

# 丛枝菌根菌在植物多样性保育领域的研究进展

刘 星<sup>1,2</sup>, 李国旗<sup>1,2\*</sup>, 谢博勋<sup>1,2</sup>, 解 盛<sup>1,2</sup>, 王雅芳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川

<sup>2</sup>宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川

Email: guoqilee@163.com

收稿日期: 2020年8月6日; 录用日期: 2020年8月28日; 发布日期: 2020年9月4日

## 摘 要

丛枝菌根真菌可以和大部分陆地植物根系形成互利共生体, 对植物的生长发育起着多种促进作用。大量研究表明, 丛枝菌根能够促进植物氮、磷吸收, 提高植物抗逆性, 如抗旱性、抗盐碱性、以及抗重金属的能力。丛枝菌根真菌的侵染可以改善植物根际微生态, 从而提高生物量。丛枝菌根因其具有独特的生理功能, 在植物多样性保育领域具有重要的价值。本文综述了丛枝菌根生理功能以及在抗逆性、植物多样性方面的应用, 并讨论了丛枝菌根与植物多样性保育的关系, 并对植物多样性保育领域中菌根研究进行了展望。

## 关键词

丛枝菌根真菌, 植物多样性保育, 作用

# Advances in the Field of Plant Diversity Conservation by *Arbuscular mycorrhiza* Fungi

Xing Liu<sup>1,2</sup>, Guoqi Li<sup>1,2\*</sup>, Boxun Xie<sup>1,2</sup>, Sheng Xie<sup>1,2</sup>, Yafang Wang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Recovery and Restoration of Degraded Ecosystem in North-Western China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

<sup>2</sup>Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

Email: guoqilee@163.com

Received: Aug. 6<sup>th</sup>, 2020; accepted: Aug. 28<sup>th</sup>, 2020; published: Sep. 4<sup>th</sup>, 2020

\*通讯作者。

文章引用: 刘星, 李国旗, 谢博勋, 解盛, 王雅芳. 丛枝菌根菌在植物多样性保育领域的研究进展[J]. 植物学研究, 2020, 9(5): 431-438. DOI: 10.12677/br.2020.95055

## Abstract

***Arbuscular mycorrhizal* fungi (AMF) can form mutualism with most terrestrial plant roots, and play a variety of promoting effects on plant growth and development. A large number of studies have shown that *Arbuscular mycorrhiza* can promote plant nitrogen and phosphorus uptake and improve plant stress resistance, such as drought resistance, saline-alkali resistance and heavy metal resistance. The infection of *Arbuscular mycorrhizal* fungi can improve the plant rhizosphere microecology, thus increasing the biomass. *Arbuscular mycorrhiza* has important value in the field of plant diversity conservation because of its unique physiological function. In this paper, the physiological function of *Arbuscular mycorrhiza* and its application in stress resistance and plant diversity were reviewed; the relationship between *Arbuscular mycorrhiza* and plant diversity conservation was discussed; and the mycorrhizal research in the field of plant diversity conservation was prospected.**

## Keywords

***Arbuscular mycorrhiza* Fungi, Plant Diversity Conservation, Function**

Copyright © 2020 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

由于不断变化的全球气候和人类社会活动增加,造成了生物多样性的日益丧失,使全球生态系统发生了诸多改变,如养分循环失衡、生态系统生产力下降等。而植物多样性是生物多样性的重要组成部分,同时植物是整个生态系统的主要生产者,对于维持生态平衡有着重要意义。目前有大量研究揭示了生物多样性与生态系统功能的关系,发现植物多样性越高,群落生产力越高、生态系统越稳定[1]。关于植物多样性保育一直是研究的热点,而土壤中微生物、菌根等在植被恢复重建中起到了重要作用,有关研究也受到国内外学者重视[2] [3]。

