

双碳目标下有机肥质量评价与低碳技术耦合综述

张雷¹ 丁芳¹

1. 枣庄学院旅游与资源环境学院 枣庄 277160

DOI:10.12238/ems.v7i7.14312

[摘要] 本文对有机肥在达成双碳目标里的关键作用展开探讨, 有机肥可提升土壤质量, 提高土壤碳汇能力, 还可以切实减少温室气体排放, 文中剖析了双碳目标的背景以及它和农业可持续发展之间的关联, 对有机肥进行了定义与分类, 评估了其质量在生物学、化学、物理以及生态影响方面的指标。强调低碳技术的运用可优化有机肥使用效果, 帮助达成双碳目标, 不过当前有机肥质量标准滞后, 迫切需要建立科学的评价体系, 同时建议整合新兴低碳技术, 强化政策支持并提升公众认知, 以此推动有机肥的推广与应用, 实现农业的绿色转型以及可持续发展。

[关键词] 双碳目标; 有机肥; 低碳技术; 质量评价; 可持续发展

一、引言

全球气候变化形势极为严峻, 多项关键气候指标不断刷新历史纪录^[1]。全球气象组织发布的《全球气候状况》报告显示: 全球近地表平均温度相较于 1850 - 1900 年的平均水平高出 $1.45 \pm 0.12^\circ\text{C}$ 。CO₂、CH₄ 和 N₂O 这三种主要温室气体在 2024 年达到创纪录水平后, 依然仍呈上升态势。在此背景下, “双碳”(碳达峰与碳中和) 目标成为各国控制温室气体排放的核心战略。作为农业生产体系的关键组分, 精准施肥与有机资源循环利用等低碳农业技术可显著降低农业温室气体排放。有机肥在提升土壤质量与增强碳汇功能方面潜力显著, 对实现“双碳”目标具有重要作用。

二、双碳目标背景

2.1 双碳目标的提出与意义

2020 年 9 月, 习近平主席在第 75 届联合国大会宣布中国 CO₂ 排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。碳达峰指特定时间节点后温室气体排放量从峰值开始持续递减; 碳中和则强调通过减排与碳汇等手段实现温室气体净零排放。双碳目标已经是中国积极应对全球气候变化的关键国家战略。该目标的制定既响应《巴黎协定》将全球温升控制在远低于 2°C 并努力限制在 1.5°C 以内的国际共识, 也契合我国可持续发展与生态文明建设的战略需求。双碳目标的实施将驱动经济结构转型、加速低碳技术创新、优化资源配置效率, 并为社会可持续发展提供制度保障。

2.2 双碳目标与农业可持续发展的协同关系

农业在实现“双碳”目标中具有双重属性: 既重要碳排

放源, 也是碳汇潜力领域。农业碳排贡献全球约 17-21% 的人为温室气体排放, 其中化肥生产能耗巨大, 并产生大量直接碳排放^[2]; 尤其是 N₂O 排放, 农业活动贡献了全球约 60% 的 N₂O 排放, 主要源于氮肥施用, 因此实现化肥的有机替代亟待提上日程。有机肥施用可通过多重机制促进低碳农业发展 (1) 能够直接增强土壤有机碳封存; (2) 通过改善土壤微生物群落结构间接优化养分循环; (3) 替代部分化学肥料施用, 减少其生产和使用过程中的温室气体排放。科学施用有机肥可使作物增产 12-18%, 配合精准施肥、土壤碳库培育等技术创新, 可显著提升农业减排贡献度^[3]。

三、有机肥的定义与分类

3.1 有机肥的基本概念

有机肥是由动植物残体、粪便或其他有机物料通过堆肥化、发酵等工艺制成的肥料, 其主要成分包含有机质及氮、磷、钾等养分。相较之下, 化肥虽然具有养分供应速度快的特点, 但若长期过量或不合理施用, 则会对土壤生态系统产生显著的负面影响。有机肥具有养分缓释特性, 可通过改善土壤持水能力、通气性, 促进微生物活性, 优化土壤结构, 并增强作物抗逆性。研究表明, 合理施用有机肥不仅能有效提升土壤肥力, 还可通过固碳减排机制在“双碳”目标中发挥关键作用。研究表明: 长期施用有机肥可使土壤有机质含量提高 20-50%^[4]。

