



丛枝菌根真菌影响作物非生物胁迫耐受性的研究进展

张春楠¹ 张瑞芳^{2,3,4} 王红^{2,3,4} 周大迈^{2,3,4} 王鑫鑫^{*2,3,4}

1 河北农业大学资源与环境科学学院 河北 保定 071001

2 国家北方山区农业工程技术研究中心 河北 保定 071001

3 河北省山区农业工程技术研究中心 河北 保定 071001

4 河北农业大学河北省山区研究所 河北 保定 071001

摘要: 土壤中存在大量不同种类的微生物资源, 土壤微生物能够与自然界中的大多数植物密切合作, 其中丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)起着十分重要的作用。近年来, 对于AMF的研究越来越多。AMF是存在于土壤中的重要真菌之一, 是土壤中的菌根真菌菌丝与高等植物营养根系形成的一种联合体。AMF可以与陆地上90%左右的植物根系形成共生体, 通过在植物根系形成重要的“丛枝菌根”结构而为植物提供更多的养分。为了了解接种AMF对作物生长过程中耐受一些非生物胁迫(如干旱、极端温度、重金属污染、盐分、不利的土壤pH变化等)性能方面的影响, 基于之前接种AMF对养分胁迫下玉米生长影响的研究, 在扩大作物品种的基础上, 通过查阅大量文献, 结合试验研究及对前人和近年来关于AMF的一些最新研究进展, 获得了具有实践性意义的新发现: AMF与植物共生有助于植物生长, 可以改善植物的营养状况, 并且可以保护植物免受各种非生物环境胁迫的影响。由此可以得出结论: AMF通过各种机制改善植物生长状况, 提高作物抗逆性, 为作物增产、农民增收创造了福利, 并且避免了由于肥料过量施用导致的一些污染环境的问题。本文主要综述了接种AMF在各种非生物环境胁迫(干旱、极端温度、重金属污染、盐分、不利的土壤pH变化等)条件下对植株生长和发育的有利影响, 并对目前存在的不足和今后研究的重点提出几点建议。

关键词: 丛枝菌根真菌, 植物生长和发育, 非生物胁迫, 耐受性

Foundation item: National Key Research and Development Program of China (2017YFD0800405)

***Corresponding author:** E-mail: 4345460@163.com

Received: 09-01-2020; **Accepted:** 31-03-2020; **Published online:** 22-04-2020

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0800405)

***通信作者:** E-mail: 4345460@163.com

收稿日期: 2020-01-09; 接受日期: 2020-03-31; 网络首发日期: 2020-04-22

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on abiotic stress tolerance in crops: a review

ZHANG Chun-Nan¹ ZHANG Rui-Fang^{2,3,4} WANG Hong^{2,3,4} ZHOU Da-Mai^{2,3,4}
WANG Xin-Xin^{*2,3,4}

1 College of Resources and Environment Science, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China

2 Agricultural Engineering Technology Research Center of National North Mountainous Area, Baoding, Hebei 071001, China

3 Hebei Mountain Agricultural Engineering Technology Research Center, Baoding, Hebei 071001, China

4 Hebei Mountain Research Institute, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China

Abstract: There are a large number of different microbial resources in soil. Soil microorganisms cooperate with most plants in nature, among which arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) play an important role. Arbuscular mycorrhizal fungi can form symbiosis with about 90% of plants, providing nutrients for plants by forming arbuscular structures in plants' roots. Our objective is to understand the effects of AMF inoculation on the tolerance of abiotic stresses of crops during growth (such as drought, extreme temperature, heavy metal pollution, salinity, adverse soil pH changes, etc.). Based on previous studies on the effects of AMF on maize growth under nutrient stress, on the basis of expanding crop varieties, new findings with practical significance were obtained by referring to a large number of literatures, combining with our own experimental research and the latest research progress of predecessors and AMF in recent years. The results are as follows: AMF help plant growth, improve plant nutrition uptake, and protect plants from various environmental stresses. It can be concluded that: AMF use a variety of mechanisms to improve plant growth and crop resistance, create benefits for increased crop yields and farmers' incomes, and avoid some of the harmful environmental problems caused by excessive fertilizer use. In this paper, the beneficial effects of AMF on plant growth and development under various abiotic environmental stresses (drought, extreme temperature, heavy metal pollution, salinity, adverse soil pH changes, etc.) are reviewed, and different plant responses to mycorrhizal inoculation are summarized. At the same time, some suggestions are provided for the current deficiency and future research.

Keywords: Arbuscular mycorrhizal fungi, Plant growth and development, Abiotic stress, Tolerance

干旱、极端温度、重金属污染、盐分及不利的土壤 pH 等非生物胁迫条件导致土壤退化, 并对农业生产造成了严重威胁, 因此非生物胁迫被认为是全球农作物减产的主要原因之一^[1]。陆地上存在的一些有益微生物, 特别是细菌和真菌可以克服非生物胁迫对植物造成的有害影响, 并在胁迫环境下改善植物生理性能^[2], 促进植物生长, 增强植物对非生物胁迫的耐受能力。AMF 能够在植物根系形成丛枝菌根结构, 从而与植物形成互利共生的关系^[3]。AMF 是一种与土壤肥力和植物营养关系十分密切的重要有益微生物, 能够与陆地上 90% 以上的植物根系形成共生关系^[4-5]。丛枝菌根共生体能够改善植物的营养状况, 增强植物对各种胁迫的耐受性, 因

此, AMF 在农业方面的研究得到了国内外学者广泛的关注^[6]。

通过之前对玉米与 AMF 互作的试验研究, 得出了以下结论: AMF 介导的植酸酶活性可以影响玉米从植酸中吸收磷养分^[7]; 新、老玉米品种在低土壤磷情况下对不同 AMF 种类响应有差异, 并且影响植物-土壤反馈效应^[8]。

基于之前的实验都是对于同一物种——玉米的研究, 但农业生产中很多作物都会面临多种胁迫, 因此接种 AMF 成为一种提高作物抗逆性、增加产量的有效方法。在查阅大量文献的基础上, 本文综述了 AMF 在寄主植物抵御非生物胁迫中的作用, 以期为深入研究 AMF 与非生物胁迫等逆境之

间的关系提供一个科学的依据。

1 干旱条件下接种 AMF 对植株生长的影响

众所周知,水分在植物生长过程中具有非常重要的作用,干旱不仅会限制植物生长,还会降低植物品质。干旱胁迫作为限制作物生产力最严重的非生物胁迫之一,在世界许多地区引起了广泛的关注^[9]。AMF 常常会通过与植物根系的共生形成丛枝菌根结构,从而引起植物根系结构的改变,特别是根长、密度、直径和侧根数^[8]。AMF 的胞外菌丝可以促进植物对水分和养分的吸收利用,是帮助植物避免干旱危害的重要因素之一^[10]。AMF 直接或间接地影响植物根和地上部的生理生化过程,帮助寄主植物减少缺水的有害影响(图 1)。