丛枝菌根(*Arbuscular mycorrhiza*),作为内生菌根它分布广泛,能够与超80%陆生高等植物根系形成菌根共生体系(Mycorrhizal symbiosis) [4],该体系提高了植物在抗旱、耐盐碱等方面的能力,对植物的健康生长发育有着重要意义。常用丛枝菌根真菌类型有:摩西斗管囊霉(*Funneliformis mosseae*)、幼套近环球囊霉(*Claroideoglomus etunicatu*)、根内根孢囊霉(*Rhizophagus intraradices*)、聚丛根孢囊霉(*Rhizophagus aggregatus*)等。同时丛枝菌根真菌是地上植物与地下土壤联系的重要媒介,其自身群落结构的变化影响着地上植被的组成和地下土壤理化性质、宿主植物养分动态循环,进而对生态系统生产力结构都产生影响。在菌根共生系统中,植物通过根系为丛枝菌根真菌(*Arbuscular mycorrhiza* fungi, AMF)生长提供它所需的营养成分的同时,AMF根外菌丝帮助植物吸收了土壤中的矿质养分,尤其是土壤中植物根系较难以吸收的养分[5] [6]。正是由于AMF的功能多面和适应性较强的特性,以及在植物适应各类逆境胁迫中的积极作用及重要生态功能,而受到日益广泛的关注。

## 2. 逆境胁迫下丛枝菌根对植物的作用

丛枝菌根之所以可以与植物保育相联系,是因为它可以利用菌丝网将群落各种植物根系相互连接,

使植物更加高效优质的利用资源，同时它自身通过影响植物的各种理化性质提高了植物的抗胁迫能力，使植物能够更好的适应逆境胁迫，以便实施植物保育工作。

### 2.1. 改善宿主的水分代谢，提高植物抗旱能力

宿主植物利用 AM 真菌菌丝对土壤养分的吸收能力，提高体内矿质营养成分含量、调节植株内源激素水平，影响了寄主植株的水分代谢，从而植物抗干旱能力提高[7] [8] [9]。宋会兴等[10]发现，接种 AMF 显著的促进了宿主的生长，植株的光合利用率得以提高，进而宿主植物的耐旱性增强。由此说明了接种 AMF 后扩大了植物根系营养吸收范围，增强了植物的吸水能力，叶片的水势降低，植株中糖类物质的积累量增加，提高了宿主植物的抗旱性[11]。刘润进[12]贺忠群等[13]研究显示，干旱条件下对菌丝发育和菌根侵染率影响较弱，AMF 通过提高宿主植物体内激素水平来减少脱落酸的含量，这种共生系统的存在对于干旱地区植物抗旱具有十分重要的意义。

### 2.2. 提高植物低温胁迫抗性

低温是限制植物生长发育的重要环境因素，研究表明在植物生长过程中低温胁迫降低了植物的光合速率以及根系吸水能力，质膜通透性增大、有毒物质产生等一系列影响[14] [15]，而 AMF 共生系统是一种应对低温胁迫十分有效的策略。AMF 提高植物低温胁迫抗性的机制可能包括：提高根系导水率，增强吸水性；增加可溶性糖和脯氨酸的含量来调节渗透平衡；诱导抗氧化酶系统的功能，通过降低膜脂过氧化减少膜损伤；减缓植物体内叶绿素分解，促进光合作用。通过这些机制，以及 AMF 与植物共生体的生理生化变化和相关分子机制的调节，以达到抗低温胁迫的目的。

### 2.3. 调节根系组织渗透平衡，提高植物耐盐能力

盐胁迫对植物组织的影响包括降低植物细胞内含水量，破坏其渗透平衡，由此减缓植物生长。在重度盐胁迫环境下也有着 AMF 的存在，因此可以说明 AMF 在盐胁迫环境中同样具有适应性。研究显示 AMF 的接种提高了盐胁迫环境中植物的生物量[16] [17] [18]，如王英男，陶爽等[19]研究结果表明，接种 AMF 一定程度上可以提高盐胁迫下羊草幼苗的生物量及光合色素含量。本质上是接种 AMF 后，提高了植物在盐胁迫环境下的营养吸收，并通过调控植物体内基因表达减少钠的吸收和向地上部分的转运，从而促进了植物体内的离子平衡[20] [21]。AMF 侵染植物后，对植物体内糖和氨基酸含量组成产生影响，调节了植物根系组织的渗透平衡，以及通过提高叶绿素浓度[22]、改善水分状况[23]、调节植物激素信号[24] [25] [26]等手段来增强植物在盐胁迫土壤中生长的能力。

