

Mechanism of the Impact of Agricultural Straw Carbonization and Returning to Field on Soil Carbon Sequestration, Emission Reduction, and Crop Growth

Xiaoyun Wang¹ Landao Chen² Feng Xu¹ Kechao Song³

1. Xinghua Modern Agricultural Development Service Center, Xinghua, Jiangsu, 225700, China

2. Rural Work Office of Hechen Town, Xinghua, Jiangsu, 225700, China

3. Nanjing Sinong Bio-organic Fertilizer Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211800, China

Abstract

Agricultural straw carbonization and returning to the field is an important approach to achieve carbon sequestration, emission reduction, and sustainable utilization in farmland ecosystems. By pyrolyzing crop straw at high temperatures to produce biochar and applying it to the soil, it can not only significantly increase soil organic carbon storage and improve physical and chemical properties, but also regulate the microbial community structure, enhance nutrient cycling, and crop productivity. Based on the research results of biochar returning to the field in recent years, this paper systematically discusses the mechanism of straw carbonization and returning to the field on soil carbon sequestration and crop growth from the aspects of carbon cycle mechanism, greenhouse gas emission control, and crop physiological response. Studies have shown that carbonization and returning to the field promote the formation of soil carbon sinks through the cumulative effect of stabilizing organic carbon, reduce CH_4 and N_2O emissions, and at the same time improve nitrogen and phosphorus utilization efficiency and rhizosphere activity, and enhance farmland ecological functions.

Keywords

straw carbonization and returning to field; soil carbon sequestration; emission reduction mechanism; biochar; crop growth

农业秸秆炭化还田对土壤固碳减排及作物生长的影响机制

王晓云¹ 陈兰道² 徐凤¹ 宋克超³

1. 兴化市现代农业发展服务中心, 中国·江苏 兴化 225700

2. 兴化市合陈镇农村工作办公室, 中国·江苏 兴化 225700

3. 南京思农生物有机肥研究院有限公司, 中国·江苏 南京 211800

摘要

农业秸秆炭化还田是实现农田生态系统固碳减排与可持续利用的重要途径。通过将农作物秸秆经高温热解制成生物炭并施入土壤, 不仅可显著提高土壤有机碳储量、改善理化性质, 还能调节微生物群落结构、增强养分循环与作物生产力。本文基于近年来生物炭还田研究成果, 从碳循环机制、温室气体排放控制及作物生理响应等方面, 系统探讨秸秆炭化还田对土壤固碳与作物生长的作用机理。研究表明, 炭化还田通过稳定有机碳的累积效应促进土壤碳汇形成, 降低 CH_4 与 N_2O 排放, 同时提高氮磷利用率与根际活性, 改善农田生态功能。

关键词

秸秆炭化还田; 土壤固碳; 减排机制; 生物炭; 作物生长

1 引言

农业秸秆作为重要的生物质资源, 在我国每年产量超过 8 亿吨, 其处理与利用问题直接关系到农业生态系统的可持续发展。长期以来, 秸秆焚烧不仅造成空气污染与资源浪费, 还加剧温室气体排放, 对生态环境与农业碳中和目标形成挑战。秸秆炭化还田技术通过高温无氧热解, 将秸秆转化

为稳定性较高的生物炭, 实现碳的长期固定与资源循环利用。本文围绕秸秆炭化还田的固碳减排效应与作物响应机制展开研究, 探讨其在农业生态系统中形成碳汇与促进可持续生产的作用路径, 为绿色农业发展提供理论依据与实践参考。

