

# 丛枝菌根真菌提高林木抗逆性的研究进展

环红娟<sup>1\*</sup>, 谢贤安<sup>1,2#</sup>

<sup>1</sup>华南农业大学林学与风景园林学院, 广东省森林植物种质创新与利用重点实验室, 广东 广州

<sup>2</sup>山东省农业科学院, 养分资源高效利用全国重点实验室, 山东 济南

收稿日期: 2026年3月11日; 录用日期: 2026年4月29日; 发布日期: 2026年5月7日

## 摘要

我国林业可持续发展受干旱、盐碱、重金属污染及病虫害等多重逆境制约, 导致林木生长缓慢、生理功能紊乱, 影响生态系统稳定。丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)可与绝大多数林木形成共生体, 是调控林木抗逆能力、优化林地生态的有益微生物。非生物胁迫下, AMF通过增强养分水分吸收、调节离子平衡、促进重金属螯合及激活抗氧化系统等, 提升林木环境适应性; 生物胁迫中, 依托根际微环境重塑和次生代谢产物诱导, 增强林木病虫害抵御能力。此外, AMF可通过改良土壤结构、促进植被恢复, 进一步增强生态系统稳定。分析AMF在林木生长及各类逆境中的作用, 并对其在林木中的应用研究进行了展望, 以期为我国林木菌根研究与应用提供科学参考。

## 关键词

丛枝菌根真菌, 林木, 抗逆性

# Research Progress on Arbuscular Mycorrhizal Fungi Enhancing Stress Resistance in Forest Trees

Hongjuan Huan<sup>1\*</sup>, Xian'an Xie<sup>1,2#</sup>

<sup>1</sup>Guangdong Key Laboratory for Innovative Development and Utilization of Forest Plant Germplasm, College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Nutrient Use and Management, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan Shandong

Received: March 11, 2026; accepted: April 29, 2026; published: May 7, 2026

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 环红娟, 谢贤安. 丛枝菌根真菌提高林木抗逆性的研究进展[J]. 自然科学, 2026, 14(3): 263-272.

DOI: 10.12677/ojns.2026.143030

## Abstract

The sustainable development of China's forestry is constrained by multiple stresses, including drought, salinity, alkalinity, heavy metal pollution, and pests and diseases. These stresses result in slow tree growth, disrupted physiological functions, and ultimately affect ecosystem stability. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) can form symbiotic associations with the vast majority of forest trees and serve as beneficial microorganisms that regulate stress resistance and optimize the forestland ecology. Under abiotic stress, AMF enhance the environmental adaptability of trees by improving nutrient and water uptake, regulating ion homeostasis, promoting heavy metal chelation, and activating the antioxidant system. Under biotic stress, by reshaping the rhizosphere microenvironment and inducing the production of secondary metabolites, AMF strengthen the resistance of trees to pests and diseases. In addition, AMF can further enhance ecosystem stability by improving soil structure and promoting vegetation restoration. This paper analyzes the roles of AMF in tree growth and under various stresses, and prospects the application and research of AMF in forest trees, aiming to provide a scientific reference for mycorrhizal research and application in trees in China.

## Keywords

Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Forest Trees, Stress Resistance

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国森林资源丰富、分布广泛,但随着生态功能衰减及全球气候变化加剧,林木生长面临着日益严峻的干旱、盐碱、重金属污染以及病虫害频发等逆境胁迫,导致林木光合作用受抑制,同时引发氧化损伤与渗透胁迫等一系列生理生化反应,严重制约了林业可持续发展[1][2]。在这样的背景下,寻找有效的方法提高林木的抗逆性,对于我国林业可持续发展具有重要意义。

丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)作为一种广泛存在于土壤中的有益微生物,能够与林木根系形成互惠共生体,一方面林木为 AMF 提供有机碳源;另一方面 AMF 通过扩大林木根系的吸收范围,增强林木对水分和矿质养分(如氮、磷、钾等)的吸收能力,促进生物量积累,并改善根际微环境[3]。研究表明,AMF 通过提高叶片叶绿素含量、光合速率及气孔导度;诱导抗氧化酶活性,调节渗透调节物质含量,改善林木水分状况;调节离子平衡,以及吸附和螯合重金属等多种途径促进林木生长并增强其对胁迫的适应能力[4]。此外,AMF 还能通过改变根系分泌物组成、调控根际微生物群落,增强林木抗逆能力。

目前,关于 AMF 提高植物抗逆性的研究已取得较大进展,但在林木领域,相关研究仍存在菌株筛选不精准、盆栽与田间转化困难等问题,尚未形成规模化应用体系。不同研究在对象选择、实验设计、胁迫强度控制等方面存在较大差异,导致结果的可比性有限。例如,有的研究采用盆栽控制,而有的则基于野外样地,这可能在菌根定殖率、养分吸收效率及抗逆表现上产生偏差。因此,本文旨在综述 AMF 对林木胁迫适应的研究进展,探讨 AMF 在促进林木生长、增强抗逆能力、提高生态系统稳定方面的应用前景,并对今后林木菌根研究进行展望。以期为林木抗逆性研究提供参考。