## 3. 丛枝菌根对植物群落的影响

在自然生态系统中可以利用丛枝菌根真菌与宿主之间的特异性不强这一特性，通过丛枝菌根植物的菌丝生长繁殖扩大丛枝菌根与植物的共生体系，生态系统中一些亲缘关系较远的植物被众多 AMF 菌丝联系起来，通过菌丝系统进行宿主植物根系间物质信息的交流，即丛枝菌根网络(Mycorrhizal network)结构[27] [28]。Bergelson 等[29]研究同时也说明了丛枝菌根网络结构的形成实现了不同种间植物共享营养物质，并调节植物间竞争平衡促进群落中植物与优势种共存，这种结构具有十分重要的生态学意义，如矿质养分和水分传递、含碳有机物转移、加速养分循环、利于幼苗生长发育等，从而增加了生态系统中的植物多样性。

### 3.1. 调节植物种间关系，增加植物多样性

AMF 抑制了群落中优势种的生长，降低优势种对资源的占有比例，使得植物群落内物种地上部生物量重新分配，在一定程度上维持植物群落的稳定[30]，有利于植物保育过程中关键种的保护[31] [32] [33]

[34]。并且 AMF 可以提高菌根依赖性较强植物的群落竞争力, 例如 Fitter [35] 等通过 AMF 侵染处理黑麦草(*Lolium perenne*)和绒毛草(*Holcus lanatus*)与未侵染前对比的结果显示, 绒毛草营养元素的吸收能力、根冠比及其根长均受到抑制, 而另一方面黑麦草的竞争能力明显增加, 丛枝菌根通过对植物竞争强度与关系模式的影响间接改变着植物群落的组成, 进而影响了群落内植物间的竞争格局。

相反, 当 AMF 的形成受到抑制时, 通过减弱菌根依赖型植物对营养元素和水分的获取能力, 从而降低了它们在群落中的竞争力, 间接提高了非菌根依赖型植物的竞争力, 改变了群落中的物种结构[36] [37]。多数情况下, 未被 AMF 侵染的植物其竞争力远低于与 AMF 共生的植物[38]。但随着时间增加, 丛枝菌根真菌对宿主植物的这种促进效应会逐步下降, 这种变化有利于生态系统中植物物种多样性的保持[39]。

### 3.2. 影响群落结构, 提高群落生产力

群落结构随着植物多样性的变化而变化。AMF 利用菌丝网络来调节植物获得的资源, 影响植物间的竞争结构, 降低优势物种的优势度, 从而使群落形成更加稳定的结构, 有利于生态系统的可持续发展。丛枝菌根的存在可以通过进一步增加宿主根系中营养元素含量、提高其抗逆性等方式对植物群落结构土壤环境进行改善从而提高了群落生产力[40]。Van Der Heijden 等人[34]发现不同组合的 AMF 和丰度变化对植物群落组成有着直接影响, 当系统中 AMF 种类增加到 8~14 种时, 系统中多样性和生产力最高; 而当生态系统中只有极少数 AMF 存在时, 系统中的多样性和生产力最低。同时有研究显示[36], 群落中抑制 AMF 形成后的植被存活率以及群落中地上生物量明显降低。因此可以说明, 丛枝菌根作为影响生态系统群落稳定性和物种多样性的重要因素, 与植物之间相辅相成相互驱动, 通过人为有效干预丛枝菌根丰富度, 可进一步实现生态系统良性循环。

## 4. 丛枝菌根与植物多样性保育的关系

综上所述, AMF 能够适应各种逆境且功能多样, 即广谱适应性和功能多面性。生物多样性保育是以生态学为核心, “核心研究内容是生物多样性的起源、维持与丧失过程以及生物多样性变化的机制与规律, 目标是实现生物多样性的保育和可持续利用” [41]。而从丛枝菌根对植物多样性保育最主要的影响在于提高植物的生物量, 通过调节地下资源的方式, 对植物间的竞争模式产生影响, 提高了植物物种多样性和生态系统多样性。

### 4.1. 提高植物生物量

植物接种 AMF 后菌丝的形成提升了植物根系吸水范围和水量, 调节了植物内渗透平衡, 避免细胞内水分丧失[42], 在干旱条件下菌根植物仍然保持着较好的成活率。马放[43]等通过研究丛枝菌根对小麦生长的影响发现, 接种摩西球囊霉(GM, *Glomus mosseae*)菌剂后, 株高以及小麦地上生物量都得以明显提高。吴强盛[44]等研究表明, AMF 的侵染增加白三叶植株总干物质量, 明显改善了根系构型参数。

