

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2024.04.004

张玥,郭学锋,韩剑桥,等.黄土高原近 40 年梯田建设的土壤固碳效益初步估算[J].水土保持学报,2024,38(4):190-197.

ZHANG Yue, GUO Xuefeng, HAN Jianqiao, et al. Preliminary estimation of soil carbon sequestration benefits of terrace construction on the Loess Plateau in the past nearly 40 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 190-197.

黄土高原近 40 年梯田建设的土壤固碳效益初步估算

张 玥^{1,2}, 郭学锋³, 韩剑桥^{1,2}, 孙彭成⁴

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;3.榆林市水土保持生态工程建设中心,陕西 榆林 719003;4.黄河水利科学研究院黄土高原水土保持水利部重点实验室,郑州 450003)

摘 要: [目的] 为揭示黄土高原梯田土壤有机碳含量的时空规律和梯田土壤固碳时空分布特征。[方法] 基于 META 分析的方法,研究梯田土壤有机碳含量随土层深度和梯田修建年限的变化特征,分析黄土高原各区域梯田土壤固碳的时空分布特征。[结果] (1) SOC 含量和固碳效益随土壤深度的增加而减少, 80—100 cm 土层的 SOC 含量为 0—20 cm 土层的 60.74%, 0—20 cm 土层的固碳效益为 23.1%, 80—100 cm 土层为 5.7%。(2) 梯田固碳效益随修建年限呈非线性增加, 梯田 0—20 cm 土层固碳效益由修建第 1 年的一 8.29% 逐步增加, 在第 24 年时达到最大值 34%, 此后保持稳定。(3) 1979—2023 年黄土高原梯田总固碳约为 38.29 Mt C, 平均固碳 38.49 t C/(km² · a)。泾河上中游流域平均固碳速率最高, 为 50.14 t C/(km² · a), 河龙区间平均固碳速率最低, 为 29.04 t C/(km² · a)。[结论] 在黄土高原兴修梯田可以提高 SOC 含量, 并且梯田的固碳是一个相对漫长的过程, 需要科学的设计及管护才能更好地发挥其固碳效益。在黄土高原开展梯田建设加之合理规划、设计、科学的管护是提高区域土壤固碳效益的有效措施。研究结果可为黄土高原地区水土保持固碳效益核算提供理论与方法支持。

关键词: 黄土高原; 梯田; 土壤固碳效益; META 分析

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0190-08

Preliminary Estimation of Soil Carbon Sequestration Benefits of Terrace Construction on the Loess Plateau In the Past Nearly 40 Years

ZHANG Yue^{1,2}, GUO Xuefeng³, HAN Jianqiao^{1,2}, SUN Pengcheng⁴

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Yulin Soil and Water Conservation Ecological Engineering Construction Center, Yulin, Shaanxi, 719003, China; 4. Key Laboratory of Soil and Water Conservation on the Loess Plateau of Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to reveal the spatiotemporal patterns of soil organic carbon (SOC) content in terraced fields on the Loess Plateau and investigate the spatiotemporal distribution characteristics of soil carbon sequestration in these terraced fields. [Methods] Using the META analysis method, the variations characteristics of SOC content in terraced soil with soil depth and years of terraced construction were studied, and analyzed the spatiotemporal distribution features of soil carbon sequestration in terraced fields across different regions of the Loess Plateau. [Results] (1) SOC content and carbon sequeering benefits decreased with the increase of soil depth, SOC content in the 80—100 cm soil layer was 60.74% of that in 0—20 cm soil layer, carbon sequeering benefit in the 0—20 cm layer was 23.1% and that in 80—100 cm soil layer was 5.7%. (2) The carbon sequestration benefits of terrace increased nonlinearly with the construction years. The carbon sequestration benefits of 0—20 cm soil layer of terrace gradually increased

收稿日期: 2023-11-28

修回日期: 2024-01-28

录用日期: 2024-02-05

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-30

资助项目: 黄河水科学研究联合基金重点项目 (U2243212); 榆林市 2023 年科技计划项目 (2023-SF-14); 气候变化对阿根廷水土资源影响评估与综合适应对策研究项目 (16146KYSB20200001)

第一作者: 张玥 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事水土保持土壤有机碳研究。E-mail: nmg_zhangyue@163.com

