

引用格式:

韩洋, 周东波, 张康, 卓丛莹, 张新要, 向东, 张金莲, 杨友才, 穰中文. 十种丛枝菌根真菌对烟苗生长的影响及其菌根效应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(6): 26–36.

HAN Y, ZHOU D B, ZHANG K, ZHUO C Y, ZHANG X Y, XIANG D, ZHANG J L, YANG Y C, RANG Z W. Effects of ten species of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of tobacco seedlings and their mycorrhizal effects [J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(6): 26–36.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



十种丛枝菌根真菌对烟苗生长的影响及其菌根效应

韩洋¹, 周东波², 张康¹, 卓丛莹¹, 张新要², 向东², 张金莲³, 杨友才¹, 穰中文^{1*}

(1. 湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南中烟工业有限责任公司, 湖南 长沙 410014; 3. 广西壮族自治区农业科学院微生物所, 广西南宁 530007)

摘要: 在人工气候室条件下开展漂浮育苗技术, 综合分析10种丛枝菌根真菌(AMF)接种处理对烟苗农艺性状、根系形态、色素含量、根系活力的影响以及对N、P、K养分含量等的菌根效应, 探究菌根侵染的相关特征。结果表明: 不同AMF对烟苗的侵染特征和菌根效应存在显著差异, 屏东无梗囊霉(AM1)、异形根胞囊霉(AM3)和根内根胞囊霉(AM8)显著提高了烟苗根系活力; AM1、摩东斗管囊霉(AM2)、黏质隔球囊霉(AM5)和层状近明球囊霉(AM6)对烟苗生长具有良好的调控作用, 且能有效优化烟苗根冠比; 地表球囊霉(AM9)、幼套近明球囊霉(AM4)和稍长无梗囊霉(AM7)显著促进了烟苗生物量的积累; AM8、AM9和凹坑无梗囊霉(AM10)在促进烟苗养分吸收和提高烟苗逆境抗性等方面具有应用潜力; 聚类分析结果显示, 供试的10个菌种可划分为4种效应型, 即“促生型”“生长调节型”“促养分积累型”和“增强抗逆型”, 其代表性菌种分别为AM2、AM6、AM8、AM9。

关键词: 丛枝菌根真菌; 烟草; 侵染特征; 菌根效应; 漂浮育苗

中图分类号: S572

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)06-0026-11

Effects of ten species of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of tobacco seedlings and their mycorrhizal effects

HAN Yang¹, ZHOU Dongbo², ZHANG Kang¹, ZHUO Congying¹, ZHANG Xinyao²,
XIANG Dong², ZHANG Jinlian³, YANG Youcai¹, RANG Zhongwen^{1*}

(1. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. China Tobacco Hunan Industry Co. Ltd., Changsha, Hunan 410014, China; 3. Institute of Microbiology, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China)

Abstract: Using floating seedling cultivation technology under artificial climate chamber conditions, the mycorrhizal effects of 10 arbuscular mycorrhizal fungi(AMF) inoculation treatments on the agronomic traits, root morphology, pigment content, root vitality, and N, P, K nutrient content of tobacco seedlings were comprehensively analyzed, and the relevant characteristics of mycorrhizal infection were explored. The results showed there were significant differences in the infection characteristics and mycorrhizal effects among different AMF isolates. *Acaulospora kentinensis*(AM1), *Rhizophagus irregularis*(AM3), and *Rhizophagus intraradices*(AM8) significantly increased the root vitality of tobacco seedlings; *Acaulospora kentinensis*(AM1), *Funneliformis mosseae*(AM2), *Septoglomus viscosum*(AM5), and *Claroideoglomus lamellosum*(AM6) effectively promoted tobacco seedling growth and

收稿日期: 2025-02-14

修回日期: 2025-06-10

基金项目: 湖南中烟工业有限责任公司烟草农业科技项目(KY2023YC0002、KY2023JD0001)

作者简介: 韩洋(2000—), 女, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事烟草栽培生理研究, 1431389313@qq.com; *通信作者, 穰中文, 博士, 副教授, 主要从事烟草栽培生理与生态研究, rzwronger@126.com

optimized the root to shoot ratio; *Glomus versiforme*(AM9), *Claroideoglomus etunicatum*(AM4), and *Acaulospora longula*(AM7) markedly increased biomass accumulation; *Rhizophagus intraradices*(AM8), *Glomus versiforme*(AM9), and *Acaulospora excavata*(AM10) have potential in promoting nutrient absorption and stress resistance of tobacco seedlings. Cluster analysis categorized the 10 AMF isolates into four effect types: “growth promoting type”, “growth regulating type”, “nutrient accumulation promoting type” and “stress enhancing type”, which were represented by *Funneliformis mosseae*(AM2), *Claroideoglomus lamellosum*(AM6), *Rhizophagus intraradices*(AM8) and *Glomus versiforme*(AM9), respectively.

Keywords: arbuscular mycorrhizal fungi; tobacco; infection characteristics; mycorrhizal effects; floating seedling system

丛枝菌根真菌(AMF)包括球囊霉门(G-AMF)和内生菌根类群(E-AMF)^[1], 目前, 全球已鉴定的 G-AMF 物种超过 8 500 种, E-AMF 物种也达 600 余种^[2]。AMF 能够与植物根系形成共生关系, 在促进植物营养吸收、改善土壤微生物群落结构和土壤结构、提高植物逆境抗性等方面发挥重要的生理与生态功能^[3], 对维持农业生态系统稳定、提高作物生产力和生态适应性等也起着不可或缺的作用^[4]。由于丛枝菌根(AM)共生体可在“根际”(植物-AMF 互作)和“菌丝际”(AMF-微生物互作)2 个界面同时影响寄主植物^[5], 菌根技术理论与应用研究已成为土壤学、生态学、作物学等学科领域的国内外学者广泛关注和持续研究的重要方向^[6]。

AMF 种质资源具有生态多样性和功能多样性^[7], 环境因素可影响 AMF 对作物生长及生理生态方面的正向效应^[8]。研究表明, 低磷土壤条件下作物对 AMF 的依赖性更强, 从而更容易形成 AM 共生体系^[9]; 深耕措施虽可通过改善土壤结构与肥力促进作物生长, 但会降低作物对 AMF 的依赖性^[10]; 接种不同 AMF 的烟苗的生理活性及大田生长期青枯病抗性表现也存在差异^[11-12]。因此, AM 菌根技术的田间应用要综合考量土壤环境、作物种类(或品种)以及菌种资源等方面的差异^[13]。菌根化育苗是实现特定功能 AMF 高效应用的重要途径。作物从苗床移栽至大田之前, 其根系便与 AMF 形成良好的侵染关系, 可在一定程度上减轻环境等因素对共生体造成的影响^[14]。相关研究成果已在多种作物中得到验证。例如, 利用 AM 菌根化技术进行西瓜育苗, 可有效抑制枯萎病的发生^[15]; 在不同土壤铝水平下, AMF 能够稳定侵染小麦并提高小麦的光合能力^[16]; 在盐胁迫环境下, 菌根化育苗方式可提高番茄的产量与品质^[17]; 此外, 经过菌根化处理的烟草幼苗, 在大田生长期表现出更强的抗冷性^[18]。由此可见, AM 菌根化育苗在提高