### 4.2. 调节植物间竞争模式, 维持植物群落稳定

在植物多样性保育领域应用时丛枝菌根通过调节植物间竞争模式, 抑制高竞争力物种保持群落稳定, 同时通过二者共生网络体实现资源再分配进一步影响了群落结构, 达到提高植物多样性的目的。Walder [45]研究表明当亚麻(*Linum usitatissimum*) 和高粱(*Sorghum bicolor*)间作时, 群落里营养分配存在着强烈的不对称性: 亚麻只投入很少的碳, 却获得了菌根网络提供的高达 94% 的氮和磷, 这极大地促进了生长; 而相邻的高粱投入了大量的碳, 回报很小但几乎不影响生长, 验证了 AM 真菌可以通过调配植物营养元素的方式影响植物间的竞争方式, 维持群落的稳定。

### 4.3. 调节土壤结构, 改善幼苗建植环境

AMF 的定植利于形成和维持稳定的土壤结构, 土壤颗粒可通过菌丝及其 AMF 分泌的结合而形成聚集体[46], 促进土壤矿质元素的转化, 提高土壤微生物的活性[47], 并且通过外界因素与根围细菌共同作用进一步提高了植物对养分的吸收, 提高了植物生物量、修复土壤、抑制病原微生物对植物的损害。同时, AMF 存在有利于群落中幼苗的建植, 在植物群落定植过程中, 光照和土壤养分对植物群落定植是否成功起着决定性作用。土壤中 AMF 菌丝网络对植物根部的侵染为植物幼苗的生长提供了丰富的菌剂, 使其快速定植于菌丝网中, 同时菌丝网输送给幼苗水分以及成年植株固定的光合产物, 为幼苗生长提供了良好的环境。Zhen [48]等研究发现, 土壤中氮元素含量的高低可以影响幼苗定植, 在低养分水平下, AMF 的存在促进了冷蒿幼苗的建植, 高养分水平反而不利于被 AMF 侵染后幼苗的生长。大量研究表明, 植物会依据环境中养分的供应水平高低调节 AMF 对自身的侵染, 土壤养分含量高时, 侵染率低; 反之, 侵染率相对较高。

### 4.4. 提高本地种抵御外来入侵植物的能力

外来入侵植物的出现是导致生物多样性下降的重要因素, AMF 通过影响植物根系觅养行为, 调节群落中竞争格局, 从而提高本地植物对入侵植物的抵抗力。程俊康[49]等研究发现 AMF 可以抵御白花鬼针草(*Bidens pilosa*)对金盏银盘(*Bidens biternata*)的入侵, 通过设置不同植物密度比例接种处理发现, 未接种前白花鬼针草对金盏银盘有较强生长抑制性, 且抑制作用随密度增大而增强。接种 AMF 后, 本地植物金盏银盘并未受到入侵植物白花鬼针草的抑制, 且随着金盏银盘密度的增加竞争力逐渐增强。因此, 丛枝菌根的存在提高了本地种的竞争力。Barto [50]等人通过模拟野外试验, 发现 AMF 与本地种凤仙花共生早期形成稳定关系后便不会受到入侵植物葱芥的影响。由此说明, 若 AMF 可以与本地植物在早期形成共生结构, 则可以有效抵御外来入侵植物。

### 4.5. 提高植物的耐病性和抗病性

AM 真菌可以提高植物对各种致病菌类的抵抗能力, 调节植物营养组分, 与病原体竞争光合产物和侵染位点等[51]。高萍[52]研究表明, AM 真菌一定程度上可以调控病害相关酶活性, 促进植物养分吸收等, 提高了植株的抗病性, 具有一定的生物防治价值。秦海滨[53]等发现苗期接种菌根真菌后, 通过菌根真菌与病原菌间二者相互竞争抑制了病原菌对宿主的侵害, 减轻了植物细胞膜的损害程度, 显著提高了黄瓜抵抗立枯病的能力。王艳玲等[54]研究结果表明, 接种丛枝菌根后一方面直接促进植物生长弥补了线虫带来的损失, 另一方面丛枝菌根通过与线虫竞争入侵位点等方式明显降低了线虫侵染率。