2 秸秆炭化还田的原理与特性

2.1 秸秆炭化过程的物质转化特征

秸秆炭化是在缺氧或惰性气氛中经高温热解生成固态炭、气体与液体产物的复杂化学过程, 其核心是碳结

【作者简介】王晓云(1978-), 男, 本科, 助理农艺师, 从事土肥研究。

构的重构与稳定化。热解温度、反应时间及原料组成决定了炭的理化性质及其在土壤中的稳定性。低温炭化（约 300 ~ 400℃）生成的产物中含有较多酚类、有机酸及半纤维素衍生物，具有较高的生物活性与可降解性，适用于短期改良土壤肥力。高温炭化（约 500 ~ 700℃）则产出芳香化程度高、石墨结构明显的惰性有机碳，具备极强的化学稳定性与环境持久性^[1]。热解温度升高会让秸秆氢氧比下降、芳香碳比例上升、极性官能团减少，使秸秆生物炭在土壤中难被微生物分解而形成“碳锁定”，这种活性有机碳向惰性稳定碳的转化，让秸秆炭化成为农业固碳和温室气体减排的重要技术路径。

2.2 生物炭的理化性质与生态功能

秸秆炭化产物即生物炭，具有高比表面积、丰富的孔隙结构和多种表面官能团，是一种兼具吸附性与环境调控功能的土壤改良材料。生物炭施入土壤后，可显著提升阳离子交换量（CEC），增强对氮、磷、钾等养分的吸附与缓释作用，减少养分淋溶损失。其碱性特征有助于中和酸性土壤，提高 pH 值，改善土壤通气与保水性能。炭表面羧基、羟基、酚羟基等活性基团促进离子交换与微生物附着，提升微生态活性与根际营养供给^[2]。研究表明，秸秆炭化还田后，土壤容重平均下降 10%，孔隙度与团聚体稳定性提高约 25%，根系生长与作物产量显著改善。

2.3 秸秆炭化技术的区域适应性与推广意义

秸秆炭化还田的实际效应受区域气候、土壤类型与农作制度的显著影响。东北黑土区有机质丰富但易退化，施用秸秆炭可增强有机碳储量与水分保持能力；华北黄土区土壤结构疏松，施炭后团聚体稳定性提升、盐碱胁迫得到缓解；南方红壤区酸性强、养分流失快，炭化还田能有效中和酸度、提高肥力与微生物活性。不同炭化温度与施用量需根据区域土壤特征进行优化组合，以实现因地制宜的应用效果。近年来，国家在“黑土保护工程”“农业废弃物资源化利用”等政策中明确提出推广秸秆炭化利用，鼓励建立区域化生物炭生产与应用体系。

3 炭化还田对土壤固碳过程的影响机制

3.1 稳定有机碳的积累与碳库转化

秸秆炭化还田通过高温热解将活性有机碳转化为稳定的惰性碳结构，实现了碳在土壤中的长期封存。生物炭的主要组分为芳香碳与石墨碳，这些高聚合度碳链具有极强的抗降解性，在土壤中可保持数百年以上的稳定存在。生物炭与土壤矿物颗粒结合后形成“有机—无机复合体”，既减少了有机碳的再释放，又提高了土壤碳库的活性比例。田间试验表明，长期施炭能显著提高土壤有机碳含量，增幅可达 20%—35%，同时增强腐殖质形成与碳固定速率。

3.2 微生物介导下的碳循环调控

生物炭施入土壤后，其独特的多孔结构为微生物提供

了稳定的栖息环境与生物膜附着空间，显著改变了土壤微生态系统^[3]。炭表面含氧官能团为微生物提供能量底物，促进有益菌群的富集与多样性提升，尤其是放线菌、固氮菌和反硝化菌等功能群的数量显著增加。微生物在炭表的生物膜环境中协同参与有机质的分解与腐殖化，使有机碳逐步向稳定态转化。同时，炭中芳香族化合物对氧化酶具有一定的抑制作用，减缓土壤有机质的分解速率，形成“缓释碳”效应。这一过程使得碳循环趋于平衡，碳的输入与输出动态稳定。研究结果显示，生物炭可提高土壤微生物群落的代谢活性与碳氮耦合效率，增强碳固定速率，使土壤成为长期稳定的碳汇。

