

Study on the Impact of Soil Microbial Community Structure on Soil Fertility in Forest Ecosystems

Yiran Cai

Anhui Academy of Forestry, Hefei, Anhui, 230000, China

Abstract

The soil microbial community structure of forest ecosystems plays a crucial role in the formation and maintenance of soil fertility. By decomposing organic matter, microorganisms convert nutrients such as nitrogen, phosphorus, and potassium into forms that can be absorbed by plants, promoting nutrient cycling. Its metabolites can improve soil structure, enhance aeration and water retention performance. Some microorganisms can also secrete growth hormones to promote plant growth, inhibit pathogens, and maintain soil health. With the intensification of global climate change and human activities, the structural changes of soil microbial communities have an increasingly significant impact on forest soil fertility. This article aims to explore the impact mechanism of soil microbial community structure on soil fertility in forest ecosystems and propose corresponding research strategies

Keywords

forest ecosystem; Soil microbial community; Soil fertility; Ecological function

森林生态系统土壤微生物群落结构对土壤肥力的影响研究

蔡懿苒

安徽省林业科学研究院, 中国·安徽 合肥 230000

摘要

森林生态系统的土壤微生物群落结构在土壤肥力的形成和维持过程中起着关键作用。通过分解有机物, 微生物将氮、磷、钾等养分转化为可被植物吸收的形式, 促进养分循环。其代谢产物能改良土壤结构, 增强通气与保水性能。部分微生物还能分泌生长激素, 助力植物生长, 或抑制病原菌, 维护土壤健康。随着全球气候变化和人为活动的加剧, 土壤微生物群落的结构变化对森林土壤肥力的影响日益显著。本文旨在探讨森林生态系统中土壤微生物群落结构对土壤肥力的影响机制, 并提出相应的研究策略。

关键词

森林生态系统; 土壤微生物群落; 土壤肥力; 生态功能

1 引言

森林生态系统的土壤不仅是植物生长的基础, 还通过其复杂的微生物群落在营养循环、土壤结构稳定性等方面发挥着重要作用。近年来, 随着生态环境变化的加剧, 特别是森林土壤中微生物群落结构的变化, 土壤肥力的退化问题逐渐凸显。因此, 探究森林土壤微生物群落结构如何影响土壤肥力的形成和维持, 对于森林生态保护及土壤管理具有重要的理论意义和实践价值。

2 土壤微生物群落结构与土壤肥力的关系

2.1 微生物群落多样性与土壤肥力的关系

微生物多样性是土壤生态系统健康和稳定的重要标志。

随着微生物群落多样性的增加, 土壤生态系统能够更好地应对环境变化和外界干扰, 表现出更强的稳定性和韧性。多样化的微生物群落在土壤中发挥着协同作用, 它们通过不同的代谢路径共同促进土壤有机质的分解, 提高有机物的矿化率, 从而加速土壤中的养分释放。特别是细菌、真菌、放线菌等多类微生物的相互作用, 有助于矿质营养元素的转化和再循环。微生物多样性不仅提高了土壤的养分供应能力, 还能促进土壤有机质的积累, 从而提高土壤的肥力^[1]。

2.2 微生物功能特性与土壤肥力的关系

微生物群落的功能特性是土壤肥力维持的关键因素, 不同类型的微生物在土壤中扮演着不同的生态角色, 直接影响土壤的养分供应和植物生长。以氮固定细菌为例, 它们能够通过生物固氮作用, 将大气中的氮气转化为氨或硝酸盐等可被植物吸收的形式, 这一过程对植物的氮素需求至关重要, 尤其在缺乏化肥的生态系统中, 氮固定细菌提供了一个持续的氮源, 减少了对外部氮肥的依赖。同时, 土壤中还有

【作者简介】蔡懿苒 (1989-), 女, 中国安徽合肥人, 硕士, 助理研究员, 从事生态学研究。

大量的有机物分解菌，它们通过分解植物残体、动物尸体及其他有机物，将其中的有机氮、磷、钾等矿质元素转化为植物易于吸收的无机形式，从而提高土壤的肥力。因此，微生物群落的功能特性对土壤肥力的维持具有深远影响，不同微生物的功能互补作用使得土壤肥力得到有效提升，并帮助植物在自然环境中健康生长。

2.3 微生物群落的相互作用与土壤肥力的影响

微生物群落中的不同微生物种类通过相互作用形成了复杂的生态网络，这些相互作用可以是竞争、共生、协同等多种形态，彼此间的关系促进了土壤生态系统的功能稳定性与高效性。在这种相互作用中，微生物种类间的互补性作用尤为突出，能够增强土壤的养分供应能力。例如，某些真菌和植物根系之间的共生关系，形成了所谓的“菌根”系统。真菌通过其广泛的菌丝网络与植物根系紧密连接，扩大了根系的吸收表面积，帮助植物更有效地从土壤中吸收矿质元素，尤其是磷、氮等植物生长所必需的养分。这种共生关系不仅提高了植物对养分的获取效率，还促进了植物的生长和健康发展^[2]。