## 5. 丛枝菌根在植物多样性保育领域的研究展望

AMF 作为陆地生态系统中的重要组成部分, 不管是对植物本身还是生态系统都有着积极作用, 而目前 AMF 技术大多应用于矿区修复、农田增产、退化生态系统恢复等领域, 在植物多样性保育应用方面的报道较少。植物多样性保护应用时, 应注意 AMF 的选择土著 AMF 更易发挥良好作用且应考虑现存 AMF 与植物匹配度。在接种时也应考虑当地生态系统中土壤、气候等环境要素对 AMF 侵染力的影响。因此, 不能盲目批量接种, 应筛选出适合当地生态环境的菌种, 更好地让其发挥积极作用。今后研究应从以下几个方面展开: (1) 选择对菌根依赖性较强的物种, 来进行应用推广; (2) 因 AMF 不能进行离体繁殖, 所以应改进 AMF 的培养技术深入研究其机理, 使菌种能够更好地大规模应用; (3) 在野外植被恢复应用时, 应关注如何有效把控群落结构变化以及演替进程。大量试验表明 AMF 能够在植被恢复应用中发挥十分重要的作用, 为 AMF 在野外生态系统的使用提供了可行性, 后续应进一步观测 AMF 野外环境中的应用效果, 使 AMF 能够在植物多样性保育领域应用中发挥更大的作用。

## 基金项目

国家重点研发项目(2017YFC0504406)。

## 参考文献

- [1] 张全国, 张大勇. 生物多样性与生态系统功能: 新的进展与动向[J]. 生物多样性, 2003, 11(5): 351-363.
- [2] 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.
- [3] 钟文辉, 蔡祖聪. 土壤管理措施及环境因素对土壤微生物多样性影响研究进展[J]. 生物多样性, 2004, 12(4): 456-465.
- [4] Davison, J., Moora, M., Öpik, M., *et al.* (2015) Global Assessment of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Diversity Reveals Very Low Endemism. *Science*, **349**, 970-973. <https://doi.org/10.1126/science.aab1161>
- [5] Lehmann, A. and Rillig, M.C. (2015) Arbuscular Mycorrhizal Contribution to Copper, Manganese and Iron Nutrient concentrations in Crops—A Meta-Analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, **81**, 147-158. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.013>
- [6] Lehmann, A., Stavros, D.V., Eva, F., Rillig, M.C. (2014) Arbuscular Mycorrhizal Influence on Zinc Nutrition in Crop Plants—A Meta-Analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, **69**, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.11.001>
- [7] 夏建国, 李静. 利用丛枝菌根真菌(AMF)提高植物抗旱性的研究进展[J]. 中国农学通报, 2005, 21(2): 326-329.
- [8] Gehrin, C.A., Swaty, R.L. and Deckert, R.J. (2017) Mycorrhizas, Drought, and Host-Plant Mortality. In: Johnson, N. C., Gehring, C. and Jansa, J., Eds., *Mycorrhizal Mediation of Soil*, Elsevier, Amsterdam, 279-298. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804312-7.00016-4>
- [9] Morte, A., Lovisolo, C. and Schubert, A. (2000) Effect of Drought Stress on Growth and Water relations of the Mycorrhizal Association *Helianthemum almeriense-Terfezia claveryi*. *Mycorrhiza*, **10**, 115-119. <https://doi.org/10.1007/s005720000066>
- [10] 宋会兴, 钟章成, 杨万勤, 等. 摩西球囊霉对三叶鬼针草保护酶活性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2471-2477.
- [11] Davies, F.T., Potter, J.R. and Linderman, R.G. (1992) Mycorrhiza and Repeated Drought Exposure Affect Drought Resistance and Extraradical Hyphae Development of Pepper Plants Independent of Plant Size and Nutrient Content. *Journal of Plant Physiology*, **139**, 289-294. [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(11\)80339-1](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)80339-1)
- [12] 刘润进, 李敏, 孟祥霞, 等. 丛枝菌根真菌对玉米和棉花内源激素的影响[J]. 菌物系统, 2000, 19(1): 96.
- [13] 贺忠群, 贺超兴, 张志斌, 等. 丛枝菌根真菌提高植物耐盐性的作用机制[J]. 西北植物学报, 2007, 27(2): 414-420.
- [14] 朱鹏锦, 庞新华, 梁春, 等. 低温胁迫对甘蔗幼苗活性氧代谢和抗氧化酶的影响[J]. 作物杂志, 2018(4): 131-137.
- [15] Andreas, T., Christophe, C. and Ait, B.E. (2012) Physiological and Molecular Changes in Plants Grown at Low Temperatures. *Planta*, **235**, 1091-1105. <https://doi.org/10.1007/s00425-012-1641-y>
- [16] 冯固, 杨茂秋, 白灯莎. 盐胁迫下 VA 菌根真菌对无芒雀麦体内矿质元素含量及组成的影响[J]. 草业学报, 1998, 7(3): 22-29.
- [17] Cantrell, I.C. and Linderman, R.G. (2001) Preinoculation of Lettuce and Onion with VA Mycorrhizal Fungi Reduces Deleterious Effects of Soil Salinity. *Plant and Soil*, **233**, 269-281. <https://doi.org/10.1023/A:1010564013601>
- [18] Rekha, G. and Krishnamurthy, K.V. (1996) Response of Mycorrhizal and Nonmycorrhizal *Arachis hypogaea* to NaCl and Acid Stress. *Mycorrhiza*, **6**, 145-149. <https://doi.org/10.1007/s005720050119>
- [19] 王英男, 陶爽, 华晓雨, 等. 盐碱胁迫下 AM 真菌对羊草生长及生理代谢的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2187-2194.
- [20] 陈婕. 丛枝菌根真菌(AMF)提高刺槐耐盐性机制的研究[D]: [博士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [21] 肖龙敏. 宁夏枸杞根际微生物群落多样性及丛枝菌根真菌对其耐盐性的影响[D]: [硕士学位论文]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [22] 岳英男, 杨春雪. 松嫩盐碱草地土壤理化特性与丛枝菌根真菌侵染的相关性[J]. 草业科学, 2014, 31(8): 1437-1444.
- [23] 冯固, 李晓林, 张福锁, 等. 盐胁迫下丛枝菌根真菌对玉米水分和养分状况的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 595-598.
- [24] Farzad, J., Ricardo, A., Rosa, P., *et al.* (2008) Influence of Salinity on the *in Vitro* Development of *Glomus intraradic-*

