

绿肥促进果园土壤有机碳固存机制的研究进展

魏琳 王悦琰 杨一派

河南农业大学林学院 河南 郑州 450000

摘要: 土壤有机碳固存对缓解气候变化和维持果园生产力至关重要,其效率受气候、生物因素和土壤特性等共同调控。果园生态系统可通过增加碳输入、减少矿化损失及延长碳滞留时间三条途径提升固碳能力。绿肥作为多功能绿色有机肥,通过物理、化学和生物多维机制协同促进碳固存。当前提升绿肥固碳的关键技术包括筛选适宜绿肥品种、构建区域适配种植模式、提升养分协同技术与优化耕作措施等。未来需深化研究不同类型绿肥的固碳机制差异、选育高效固碳种质、建立长期定位观测体系并构建基于绿肥的土壤碳汇管理框架,以充分发挥其在增汇减排中的潜力。

关键词: 绿肥; 土壤有机碳; 影响因素; 优化路径

土壤有机碳(SOC)作为陆地上最大的碳库,储存了地球超过80%的土地碳,对于减缓气候变化至关重要。果园作为农田生态系统的重要组成部分,集约化农业实践,包括耕作、单一作物种植和过度施肥,会显著加速土壤有机碳的矿化分解,导致土壤碳损失加剧。采用科学的果园管理措施能够有效提升土壤固碳能力,挖掘果园土壤巨大的固碳潜力对于实现农业可持续发展和应对气候变化至关重要。

近年来,果园绿肥种植(生草)作为一种环境友好的土壤管理模式,其研究与应用日益受到重视。在农田生态系统中,种植绿肥(如豆科、禾本科或混合草种)不仅能增加地表覆盖、抑制杂草、减少水土流失^[1],还能通过残体分解为果树提供养分,部分替代化肥,改善土壤理化生物性质^[2]。更重要的是,绿肥的引入深刻影响着果园土壤碳循环过程:其地上生物量和庞大根系直接向土壤输入大量新鲜有机碳;其覆盖效应可调节土壤微环境(温湿度),降低原有土壤有机碳的矿化速率^[3];其根系活动及微生物过程则共同驱动着土壤团聚体形成、有机-矿物结合以及微生物碳泵等关键固碳机制,最终显著提升果园土壤的有机碳固存能力。但是,目前关于绿肥固碳效应的研究主要集中在粮食蔬菜等农田生态系统,对于果园生态系统中土壤有机碳固存的关键过程与稳定化机制尚缺乏关注。

本文旨在综述绿肥种植促进果园土壤有机碳固存的研究进展,重点剖析绿肥影响果园土壤碳固存的物理、化学和生物机制,探讨其优化途径,以期提升果园土壤固碳潜力、优化果园绿色低碳管理策略提供理论依据。

作者简介: 魏琳(1987.02-),女,河南焦作,研究生,职称:讲师,研究方向:根系生理生态

1 绿肥影响土壤有机碳固存的核心机制

1.1 物理固碳机制:团聚体保护与结构优化

土壤团聚体是衡量土壤质量和环境健康的重要指标,能够为有机质提供物理保护、调节养分有效性^[4],其分布和稳定性对SOC固存具有重要影响。绿肥生长期间及其残体翻压还田后,显著增加了土壤中的有机质和胶结物质。这些物质作为“粘合剂”,促进土壤颗粒结合形成水稳性和机械稳定性更强的团聚体^[5]。绿肥发达的根系及其分泌物、根际微生物(尤其是细菌分泌物和真菌菌丝)活动产物,连同绿肥残体分解物,共同发挥胶结作用。这些团聚体内部形成的复杂物理微域(限制水分、氧气扩散和微生物活动)对包裹其中的有机碳(包括新输入的绿肥碳和原有碳)形成有效的物理隔离保护,使其免受快速分解。同时,绿肥生长阶段形成的地表覆盖层有效缓解了降雨和水蚀对团聚体的冲击力,降低团聚体分散和破损率^[6]。

