

DOI: 10.11766/trxb202202411290457

CSTR: 32215.14.trxb202411290457

马世杰, 薛加祥, 韩骥, 胡枫楠, 赖水晶, 孔召玉, 刘洪光. 丛枝菌根真菌影响土壤质量的研究趋势与量化分析[J]. 土壤学报, 2026, 63 (1): 210–220.

MA Shijie, XUE Jiexiang, HAN Ji, HU Fengnan, LAI Shuijing, KONG Zhaoyu, LIU Hongguang. Research Trends and Quantitative Analysis of the Impact of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Soil Quality. [J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (1): 210–220.

## 丛枝菌根真菌影响土壤质量的研究趋势与量化分析\*

马世杰<sup>1, 2</sup>, 薛加祥<sup>2</sup>, 韩 骥<sup>2</sup>, 胡枫楠<sup>2</sup>, 赖水晶<sup>2</sup>, 孔召玉<sup>2</sup>, 刘洪光<sup>1†</sup>

(1. 江西省水利科学院 流域水土保持江西省重点实验室 江西省鄱阳湖流域生态水利技术创新中心 南昌 330029; 2. 南昌大学生命科学学院 南昌 330031)

**摘 要:** 丛枝菌根真菌 (Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF) 作为土壤生态系统中的重要有益微生物, 其生态功能已得到广泛研究, 但尚缺乏对 AMF 影响土壤质量的综合评价。因此, 本研究通过对 Web of Science 核心数据集的 4854 篇相关文献进行 CiteSpace 文献计量和 Meta 分析, 系统总结了 2003—2023 年间 AMF 影响土壤质量的研究进展, 并量化了不同生态系统及环境条件下接种 AMF 对土壤理化和生物学性质的综合效应。结果发现, AMF 与土壤质量相关领域发文量逐年增加, 热度持续攀升, 发文量前十的国家包括中国、美国、印度、德国、巴西、澳大利亚、西班牙、加拿大、意大利和法国。其中, 中国的发文量在 2016 年后快速增加, 大幅超越其他国家, 成为该领域文献增长的主要动力。20 余年间相关研究主要集中在土壤性状、养分吸收、球囊霉素相关土壤蛋白、CO<sub>2</sub> 浓度升高、植物修复和侵染率等方面, 研究焦点则从 AMF 对植物营养吸收的影响逐步扩展至对土壤生态系统可持续性的整体考量; 接种 AMF 对土壤生物学特性的影响高于理化特性, 即显著提高了土壤细菌 (含放线菌) 数量、酶活性和植物生物量, 增加了土壤有机质及养分有效性, 但对土壤容重和 pH 的影响不显著; AMF 对土壤质量的提升作用受到施肥、接种剂来源、土壤灭菌和接种时间等因素影响。综上, 本研究系统揭示了接种 AMF 对土壤理化性质和生物学特性的影响, 并对 AMF 影响土壤质量综合评价指标设计进行了展望, 为利用 AMF 促进农业生产和生态修复提供了科学依据。

**关键词:** 土壤理化性状; 土壤微生物群落; 丛枝菌根真菌; CiteSpace; 土壤健康

**中图分类号:** Q 939.96      **文献标志码:** A

## Research Trends and Quantitative Analysis of the Impact of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Soil Quality

MA Shijie<sup>1, 2</sup>, XUE Jiexiang<sup>2</sup>, HAN Ji<sup>2</sup>, HU Fengnan<sup>2</sup>, LAI Shuijing<sup>2</sup>, KONG Zhaoyu<sup>2</sup>, LIU Hongguang<sup>1†</sup>

(1. Jiangxi Key Laboratory of Watershed Soil and Water Conservation, Jiangxi Poyang Lake Basin Ecological Water Conservancy Technology Innovation Center, Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China; 2. School of Life Sciences, Nanchang

\* 江西省重点研发计划重点项目 (20243BBH81035)、流域水土保持江西省重点实验室开放研究基金项目 (2023SKTR04) 和江西水利科技项目 (202526YBKT09) 资助 Supported by the Jiangxi Provincial Key R&D Program (No. 20243BBH81035), the Open Fund of Jiangxi key laboratory of watershed soil and water conservation (No.2023SKTR04) and the Jiangxi Water Conservancy Science and Technology Projects (No.202526YBKT09)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hongguangliu0791@hotmail.com

作者简介: 马世杰 (2000—), 男, 宁夏石嘴山人, 硕士研究生, 主要从事微生物-植物互作及生态修复研究。E-mail: msj12358@163.com

收稿日期: 2024-11-29; 收到修改稿日期: 2025-09-15; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-09-30

University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** 【Objective】 Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) are important beneficial microorganisms in soil ecosystems, and their ecological functions have been extensively studied. However, a comprehensive evaluation on the impact of AMF on soil quality is still lacking. 【Method】 In this study, we conducted a bibliometric analysis using CiteSpace and a meta-analysis based on 4, 854 articles retrieved from the Web of Science Core Collection from 2003 to 2023, aiming to systematically summarize the research progress on the effects of AMF on soil quality and to quantify their comprehensive effects on soil physicochemical and biological properties across different ecosystems and environmental conditions. 【Result】 The results revealed a steady increase in the number of publications over the past two decades, indicating growing research interest in this field. The top ten contributing countries in terms of publication size were China, the United States, India, Germany, Brazil, Australia, Spain, Canada, Italy, and France. Notably, China experienced a sharp rise in publication output after 2016, significantly surpassing other countries and becoming a major driving force in the field. Research during this period primarily focused on soil properties, nutrient uptake, glomalin-related soil proteins, elevated CO<sub>2</sub> concentrations, phytoremediation, and AMF colonization rates. The research emphasis has gradually shifted from enhanced plant nutrient acquisition by AMF to its broader implications for soil ecosystem sustainability. Meta-analysis results showed that AMF inoculation had stronger effects on biological properties than on physicochemical traits. Specifically, AMF significantly enhanced soil bacterial (including actinomycete) abundance, enzyme activities, and plant biomass, and increased soil organic matter and nutrient availability. In contrast, its effect on soil bulk density and pH was not significant. The positive impact of AMF on soil quality was modulated by factors such as fertilization, inoculum source, soil sterilization status, and inoculation timing. 【Conclusion】 This study provides a systematic synthesis of the effects of AMF inoculation on soil physicochemical and biological properties, and offers insights into the development of comprehensive indicators for evaluating soil quality improvement by AMF. The findings serve as a scientific basis for promoting the application of AMF in sustainable agriculture and ecological restoration.