3.3 土壤结构改良与碳储稳定机制

炭化还田通过改善土壤物理结构强化有机碳的物理保护，是其长期固碳的关键途径。炭的高比表面积和吸附特性还能固定可溶性有机碳与金属阳离子，抑制碳的向深层淋溶损失。此外，生物炭改善土壤通气性与保水性，增强微环境稳定性，为碳储存提供物理屏障和化学吸附双重保护。长期田间观测结果表明，施炭土壤的有机碳半衰期延长 1.5 倍以上，碳储量显著增加，固碳潜力得到持续提升。该机制表明，生物炭通过“物理屏障—化学吸附—生物调控”三重路径，实现了农业土壤碳库的长期稳定化与可持续固碳效应。

4 炭化还田的减排效应与温室气体通量调控

4.1 抑制甲烷（CH₄）排放的作用机制

甲烷是农业生态系统中最主要的温室气体之一，尤其在稻田环境中，由于厌氧条件和有机质分解加剧，其排放量占农业甲烷总量的绝大部分。生物炭还田通过改善土壤的物理结构与氧化还原条件，有效抑制甲烷的生成与释放。生物炭多孔的碳结构增加了土壤通气性，提升氧气扩散速率，为甲烷氧化菌（Methanotrophs）的生长提供良好环境，增强甲烷氧化作用；同时，炭的表面基团与微量金属氧化物可参与电子传递过程，竞争性抑制甲烷生成菌（Methanogens）的能量代谢途径，降低产甲烷潜力^[4]。研究表明，连续施炭 3 年以上的稻田系统，CH₄ 排放量平均下降 30%—50%，且不影响甚至略有提高稻谷产量。该减排机制不仅体现为气体通量的减少，更在微生物层面重构了碳循环途径，表现出显著的生态调控效应。

4.2 降低氧化亚氮（N₂O）排放的生物化学机制

氧化亚氮是农业生产中第二大温室气体，其来源主要包括施肥引发的硝化与反硝化过程。生物炭的引入对这一过程产生显著的抑制效应。炭的高比表面积与表面官能团能有效吸附铵态氮（NH₄⁺）和硝态氮（NO₃⁻），减少其在土壤溶液中的浓度，降低反硝化底物供给。与此同时，炭中的有机碳为反硝化菌提供电子供体，促进 N₂O 向 N₂ 的完全还原，从而减少中间产物的积累。炭的碱性特征改善土壤酸化环境，优化微生物生态位，使氮转化过程更加稳定。长期

监测数据表明,施用生物炭可使土壤 N_2O 通量降低 20%—40%。此外,炭对氮肥的吸附与缓释作用提高了氮素利用率,减少了农业面源污染,实现氮循环的可持续管理,为农业温室气体减排提供了稳定的技术支撑。

4.3 综合减排效益与生态协同作用

秸秆炭化还田的温室气体减排效益不仅体现在 CH_4 与 N_2O 的双重削减上,更通过对碳氮循环系统的整体优化实现农田生态功能的提升。生物炭在土壤中长期稳定存在,既作为碳汇锁定有机碳,又通过改善结构、调节微环境和促进微生物多样性,实现碳固定与氮循环的协同平衡。通过这种“固碳—减排—稳产”的多重路径,农田系统可逐步由“碳源”向“碳汇”转变。施炭不仅减少温室气体通量,还能降低化肥使用量、减少氮磷流失与径流污染,推动农业生态系统由高消耗型向生态循环型转变。研究表明,秸秆炭化还田的综合减排潜力可达每公顷 7—10 吨 CO_2 当量,生态与经济效益兼备^[9]。该技术的推广不仅有助于农业绿色低碳转型,也为实现全球气候治理与粮食安全目标提供了切实路径。