2.4 土壤微生物群落结构对土壤肥力的影响

对养分循环与转化的影响：详述固氮菌、硝化细菌、反硝化细菌等在氮素循环中的作用；说明微生物通过分泌有机酸等对磷素转化的影响；阐述微生物分解有机质释放养分的过程和机制。

对土壤结构的改良作用：论述菌根真菌等如何通过菌丝体缠绕土壤颗粒形成团聚体，增加土壤稳定性；介绍微生物活动如何增加土壤孔隙度，改善通气性和透水性。

对植物生长的促进作用：解释菌根真菌扩大植物养分吸收范围的原理；说明根际微生物产生植物激素对植物根系生长和发育的促进作用。

对有害微生物的抑制作用：分析有益微生物与有害微生物的竞争关系，以及有益微生物分泌抗菌物质对有害微生物的抑制效果，强调其对维持土壤生态平衡和土壤肥力的意义。

3 影响森林土壤微生物群落结构的因素

3.1 土壤理化性质的影响

土壤的理化性质对微生物的生长和群落组成有着重要的影响，具体包括 pH 值、温度、湿度和有机质含量等因素。土壤 pH 值是影响微生物生长的关键因素之一。酸性土壤中，酸性环境有利于耐酸微生物的生长，如一些真菌和某些厌氧细菌，它们能够适应低 pH 条件并在其中繁殖。而在碱性土壤中，碱性微生物，如嗜碱细菌，会占据主导地位，这些微生物能够在高 pH 环境下进行代谢活动，参与土壤的有机质分解与养分循环。土壤温度对微生物的活性也有显著影响。一般来说，适宜的温度能够促进微生物的代谢活动，提高其生长速度，而过高或过低的温度则会抑制微生物的活性。湿

度是影响微生物生长的另一重要因素，过低的湿度会导致微生物失水死亡，而过高的湿度则可能导致缺氧条件，抑制某些需氧微生物的生长。因此，土壤的这些理化性质共同作用，塑造了一个特定的微生物生态环境。

3.2 植被类型与土壤微生物的关系

不同植被类型对土壤微生物群落结构具有显著影响，主要通过植被的根系分泌物、落叶、枯枝和其他有机质来源来提供不同种类的营养物质。这些有机物质在分解过程中为微生物提供了丰富的碳源、氮源和其他元素，影响土壤中的微生物种类和丰度。森林、草原和农田等不同植被类型通过各自特有的生态过程，塑造了不同的微生物生态环境。例如，针叶林土壤由于常年积累大量的针叶和酸性有机物，土壤呈现较强的酸性环境，这种环境有利于某些耐酸微生物的生长，而抑制了其他类型微生物的繁殖。相比之下，阔叶林土壤由于落叶分解后释放出的营养物质较为丰富，且土壤 pH 相对较中性或弱酸性，这为多样化的微生物群落提供了更为宽松的生长条件^[1]。

3.3 人为活动的干扰

人类活动对森林土壤微生物群落的影响日益显著，农业耕作、森林砍伐和城市化等活动通过改变土壤环境，深刻影响微生物的生长和群落结构。首先，农业耕作通过频繁的耕翻操作，破坏了土壤的自然结构，压实了土壤，减少了土壤的透气性和水分保持能力，进而影响了土壤微生物的生存条件。耕作过程中，土壤中有机质的积累也减少，微生物的栖息地被破坏，从而降低了微生物多样性，改变了微生物群落的组成。森林砍伐则对土壤微生物群落产生更为直接的影响。树木根系分泌物和落叶等有机质是森林土壤微生物的重要营养来源，森林砍伐导致这些有机质的减少，土壤的碳源和养分供应也随之减少，从而使得微生物群落结构发生迅速变化。一些适应贫瘠环境的微生物可能会占据主导地位，其他对有机质需求较高的微生物则逐渐减少。重金属如铅、铜、镉等能直接抑制微生物的生长和繁殖，而农药则选择性地杀灭某些敏感微生物，导致微生物群落的单一化。这些污染物的积累使得土壤生态系统的稳定性和微生物的多样性受到威胁，进一步影响了土壤的生态功能，如有机质分解、养分循环等。

4 森林土壤微生物群落研究的策略与方法

4.1 多尺度生态学分析

在进行微生物群落研究时，从不同尺度（如微观、景观和区域尺度）进行分析，能够提供更全面、系统的认识。微观尺度研究侧重于单一微生物种类的功能作用，帮助科学家深入了解微生物在土壤中的具体生理和生态功能。通过对特定微生物种类的基因、代谢过程、环境适应性等方面的研究，能够揭示这些微生物如何直接参与土壤有机质的分解、养分循环及植物根际的健康维护等关键功能。这对于理解单

一物种如何影响土壤健康和植物生长至关重要。景观尺度的研究则侧重于土壤微生物群落不同空间尺度上的分布和变化规律。通过分析土壤样本在不同景观单元（如森林、草地、农田等）中的微生物群落结构，可以揭示环境异质性对微生物群落多样性和功能的影响。这种尺度的研究能够提供关于微生物群落如何响应土地利用变化、气候波动等环境因子的空间模式。将微观、景观和区域尺度的研究结合起来，通过多尺度整合分析，能够更全面地评估微生物群落在土壤肥力、养分循环和生态系统功能中的作用，从而为土壤管理和农业可持续发展提供科学依据^[2]。