**Key words:** Soil physicochemical properties; Soil microbial communities; Arbuscular mycorrhizal fungi; CiteSpace; Soil health

土壤是自然界最复杂的生态系统之一。健康的土壤为动植物生长提供必需的养分和栖息地，是保障全球粮食安全和可持续发展的关键<sup>[1]</sup>。土壤质量是指土壤在生态系统中保持生物的生产能力、维持环境质量及促进动植物健康的能力<sup>[2]</sup>，包含土壤肥力、土壤环境及土壤健康三个方面<sup>[3-4]</sup>。目前，土壤质量评价指标分为物理、化学和生物学指标，其中物理指标包括土壤容重、含水量、机械组成、总孔隙度等，这些指标决定了土壤的通气性、保水能力和支持植物生长的能力；化学指标包括有机质、碱解氮、有效磷、速效钾和 pH 等，直接反映土壤养分的供应能力；生物指标包括微生物生物量、微生物群落组成和多样性、酶活性等，是土壤质量最为敏感和活跃的组成部分<sup>[5]</sup>。毋庸置疑，土壤物理、化学和生物因素的综合作用决定了土壤质量<sup>[6]</sup>。其中，生物因素（特别是土壤微生物）是反映土壤质量好坏的关键指标之一<sup>[7]</sup>。

在土壤微生物中，丛枝菌根真菌（Arbuscular

mycorrhizal fungi, AMF）可与 90% 以上的陆生植物形成共生关系<sup>[8-9]</sup>，构成了植物与土壤之间物质交流的关键桥梁<sup>[10-11]</sup>。植物将约 20% 的光合产物输送至 AMF<sup>[12]</sup>，而 AMF 的根外菌丝可协助植物高效获取土壤养分<sup>[13]</sup>。此外，AMF 在菌丝际招募微生物，协同促进土壤养分周转，进一步增强植物的养分吸收能力<sup>[9]</sup>。在土壤物理方面，AMF 通过根外菌丝和球囊霉素相关土壤蛋白（Glomalin-related soil protein, GRSP）的胶结作用，促进土壤团聚体的形成和稳定<sup>[14]</sup>；AMF 菌丝生长还能增加土壤孔隙度，提高土壤通气性和保水能力<sup>[15]</sup>。在土壤生物方面，AMF 能够调整土壤微生物群落结构，促进有益微生物的繁殖，从而提高土壤生物活性<sup>[16]</sup>；AMF 产生的激素类（如赤霉素、生长素等）信号分子可刺激植物生长，并通过根系活动改善土壤酶系统<sup>[17]</sup>。更为重要的是，AMF 能够降低农业化肥的施用量，提升肥料的利用效率，增强植物对病虫、干旱、盐碱、重金属等胁迫的抵抗力<sup>[18-19]</sup>。因此，近年来菌根生物技术的研

发及其在农业生产及生态修复领域的应用受到了广泛关注<sup>[20]</sup>。

20 多年来, AMF 在土壤生态系统中的作用和机制已经得到了广泛研究。总体而言, AMF 在中低纬度的森林和草原生态系统中分布最为普遍<sup>[21]</sup>, 并能与超过 150 种的粮食、蔬菜和水果作物形成共生关系。但是, 目前对 AMF 影响土壤质量的整体评价仍相对缺乏。本文采用 CiteSpace 文献可视化分析, 对 2003—2023 年间国际上 AMF 影响土壤质量的相关研究进行了归纳和整理, 对全球及主要国家的研究趋势和学术影响力进行了比较; 并进一步采用 Meta 分析方法, 从土壤理化和生物学性状多维度评价了接种 AMF 对土壤质量的影响, 旨在全面梳理 AMF 在土壤质量提升中的作用和潜力, 为 AMF 生物肥料研发及其在农业可持续发展和土壤生态修复中的应用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据整理与收集

CiteSpace 分析文献收集: 本文以 Web of Science 核心数据集为数据来源, 检索文献时间范围为 2003—2023 年, 以  $TS = (AMF \text{ OR } AM \text{ fungi OR arbuscular mycorrhiza OR arbuscular mycorrhizal fungi OR mycorrhiza * OR vesicular arbuscular * OR vesicular arbuscular mycorrhizal}) \text{ AND } TS = (\text{soil quality OR SQI OR soil health OR soil fertility OR land quality OR soil capability OR soil properties OR soil nutrient OR soil physicochemical properties})$  进行检索, 共检索到 6 035 篇文献, 选择文章类型为 Article, 手动剔除会议、书籍、通知等非学术性文章, 最终获得有效文献 4 854 篇。

Meta 分析文献收集: 在 Web of Science 数据库 (ISI, 美国), 以  $TS = (AMF \text{ inoculation OR } AM \text{ fungi inoculation OR arbuscular mycorrhiza inoculation OR arbuscular mycorrhizal fungi inoculation OR mycorrhiza * inoculation}) \text{ AND } TS = (\text{physical and chemical soil properties OR soil physical - chemical properties OR physicochemical properties of soil OR physical and chemical properties of soil OR soil enzyme activity * OR soil enzymatic activity * OR soil biological properties})$  进行检索, 共检索到 1 956 篇文献, 阅读标题和摘要初步筛选后剩余 538 篇, 全文阅读后筛选出 86 篇文章, 共 2 340 条观测值。

Meta 分析文献筛选标准: (1) 文章必须是原创, 类型为论文 (Article); (2) 文章应以接种 AMF 为处理组, 以不接种 AMF 为对照组, 并同时包含数值统计分析; (3) 文章至少需同时包括物理、化学和生物学三大类性状中的任意两大类指标, 并且这些指标在接种 AMF 处理组和对照组中均需被测试; (4) 文章需对实验条件进行明确说明; (5) 每一项指标均需包含均值和样本数; (6) 仅选取观测值数量  $\geq 5$  的指标进行效应值分析。共筛选 15 个与土壤质量相关的指标, 包括物理指标: 容重; 化学指标: 土壤 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾; 生物指标: 微生物生物量碳、细菌数量、放线菌数量、真菌数量、土壤酶活性和植物生物量。