3.2 有机肥的主要类别

有机肥主要分为三类: 一是植物源有机废弃物 (如秸秆、豆饼等), 通过发酵分解纤维素形成的腐殖质 (有机质 $\geq 40\%$),

可提升土壤有机质并改善团粒结构;二是动物源粪尿肥(牛粪、鸡粪等)与秸秆混合发酵成的厩肥,富含速效氮(鸡粪4%-6%)、磷、钾,腐熟后作为基肥/追肥直接供肥;三是堆沤肥以餐厨垃圾、园林废弃物为原料,经调控碳氮比有氧发酵制成,腐殖质稳定,兼具改良土壤与持续功能肥,此类肥料特别利于微生物活性和长期肥力维持。三类有机肥各具特色,通过不同途径改善土壤环境,为作物生长提供全面营养支持,是实现可持续农业的重要资源。

四、有机肥质量评价指标

4.1 生物学指标

生物学指标是评估有机肥质量的核心要素,其核心价值体现在微生物活性和土壤生物多样性两个维度。微生物活性通过基础呼吸、酶活性等指标反映有机质分解效率,其中脲酶和磷酸酶活性可表征氮磷转化能力,而芽孢杆菌、放线菌等功能微生物既能分解有机质,又能抑制病原菌,提升土壤健康度。土壤生物多样性则体现为细菌、真菌、线虫等生物的丰富度与均衡性,研究显示生物多样性指数每提升10%,土壤抑病能力可增强5-15%,其中蚯蚓能改善土壤结构,丛枝菌根真菌可促进植物养分吸收^[5]。检测技术上,PLFA分析适用于评估微生物群落组成,而高通量测序技术能精准解析微生物多样性。

4.2 化学成分指标

化学成分指标是评估有机肥质量的核心依据,涵盖氮、磷、钾等关键养分含量及重金属等有害物质限量控制。氮元素作为必需元素,促进蛋白质合成并提升光合效率,直接驱动作物产量形成;磷元素参与能量代谢和细胞分裂,增强根系发育及抗逆性;钾元素则调节水分与养分运输,改善作物品质和抗病能力。养分检测严格执行NY 525-2021标准,要求总养分的 $\geq 5.0\%$ (以 N_2O 、 P_2O_5 、 K_2O 计)。重金属如铅、镉、汞、砷、铬等需严控,依据GB 38400-2019限量标准,检测采用原子吸收光谱法(AAS)或电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)。

4.3 物理特性指标

物理特性指标主要包括水分含量、密度和颗粒粒径等。水分含量过高易使有机肥在储存运输中发霉变质、降低肥效,过低则导致干燥难均匀施用。NY525-2021标准规定其不得超

过30%,理想范围通常为20-40%。适宜的水分利于微生物活动、促进养分释放,水分不适可使矿化速率降低30-50%^[6]。密度是衡量施用效率的参数,不同类型有机肥密度有差异,颗粒状密度较大、粉状较小,堆肥密度常在 $0.4-0.8g/cm^3$,低密度有机肥能疏松土壤、改善通气和水分渗透、优化结构。颗粒粒径影响施用效果与土壤改良,小粒径增加接触面积、促进养分吸收但易流失,大粒径稳定性高但混合不均,一般认为 $<2mm$ 粒径占比高利于与土壤接触、形成水分保留层、影响持水能力和微生物活性。

4.4 生态影响指标

生态影响指标包括生物多样性、碳循环、重金属及污染物残留等维度。生物多样性方面,有机肥施用可影响土壤生物群落结构与多样性,长期施用能增加微生物、蚯蚓等生物数量和种类,如果园施用可提高有益微生物数量、抑制病原菌。碳循环上,有机肥中的有机碳可在土壤储存固定,减少温室气体排放,长期施用能增加土壤有机碳和无机碳含量,中国农科院试验站研究证实其通过增加次生碳酸盐形成、缓解原生碳酸盐损失来增加无机碳储量^[7]。重金属及污染物残留过高会污染土壤和环境,我国不断提高相关限量标准,如NY525-2021新增镍、铜、锌三种重金属限量。

五、有机肥在低碳技术中的应用

在减碳机制方面,有机肥可改善土壤结构,促进团聚体形成,通过物理保护作用使土壤有机质矿化分解速率降低20-80%,从而减少 CO_2 净排放;与此同时需要注意:在稻田等特定生态系统中,科学施用有机肥可促进甲烷排放^[8]。有机肥替代化肥能大幅减少合成氨等高耗能工业过程的碳排放,每生产1吨合成氨约排放1.7-2.1吨 CO_2 当量,而有机肥生产以农业废弃物为原料,有机废弃物资源化利用可避免填埋或焚烧产生温室气体。

在土壤碳汇影响方面,微生物在分解有机质时,其代谢活动及死亡残体可形成稳定态土壤有机碳,如矿物结合有机碳、团聚体保护碳等,微生物源碳可贡献土壤稳定碳库的40%以上。全球农田土壤固碳潜力估计为每年2-5亿吨碳,土壤稳定碳库贡献率占50以上,这种碳汇效应不仅能减少大气 CO_2 浓度,缓解气候变暖,还可改善土壤质量、提升肥力,助力农业可持续发展^[9]。综合来看,有机肥通过减碳与增汇的