- es and on the *in Vivo* Physiological and Molecular Responses of Mycorrhizal Lettuce Plants. *Microbial Ecology*, **55**, 45-53. <https://doi.org/10.1007/s00248-007-9249-7>
- [25] Estrada, L.A.A. and Davies, F.T. (2003) Arbuscular Mycorrhizal Fungi Influence Water Relations, Gas Exchange, Abscisic Acid and Growth of Micro Propagated Chile Ancho Pepper (*Capsicum annum*) Plantlets during Acclimatization and Post Acclimatization. *Journal of Plant Physiology*, **160**, 1073-1083. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00989>
- [26] Michel, R.S., Ricardo, A., Yaumara, M., *et al.* (2010) The Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Enhances the Photosynthetic Efficiency and the Antioxidative Response of Rice Plants Subjected to Drought Stress. *Journal of Plant Physiology*, **167**, 862-869. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.01.018>
- [27] 梁宇, 郭良栋, 马克平. 菌根真菌在生态系统中的作用[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6): 739-745.
- [28] Breemen, N.V., Finlay, R., Lundstrom, U., *et al.* (2000) Mycorrhizal Weathering: A True Case of Mineral Plant Nutrition? *Biogeochemistry*, **49**, 53-67. <https://doi.org/10.1023/A:1006256231670>
- [29] Bergelson, J.M. and Crawley, M.J. (1988) Mycorrhizal Infection and Plant Species Diversity. *Nature*, **334**, 202. <https://doi.org/10.1038/334202a0>
- [30] 龙显莉. 氮施肥条件下丛枝菌根真菌对植物种间相互作用影响的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [31] Grime, J.P., Mackey, J.M.L., Hillier, S.H., *et al.* (1987) Floristic Diversity in a Model System Using Experimental Microcosms. *Nature*, **328**, 420-422. <https://doi.org/10.1038/328420a0>
- [32] Dhillon, S.S. and Tone, L.G. (2004) Arbuscular Mycorrhizas Influence Plant Diversity, Productivity, and Nutrients in Boreal Grasslands. *Canadian Journal of Botany*, **82**, 104-114. <https://doi.org/10.1139/b03-139>
- [33] 石伟琦. 丛枝菌根真菌对内蒙古草原大针茅群落的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 344-349.
- [34] Van, D. and Klironomos, J.N. (1998) Mycorrhizal Fungal Diversity Determines Plant Biodiversity, Ecosystem Variability and Productivity. *Nature*, **396**, 69-72. <https://doi.org/10.1038/23932>
- [35] Fitter, A.H. (1977) Influence of Mycorrhizal Infection on Competition for Phosphorus and Potassium by Two Grasses. *New Phytologist*, **79**, 119-125. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1977.tb02187.x>
- [36] Smith, M.D., Hartnett, D.C. and Wilson, G.W.T. (1999) Interacting Influence of Mycorrhizal Symbiosis and Competition on Plant Diversity in Tallgrass Prairie. *Oecologia*, **121**, 574-582. <https://doi.org/10.1007/s004420050964>