有些学者认为,抗旱性的提高和作物更好的表现可以归因于 AMF 共生产生的抗氧化酶(超氧化物

歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶)和可溶性糖的积累^[11]。研究发现,接种 AMF 促进了柑橘幼苗叶片和根系中的可溶性糖及可溶性蛋白的积累,提高了超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)的活性,提高了水分的利用效率,提高植株对干旱胁迫的适应能力^[12]。在不同干旱强度下,接种 AMF 的加工番茄有不同的表现,在两种不同程度的水分胁迫条件下,接种 *Glomus versiforme* 和 *Glomus mosseae* 显著提高了番茄的产量(2%–28%),并且显著增加了番茄叶片中的叶绿素含量;研究者认为接种的植株可以减弱水分胁迫对番茄的毒害,提高抗逆相关酶活性,提高了番茄的抗旱性,从而促进了番茄的生长^[13]。许平辉等^[14]对茶树植株进行了盆栽试验的研究,发现在水分胁迫条件下,接种了 AMF

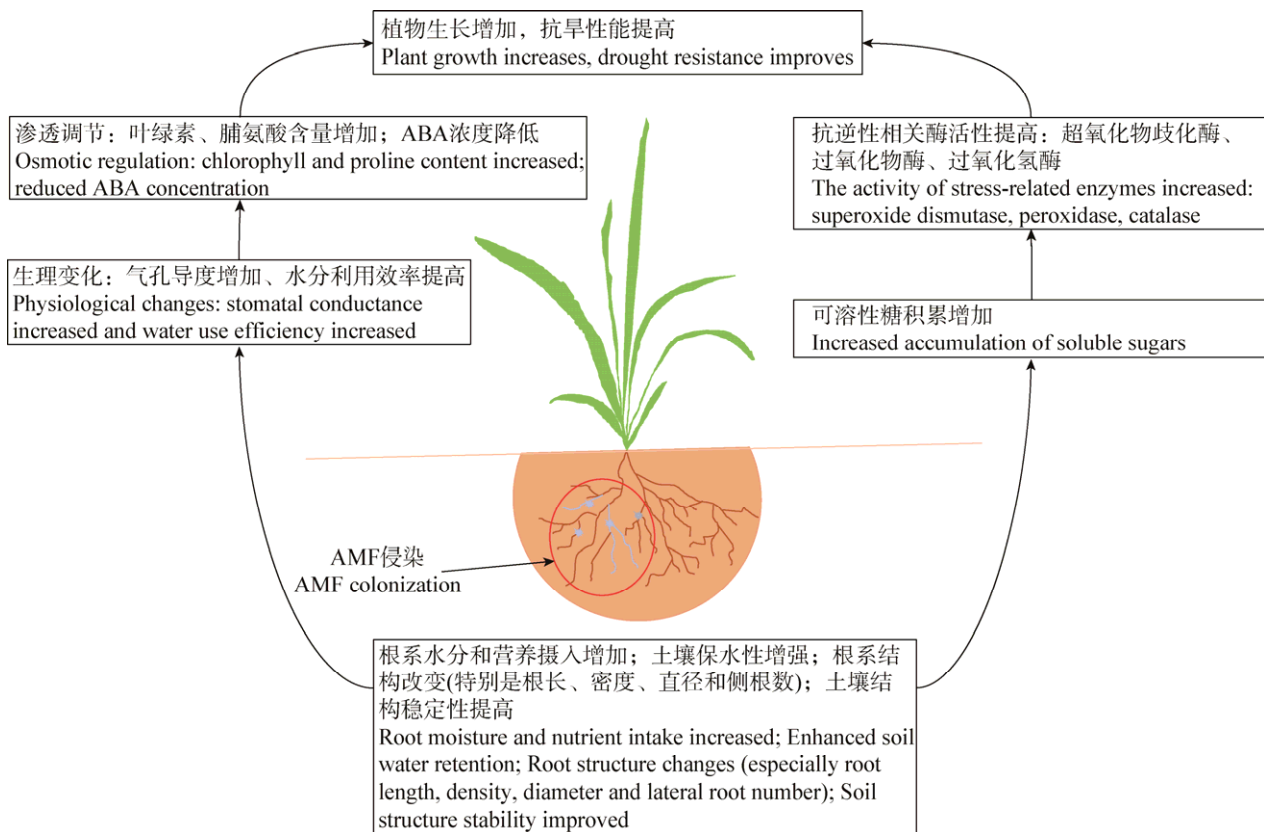


图 1 水分胁迫下 AMF 与植物共生的效应

Figure 1 Symbiosis between AMF and plants under water stress

的茶树植物的生物量、脯氨酸及可溶性蛋白的质量分数显著提高,同时 SOD、POD 和 CAT 的活性显著增强。接种 AMF 可以提高植株抗氧化能力,清除活性氧,缓解水分胁迫对植株造成的伤害,增强植株的耐旱性能,促进植株生长。

渗透调节是植物适应干旱胁迫最重要的特征之一^[15],研究表明脯氨酸^[16]和脱落酸^[17-18](abscisic acid, ABA)的积累可以帮助 AMF 植株更好地缓解干旱胁迫。于萌等^[16]的温室盆栽试验研究表明,在干旱胁迫下,接种 AMF 的紫花苜蓿植株干物质显著增加,AMF 促进了植物对矿质营养元素的吸收,叶片中叶绿素和脯氨酸的含量显著增加,增强了植株的抗旱性能。有研究表明,与未接种的植物相比,接种 AMF 的植物能够更好、更快地调节 ABA 的浓度,从而在干旱胁迫和恢复期间更好地平衡叶片蒸腾和根系水分运动^[17-18]。菌根植株在干旱条件下能够维持更好的 ABA 含量,调节叶片气孔开闭,减少作物因蒸腾作用而失水,菌根实际上提高了作物的吸水能力,从而提高了叶片的电导率,通过延长气孔开放时间来调节渗透调节能力^[9]。在干旱条件下,植株叶片气孔保持紧闭状态,以防止叶片水分状态下降到临界水平^[19]。如上所述,AMF 通过触发 ABA 反应来调节叶片气孔导度和其他生理机制,从而提高作物抗旱性^[20]。

此外,AMF 还可以通过提高土壤结构稳定性进而提高植株耐旱性。据报道,AMF 菌丝具有丰富的丝状菌丝网络,可以增强土壤结构,也可以通过产生糖蛋白形成团聚体来改变土壤结构^[21]。因此,AMF 共生还可以通过提高土壤结构稳定性来提高植物的抗旱性能,从而提高土壤持水能力^[22]。据报道,菌根侵染的土壤比未侵染的土壤形成更稳定的团聚体和更高的菌丝外菌丝,能防止各种非生物胁迫下土壤水分的流失^[23],从而调节土壤和植物之间的水分关系。因此,AMF 被认为是改善土壤结构的最佳生物工具。