1.2 化学固碳机制:矿物结合与化学惰性

矿物结合是土壤有机碳(SOC)长期固存的关键机制,主要通过有机碳与铁铝氧化物等矿物形成稳定的有机-矿物复合体来实现。绿肥还田提供的新鲜外源有机质(氨基糖和脂类等)通过共价键或氢键与矿物表面结合,形成矿物结合有机碳(MAOC)。该过程不仅保护有机碳不被分解,还同步提高铁氧化物自身的化学稳定性。绿肥通过改变土壤理化性质(如pH、离子组成),调控铁铝氧化物与粘土矿物的结合状态。高价铁铝氧化物(如赤铁矿、针铁矿)与粘土矿物结合后,可显著降低SOC的生物有效性,增强化学固定作用。此外,绿肥残体(尤其是豆科绿肥)分解过程中释放的酚类物质(如单宁酸)和多酚氧化酶,促进木质素-蛋白质复合

物的形成,并通过醌-胺缩合等反应生成具有复杂芳香环结构的大分子腐殖质(如胡敏酸),进而增强有机碳(SOC)的化学稳定性。

1.3 微生物固碳机制:碳泵效应与养分调控

绿肥种植通过调控微生物过程是增强土壤有机碳(SOC)固存的关键环节。绿肥作为优质碳源,刺激微生物生物量增长(尤其是真菌),其死亡残体(如氨基酸)转化为微生物源有机碳,易与土壤矿物质结合或被团聚体包裹而形成稳定的土壤有机碳(微生物碳泵理论)。尽管豆科绿肥还田可能短期引发“激发效应”加速原有SOC分解,但其低C/N特性(通常 <20)可优化微生物代谢,改善微生物碳源利用效率(CUE),减少呼吸损耗(qCO_2 降低),增加生物量合成比例,从而减少对原生碳库的激发,最终促进净碳固存。此外,绿肥还田显著提升真菌丰度及网络复杂性,而真菌较高的C/N需求和对新碳源的强响应能力,使其成为固碳关键驱动者。同时,绿肥提升碳转化相关酶活性,加速易分解碳(如纤维素)周转,同时增强顽固碳稳定性^[7]。

2 绿肥间作固碳的优化策略与技术路径

2.1 适宜绿肥品种选择

绿肥可划分为豆科与非豆科两大类,在实际种植应用中需依据环境条件选择适宜的绿肥品种,以确保其对果园生态系统固碳效益的发挥。大多数研究结果显示,豆科绿肥在植株总养分含量上优于十字花科和禾本科绿肥,具备显著的固氮和碳吸收能力,翻压还田后对提升土壤有机碳含量、促进碳固存的效果最为突出。然而,另有研究指出C/N比较高的新鲜豆科绿肥还田容易引发“激发效应”,导致土壤中原有有机质加速分解,反而不利于土壤碳的固存。需要强调的是,不同绿肥品种因其自身养分构成、根系形态特征、生物量以及腐解速率的差异,在改善土壤理化性质、水分养分状况及固碳效能方面表现各异。因此,将绿肥纳入果园生态系统时,必须结合具体的气候、土壤等综合环境条件,因地制宜地选用适宜的绿肥品种。

2.2 构建区域适配模式

构建“果树+绿肥”种植体系需通过时空资源配置缓解种间竞争,主要模式包括:1)行间周年种植:利用果树休眠期/间隙期在行间持续或季节性种植绿肥,高效整合光热土地资源,长期实施可改善土壤质量、优化果树根系分布与光合碳固定,提升团聚体稳定性及有机碳含量^[8]。2)带状种植:在果树行间划分条带与树盘清耕带相间配置,通过空间高效利用实现用地养地结合;绿肥与果树根系交错分布改善养分状况、提高微生物多样

性,绿肥残体输入优化团聚体结构;需依据株行距、树冠等因子优化带宽、绿肥种类及密度以提升固碳效果。

3)混播种植:采用豆科与非豆科绿肥行间组合播种,豆科提供生物固氮,非豆科增强地面覆盖与物理支撑,混播促进大团聚体形成,增加有机碳含量并减少矿化损失,协同强化碳固存能力。模式选择需注重周年种植的水肥同步管理、带状种植的带宽优化配置,最终根据果园立地条件与经营目标因地制宜,最大化固碳效益。

2.3 配套养分管理技术

果园绿肥作为一种养分全面的生物肥源,在拓展肥源、改良土壤、提升表层有机质含量及降低矿质氮淋失风险方面潜力巨大。然而,新鲜绿肥同样存在引发“激发效应”增加土壤有机碳矿化的风险。研究表明:适量增施氮肥可通过提升果树生物量间接增加碳归还,提高表层有机碳;相比单施化肥,绿肥与化肥配施可改善土壤理化性质,更利于土壤碳固定。但以下问题亟待系统研究:不同绿肥品种(豆科/禾本科/十字花科)与其他肥源(有机肥/化肥)的组合效应差异;各类种植模式(行间生草/带状间作/混播)及利用方式(翻压/刈割覆盖/自然枯落)对碳固存的影响机制;如何通过翻压时间、留茬高度、水肥调控等农艺措施精准协调养分矿化-果树需求-碳固存目标的关系。