通信作者: 韩剑桥 (1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: hjq13@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

from -8.29% in the first year of construction to 34% in the 24th year, and then remained stable. (3) During 1979 to 2023, the total carbon sequestration of terraces on the Loess Plateau was approximately 38.29 Mt C , and the average carbon sequestration was $38.49 \text{ t C}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. The Jinghe River upper and middle reaches exhibited the highest average sequestration rate at $50.14 \text{ t C}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, while the Helong interval showed the lowest at $29.04 \text{ t C}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$. **[Conclusion]** Terraced field construction on the Loess Plateau can enhance SOC content, and terraced field carbon sequestration was a relatively lengthy process that requires scientific design and management to maximize its carbon sequestration benefits. Conducting terraced field construction, along with proper planning, design, and scientific management, proved to be an effective measure to enhance regional soil carbon sequestration benefits. The research findings can offer theoretical and methodological support for assessing the carbon sequestration benefits of soil and water conservation in the Loess Plateau region.

Keywords: the Loess Plateau; terraced fields; soil carbon sequestration benefits; META analysis

Received: 2023-11-28

Revised: 2024-01-28

Accepted: 2024-02-05

Online (www.cnki.net): 2024-04-30

在全球变暖的背景下,土壤有机碳对于维持良好的土壤质量、恢复退化的生态系统、确保粮食安全和减少二氧化碳排放至关重要。为实现“碳达峰”“碳中和”目标,国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》中提到,通过水土流失综合治理等举措能够巩固生态系统固碳作用、提升生态系统固碳能力^[1]。科学分析水土保持固碳作用,对水土保持固碳监测核算指标体系的建立,阐明水土保持对碳中和的贡献具有重要意义。由于数据来源不同和SOC的空间变异性,加之SOC受到气候、地形、土壤质地、土地利用等诸多因素的影响,导致对SOC分布及储量研究结果的不确定性,且结果针对性不强^[2]。因此,开展有针对性的土壤有机碳研究尤为重要。

黄土高原是世界上水土流失最为严重的地区之一。因其地形破碎,土地利用类型复杂多样,加之人类长时间不合理开发,导致土壤养分流失、土壤肥力下降、土地生产力降低等一系列问题^[3]。黄土高原是我国生态环境建设的重点实施区域,在水土保持措施的广泛布设下,黄土高原的水土流失得到有效的控制。因兼顾水土保持与粮食生产双重功效,梯田在黄土高原上大规模修建。20世纪50年代,黄土高原成为坡改梯工程的核心区域,至2017年,黄土高原梯田总面积占耕地总面积的 60% ^[4]。经过科学设计、合理修建和有效管理的梯田能够通过改变微地形,达到削减径流冲刷力、促进降水就地入渗、减少产流产沙的目的,同时可以有效改善土壤理化性质,有利于作物生长和营养物质的积累^[5]。尽管梯田被视为保护土壤及其土壤水分的有效措施,但梯田的建设和维护能够通过改变土地利用类型和地形来扰乱大气和土壤之间的碳通量,可能改变土壤有机碳动态^[6]。已有研究^[7]调查了不同梯田下SOC水平的变化,发现梯

田对SOC具有正或负面影响。目前关于梯田固碳的研究,因为措施类型复杂、数量大、面积广、机理复杂且受限于样本的数量和空间分布,现有的土壤固碳估算方法,其估算结果间存在较大差异^[8],黄土高原梯田土壤碳库估算还存在诸多不确定性,而且固碳机理研究多集中在点尺度,大尺度范围研究不明晰,制约水土保持固碳的科学评估^[9]。

因此,本研究以黄土高原梯田SOC为研究对象,在整理分析梯田土壤有机碳现有成果的基础上,将黄土高原划分为不同区块,构建梯田SOC和修建年限的关系方程。初步估算固碳量及其时空分布特征,阐明黄土高原梯田建设对SOC的影响,以期为黄土高原地区水土保持固碳评估提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原地处黄河中游($33^{\circ}41'05''-41^{\circ}16'06''\text{N}$, $100^{\circ}52'30''-114^{\circ}33'02''\text{E}$),跨陕西、山西、甘肃、宁夏、内蒙古、河南、青海7个省级行政区。海拔 $900\sim 3\,000 \text{ m}$,年平均气温 $2.4\sim 14.2^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $300\sim 650 \text{ mm}$,降水多集中在7—9月^[10]。