5 炭化还田对作物生长的促进与生态反馈

5.1 养分可利用性与根际环境改善

秸秆炭化还田在提升土壤养分保持与供给能力方面具有显著作用。生物炭独特的多孔结构和较高的比表面积使其具备优良的养分吸附与缓释性能,能有效吸附铵态氮、磷酸根及钾离子等营养元素,并通过微孔扩散机制实现持续供应,从而提高肥料利用率、减少流失。其碱性特性对酸性土壤具有良好的调节作用,改善土壤 pH 值,优化根际环境。生物炭表面含有羧基、羟基等活性基团,可促进有益微生物定殖,增强土壤酶活性与氮循环效率。长期田间监测结果表明,施炭后土壤速效氮和有效磷含量平均提高 20% 以上,根系活力提升 15%—25%,叶绿素含量及光合效率显著增强。这一过程作为作物的稳产增产奠定了物质基础,体现出炭化还田在改善土壤肥力和提升根际生态质量方面的综合效益。

5.2 作物生理生态响应机制

秸秆炭化还田通过调节土壤水分与养分动态,显著影响作物的生理代谢活动。生物炭在土壤中形成微水库效应,增强保水能力与抗旱性能,使旱作作物在干旱胁迫条件下仍能维持正常代谢水平。同时,炭的吸附与络合作用减少了重金属离子与有机酸对根系的毒害,改善细胞膜稳定性,增强抗氧化酶活性与渗透调节能力。研究表明,玉米在施炭土壤中籽粒灌浆率提高约 18%,水稻分蘖数与穗粒数显著增加,说明炭化还田可通过优化生理代谢过程促进光合产物积累与能量转化效率。此外,生物炭调节土壤微生物群落结构,

使根际固氮、解磷菌群活性增强,为作物生长提供持续营养供应。这种从生理层面到生态层面的双重促进,充分体现了炭化还田在作物生长质量提升中的长期生态效应。

5.3 生态系统服务与农业可持续性提升

炭化还田不仅改善土壤养分环境和作物生理状态,还在更大尺度上增强了农田生态系统服务功能。生物炭的高碳稳定性使其成为重要的碳汇载体,能显著提升土壤碳储量并延缓碳释放过程,从而增强农业生态系统的碳固定能力。同时,生物炭通过调节土壤结构与微气候条件,改善水分循环与能量分布,使农田具备更强的生态韧性。研究发现,连续施炭三年以上的耕地,其土壤团聚体稳定性提高约 30%,生态系统抗干旱与抗退化能力显著增强。炭化还田还可减少化肥与农药使用量,降低农业面源污染与温室气体排放,实现生产与生态效益的双提升。综合评估表明,该技术在增产、固碳与生态修复之间形成了长期协同关系,代表了绿色低碳农业发展的方向,对构建高质量农业生态体系具有深远意义。

6 结语

农业秸秆炭化还田作为一种集减排、固碳与增产于一体的绿色技术路径,正在成为我国农业生态转型的重要方向。通过将秸秆热解为生物炭并施入土壤,不仅实现了碳的长期固定,还优化了土壤结构与养分循环,改善了作物生长环境,显著增强了生态系统的碳汇功能。其减排效果通过降低 CH_4 与 N_2O 通量实现温室气体削减,生态效益通过促进微生物多样性与根际活性得以体现。未来研究应聚焦不同土壤类型与气候条件下炭化还田的差异效应,建立碳汇量化模型与生命周期评估体系,实现区域化精准管理。通过政策支持与技术推广的协同推进,秸秆炭化还田将在农业碳中和战略中发挥更大作用,为我国农业可持续发展与生态文明建设提供坚实的科技支撑与实践路径。

参考文献

- [1] 霍澳.秸秆直接还田与炭化还田下玉米生产的碳足迹和经济效益研究[D].沈阳农业大学,2025.
- [2] 孙媛媛.秸秆炭化还田对稻田土壤有机质和温室气体排放的长期效应及生物炭老化特征[D].沈阳农业大学,2025.
- [3] 三聚.秸秆炭化还田技术列入农业绿色发展集成示范项目[J].中国农资,2018,(27):20.
- [4] 苗蕊可.秸秆炭化还田对温室气体排放和土壤动物的影响[D].辽宁大学,2022.
- [5] 肖涵星.生物炭施用对农田土壤固碳减排及增产效应的影响[D].北京建筑大学,2023.