作物抗逆性和营养吸收效率等方面具有重要的实践价值。

漂浮育苗以集约高效的优点成为当前我国烤烟生产的主要育苗方式, 但该技术易受播种期低温寡照和移栽期干旱等生态因素的制约^[19], 常导致烟苗根系欠发达、活力较低、抗旱能力差、移栽后缓苗期和成活率低等问题^[20], 不利于烟株大田期的生长发育。作为育苗移栽作物, 烤烟幼苗与 AMF 具有较高的共生亲和力, 易形成良好的共生关系^[12], 具有开展菌根化育苗的优势与潜力。我国烟草种植区内 AMF 的潜在资源较为丰富, 目前, 从烟草根系土壤中分离鉴定的 AMF 达 54 种^[21], 且不断有新种被发现, 但在具体应用中, 研究者大多只关注少数常见的 AMF 菌种在养分吸收^[22-23]、生物与非生物胁迫^[12,18,24]、缓解重金属污染^[25]以及香气物质代谢^[26]等方面的效应, 而针对不同 AMF 菌种在烟草育苗中的菌根效应的分类评价鲜见报道。基于此, 本研究以国内报道的从烟田土壤中分离鉴定的 10 个菌种为试验材料, 采用菌根化漂浮育苗技术, 探究 AMF 对烟苗生长的影响及其菌根效应特征, 并对供试的 10 种 AMF 菌剂进行聚类分析, 旨在为烟草 AM 菌根化育苗技术应用中菌剂的选择以及相关菌根效应机制的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

烤烟新品系 HG2, 由湖南中烟工业有限责任公司技术中心提供。AMF 菌剂共 10 种, 由广西农业科学院亚热带丛枝菌根真菌资源保藏中心提供, 具体菌剂编号及名称见表 1。烤烟漂浮育苗专用基质、育苗专用肥购于湖南省天亮农业技术开

发有限公司。

表1 供试AMF菌剂编号及名称

Table 1 Codes and species names of the tested AMF inocula

序号	编号	中文名	学名
1	AM1	屏东无梗囊霉	<i>Acaulospora kentinensis</i>
2	AM2	摩西斗管囊霉	<i>Funnelformis mosseae</i>
3	AM3	异形根孢囊霉	<i>Rhizophagus irregularis</i>
4	AM4	幼套近明球囊霉	<i>Claroideoglossum etunicatum</i>
5	AM5	黏质隔球囊霉	<i>Septoglossum viscosum</i>
6	AM6	层状近明球囊霉	<i>Claroideoglossum lamellosum</i>
7	AM7	稍长无梗囊霉	<i>Acaulospora longula</i>
8	AM8	根内根孢囊霉	<i>Rhizophagus intraradices</i>
9	AM9	地表球囊霉	<i>Glomus versiform</i>
10	AM10	凹坑无梗囊霉	<i>Acaulospora excavata</i>

1.2 试验设计

在人工气候室((25±2) °C)开展烟草漂浮育苗试验。10种AMF菌剂分别单独接种,接种时将育苗专用基质装入灭菌袋中进行高压蒸汽灭菌(121 °C, 120 min)。灭菌冷却后加入1/2已灭菌的基质,每种菌剂的接种量为3 g/孔,装盘(105孔聚乙烯托盘, 54 cm×28 cm×5 cm)后播种,继续添加基质至穴盘上口平齐。以不添加菌剂的灭菌基质为对照(CK),共11个处理,每个处理3次重复。所有托盘置于10 cm水深的塑料大盆(90 cm×50 cm×30 cm)中,共11个大盆,33盘。苗床期的水肥管理按照《烟草集约化育苗技术规程 第1部分:漂浮育苗》(GB/T 25241.1—2010)执行,分别于出苗期、生根期和7片真叶期等3个时期施入烟草漂浮育苗专用肥(液态肥),施肥量以塑料盆水的氮素质量分数达100 mg/kg为标准。苗床期75 d,苗床期间不剪叶。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 烟苗农艺性状的测定

于成苗期(播种75 d后)按照YC/T 142—2010《烟草农艺性状调查测量方法》测定烟苗茎高、茎围、地上部鲜质量、根系鲜质量和最大叶面积,每个处理调查具代表性烟苗3株(3个重复托盘各取1株);采用根系扫描仪(Epson Expression 11000XL)及WinRHIZO软件测定最大叶面积、总根长、根总表面积、根平均直径和根总体积。

1.3.2 色素含量的测定

农艺性状测定后,将3株烟苗最大叶叶片剪碎、混匀,称取0.2 g鲜烟,先于研钵中加入少量石英砂、碳酸钙和95%乙醇2~3 mL,研磨成匀浆,再加95%乙醇10 mL继续研磨至变白,静置3~5 min,将研磨液过滤至25 mL棕色容量瓶中,用乙醇定容至25 mL,充分摇匀后比色,以95%乙醇为空白,分别在665、649、470 nm波长下测定吸光度^[27],计算叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素和总叶绿素含量。

1.3.3 根系活力的测定

每个处理另选取长势基本一致且具代表性的烟苗3株,将根系从根茎接合处剪下,用蒸馏水洗净根系;剪取粗细基本一致的根尖部位,混合称重;参照植物根系活力检测试剂盒(TTC法)的说明书测定烟株的根系活力。

1.3.4 AM真菌根系侵染特征的统计

参考王幼珊等^[28]的方法统计丛枝侵染率、泡囊侵染率、菌丝侵染率和侵染强度。

1.3.5 烟苗地上部分养分含量的测定

将测定色素含量后剩余的烟苗地上部分剪碎、混匀,称取3份混合样,分别采用凯氏定氮法、钼锑抗分光光度法和火焰光度法测定全氮、全磷和全钾含量。

1.3.6 菌根效应的计算

以接种AMF后烟苗的相关生长及生理指标与未接种AMF烟苗的差异来衡量菌根效应,按照文献^[29]的方法计算菌根效应。

1.4 数据统计与分析

利用Microsoft Excel 2019进行数据统计;采用OriginPro 2021进行单因素方差分析和层次聚类分析;采用Fisher's LSD法进行多重比较, $\alpha=0.05$;层次聚类分析中,以欧氏距离计算组间平均距离,采用距离和法确定聚类中心,并根据欧氏距离绘制聚类图。