### 1.2 数据处理与分析

CiteSpace 分析: 本研究采用 CiteSpace 6.2.R4 软件进行可视化分析, 以揭示研究领域的现状、发展趋势和热点。相关文献数据从 Web of Science 核心数据库检索并导出, 导出的文本以 download\_XXX.txt 格式命名。创建 input、output、data 和 project 四个空文件夹, 并将待分析的文献数据放入 data 文件夹内, 随后使用 CiteSpace 软件进行数据转换, 时间跨度选择为 2003 年 1 月—2023 年 12 月。设置时间切片 (time slicing) 为 1 年, 选择标准包括 TopN 设为 50, TopN% 设为 10.0, 网络修剪方式 (pruning) 选择 Pathfinder、Pruning sliced networks 和 Pruning the merged network。聚类网络图谱中, 节点的中心性是指与其他任意两个节点之间的所有最短路径经过该节点的次数, 以此可以衡量节点在整个网络中的重要程度<sup>[22]</sup>。在 CiteSpace 软件中, 选择节点类型为 “Country”, 软件会自动统计各国发文量并生成合作网络图谱。节点大小直接体现了发文量的多少, 节点越大, 则表明该国家的发文量越高。节点间的连线表示国家间合作关系, 连线越粗、颜色越深代表合作越紧密。选择 “Keyword”、使用对数极大似然率 (Log-Likelihood Ratio, LLR) 算法进行关键词聚类共现分析。

Meta 分析: 本研究采用软件 MetaWin 3.0 对数据进行了效应值、异质性和安全系数等分析。选取平均数和标准差作为数据类型, 若某项指标未提供标准差、标准误或置信区间信息, 则默认采用均值的 10% 作为标准差进行估算<sup>[23]</sup>。此外, 图片数据通

过 GetData Graph Digitizer 2.24 进行提取。采用响应比 (In response ratio) 计算效应值<sup>[24]</sup>, 计算公式为  $\ln R = \ln(\text{Mean}_T) - \ln(\text{Mean}_C)$ ; 效应值方差公式:

$$v\ln R = \frac{(\text{SD}_T)^2}{(n_T)(\text{Mean}_T)} + \frac{(\text{SD}_C)^2}{(n_C)(\text{Mean}_C)}$$

采用随机效应模型 ( $\alpha = 0.05$ ) 来评估各指标分组间的差异显著性, 判断依据为置信区间是否与 0 重叠<sup>[25]</sup>。

采用 OriginPro 2019、CiteSpace 6.2.R4 和 GraphPad Prism 9.5 软件制图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 2003—2023 年 AMF 影响土壤质量的发文趋势

在 2003—2023 年间, AMF 在土壤质量研究领域的发文量总体上呈现逐年增加趋势, 表明研究热度持续上升(图 1a)。发文量波动情况表明, 2003—2007 年间年发文量在 100 篇以下, 相对较低; 2008—2017 年间年发文量翻番, 从 124 篇增加至 250 篇; 2017—2021 年间年发文量再次翻番, 达到 500 篇左右并保持稳定。2003—2013 年间中国发文量与其他国家相

比并没有明显优势, 但在 2014 年后超过其他国家, 且优势不断扩大, 其他国家发文量则长期相对稳定(图 1a)。对总发文量而言, 中国以 1194 篇位居首位(占 24.6%), 中心性为 0.10; 紧随其后的是美国、印度、德国、巴西, 分别发表论文 809、384、352 和 298 篇, 中心性为 0.22、0.04、0.22 和 0.02(图 1b 和图 2)。尽管法国发文量仅排第十, 仅为 189 篇, 但其中心性却高居第三, 达到 0.18。节点中心性与传播影响力正相关, 若一个节点的中心性超过 0.1, 则认为这个节点是关键节点。因此, 在发文量排名前十的国家中, 美国、德国、法国、中国和意大利是关键节点国家(中心性  $\geq 0.1$ )。

2003—2007 年, AMF 研究主要集中于对植物养分吸收、生长和抗逆的影响, 在土壤质量领域的发文量相对较低。2008—2016 年, 高通量测序技术的应用极大缓解了 AMF 形态学鉴定的难题<sup>[26]</sup>, AMF 群落组成和多样性研究领域不断拓展, 其对土壤质量的影响开始受到更多关注, 相关研究的论文发表量呈现出稳步上升的趋势。植物-土壤反馈理论的发展和 AM 真菌种质资源库的建立也是促进该领域增长的重要原因<sup>[27]</sup>。2017—2023 年, 随着高通量测序成本的不断降低以及宏基因组和基因芯片等技术的广泛推广<sup>[28]</sup>, AMF 对土壤质量影响的研究发文量迅速增长。