20世纪50年代起,由于梯田能够把“跑水”“跑土”“跑肥”的“三跑田”治理为“保水”“保土”“保肥”的“三保田”,加之农业机械化的应用^[11],各类梯田在黄土高原上开始大规模修建,截至2021年,黄土高原修建梯田共计 624.14 万 hm^2 ^[3]。

1.2 研究方法

1.2.1 文献检索 以“黄土高原”“梯田”“土壤有机碳”和“soil organic carbon”“SOC”“The Loess Plateau”“terrace”为关键词对文献进行检索,中文文献来源为中国CNKI学术总库和万方数据知识服务平台;

组,共分为 5 组。梯田土壤 SOC 各土层含量中 0—20 cm 最高,为 5.4 g/kg,80—100 cm 最低,为 3.28 g/kg,0—20 cm 土层的 SOC 平均含量为 5.40 g/kg,分别是 20—40,40—60,60—80,80—100 cm 土层的 1.33,1.54,1.59,1.64 倍,SOC 含量随土层增加而减少,梯田对 SOC 含量的影响随着土层深度的增加而

降低。

本研究结果表明,梯田不同深度土层均可以促进 SOC 积累,固碳效益在 0—20 cm 土层最高,为 23.1%,其次是 20—40 cm 土层,为 22.1%。固碳效益最低的是 80—100 cm 土层,为 5.7%,固碳效益呈现随土层深度递减的趋势。

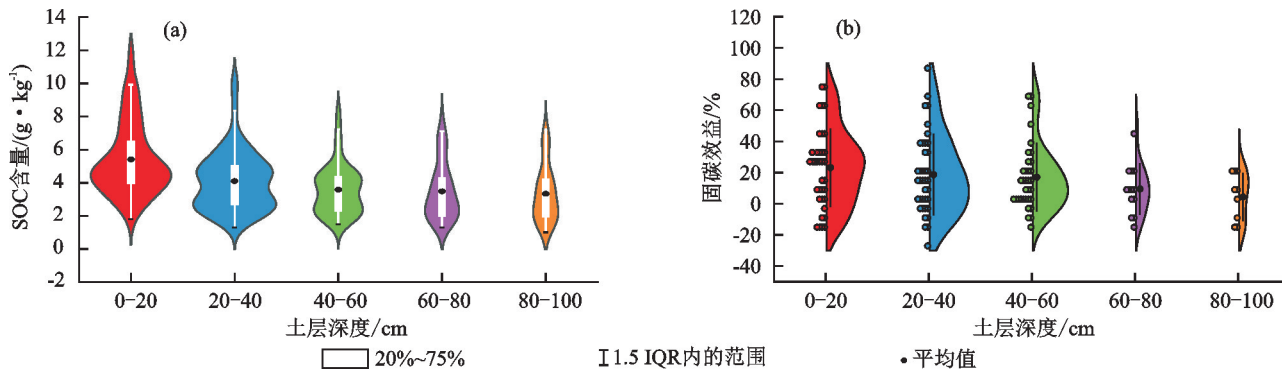


图 3 梯田固碳效益和 SOC 含量深度变化特征

Fig. 3 Depth variation characteristics of carbon sequestration benefits and SOC content in terraced fields

2.2 梯田固碳效益时间变化特征

由图 4 可知,利用数据中 0—20 cm 土层梯田 SOC 和年份相关数据拟合梯田固碳效益和梯田修建年限的逻辑斯谛方程,相关系数 $R^2=0.655$ 。

梯田固碳效益随修建年限的变化依据逻辑斯谛方程的常用划分方法^[16]分为 5 个时期。开始期,梯田建设第 1~4 年,梯田修建第 1 年固碳效益为 -8.29%,第 4 年恢复到修建梯田前坡耕地水平;加速期,梯田建设第 5~8 年,SOC 含量开始加速增长;转折期,梯田修建第 8 年,固碳效益达到最大值 34.8% 的 1/2,这时固碳效益增长最快;一般来说,修建 8 年以上的梯田可以显著提高 SOC 含量;减速期,固碳效益超过 $E_{\max}/2$ 以后,SOC 含量逐渐接近于饱和,增长逐渐变慢;饱和期,24 年之后固碳效益达到 $E_{\max}$ 值,梯田固碳效益趋于平缓。

