

DOI: 10.3969/j.issn.2096-4900.2025.04.016

菌根真菌对森林碳汇的影响及展望

刘一江

(铁岭市森林资源保护中心, 辽宁 铁岭 112000)

摘要: 随着全球气候变暖的加剧, 深入了解森林在碳循环中的作用和机制, 对实现碳达峰、碳中和的目标具有至关重要的作用。在森林生态系统中, 菌根真菌与林木之间的相互作用对森林碳汇产生了显著的影响。为了探讨菌根真菌对森林碳汇的影响, 本研究以菌根真菌作为桥梁, 拟从一个系统的视角深入探讨菌根真菌与森林碳汇之间的关系, 重点分析阐述了菌根真菌对森林碳的输入、固定和排放的影响以及如何通过调整菌根真菌的群落结构和功能来增强森林的碳汇能力。并针对性地提出了发展建议及展望, 旨在对提高森林的碳汇能力和实现碳中和提供参考。通过深入研究菌根真菌对森林碳汇的影响及展望, 可为未来的理论和实践研究提供新的方向。

关键词: 林木; 菌根真菌; 森林碳汇

中图分类号: S718.81

文献标识码: A

文章编号: 2096-4900(2025)04-0099-04

Impact and Outlook of Mycorrhizal Fungi on Forest Carbon Sink

LIU Yijiang

(Tieling Forest Resources Protection Center, Tieling 112000, Liaoning)

Abstract: With the intensification of global warming, a deep understanding of the role and mechanism of forests in the carbon cycle plays a crucial role in achieving the goal of carbon peak and carbon neutrality. In forest ecosystems, interactions between mycorrhizal fungi and trees have significant effects on forest carbon sink. In order to explore the influence of mycorrhizal fungi on forest carbon sink, this study used mycorrhizal fungi as a bridge to explore the relationship between mycorrhizal fungi and forest carbon sink from a systematic perspective. It focuses on how mycorrhizal fungi affect the input, fixation and emission of forest carbon as well as how to enhance the forest carbon sink capacity by adjusting the community structure and function of mycorrhizal fungi. Through the in-depth analysis and prospect, it can provide a new direction for the future theoretical and practical research.

Key words: forest trees; mycorrhizal fungi; forest carbon sink

自工业革命以来, 大气中温室气体的浓度逐步攀升, 这一现象导致了全球平均气温持续上升, 引起了全球气候的变化, 更对生态环境、食物安全和人类福祉造成了严重威胁。如何在大气中对 CO₂ 浓度进行有效管理, 并减轻温室效应, 已经成为亟待解决的问题。在陆地生态系统中, 森林是最大的碳存储场所, 具有极高的碳吸收能力^[1]。森林碳汇主要是通过植物的光合作用以及森林土壤的固碳作用来吸收空气中的碳, 并固定在植被与土壤当中, 从而减少大气中 CO₂ 浓度。其光合作用的过程是通过绿色植物利用叶绿素等光合色素, 在可见光的照射下, 将 CO₂ 和水转化为储存着能量的有机物。固碳过程是通过光合作用, 植物将空气中的 CO₂ 固定在

自身的生物量中, 包括树叶、树枝、树干和根系等。随着树木的生长, 其生物量不断增加, 也就不断地从大气中吸收并储存碳。森林是陆地生态系统中最大的碳库, 在降低大气中温室气体浓度、减缓全球气候变暖中, 具有十分重要的作用。

森林碳汇中的碳汇是指森林通过光合作用吸收 CO₂, 并将其转化为有机物质存储起来的过程。因此, 森林碳汇表示森林在生态系统中扮演着重要角色, 能够吸收大量的 CO₂, 减缓全球气候变化。据研究表明, 85% 的陆地植物在其生命周期的某些或全部时期都与菌根存在联系^[2]。在森林的生态环境里, 菌根真菌与树木的相互作用是十分常见的现象。植物与菌根真菌的相互作用主要体现在互利共生、植