## 2. AMF 增强林木对矿质营养的吸收

随着木材需求的日益增长, 人工林逐步替代天然林。人工林较为单一的树种种植和管理方式导致土壤肥力明显低于天然林。AMF 在碳(C)、氮(N)、磷(P)循环中发挥关键作用, 同时也参与钾(K)、硫(S)等微量元素的循环过程, 能够有效促进林木对土壤中的矿质养分的吸收, 被誉为“生物肥料”[5]。研究发现, 营养胁迫下接种 AMF 显著促进核桃[6]、桉树[7]和柑橘[8]株高、根长和生物量的积累。此外接种 AMF 对提高润楠[9]、杉木[10]、侧柏[11]、杨树[12]、宁夏枸杞[13]及尼泊尔桉木[14]等氮、磷、钾及碳元素的吸收具有重要作用。接种幼套近明球囊霉极显著降低了土壤中磷酸铝盐、磷酸铁盐、磷酸钙盐、闭蓄态磷 4 种磷形态含量。接种摩西球囊霉降低了杉木土壤中硝态氮、铵态氮、可溶性有机氮含量, 提高土壤中酸性磷酸酶、脲酶和 N-乙酰- $\beta$ -D 葡萄糖苷酶活性[15]。同时, 接种 AMF 能增加光合碳在矿区植物-土壤系统中的积累量, 维持了土壤碳库的稳定, 并提高土壤有机碳转化的能力[16]。此外, 在营养胁迫下接种 AMF 可显著提升林木的叶绿素含量、叶绿素相对含量、净光合速率、气孔导度及电子传递速率[17][18]。

我国石漠化主要集中于西南岩溶地区, 这些区域水土流失与植被退化严重, 同时由于土壤偏碱性, 磷元素多以植物难以直接利用的难溶态存在, 加之造林幼苗成活率低、抗逆性差, 进一步导致生态系统脆弱。通过对石漠化地区 5 种常用造林树种茶条木、降香黄檀、香椿、喜树和任豆接种, 发现 AMF 的菌丝能够延伸至根系无法到达的区域, 帮助苗木根系扩大养分吸收范围, 改善土壤养分环境, 有效缓解林木面临的营养胁迫, 进而提高林木在石漠化缺磷土壤下的生长和生存能力[19]。

现有研究表明, AMF 能显著促进林木矿质养分吸收。盆栽实验中, AMF 通过菌丝扩展、酶活性提升及光合效率改善等机制促进植物对养分的吸收; 田间研究(如石漠化造林)则在复杂环境下, 验证 AMF 改善土壤养分、提升苗木存活率的实际效果。盆栽中验证的菌丝网络高效吸收、光合提升等机制, 在石漠化、干旱矿区等贫瘠、结构不良的田间土壤中, 会因物理阻隔、水分匮乏而受限。因此, 如何筛选具有环境耐受性的土著优势菌株, 并开发与土壤改良剂协同的接种技术, 成为亟待解决的问题。

## 3. AMF 对林木抗非生物胁迫的影响

### 3.1. 增强抗旱性

林木作为固着生长生物, 容易受到干旱胁迫。干旱胁迫会阻碍林木生长发育、干扰酶活性并破坏水分养分平衡。AMF 对林木耐旱性的调控是一个复杂的过程, 其主要通过改善土壤结构、促进水分养分吸收、增强渗透调节与抗氧化能力、调节激素平衡等途径实现[20][21]。通过接种摩西斗管囊霉、幼套近明球囊霉、根内根孢囊霉及其三者混合菌种, 并进行干旱处理, 发现菌根榆树、柏木幼苗的耐旱能力显著强于非菌根幼苗[21][22]。同时, 干旱胁迫条件下接种 AMF 能显著提高黄檀的总生物量、株高和根系生长, 提高超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、可溶性蛋白含量, 降低丙二醛(MDA)含量, 从而增强黄檀的抗旱性[23]。在以毛红椿幼苗为实验材料的研究中, 接种 AMF 能够通过提高毛红椿幼苗叶片的光合能力及渗透调节能力增强其抗旱性, 有效提高毛红椿幼苗对干旱胁迫的适应性[24]。

AMF 提高林木抗旱性本质上是 AMF 诱导抗旱相关基因的表达的结果。在刺槐中, AM 共生可以通过调节 RpAQP 的表达, 并通过改善植物生物量、组织水分状况和宿主幼苗的叶片光合作用, 增强刺槐的耐旱性[25]。此外, AMF 诱导的青杨 14-3-3 蛋白质编码基因 PcGRF10 和 PcGRF11 的表达水平与 SOD、POD 和糖含量显著正相关, 表明 14-3-3 可能通过抗氧化和渗透调节来响应干旱胁迫[26]。通过对茶树研究, 发现 AMF 通过诱导碳同化相关酶基因和叶绿素代谢相关酶基因的表达, 缓解干旱胁迫对光合器官的伤害, 从而提高茶树的耐旱性[27]。

我国西部存在大面积的干旱区域, 加之煤炭资源主要分布在西部干旱半干旱区。人类不合理的生产

经营活动与脆弱的生态条件相互叠加, 不仅造成土地生产力衰减、土地资源流失, 更使得荒漠化与沙漠化进程不断加快[28]。通过对复垦区植被接种 AMF, 发现菌根真菌的定殖增强了植物对恶劣环境的适应性, 逐步改善煤矿区生态环境[29]。此外, 接种 AMF 还促进土壤养分的活化, 为沙棘人工林提供更多的生态位, 打破种植密度过高对林下植被生长和正向演替的限制[30]。