2 高温胁迫下接种 AMF 对植株生长的影响

高温胁迫是各种非生物胁迫中的主要胁迫之一。

高温胁迫不仅会影响植物正常生长和发育规律^[24],还会对植物的形态、生理生化产生负面的影响,最终导致植物生产力下降,超过阈值水平的高温状态在一段时间内会对整个植物的生长、代谢和生产力造成不可逆的伤害^[25]。为了避免高温胁迫,植物可以通过一些生理改变、渗透调节和生化变化来采取不同的抗逆性策略,帮助植物修复受损的系统,以改善胁迫环境下植物的生长和生产力^[26]。AMF 的存在大大提高了植物对高温胁迫的耐受性。

高温胁迫条件下,接种 AMF 可以增强玉米(*Zea mays* L.)植株内抗氧化酶的活性、增加可溶性蛋白和脯氨酸的含量;此外,玉米接种 AMF 后,其株高、叶宽和叶长与不接种 AMF 的植株相比分别提高了 50%、40%和 21%,表明 AMF 可以通过提高植株的抗氧化能力来抵抗高温胁迫的损害,进而促进植株的生长^[26]。马通等^[27]研究 AMF 对生菜耐热性效应发现,35 °C 下接种摩西球囊霉(*G. mosseae*)的生菜叶片中 SOD、POD 和 CAT 等防御酶活性分别比不接种 AMF 增加了 68%、129%和 89%;接种了 AMF 的生菜中可溶性糖、脯氨酸及可溶性蛋白的含量显著高于未接种的生菜植株;此外,接种处理的生菜根系活力和叶绿素含量分别比对照增加了 26%和 27%,生菜的耐热性能显著提高。高温胁迫条件下,可溶性渗透调节物质的脯氨酸及可溶性蛋白的含量往往会呈现增加的趋势,而且耐热性强的植株脯氨酸增加幅度越大^[28-30],但接种 AMF 通常会增加植株中脯氨酸和可溶性蛋白的含量^[31]。

3 重金属污染胁迫下接种 AMF 对植株生长的影响

土壤重金属胁迫已经成为影响全球作物生长和生产的最具挑战性的环境因素之一^[32]。土壤中重金属浓度升高,无论是必需还是非必需,都会对植物产生毒害作用,导致植物生长及营养获取受阻、生物量减少,最终导致植物死亡^[33-34]。植物可以通过避免接触有毒重金属、减少有毒离子的吸收等措施来减轻重金属毒性的有害影响。但是在生长过程

中,植物难免会遇到一些不可避免的重金属胁迫。在重金属胁迫下,AMF可以通过开发和探索环境中不受胁迫的部分改变植物的生长模式^[35],通过各种途径减轻重金属的毒害(图2)。因此,AMF在减轻重金属污染的有害影响方面发挥了重要的作用。

有研究表明,在土壤重金属污染的条件下,接种AMF的植物根系对土壤中重金属有较强的固持作用,可以抑制重金属由根系向地上部运输^[36],可以帮助宿主植物减少对重金属的吸收来避免伤害,或通过促进植株对重金属的耐受性来适应重金属胁迫^[37-38]。但是菌丝对重金属的吸收有限,在高度污染的地方,菌丝避免有毒金属危害的可能性非常有限,因此,菌根发展出不同的策略来抵抗重金属胁迫:AMF可以分泌球囊霉素^[39-40],球囊霉素通过与土壤中的重金属螯合,参与重金属失活^[41]。Audet等^[42]在最近的一项关于重金属植物修复AMF共生动力学的元分析(mapping education towards achievement

analysis, META-analysis)研究中表明,AMF从低土壤重金属水平的“增强吸收”转变为高土壤重金属水平的“金属结合”。在最近两项关于龙葵^[43]和嫁接番茄^[44]的研究中观察到了吸收/结合现象,在前一个试验中,接种*G. versiforme*的龙葵,在低浓度镉含量(25或50 mg/kg)时地上部组织中的镉浓度增加,而在高镉土壤浓度(100 mg/kg)时地上部组织中镉浓度下降。

AMF与寄主植物根共生可以增加植物根系吸收面积,这是由于寄生真菌菌丝在根毛区以外探索了更大的区域,从而提高了植物对水和矿质养分的吸收,在胁迫条件下产生更大的生物量^[45]。刘芳等^[46]研究了5种AMF对生长在0、6和12 mg/kg镉土壤中的盆栽紫花苜蓿宿生长和氮吸收的影响,结果发现:AMF可以减轻镉尤其是高水平镉含量的有害影响,对地上部、根生物量的影响最大;在镉污染为12 mg/kg水平时,接种地表球囊霉(*G. versiforme*)

