

保护性耕作系统下固碳与经济效益研究

黄昕

陕西农业发展集团有限公司

DOI:10.12238/as.v8i4.2916

[摘要] 本研究分析了保护性耕作的固碳机理和经济效益,包括增加土壤有机碳、提高团聚体稳定性和抑制微生物呼吸三条固碳途径,以及农资投入减少和产量提高带来的经济收益。结果表明保护性耕作能同时实现固碳增效,为农业绿色发展提供科学依据。

[关键词] 保护性耕作; 固碳机理; 土壤有机碳; 经济效益

中图分类号: S15 文献标识码: A

Research on Carbon Sequestration and Economic Benefits under Conservation Tillage Systems

Xin Huang

Shaanxi Agricultural Development Group Co., Ltd.

[Abstract] This study analyzes the carbon sequestration mechanisms and economic benefits of conservation tillage, including three pathways: increasing soil organic carbon, enhancing aggregate stability, and inhibiting microbial respiration. It also examines the economic gains from reduced input costs and increased yields. The results show that conservation tillage can achieve both carbon sequestration and efficiency enhancement, providing a scientific basis for green agricultural development.

[Key words] conservation tillage; carbon sequestration mechanism; soil organic carbon; economic benefits

引言

随着全球气候变化问题的日益严峻,农业作为重要的温室气体排放源之一,寻求既能减少碳排放又能保障农业生产的可持续模式显得尤为重要。保护性耕作作为一种可持续的农业生产方式,正受到越来越多的关注。它不仅可以减少土壤侵蚀、保持土壤水分和提高土壤肥力,还具有较强的固碳能力。研究保护性耕作系统下的固碳与经济效益,对于推动农业绿色发展、应对气候变化具有重要的现实意义。

1 保护性耕作系统概述

1.1 保护性耕作的定义与内涵

保护性耕作相较传统翻耕方式有着显著区别,通过减少土壤扰动和增加地表植被覆盖,致力于保护土壤资源并减轻水土流失问题,实现土壤肥力提升和农业生态系统稳定性增强的一系列技术手段。这种耕作方式不仅考虑土壤结构保护,还着眼于长期生态效益,可持续农业生产理念在保护性耕作中得到充分体现。减少机械作业频次同时保持土壤结构完整性,让土壤微生物群落得以良性发展,形成更为健康的农业生产环境^[1]。保护性耕作内涵极为丰富,除去具体耕作技术层面,更包含农业可持续发展思想和整体生态系统平衡的管理理念,从土壤生物多样性维护到水资源高效利用,从农田生态系统健康到农业碳排放减

少,保护性耕作系统构建了一套完整的农业生产与环境保护协同发展模式。随着全球气候变化与环境保护意识增强,保护性耕作正逐步成为现代农业发展的重要方向。

1.2 常见的保护性耕作模式

保护性耕作模式呈现多样化特点,免耕种植作为典型代表,最大程度减少了对土壤的干扰,取消常规翻耕环节,直接在作物残茬或覆盖物上进行播种作业,保留了土壤原有结构和微生物系统,有效避免了土壤有机质流失。少耕种植则采取折中方案,适当保留部分必要的耕作环节,在降低土壤扰动程度基础上兼顾土壤结构改良需求,既减少了能源消耗又保障了作物生长环境。秸秆覆盖还田技术通过将收获后的作物秸秆留在田间地表,形成天然保护层,起到保水保温减少蒸发的作用,覆盖层能有效控制杂草生长,减少除草剂使用需求,同时秸秆分解过程为土壤提供有机质和养分,逐步改善土壤理化性质。这些保护性耕作模式可根据不同地区气候条件和作物种类灵活组合应用,共同构成了现代可持续农业生产体系的重要技术支撑。