在抗旱性研究中, 盆栽实验通过在控制条件下探究 AMF 在特定因素下的作用, 具有较好的重复性和结果稳定性, 有助于明确 AMF 对林木耐旱性的具体作用机制。而田间研究则聚焦于干旱矿区、荒漠化区域等自然环境中, 旨在验证 AMF 改善植被状态、促进生态恢复的实际效果。然而, 盆栽实验与实际田间情况存在差异, 且 AMF 菌株的定殖效率易受气候条件因素影响。需进一步探索 AMF 在提高实际林业生产和生态修复中的应用效果。

### 3.2. 增强耐盐性

盐胁迫会对林木产生多方面的严重危害。首先盐胁迫会破坏林木体内的离子稳态, 导致钠、氯等离子过量积累, 造成离子毒害, 干扰细胞正常功能。同时, 盐胁迫会抑制林木的呼吸作用与光合作用, 影响能量代谢, 限制林木生长。此外, 还可能损伤细胞膜结构, 引发代谢紊乱, 严重影响林木存活与生长[31] [32]。研究表明, AMF 广泛分布在盐渍土壤中, 能够与林木根系形成共生关系, 通过改善林木养分吸收、减少氧化损伤、增强渗透调节能力以及维持良好的离子稳态等途径, 有效促进林木对盐胁迫的耐受性, 帮助林木在盐渍环境中更好地生存和生长。通过设置正常水分和盐胁迫(100、200、300 mmol/L NaCl)处理, 发现盐胁迫下, 接种 AMF 增加了桉楠对 N、P、K 的吸收[33]。此外, 与不接种相比, 接种摩西球囊霉、扭形球囊霉显著增加桦树根系的生长量、干物质质量及含水量, 增强了植株对氮、磷的吸收能力, 同时提升了叶片净光合速率、气孔限制值和水分利用效率, 并降低了胞间 CO<sub>2</sub> 浓度[34] [35]。更重要的是, 盐胁迫导致核桃幼苗生长发育受到抑制, 光合性能下降, 接种 AMF 能够促进叶绿素合成, 提高光合性能并减轻氧化应激[36]。此外, 接种 AMF 不仅有利于月季叶片中玉米素(ZT)、赤霉素(GA)、生长素(IAA)含量提高以及脱落酸(ABA)含量下降[37], 还有利于沙枣苗木降低叶片盐害率, 缓解盐胁迫对沙枣生长产生的不利影响[38]。

土壤盐渍化是当前干旱和半干旱地区面临的严重问题之一, 会显著抑制植物生长发育。AMF 能够增加土壤团聚体的稳定性, 促进盐胁迫下林木的生长。如在塔里木河下游荒漠河岸林地处于干旱内陆河流域, 土壤盐含量较大, AMF 通过增加土壤大团聚体的比例, 促进幼苗根系生长, 扩大根系对土壤中营养物质的吸收范围, 从而增强幼苗对盐渍环境的适应能力[39]。

耐盐性相关研究多以盆栽实验为主, 系统揭示了 AMF 通过离子稳态调控、抗氧化防御、光合性能提升及激素平衡调节等多重机制缓解盐胁迫的作用路径。相比之下, 针对高盐环境(如荒漠河岸林)的田间研究相对较少, 缺乏系统性的长期定位观测。盆栽实验的盐分梯度通常为短期胁迫, 而田间土壤盐渍化往往呈季节性波动与长期累积的特征。未来可构建模拟田间盐分动态的试验系统, 并探索 AMF 与耐盐植物品种的协同建植模式。

### 3.3. 缓解重金属毒害

重金属对林木生长的影响具有双重性, 既能在特定条件下促进生长, 也能因过量积累而产生毒害作用[40]。目前, 重金属污染已成为全球关注的环境问题, 其对林业生产产生了严重威胁[41]。近年来, 关于 AMF 在重金属胁迫条件下缓解植物重金属毒害、促进养分获取及改善植物生理和分子机制方面的研究已取得显著进展。一方面, 接种 AMF 可促进林木总生物量积累, 并通过 AMF 对重金属的吸附作用, 降低植物对有害重金属离子的吸收, 从而改善植物的生长状况[42]。另一方面, AMF 还可通过吸附重金

属、调控转运蛋白、分泌有机酸以及增强抗氧化能力等途径,有效缓解重金属毒害[43]。镉(Cd)胁迫下,AMF 不仅能够促进构树的光合性能提升、镉吸收增加、相关基因表达上调、活性氧水平调节以及抗氧化酶活性增强[44],还能够通过调节三羧酸循环(TCA)、糖代谢、脂质代谢和氨基酸代谢等途径,增强枇杷的能量供应和抗逆能力,并改变枇杷根际有机酸(如草酸、苹果酸、柠檬酸)的分泌模式,促进铝离子螯合并降低其毒性[45]。此外,AMF 引起的滇杨生长稀释效应,可增加滇杨 Cd 胁迫条件下的净光合速率,缓解过量 Cd 引起的营养离子(例如 Ca、Mg)紊乱,减少植物叶静脉细胞和根皮质细胞出现明显的浆溶解和线粒体空泡化,进而缓解 Cd 毒性引起的细胞损伤。通过评估 Cd 添加和 AMF 接种对杨树基因的差异表达基因发现有多个基因与金属运输和抗氧化活性,细胞壁和液泡中的细胞区隔化,氨基酸和碳水化合物的金属螯合作用有关[46]。