2 结果与分析

2.1 接种不同AMF对烟苗农艺性状的影响

由表2可知，除茎围外，其他农艺性状部分处理存在显著差异。具体而言，AM5、AM8和AM9处理的苗高显著高于CK的，分别较CK高22.61%、20.91%和20.40%，AM6的苗高较CK低25.78%，差异显著；除AM2和AM10处理外，其他接种处理的最大叶叶面积均显著大于CK的，其中AM9处理的

最大，较CK的增加61.39%；与CK相比，AM9、AM7、AM4、AM3和AM5处理均显著提高了地上部鲜质量，分别增加75.41%、45.75%、48.07%、40.86%和38.82%；AM7和AM10处理的根鲜质量与CK的无显著差异，其他处理均显著高于CK的，AM9、AM1、AM5、AM6、AM4、AM3、AM2、AM8对根鲜质量的促进作用的强度依次减弱。此外，除AM7和AM10外，其他处理的根冠比均显著高于CK的，其中AM1和AM6处理的根冠比相对较大。

表2 接种不同AMF烟苗的农艺性状

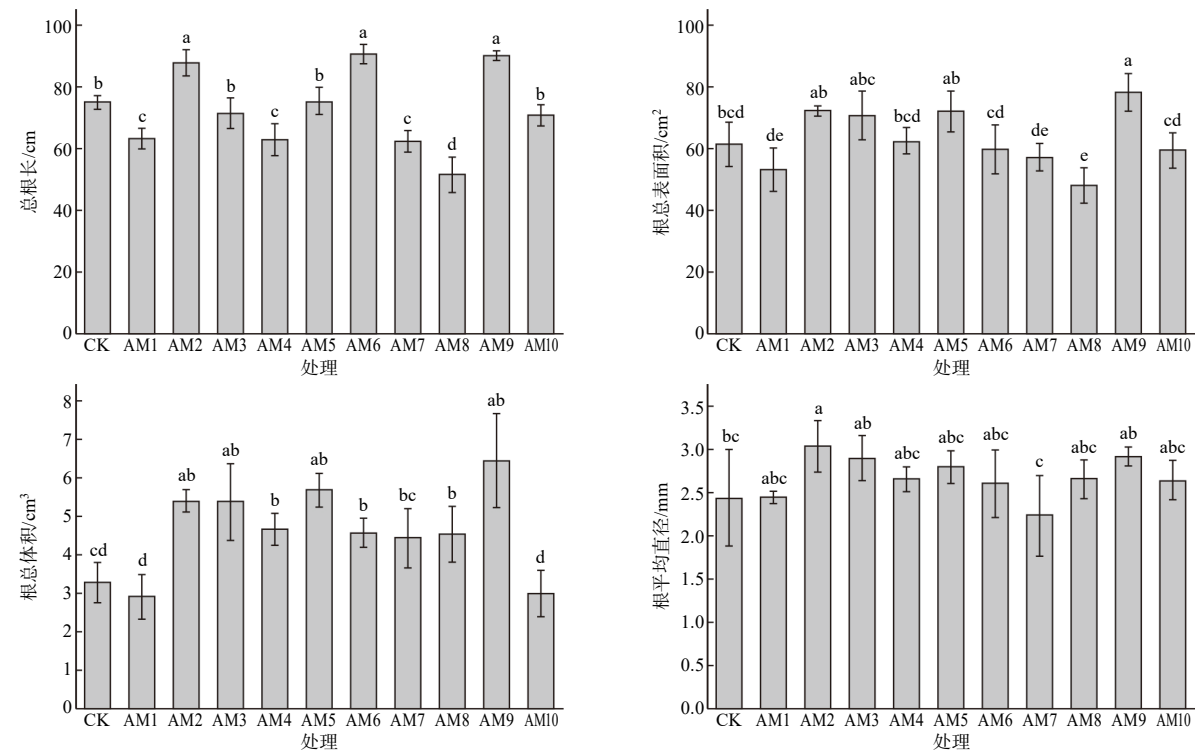
Table 2 Agronomic traits of tobacco seedlings following inoculation with different AMF species						
处理	苗高/cm	茎围/mm	最大叶叶面积/cm ²	地上部鲜质量/g	根鲜质量/g	根冠比
CK	(25.83±0.49)b	7.52±1.51	(93.63±3.94)g	(21.51±2.71)c	(0.27±0.07)d	(0.013±0.005)f
AM1	(26.67±2.48)b	8.45±1.69	(105.06±8.32)f	(23.95±2.06)c	(1.33±0.10)a	(0.056±0.008)a
AM2	(27.07±1.95)b	7.99±1.65	(91.63±7.34)g	(21.45±1.52)c	(1.01±0.22)b	(0.048±0.012)ab
AM3	(28.67±1.31)ab	9.88±1.11	(109.77±7.33)ef	(30.30±3.86)b	(1.11±0.24)ab	(0.037±0.010)bcd
AM4	(29.47±2.60)ab	9.10±1.38	(144.54±7.92)ab	(31.85±2.16)b	(1.21±0.12)ab	(0.038±0.005)bc
AM5	(31.67±2.74)a	9.68±0.58	(119.47±4.06)e	(29.86±3.93)b	(1.30±0.31)ab	(0.044±0.014)ab
AM6	(19.17±1.70)c	9.33±0.93	(130.67±7.97)cd	(24.95±3.80)c	(1.30±0.29)ab	(0.052±0.010)a
AM7	(27.10±1.48)b	9.06±0.77	(135.83±3.74)bc	(31.35±0.88)b	(0.45±0.07)cd	(0.014±0.002)ef
AM8	(31.23±2.32)a	9.86±2.41	(119.98±8.63)de	(24.17±4.56)c	(0.65±0.09)c	(0.027±0.004)cde
AM9	(31.10±1.48)a	9.13±2.49	(151.11±2.21)a	(37.73±1.89)a	(1.40±0.20)a	(0.037±0.006)bc
AM10	(29.00±4.75)ab	8.43±1.83	(100.41±6.43)fg	(23.39±0.71)c	(0.55±0.07)cd	(0.023±0.002)def

