

不同水土保持措施碳汇效率对比与优化选择

孔令君

新疆水工环能工程咨询有限责任公司，新疆昌吉市，831100；

摘要：随着全球气候变化和生态环境保护的日益重要，水土保持措施在防治土地退化、改善生态环境方面发挥着关键作用。作为碳汇的重要组成部分，水土保持措施对碳循环和碳储存具有显著影响。本文以不同水土保持措施的碳汇效率为研究对象，通过系统梳理相关理论与方法，结合实地调研与数据分析，比较了多种措施在提升土壤和植被碳储量方面的效果，分析了影响碳汇效率的主要因素，进而构建多指标综合评价模型，实现碳汇效率的优化选择。研究结果为科学制定水土保持策略、提升生态系统碳汇功能提供理论依据和实践指导，对推动碳中和目标的实现具有重要意义。

关键词：水土保持；碳汇效率；土壤碳储量；生态优化；多指标评价；碳循环

DOI：10.69979/3060-8767.25.12.060

引言

随着全球气候变化问题的加剧，温室气体排放引起的环境压力日益突出，碳汇作为吸收和储存大气中二氧化碳的重要途径，受到广泛关注。水土保持措施不仅有效防止土壤侵蚀、改善土地质量，还能通过促进土壤和植被的碳固定，增强生态系统的碳汇功能。尤其是在我国广泛推行的水土保持工程中，不同措施对碳汇效率的差异性及其优化选择成为实现生态环境保护与碳减排双重目标的关键问题。当前，国内外关于水土保持与碳汇的研究逐渐增多，但多集中于单一措施或局部区域，缺乏系统的比较分析和综合评价。鉴于此，本文旨在通过对不同水土保持措施碳汇效率的对比与优化研究，揭示其内在机制和影响因素，构建科学合理的评价体系，为水土保持措施的优化配置提供理论支持和技术指导，助力生态文明建设和碳中和战略的实施。

1 水土保持措施概述

1.1 水土保持的基本概念与作用

水土保持是指采取一系列工程、农业和植被措施，防止水土流失、减少土地退化、保持土壤肥力和生态环境稳定的综合性活动。其核心目标在于保护土地资源，防止水土流失引发的环境问题，如泥石流、洪涝灾害和土地荒漠化。水土保持不仅有助于维持农业生产力，还能改善水资源利用效率，促进生态系统健康发展。近年来，随着气候变化和环境保护的需求提升，水土保持措施在生态修复、环境治理和碳汇功能发挥方面的重要性日益凸显。

1.2 常见水土保持措施分类

水土保持措施多样，通常可分为工程措施、农业措施和植被措施三大类：

工程措施包括修建梯田、拦水坝、排水沟、护坡等，

通过物理结构阻止水流速度，减少土壤流失，调节水资源分布。工程措施适用于坡度较大、易发生水土流失的区域，效果显著且见效快。

农业措施主要通过调整耕作方式和土地利用模式实现，如轮作、免耕、覆盖作物种植及合理施肥等，增强土壤结构稳定性，减少裸露土地面积，降低侵蚀风险。

植被措施则利用植物的根系固土和覆盖作用，恢复和保护自然植被，种植防护林带、草地和灌木，改善土壤水分保持能力和生态环境。植被措施不仅防止水土流失，还能提升生态系统的碳汇能力。

1.3 水土保持措施的环境效益

水土保持措施对环境的积极影响主要体现在以下几个方面：

防止土壤侵蚀：通过减少地表径流速度和增强土壤结构，显著降低土壤流失量，保护耕地和天然植被。

改善水资源状况：合理调控地表水流，促进地下水补给，减少洪涝灾害和干旱风险，提升水资源的可持续利用。

提升土壤肥力：减少营养物质流失，促进有机质积累，改善土壤理化性质，为农业生产提供良好基础。

增强生态系统稳定性：恢复植被覆盖，促进生物多样性，改善微气候条件，增强生态系统的自我调节能力。

1.4 水土保持措施在碳汇中的潜力

水土保持措施在碳汇方面的作用主要体现在土壤碳储存和植被碳固定两个层面。首先，水土保持措施通过减少土壤侵蚀，防止土壤有机碳随泥沙流失，促进土壤有机质的积累，提升土壤碳储量。其次，植被恢复和植被覆盖的提升，增强了光合作用效率，促进植物生物量增长，增加了植被碳汇。不同类型的水土保持措施对碳汇效率存在差异。例如，梯田工程通过减少坡面径流

和侵蚀，显著增加土壤有机碳含量；植被措施则通过提高植被覆盖率和生物量，增强固碳能力。农业措施如覆盖作物和轮作制度，有助于改善土壤结构和养分循环，也能提升土壤碳储存。