工矿企业发展所导致的土壤污染日益严峻。由于重金属在自然环境中难以被微生物分解,导致在土壤中的累积效应愈发显著,因此,针对重金属污染土壤的生态修复技术研究,已成为全球环境治理领域的关注焦点。例如在矿区修复中,AMF 在提高沙棘生物量的同时,也显著提升了根际土壤酶的活性与土壤质量[47]。同时,AMF 在污染土壤修复中也具有重要价值。它既能在重金属污染修复中表现出良好效果,也能通过加速多氯联苯同系物消散、促进植物对多环芳烃的吸附与生物积累,实现对土壤有机化学物质污染的有效治理,从而拓宽了生态修复的应用范围[48]-[50]。

盆栽条件下人为添加的重金属形态与田间长期老化污染态的生物有效性存在显著差异;同时,田间环境存在多种污染物复合胁迫,而盆栽修复机制往往相对单一,难以有效应对田间长期“老化”状态下多金属、有机污染物并存的复合污染问题。因此,需推动研究从针对单一重金属的修复,转向 AMF 调控根际微环境、协同其他功能微生物的复合污染生态修复综合策略。

## 4. AMF 对林木抗生物胁迫的影响

### 4.1. 增强抗病能力

森林病害通过降低光合效率、损耗生物量、破坏群落结构等途径,削弱林木生长势与生态系统稳定性,同时大幅削减森林碳汇功能。目前,AMF 已被广泛应用于针对多种林木病原真菌的生物防治策略中。接种 AMF 可显著促进枸杞[51]、云杉[52]和桃树[53]的生长、扩大根系吸收面积、降低根腐病病情指数并提高根腐病防治效果。接种 5 种 AMF 能够降低香蕉[54]枯萎病,接种摩西管柄囊霉能降低桉树[55]幼苗青枯病发病率。显著降低西南桦[56]幼树溃疡病发病率和感病指数。AMF 还可通过诱导根际微生物组变化,增加假单胞菌和芽孢杆菌丰度,使其产生抗生素和铁载体从而抑制土传病害[57]。将 AMF、草酸青霉和枯草芽孢杆菌联合接种,发现花椒根腐病发病率显著下降[58]。AMF(异形根孢囊霉)通过积累脯氨酸,降低 MDA 含量,提高 SOD、CAT 和多酚氧化酶活性,增强杨树抗溃疡病能力;同时提高多聚半乳糖醛酸酶和果胶甲基酯酶活性来抑制病原菌菌丝的生长[59]。此外 AMF 与林木共生后,可调节植物体内茉莉酸、水杨酸、乙烯等激素水平,增强林木的抗病性。

林木是森林资源中最重要的组成部分,随着人工林面积的增加和纯林化程度的提高,林木的病害种类逐渐增多,其危害程度也日益加重。在林木的种植过程中做好病害防治工作是保证林木经济效益的重要前提[60]。AMF 可通过影响林木根系周围的土壤环境和微生物活性,帮助林木抵抗病原菌侵染,维持森林生态系统的健康和稳定。

盆栽实验阐明,AM 真菌既能直接抑制病原菌生长,又能通过调节宿主植物的激素信号通路、激活抗氧化系统以及重塑根际微生物组,间接诱导宿主抗性。田间研究则主要聚焦于经济林和果树中 AMF 在降低发病率、减轻病情指数方面的实际防控效果。盆栽实验中病原菌接种量、接种时间及环境条件高度

可控, 而田间病原菌的侵染压力、土壤微生物群落背景以及气候因素均存在较大时空异质性。后续研究应关注 AMF 在“土壤-微生物-植物”整体健康管理中的影响, 而非孤立使用。

## 4.2. 增强抗虫害能力

线虫是一类危害林木果树、花卉与农作物根部的专性植物寄生物。随着人工林面积的扩大, 线虫病的发生和危害逐渐加剧[61]。化学防控是减少线虫数量最常用的策略之一。然而, 合成线虫杀灭剂成本高, 并对环境、生物多样性产生严重负面影响[62]。为了尽量减少化学品的使用, 在林业生产不断实践中, AMF 作为环保的替代方案, 在生物防治中也发挥着越来越重要的作用, AMF 通过改变宿主的根分泌物, 可以减少根结线虫和寄生植物的入侵。通过将根内根孢囊霉接种到 3 个抗性水平不同的楸树无性系幼苗中发现, AMF 在促进楸树无性系幼苗的生长、增加光合色素含量、增加营养物质吸收和改善营养分配的同时, 还通过降低根结线虫的卵粒数和幼虫数, 抑制根结线虫的侵染和繁殖, 进而增强楸树对根结线虫病的抗性[61]。

综上, AMF 不仅能促进林木养分吸收、提升光合效率、改善营养状况, 还能增强林木抗旱、耐盐、抗重金属等非生物胁迫能力, 并通过激活防御系统、调控根际微生物, 提高林木对多种病虫害的抗性。但盆栽实验多为可控环境下的机制探究, 与田间复杂环境存在差异(如表 1), 往往导致菌株定殖率不高、作用机制难以充分发挥; 同时, 不同胁迫场景下土著优势菌株筛选不足、与土壤改良剂等协同接种技术不成熟及缺乏长期田间定位观测数据等, 使得 AMF 的优良特性难以有效转化为林业生产与生态修复中的实际效能, 未来需针对性突破这些难题, 推动其实际应用。