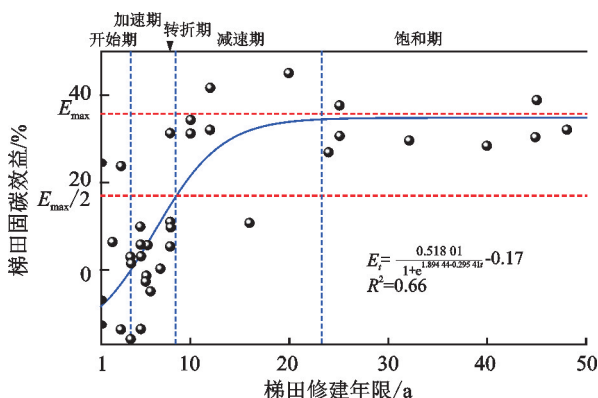


图 4 梯田 0—20 cm 土层固碳效益年际变化特征

Fig. 4 Annual variation characteristics of carbon sequestration benefits in the 0—20 cm soil layer of terraced fields

2.3 黄土高原梯田土壤固碳空间分布特征

整体上,梯田固碳量在梯田修建后的 43 年持续增加。梯田面积若维持现状,固碳量在 2025 年后将保持稳定。由图 5 可知,自 1980 年起,各区域梯田固碳量在初期曲线平缓。渭河上游和河龙区间从 1985 年开始,固碳量有上升趋势,泾河上中游、湟水、祖厉河、汾河上游、洮河下游固碳量从 1990 年开始出现上升趋势,北洛河上游、清水河固碳量自 2000 年开始呈现上升趋势。

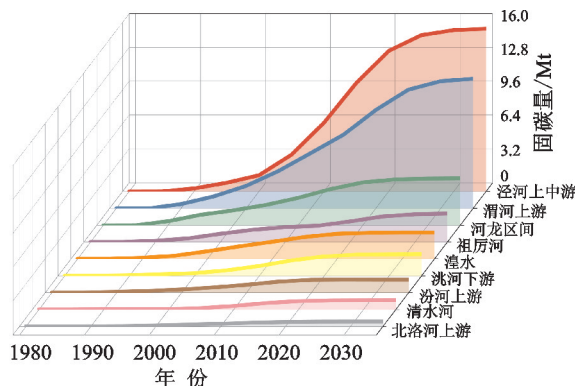


图 5 不同区域固碳量年际变化特征

Fig. 5 Annual variation characteristics of carbon sequestration amount in different regions

由表 1 可知,祖厉河和渭河上游在 2020 年固碳量增速达到最大,河龙区间、洮河下游、湟水流域在 2013 年固碳量增速达到最大;泾河中上游、汾河上游在 2015 年固碳量增速达到最大;北洛河上游、清水河在 2016 年固碳量增速达到最大。年际最大固碳量增速渭河上游最高,为 0.51 Mt C/a,北洛河上游最低,为 0.02 Mt C/a。泾河中游固碳量和平均固碳速率最

高为 14.35 Mt C 和 50.14 t C/(km² · a);河龙区间平均固碳速率为 29.04 t C/(km² · a),是研究区域中最低的。43 年来黄土高原总计增加梯田面积 23 135.05 km²,固碳量约为 38.29 Mt C,平均固碳速率为 38.49 t C/(km² · a)。

表 1 1980—2023 年黄土高原不同区域的梯田土壤固碳情况

Table 1 Terraced soil carbon sequestration in different regions of the Loess Plateau from 1980 to 2023				
研究区域	梯田修建 面积/ km ²	固碳量/ Mt C	年际最大 固碳量增速/ (Mt C · a ⁻¹)	平均固碳 速率/(t C · km ⁻² · a ⁻¹)
河龙区间	3 390.69	4.23	0.17	29.04
北洛河上游	344.34	0.43	0.02	29.11
泾河中上游	6 652.95	14.35	0.76	50.14
渭河上游	7 089.63	10.58	0.51	34.72
汾河上游	821.99	1.23	0.06	34.81
清水河	674.29	0.84	0.06	29.07
祖厉河	1 554.07	2.25	0.11	33.60
洮河下游	1 175.18	1.94	0.11	38.46
湟水	1 432.05	2.44	0.09	39.56
共计	23 135.18	38.29	—	38.49