2 保护性耕作系统的固碳机理

2.1 增加土壤有机碳含量

保护性耕作系统通过显著减少土壤翻动频率,形成了土壤有机碳积累的理想环境,农作物收获后的根茬秸秆等植物残体

能够原位保留在土壤表层或浅层中,这些富含碳元素的有机物质在土壤微生物作用下逐步分解转化为稳定性更高的土壤有机碳,形成了大气碳向土壤碳池转移的有效途径。免耕技术作为保护性耕作的核心模式,完全取消了传统的翻耕过程,使得作物根系分布更加集中在表层土壤,收获后留下的根茬数量显著增加,这些根茬含有丰富的碳水化合物和木质素等难分解物质,成为土壤有机碳形成的重要前体物质^[2]。长期免耕条件下,土壤表层会形成明显的有机质富集层,这一区域的有机碳含量可比传统耕作提高20%至30%,成为农田生态系统固碳的关键区域。少耕技术虽保留部分必要的翻耕环节,但通过减少耕作次数和深度,同样能够减缓有机质分解速率,促进碳素在土壤中的长期储存。秸秆覆盖还田技术使大量作物秸秆直接返回田间,这些秸秆含有约40%的碳元素,每公顷可提供2至5吨的有机碳输入,随着微生物分解活动的进行,部分碳元素转化为腐殖质等稳定性碳组分,实现了从大气到土壤的碳转移与固定。保护性耕作系统中土壤有机碳的增加不仅表现在含量上的提高,更体现在碳库周转时间的延长,形成了更为稳定的碳汇效应,这种固碳过程与土壤生物多样性提升、团聚体稳定性增强等因素互为促进,共同构建了农田生态系统的可持续固碳机制。

2.2 提高土壤团聚体稳定性

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,对固碳过程具有决定性影响,保护性耕作通过多种途径增强了团聚体的形成与稳定性,从而提高了土壤碳封存能力。传统翻耕会破坏土壤结构,使团聚体分散,保护性耕作减少了这种机械扰动,让土壤颗粒能够自然聚集形成稳定的大团聚体,这些团聚体内部存在微孔隙结构,能够物理包裹有机碳分子,有效隔离微生物与有机质的接触,从而减缓有机碳的分解速率。长期保护性耕作条件下,土壤团聚体稳定性可提高15%至25%,对应的土壤有机碳储量也呈现显著增加趋势^[3]。团聚体的形成过程中,植物根系分泌物和微生物代谢产物如多糖、有机酸等起到重要的胶结作用,这些物质将矿物颗粒与有机质紧密结合,形成有机-矿物复合体,实现了有机碳在土壤中的化学保护。保护性耕作保留的作物残体分解产生的腐殖质也是团聚体稳定性的重要贡献者,腐殖质分子含有大量的羧基和酚羟基等活性官能团,能够与土壤中的多价阳离子如钙离子、铁铝氧化物等形成稳定的络合物,这种化学键合作用显著增强了团聚体的稳定性和抗侵蚀能力。土壤团聚体的粒径大小与碳储存能力密切相关,通常大团聚体(>2mm)具有更强的碳保护能力,保护性耕作促进了大团聚体比例的增加,改变了土壤团聚体的粒径分布特征,优化了土壤结构,不仅增强了土壤的抗侵蚀能力,也创造了更有利于碳固定的物理环境。团聚体稳定性的提高还能够增强土壤保水保肥能力,减少养分流失,促进作物生长,形成更多的生物量返回土壤,构成了保护性耕作系统固碳的正向反馈机制。