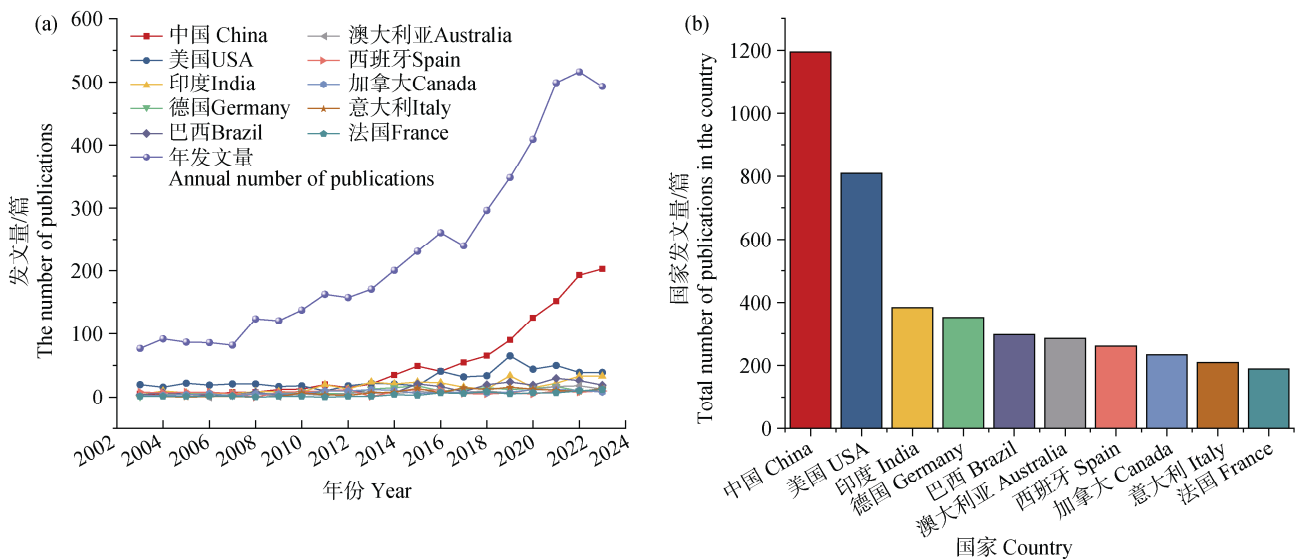


图 1 2003—2023 年发文量的变化趋势 (a) 排名前十国家和全球总发文量 (b) 期间排名前十国家总发文量 (参照图 (a) 图例)

Fig. 1 The change trend of publication size from 2003 to 2023: (a) the top 10 countries and the annual number of global publications; (b) the total number of publications of the top 10 countries during this period (Refer to the legend in Fig. 1 (a))





图 2 国家合作网络图谱及发文量排名前十国家的中心性

Fig. 2 The national cooperation network map and the centrality of top 10 countries with the highest publication size

尽管我国在 AMF 领域是高产和关键节点国家,但影响力还不够高,主要局限于国内,与国际同行间的交流不足,未能有效促进跨国的知识交流与整合。未来应该提高发文质量,减少冗余发文,提高学术或行业认可度。同时,应鼓励我国菌根学学者加强国际交流,特别是与菌根学领域水平较高的研究机构和学者联合开展工作、发表成果,以提升我国菌根学研究的国际影响力。

## 2.2 2003—2023 年 AMF 影响土壤质量的主要研究内容

通过关键词聚类分析,共得到 soil properties、nutrient uptake、glomalin-related soil protein、elevated CO<sub>2</sub>、phytoremediation、mycorrhizal colonization 等 6 个聚类(图 3a)。聚类#0 聚焦土壤性状,土壤物理、化学和生物性质会影响 AMF 的定殖和功能,反之,AMF 也会影响以上土壤性质,作为 AMF 与土壤质量相关研究的背景数据或响应指标,土壤性状分析广泛存在<sup>[16]</sup>。聚类#1 涉及植物养分吸收功能,植物生长表现直接决定于养分状况,但很多植物存在养分吸收障碍,AMF 可通过其根外菌丝网络促进植物养分吸收,特别是对难移动元素(如磷)吸收的贡献更为显著<sup>[29]</sup>。聚类#2 关注 GRSP,GRSP 是 AMF 分泌的一种疏水性糖蛋白,具有强大的胶结性

能、长时间的周转期和富含多种金属元素亲和官能团的显著特点,因而可发挥促进土壤结构形成、增加土壤碳汇和螯合重金属强化污染修复的作用,有望提升土壤质量<sup>[30-31]</sup>。聚类#3 为 CO<sub>2</sub> 浓度升高,CO<sub>2</sub> 浓度升高的施肥和增温效应提升植物光合作用效率,植物对 AMF 的依赖度提高,同时转运至根系的碳水化合物增加,根际环境和菌根共生体的形成发生变化,对土壤质量有显著影响<sup>[32]</sup>。聚类#4 关注植物修复,伴随工业高速发展,土壤污染事件频发且难以治理,植物修复是解决该问题的重要方法<sup>[33]</sup>。然而,植物修复措施也存在见效较慢、稳定性欠佳和修复范围有限等局限性,而 AMF 可促进植物生长、提升植物抗逆性和根系修复范围,进而提升植物修复效率、修复稳定性和修复范围,改善土壤质量<sup>[34-35]</sup>。聚类#5 关注 AMF 侵染率,侵染率是表征植物与 AMF 建立共生关系的重要指标,是保证 AMF 正常发挥功能的前提,因而成为多数研究的基本数据。

从关键词突现分析中可以发现,AMF 在土壤质量领域的研究热点大致可分为四个依次出现又相互交叉的时期:基础探索期(2003—2015 年)、机制深化期(2003—2017 年)、功能转型期(2012—2020 年)和应用整合期(2019—2023 年)(图 3b)。(1)基

