

森林培育中土壤微生物群落结构对苗木生长的影响机制

曹长春

沂源县大张庄镇人民政府 山东 淄博 256114

摘要: 在森林生态系统中,土壤不仅是植物生长的物理基质,更是一个蕴含着极其复杂且高度动态的微生物世界的“黑箱”。随着高通量测序等分子生物学技术的发展,土壤微生物群落作为连接土壤-植物互作的核心枢纽,其结构与功能对森林培育成效的影响日益受到关注。本文系统综述了森林培育背景下土壤微生物群落(包括细菌、真菌、放线菌及原生动物等)的基本组成与演替规律,并深入探讨了其通过养分循环、共生互惠、病害抑制及信号传导等多重途径影响苗木生长的内在机制。文章进一步分析了森林经营措施(如整地方式、施肥、间伐及混交模式)对土壤微生物群落结构的扰动效应,并指出了当前研究中存在的挑战与未来发展方向。研究表明,精准调控土壤微生物群落结构,构建有利于苗木健康生长的“根际微生物组”,是实现森林高质量、可持续培育的关键科学路径。

关键词: 森林培育;土壤微生物群落;苗木生长;根际微生物组;共生互惠;养分循环

引言

森林是陆地生态系统主体,在涵养水源、固碳释氧等方面作用关键。全球气候变化下,如何高效可持续培育森林、提升林分质量与生产力,成为林业科学核心议题。传统森林培育理论多关注宏观因子,对地下微观世界关注不足。但现代生态学表明,土壤是高度活跃的生命网络,由大量微生物构成土壤微生物群落,其结构决定生态功能。森林培育初始阶段,苗木根系与周围土壤环境的互动,是决定其能否成林的关键,而互动核心在根际这一土壤微域,它是植物与微生物交换物质、能量和信息的“战场”与“市场”。所以,理解土壤微生物群落结构对苗木生长需求的作用,进而调控其发育,对革新森林培育理念、发展精准育林技术意义重大。

1 森林土壤微生物群落的基本组成与特征

森林土壤微生物群落是一个极其复杂的生态系统,其组成和丰度受多种因素影响,呈现出显著的空间异质性和时间动态性。

1.1 主要功能类群

森林土壤中的微生物世界由多个关键的功能类群共同构筑。其中,细菌以其庞大的数量和惊人的代谢多样性构成了群落的基础,变形菌门、酸杆菌门、放线菌门和拟杆菌门等类群在有机质分解、氮素转化以及磷钾活化等核心生物地球化学循环中扮演着不可或缺的角色。紧随其后的是真菌,尤其是子囊菌门和担子菌门,它们不仅是强大的有机物分解者,更是形成外生菌根和丛枝菌根等共生体的关键伙伴,这种共生关系极大地扩展了植物根系的吸收能力,对森林生态系统的养分获取至关重要。放线菌则以其独特的生理特性,在分解纤维素、几丁质

等难降解有机物方面表现出色,同时其产生的多种抗生素赋予了它们抑制土传病原菌的天然能力,为土壤健康筑起了一道化学防线^[1]。此外,古菌在特定氮循环过程和极端环境中发挥作用,而原生动物和线虫等微型动物则通过捕食作用调控着细菌和真菌的种群动态,并促进了养分的矿化与释放,共同维系着这个地下生态网络的平衡与活力。

1.2 群落结构的动态演替

在森林培育的不同阶段,土壤微生物群落结构会发生显著变化。造林初期,由于植被覆盖度低、凋落物输入少,土壤环境相对贫瘠,微生物群落往往以机会主义的r-对策者(如某些变形菌)为主,其特点是生长迅速、代谢活跃但竞争力弱。随着林龄的增长,凋落物和根系分泌物不断输入,土壤有机质积累,环境趋于稳定,群落结构逐渐向以K-对策者(如酸杆菌、部分子囊菌)为主的成熟状态转变,这些微生物生长较慢但竞争力强,能更有效地利用有限资源。此外,不同树种因其独特的根系分泌物谱,会招募和富集特定的微生物类群,形成具有“树种特异性”的根际微生物组。

2 土壤微生物群落影响苗木生长的核心机制

土壤微生物群落通过一系列直接和间接的途径,深刻地影响着苗木的生长、发育和抗逆能力。

2.1 养分供给与循环:微生物驱动的“地下工厂”

土壤微生物群落对苗木生长最根本的影响在于其作为“地下工厂”所驱动的营养供给与循环过程。在氮素匮乏的环境中,固氮微生物扮演着至关重要的角色,无论是与豆科树种形成专性共生的根瘤菌,还是在非豆科树种根际自由生活或联合生活的自生/联合固氮菌,都能