4.2 功能基因组学与高通量测序技术

功能基因组学和高通量测序技术（如 16S rRNA 基因测序和宏基因组学分析）为土壤微生物群落研究提供了强有力的技术支持，能够全面揭示微生物群落的组成及其潜在功能。16S rRNA 基因测序技术通过分析微生物的 16S rRNA 基因序列，能够对土壤中的细菌和古菌进行高效、准确的分类，并揭示微生物种群的多样性。这一技术不仅可以识别微生物的种类，还能提供其在生态系统中可能发挥的角色，例如分解有机物、氮固定、病原抑制等^[1]。宏基因组学分析则进一步扩大了研究的视野，它不仅能分析微生物群落的组成，还能够关联功能基因，揭示微生物在特定环境下的代谢功能。这使得研究人员可以获得微生物群落在土壤肥力、污染降解、病害防治等方面的潜在作用^[2]。

4.3 微生物－植物互作研究

土壤微生物与植物根系的相互作用在维持土壤肥力方面起着至关重要的作用。植物根系通过分泌有机酸、氨基酸和糖类等物质，为土壤中的微生物提供了丰富的营养来源。这些微生物则通过分解有机质、转化矿质元素等方式，帮助植物获取土壤中的养分，促进植物生长。同时，根际微生物群落的多样性与稳定性也直接影响植物的健康和土壤的肥力水平^[7]。为了深入了解微生物与植物根系的互作机制，研究者常采用同位素示踪技术和根际微生物群落分析等方法。通过同位素示踪，可以追踪植物吸收的养分来源，揭示微生物如何通过氮固定、磷溶解等途径为植物提供养分。研究表明，某些微生物群落能够通过共生关系，提升植物对土壤中氮、磷、钾等关键营养元素的吸收效率，从而提高土壤肥力，促进土壤生态系统的可持续性。

4.4 抑制有害微生物

竞争作用：有益微生物在土壤中占据生态位，与有害微生物竞争养分和生存空间，抑制有害微生物的生长和繁殖，减少土壤中病原菌的数量，降低植物病害的发生风险，

维持土壤生态系统的平衡，有利于土壤肥力的保持和提高。

分泌抗菌物质：一些微生物能够分泌抗生素、抑菌素等抗菌物质，抑制或杀死土壤中的有害微生物，保护植物根系健康，促进植物生长，间接对土壤肥力产生积极影响。

5 结语

土壤微生物群落结构在森林生态系统中对土壤肥力的影响机制复杂且深远。微生物群落的多样性、功能特性及其相互作用共同决定了土壤的养分循环和植物生长所需的土壤肥力。通过分析土壤理化性质、植被类型及人为活动等因素对微生物群落的影响，可以进一步理解微生物在土壤肥力维持中的关键作用。未来的研究应注重多尺度整合分析与现代基因组学技术的应用，以便全面揭示土壤微生物群落的功能与土壤肥力的关系，并提出相应的生态管理策略。

研究区域相对有限，未能全面涵盖各类森林生态系统的差异；对微生物与土壤肥力之间复杂的动态互作机制，在时间尺度上的研究还不够深入。后续研究可扩大研究范围，纳入不同气候带、植被类型的森林，同时利用长期定位监测，更精准地把握二者随时间的变化规律。

参考文献

- [1] Meng Xiao, Shengguo Jiang, Jinbiao Li, Wenping Li, Pengxiao Fu, Guangming Liu, Jinlin Chen. Synergistic effects of bio-organic fertilizer and different soil amendments on salt reduction, soil fertility, and yield enhancement in salt-affected coastal soils[J]. Soil & Tillage Research, 2025, 248: 106433-106433.
- [2] Zhanjun Liu, Xiaohu Yuan, Zhenxing Zhang, Xueyun Yang, Chao Ai, Zhaohui Wang, Qinglu Fan, Xinpeng Xu. Revisiting potassium-induced impacts on crop production and soil fertility based on thirty-three Chinese long-term experiments[J]. Field Crops Research, 2025, 322: 109732-109732.
- [3] 赵丽娜. 植物资源输入变化对森林土壤线虫能量通量和微生物群落的影响[D]. 河南大学, 2021.
- [4] 刘岳, 刘旭军, 宋雨婷, 列志旸, 周曙屹, 苏炜, 刘菊秀. 氮沉降和降水格局变化对南亚热带森林土壤微生物群落的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(03): 617-623.
- [5] 李益, 冯秀秀, 赵发珠, 郭垚鑫, 王俊, 任成杰. 秦岭太白山不同海拔锐齿栎林土壤微生物群落的变化特征[J]. 林业科学, 2021, 57(12): 22-31.
- [6] 郭超, 王霖娇. 氮沉降对森林生态系统土壤微生物、酶活性以及细根生产与周转的影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3730-3741.