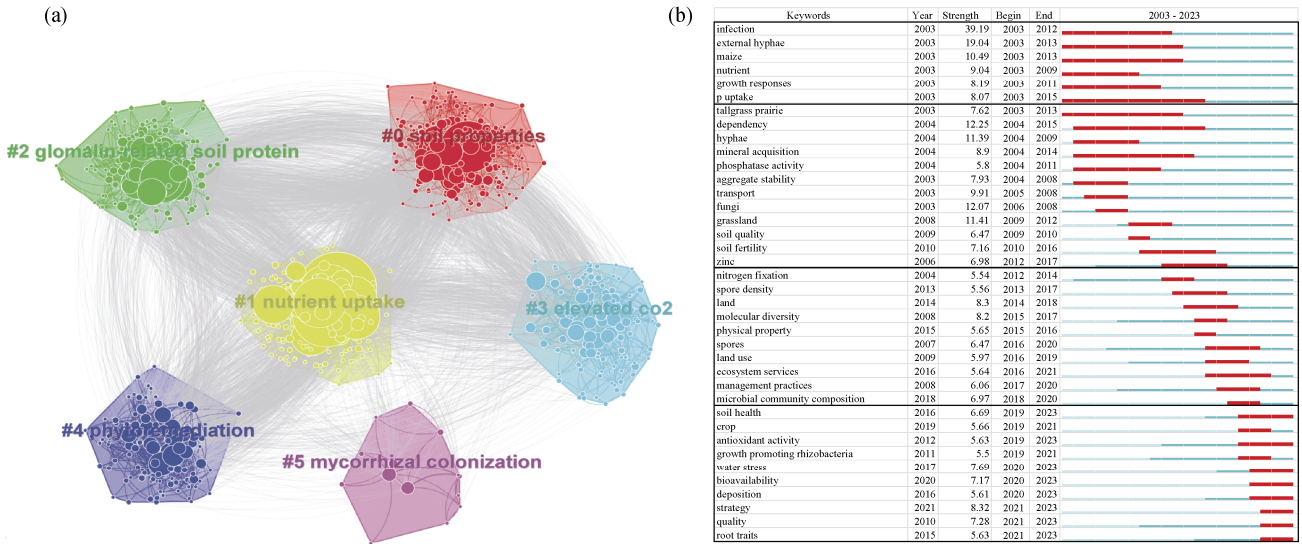


图 3 关键词聚类分析与突现分析

Fig. 3 Keyword clustering analysis and burst analysis

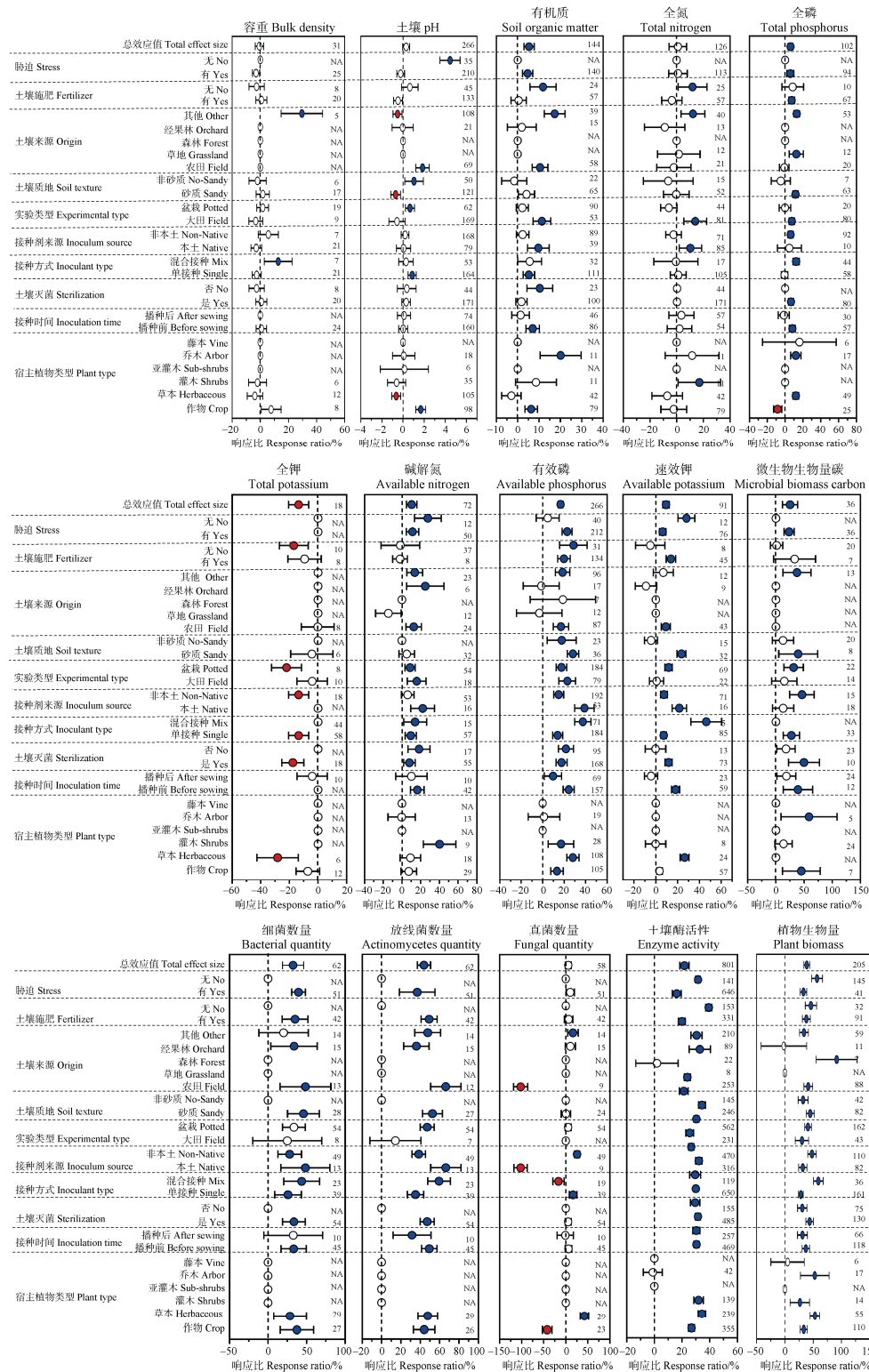
基础研究期以共生机制和植物响应为核心，这一时期的研究聚焦于 AMF 与植物根部的互动机制，涵盖了 AMF 的侵染过程 (infection) 及其根外菌丝 (external hyphae) 的结构。因此，infection (侵染) 现象表现出最强的突发强度和最长的持续时间。此外，AMF 对宿主植物养分吸收，尤其是磷的吸收，具有显著影响，这使得以玉米 (*Zea mays* L.) 为代表的作物生长受益于 AM 共生关系。(2) 机制深化期向生态功能延伸，此阶段的研究聚焦于 AMF 在土壤改良领域的效能，涵盖了磷素循环相关的酶活性、团聚体的稳定性、元素的转运机制以及有益真菌的作用，并探讨了其在草地及高草草原生态修复中的应用，着重强调了土壤肥力与土壤质量的改善。(3) 功能转型期侧重于土壤生物过程及群落结构的变化，诸如固氮过程、生态系统服务等，同时深入探讨了微生物群落的变化，包括孢子密度、群落组成及分子多样性等方面，以及它们与土地利用之间的复杂关联。(4) 应用整合期聚焦可持续农业和环境适应性，特别是土壤健康 (soil health) 的维护和养分生物有效性 (bioavailability) 的提升，同时探索与根际促生细菌 (plant growth-promoting rhizobacteria, PGPR) 在胁迫条件下 (如水分胁迫、抗氧化活性) 协作改善作物 (crop) 生长特性 (如根系性状) 的策略。