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.2 接种不同AMF对烟苗根系形态的影响

由图1可知，接种不同AMF处理烟苗的各根系

形态指标均存在差异。AM6、AM9和AM2处理的总根长显著高于CK的，较CK分别增加20.96%、



柱上不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

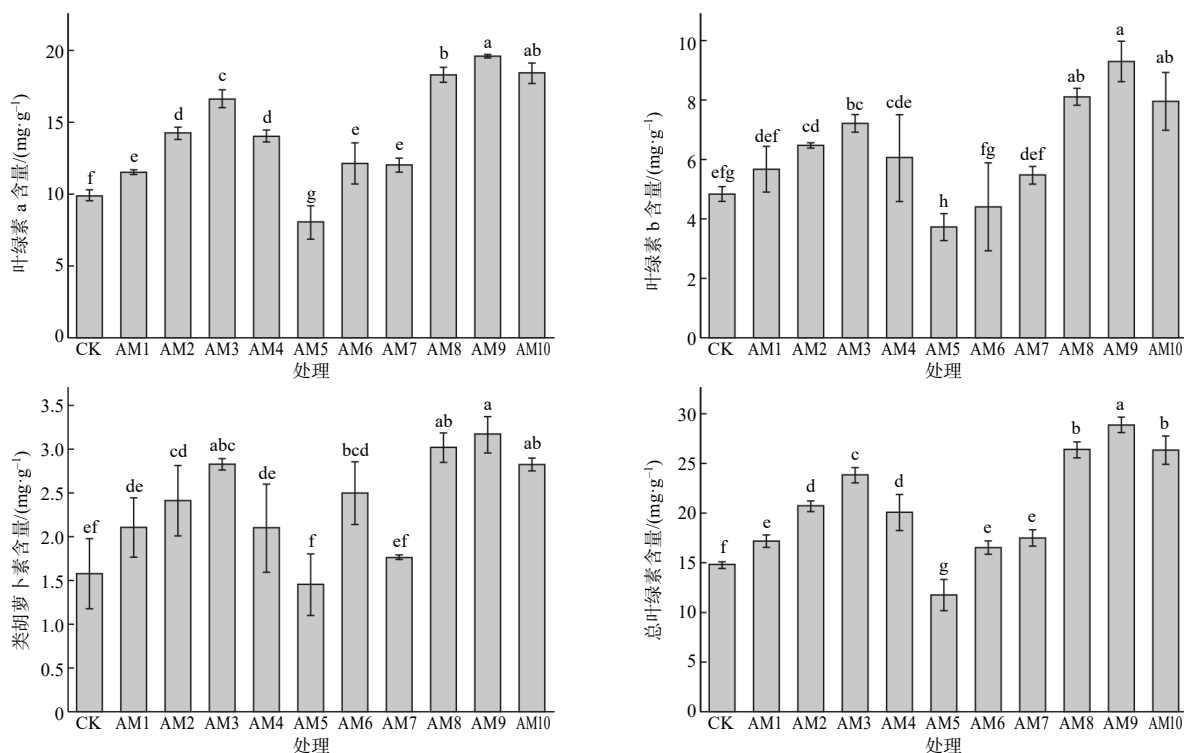
图1 接种不同AMF烟苗的根系形态

Fig. 1 Root system morphology of tobacco seedlings following inoculation with different AMF species

20.09%和17.09%; AM8、AM4、AM7和AM1处理的总根长显著低于CK的。AM9处理的根总表面积显著高于CK的, 而AM8处理的显著低于CK的。AM9、AM5、AM2和AM3处理的根总体积相对较大, 较CK的分别增加97.26%、73.56%、65.05%和64.44%。各处理中, 仅AM2处理的根平均直径显著大于CK的。

2.3 接种不同AMF对烟苗最大叶叶片色素含量的影响

从图2可以看出, 叶绿素a、叶绿素b以及总叶绿素含量均以AM9处理的最高, 较CK的分别增加97.28%、92.34%和95.66%; AM5处理的最低, 较CK的分别低19.15%、23.19%和20.47%, 二者均与CK的存在显著差异; 类胡萝卜素含量也以AM9处



柱上不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

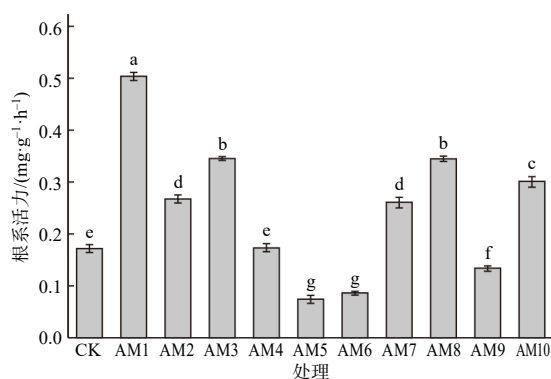
图2 接种不同AMF烟苗的最大叶叶片色素含量

Fig. 2 Pigment content in the largest leaves of tobacco seedlings inoculated with different AMF species

理的最高, 为CK的2.01倍, 除AM1、AM4、AM5和AM7外, 其他接种处理的均显著高于CK的。

2.4 接种不同AMF对烟苗根系活力的影响

由图3可知, AM1处理的根系活力显著高于其他处理的, 其根系活力是CK的2.92倍; AM3、AM8、AM10、AM2和AM7处理的根系活力也显著高于CK的, 分别较CK的高100.27%、100.00%、74.80%、55.00%和51.74%。此外, AM5、AM6和AM9处理的根系活力显著低于CK的, 分别较CK的低56.03%、49.33%和21.72%。



柱上不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图3 接种不同AMF烟苗的根系活力

Fig. 3 Root activity of tobacco seedlings inoculated with different AMF species

2.5 接种不同AMF对烟苗地上部养分含量和养分积累的影响

由表3可知，不同处理的烟苗地上部养分含量和积累量均存在较大差异，变异系数(CV)为17.23%~47.86%，属中等变异(10%<CV<100%)。在养分含量方面，与CK相比，AM9和AM3处理的烟苗地上部氮含量显著增加，分别较CK的增加51.07%、40.16%；AM9、AM7、AM4、AM10、AM2和AM5处理的烟苗地上部磷含量显著增加，分别较CK的增加38.31%、37.66%、36.36%、31.17%、26.62%、25.97%；AM9、AM7、AM10、AM5、AM4、AM8和AM2处理的地上部烟苗钾含量均显著高于CK的，分别较CK的提高118.46%、