双重作用,为实现“双碳”目标提供了重要技术路径,其“废弃物-肥料-土壤”的良性循环模式兼具环境效益与资源循环价值。

六、未来发展方向与挑战

6.1 有机肥质量标准的制定

在“双碳”目标与环境保护意识提升的背景下,有机肥作为土壤改良的核心要素,其质量标准的科学性 with 全面性至关重要。当前我国有机肥质量标准体系存在显著短板:评价指标以养分含量、重金属为主,缺乏微生物活性、碳汇能力等生物学与生态指标,且标准更新滞后于产业发展,导致劣质有机肥可能携带病原菌或重金属超标,威胁农作物安全与土壤健康。

因此,构建现代化质量评价体系至关重要:引入生物伦理与环境科学理论,制定多元化标准体系,针对不同作物的养分需求,细分专用质量标准;强化全链条监管,推广快速检测技术与区块链溯源平台,实现从原料采购到田间施用的全程可追溯,杜绝不合格原料流入生产环节。融合低碳技术升级生产工艺,进行产业升级。通过上述措施,既能保障有机肥的安全高效,又能为农业碳汇核算提供科学依据,助力“双碳”目标落地。

6.2 新兴低碳技术的整合

新兴低碳技术与有机肥产业的深度融合,是实现农业减碳增效的关键路径。一些新兴技术如:生物炭技术、智慧农业有望改变现状。生物炭技术通过将农业废弃物在缺氧条件下热解为富碳材料,不仅能将碳稳定封存于土壤中,还能提升土壤孔隙度与保水能力。智能农业技术则通过土壤传感器、无人机与AI算法,实现有机肥精准施用,避免过量施用导致的面源污染。然而,技术整合面临成本高企、协同性不足等挑战,需政策与市场双轮驱动:政府可设立低碳肥料研发专项基金激发企业技术投入动力。

6.3 政策支持与公众认知提升

政策引导与公众参与是有机肥产业发展的“双引擎”。政府层面需构建激励与监管并重的政策框架:一方面,通过财政补贴、税收减免、绿色信贷等工具降低生产成本;另一方面,参照欧盟等地区的成熟标准,制定涵盖原料控制、生产流程、环境影响的强制性规范,重塑消费者信任。此外,

公众认知不足也是制约推广的关键瓶颈—仅有极少数的消费者了解有机肥包含固碳功能。

未来,需通过政策刚性约束与柔性引导相结合、技术创新与科普教育相协同,直观展示有机肥提升农产品品质、减少病虫害的效果。构建政府、企业、科研机构、公众共同参与的治理网络,让有机肥成为“双碳”目标下农业绿色转型的核心抓手,实现土壤健康、农民增收与生态保护的多赢格局。

[参考文献]

- [1]郭文强,韦星羽,雷明.“双碳”目标下数字技术赋能农业碳生产率的影响[J].环境科学,1-18.
 - [2]傅伟军,徐向瑞,魏玲玲,等.生物炭农田应用的固碳减排研究进展[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2023,15(01):1-15.
 - [3]林思远,袁军委,侯俊,等.有机肥小分子化促进作物增产增效的研究进展[J].中国农学通报,2024,40(15):59-65.
 - [4]彭复细,雷文硕,牟廷森,等.长期不同有机肥替代20%化肥氮对稻田土壤有机碳组分及肥力的差异化影响[J].植物营养与肥料学报,1-11.
 - [5]高雁,张永强,张志东,等.功能性微生物菌剂对小麦生长和根际土壤生态的影响[J].新疆农业科学,2021,58(01):115-124.
 - [6]赵玉蝶,王兴来,余洁,等.土壤团聚体有机碳矿化对秸秆添加和水分变化的响应[J].南方农业学报,2025,56(04):1137-1146.
 - [7]解萌萌.长期秸秆还田的农田土壤剖面有机和无机碳组分特征及影响因素研究[D].东北师范大学,2024.
 - [8]蔡文倩,周丽,余婷,等.农业有机废物还田利用促进土壤健康和应对气候变化的路径及研究建议[J].环境工程技术学报,2024,14(05):1532-1540.
 - [9]苏兴雷,渠晨晨,康杰,等.微生物驱动土壤矿物结合态有机碳的形成[J].科学通报,2024,69(22):3327-3338.
- 项目基金:山东省自然科学基金(ZR2023QC299),枣庄学院博士启动基金(2023ZKBS031)