	-0.815**	-0.833***	-2.54	-0.95
	L-甲硫氨酸	-0.770**	-0.826***	-0.794**	-0.789**	-0.812**	-2.93	-1.16
	酪胺	0.164	0.637*	0.662*	0.606*	0.577*	1.13	0.41
	2,3-二氢-4-(4-甲氧基苯基)-1H-菲并烯-1,2,3-二醇	0.404	-0.154	-0.121	-0.037	-0.012	0.59	0.33
	桉叶酸	0.165	0.658*	0.692*	0.651*	0.612*	0.22	0.27
	1-甲基-2-丙基苯	-0.378	-0.010	-0.105	-0.194	-0.215	-0.87	-0.65
	1,2,4-三甲基苯	-0.476	-0.080	-0.181	-0.270	-0.293	-1.01	-0.65
	姜醇	-0.901***	-0.752**	-0.836***	-0.877***	-0.890***	-2.10	-1.14
G	3-吡啶甲酯	0.732**	0.213	0.236	0.294	0.354	1.32	0.42
	琥珀酰腺苷	0.381	-0.150	-0.105	-0.026	0.002	0.47	0.49
	腺苷	-0.837***	-0.707*	-0.782**	-0.823**	-0.839***	-1.59	-0.72
	3'-O-甲基腺苷	-0.909***	-0.740**	-0.756**	-0.804**	-0.817**	-2.25	-0.53
	脱氧腺苷	-0.559	-0.221	-0.320	-0.385	-0.432	-2.61	-1.23
	橙皮素	0.871***	0.792**	0.832***	0.825***	0.858***	3.90	0.57
	坎松醇F	0.629*	0.844***	0.843***	0.833***	0.833***	1.15	0.30
	二氢藜芦醇	-0.456	-0.014	-0.073	-0.146	-0.178	-0.98	-0.36
	乔松素	-0.887***	-0.515	-0.487	-0.526	-0.588*	-1.44	-0.21
	N6-甲基肌丁胺	0.753**	0.298	0.309	0.384	0.400	1.98	0.19
H	檀香	0.160	0.643*	0.667*	0.621*	0.590*	0.39	0.37
	去甲乌药碱	0.743**	0.237	0.213	0.262	0.336	4.97	0.73
I	对羟基苯丙酸	0.427	0.783**	0.773**	0.741**	0.731**	1.84	0.30

A:脂质和类脂分子;B:有机杂环化合物;C:有机氧化合物;D:有机酸及其衍生物;E:苯环型化合物;F:核苷、核苷酸和类似物;G:苯基丙烷和聚酮;H:有机氮化合物;I:碳氢化合物;J:其他。K0AMF:低钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼苗近明球囊霉处理;K0NAMF:低钾土壤对照;K1AMF:高钾土壤中接种丛枝菌根真菌幼苗近明球囊霉处理;K1NAMF:高钾土壤对照。*表示相关性显著($P<0.05$);**表示相关性极显著($P<0.01$);***表示相关性极显著($P<0.001$)。 $\log_2 FC$ 表示差异倍数值的对数, $\log_2 FC>0$ 表示代谢物含量增加, $\log_2 FC<0$ 表示代谢物含量减少。

图6 甘薯根分泌物的差异代谢物及其与丛枝菌根真菌定殖率、生物量和养分吸收的相关性

Fig.6 Differential metabolites in root exudates of sweet potato and their correlation with arbuscular mycorrhizal fungi colonization rate, biomass and nutrient uptake

化合物、有机酸及其衍生物的数量影响较明显。甘薯丛枝菌根真菌定殖率和甘薯根系氮、磷、钾吸收量与环烯醚萜苷 Caryoptosidic acid^[39]、6-反式-白三烯 B₄、白三烯 B₄、2-羟基-4-甲基戊酸、网脉碱、L-阿糖醇、托品酸、橙皮素、坎松醇 F 相关性较强,这些代谢物可能是甘薯响应丛枝菌根真菌接种的关键代谢物,在丛枝菌根真菌定殖甘薯根系过程中发挥重要作用。

脂质和类脂分子包括萜类及萜苷、脂肪酸、类花生酸等,有机杂环化合物包括吡啶类、吡啶类、嘧啶类、二噻类等,有机酸及其衍生物包括氨基酸、羧酸等。萜类化合物在丛枝菌根真菌与宿主植物建立共生的过程中发挥重要作用,如独脚金内酯能够有效促进丛枝菌根真菌孢子萌发和菌丝分枝^[40-41],单萜糖苷龙胆如苦苷和獐牙菜苦苷可显著促进丛枝菌根真菌根内球囊霉和明根孢囊霉的菌丝分支^[42]。此外,丛枝菌根真菌共生能够促进寄主植物百脉根释放根系分泌物花生四烯酸等,有助于聚集有益菌群,从而促进土壤养分循环和植物养分吸收^[43-44]。吡啶类化合物如 5-羟基-L-色氨酸是色氨酸的前体物质,色氨酸在植物或微生物体内合成生长素吡啶-3-乙酸,生长素吡啶-3-乙酸能够促进植物根系生长发育^[45],二噻类如 2,5-二甲基吡啶可以抑制终极腐霉、立枯丝核菌、核盘菌等土传病害^[46]。此外,氨基酸类物质通过增强微生物活性以提高土壤养分的有效性^[47],有机酸和酚类物质通过酸化根际环境促进土壤养分活化^[13]。