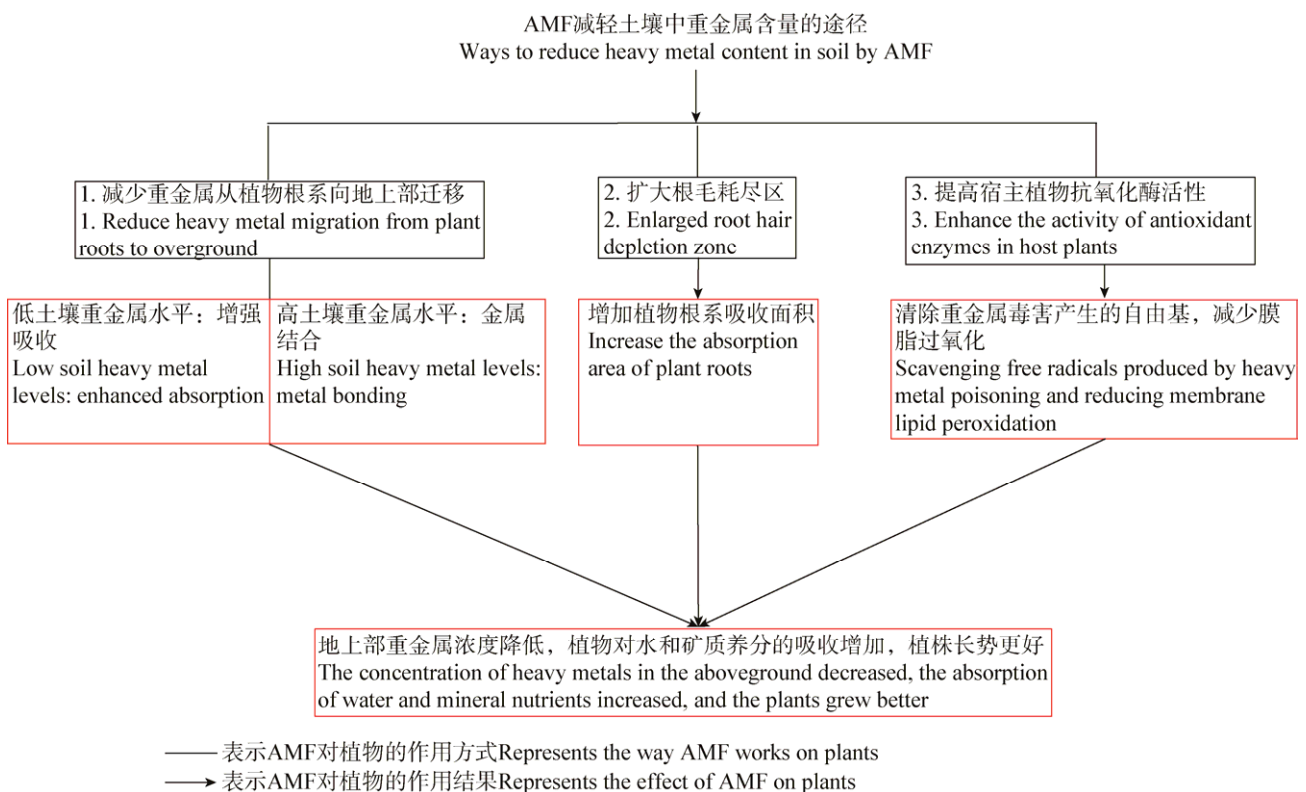


图2 AMF减轻土壤中重金属含量的途径

Figure 2 AMF approaches to reduce heavy metal content in soil

能促进紫花苜蓿生长和氮素的吸收, 接种地表皮囊霉处理的紫花苜蓿植株与未接种处理相比, 株高、根瘤菌数量、总生物量、地上部生物量、整株氮含量、地上部植株氮含量分别增加了 65%、95%、50%、62%、72% 和 5.8%。张晓松等^[47]通过不同浓度镉污染土壤接种 AMF 的黑麦草试验, 研究了 AMF 对镉污染条件下黑麦草生长的影响, 结果发现: 在 180 mg/kg 的重度镉污染条件下, *G. mosseae* 对黑麦草的生长有较好的促进作用; AMF 在一定程度上减轻了镉污染对黑麦草植株的株高、根长及生物量积累的限制, 显著提高了黑麦草叶片中的叶绿素含量。

AMF 通过提高宿主植物抗氧化酶活性来清除重金属毒害产生的自由基, 减少膜脂过氧化, 进而提高宿主植物对重金属胁迫的耐受性^[48]。AMF 被报道在镉胁迫下通过提高抗氧化酶活性(如 SOD、POD 等)减少氧化损伤^[48]。在对不同番茄品种的研究中发现, 在重金属镉(20 mg/kg)污染下, AMF 对 2 个番茄品种的生长、叶和根中的丙二醛含量、抗氧化酶活性、镉积累情况及化学形态均产生了影响; 接种 AMF 显著提高了 2 个番茄品种的根、茎、叶和果实的干物质重, 总干重也显著增加^[48]。在铝胁迫下, 木豆植株抗氧

化酶活性受限, 而 AMF 侵染植株的 SOD 活性升高^[49], 从而保护了植株免受重金属锌的毒害。

4 盐胁迫下接种 AMF 对植株生长的影响

在干旱和半干旱地区, 高盐度是造成作物生长不良和产量损失的主要原因。人为活动, 包括过度使用咸水灌溉以及气候变化造成的低降雨量都会使肥沃的可耕地变成受盐胁迫影响的荒地^[50]。盐胁迫会对植物光合作用、蛋白质合成、酶活性和矿物质营养产生负面影响, 对植物产生渗透胁迫和离子胁迫, 从而影响植物的生理生化平衡^[51-52], 植物的大部分结构成分被破坏, 导致植物功能丧失, 最后死亡^[53]。接种 AMF 后植物的生理生化性能得到改善(图 3)。AMF 接种可通过提高矿质吸收、叶绿素合成和抗氧化酶活性来保护植物免受盐分胁迫。

许多研究结果表明, 盐胁迫下 AMF 接种可以增强寄主植物的耐盐能力, 提高作物生长, 增加作物产量^[54-56]。几篇综述调查了 AMF 在减轻作物盐分不利影响方面的作用^[57-59]。以往的研究报道表明, 尽管盐度对 AMF 的生长有负面影响^[60], 但在盐度胁迫下菌根植物的作物性能得到了提高。

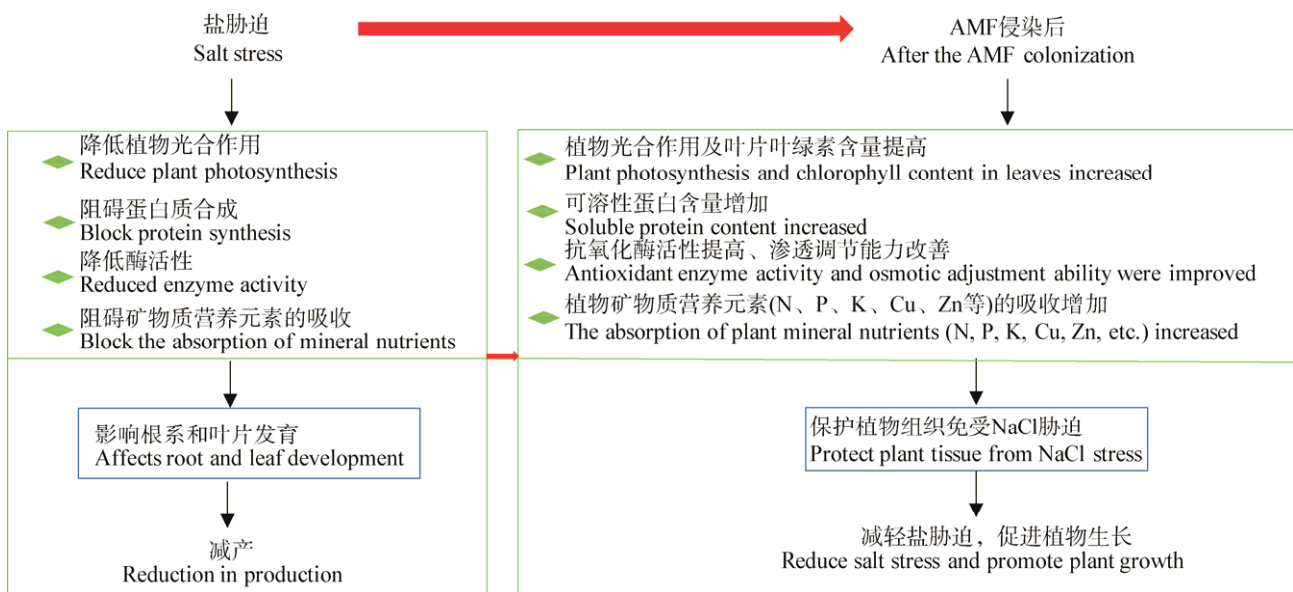


图 3 AMF 侵染前后对比示意图

Figure 3 A pre- and post-colonization diagram of AMF

在盐胁迫条件下接种 AMF 对黄瓜植株生长、果实产量和品质影响的研究发现,与未接种的植株相比,接种 AMF 的黄瓜植株果实产量更高、蔬菜营养品质更好;盐胁迫下接种 AMF 的黄瓜植株体内的氮、磷、钾、铜和锌含量分别比对照提高了 7.3%、12%、28%、14%和 9.9%,果实产量、总糖含量、维生素 C 和可溶性蛋白含量明显提高,表明 AMF 可以有效促进黄瓜植株的生长和对矿物质营养的吸收,改善蔬菜的营养品质,提高果实产量^[61]。Hajiboland 等^[62]证明接种了 AMF 的番茄对盐胁迫耐受性的改善与磷、钾和钙的较高摄取以及钠毒性的降低有关。王敏强等^[63]在研究盐胁迫条件下接种 AMF 对甜菊生长和氮磷吸收的影响时发现,在高盐胁迫下接种 AMF 显著增加了甜菊植株的生物量和磷含量,而且随着盐浓度的升高,甜菊的氮素依赖性明显下降,但磷素依赖性显著升高。接种 AMF 可以显著提高盐胁迫下紫薇的株高、生物量、根长以及根系平均直径、总表面积和总体积,促进紫薇植株根系的生长,同时增加了叶片中氮、磷、钾和叶片叶绿素的含量,与未接种的紫薇植株相比,接种 AMF 的植株耐盐性提高了 27%^[64]。