将大气中植物无法直接利用的惰性氮气转化为可被吸收的氨态氮，为苗木的蛋白质合成和生长提供氮源保障。与此同时，硝化细菌则负责将氨进一步氧化为硝酸盐，这一过程不仅满足了偏好硝态氮树种的营养需求，也完成了氮素形态的转化。除了氮素，磷和钾的有效性同样是限制苗木生长的关键因素，而解磷菌和解钾菌通过分泌有机酸、质子或特定酶类，能够有效溶解土壤中被铁、铝或钙固定的难溶性磷酸盐和硅酸盐矿物，将其活化为可溶态的磷和钾离子，极大地缓解了苗木在酸性或石灰性土壤中的养分胁迫。此外，腐生微生物对凋落物和死亡根系的持续分解，将其中锁闭的有机养分矿化为无机离子，完成了生态系统内部的养分再循环，为苗木的长期、稳定生长提供了源源不断的“食物”供应。

2.2 共生互惠：构建“地下共生网络”

超越单纯的分解者角色，许多土壤微生物与苗木建立了紧密的共生互惠关系，共同构建了一个高效的“地下共生网络”。其中，菌根共生是森林生态系统中最普遍且最具影响力的互惠形式。外生菌根真菌主要与松、栎、桦等针阔叶树种形成共生体，其菌丝体在根尖外部形成致密的菌鞘，并向内侵入皮层细胞间隙构建哈蒂氏网，这一结构极大地扩展了根系的吸收表面积，使宿主能够从广阔的土壤空间乃至有机质中直接高效地吸收水分、磷、氮（特别是有机氮如氨基酸）等关键资源，并能有效抵御重金属毒害和干旱等非生物胁迫^[2]。相比之下，丛枝菌根真菌则与杨、柳、桉等多数阔叶树种结盟，其菌丝穿透根皮层细胞内部形成高度分支的丛枝结构，作为双方进行养分交换的精密“交易市场”，尤其在磷的吸收方面效率极高，同时还能通过分泌球囊霉素相关土壤蛋白来改善土壤团粒结构，增强苗木的抗旱能力。对于豆科树种而言，与根瘤菌形成的根瘤共生则是一种更为专一的氮素工厂，根瘤菌在根瘤内进行高效的生物固氮，几乎可以满足宿主植物全生命周期的氮素需求，使其具备了在极度贫瘠土地上成功造林的独特优势。

2.3 生物防治：构筑“地下免疫防线”

一个结构健康、功能健全的土壤微生物群落本身就是一道强大的天然屏障，为苗木构筑起坚固的“地下免疫防线”。有益微生物通过多种策略协同作用，有效抑制土传病原菌的入侵与蔓延。首先，它们与病原菌激烈地争夺根际有限的空间和养分资源，特别是通过产生高亲和力的铁载体来螯合土壤中的铁离子，使病原菌因缺铁而生长受限。其次，许多根际促生细菌和放线菌能够合成并分泌抗生素、溶菌酶、几丁质酶等一系列抗菌物质，这些化学武器可以直接攻击病原真菌的细胞壁或抑制其

关键代谢过程，从而达到杀菌或抑菌的效果。更为精妙的是，某些特定的有益微生物还能作为一种“疫苗”，通过诱导系统抗性（ISR）来激活植物自身的防御体系。它们通过根系被植物感知后，能够触发茉莉酸和乙烯等防御信号通路，使植物整体进入一种“预警”状态，从而在真正的病原菌入侵时能够更快、更强地启动防御反应，显著提升苗木的整体抗病能力。

2.4 激素调节与信号传导：微生物的“化学语言”

植物与微生物之间的互动远不止于物质交换，更是一场持续而精密的“化学语言”对话。许多根际促生细菌能够直接合成植物生长素（IAA）、赤霉素（GA）和细胞分裂素（CTK）等关键植物激素，并将其释放到根际环境中。这些外源激素被苗木根系吸收后，能够直接刺激根系的伸长、促进侧根和根毛的大量形成，从而在物理上极大地扩大了根系的吸收表面积，为地上部分的旺盛生长奠定了坚实的基础。这场对话是双向的：植物根系会主动向土壤中分泌黄酮类化合物、糖类、氨基酸等多种信号分子，这些物质如同精心设计的“邀请函”，能够特异性地吸引对其有益的微生物向根际区域聚集^[3]。作为回应，这些被招募的微生物也会释放出自身的信号分子，如脂几丁寡糖（LCOs）或短链脂肪酸（SCFAs），这些信号被植物根系上的受体识别后，会触发一系列复杂的生理生化级联反应，精确地协调共生关系的建立、维持乃至功能的优化，确保双方在互惠合作中实现共赢。