107.69%、79.74%、51.54%、44.87%、31.03%和17.95%；AM1和AM6处理的烟苗地上部磷含量以及AM6处理的钾含量均显著低于CK的。在养分积累方面，不同处理的氮积累量差异相对较小(CV=17.23%)，AM9、AM3和AM4处理的烟苗地上部氮积累量显著高于CK的，分别增加162.79%、93.24%和83.34%；AM9、AM4、AM7、AM5、AM3和AM10处理的磷积累量显著高于CK的，分别较CK的增加141.63%、101.31%、100.62%、75.80%、56.43%和42.31%；不同处理的钾积累量差异最大(CV=47.86%)，其中AM9、AM7、AM4、AM5、AM10、AM3和AM8处理的分别为CK的3.82、3.02、2.14、2.11、1.95、1.60、1.47倍。

表3 接种不同AMF烟苗地上部的主要养分吸收

Table 3 The main nutrient absorption in the aboveground part of tobacco seedlings inoculated with different AMF species						
处理	氮		磷		钾	
	含量/%	积累量/mg	含量/%	积累量/mg	含量/%	积累量/mg
CK	(5.13±0.43)cde	(1 111.01±221.68)def	(1.54±0.03)c	(331.78±40.69)e	(3.90±0.16)gh	(841.51±125.99)g
AM1	(4.20±0.56)e	(1 008.51±176.07)def	(1.32±0.03)d	(317.34±30.58)e	(3.93±0.18)gh	(939.67±72.06)fg
AM2	(6.35±0.43)abc	(1 362.03±149.67)cde	(1.95±0.03)ab	(417.79±36.55)de	(4.60±0.31)ef	(985.01±79.14)fg
AM3	(7.19±1.71)ab	(2 146.88±411.70)b	(1.72±0.14)bc	(519.01±59.69)cd	(4.40±0.64)fg	(1 343.72±343.20)de
AM4	(6.44±1.01)abc	(2 036.96±176.50)b	(2.10±0.11)a	(667.91±50.27)b	(5.65±0.25)cd	(1 800.45±177.67)c
AM5	(6.07±0.43)bcd	(1 803.02±170.30)bc	(1.94±0.19)ab	(583.27±127.19)bc	(5.91±0.55)c	(1 771.75±349.70)c
AM6	(3.92±1.01)e	(1 002.10±374.67)def	(1.28±0.07)d	(319.42±54.77)e	(3.68±0.24)j	(911.34±91.15)fg
AM7	(4.57±0.43)de	(1 435.86±169.60)cd	(2.12±0.09)a	(665.62±39.04)b	(8.10±0.22)a	(2 540.22±140.82)b
AM8	(4.01±0.43)e	(974.29±225.86)de	(1.73±0.11)bc	(418.94±87.82)de	(5.11±0.20)de	(1 233.96±231.50)de
AM9	(7.75±1.13)a	(2 919.58±422.47)a	(2.13±0.24)a	(801.67±77.57)a	(8.52±0.22)a	(3 215.54±164.70)a
AM10	(3.55±0.58)e	(832.19±163.34)f	(2.02±0.15)a	(472.14±24.37)d	(7.01±0.47)b	(1 640.48±139.47)cd
平均值	5.38	1.80	5.53	1512.04	501.35	1 565.79
标准差	1.44	0.31	1.70	647.96	161.95	749.39
CV/%	26.85	17.23	30.74	42.85	32.30	47.86

注：同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

2.6 接种不同AMF对烟苗根系侵染强度的影响

由表4可知，CK和AM3处理根系中未观察到AMF的侵染现象；AM4、AM5和AM6处理根系中未观察到泡囊的形成。AM9和AM2处理的菌丝侵染率相对较高，显著高于其他接种处理的；AM9、

AM8、AM2、AM10和AM4处理的丛枝侵染率为22.67%~75.00%，显著高于AM5、AM6、AM1和AM7处理的；AM9、AM2、AM10、AM8、AM4、AM5、AM6、AM7、AM1的侵染强度依次减弱，AM7和AM1处理的侵染强度显著低于其他处理(AM3、CK除外)的。

表4 接种不同AMF烟苗根系的侵染特征

Table 4 Infection characteristics of tobacco seedling roots inoculated with different AMF species				
处理	菌丝侵染率/%	泡囊侵染率/%	丛枝侵染率/%	侵染强度/%
CK	0.00	0.00	0.00	0.00
AM1	(2.67±0.58)f	(1.97±0.15)d	(3.10±0.36)fg	(2.90±0.10)g

表4(续)

处理	菌丝侵染率/%	孢囊侵染率/%	丛枝侵染率/%	侵染强度/%
AM2	(37.67±2.52)b	(7.50±0.50)b	(50.00±5.00)c	(47.67±2.52)b
AM3	0.00	0.00	0.00	0.00
AM4	(5.50±0.50)de	0.00	(22.67±2.52)d	(25.17±1.04)d
AM5	(11.67±1.53)c	0.00	(9.00±1.00)e	(10.67±1.53)e
AM6	(7.50±0.50)d	0.00	(6.50±0.50)ef	(7.17±0.29)f
AM7	(2.83±0.76)f	(4.50±0.50)c	(2.17±0.76)fg	(3.00±0.50)g
AM8	(6.50±0.50)de	(10.67±1.15)a	(65.00±5.00)b	(38.33±2.08)c
AM9	(67.67±2.52)a	(1.50±0.50)d	(75.00±5.00)a	(77.67±2.52)a
AM10	(4.50±0.50)ef	(4.17±0.76)c	(45.00±5.00)c	(40.00±2.00)c

注：侵染率和侵染强度为0.00的处理未参与差异显著性分析；同列不同字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.7 接种不同AMF对烟苗生长的菌根效应

由表5可知，不同AM真菌接种处理对烟苗生长的菌根效应存在较大差异。根系活力和N积累量的菌根效应差异较大，变异系数分别达155.42%和143.76%，属强变异($CV>100\%$)；生物量、根冠比、色素含量以及P、K积累量的菌根效应相对较小，变异系数为45.69%~89.10%，均属中等变异。接种AM9、AM4和AM7对生物量的菌根效应较

大；AM1、AM6、AM2和AM5对根冠比的菌根效应较大；AM1、AM3和AM8对根系活力的菌根效应较大；AM9、AM8和AM10对色素含量的菌根效应较大；AM9、AM3和AM4对N积累的菌根效应较大；AM9、AM4和AM7对P、K积累的菌根效应较大。接种AM5对根系活力和叶绿素含量，接种AM10对N积累存在较大的负菌根效应。