收稿日期: 2024-02-28

作者简介: 刘一江 (1987—), 女, 本科, 助理工程师, 主要研究方向: 林业改革发展。E-mail: cz13945136819@163.com。

物生长促进、提高抗病能力、提供食物资源等方面。

菌根的作用主要是扩大根系吸收面,增加对原根毛之外的元素的吸收能力。这是因为菌根真菌菌丝体与寄主植物组织相通,其不仅从植物中吸收有机物质,同时又从土壤中吸收养分、水分供给植物。菌根真菌的寄主约2 000种,主要为木本和草本植物。某些菌根具有合成的能力,能提高植物的抗病能力,促进植物良好生长。菌根是土壤中某些真菌与植物根系形成的共生体,能帮助植物更好地吸收养分和水分,增强植物的抗逆性,因此,当前较多的研究多集中在对菌根真菌促进土壤生态系统碳循环、菌根真菌自身的碳汇功能上^[3]。与菌根真菌相互作用的植物种类繁多,常见的有小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)、松树、青甘杨(*Populus przewalskii*)、兰花(*Cymbidium goeringii*)等。但还没有明确地揭示菌根真菌与森林碳汇之间的直接联系,因此,深入研究不同种类的菌根与森林碳汇的相互作用,以及合理量化森林碳汇成为当前亟待研究的方向。

1 菌根真菌在森林碳汇中的复杂作用

1.1 菌根真菌对森林生态系统碳循环的影响机理

森林生态系统构成了一个庞大的碳储存库,其输入、固定和排出共同组成了森林生态系统碳循环的基本过程^[4]。森林中的植物通过光合作用将CO₂和水转化为葡萄糖和氧气,其中光能被植物吸收,其产物部分用于自身生长,部分通过根系输入土壤中,并利用气孔中的CO₂和根部吸收的水进行化学反应转化成有机物固存在土壤中;除了光合作用,森林中的植物和土壤中的微生物还通过生物呼吸作用释放CO₂。植物通过呼吸作用分解葡萄糖并释放能量,而微生物通过分解有机物进行类似的过程。

菌根真菌是土壤中一类特殊的微生物,通常被分类为外生菌根、水晶兰(*Monotropa uniflora*)类菌根等七个主要类别。在森林里,绝大多数的植物根系都能与土壤中的真菌生成菌根而形成共生关系,这些植物会向菌根真菌输送它们自己合成的部分碳水化合物,这些碳水化合物是菌根真菌生长和发育所必需的碳源。

菌根真菌有能力与树木的根系形成紧密的结合。它们既可以从宿主植物中获取所需的营养以促进其自身的代谢过程,同时也能帮助宿主植物从土壤中获得必要的矿质营养,进而有助于宿主的生长

和发育^[5]。菌根真菌起到了桥梁的作用,它连接了地面的植物和地下的生物,成为有机碳从植物传输到土壤的主要载体。在全球的生态环境中,这些因素共同推动了物质的循环、能量的流转以及信息的交流。显然,菌根真菌通过与植物根系建立共生关系,协助植物吸收土壤中的水分和矿质营养,同时将光合作用的产物输送到地下,从而促进土壤有机质的积累,这是地下生态过程的一个重要推动力。除此之外,菌根真菌还具有改变树木形态结构和体内营养成分的能力,从而提升树木对水和营养的吸收效率,同时也能调整根系内的微生物群落,以增强森林对碳的输入、排出和稳定性^[6]。

1.2 菌根真菌促进森林土壤碳循环过程

菌根真菌相较于非菌根植物,将3%~36%的碳排放分配到土壤的地下部分,这在森林土壤的碳输入和排放过程中起到了至关重要的作用:

1.2.1 菌根真菌对碳输入的影响

直接影响:植物通过光合作用产生的物质主要是通过菌丝的分泌物和菌根的根部进入土壤的^[7],占植被净初级生产的2%~17%的碳是由其小分子分泌物产生的,并且这些分泌物有能力改变植物根系中微生物群落的结构。生长在丛枝菌根根部的球囊霉素,碳含量高达3~6 g·kg⁻¹,这无疑使其成为森林土壤中的主要碳源。它能够有效地固定土壤中的重金属,增强植物对抗重金属毒性的能力。

间接影响:菌根真菌的功能也间接地反映在凋落物的性质上。接种菌根真菌能够显著提升树苗的比叶面积和比根长度^[8],具有较大比叶面积和更高养分含量的凋落物具有更高的质量,这使得它们更容易被分解。