由此可以看出，AMF 与土壤质量相关研究脉络从共生机制探索，到生态系统功能深化，再到农业与环境应用集成<sup>[36]</sup>。在过去 20 年中，研究呈现从微

观到宏观、从基础到应用的清晰演变路径。当前的研究趋势愈加重视 AMF 在全球变化情境下的响应机制与调控策略，这预示着菌根学正在逐步迈向服务于绿色农业与生态工程的跨学科融合阶段<sup>[27]</sup>。而且，为应对国家“双碳”目标、农业发展等领域的挑战，AMF 对土壤质量影响的研究热点仍会持续。

### 2.3 接种 AMF 对土壤质量影响的综合评价

Meta 分析发现，接种 AMF 对土壤容重的影响相对微弱，仅在土壤来源为其他及 AMF 混合接种条件下，观察到容重有所增加；对土壤 pH 的影响效应则受土壤质地、实验条件以及宿主植物类型等因素的综合影响，在无胁迫、农田土壤、非砂质土壤、盆栽试验以及宿主为作物等情况下会显著上升，而在土壤来源为其他、砂质土壤以及宿主为草本植物等情况下则显著下降 (图 4)。研究表明，接种 AMF 后，土壤有机质含量普遍增长 5%；在特定条件下，如存在胁迫、不施肥、接种土著 AMF、单独接种以及播种前接种等，土壤有机质含量的增幅达 10%；而在盆栽试验或宿主为乔木的情况下，土壤有机质含量的增幅甚至超过 20%。养分总量分析表明，接种 AMF 促使土壤全磷增加 6%，全钾降低 14%，而全氮则没有显著变化；在亚组分析中，实验类型与土壤是否灭菌是影响土壤养分总量效应的显著因素：在大田条件下土壤全氮含量提升 14%，而在温室条件下土壤全钾含量显著降低；在土壤未灭菌条件下土壤全量养分含量未见显著变化，而在土壤灭



注: 均值两端的条形代表 95% 置信区间, 红色代表接种 AMF 显著低于对照处理, 蓝色代表接种 AMF 显著高于对照处理, 白色代表与对照无显著差异, NA 代表观测值  $\leq 5$ , 后面的数代表观测值数量。Note: Bars around the means denote 95% CIs. Mean values  $< 0$  indicate a higher value in the control treatment (red dots), while mean values  $> 0$  indicate a higher value in the control treatment (blue dots). The number of observations is provided beside each attribute. NA stands for observations  $\leq 5$ , and the number following it represents the count of observations.

图 4 接种 AMF 对土壤理化和生物学指标的影响

Fig. 4 The effect of AMF inoculation on soil physicochemical indicators



菌条件下土壤全钾含量显著降低 18%。接种 AMF 显著增加土壤养分有效性,且效应值表现为有效磷 (+19%) > 碱解氮 (+10%) > 速效钾 (+9%); 亚组分析显示,对有效磷的促进作用比较稳定,未受到土壤质地、实验类型、接种剂来源、接种方式、土壤灭菌和接种时间等因素的影响;特别是混合接种后,土壤速效养分指标的提升效果尤为明显,其中速效钾的增幅更是高达 46%;种植前接种的效果明显优于种植后接种,具体而言,种植前接种可使有效磷含量提升 24%,而种植后接种的增幅则仅为 10%。

从土壤生物学指标来看,AMF 总体上会提升土壤微生物生物量碳,但会受到施肥、土壤质地、接种剂来源和接种方式等多因素的影响;同时会显著提高土壤微生物数量,真菌、细菌和放线菌总效应值分别增加 6%、32%和 44% (图 4)。亚组分析表明,细菌和放线菌呈现相似趋势,而真菌则表现出较大差异,如在农田土壤中细菌和放线菌数量分别增加 49%和 66%,而真菌数量显著下降 100%。真菌受多种因素的共同作用,包括接种方法、接种剂的来源以及宿主植物的种类等,如施用外源性 AMF 可显著提升真菌数量,而应用土著 AMF 则可能导致真菌数量下降;接种混合 AMF 后,土壤真菌数量的效应值降低了 17%,相反,接种单一 AMF 菌剂则使真菌数量的效应值提升了 17%。接种 AMF 显著提升了土壤酶活性,增幅均超过 25%,提升效应除了土壤来源和宿主植物类型之外,不受其他条件影响。接种 AMF 对植物生长的促进作用明显,植物生物量增幅可达 39%,该促生效应在胁迫、土壤施肥、土壤来源、宿主类型、实验种类等因素作用下保持稳定;在宿主为草本或乔木植物、混合接种 AMF、土壤来源为森林以及无胁迫条件下,效应值均显著超过 50%。

由上可知,AMF 增加土壤有机质含量,是与植物建立共生关系后诱导更多光合产物转移至土壤<sup>[37]</sup>;对土壤养分总量影响不明显,但对土壤养分有效性具有提升作用,特别是通过优化接种方式会有更大潜力。AMF 对土壤养分活化的贡献,与其引发的细菌和放线菌丰度增加有关,而 AMF 与其他微生物互作增加土壤酶活性可能是土壤养分有效性提升的直接原因<sup>[38]</sup>。在灭菌条件下,AMF 对土壤养分有效性的促进作用不明显,更加反映了 AMF 与其他微生物互

作的重要性<sup>[39]</sup>。接种顺序也会影响 AMF 对土壤养分有效性的作用,体现了 AMF 具有优先效应<sup>[40]</sup>。研究显示,AMF 与菌丝际微生物的互作显著提高了磷素的有效性<sup>[41]</sup>,并揭示了 AMF 在土壤结构稳定、污染物分解,以及缓解植物胁迫等方面的重要作用,这些功能可能同样依赖于菌丝际微生物的相互作用。同时,与土壤理化指标相比,接种 AMF 对土壤生物学性质的影响更为显著。接种 AMF 在不同条件下均能显著增加植物生物量,表现出稳定的促生效应,这对农林生产和生态修复均有积极作用<sup>[36]</sup>。AMF 是连接植物和土壤的纽带,过去 20 余年的研究更多关注 AMF 对植物营养吸收的直接作用。实际上,AMF 与植物、其他微生物互作,对塑造土壤质量有更为综合的效果。近年来 AMF 相关研究热点分析表明,AMF 在土壤修复、土壤结构改良、土壤肥力提升等方面的研究逐渐受到重视,未来应该更加重视 AMF 与其他土壤微生物协同提升土壤质量方面的研究。