**Table 1.** Summary table of mycorrhizal fungi enhancing tree stress resistance

**表 1.** AMF 提高林木抗逆性总结表

调控类型	菌种	树种	盆栽与田间试验区别	研究结论
促进矿质营养吸收	幼套近明球囊霉、摩西球囊霉、苏格兰球囊霉、地表球囊霉、根内球囊霉	针叶树: 杉木、侧柏; 阔叶树: 核桃、桉树、柑橘、润楠、宁夏枸杞、尼泊尔桉木、茶条木、降香黄檀、香椿、喜树、任豆	盆栽试验在可控条件下研究变量因素对植物吸收机制及关键路径的影响, 而田间试验(如石漠化造林)则可长期监测 AMF 在复杂环境下的生态功能。	增加林木生物量, 改善土壤养分, 提高石漠化地区苗木存活率
抗非生物胁迫	摩西斗管囊霉、幼套近明球囊霉、根内根孢囊霉、扭形球囊霉	针叶树: 柏木; 阔叶树: 榆树、黄檀、毛红椿、刺槐、青杨、茶树、沙棘、桢楠、榉树、核桃、沙枣、月季、构树、枇杷、滇杨、杨树	盆栽初步探索植物对特定处理的生理/分子响应机制; 田间在自然或半自然进行, 真实反映植物在生态系统中的表现	提升林木抗逆存活能力, 助力退化生态系统修复
抗生物胁迫	地表球囊霉、根内球囊霉、摩西球囊霉、聚丛球囊霉、幼套球囊霉、黄球囊霉、层状近明球囊霉	针叶树: 云杉; 阔叶树: 枸杞、桃树、香蕉、桉树、西南桦、花椒、杨树、楸树	盆栽阐明抑制机制; 田间聚焦经济林/果树防控效果	降低病虫害发病率, 实现绿色生物防治, 维持森林生态稳定

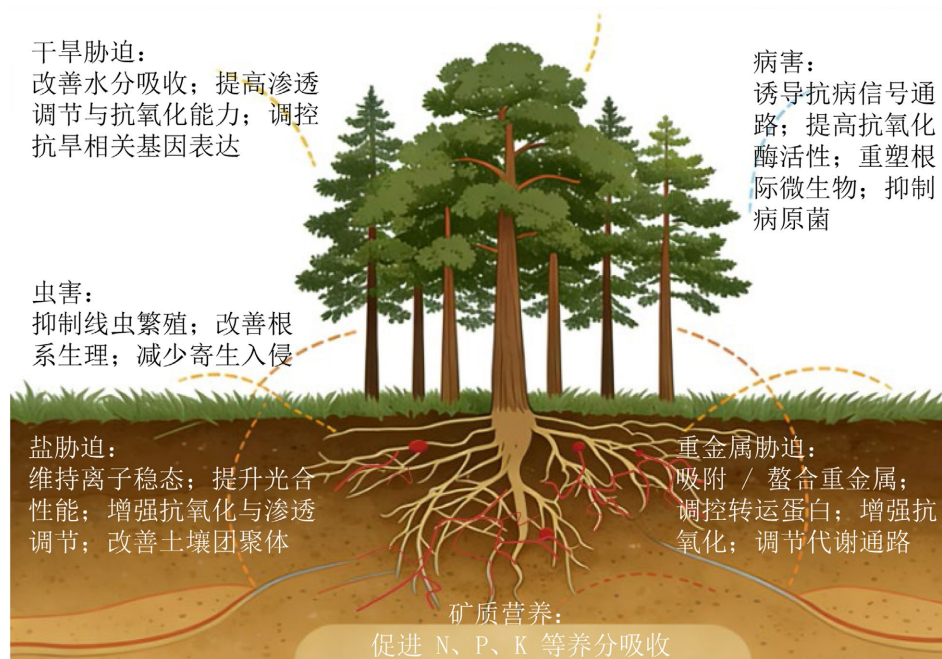
注: 表格中列出的菌种名称来自正文所引用的具体研究文献。为保持正文行文简洁, 相关研究在正文中多以“AMF”泛指。

## 5. 讨论和展望

本文综述了 AMF 在矿质养分吸收、抗旱、耐盐、抗重金属和抗虫害病等方面的影响, 并探讨了相关

调控机制(如图 1)。明确 AMF 作为一种环境友好、长效可持续的微生物菌剂, 在林业领域的非生物胁迫、生物胁迫和生态系统稳定维护等方面具有重要应用价值。目前, 传统生态修复主要依靠人工植树造林与植被恢复, 虽能重建地上植被群落, 但往往面临土壤碳库恢复缓慢、生态系统功能较为单一等局限。而 AMF 通过与植物根系形成共生体, 系统性地提升修复效果。不仅能有效改善退化土壤的结构与养分状况, 促进植物地上与地下部分的生长, 还能增强植物在干旱、盐胁迫及病虫害等逆境条件下的抵抗能力。