2.4 耕作优化措施

果园土壤保护性管理(如果园行间生草免耕、浅耕、地表覆盖等)能减少碳素损失,提升土壤有机碳含量。果园绿肥配套耕作以行间生草免耕/少耕为核心,结合绿肥刈割物地表覆盖或翻压还田。研究表明:行间生草免耕配合绿肥较常规清耕显著改善土壤理化性质与微生物活性,提高土壤有机碳含量^[9]。不同还田方式对碳分布影响各异——地表覆盖主要提升0-5cm表层有机碳,但对深层影响有限^[10];翻压还田对表层提升不显著,却能有效增加 >20 cm深层土壤有机碳^[11]。因此,在果园生态系统中应优先选择保护性管理(特别是行间生草免耕),并优化绿肥还田方式(表层覆盖利于保表土碳,翻压利于增深土碳),结合其他有机物料协同利用,以最大程度减少土壤扰动、改善结构并促进土壤碳固存(树盘区域通常仍需清耕或覆盖管理)。

3 总结与展望

正确理解农田土壤碳固存的关键决定因素,并厘清其强化途径与具体技术措施之间的内在联系,是应对土壤肥力退化及缓解全球气候变化的核心环节。长期实践已证实,种植利用绿肥在提升农田土壤肥力、改善养分供应、优化土地利用效率方面成效显著,同时有助于增

强土壤有机碳的稳定性和保护性。然而,由于土壤碳库本身具有复杂性、动态性和理论体系的多样性,加之绿肥应用本身是多种农艺措施协同作用的综合体现,当前关于绿肥如何调控农田土壤碳固存的研究尚存较大不确定性。未来研究亟需在以下方向深化探索:(1)深入揭示绿肥驱动下土壤微生物、团聚体与矿物颗粒之间协同固碳的作用机制;(2)优化绿肥高效栽培管理技术体系;(3)加强具有高效固碳潜力绿肥种质资源的选育工作;(4)建立绿肥长期定位研究网络以获取稳定可靠的数据;(5)构建基于绿肥应用的土壤有机碳综合管理框架。

参考文献

- [1]曹卫东,包兴国,徐昌旭,等.中国绿肥科研60年回顾与未来展望[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1450-1461.
- [2]刘晗,王萍,孙鲁沅等.种植冬绿肥对红壤幼龄橘园土壤微生物量碳、氮和酶活的影响[J].生态环境学报,2023,32(9):1623-1631.
- [3]王强盛,薄雨心,余坤龙,等.绿肥还田在稻作生态系统的效应分析及研究展望[J].土壤,2021,53(2):243-249.
- [4]闫桂苑,董文斌,李忠义,等.绿肥覆盖对果园土壤团聚体及有机碳组分的影响[J].应用生态学报,2024,35(12):3427-3434
- [5]姜灿烂,何园球,刘晓利,等.长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响[J].土壤学报,2010,47(4):715-722.
- [6]张钦,于恩江,林海波,等.连续种植不同绿肥作物的土壤团聚体稳定性及可蚀性特征[J].水土保持研究,2019,26(2):9-16.
- [7]管彤彤,张燕,陶海宁等.绿肥还田对土壤有机碳组分及碳转化酶活性的影响[J].中国农业科学,2024,57(14):2791-2802.
- [8]刘霏霏,何万荣,孙强等.苜蓿绿肥对塔里木盆地苹果园土壤细菌多样性和功能的影响[J].中国农业科技导报,2024,26(8):223-233
- [9]田伟,胡金霞,李刚,等.耕作方式与绿肥种植对玉米产量和土壤质量的影响[J].江苏农业学报,2017,33(6):1272-1277.
- [10]徐阳春,沈其荣,冉炜.长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J].土壤学报,2002,39(1):89-96.
- [11]邹洪涛,关松,凌尧,等.秸秆还田不同年限对土壤腐殖质组分的影响[J].土壤通报,2013,44(6):1398-1402.