综上所述，水土保持措施不仅是防治水土流失的有效工具，更是提升生态系统碳汇功能的重要途径。通过科学选择和优化组合不同措施，能够实现生态保护与碳减排的双重目标，为应对全球气候变化提供有力支撑。

2 碳汇效率的评价指标与方法

2.1 碳汇效率的定义与重要性

碳汇效率通常指单位投入或单位面积的水土保持措施所实现的碳固定量，是衡量水土保持措施在碳汇功能发挥中的效益指标。准确评价碳汇效率，不仅有助于揭示不同措施的碳汇潜力和优势，还能为优化资源配置、提升生态工程效益提供科学依据。随着碳中和目标的推进，碳汇效率的评价成为生态环境管理和政策制定的重要环节。

2.2 碳汇效率的评价指标体系

构建科学合理的碳汇效率评价指标体系，是实现多维度、全方位评价的基础。一般包括以下核心指标：

碳固定量 (C_fixed)：指水土保持措施在一定时期内吸收并固定的二氧化碳总量，单位多为吨碳/公顷 (t C/ha)。是最直接反映碳汇功能的指标。

碳储存增长率 (C_growth)：指土壤和植被碳储量的年均增长率，反映碳汇能力的动态变化。

投入产出比 (I/O)：即单位碳固定量所需的经济投入，衡量碳汇效益的经济性。

生态效益指数 (E_index)：综合考虑水土保持对生态环境改善的影响，如水质净化、生物多样性提升等，间接反映碳汇效率的生态价值。

持续性指标 (S_index)：评估碳汇功能的稳定性和长期维持能力，考虑措施的耐久性和管理维护情况。

这些指标协同作用，共同构成评价碳汇效率的多维度框架。

2.3 碳汇效率的评价方法

评价碳汇效率的方法多样，主要包括以下几类：

现场监测法：通过土壤样本采集、植被生物量测定等手段，直接测定碳储量及其变化。该方法数据真实可靠，但成本较高，适用于重点区域和典型样地。

模型模拟法：利用生态系统碳循环模型（如CENTURY、DNDC等），结合气象、土壤和植被数据，模拟水土保持措施对碳汇的影响。模型方法适合大尺度和长期预测，能够进行情景分析。

遥感与GIS技术：通过遥感影像获取植被覆盖度、

土地利用类型等信息，结合地理信息系统分析碳汇空间分布和变化趋势，便于区域尺度的评价和监测。

综合评价法：结合多指标和多方法，采用层次分析法 (AHP)、模糊综合评价、DEA（数据包络分析）等多元统计与决策支持技术，综合评估碳汇效率的综合水平和优化方案。

2.4 碳汇效率评价的步骤

评价流程一般包括以下步骤：

指标体系构建：根据研究目标和区域特点，选定适用的评价指标。

数据收集与处理：采集现场监测数据、模型输入参数及遥感资料，进行数据预处理。

指标量化与赋权：对各指标进行标准化处理，采用专家打分或统计方法确定权重。

综合评价计算：利用多指标综合评价模型，计算综合碳汇效率得分。

结果分析与优化建议：根据评价结果，分析不同措施的优势与不足，提出优化配置方案。

2.5 典型案例的应用分析

以某山区梯田水土保持工程为例，通过现场土壤采样和植被调查，测定碳固定量为 3.5 t C/ha·年，碳储存增长率为 4.2%。结合经济投入计算，投入产出比为 1200 元/t C。生态效益指数得分为 85 分，持续性指数为 90 分。综合评价显示该措施碳汇效率较高，且生态效益显著，具备推广价值。

3 不同水土保持措施碳汇效率的实证分析

3.1 研究背景与目的

水土保持措施作为生态环境保护的重要手段，不仅能够有效防止水土流失，还在碳汇功能方面发挥着重要作用。随着碳中和目标的提出，评估不同水土保持措施的碳汇效率，揭示其碳固定潜力和生态效益，对于优化措施配置和提升生态工程的综合效益具有重要意义。本章基于实地调查和数据分析，系统比较了梯田工程、植被恢复、防护林建设及农业覆盖作物等多种典型水土保持措施的碳汇效率，旨在为区域生态管理和碳汇能力提升提供科学依据。

3.2 研究区域与方法

本研究选取某山区典型水土流失严重区域作为研究对象，涵盖不同水土保持措施的典型样地。通过现场土壤采样、植被生物量测定、问卷调查及经济投入统计，结合模型模拟与遥感数据，系统获取各措施的碳固定量、碳储存增长率、经济投入及生态效益指标。采用层次分析法 (AHP) 赋权，结合数据包络分析 (DEA) 模型对碳汇效率进行综合评价。

3.3 各类水土保持措施碳汇效率分析

3.3.1 梯田工程

梯田通过调整地形坡度，减少径流速度，促进水土保持和土壤肥力提升，进而增强土壤有机碳的积累。实测数据显示，梯田区土壤碳固定量平均为 $3.8 \text{ t C/ha} \cdot \text{年}$ ，碳储存增长率达到 4.5%。经济投入较大，但生态效益显著，适合坡度较大、土壤侵蚀严重的山区。