不同树种与 AMF 的共生关系存在显著差异。针叶树通常生长在较贫瘠的土壤环境中, 其根系与 AMF 的共生更侧重于磷、氮等矿质养分的吸收, 以弥补土壤养分不足; 在抗旱、耐盐方面, AMF 通过增强针叶树根系的渗透调节能力和细胞稳定性, 帮助针叶树在干旱或盐碱环境中维持水分平衡和生理功能[21][32]; 针叶树的树冠结构相对简单, AMF 的菌丝网络在针叶树根系周围形成较为集中的养分输送通道, 对针叶树的生长和抗逆性提升作用较为直接。而阔叶树通常生长在土壤养分相对丰富的环境中, 除了帮助吸收矿质养分外, 更注重调节植物与土壤微生物之间的相互作用, 促进土壤有机质的分解和循环[40]; 在抗虫害病方面, AMF 通过激活阔叶树的免疫系统, 增强其对病虫害的抵抗能力, 同时通过菌丝网络抑制土壤中病原菌的生长, 为阔叶树提供更健康的生长环境[59][61]; 阔叶树的树冠结构复杂, AMF 的菌丝网络在阔叶树根系周围形成更广泛的分布, 能够覆盖更大的土壤面积, 对阔叶树的养分吸收和生态功能提升作用更为全面。这种差异反映了不同树种特性对 AMF 共生功能的调节作用, 也提示在森林生态修复或人工造林中, 需根据树种特性选择适配的 AMF 菌种, 以优化生态效益。



**Figure 1.** Schematic diagram of arbuscular mycorrhizal fungi enhancing tree stress resistance  
**图 1.** AMF 提高林木抗逆性示意图

尽管 AMF 应用潜力巨大, 但在林业推广中仍面临一系列关键技术挑战: 首先, AMF 人工纯培养技术虽有所突破, 但仍难以实现高效人工纯培养及规模化生产, 导致 AM 菌剂的市场供给与应用推广受到严重限制; 其次, AMF 种类繁多, 与林木的共生受林木种类、营养需求、环境条件等多重因素影响, 需有针对性地筛选适宜菌株; 此外, 林木、AMF 与土壤微生物间存在复杂互作网络, 探究菌根调控机制需重视其与土壤微生物组的交互作用。未来研究应重点关注逆境胁迫下 AMF 与林木的共生机制, 深入解析

AMF 对林木生长、养分吸收及抗逆性的调控路径, 明确其与土壤微生物的互作规律, 同时突破 AMF 人工纯培养技术瓶颈, 推动其在精准林业与生态系统稳定中的应用, 为林业可持续发展提供科学支撑。具体而言, 建议从以下三个方向开展系统性研究:

方向一: 利用同位素标记和网络分析技术, 量化 AMF 菌根网络在林分尺度养分再分配和胁迫信号传递中的作用: 通过稳定同位素标记技术追踪 AMF 菌根网络中的养分流动路径, 结合网络分析模型, 揭示 AMF 在林分尺度上如何协调不同植物个体间的养分再分配, 以及其在干旱、盐碱等胁迫条件下信号传递的时空动态, 为理解 AMF 在森林生态系统功能中的作用提供量化依据。

方向二: 开发针对不同林木类型(如针叶/阔叶)和立地条件(如酸性红壤/钙质土壤)的“处方型”复合 AMF 菌剂: 基于不同林木物种的生理特性及立地土壤的理化性质, 筛选适配的 AMF 菌株组合, 结合土壤改良剂、植物生长调节剂等, 研发具有针对性功能的复合菌剂。通过田间试验验证其在不同林木类型和立地条件下的促生、抗逆效果, 实现 AMF 菌剂的精准化应用。

方向三: 构建 AMF 菌剂规模化生产与林业应用的技术体系针对 AMF 人工纯培养及规模化生产的瓶颈, 优化菌剂制备、储存及运输技术。同时, 建立 AMF 菌剂在林业生态修复、林木培育等场景下的应用技术规范, 推动 AMF 菌剂在林业领域的应用。

## 基金项目

本项目受国家自然科学基金(32370108); “广东特支计划”青年拔尖人才项目(2024TQ08A220); 养分资源高效利用全国重点实验室开放基金(KF2024-4)资助。

## 参考文献

- [1] 李祖飞, 童俊彪, 郭文成, 等. 菌根在林业生产中的应用[J]. 现代化农业, 2025(8): 24-26.
- [2] 薛松. 菌根学及其在林业上的应用研究进展[J]. 贵州林业科技, 2017, 45(1): 51-55.
- [3] Shi, J., Wang, X. and Wang, E. (2023) Mycorrhizal Symbiosis in Plant Growth and Stress Adaptation: From Genes to Ecosystems. *Annual Review of Plant Biology*, **74**, 569-607. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-061722-090342>
- [4] Samanta, I., Ghosh, K., Saikia, R., Savita, Maity, P.J. and Chowdhary, G. (2025) Arbuscular Mycorrhizal Fungi—A Natural Tool to Impart Abiotic Stress Tolerance in Plants. *Plant Signaling & Behavior*, **20**, 1-18. <https://doi.org/10.1080/15592324.2025.2525843>
- [5] 李英鹏. 逆境丛枝菌根生理生态学研究[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
- [6] 曹明昇, 张菲, 黄光明, 等. 丛枝菌根真菌对低磷胁迫下核桃幼苗根系磷吸收的影响及机制[J]. 林业科学, 2023, 59(12): 117-124.
- [7] 韦伟, 唐明, 陈辉, 等. 丛枝菌根真菌诱导巨桉磷饥饿响应基因的挖掘[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2025, 49(6): 261-269.
- [8] 李京晨, 王曙光, 郭佩佩, 等. 不同持水量和氮肥形态对丛枝菌根真菌调节柑橘幼苗生长和氮积累的影响[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2024, 42(2): 130-137.
- [9] 郑明轩, 林伟通, 吴永彬. 接种 4 种丛枝菌根对中华润楠苗木生长及营养状况的影响[J]. 南方林业科学, 2019, 47(5): 49-53.
- [10] 宁晨, 向雪莲, 张宇蒙, 等. 杉木-丛枝菌根共生机制对不同形态磷的解吸效率[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(10): 111-118.
- [11] 韦满, 金小霞, 程康, 等. 侧柏与 2 种丛枝菌根真菌的共生研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(4): 114-121.
- [12] 彭思利, 张鑫, 武仁杰, 等. 杨树人工林土壤丛枝菌根真菌群落对氮添加的季节性动态响应[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(4): 792-800.
- [13] 韦素贞, 张好强, 胡文涛, 等. AM 真菌和施钾对宁夏枸杞响应干旱胁迫的交互影响[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(5): 165-170.
- [14] 王邵军, 左倩倩, 曹乾斌, 等. 云南寻甸石漠化土壤易氧化碳对丛枝菌根真菌共生的响应[J]. 南京林业大学学报