2.3 抑制微生物呼吸作用

保护性耕作系统通过调节土壤微环境条件,有效抑制了微生物的过度呼吸活动,减少了土壤碳的损失,这成为固碳机理中

不可忽视的重要环节。传统翻耕会打破土壤结构,增加土壤与大气的接触面积,加速氧气进入土壤,刺激好氧微生物的呼吸作用,导致有机碳快速氧化分解为二氧化碳返回大气,保护性耕作减少了这种扰动,维持了土壤内部相对稳定的气体环境,降低了微生物呼吸强度,减少了碳排放量。免耕条件下,土壤表层秸秆覆盖形成了一层自然屏障,调节了土壤温度波动,避免了土壤温度的急剧升高,由于微生物活性与温度密切相关,相对稳定的温度环境可减缓微生物的代谢速率,降低呼吸作用产生的碳排放。秸秆覆盖还能有效保持土壤水分,避免极端干湿交替条件,研究表明,土壤经历干湿交替过程会导致微生物碳代谢加速,产生碳排放脉冲,保护性耕作通过维持适宜的土壤含水量,减轻了这种“激发效应”,稳定了土壤碳库。保护性耕作还改变了土壤微生物群落结构,促进了真菌在微生物群落中的比例增加,相比细菌,真菌的碳代谢效率更高,碳转化为生物量的比例更大,呼吸消耗的碳比例相对较小,这种微生物群落结构的变化有利于减少土壤碳的消耗性损失。长期保护性耕作实践表明,土壤微生物碳代谢活性可降低10%至20%,相应的土壤呼吸碳排放减少,固碳效率提高^[4]。微生物呼吸作用的适度抑制并不意味着微生物活性的全面抑制,保护性耕作系统中微生物仍保持着适度的活性,参与有机质的转化与腐殖化过程,只是减少了碳的过度消耗,形成了微生物活动与碳固定之间的平衡,这种平衡状态是保护性耕作系统固碳机理的重要表现。

3 保护性耕作系统的经济效益分析

3.1 生产成本分析

3.1.1 农资投入

保护性耕作系统对农业生产投入结构产生显著影响,种子化肥农药等关键农资投入模式在此耕作体系下呈现变化特征。根据嘉吉中国与农业农村部农村经济研究中心2023年启动的保护性耕作试点项目研究表明,保护性耕作具有防治农田扬尘和水土流失、蓄水保墒、培肥地力、节本增效、减少温室气体排放等作用。实施保护性耕作后,土壤物理性质改善使养分吸收效率提高,减少化肥需求。农业部保护性耕作研究中心的田间试验数据显示,长期实施保护性耕作的农田土壤有机质含量平均提高0.5-1个百分点,化肥使用量可减少10%-15%。秸秆覆盖还田在黑龙江垦区的应用表明,其不仅提供养分还能活化土壤中难溶性养分。病虫害防治成本也有所降低,保护性耕作技术体系包含秸秆覆盖地表、免少耕播种、深松及病虫草害综合控制,这种综合防控措施能有效减少除草剂使用。在东北黑土地保护性耕作项目区,杂草密度降低30%-40%,相应的除草剂使用量减少20%-25%。保护性耕作初期可能面临种子投入增加问题,由于地表覆盖层影响,种子发芽率可能略有降低,需要适当增加5%-8%的播种量^[5]。总体而言,农业农村部多年推广实施数据显示,保护性耕作技术取得了明显的经济、生态和社会效益,综合农资成本平均下降15%-20%。

3.1.2 机械使用成本

保护性耕作系统的机械使用成本呈现与传统耕作不同的特

点,需要配套专用机械设备。根据《东北黑土地保护性耕作行动计划(2020-2025年)》,中国农业大学(农业部保护性耕作研究中心)的田间试验数据表明,保护性耕作专用设备如免耕播种机、秸秆还田机等初期购置成本较高,但长期运行成本显著降低。传统耕作需要多道工序,而保护性耕作特别是免耕技术取消了翻耕环节,机械作业时间减少40%-50%。在黑龙江省农垦系统的典型案例显示,免耕技术比传统耕作模式每公顷节省燃油30-45升,按当前燃油价格计算,每公顷节约燃油成本150-220元。机械使用频率降低也延长了设备使用寿命,传统耕作条件下农机具平均使用寿命约8-10年,而保护性耕作模式下延长至12-15年。长期效益评估表明,虽然初期投入较高,但3-5年后机械使用总成本优势明显,第5年后每公顷耕地机械使用成本降低20%-25%。区域化集约经营如农机合作社共享设备模式,可有效分摊投资成本。随着技术推广普及,相关机械设备规模化生产后价格趋于合理,进一步增强经济可行性。