表5 接种不同AMF对烟苗生长与养分吸收的菌根效应

Table 5 Mycorrhizal effects on tobacco seedling growth and nutrient absorption following different AMF inoculations								
菌种	生物量	根冠比	根系活力	叶绿素含量	类胡萝卜素含量	养分积累量		
						N	P	K
AM1	0.16	3.31	1.94	0.16	0.67	-0.09	-0.04	0.12
AM2	0.03	2.69	0.59	0.40	0.92	0.23	0.26	0.17
AM3	0.44	1.85	1.06	0.61	1.25	0.93	0.56	0.60
AM4	0.52	1.92	0.00	0.36	0.67	0.83	1.01	1.14
AM5	0.43	2.38	-0.53	-0.20	0.16	0.62	0.76	1.11
AM6	0.21	3.00	-0.47	0.12	0.99	-0.10	-0.04	0.08
AM7	0.46	0.08	0.53	0.18	0.40	0.29	1.01	2.02
AM8	0.14	1.08	1.06	0.79	1.40	-0.12	0.26	0.47
AM9	0.80	1.85	-0.18	0.96	1.52	1.63	1.42	2.82
AM10	0.10	0.77	0.76	0.79	1.25	-0.25	0.42	0.95
平均值	0.33	1.89	0.48	0.42	0.93	0.40	0.56	0.95
标准差	0.23	0.97	0.74	0.35	0.42	0.57	0.46	0.84
CV/%	69.18	51.07	155.42	83.17	45.69	143.76	81.42	89.10

2.8 接种不同AMF对烟苗生长菌根效应聚类分析

鉴于接种不同AMF在促进烟苗生长和养分吸收等方面具有不同效应，结合根系中菌根侵染特征(表4)和菌根效应(表5)进行层次聚类分析，结果(图4)表明，10种菌剂被聚类为4类：AM1、AM7、AM3、AM5、AM6、AM4聚类为“生长调节型”(第

I类)，这些菌种根系侵染强度低(0.00~25.17%)，在提高烟苗生物量及根冠比方面可能具有较好的调控效应，但AM5和AM6对根系活力可能存在抑制效应；AM8和AM10菌剂聚类为“促养分积累型”(第II类)，对烟苗根系的侵染强度相对较高(38.33%~40.00%)，且在烟苗地上部的P积累方面表现出较高的菌根效应；AM2菌剂聚类为“促生

型”(第Ⅲ类),其侵染强度达47.67%,在烟苗多个生理指标的菌根效应均表现突出;AM9菌剂为“增

强抗逆型”(第Ⅳ类),在提高烟苗生物量以及养分积累方面有较高的菌根效应。

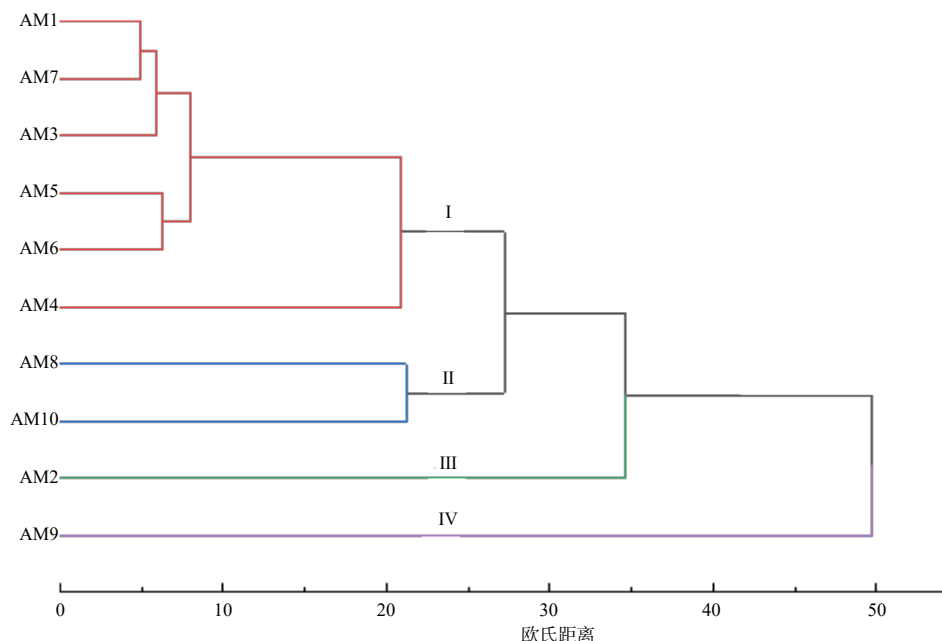


图4 接种不同AMF对烟苗菌根效应的层次聚类结果

Fig. 4 Hierarchical clustering dendrogram of mycorrhizal effects on tobacco seedlings induced by different AMF

3 讨论

3.1 不同AMF对烟草幼苗地上地下部分的促生效应存在差异

在AM菌根共生体建立过程中,根系表皮细胞的基因表达模式可能发生显著变化,细胞内形成的新型细胞器或新结构会引起根系形态的改变^[30-31],形成的根外菌丝也会扩展植物养分吸收范围^[32],烟苗可从基质中以“根系途径”和“菌根途径”等多种策略获取养分^[33],这对烟苗的生长发育至关重要。研究表明,接种AMF可显著提高烟苗根系性状,增加总根长、根表面积、根体积以及根系活力^[34],增加叶绿素含量,改变烟草叶片光合特性^[35],从而促进其生物量的积累^[36]。本研究结果表明,接种不同AMF对烟苗的生长起到不同程度的促进作用,并且这些促生效应在烟苗植物学形态响应上呈现出差异:AM9、AM7和AM4对促进烟苗地上部分生物量积累的效应更明显,而AM1、AM2、AM6和AM5在促进根系生长和调节根冠比等方面的效应更加突出。此外,接种AM3后烟苗根系中虽未发现侵染结构的形成,但在烟苗生长与养分吸收等方面仍有较明显的菌根效应,推测其原因:一方面可能是根外菌丝在基质中扩展增

加了根系对养分的吸收面积,促进了烟苗的生长^[6];另一方面,根外菌丝可能通过分泌植物激素、改善基质微环境等提高了养分的可用性,从而促进烟苗的生长^[37]。以上研究结果提示,不同AMF对烟苗地上地下部分的促生作用及其效应机制可能存在差异,如菌根共生体中的激素调节水平^[38]、同化物的积累分配机制^[39]以及养分获取途径^[40]等的差异,这有待在后续研究中进一步证实与解析。