- (自然科学版), 2022, 46(1): 7-14.
- [15] 祝嘉新, 雷梅, 黄智军, 等. 不同种类丛枝菌根真菌接种对杉木幼苗氮磷养分吸收和流失的影响[J]. 生态学报, 2025, 45(17): 8474-8484.
- [16] 毕银丽, 张可, 肖礼, 等. 矿区复垦地接菌驱动植物-土壤系统中光合碳分配与稳定机制[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 572-583.
- [17] 赵飞, 唐明, 张好强. 丛枝菌根真菌对宁夏枸杞生长和氮代谢的影响[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 166-171.
- [18] 陈书羽, 杨淑雅, 伊力塔, 等. 模拟氮沉降和接种丛枝菌根真菌对杉木幼苗生长和光合作用的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2025, 54(1): 47-58.
- [19] 张中峰, 张金池, 周龙武, 等. 丛枝菌根真菌对石漠化地区造林苗木生长的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 2927-2934.
- [20] Wang, Q., Liu, M., Wang, Z., Li, J., Liu, K. and Huang, D. (2024) The Role of Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in Plant Abiotic Stress. *Frontiers in Microbiology*, **14**, Article ID: 1323881. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1323881>
- [21] 刘学松, 邵慰忠, 邓创, 等. 丛枝菌根真菌增强柏木幼苗抗干旱性研究[J]. 江苏林业科技, 2024, 51(6): 1-6.
- [22] 张月欣. 丛枝菌根真菌对榆树幼苗生长及抗旱性的影响[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [23] 邓创, 王志高, 朱锦茹, 等. 丛枝菌根接种对黄檀的抗旱性影响[J]. 分子植物育种, 2024, 22(15): 5107-5114.
- [24] 杜宣瑾, 朱源, 张露, 等. 接种丛枝菌根真菌对毛红椿幼苗生长及抗旱性的影响[J]. 森林与环境学报, 2024, 44(1): 71-78.
- [25] He, F., Zhang, H. and Tang, M. (2016) Aquaporin Gene Expression and Physiological Responses of Robinia Pseudoacacia L. to the Mycorrhizal Fungus Rhizophagus Irregularis and Drought Stress. *Mycorrhiza*, **26**, 311-323. <https://doi.org/10.1007/s00572-015-0670-3>
- [26] Han, Y., Zhang, W., Xu, T. and Tang, M. (2022) Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Phosphorus on Drought-Induced Oxidative Stress and 14-3-3 Proteins Gene Expression of Populus Cathayana. *Frontiers in Microbiology*, **13**, Article ID: 934964. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.934964>
- [27] 陈鑫, 邬晓龙, 刘升锐, 等. 干旱胁迫下 AMF 对茶树光合特性及其基因表达的影响[J]. 园艺学报, 2024, 51(10): 2358-2370.
- [28] 毕银丽, 李璞宁, 郭芸. 半干旱区丛枝菌根真菌复垦地生物结皮胞外酶活性及化学计量特征[J]. 煤炭学报, 2024, 49(8): 3593-3604.
- [29] 毕银丽. 西部干旱半干旱煤矿区微生物修复机理与应用研究[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(1): 2.
- [30] 王晓, 毕银丽, 王义, 等. 沙棘林密度和丛枝菌根真菌接种对林下植物和土壤性状的影响[J]. 林业科学, 2023, 59(10): 138-149.
- [31] Dastogeer, K.M.G., Zahan, M.I., Tahjib-Ul-Arif, M., Akter, M.A. and Okazaki, S. (2020) Plant Salinity Tolerance Conferred by Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Associated Mechanisms: A Meta-Analysis. *Frontiers in Plant Science*, **11**, Article ID: 588550. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.588550>
- [32] 汪贵斌, 曹福亮. 盐胁迫对落羽杉生理及生长的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2003, 27(3): 11-14.
- [33] 王介华, 睢金凯, 崔令军, 等. AMF 对盐胁迫下桉楠生长和生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(6): 51-58.
- [34] 曾婧祎, 朱凌骏, 马仕林, 等. 盐胁迫和接种丛枝菌根真菌对榉树根系的影响[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(9): 11-17.
- [35] 马仕林, 曹鹏翔, 张金池, 等. 盐胁迫下 AMF 对榉树幼苗生长和光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(1): 122-130.
- [36] 李敖, 郑旭, 吴承勛, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下核桃幼苗生长及生理的影响[J]. 园艺学报, 2025, 52(2): 423-438.
- [37] 周英, 谢科, 蔡汉, 等. 盐胁迫下外源褪黑素和丛枝菌根真菌对月季幼苗生长生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(3): 370-380.
- [38] 徐娜, 宋福强, 范晓旭, 等. 盐胁迫对菌根化沙枣幼苗生长性状的影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(6): 29-33.
- [39] 陈晓楠, 伊力努尔·艾力, 高文礼, 等. 盐胁迫下接种丛枝菌根真菌对两种典型荒漠河岸林植物幼苗生长和叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(5): 1333-1340.
- [40] 姜朦, 杨洪一. 丛枝菌根真菌对植物抗非生物胁迫研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2020(9): 117-121.
- [41] Riaz, M., Kamran, M., Fang, Y., Wang, Q., Cao, H., Yang, G., *et al.* (2021) Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Induced