AMF 会影响土壤理化性质和生物学特性,不同研究针对各自主题选取了多样化的指标,这无疑增加了全面评估 AMF 对土壤质量影响的难度。目前,通常使用土壤质量指数 (Soil Quality Index, SQI) 量化土壤在支持生态系统服务 (如养分循环、水分保持、作物生产) 方面的能力<sup>[42]</sup>。但是,AMF 广泛分布于全球各类生态系统、不同利用方式土壤中,不同的生态系统类型 (如农田、森林、草原等) 相关研究测定指标各有侧重:例如,农业系统可能侧重土壤养分含量 (如全磷、速效钾等),而森林系统更关注有机质和持水能力<sup>[43]</sup>。这种差异使得跨生态系统的指标难以综合计算 SQI,限制了该指标在 AMF 影响土壤治理的 Meta 分析中的应用。土壤质量评价是一项复杂而系统的工程,需要综合考虑土壤的物理、化学和生物特性,以及土地利用方式和生态系统类型等多种因素。因此,需要进一步探索和研究适合 AMF 接种研究的土壤指标数据集,以期全面、准确且稳定地反映 AMF 等有益微生物影响土壤质量状况的指标<sup>[44]</sup>。

### 3 结 论

在 2003—2023 年间,AMF 对土壤质量的研究主要集中在土壤特性、养分吸收、球囊霉素相关土

壤蛋白、CO<sub>2</sub> 浓度升高、植物修复和侵染率等 6 个方面,研究主题随着时间的推移也发生了明显变化,研究热点经历了从促进植物生长与健康,到强化土壤生物过程的转变,并最后聚焦于提高生态系统多功能性,同时这一研究也在全球气候变化领域得到了延伸。接种 AMF 促使土壤物理、化学、生物学质量指标均得到显著改善,且增加幅度表现为生物学指标>理化指标,体现了接种 AMF 对土壤质量的综合提升效应。AMF 对土壤质量的改善作用会受农事活动(如施肥)、菌剂来源和接种方式、AMF 与本土微生物的兼容性等方面的影响,在实际应用时应综合考虑以上因素,以期实现接种 AMF 菌肥的效应最大化,促进农业和生态环境的可持续发展。

### 参考文献 (References)

- [1] Huang J H, Zhang Y, Xiao K, et al. Evaluation index and development trend of farmland soil quality in China[J]. Resources Environment & Engineering, 2024, 38 (1): 26—33. [黄佳惠, 张瑶, 肖凯, 等. 中国农田土壤质量评价指标及其发展趋势[J]. 资源环境与工程, 2024, 38 (1): 26—33.]
- [2] Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. Defining soil quality for a sustainable environment[M]. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1994.
- [3] Liu S L, Fu B J, Liu G H, et al. Research review of quantitative evaluation of soil quality in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(1): 137—143. [刘世梁, 傅伯杰, 刘国华, 等. 我国土壤质量及其评价研究的进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 137—143.]
- [4] Lehmann J, Bossio D A, Kögel-Knabner I, et al. The concept and future prospects of soil health[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1(10): 544—553.
- [5] Li X, Zhang W J, Wu L, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(14): 3043—3056. [李鑫, 张文菊, 邬磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043—3056.]
- [6] Sooryamol K R, Kumar S, Sankar M. Advanced methods of soil quality assessment for sustainable agriculture[M]//Intelligence Systems for Earth, Environmental and Planetary Sciences. Amsterdam: Elsevier, 2024: 185—208.
- [7] Bennett L T, Mele P M, Annett S, et al. Examining links between soil management, soil health, and public benefits in agricultural landscapes: An Australian perspective[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 139 (1/2): 1—12.
- [8] Brundrett M C, Tedersoo L. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity[J]. New Phytologist, 2018, 220 (4): 1108—1115.
- [9] Zhang L, Zhou J C, George T S, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi conducting the hyphosphere bacterial orchestra[J]. Trends in Plant Science, 2022, 27 (4): 402—411.
- [10] Tao J Y, Liu X Y. Does arbuscular mycorrhizal fungi inoculation influence soil carbon sequestration [J]. Biology and Fertility of Soils, 2024, 60 (2): 213—225.
- [11] Johnson N C, Angelard C, Sanders I R, et al. Predicting community and ecosystem outcomes of mycorrhizal responses to global change[J]. Ecology Letters, 2013, 16 (s1): 140—153.
- [12] Kakouridis A, Yuan M T, Nuccio E E, et al. Arbuscular mycorrhiza convey significant plant carbon to a diverse hyphosphere microbial food web and mineral-associated organic matter[J]. New Phytologist, 2024, 242 (4): 1661—1675.
- [13] Duan H X, Luo C L, Shi Q, et al. Research progress in the effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant-soil systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45 (1): 475—491. [段海霞, 罗崇亮, 师茜, 等. 丛枝菌根真菌对植物-土壤系统的影响研究进展[J]. 生态学报, 2025, 45 (1): 475—491.]
- [14] Biró I, Németh T, Takács T. Changes of parameters of infectivity and efficiency of different *Glomus mosseae* arbuscular mycorrhizal fungi strains in cadmium-loaded soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2009, 40 (1/2/3/4/5/6): 227—239.
- [15] Peng S L, Shen H, Zhang Y T, et al. Compare different effect of arbuscular mycorrhizal colonization on soil structure[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (3): 863—870. [彭思利, 申鸿, 张宇亭, 等. 不同丛枝菌根真菌侵染对土壤结构的影响[J]. 生态学报, 2012, 32 (3): 863—870.]
- [16] Fall A F, Nakabonge G, Ssekandi J, et al. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on soil fertility: Contribution in the improvement of physical, chemical, and biological properties of the soil[J]. Frontiers in Fungal Biology, 2022, 3: 723892.
- [17] Zhou Y F, Bai Y S, Yue T, et al. Research progress on the growth-promoting characteristics of plant growth-promoting rhizobacteria[J]. Microbiology China, 2023, 50 (2): 644—666. [周益帆, 白寅霜, 岳童, 等. 植物