3.2 漂浮育苗方式下接种不同AMF对烟苗侵染的差异

不同种类的AMF具有不同的生物学特性,包括菌丝生长速度、侵染策略和与宿主植物的互作机制,因而对植物根系的侵染特征也会不同^[41-42]。本研究中,AM9和AM2在烟苗根系中的菌丝侵染率显著高于其他菌种的,表明这2种AMF在烟苗根系中菌丝生长和扩展的能力较强;AM2和AM8在烟苗根系中的泡囊侵染率较高,这有助于优化AM菌根共生体中的营养交换和储存能力,可能更有利于烟苗在环境胁迫下的生长与发展;AM9、AM8、AM2和AM10在根系中的丛枝侵染率较高,表明这些AMF在烟苗根系中形成丛枝的能力较强,可能更有利于菌根共生体的营养交换以及养

分吸收。另外,植物生长的环境条件如pH、养分水平、水分状况等,也会影响AMF的侵染^[43-44]。漂浮育苗基质水分多、空气少,可能造成幼苗根系缺氧、发育受阻等问题^[45],对AMF的侵染可能造成不利的影响。本研究在控温控湿的人工气候室条件下进行,更适于烟苗的生长和发育,也更有利于参试AMF菌种与烟苗共生关系的形成、侵染效率的提升以及菌根效应的发挥,但其在实际育苗生产中的接种效应有待进一步验证。

3.3 不同AMF对烟苗生长的菌根效应及其在农业应用中的潜力

AMF对烟苗生长的菌根效应受到菌株特异性、营养交换效率、环境适应性、植物生理代谢调节以及施肥水平等多种因素的影响^[40]。本试验条件下,不同AMF对烟苗相关生理指标的菌根效应有较大差异,其中根系活力和氮素积累量的变异系数相对较大,表明AMF的种类是影响烟苗生长的重要因素,根系活力和养分积累对AMF的种类变化更为敏感。AMF通过泡囊和丛枝结构与植物进行营养交换,高泡囊侵染率的AMF可能更有效地储存和交换养分,从而促进烟苗的生长^[46]。然而,AMF的侵染强度较高(如AM9),可能会对根系活力产生抑制效应,这可能是资源分配失衡或根系结构改变所致^[47]。本研究结果还表明,AMF的不同种类对烟苗生长的效应点不同,AM1、AM3和AM8可能更有利于提高根系活力;AM1、AM6、AM2和AM5在优化根冠比方面具有更好的效应;AM9、AM4和AM7菌剂可能在促进生物量增长方面的作用更为突出;AM8、AM9和AM10的丛枝侵染率较高,且三者对类胡萝卜素含量的菌根效应也较大,可能在促进烟苗养分吸收和提高植株抗氧化能力以及逆境耐受性方面具有应用潜力^[48]。以上研究结果进一步说明,菌种特异性及其与宿主植物互作的机制差异,是决定特定环境条件下菌种生物学功能的重要因素^[49],深入研究这些因素可以更好地理解AMF如何影响烟苗的生长发育以及菌根效应的发挥,从而为农业应用提供指导。

4 结论

本研究结果表明,漂浮育苗方式下不同AMF对烟苗的侵染特征和菌根效应存在差异,屏东无

梗囊霉(AM1)、异形根孢囊霉(AM3)和根内根孢囊霉(AM8)有利于提高烟苗根系活力;屏东无梗囊霉(AM1)、摩西斗管囊霉(AM2)、黏质隔球囊霉(AM5)和层状近明球囊霉(AM6)具有较好的烟苗生长调节和优化根冠比效应;地表球囊霉(AM9)、幼套近明球囊霉(AM4)和稍长无梗囊霉(AM7)在促进烟苗生物量积累方面作用突出;根内根孢囊霉(AM8)、地表球囊霉(AM9)和凹坑无梗囊霉(AM10)在促进烟苗养分吸收和提高烟苗逆境抗性等方面具有应用潜力;供试的10个菌种聚类为4种功能型,即“促生型”“生长调节型”“促养分积累型”和“增强抗逆型”,摩西斗管囊霉(AM2)、层状近明球囊霉(AM6)、根内根孢囊霉(AM8)和地表球囊霉(AM9)分别为各功能型代表性菌剂。

参考文献:

- [1] TEDERSOO L, MAGURNO F, ALKAHTANI S, et al. Phylogenetic classification of arbuscular mycorrhizal fungi: new species and higher-ranking taxa in Glomeromycota and Mucoromycota(class Endogonomycetes)[J]. MycoKeys, 2024, 107: 273–325.
- [2] LUTZ S, MIKRYUKOV V, LABOUYRIE M, et al. Global richness of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Fungal Ecology, 2025, 74: 101407.
- [3] BHUPENCHANDRA I, CHONGTHAM S K, DEVI A G, et al. Unlocking the potential of arbuscular mycorrhizal fungi: exploring role in plant growth promotion, nutrient uptake mechanisms, biotic stress alleviation, and sustaining agricultural production systems[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2024, 44: 6802–6840.
- [4] LUTZ S, BODENHAUSEN N, HESS J, et al. Soil microbiome indicators can predict crop growth response to large-scale inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Nature Microbiology, 2023, 8(12): 2277–2289.
- [5] 申建波, 白洋, 韦中, 等. 根际生命共同体: 协调资源、环境和粮食安全的学术思路与交叉创新[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 805–813.
- [6] 储薇, 郭信来, 张晨, 等. 丛枝菌根真菌-植物-根际微生物互作研究进展与展望[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(11): 1709–1721.
- [7] 杨文莹, 孙露莹, 宋凤斌, 等. 陆地农业生态系统丛枝菌根真菌物种多样性研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3971–3979.