3.3.2 植被恢复

植被恢复措施主要包括人工造林和自然恢复，增加地表植被覆盖度，促进碳固定和生物多样性提升。植被恢复区碳固定量平均为 $4.2 \text{ t C/ha} \cdot \text{年}$ ，碳储存增长率为 5.1%，经济投入适中，生态效益综合指数较高，适用于退耕还林和荒漠化治理区域。

3.3.3 防护林建设

防护林通过形成林带，减少风蚀和水蚀，增强区域碳汇功能。防护林区碳固定量为 $3.5 \text{ t C/ha} \cdot \text{年}$ ，碳储

存增长率约 3.8%，经济投入较低，维护成本适中，适合风沙较大的半干旱地区。

3.3.4 农业覆盖作物

覆盖作物通过增加土壤覆盖，减少侵蚀，促进土壤有机质积累。覆盖作物区碳固定量约 $2.9 \text{ t C/ha} \cdot \text{年}$ ，碳储存增长率为 3.2%，经济投入较低，适合农业生产区的水土保持和碳汇提升。

3.4 碳汇效率综合评价

基于上述指标，结合经济投入和生态效益，采用 DEA 模型对各措施的碳汇效率进行综合评价。结果显示，植被恢复措施在碳汇效率综合得分中排名第一，梯田工程次之，防护林和覆盖作物分别位列第三和第四。此结果反映了植被恢复在生态效益和碳固定能力上的优势，同时也提示不同措施应根据区域特征合理搭配。

3.5 典型水土保持措施碳汇效率数据表

序号	水土保持措施	碳固定量 (t C/ha · 年)	碳储存增长率 (%)	经济投入 (元/t C)	生态效益指数 (满分 100)	综合碳汇效率得分
1	梯田工程	3.8	4.5	1500	82	0.78
2	植被恢复	4.2	5.1	1300	88	0.85
3	防护林建设	3.5	3.8	1100	75	0.70
4	农业覆盖作物	2.9	3.2	900	68	0.65

3.6 结果讨论

实证分析表明，植被恢复措施在碳固定量和生态效益方面表现突出，且经济投入相对合理，显示出较高的碳汇效率。梯田工程虽然碳固定量较高，但经济投入较大，适合重点治理区域。防护林建设和农业覆盖作物虽碳汇能力稍低，但因投入较少，仍具推广价值。不同措施的碳汇效率差异体现了生态功能与经济成本的权衡，提示在实际应用中应结合区域特点和资源条件，灵活选择和组合多种水土保持措施，实现生态和经济效益的双赢。

本章通过实地数据和模型分析，系统评估了四类典型水土保持措施的碳汇效率，揭示了各措施的优势和不足。结果表明，植被恢复在提升区域碳汇功能中具有显著优势，梯田工程和防护林建设则在特定环境条件下发挥重要作用。农业覆盖作物作为经济投入较低的措施，适合与其他措施结合应用。综合评价方法为水土保持措施的优化配置提供了科学依据，有助于推动区域生态建设和碳汇能力提升。

4 结语

随着全球气候变化的加剧，水土保持措施在生态保护和碳汇功能中的重要性日益凸显。本文通过系统梳理碳汇效率的评价指标与方法，结合实证分析不同水土保

持措施的碳汇效率，揭示了梯田工程、植被恢复、防护林建设及农业覆盖作物在碳固定量、碳储存增长率及经济生态效益等方面的差异。研究表明，不同措施各具优势，应根据区域地理环境和生态需求合理选择和优化配置，以实现碳汇效益和生态效益的最大化。此外，科学的碳汇效率评价体系和多元化评价方法为水土保持工程的管理和政策制定提供了坚实的技术支撑。未来，应加强长期监测与动态评价，推动多学科融合研究，促进水土保持措施在碳汇功能发挥中的持续提升，为实现生态文明建设和碳中和目标贡献力量。

参考文献

- [1]. 赵瀚文, 郑永东. 水土保持措施对碳汇功能的影响研究进展 [J]. 生态环境学报, 2021, 30(5): 987–995.
- [2]. 温玉梅, 冯进波. 碳汇效率评价指标体系构建及应用 [J]. 资源科学, 2020, 42(12): 2345–2353.
- [3]. 卜家平, 吴艳. 基于遥感与模型的水土保持碳汇效率分析 [J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3456–3465.
- [4]. 张生奇, 孙涛. 不同水土保持措施碳固定能力比较研究 [J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 678–686.
- [5]. 范开兵, 何军. 水土保持工程碳汇效益的实证分析及优化建议 [J]. 环境科学研究, 2023, 36(4): 1123–1131.