3 讨论

3.1 梯田土壤固碳时间分布特征

修建 1~4 年的梯田固碳效益呈现下降趋势(图 4),在流域尺度上,修建梯田前期固碳量曲线平缓(图 5),是因为梯田建成初期消耗 SOC 的因素成为主导。在梯田建设过程中土壤扰动会使不同土层的土壤混合,导致生物群落结构不稳定并且增加土壤呼吸,加速 SOC 的分解,使得 SOC 消耗速度大于 SOC 产生、积累的速度,从而导致 SOC 下降^[15]。修建梯田后短时间内不利于 SOC 的积累导致这一时段内梯田 SOC 低于坡耕地。修建年限超过 5 年的梯田才能有效发挥土壤固碳效益,对应图 4 逻辑斯蒂曲线中开始期结束之后。

修建梯田 5 年后其固碳效益开始显现,流域尺度固碳量呈上升趋势(图 5),是因为促进 SOC 增长的因素成为主导。梯田建设过程中,原本深层的土壤会暴露在表层,表层的土壤埋到深层,或使表土和深层土混合,由于土壤的 SOC 含量随着土层深度增加而减小,深层的土壤 SOC 含量较低,具有更强的固存土壤有机碳的能力^[18];SOC 含量较高的表土掩埋导致土壤有机碳分解减少。梯田修建产生的土壤扰动短时间内不利于 SOC 的积累,但 SOC 含量较低的土壤有相对更强的固存新土壤有机碳的能力^[19],有利于 SOC 的长期积累。梯田的阶梯结构减缓地表坡度,可以有效拦截从上坡位土壤侵蚀产生的物质,使梯田输入土壤有机碳;同时阶梯结构能够减少梯田土壤有

机碳等营养成分的流失,减缓 SOC 的矿化,从而有效促进土壤养分的积累^[20]。土壤细颗粒具有较大的比表面积,可以固定更多的有机碳组分,梯田的阶梯结构还能增加地表粗糙度,在一定程度上减小风蚀,减少细颗粒物质损失^[21],间接有利于 SOC 的积累固定。加之植物群落结构逐渐稳定,梯田土壤可以容纳更多的生物,生物量、植物残体、土壤微生物残体逐渐增加,作物和微生物的残体对梯田 SOC 进行了补充^[8],长期有效地促进土壤养分的积累^[17]。

24 年后固碳效益增长速度逐步放缓(图 4),流域尺度固碳量后期趋于稳定(图 5),可能是因为梯田建设后外源有机碳的增加有助于大团聚体形成。随着梯田建设年限增加,土壤大团聚体内部形成粗颗粒有机碳^[22],随着大团聚体不断地分解,稳定的细颗粒有机碳逐渐得到积累^[23],其含量越来越高,进而形成稳定的有机碳^[24]。此外,随着梯田生态效应及连年的耕作及有机和无机肥料的输入,促进营养元素的积累^[25],SOC 含量开始加速增长。一般来说,修建 8 年以上的梯田可以显著提高 SOC 含量。随梯田修建年限增加,固碳效益逐渐增加,之后达到饱和,20 年左右达到稳定状态(图 4)^[15,26]。所以梯田的固碳是一个相对漫长的过程,梯田撂荒或缺少科学管护使梯田 SOC 下降,梯田固碳效益稳定之后要科学养护梯田,为了使得固存到梯田中的碳不再流入大气,保持梯田土壤肥力,管理农田时还应配有增加土壤有机碳的种植措施,如科学施肥、保护性耕作、科学灌溉和秸秆还田等。

3.2 梯田土壤固碳空间分布特征

梯田的土壤固碳效益受梯田修建年限、气候和地形坡度等诸多因素的综合影响。已有研究^[27-28]表明,梯田的固碳效益随着土层深度的增加而减小,随着土层深度的增加,土壤中来自地面的养分输入逐步减小。已有研究^[28-29]表明,SOC 含量随着土层深度的加深而下降,与本文研究结果一致,这可能归因于表层植物根系分布较多,微生物分解效率高^[30],有利于表层有机碳的积累,以及梯田土壤是主要是人为耕作土壤,很大程度上受到施肥和耕作的影响^[31],使得表层土壤有机碳相对丰富^[32];犁底层在一定程度上阻碍土壤有机质的随水下渗,随着剖面深度加深,有机碳输入量减少,导致深层土壤有机碳含量显著低于耕作层和犁底层^[28]。土壤生物残体、植物根系等主要分布于浅层土壤为土壤有机碳提供了来源^[24,33]。