- [8] MENGE E M. Investigating the effect of environmental factors on arbuscular mycorrhizal fungi(AMF) colonization[J]. International Journal of Science and Research Archive, 2023, 10(2): 568–577.
- [9] LANFRANCO L, FIORILLI V, GUTJAHR C. Partner communication and role of nutrients in the arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. New Phytologist, 2018, 220(4): 1031–1046.
- [10] GONG J L, ZHENG Z Y, ZHENG B F, et al. Deep tillage reduces the dependence of tobacco(*Nicotiana tabacum* L.) on arbuscular mycorrhizal fungi and promotes the growth of tobacco in dryland farming[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2022, 68(3): 203–213.
- [11] 江龙, 黄建国, 袁玲. 不同丛枝菌根真菌对烟苗生长营养状况和生理活性的影响[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(12): 53–57.
- [12] 曾维爱, 龙世平, 李宏光, 等. 苗期接种不同丛枝菌根真菌对烟草青枯病防治效果的影响[J]. 南方农业学报, 2011, 42(6): 612–615.
- [13] 王幼珊, 张俊伶. 中国丛枝菌根真菌的保藏、共享服务与研究利用[J]. 菌物学报, 2019, 38(11): 1760–1807.
- [14] 李芳, 徐丽娇, 谢伟, 等. 菌根化育苗对玉米生长和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(1): 42–50.
- [15] 张舒桓. 西瓜丛枝菌根育苗提高磷吸收和抑制连作枯萎病的机制[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- [16] 王震, 高旭硕, 张梦歌, 等. 丛枝菌根和钼对小麦光合荧光特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(3): 10–16.
- [17] 顾惠敏, 陈波浪, 孙锦. 菌根化育苗对盐胁迫下加工番茄生长和生理特征的影响[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(3): 166–177.
- [18] 徐昊. 丛枝菌根化育苗提高烟草抗冷性的效果及对烟草品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- [19] 董建新, 苏建东, 王刚, 等. 我国烟草育苗技术现状分析[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(1): 119–124.
- [20] 董建新, 王树声, 李秋剑. 烤烟托盘假植育苗与直播漂浮育苗对比试验[J]. 烟草科技, 2003, 36(2): 35–39.
- [21] 曹本福, 姜海霞, 陆引罡, 等. 烟草与丛枝菌根真菌的共生效应研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 327–338.
- [22] 罗杰, 朱春波, 董清, 等. 丛枝菌根真菌(AMF)对烤烟生长及烟叶养分积累的影响[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(11): 30–34.
- [23] 李国明, 祖庆学, 曹本福, 等. 丛枝菌根真菌对不同氮效率烟草品种生长及养分吸收的影响[J]. 中国烟草科学, 2021, 42(3): 26–31, 37.
- [24] 裴佳, 梁瑾, 金夏焕, 等. 两种丛枝菌根真菌和黄瓜花叶病毒复合作用对烟草生长和光合特性的影响[J]. 生态科学, 2024, 43(1): 55–62.
- [25] 高媛. AMF减轻Cd胁迫对烟苗矿质吸收、营养生长及生理代谢的危害[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [26] 赵方贵, 渠峰, 车永梅, 等. 丛枝菌根真菌对烟草香气相关物质代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1298–1304.
- [27] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [28] 王幼珊, 张淑彬, 殷晓芳, 等. 中国大陆地区丛枝菌根真菌菌种资源的分离鉴定与形态学特征[J]. 微生物学通报, 2016, 43(10): 2154–2165.
- [29] 杨高文, 刘楠, 杨鑫, 等. 丛枝菌根真菌与个体植物的关系及其对群落生产力和物种多样性的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(6): 188–203.
- [30] GENRE A, CHABAUD M, TIMMERS T, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi elicit a novel intracellular apparatus in *Medicago truncatula* root epidermal cells before infection[J]. The Plant Cell, 2005, 17(12): 3489–3499.
- [31] RUSSO G, CAROTENUTO G, FIORILLI V, et al. Ectopic activation of cortical cell division during the accommodation of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. New Phytologist, 2019, 221(2): 1036–1048.
- [32] SMITH S E, SMITH F A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystem scales[J]. Annual Review of Plant Biology, 2011, 62: 227–250.
- [33] 段世龙, 严文辉, 冯固, 等. 植物根系/菌根途径获取养分的碳磷互惠机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(6): 1160–1167.
- [34] 邢睿, 黄建国, 晋艳, 等. 交联聚丙烯酰胺和丛枝菌根真菌对烟苗生长、养分吸收和生理指标的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 234–237, 241.
- [35] 姚娟, 王茂胜, 王通明, 等. 接种丛枝菌根真菌对烤烟叶片光合特性的影响[J]. 中国烟草科学, 2013, 34(4): 30–35.
- [36] 江龙, 李竹玫, 黄建国, 等. AM真菌对烟苗生长及某些生理指标的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 156–161.
- [37] 李侠, 叶诚诚, 张俊伶, 等. 丛枝菌根真菌侵染指标与植物促生效应相关性分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(10): 41–53.
- [38] BEGUM N, AHANGER M A, ZHANG L X. AMF

- inoculation and phosphorus supplementation alleviates drought induced growth and photosynthetic decline in *Nicotiana tabacum* by up-regulating antioxidant metabolism and osmolyte accumulation[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 176: 104088.
- [39] ALUKO O O, LI C Z, YUAN G, et al. Differential effects of ammonium(NH_4^+) and potassium(K^+) nutrition on photoassimilate partitioning and growth of tobacco seedlings[J]. *Plants*, 2022, 11(23): 3295.
- [40] ZHANG H, SUN X P, DAI M Q. Improving crop drought resistance with plant growth regulators and rhizobacteria: mechanisms, applications, and perspectives[J]. *Plant Communications*, 2022, 3(1): 100228.
- [41] POZO M J, CORDIER C, DUMAS-GAUDOT E, et al. Localized versus systemic effect of arbuscular mycorrhizal fungi on defence responses to *Phytophthora* infection in tomato plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(368): 525–534.
- [42] RAVNSKOV S, CABRAL C, LARSEN J. Mycorrhiza induced tolerance in *Cucumis sativus* against root rot caused by *Pythium ultimum* depends on fungal species in the arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. *Biological Control*, 2020, 141: 104133.
- [43] CHOURASIYA D, GUPTA M M, SAHNI S, et al. Unraveling the AM fungal community for understanding its ecosystem resilience to changed climate in agroecosystems[J]. *Symbiosis*, 2021, 84(3): 295–310.
- [44] GARG N and CHANDEL S. Arbuscular mycorrhizal networks: process and functions. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(3): 581–599.
- [45] 时向东, 孙军伟, 谢晓波, 等. 烟草漂浮育苗基质研究进展[J]. *中国烟草科学*, 2008, 29(5): 64–68.
- [46] BÜCKING H, KAFLE A. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in the nitrogen uptake of plants: current knowledge and research gaps[J]. *Agronomy*, 2015, 5(4): 587–612.
- [47] ZANGARO W, ANSANELO A P, LESCANO L E A M, et al. Infection intensity, spore density and inoculum potential of arbuscular mycorrhizal fungi decrease during secondary succession in tropical Brazilian ecosystems[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2012, 28(5): 453–462.
- [48] 修伟业, 黎晨晨, 遇世友, 等. 类胡萝卜素生物学功能及提高其生物利用的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(10): 406–415.
- [49] WAQAR S, BHAT A A, KHAN A A. Endophytic fungi: unravelling plant-endophyte interaction and the multifaceted role of fungal endophytes in stress amelioration[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 206: 108174.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 罗 维