- [37] Hartnett, W.D. (1997) Effects of Mycorrhizae on Plant Growth and Dynamics in Experimental Tallgrass Prairie Microcosms. *American Journal of Botany*, **84**, 478-482. <https://doi.org/10.2307/2446024>
- [38] 杨宏宇, 赵丽莉, 贺学礼. 丛枝菌根在退化生态系统恢复和重建中的作用[J]. 干旱区地理, 2005, 28(6): 836-842.
- [39] Johnson, D., Philippe, J.V., Jonathan, R.L., *et al.* (2004) Plant Communities Affect Arbuscular Mycorrhizal Fungi Diversity and Community Composition in Grassland Microcosms. *The New Phytologist*, **161**, 503-515. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00938.x>
- [40] 白梨花, 斯日格格, 曹丽霞, 等. 丛枝菌根对牧草与草地生态系统的重要作用及其研究展望[J]. 草地学报, 2013, 21(2): 214-221.
- [41] 何春光. 生物多样性保育学[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 2015: 11-18.
- [42] 吴强盛. 园艺植物丛枝菌根研究与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 80-85.
- [43] 马放, 苏蒙, 王立, 等. 丛枝菌根真菌对小麦生长的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(21): 6107-6114.
- [44] 吴强盛, 袁芳英, 费永俊, 等. 丛枝菌根真菌对白三叶根系构型和糖含量的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(1): 199-204.
- [45] Florin, W., Helge, N., Mathimaran, N., *et al.* (2012) Mycorrhizal Networks: Common Goods of Plants Shared under unequal Terms of Trade. *Plant Physiology*, **159**, 789-797. <https://doi.org/10.1104/pp.112.195727>
- [46] Hallett, P.D., Feeney, D.S., Bengough, A.G., *et al.* (2009) Disentangling the Impact of AM Fungi versus Roots on Soil Structure and Water Transport. *Plant and Soil*, **314**, 183-196. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9717-y>
- [47] 宋福强, 杨国亭, 孟繁荣, 等. 丛枝菌根化大青杨苗木根际微域环境的研究[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 211-216.
- [48] Zhen, L., Yang, G.W., Yang, H.J., *et al.* (2014) Arbuscular Mycorrhizal Fungi Affect Seedling Recruitment: A Potential Mechanism by Which N Deposition Favors the Dominance of Grasses over Forbs. *Plant and Soil*, **375**, 127-136. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1950-3>
- [49] Cheng, J.K., Yue, M.F., Yang, H.R., *et al.* (2019) Do Arbuscular Mycorrhizal Fungi Help the Native Species *Bidens biternata* Resist the Invasion of *Bidens alba*? *Plant and Soil*, **444**, 443-455. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04297-2>

- [50] Barto, K., Friese, C. and Cipollini, D. (2010) Arbuscular Mycorrhizal Fungi Protect a Native Plant from Allelopathic Effects of an Invader. *Journal of Chemical Ecology*, **36**, 351-360. <https://doi.org/10.1007/s10886-010-9768-4>
- [51] 李海燕, 润进, 怀瑞. 丛菌根真菌提高植物抗病性的作用机制[J]. 菌物系统, 2001, 20(3): 435-439.
- [52] 高萍. 丛菌根真菌和根瘤菌对苜蓿根腐病和叶斑病的防病促生作用[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [53] 秦海滨. 丛菌根真菌对温室黄瓜生长及抗病性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [54] 王艳玲, 胡正嘉. 丛菌根真菌和植物寄生线虫[J]. 生物学杂志, 1999, 16(6): 3-5.