- 根际促生菌促生特性研究进展[J]. 微生物学通报, 2023, 50 (2): 644—666.]
- [ 18 ] Rillig M C, Sosa-Hernández M A, Roy J, et al. Towards an integrated mycorrhizal technology : Harnessing mycorrhiza for sustainable intensification in agriculture[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1625.
- [ 19 ] Chen M, Arato M, Borghi L, et al. Beneficial services of arbuscular mycorrhizal fungi - from ecology to application[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1270.
- [ 20 ] Li W J, Liu Y J, Zhang Y, et al. Application of microbial technology in ecological protection and restoration of agriculture, forestry and grassland: An example of mycorrhizal fungi[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2024, 14 (6): 1905—1915. [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.]
- [ 21 ] Tedersoo L, Bahram M, Zobel M. How mycorrhizal associations drive plant population and community biology[J]. *Science*, 2020, 367 (6480): eaba1223.
- [ 22 ] Freeman L C. Centrality in social networks conceptual clarification[J]. *Social Networks*, 1978, 1 (3): 215—239.
- [ 23 ] Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated CO<sub>2</sub> stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: A meta-analysis[J]. *Ecology*, 2006, 87 (1): 53—63.
- [ 24 ] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. *Ecology*, 1999, 80 (4): 1150—1156.
- [ 25 ] Adams D C, Gurevitch J, Rosenberg M S. Resampling tests for meta-analysis of ecological data[J]. *Ecology*, 1997, 78 (4): 1277—1283.
- [ 26 ] Victorino Í M M, Berruti A, Orgiazzi A, et al. High-throughput DNA sequence-based analysis of AMF communities[J]. *Methods in Molecular Biology*, 2020, 2146: 99—116.
- [ 27 ] Wang X Y, Wang W, Wang Y S, et al. Analyses of the research status of arbuscular mycorrhizal fungi in the last 30 years based on CiteSpace software[J]. *Mycosystema*, 2022, 41 (5): 802—818. [王晓燕, 王微, 王幼珊, 等. 基于 CiteSpace 软件的丛枝菌根真菌近 30 年研究态势分析[J]. 菌物学报, 2022, 41 (5): 802—818.]
- [ 28 ] Wang X Z, Wang F H, Sun R B, et al. Application of high-throughput DNA sequencing in microbial ecology[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26 (10): 1593—1600. [王新珍, 王凤花, 孙瑞波, 等. 高通量测序技术在微生物分子生态学研究中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26 (10): 1593—1600.]
- [ 29 ] 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.
- [ 30 ] Agnihotri R, Sharma M P, Prakash A, et al. Glycoproteins of arbuscular mycorrhiza for soil carbon sequestration: Review of mechanisms and controls[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806: 150571.
- [ 31 ] Holátko J, Brtnický M, Kučerík J, et al. Glomalin—Truths, myths, and the future of this elusive soil glycoprotein[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2021, 153: 108116.
- [ 32 ] Song G, Wang Q C, Zheng Y, et al. Responses of arbuscular mycorrhizal fungi to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and warming: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33 (6): 1709—1718. [宋鸽, 王全成, 郑勇, 等. 丛枝菌根真菌对大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高和增温响应研究进展[J]. 应用生态学报, 2022, 33 (6): 1709—1718.]
- [ 33 ] Wang J Y, Aghajani Delavar M. Techno-economic analysis of phytoremediation: A strategic rethinking[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 902: 165949.
- [ 34 ] Riaz M, Kamran M, Fang Y Z, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 402: 123919.
- [ 35 ] Lenoir I, Lounes-Hadj Sahraoui A, Fontaine J. Arbuscular mycorrhizal fungal-assisted phytoremediation of soil contaminated with persistent organic pollutants : A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67 (5): 624—640.
- [ 36 ] Martin F M, van der Heijden M G A. The mycorrhizal symbiosis: Research frontiers in genomics, ecology, and agricultural application[J]. *New Phytologist*, 2024, 242 (4): 1486—1506.
- [ 37 ] Bi Y L, Zhang K, Xiao L, et al. Mechanisms of carbon distribution and stability in the photosynthetic processes of plant-soil systems influenced by arbuscular mycorrhizal fungi during reclamation of mining areas[J]. *Journal of China Coal Society*, 2025, 50 (1): 572—583. [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.]
- [ 38 ] Miransari M. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and soil bacteria[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, 89 (4): 917—930.
- [ 39 ] Duan S L, Feng G, Limpens E, et al. Cross-Kingdom nutrient exchange in the plant—arbuscular mycorrhizal



- fungus-bacterium continuum[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2024, 22 ( 12 ): 773—790.
- [ 40 ] Kong Z Y, Li T, Glick B R, et al. Priority effects of inoculation timing of plant growth-promoting microbial inoculants: Role, mechanisms and perspectives[J]. *Plant and Soil*, 2025: 1—13.
- [ 41 ] Duan S L, Jin Z X, Zhang L, et al. Mechanisms of cooperation in the plants-arbuscular mycorrhizal fungi-bacteria continuum[J]. *The ISME Journal*, 2025, 19 ( 1 ): wraf023.
- [ 42 ] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California[J]. *Agriculture , Ecosystems & Environment*, 2002, 90 ( 1 ): 25—45.
- [ 43 ] Ramirez M A J, Visco R, Predo C, et al. Assessment of soil condition using soil quality index of different land use types in Liliw, Laguna, Philippines[J]. *Philippine Journal of Science*, 2022, 151 ( 3 ): 1157—1169.
- [ 44 ] China Science Communication. [China Science Communication] - Factors influencing soil quality[EB/OL]. ( 2021-12-31 ) [2025-03-19]. [https://www.kepuchina.cn/article/articleinfo business\_type=100&classify=0&ar\_id=243086. [科普中国. [科普中国]-土壤质量影响因素 [EB/OL]. ( 2021-12-31 ) [2025-03-19]. https://www.kepuchina.cn/article/articleinfo business\_type=100& classify=0&ar\_id=243086.]

( 责任编辑: 檀满枝 )