近 40 年渭河上游流域修建梯田面积最大,但泾河上中游的固碳量却最高,而且平均固碳速率最高,这可能是由于泾河上中游整体上 SOC 含量较高导致

的。再加之,梯田的建设不完全对土壤固碳起到正面作用,其也导致与边坡稳定性有关的问题。尤其在黄土高原陡峭的山坡上建设宽梯田,因需要更宽的道路和更高的田坎,导致梯田边坡稳定性变差,阶梯地形发生大量侵蚀,甚至崩塌^[7]。同时,梯田旁的道路发生侵蚀会为侵蚀土壤输送到冲沟和沟渠的有效途径^[7]。梯田在暴雨期间使雨水集中,因此有时导致田坎崩塌和滑坡对土壤有机碳的固存起到反作用^[12]。此外,在河龙区间内的陕北地区存在着大量“广种薄耕薄收”的耕地,由于陕北地区地广人稀,当地居民就采取扩大自己的耕种面积提高产量的方法,但是由于劳动力有限,难以对大面积的耕地进行管护,最后导致无人管护的耕地土壤养分流失严重,这也是河龙区间面积虽大但是固碳量却不高的原因之一。本研究表明,黄土高原范围内梯田平均固碳效益为34%,固碳能力为38.49 t C/(km²·a)。以中国梯田为研究对象的META分析结果^[8]表明,梯田土壤固碳效益为32.4%,与本研究接近。本研究中梯田固碳能力整体略高于退耕还林土壤固碳能力[33 t C/(km²·a)]^[34],这可能是由于施肥或其他耕作行为对梯田土壤养分的增长起到促进作用,梯田持续施肥可使梯田SOC在12年间持续增长^[35],施肥也是提高SOC含量和提高土壤肥力的重要途径,可以提供作物生长的必要的营养元素并且弥补土壤养分的不足^[36],同时促进作物的生长发育,提高作物的产量和质量^[37]。所以,梯田需要科学的设计和管护才能充分发挥出它的固碳效益。因此,黄土高原开展梯田建设加之合理规划设计、科学的管护是提高区域土壤固碳效益的有效措施。

4 结论

(1)梯田土壤有机碳含量和固碳效益随土层深度的增加而减少。SOC主要富集于0—40 cm土层,固碳效益在表层土中(0—20 cm)最高,在80—100 cm土层中最低。

(2)梯田土壤固碳效益随修建年限变化符合逻辑斯谛方程,新建梯田固碳效益由第1年的-8.29%,逐步增长,至修建24年后固碳效益达到最大值34%。

(3)黄土高原在1979—2023年43年间梯田总固碳量约为38.29 Mt C,梯田修建第5~20年后,固碳量开始显著增加,在第40年达到稳定水平,平均固碳38.49 t C/(km²·a)。

(4)在黄土高原兴修梯田可以提高SOC,并且梯田的固碳是一个相对漫长的过程,需要科学的设计以及管护才能充分发挥出其固碳效益。在黄土高原开

展梯田建设加之合理规划设计、科学的管护是提高区域土壤固碳效益的有效措施。

本文研究结果可为黄土高原地区梯田建设和梯田的水土保持固碳评估提供参考依据。

参考文献:

- [1] 李智广,王海燕,王隼雄.碳达峰与碳中和目标下水土保持碳汇的机理、途径及特征[J].水土保持通报,2022,42(3):312-317.
LI Z G, WANG H Y, WANG J X. Mechanisms, pathways, and characteristics of carbon sink in soil and water conservation under carbon peaking and neutralization goals[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 312-317.
- [2] 张祎,李鹏,肖列,等.黄土高原丘陵区地形和土地利用对土壤有机碳的影响[J].土壤学报,2019,56(5):1140-1150.
ZHANG Y, LI P, XIAO L, et al. Effects of topography and land use on soil organic carbon in hilly region of Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(5): 1140-1150.
- [3] CAO B W, YU L, NAIPAL V, et al. A 30 m terrace mapping in China using Landsat 8 imagery and digital elevation model based on the Google Earth Engine[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(5): 2437-2456.
- [4] RAN Q H, CHEN X X, HONG Y Y, et al. Impacts of terracing on hydrological processes: A case study from the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 588: e125045.
- [5] HAN J Q, GE W Y, HEI Z, et al. Agricultural land use and management weaken the soil erosion induced by extreme rainstorms[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 301: e107047.
- [6] GE J M, WANG S, FAN J, et al. Soil nutrients of different land-use types and topographic positions in the water-wind erosion crisscross region of China's Loess Plateau[J]. Catena, 2020, 184: e104243.
- [7] DENG C X, ZHANG G Y, LIU Y J, et al. Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2021, 9(3): 344-359.
- [8] CHEN D, WEI W, DARYANTO S, et al. Does terracing enhance soil organic carbon sequestration? A national-scale data analysis in China[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 721: e137751.
- [9] 李智广,王隼雄,王海燕.区域水土保持碳汇能力评估的指标体系[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(1): 64-72.
LI Z G, WANG J X, WANG H Y. Index system for evaluating the carbon sink capacity of regional soil and

- water conservation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(1): 64-72.
- [10] 焦菊英, 王万中, 李靖. 黄土丘陵区不同降雨条件下水平梯田的减水减沙效益分析[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 13(3): 59-63.
- JIAO J Y, WANG W Z, LI J. Analysis on soil and water conservation benefit of level terrace under different rainfall condition in Loess Hilly Region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1999, 13(3): 59-63.
- [11] 高海东, 李占斌, 李鹏, 等. 梯田建设和淤地坝淤积对土壤侵蚀影响的定量分析[J]. *地理学报*, 2012, 67(5): 599-608.
- GAO H D, LI Z B, LI P, et al. Influences of terrace construction and check dam silting-up on soil erosion[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(5): 599-608.
- [12] 高云飞, 刘晓燕, 韩向楠. 黄土高原梯田运用对流域产沙的影响规律及阈值[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(3): 535-545.
- GAO Y F, LIU X Y, HAN X N. Impact of the terraces on sediment yield and its thresholds on the Loess Plateau[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(3): 535-545.
- [13] 刘晓燕. 黄土高原现状产沙情势评价[J]. *水利学报*, 2023, 54(1): 24-33.
- LIU X Y. Evaluation on present status of sediment yield in the Loess Plateau[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(1): 24-33.
- [14] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 513-519.
- WANG Q K, WANG S L, FENG Z W, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 513-519.
- [15] 郝丽婷, 吴发启. 黄土丘陵沟壑区坝地和梯田土壤养分特征与演变[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 16-22.
- HAO L T, WU F Q. Characteristics and evolution of soil nutrients of dam land and terrace in a loess hilly area[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5): 16-22.
- [16] 余爱华. Logistic 模型的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2003.
- YU A H. Research on the Logistic Model[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2003.
- [17] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437-5448.
- LIU S R, WANG H, LUAN J W. A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [18] OKOLO C C, GEBRESAMUEL G, ZENEBE A, et al. Soil organic carbon, total nitrogen stocks and CO₂ emissions in top- and subsoils with contrasting management regimes in semi-arid environments[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: e1117.
- [19] VANDENBYGAART A J, KROETSCH D, GREGORICH E G, et al. Soil C erosion and burial in cropland[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(4): 1441-1452.
- [20] LI Y, LINDSTROM M J. Evaluating soil quality-soil redistribution relationship on terraces and steep hillslope[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(5): 1500-1508.
- [21] 臧英, 高焕文, 周建忠. 保护性耕作对农田土壤风蚀影响的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(2): 56-60.
- ZANG Y, GAO H W, ZHOU J Z. Experimental study on soil erosion by wind under conservation tillage[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(2): 56-60.
- [22] LIANG C, SCHIMEL J P, JASTROW J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. *Nature Microbiology*, 2017, 2: e17105.
- [23] MORRIS K A, HORNUM S, CRYSTAL-ORNELAS R, et al. Soil respiration response to simulated precipitation change depends on ecosystem type and study duration[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, 127(11): e2022JG006887.
- [24] BLANKINSHIP J C, FONTE S J, SIX J, et al. Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem[J]. *Geoderma*, 2016, 272: 39-50.
- [25] SHI H, SHAO M G. Soil and water loss from the Loess Plateau in China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45(1): 9-20.
- [26] 郝丽婷. 黄土丘陵沟壑区坝地和梯田土壤肥力变化特征[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- HAO L T. Characteristics of soil fertility changes in dammed fields and terraced fields in the loess hilly gully region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [27] HU W, XU J Z, LI J Y, et al. The effect of soil and water conservation measures on soil organic carbon in a typical small watershed in the Mollisol region of Northeast China[J]. *Catena*, 2022, 208: e105744.
- [28] SUN C L, XUE S, CHAI Z Z, et al. Effects of land-use types on the vertical distribution of fractions of oxidizable organic carbon on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(2): 221-231.
- [29] ZHANG C, LIU G B, XUE S, et al. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54: 16-24.
- [30] SHARDA V N, DOGRA P, SENA D R. Comparative economic analysis of inter-crop based conservation bench-