樊丽^[65]发现,接种 AMF 提高了草莓的耐盐性,缓解了草莓盐胁迫的受害症状,促进了草莓植株的生长;接种 AMF 显著增加了草莓的叶片数和叶面积,草莓单果重量明显增加;与未接种的草莓植株相比,接种的草莓叶片叶绿素值提高了 11%,可见接种 AMF 显著提高了草莓的品质和抗氧化活性。类似地,张美月等^[66]采用盆栽法研究了 AMF 对盐胁迫草莓的影响,在 150 mmol/L 的 NaCl 条件下,与未接种的植株相比,接种 AMF 草莓表现出更高的叶绿素含量、净光合速率、气孔导度和气孔限制值,盐害指数低。接种草莓幼苗后,作物表现较好,主要是由于钠和氯浓度较低。

曹岩坡等^[67]证明,在非盐条件下,接种 AMF 可以促进芦笋的生长,提高可溶性蛋白质量分数和 SOD、POD、CAT 活性;在盐胁迫下,接种 AMF 可以通过促进芦笋植株体内的渗透调节和提高其

抗氧化酶活性,有效地降低细胞膜脂的过氧化水平,从而缓解了盐胁迫对芦笋植株的伤害以及盐胁迫条件对芦笋幼苗生长的抑制。另外,接种 AMF 对于黄瓜植株的生长也有明显的促进作用,在盐胁迫条件下,黄瓜幼苗的生长会受到明显的抑制,接种 AMF 可以显著促进黄瓜植株的生长发育,提高黄瓜幼苗的可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸的含量,而且提高了 SOD、POD 和 CAT 的活性;同时,AMF 通过调节盐胁迫条件下黄瓜幼苗体内的渗透调节物质和提高抗氧化酶活性水平,从而缓解盐胁迫对黄瓜植株造成的伤害,增强植株对于盐胁迫的耐受性^[68]。

5 不利的土壤 pH 条件下接种 AMF 对植株生长的影响

土壤 pH 是控制土壤养分有效性、土壤微生物活性和作物生长发育的关键因素^[69]。强酸或强碱性土壤中,由于氢离子或钠离子较多,难以形成良好的土壤结构;过酸或过碱都会严重抑制土壤微生物的活动,不利于作物生长。因此,植物只有生长在适宜的土壤 pH 中才能具有更好的生长性能和更高的生物产量。有报道^[70-75]调查了 AMF 在减轻植株不利的土壤 pH 方面的负面影响。

和玉吉^[70]在对 AMF 提高紫花苜蓿耐铝性机理的研究中发现,接种 AMF 后紫花苜蓿在高铝水平下地上部生物量、地下部生物量和植株的磷含量均有所增加,说明 AMF 能够有效改善紫花苜蓿在酸性土壤中的生存环境,促进紫花苜蓿的生长发育。同样,张爽等^[71]的研究也表明,不同 AMF 在减轻大豆酸性和铝毒性的有害影响方面发挥了作用:在低 pH 值和铝胁迫处理条件下,与不接种的对照相比,接种 7 种不同 AMF 均能够显著增加大豆植株的生物量、总根长以及植株的磷吸收量,降低了大豆植株的铝含量;其中,大豆植株的地上部干物质质量增加了 2 倍以上,总根长和磷吸收量增加了 1.5 倍以上,植株的铝含量降低了 49%以上。

关于接种 AMF 后植株碱度耐受性的提高,孟

根花^[72]发现,在两种 pH (7.0 和 8.6)条件下,接种和未接种 AMF 的牧草在形态、生理生化反应方面有很大的不同,3 个 AMF 菌种均可以与牧草形成良好的共生关系,且都能够促进牧草的生长,增加牧草生物量,促进牧草对氮磷的吸收,增强了牧草的抗盐性。同样地,在对黑莓扦插苗的研究也发现 AMF 在盐胁迫下可以提高黑莓的生长量,增加黑莓扦插苗对氮、磷、钾和矿物质营养的吸收,减轻了黑莓因盐害造成的产量损失,提高了黑莓植株的耐盐性^[73]。Cartmill 等^[74-75]研究了混合 *Glomus* 物种分离株 ZAC-19 (*G. claroideum*、*G. diaphanum*)增强敏感(蔷薇花)和中等耐受性(长春花)观赏植物对灌溉水中高碱度的耐受性的能力。Cartmill 等^[74]得出的结论是,接种 ZAC-19 的蔷薇花,通过提高叶绿素合成、营养吸收和转移(例如磷和铁)、低铁还原酶和碱性磷酸酶活性,改善了对于灌溉用水中碳酸氢盐诱导的碱度(0、2.5、5.0 和 10.0 g/mol-HCO₃⁻)的耐受性。同样地, Cartmill 等^[75]使用相同的混合 *Glomus* 物种,证明 AMF 接种在高 HCO₃⁻浓度(7.5 g/mol 和 10.0 g/mol)条件下提高了长春花植株的生长参数,特别是叶片面积,这使得光合速率增加;他们强调,接种 AMF 的长春花植株对灌溉水中高碱度的耐受性、磷的吸收和转移以及 AMF 植株通过增加抗氧化活性来维持解毒活性的能力有关。

6 展望

综上所述,AMF 在寄主植物抵御非生物胁迫中起着十分重要的作用,接种 AMF 能够提高植物的抗逆性,改善植物营养状况,增加产量。此外,在育苗时接种 AMF 可以提高秧苗移栽的成活率。但是,只有采取有益的农艺管理措施(例如施用有机肥料或禁止使用某些杀菌剂)、接种有效的 AMF 菌株,以及准确选择植物寄主与真菌组合才能获得最大的效益。接种选定的 AMF 可以促进植物次生代谢,从而改善植物营养品质,还可以增强植物对于干旱、极端温度和不利化学土壤条件的耐受性^[76]。因此,AMF 在农业生产中具有非常广阔的应用前景。