- Mitigation of Heavy Metal Phytotoxicity in Metal Contaminated Soils: A Critical Review. *Journal of Hazardous Materials*, **402**, Article 123919. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123919>
- [42] 李雯婧, 刘煜杰, 张义飞, 等. 微生物技术在农林草业生态保护与生态修复中的应用——以菌根真菌技术为例[J]. 环境工程技术学报, 2024, 14(6): 1905-1915.
- [43] 苗志加, 孟祥源, 李书缘, 等. 丛枝菌根真菌修复重金属污染土壤及增强植物耐性研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 252-262.
- [44] Liang, J., Wang, Z., Ren, Y., Jiang, Z., Chen, H., Hu, W., *et al.* (2023) The Alleviation Mechanisms of Cadmium Toxicity in *Broussonetia Papyrifera* by Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Varied with Different Levels of Cadmium Stress. *Journal of Hazardous Materials*, **459**, Article 132076. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132076>
- [45] Zhang, Y., Wu, J., Liang, Z., Chen, H., Xu, T. and Tang, M. (2025) Different Arbuscular Mycorrhizal Fungi Alleviate Aluminum-Induced Metabolic Disruption and Promote Loquat Growth. *Industrial Crops and Products*, **236**, Article 121927. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121927>
- [46] Liu, D., Zheng, K., Wang, Y., Zhang, Y., Lao, R., Qin, Z., *et al.* (2022) Harnessing an Arbuscular Mycorrhizal Fungus to Improve the Adaptability of a Facultative Metallophytic Poplar (*Populus Yunnanensis*) to Cadmium Stress: Physiological and Molecular Responses. *Journal of Hazardous Materials*, **424**, Article 127430. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127430>
- [47] 苗春光, 杨惠惠, 毕银丽, 等. 丛枝菌根真菌与沙棘对露天矿排土场的联合改良效应[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 202-206.
- [48] 石峰, 宋福强. 丛枝菌根修复煤矿废弃地的机制与应用潜力[J]. 黑龙江大学学报, 2021, 12(3): 239-246.
- [49] 秦华, 白建峰, 徐秋芳, 等. 丛枝菌根真菌菌丝对土壤微生物群落结构及多氯联苯降解的影响[J]. 土壤, 2015, 47(4): 704-710.
- [50] 周笑白. 植物-丛枝菌根真菌修复多环芳烃污染土壤[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [51] 王佳玮, 吕燕, 刘建利, 等. 宁夏枸杞根腐病不同发病时期根区土壤 AMF 群落变化规律[J]. 中国果树, 2023(9): 72-78.
- [52] 周昱. 不同丛枝菌根真菌对云杉生长及根腐病的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(14): 102-105.
- [53] 宋福强, 王焱, 田兴军, 等. 丛枝菌根(AM)与桃树根癌病关系初探[J]. 植物病理学报, 2005(S1): 192-195.
- [54] 江靓, 张金莲, 康贻豪, 等. 5 种丛枝菌根真菌对香蕉组培苗生长及枯萎病的影响[J]. 热带作物学报, 2025, 46(6): 1480-1490.
- [55] 黄迪, 陈园, 钟冻龙, 等. 桉树生长和防御相关酶对摩西管柄囊霉和青枯菌的响应[J]. 林业科学, 2023, 59(11): 68-75.
- [56] 李丽, 伍建榕, 马焕成, 等. 丛枝菌根真菌(AMF)对西南桦溃疡(干腐)病的抗性调查研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2015, 30(3): 369-375.
- [57] Lahlali, R., Ezrari, S., Radouane, N., Kenfaoui, J., Esmael, Q., El Hamss, H., *et al.* (2022) Biological Control of Plant Pathogens: A Global Perspective. *Microorganisms*, **10**, Article 596. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030596>
- [58] 李梦玮, 陈晓霞, 廖礼彬, 等. 丛枝菌根真菌联合拮抗菌对花椒根腐病的防治作用[J]. 西南农业学报, 2023, 36(11): 2391-2400.
- [59] 张钰, 唐明. 丛枝菌根真菌对青杨抗溃疡病生物量和抗病酶活性的影响[J]. 菌物学报, 2021, 40(5): 1110-1122.
- [60] 刘彩霞, 焦如珍, 赵京京. 林木病原菌广谱拮抗菌株的筛选及功能研究[J]. 生物技术进展, 2018, 8(1): 63-70.
- [61] 牟雪丽. 丛枝菌根真菌对楸树抗根结线虫病的影响[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [62] Caccia, M., Grilli, G., Janoušková, M. and Marro, N. (2025) From Nutrition to Protection: The Role of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Interactions of Plants with Endoparasitic Nematodes—A Meta-Analysis. *Plant and Soil*, **514**, 1405-1419. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07474-8>