1.2.2 菌根真菌对碳排放的影响

土壤中有有机碳的分解以及植物地下部分的自然呼吸过程揭示了菌根真菌对碳排放的影响^[9]。其一,对土壤中有有机碳的影响。土壤中存储的碳储量高达1 500~2 400 Pg,而碳排放大约是植被碳排放的两倍。对于陆地生态系统而言,存储的碳形成庞大的碳库,排放CO₂构成最重要的碳通量,两者此消彼长在碳平衡中扮演着不可或缺的角色。其二,对植物的地下部分对其自养呼吸产生影响。经植物光合作用固定的碳,其中很大一部分转移到植物根系或者其他地下微生物中,最终转化为有机质存储于土壤中。

尽管森林土壤碳排放主要由菌根真菌等微生物参与，但关于菌根真菌对森林土壤碳排放影响过程的相关研究依然并不多见。现阶段，菌根真菌对森林土壤碳排放的影响主要是通过改变植物碳分配和影响土壤微生物活性这两种方式对土壤碳排放产生影响^[10]。并且这两种方式之间存在一定的差异性。这种差异主要表现在以下几个方面：首先，由于植物根系和菌丝的不同，致使根系分泌物的种类不同，其分泌速度也存在差异，这进一步影响了土壤中碳的生成过程；其次是各种林地的土壤中的微生物群落，主要包括细菌、真菌、放线菌、绿弯菌门以及其他微生物类群。在生态系统中，这些微生物参与分解土壤有机质和植物凋落物以及碳循环、氮循环等。此外，土壤微生物群落还受到气候、土壤性质、植被类型等因素影响，并且随着时间的推移和环境条件的变化，微生物群落的组成和功能也会发生变化，从而对土壤中的碳造成一定影响。菌根真菌通过改变土壤微生物群落结构，间接影响土壤有机物质的分解速率和碳排放。例如，某些与菌根真菌共生的细菌可能具有更强的分解复杂有机物质的能力，从而加速土壤碳排放。不同种类的菌株能够直接或间接地进入土壤并形成菌根真菌群落，侵入根系形成不同的附属结构从而改变土壤碳循环过程，但目前关于不同种类的菌根如何影响土壤碳排放的研究较少。

1.2.3 菌根真菌增加森林植被碳储量

科学研究已经证明，在特定条件下，菌根真菌能够显著影响植物生长和碳吸收过程，接种了菌根真菌的植物，其叶子的面积、叶绿素的含量、光合作用的速度以及光合产物都有了明显的增长^[11]。菌根真菌之所以受到青睐，是因为它们可以增强植物根系对碳水化合物的吸收能力，提高土壤中微生物对碳的利用效率。这样，更多的光合产物可以被分配到植物的地上部分，有助于宿主更好地吸收营养元素，进而促进树木的生长、碳的分配和运输。例如混合接种丛枝菌和外生菌的西南桦 (*Betula alnoides*)，其叶绿素含量、净光合速率、气孔导度均明显提高^[12]。因此，选择与树木高度协同的菌根真菌是获得优势树种、提高植被碳储量的关键。

2 存在的问题与解决方法

就目前而言，菌根真菌对森林碳汇功能和内在作用机理的认知还不够系统和深入，尤其是全球变

化对森林土壤碳汇功能的影响研究较为缺乏。在空间尺度方面，其影响较为复杂，主要是研究地点、森林类型、树种特性等方面存在明显差异。在时间尺度上，由于森林生态系统中树木、菌根真菌及其功能存在耐受力 and 适应性，因此全球变化对于森林生态系统的影响在短期内难以准确体现。

针对以上问题，应加强菌根类型对森林碳汇功能的研究。通过长期定位试验，研究树种多样性与森林生态系统功能之间的关系。其次需要对菌根真菌多样性的研究方法与技术进一步加强和提升，提高三代测序技术及测序精度，使其更广泛地应用于菌根真菌多样性的检测，使菌根真菌物种分子鉴定的准确性有较大提高，有助于甄别森林生态系统碳循环功能的真菌物种或类群。同时还要重视菌根真菌的形态学研究，重视发展其研究的方法与技术。

3 展望

菌根真菌在森林生态系统中扮演着多重角色，能够通过自身的碳汇功能和对碳循环的促进作用进行固碳增汇，具有巨大的碳汇潜力，这对于维护森林生态系统的平衡和稳定具有至关重要的作用。