目前 AMF 只有侵染植物根系才能够存活并发挥积极作用,因此在使用上需要研究新的使用方法。综合国内外对于 AMF 的研究动态,我们今后的研究重点应放在以下几个方面:(1)除了侵染植物根系外,研究 AMF 的其他使用方法,使其更广泛、方便地应用于农业生产;(2)了解 AMF 菌株与作物品种及生态环境间的相互作用,选择最佳的菌根-植株组合;(3)农业生产会面临多种非生物胁迫,引导农民了解并使用 AMF;(4)开发更高质量的 AMF 接种物,延长 AMF 的保存期限;(5)在田间条件和多种生物及非生物胁迫条件下,对 AMF 的接种效果进行评价。

REFERENCES

- [1] Wang XW, Vinocur B, Altman A. Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: towards genetic engineering for stress tolerance[J]. *Planta*, 2003, 218(1): 1-14
- [2] Levy Y, Dodd J, Krikun J. Effect of irrigation, water salinity and rootstock on the vertical distribution of vesicular-arbuscular mycorrhiza in citrus roots[J]. *New Phytologist*, 1983, 95(3): 397-403
- [3] Tan LP, Liu MY, Ma YQ, et al. Research progress on arbuscular mycorrhizal fungi in vegetables[J]. *China Vegetables*, 2018(4): 21-29 (in Chinese)
谭亮萍, 刘明月, 马艳青, 等. 蔬菜丛枝菌根真菌研究概况及进展[J]. *中国蔬菜*, 2018(4): 21-29
- [4] Harley JL, Smith SE. Mycorrhizal symbiosis[J]. *Quarterly Review of Biology*, 2008, 3(3): 273-281
- [5] Gadkar V, David-Schwartz R, Kunik T, et al. Arbuscular mycorrhizal fungal colonization. Factors involved in host recognition[J]. *Plant Physiology*, 2001, 127(4): 1493-1499
- [6] Chen BD, Yu M, Hao ZP, et al. Research progress in arbuscular mycorrhizal technology[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 1035-1046 (in Chinese)
陈保冬, 于萌, 郝志鹏, 等. 丛枝菌根真菌应用技术研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 1035-1046
- [7] Wang XX, Hoffland E, Feng G, et al. Phosphate uptake from phytate due to hyphae-mediated phytase activity by arbuscular mycorrhizal maize[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 684
- [8] Wang XX, Hoffland E, Mommer L, et al. Maize varieties can strengthen positive plant-soil feedback through beneficial arbuscular mycorrhizal fungal mutualists[J]. *Mycorrhiza*, 2019, 29(3): 251-261
- [9] Wu QS, Srivastava AK, Zou YN. AMF-induced tolerance to

- drought stress in citrus: a review[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 164: 77-87
- [10] Tyagi J, Sultan E, Mishra A, et al. The impact of AMF symbiosis in alleviating drought tolerance in field crops[A]//Varma A, Prasad R, Tuteja N. *Mycorrhiza - Nutrient Uptake, Biocontrol, Ecorestoration*[M]. Cham: Springer, 2017
- [11] Huang Z, Zou ZR, He CX, et al. Physiological and photosynthetic responses of melon (*Cucumis melo* L.) seedlings to three *Glomus* species under water deficit[J]. *Plant and Soil*, 2011, 339(1): 391-399
- [12] Zhang NN. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on drought resistance mechanism of the potted citrus plantlets[D]. Chongqing: Master's Thesis of Southwest University, 2018 (in Chinese)
张妮娜. 接种丛枝菌根真菌(AMF)对盆栽柑橘幼苗抗旱性的影响[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2018
- [13] Wang B. Arbuscular mycorrhizal fungi improve salt and drought resistance to processing tomato and study of their mechanisms[D]. Shihezi: Master's Thesis of Shihezi University, 2013 (in Chinese)
王斌. 丛枝菌根真菌提高加工番茄抗盐和抗旱效能及其机理研究[D]. 石河子: 石河子大学硕士学位论文, 2013
- [14] Xu PH, Wang FQ, Qi YG, et al. Effect of arbuscular mycorrhiza fungi on drought resistance in tea plant (*Camellia sinensis*) [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(7): 1033-1040 (in Chinese)
许平辉, 王飞权, 齐玉岗, 等. 丛枝菌根真菌对茶树抗旱性的影响[J]. *西北农业学报*, 2017, 26(7): 1033-1040
- [15] Martínez JP, Silva H, Ledent JF, et al. Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(1): 30-38
- [16] Yu M, Zhang YS, Fu W, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi *Rhizophagus irregularis* and super absorbent polymers on growth and drought tolerance of *Medicago sativa* [J]. *Mycosystema*, 2019, 38(11): 1976-1991 (in Chinese)
于萌, 张永帅, 付伟, 等. 保水剂和丛枝菌根真菌异形根胞囊霉对紫花苜蓿生长与抗旱性的影响[J]. *菌物学报*, 2019, 38(11): 1976-1991
- [17] Aroca R, Vernieri P, Ruiz-Lozano JM. Mycorrhizal and non-mycorrhizal *Lactuca sativa* plants exhibit contrasting responses to exogenous ABA during drought stress and recovery[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2008, 59(8): 2029-2041
- [18] Jahromi F, Aroca R, Porcel R, et al. Influence of salinity on the *in vitro* development of *Glomus intraradices* and on the *in vivo* physiological and molecular responses of mycorrhizal lettuce plants[J]. *Microbial Ecology*, 2008, 55(1): 45
- [19] Bago B, Pfeffer PE, Abubaker J, et al. Carbon export from arbuscular mycorrhizal roots involves the translocation of carbohydrate as well as lipid[J]. *Plant Physiology*, 2003, 131(3): 1496-1507
- [20] Ludwig-Müller J. Hormonal responses in host plants triggered by arbuscular mycorrhizal fungi[A]//Koltai H, Kapulnik Y. *Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function*. Netherlands: Springer, 2010
- [21] Singh PK, Singh M, Tripathi BN. Glomalinalin: an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein[J]. *Protoplasma*, 2013, 250(3): 663-669
- [22] Ruiz-Lozano JM. Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress. New perspectives for molecular studies[J]. *Mycorrhiza*, 2003, 13(6): 309-317
- [23] Wu ZP, McGrouther K, Huang JD, et al. Decomposition and the contribution of glomalinalin-related soil protein (GRSP) in heavy metal sequestration: Field experiment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 68: 283-290
- [24] Zandalinas SI, Mittler R, Balfagón A, et al. Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures[J]. *Physiologia Plantarum*, 2018, 162(1): 2-12
- [25] Rykaczewska K. Impact of heat and drought stresses on size and quality of the potato yield[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2017, 63(1): 40-46
- [26] Mathur S, Sharma MP, Jajoo A. Improved photosynthetic efficacy of maize (*Zea mays*) plants with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) under high temperature stress[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2018, 180: 149-154
- [27] Ma T, Liu RJ, Li M. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on heat-tolerance of *Lactuca sativa* L. [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 51(11): 1919-1926 (in Chinese)
马通, 刘润进, 李敏. 丛枝菌根真菌对生菜耐热性的效应[J]. *植物生理学报*, 2015, 51(11): 1919-1926
- [28] Liu CF, Zhang WX, Sun L, et al. Effects of high temperature on photosynthesis and growth of crabapple seedling[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2013, 37(4): 17-22 (in Chinese)
刘春风, 张往祥, 孙垒, 等. 高温对观赏海棠生长和光合作用的影响[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2013, 37(4): 17-22
- [29] Xing XL, Liu DY, Hu SZ. The effect on several physiological responses to heat stress of *Lilium davidii* var. *unicolor* seedlings[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2010, 33(5): 65-68 (in Chinese)
邢晓蕾, 刘冬云, 胡松竹. 高温胁迫对兰州百合幼苗生理指标的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2010, 33(5): 65-68