综上所述,在低钾和高钾土壤中,接种丛枝菌根真菌幼套近明球囊霉能够显著提高甘薯根系丛枝菌根真菌定殖率,显著影响甘薯根系分泌物的组成和代谢通路,有效提高甘薯对氮、磷、钾的吸收量和甘薯生物量。该研究有助于解析丛枝菌根真菌的促生作用及其在生态系统中的潜在生态功能,为丛枝菌根真菌在甘薯生产中的应用提供理论依据。

参考文献:

- [1] 王 欣,李 强,曹清河,等. 中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学,2021,54(3):483-492.
- [2] 石 琨,袁 洁,叶佳敏,等. 丛枝菌根真菌对甘薯源库关系、养分吸收和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2024(4):143-152.
- [3] KALAMULLA R, KARUNARATHNA S C, TIBPROMMA S, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable agriculture[J]. Sustainability,2022,14(19):12250.
- [4] 盖京苹,冯 固,李晓林. 接种丛枝菌根真菌对甘薯生长的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2004,12(1):116-118.
- [5] ALHADIDI N, PAP Z, LADÁNYI M, et al. Mycorrhizal inoculation effect on sweet potato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) seedlings[J]. Agronomy,2021,11(10):2019.
- [6] 周晓月,袁 洁,石 琨,等. 丛枝菌根真菌对甘薯生物量、根系形态及钾素吸收的影响[J]. 江苏农业学报,2022,38(4):939-948.
- [7] YUAN J, SHI K, ZHOU X Y, et al. Interactive impact of potassium and arbuscular mycorrhizal fungi on the root morphology and nutrient uptake of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.)[J]. Frontiers in Microbiology,2023,13:1075957.
- [8] 石 琨,袁 洁,叶佳敏,等. 丛枝菌根真菌在甘薯生产中的应用研究进展[J]. 江苏农业学报,2023,39(2):576-581.
- [9] 王雨茜,陈 莲,张培珍,等. 基于文献计量分析的根系分泌物研究进展[J]. 中国农学通报,2024,40(7):144-154.
- [10] 杜思垚,方娅婷,鲁剑巍. 根系分泌物对作物养分吸收利用的影响研究进展[J]. 华中农业大学学报,2023,42(2):147-157.
- [11] 竹嘉妮,黄 弘,杜 勇,等. 丛枝菌根真菌影响宿主植物蒴藜苜蓿根系酸性磷酸酶活性的跨世代效应[J]. 生态学杂志,2022,41(5):912-918.
- [12] 孙晨瑜,曾燕红,马俊卿,等. 丛枝菌根真菌对黄花蒿生长和根系分泌物化学组成的影响[J]. 热带作物学报,2020,41(9):1831-1837.
- [13] VIVES-PERIS V, DE-OLLAS C, GÓMEZ-CADENAS A, et al. Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond[J]. Plant Cell Reports,2020,39:3-17.
- [14] ZHANG G Y, RAZA W, WANG X H, et al. Systemic modification of cotton root exudates induced by arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus vallismortis* HJ-5 and their effects on *Verticillium* wilt disease[J]. Applied Soil Ecology,2012,61:85-91.
- [15] SUN C Y, ZENG Y H, MA J Q, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on allelopathic potential of *Artemisia annua* L. root exudates[J]. Allelopathy Journal,2019,48:175-190.
- [16] MA J Q, WANG W Q, YANG J, et al. Mycorrhizal symbiosis promotes the nutrient content accumulation and affects the root exudates in maize[J]. BMC Plant Biology,2022,22:64.
- [17] XU Q W, FU H, ZHU B, et al. Potassium improves drought stress tolerance in plants by affecting root morphology, root exudates, and microbial diversity[J]. Metabolites,2021,11:131.
- [18] AZIZAH F N, PURWANTO B H, OIKAWA A, et al. Detection of metabolites in rhizosphere of soybean under different status of soil potassium[J]. Soil Science and Plant Nutrition,2023,69(2):69-77.
- [19] MINEMBA D, GLEESON D B, VENEKLAAS E, et al. Variation in morphological and physiological root traits and organic acid exudation of three sweet potato (*Ipomoea batatas*) cultivars under seven phosphorus levels[J]. Scientia Horticulturae,2019,256:108572.

- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] XU Z, ZHAO Y Q, YANG D J, et al. Attractant and repellent effects of sweet potato root exudates on the potato rot nematode, *Ditylenchus destructor*[J]. *Nematology*, 2015, 17: 117-124.
- [22] MA J Q, XIE Y, YANG Y S, et al. AMF colonization affects allelopathic effects of *Zea mays* L. root exudates and community structure of rhizosphere bacteria[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1050104.
- [23] WANG J L, ZHANG T, SHEN X T, et al. Serum metabolomics for early diagnosis of esophageal squamous cell carcinoma by UH-PLC-QTOF/MS[J]. *Metabolomics*, 2016, 12(7): 116.
- [24] SMITH C A, WANT E J, O' MAILLE G, et al. XCMS: processing mass spectrometry data for metabolite profiling using nonlinear peak alignment, matching, and identification[J]. *Analytical Chemistry*, 2006, 78(3): 779-787.
- [25] 陈翔, 许波, 吴宇, 等. 不同季秸秆全量还田对夏玉米根系分泌物的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(9): 1403-1415.
- [26] 张杨, 曹靖, 李广, 等. 盐碱胁迫下湖南稷子苗期根系分泌代谢组学[J]. *生态学报*, 2024, 44(8): 3540-3549.
- [27] 刘燕, 曾维军, 秦维, 等. 威宁短柱油茶丛枝菌根真菌和深色有隔内生真菌定殖特征及其与果实经济性状的相关性[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(22): 145-153.
- [28] 杨双琳, 邓利娟, 黄博, 等. 不同年限三七根系丛枝菌根真菌多样性及其与土壤理化性质的相关分析[J]. *南方农业学报*, 2023, 54(11): 3217-3227.
- [29] 喻彩丽, 李亮, 张贝, 等. 丛枝菌根真菌和解磷菌对青梅根系发育、磷吸收及土壤磷有效性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(17): 240-248.
- [30] 黄博, 邓利娟, 杨双琳, 等. 云南 3 种黄精根系丛枝菌根真菌群落结构特征差异研究[J]. *南方农业学报*, 2023, 54(6): 1656-1666.
- [31] 农颖杰, 卢昱帆, 许诗萍, 等. 基于 rDNA 序列分析的 3 种丛枝菌根真菌分子鉴定方法比较[J]. *南方农业学报*, 2023, 54(10): 2854-2864.
- [32] CHANDRASEKARAN M. A meta-analytical approach on arbuscular mycorrhizal fungi inoculation efficiency on plant growth and nutrient uptake[J]. *Agriculture*, 2020, 10(9): 370.
- [33] HUSSAIN H A, ZHANG Q W, HUSSAIN S, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on maize growth, root colonization, and root exudates varied with inoculum and application method[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21: 1577-1590.
- [34] YANG H S, ZHANG Q, DAI Y J, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth depend on root system: a meta-analysis[J]. *Plant and Soil*, 2015, 389: 361-374.
- [35] 郭哈铃, 刘世俊, 徐静, 等. 丛枝菌根真菌对双子叶植物生长和根系特征的影响: 整合分析[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(7): 1855-1864.
- [36] O'KEEFE D M, SYLVIA D M. Seasonal dynamics of the association between sweet potato and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Mycorrhiza*, 1993, 3: 115-122.
- [37] GAI J P, FENG G, CHRISTIE P, et al. Screening of arbuscular mycorrhizal fungi for symbiotic efficiency with sweet potato[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2006, 29: 1085-1094.
- [38] FARMER M J, LI X, FENG G, et al. Molecular monitoring of field-inoculated AMF to evaluate persistence in sweet potato crops in China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35: 599-699.
- [39] RASTRELLI L, CACERES A, MORALES C, et al. Iridoids from *Lippia graveolens*[J]. *Phytochemistry*, 1988, 49(6): 1829-1832.
- [40] 王浩, 孙丽英. 植物激素调控丛枝菌根发育的作用机制研究进展[J]. *微生物学通报*, 2022, 49(10): 4448-4466.
- [41] AKIYAMA K, MATSUZAKI K, Hayashi H. Plant sesquiterpenes induce hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Nature*, 2005, 435: 824-827.
- [42] TOMINAGA T, UENO K, SAITO H, et al. Monoterpene glucosides in *Eustoma grandiflorum* roots promote hyphal branching in arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Plant Physiology*, 2024, 193(4): 2677-2690.
- [43] XU Y J, CHEN Z, LI X Y, et al. Mycorrhizal fungi alter root exudation to cultivate a beneficial microbiome for plant growth[J]. *Functional Ecology*, 2022, 37(3): 664-675.
- [44] XU Y J, CHEN Z, LI X Y, et al. The mechanism of promoting rhizosphere nutrient turnover for arbuscular mycorrhizal fungi attributes to recruited functional bacterial assembly[J]. *Molecular Ecology*, 2023, 32: 2335-2350.
- [45] KONDHARE K R, PATIL A B, GIRI A P et al. Auxin: an emerging regulator of tuber and storage root development[J]. *Plant Science*, 2021, 306: 110854.
- [46] VLASSI A, NESLER A, PERAZZOLLI M, et al. Volatile organic compounds from *Lysobacter capsica* AZ78 as potential candidates for biological control of soilborne plant pathogens[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 1748.
- [47] 杜思垚, 方娅婷, 鲁剑巍. 根系分泌物对作物养分吸收利用的影响研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2023, 42(2): 147-157.

(责任编辑: 成纾寒)