3 森林经营措施对土壤微生物群落的扰动效应

人类的森林经营活动不可避免地会改变土壤物理、化学和生物环境，从而对微生物群落结构产生深远影响。

3.1 整地与造林

造林前的整地（如穴状、带状、全面整地）会破坏原有的土壤结构和植被，短期内导致微生物生物量下降，群落结构失衡。然而，合理的整地可以改善土壤通气性和透水性，为后续引入的有益微生物创造有利条件。选择携带特定功能微生物（如固氮菌、菌根真菌）的容器苗进行造林，可以加速构建有利于目标树种生长的根际微生物组。

3.2 施肥管理

施肥是森林培育中常用的增产措施，但其对微生物的影响具有两面性。适量施用有机肥（如堆肥、绿肥）能显著增加土壤有机质含量，促进微生物多样性和活性，特别是对腐生真菌和细菌的增殖有积极作用^[4]。然而，长期过量施用化肥，尤其是氮肥，会导致土壤酸化，抑制对酸敏感的微生物（如AM真菌），并可能打破原有的微生物平衡，甚至诱发土传病害。

3.3 抚育间伐

间伐通过调整林分密度,改变了林内的光照、温度和湿度等微气候条件,进而影响凋落物的产量和质量。适度间伐通常能增加林下光照,促进灌草生长,增加凋落物多样性,从而有利于土壤微生物群落的丰富度和功能冗余。但过度间伐可能导致水土流失,反而对微生物栖息地造成破坏。

3.4 树种配置与混交

营造混交林是模拟自然森林、提升生态系统稳定性的有效途径。不同树种的根系分泌物和凋落物化学性质各异,能支持更多样化的微生物类群共存。例如,将固氮树种(如桉木)与需氮量大的用材树种(如杉木)混交,前者通过固氮作用和根系分泌物改善土壤氮素状况,促进后者的生长,同时其根际微生物组也能为邻近树种提供间接益处。这种“正关联”效应是混交林生产力高于纯林的重要原因之一。

4 研究挑战与未来展望

尽管对土壤微生物群落与苗木生长关系的认识已取得显著进展,但仍面临诸多挑战。高通量测序虽揭示大量相关性,但确定真正驱动苗木生长的关键功能微生物及其作用机制,需结合多组学技术与严格控制实验验证。微生物群落的功能冗余特性,使得仅关注物种组成变化难以预测生态系统功能,未来需更多聚焦功能基因表达和代谢通量。此外,实验室研究成果向野外复杂环境的应用与验证存在巨大鸿沟,需发展更贴近实际的原位研究方法。基于此,未来研究应聚焦精准微生物组工程,开发定制化微生物接种剂用于困难立地造林或退化林地修复;将土壤微生物群落指标纳入森林立地质量评价和经营方

案制定,实现精准化、智能化育林;深入研究全球变化背景下,气候变化和人为干扰对森林土壤微生物-苗木互作网络的长期影响,为预测和应对未来森林健康风险提供科学支撑。

5 结语

土壤微生物群落是森林培育系统中一个隐秘却至关重要的“引擎”。其结构的优劣直接决定了土壤的健康状况和生态功能的发挥,进而通过养分供给、共生互惠、生物防治和信号传导等多重机制,深刻地影响着苗木的定植、生长、发育和抗逆能力。森林经营措施通过对土壤环境的改造,间接地重塑了这一地下微生物世界。因此,未来的森林培育不应仅仅着眼于地上部分的管理,更应将目光投向脚下这片充满生机的土壤。通过深入解析土壤微生物群落的构建规律与功能机制,并在此基础上发展微生物组调控技术,我们有望开启一个更加高效、生态和可持续的森林培育新时代,让“看不见的地下世界”成为支撑“看得见的绿水青山”的坚实根基。

参考文献

- [1]王好才.不同时空尺度下土壤微生物群落及其代谢功能对森林恢复方式的响应机制[D].西南大学,2025.
- [2]郑发辉,饶德军,杨衍辉,等.森林土壤碳库与微生物群落的关系[J].南方林业科学,2024,52(02):70-74.
- [3]安怡凝.森林和农田土壤微生物菌群对土壤健康的影响及调控机制[D].西北农林科技大学,2025.
- [4]刘雅静,邢华,吴宪,等.森林生态系统根系分泌物介导植物-土壤-微生物互作关系研究进展[J].生态科学,2025,44(02):260-270.