- [30] Han W, Sun CX, Zhao HL, et al. Compensatory ability and defense mechanism of Chinese cabbage under high temperature stress[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(2): 119-128 (in Chinese)
韩玮, 孙晨曦, 赵和丽, 等. 高温胁迫后小白菜的补偿生长能力及防御机制[J]. 中国农业气象, 2018, 39(2): 119-128
- [31] Kong YF, Zhu XC, Zhang JF, et al. Responses of drought resistance from wild and cultivated soybeans to arbuscular mycorrhizal fungi inoculation[J]. Soil and Crops, 2017, 6(1): 25-31 (in Chinese)
孔钰凤, 朱先灿, 张建峰, 等. 野生大豆与栽培大豆抗旱性对接丛枝菌根真菌的响应[J]. 土壤与作物, 2017, 6(1): 25-31
- [32] Meier S, Borie F, Bolan N, et al. Phytoremediation of metal-polluted soils by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2012, 42(7): 741-775
- [33] Singh S, Parihar P, Singh R, et al. Heavy metal tolerance in plants: Role of transcriptomics, proteomics, metabolomics, and ionomics[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 6: 1143
- [34] Gangwar S, Singh VP, Tripathi DK, et al. Chapter 10 Plant responses to metal stress: the emerging role of plant growth hormones in toxicity alleviation[A]/Ahmad P, Rasool S. Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance[M]. San Diego: Academic Press, 2014: 215-248
- [35] González-Guerrero M, Melville LH, Ferrol N, et al. Ultrastructural localization of heavy metals in the extraradical mycelium and spores of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2008, 54(2): 103-110
- [36] Yang WT, Feng YJ, Wang JW. Review on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi on host plants under biotic and abiotic stresses[J]. Ecological Science, 2008, 27(4): 267-271 (in Chinese)
杨文亭, 冯远娇, 王建武. 丛枝菌根真菌在寄主植物抵御生物和非生物胁迫中的作用[J]. 生态科学, 2008, 27(4): 267-271
- [37] Zhang HH, Tang M, Chen H, et al. Effect of inoculation with AM fungi on lead uptake, translocation and stress alleviation of *Zea mays* L. seedlings planting in soil with increasing lead concentrations[J]. European Journal of Soil Biology, 2010, 46(5): 306-311
- [38] Słomka A, Kuta E, Szarek-Lukaszewska G, et al. Violets of the section melanium, their colonization by arbuscular mycorrhizal fungi and their occurrence on heavy metal heaps[J]. Journal of Plant Physiology, 2011, 168(11): 1191-1199
- [39] Ferrol N, González-Guerrero M, Valderas A, et al. Survival strategies of arbuscular mycorrhizal fungi in Cu-polluted environments[J]. Phytochemistry Reviews, 2009, 8(3): 551-559
- [40] Gamalero E, Berta G, Glick BR. The use of microorganisms to facilitate the growth of plants in saline soils[A]/Khan MS, Zaidi A, Musarrat J. Microbial Strategies for Crop Improvement[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009
- [41] González-Chávez MC, Carrillo-González R, Wright SF, et al. The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements[J]. Environmental Pollution, 2004, 130(3): 317-323
- [42] Audet P, Charest C. Dynamics of arbuscular mycorrhizal symbiosis in heavy metal phytoremediation: Meta-analytical and conceptual perspectives[J]. Environmental Pollution, 2007, 147(3): 609-614
- [43] Liu HQ, Wang YH, Wang LL, et al. P16INK4A and survivin: diagnostic and prognostic markers in cervical intraepithelial neoplasia and cervical squamous cell carcinoma[J]. Experimental and Molecular Pathology, 2015, 99(1): 44-49
- [44] Kumar P, Lucini L, Rouphael Y, et al. Insight into the role of grafting and arbuscular mycorrhiza on cadmium stress tolerance in tomato[J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 477
- [45] Upadhyaya H, Panda SK. Role of arbuscular mycorrhiza in heavy metal tolerance in plants: prospects for phytoremediation[J]. Journal of Phytology, 2010, 2(7): 16-27
- [46] Liu F, Jing SX, Hu J, et al. Effects of cadmium and arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the growth and nitrogen uptake of alfalfa (*Medicago sativa*)[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(2): 69-77 (in Chinese)
刘芳, 景戌旋, 胡健, 等. 镉污染和接种丛枝菌根真菌对紫花苜蓿生长和氮吸收的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(2): 69-77
- [47] Zhang XS, Meng XY, Wang W, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth of ryegrass seedling in cadmium contaminated soils[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015(6): 122-127 (in Chinese)
张晓松, 孟祥英, 王薇, 等. 丛枝菌根真菌对镉污染土壤中黑麦草幼苗生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6): 122-127
- [48] Jiang L, Yang Y, Xu WH, et al. Effects of ryegrass and arbuscular mycorrhiza on activities of antioxidant enzymes, accumulation and chemical forms of cadmium in different varieties of tomato[J]. Environmental Science, 2014, 35(6): 2349-2357 (in Chinese)
江玲, 杨芸, 徐卫红, 等. 黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(6): 2349-2357