3.2 产量和收益分析

保护性耕作系统对作物产量和经济收益的影响已通过多年试验研究得到验证,不同地区不同作物表现出各具特色的产量效应和收益模式。根据我国东北黑土地保护性耕作实践经验,长期实施保护性耕作技术显著改善了土壤结构和肥力,为作物高产稳产创造了有利条件。黑龙江省农业科学院在垦区连续8年的定位试验数据表明,免耕条件下玉米产量前3年略有波动,但第4年开始稳定提高,第6-8年平均增产3.5%-5.2%,这主要归因于土壤有机质含量提高和水分利用效率改善。华北平原地区的小麦-玉米轮作系统研究显示,少耕配合秸秆覆盖模式下,小麦产量提高2.8%-4.1%,玉米产量提高2.1%-3.8%,系统年总产量平均提高3.2%。不同保护性耕作模式对产量的影响存在差异,免耕技术初期可能面临产量波动,但长期效益更为显著,少耕模式则相对稳定但增产幅度略低。从经济收益角度分析,保护性耕作通过降低生产投入成本和提高产量实现双重增效,根据典型区域实证数据,免耕玉米生产综合收益比传统耕作提高10%-15%,在燃油价格上涨背景下优势更为明显。东北地区冷凉气候条件下,保护性耕作提高了春玉米出苗率和抗逆性,减少了早春低温危害,增产效果尤为突出。长期追踪观测证实,保护性耕作系统下土壤质量持续改善,表现为有机质含量年平均增长0.03-0.05个百分点,土壤团聚体稳定性提高,容重降低,这些变化促进了

土壤养分有效性提升和微生物活性增强,为作物产量的持续稳定增长奠定了基础。随着保护性耕作实践年限延长,其生态效益转化为经济效益的机制更加明显,从土壤改良到生态系统服务功能提升的综合经济价值逐步显现,区域尺度的产量效应和收益贡献更加突出。值得注意的是,保护性耕作的产量效应和经济收益在不同气候土壤条件下存在差异,在干旱半干旱地区水分保持效果突出,在寒冷地区增温保墒效果显著,因此制定区域性保护性耕作技术方案对于充分发挥其产量效益具有重要意义。

4 结论

保护性耕作系统形成了独特的碳循环模式,土壤有机碳积累与土壤结构改善相互促进,微生物群落结构优化进一步增强了固碳潜力。经济效益与固碳能力呈现协同增长关系,随着实施年限延长,效益逐步显现并稳定提升。黑龙江和华北平原地区的实践证明,保护性耕作在不同气候土壤条件下均能取得良好效果,但应根据区域特点优化技术参数。这一技术体系为解决农业生产与环境保护的矛盾提供了可行途径,是农业绿色发展的重要技术支撑。

[基金项目]

陕西省土地工程建设集团内部科研项目:基于多尺度分析的保护性耕作系统下土壤碳库与经济效益研究(DJNY2024-42)。

[参考文献]

- [1]梁爱珍.东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J].地理科学,2022,42(8):11-12.
- [2]朱雪峰.土壤微生物碳泵概念体系2.0[J].应用生态学报,2024,35(1):102-110.
- [3]祁剑英.保护性耕作对土壤有机碳稳定化影响的研究进展[J].中国农业大学学报,2020(1):9-10.
- [4]汪洋.农田管理措施对土壤有机碳周转及微生物的影响[J].农业环境与发展,2020,37(3):340-352.
- [5]赵明月.农田生态系统碳汇研究进展[J].生态学报,2022,42(23):9405-9416.

作者简介:

黄昕(1989-),男,汉族,陕西西安人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:高标准农田建设,土地整治。