3.1 菌根真菌与森林碳汇的合作关系

近年来，关于菌根真菌如何影响生态系统碳循环的研究呈现出飞速的进展。然而，对于菌根真菌与森林碳汇的合作机制缺乏深入研究。因此，未来的研究应该更多地关注这两者间的互动关系^[13]。首先，必须研究菌根真菌、植物以及微生物之间的合作效益，尽可能地提高森林碳汇量。其次，面对森林生态系统的环境变化，研究菌根真菌随环境的变化，这样可以更好地利用菌根真菌的生态效应，科学地管理森林碳汇。

3.2 关于碳汇的评价标准

菌根真菌有助于森林大量储存碳元素，从而成为森林中重要的碳汇物种。目前，在评估森林碳汇时，是否需要考虑菌根真菌的生物量，这是一个值得进一步研究的问题。考虑引入菌根真菌作为碳汇的评估指标时，这将使得碳汇的评估变得更为精确和科学，极大地增强了其可靠性和准确度。这是一个涉及多个方面的复杂系统工程，也可能对当前基于经济学的森林碳汇评估标准产生影响，并可能改变碳汇的计算方式。为了更精确地评估不同菌根真菌的碳汇效应，可以构建一个综合考虑侵染率数量

和密度等多个指标的碳汇计算模型。

4 总结

菌根真菌是植物中的关键微生物，它们的生物量和代谢活跃性对森林中碳的输入、固定和排放都有显著的影响。土壤和植被的固碳能力是大气碳库的三倍之多，而森林生态系统贡献了其中的45%。森林能够通过光合作用来吸收大气中的CO₂，并将其固定在树木、林下植被和土壤中，从而形成碳汇。未来，应合理利用菌根真菌，积极推动森林生态系统的保护和修复工作，切实提高森林面积和质量。

参考文献

- [1] 骆亦其, 夏建阳. 陆地碳循环的动态非平衡假说 [J]. 生物多样性, 2020, 28 (11): 1405-1416.
- [2] 高景. 丛枝和外生菌根森林土壤碳排放的差异和影响机制 [D]. 上海: 华东师范大学, 2021.
- [3] 张莉滢, 孟维珊, 王慧文, 等. 菌根真菌对林木碳素营养和森林碳汇的影响初探 [J]. 防护林科技, 2023 (4): 79-82.
- [4] 邹慧, 王春胜, 曾杰. 西南桦幼苗接种丛枝菌根真菌的生长与光合生理响应 [J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26 (4): 383-390.
- [5] 周国逸, 李琳, 吴安驰. 气候变暖下干旱对森林生态系统的影响 [J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2020, 12 (1): 81-88.
- [6] 苑海鹏, 叶云舒, 司皓, 等. 丛枝菌根真菌对植物逆境胁迫抗性及其次生代谢产物合成的影响 [J]. 生物技术通报, 2024, 40 (6): 45-56.
- [7] 孙忠林, 王传宽. 森林生态系统可溶性碳和颗粒碳通量 [J]. 生态学报, 2014, 34 (15): 4133-4141.
- [8] 赵佳宁, 梁韵, 柳莹, 等. 森林生态系统细根周转规律及影响因素 [J]. 植物学报, 2020, 55 (3): 308-317.
- [9] 李思慧, 朱天姝, 魏朝响, 等. 北京市森林碳储量核算与碳汇潜力预测研究 [J]. 环境科学与管理, 2024, 49 (1): 22-27.
- [10] 马星霞, 蒋明亮, 吕文华, 等. 竹材主要变色菌霉菌的生长特性研究 [J]. 林业科学研究, 2009, 22 (6): 819-823.
- [11] 贺金生. 中国森林生态系统的碳循环: 从储量、动态到模式 [J]. 中国科学: 生命科学, 2012, 42 (3): 252-254.
- [12] 张雄伟, 李刚, 董宽虎, 等. 山西主要草地类型土壤有机碳储量及其垂直分配特征 [J]. 中国草地学报, 2020, 42 (1): 141-146.
- [13] 王兴昌, 王传宽. 森林生态系统碳循环的基本概念和野外测定方法评述 [J]. 生态学报, 2015, 35 (13): 4241-4256.