- [49] Garg N, Kaur H. Influence of zinc on cadmium-induced toxicity in nodules of pigeonpea (*Cajanus cajan* L. Millsp.) inoculated with arbuscular mycorrhizal (AM) fungi[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2012, 34(4): 1363-1380
- [50] Ruiz-Lozano JM, Porcel R, Azcón C, et al. Regulation by arbuscular mycorrhizae of the integrated physiological response to salinity in plants: new challenges in physiological and molecular studies[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(11): 4033-4044
- [51] Iqbal N, Umar S, Khan NA. Nitrogen availability regulates proline and ethylene production and alleviates salinity stress in mustard (*Brassica juncea*)[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 178: 84-91
- [52] Hashem A, Abd_Allah EF, Alqarawi AA, et al. The interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and endophytic bacteria enhances plant growth of *Acacia gerrardii* under salt stress[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 1089
- [53] Evelin H, Giri B, Kapoor R. Ultrastructural evidence for AMF mediated salt stress mitigation in *Trigonella foenum graecum*[J]. *Mycorrhiza*, 2013, 23(1): 71-86
- [54] Feng G, Bai DS, Yang MQ, et al. Influence of inoculating arbuscular mycorrhizal fungi on growth and salinity tolerance parameters of maize plants[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2000, 26(6): 743-750 (in Chinese)
冯固, 白灯莎, 杨茂秋, 等. 盐胁迫下 AM 真菌对玉米生长及耐盐生理指标的影响[J]. *作物学报*, 2000, 26(6): 743-750
- [55] He ZQ, Zou ZR, He CX, et al. Effect of AMF on GSH-Px activity and cell membrane osmosis of tomato[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition)*, 2006, 34(12): 53-57,64 (in Chinese)
贺忠群, 邹志荣, 贺超兴, 等. 盐胁迫下丛枝菌根真菌对番茄细胞膜透性及谷胱甘肽过氧化物酶活性的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(12): 53-57,64
- [56] Shen LY, Mao YM, Lu JY, et al. Effects of arbuscular mycorrhizae on salt tolerance of wild jujube (*Zizyphus spinosus* hu) seedlings[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(3): 426-433 (in Chinese)
申连英, 毛永民, 鹿金颖, 等. 丛枝菌根对酸枣实生苗耐盐性的影响[J]. *土壤学报*, 2004, 41(3): 426-433
- [57] Baum C, El-Tohamy W, Gruda N. Increasing the productivity and product quality of vegetable crops using arbuscular mycorrhizal fungi: a review[J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 187: 131-141
- [58] Liu J, Xiao B, Wang LX, et al. Influence of AMF on salt tolerance of tea[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(3): 220-225,234 (in Chinese)
柳洁, 肖斌, 王丽霞, 等. 丛枝菌根真菌对茶树耐盐性的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2014, 42(3): 220-225,234
- [59] Xu Y, Fan Y, Yu YH, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungus on the growth and physiological salt tolerance parameters of *Carthamus tinctorius* seedlings under salt stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(12): 3395-3402 (in Chinese)
徐瑶, 樊艳, 俞云鹤, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下红花幼苗生长及耐盐生理指标的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(12): 3395-3402
- [60] Juniper S, Abbott LK. Soil salinity delays germination and limits growth of hyphae from propagules of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Mycorrhiza* 2006, 16(5): 371-379
- [61] Han B, Guo SR, He CX, et al. Effects of arbuscular mycorrhiza fungi (AMF) on the plant growth, fruit yield, and fruit quality of cucumber under salt stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(1): 154-158 (in Chinese)
韩冰, 郭世荣, 贺超兴, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下黄瓜植株生长、果实产量和品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 154-158
- [62] Hajiboland R, Aliasgharzadeh N, Laiegh SF, et al. Colonization with arbuscular mycorrhizal fungi improves salinity tolerance of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants[J]. *Plant and Soil*, 2010, 331(1): 313-327
- [63] Wang MQ, Wu PH, Shen YK, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and nitrogen and phosphorus acquisition of salt-stressed *Stevia rebaudiana*[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, 24(5): 960-966 (in Chinese)
王敏强, 吴沛鸿, 沈益康, 等. 盐胁迫下接种丛枝菌根真菌对甜菊生长和氮磷吸收的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(5): 960-966
- [64] Yang HX, Li SM, Guo SX. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on salinity tolerance of *Lagerstroemia indica*[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(9): 1379-1386 (in Chinese)
杨海霞, 李士美, 郭绍霞. 丛枝菌根真菌对紫薇耐盐性的影响[J]. *植物生理学报*, 2014, 50(9): 1379-1386
- [65] Fan L. Studies on improvement of salt tolerance and fruit quality by arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on strawberry[D]. Beijing: Doctoral Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011 (in Chinese)
樊丽. 丛枝菌根真菌对草莓耐盐性及果实品质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2011
- [66] Zhang MY, Tao XJ, Fan JM, et al. Effect of phosphorus stress and AMF on photosynthesis in strawberry under salt stress[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2009, 32(4): 71-75 (in Chinese)
张美月, 陶秀娟, 樊建民, 等. 磷和丛枝菌根真菌对盐胁迫

- 迫草莓光合作用的影响[J]. 河北农业大学学报, 2009, 32(4): 71-75
- [67] Cao YP, Dai P, Dai SY. Effects of arbuscular mycorrhiza fungi (AMF) on osmoregulation substances and antioxidant enzyme activities of asparagus plant under salt stress[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2017, 39(5): 43-48 (in Chinese)
曹岩坡, 代鹏, 戴素英. 丛枝菌根真菌(AMF)对盐胁迫下芦笋植株渗透调节物质及抗氧化酶活性的影响[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2017, 39(5): 43-48
- [68] Han B, He CX, Guo SR, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on osmoregulation substance contents and antioxidant enzyme activities of cucumber seedlings under salt stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(12): 2492-2497 (in Chinese)
韩冰, 贺超兴, 郭世荣, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下黄瓜幼苗渗透调节物质含量和抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(12): 2492-2497
- [69] Zhang YY, Wu W, Liu H. Factors affecting variations of soil pH in different horizons in hilly regions[J]. PLoS One, 2019, 14(6): e0218563
- [70] He YJ. Mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi in improving aluminum tolerance of *Medicago sativa*[D]. Chongqing: Master's Thesis of Southwest University, 2016 (in Chinese)
和玉吉. 丛枝菌根真菌提高紫花苜蓿耐铝性机理研究[D]. 重庆: 西南大学硕士论文, 2016
- [71] Zhang S, Liao H, Wang XR. Effect of different arbuscular mycorrhizal fungi species on plant tolerance to low pH and aluminum toxicity in soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(5): 616-622 (in Chinese)
张爽, 廖红, 王秀荣. 不同丛枝菌根真菌对大豆耐酸、铝能力的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(5): 616-622
- [72] Meng GH. Comprehensive effects of inoculation arbuscular mycorrhizal fungi on two types of alkali-hardiness grasses[D]. Hohhot: Master's Thesis of Inner Mongolia Agricultural University, 2009 (in Chinese)
孟根花. 丛枝菌根接种对两种耐盐碱牧草的综合效应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2009
- [73] Liu XJ. Study on effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the salt and drought resistance of blackberry cuttings[D]. Chongqing: Master's Thesis of Southwest University, 2006 (in Chinese)
刘晓捷. 接种丛枝菌根真菌对黑莓扦插苗耐盐性以及抗旱性的影响[D]. 重庆: 西南大学硕士学位论文, 2006
- [74] Cartmill AD, Alarcón A, Valdez-Aguilar LA. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance tolerance of *rosa multiflora* cv. Burr to bicarbonate in irrigation water[J]. Journal of Plant Nutrition, 2007, 30(9): 1517-1540
- [75] Cartmill AD, Valdez-Aguilar LA, Bryan DL, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance tolerance of vinca to high alkalinity in irrigation water[J]. Scientia Horticulturae, 2008, 115(3): 275-284
- [76] Roupael Y, Franken P, Schneider C, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 196: 91-108