- terrace and conventional systems in a sub-humid climate of India [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 98: 30-40.
- [31] SCHIEDUNG M, TREGURTHA C S, BEARE M H, et al. Deep soil flipping increases carbon stocks of New Zealand grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(7): 2296-2309.
- [32] ZHANG C, LIU G B, XUE S, et al. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54: 16-24.
- [33] MORADI A, TEH BOON SUNG C, GOH K J, et al. Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 145: 62-71.
- [34] 杨阳, 窦艳星, 王宝荣, 等. 黄土高原土壤有机碳固存机制研究进展[J]. *第四纪研究*, 2023, 43(2): 509-522.
- YANG Y, DOU Y X, WANG B R, et al. Advances in soil organic carbon sequestration mechanisms on the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2023, 43(2): 509-522.
- [35] LIU Q, XU H W, YI H J. Impact of fertilizer on crop yield and C : N : P stoichiometry in arid and semi-arid soil[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(8): e4341.
- [36] LIU C A, LI F R, ZHOU L M, et al. Effect of organic manure and fertilizer on soil water and crop yields in newly-built terraces with loess soils in a semi-arid environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117: 123-132.
- [37] LIU C A, ZHOU L M. Soil organic carbon sequestration and fertility response to newly-built terraces with organic manure and mineral fertilizer in a semi-arid environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 172: 39-47.
- (上接第189页)
- [25] 马利芳, 熊黑钢, 孙迪, 等. 不同干扰程度下土壤有机质空间最优插值法研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(19): 7153-7160.
- MA L F, XIONG H G, SUN D, et al. Research on a spatial optimal interpolation method of soil organic matter under different degrees of disturbance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(19): 7153-7160.
- [26] 吕茂奎, 谢锦升, 林廷武, 等. 降雨对米槎次生林和杉木人工林林冠可溶性有机碳迁移的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 134-138.
- LÜ M K, XIE J S, LIN T W, et al. Effects of rainfall on dissolved organic carbon of canopy transport in a secondary forest of *Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5): 134-138.
- [27] STUBBINS A, GUILLEMETTE F, VAN STAN II J T. Throughfall and stemflow: The crowning headwaters of the aquatic carbon cycle[M]. Cham: Springer, 2020: 121-132.
- [28] LIU H F, XU H W, WU Y, et al. Effects of natural vegetation restoration on dissolved organic matter (DOM) biodegradability and its temperature sensitivity [J]. *Water Research*, 2021, 191: e116792.
- [29] 焦宏哲, 李欢, 陈惠, 等. 增温、施氮对中亚热带杉木林土壤可溶性有机质的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1249-1258.
- JIAO H Z, LI H, CHEN H, et al. Effects of soil warming and nitrogen addition on soil dissolved organic matter of *Cunninghamia lanceolata* plantations in subtropical China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1249-1258.
- [30] 杨智榕, 林伟盛, 蒲晓婷, 等. 土壤增温对杉木幼林不同深度土壤溶液 DOM 的影响[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2015, 10(1): 91-94.
- YANG Z R, LIN W S, PU X T, et al. Effect of soil warming on DOM of soil solution at different depths of Chinese fir young forest[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2015, 10(1): 91-94.
- [31] VÉDÈRE C, LEBRUN M, HONVAULT N, et al. How does soil water status influence the fate of soil organic matter: A review of processes across scales[J]. *Earth Science Reviews*, 2022, 234: e104214.