

黄土丘陵沟壑区梯田的碳汇作用及其变化特征

喻恺阳^{1,2}, 成辉^{2,3,4}, 李智广², 张晓萍^{1,3,4}, 冯浩^{1,3,4}, 马红斌⁵, 白云斌⁶

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,

陕西 杨凌 712100; 2.水利部 水土保持监测中心, 北京 100053; 3.中国科学院 教育部 水土保持

与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100; 4.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

5.黄河流域水土保持生态环境监测中心, 陕西 西安 710021; 6.延安市吴起县吴起镇林业站, 陕西 延安 717600)

摘要: [目的] 定量分析和探讨梯田碳汇作用与其特征, 为明确梯田的碳汇作用、巩固和提升生态系统碳汇能力、研编梯田碳汇方法学等提供科学参考。[方法] 选取黄土丘陵沟壑区的陕西省吴起县 1~7 a(T₅), 8~12 a(T₁₀), 13~17 a(T₁₅), 18~22 a(T₂₀), 23~27 a(T₂₅)这 5 个年份区间的梯田作为研究对象, 以未实施水土保持措施的坡耕地为对照, 研究不同年份梯田保碳、减排、增汇等能力与其变化规律。[结果] ①坡耕地修建为梯田后可发挥保碳、减排、增汇等碳汇作用, 梯田年均保碳量、减排量、增汇量(0—100 cm)分别为 0.26, 0.05, 1.36 t/(hm²·a)。②梯田各土层均发挥了一定的增汇效益, 表层土壤(0—40 cm)和深层土壤(40—100 cm)增汇效益分别占 0—100 cm 整个土层的 61.50% 和 38.50%。③随着运行年份的增加, 梯田表层土壤增汇效益显著增加, 深层土壤的增汇效益稍有提升但总体上保持平稳。表层土壤增汇率从 T₅ 的 16.30% 提升至 T₂₅ 的 51.34%, 深层土壤从 T₅ 的 14.00% 提升至 T₂₅ 的 23.66%。[结论] 黄土丘陵沟壑区梯田发挥着良好的保土保碳、减蚀减排和土壤增汇等碳汇作用。在修建 27 a 内, 梯田增汇作用的比例最大, 且表层土壤增汇更为显著; 随着运行年份增加, 梯田保碳作用的比例将逐渐增大。

关键词: 水土保持; 梯田; 碳汇; 监测评价; 黄土丘陵沟壑区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0287-07

中图分类号: S157.3⁺1

文献参数: 喻恺阳, 成辉, 李智广, 等. 黄土丘陵沟壑区梯田的碳汇作用及其变化特征[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 287-293. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.031; Yu Kaiyang, Cheng Hui, Li Zhiguang, et al. Functions and characteristics of terrace carbon sinks in loess hilly and gully regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 287-293.

Functions and Characteristics of Terrace Carbon Sinks in Loess Hilly and Gully Regions

Yu Kaiyang^{1,2}, Cheng Hui^{2,3,4}, Li Zhiguang², Zhang Xiaoping^{1,3,4}, Feng Hao^{1,3,4}, Ma Hongbin⁵, Bai Yunbin⁶

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the

Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. The Center of Soil and Water Conservation Monitoring, Ministry of Water

Resources, Beijing 100053, China; 3. The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China;

4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Monitoring Center for Soil and Water Conservation and Ecological Environment of Yellow River Basin, Xi'an, Shaanxi 710021, China; 6. Forestry Station in Wuqi Town, Yan'an, Shaanxi 717600, China)

Abstract: [Objective] The carbon sink function of terraces and their characteristics were analyzed and discussed to provide a scientific reference for clarifying the carbon sink function, consolidating and enhancing the carbon sink capacity of ecosystems, and researching and compiling a carbon sink methodology for

收稿日期: 2024-06-24

修回日期: 2024-08-20

资助项目: “政府间国际科技创新合作”国家重点研发计划项目“中欧典型农业系统退化土壤修复管理创新研究平台”(2022YFE0115300)

第一作者: 喻恺阳(1994—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持碳汇。Email: yuyuki@nwfu.edu.cn。

通信作者: 张晓萍(1971—), 女(汉族), 河南省焦作市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持与生态环境影响方面的研究。Email: zhangxp@ms.iswc.ac.cn。

李智广(1966—), 男(汉族), 陕西省岐山县人, 博士, 正高级工程师(二级), 主要从事水土保持碳汇、监管、监测、信息化、项目建设和科技方面的工作。Email: lizhiguang@mwr.gov.cn。

terraces. [Methods] Terraces with the operational ages of 1—7 a (T_5), 8—12 a (T_{10}), 13—17 a (T_{15}), 18—22 a (T_{20}), and 23—27 a (T_{25}) were selected at Wuqi County, Shaanxi Province in the loess hilly and gully region. Slope croplands without soil and water conservation measures were selected for baseline comparison to study the capabilities of terraces in terms of carbon preservation, emission reduction, and carbon sequestration across different years. [Results] ① After the transformation of sloped croplands into terraces, an increase was observed in carbon preservation, emission reduction, and carbon sequestration. Annual carbon preservation, emission reduction, and carbon sequestration (0—100 cm) were 0.26, 0.05 and 1.36 t/hm² respectively. ② Each soil layer of the terraces contributed certain benefits; the carbon sequestration benefits of the surface (0—40 cm) and deep (40—100 cm) soil layers accounted for 61.50% and 38.50% of the entire soil layer, respectively. ③ The benefits of the terrace surface soil significantly increased with the increase in the operation year of the terrace, while the benefits of deep soil were slightly improved but remained stable on the whole. The rate of carbon sequestration in the surface soil increased from 16.30% at T_5 to 51.34% at T_{25} and that in the deep soil increased from 14.00% at T_5 to 23.66% at T_{25} . [Conclusion] The terraces in the loess hilly and gully regions exhibited significant carbon sink functions, including carbon preservation, emission reduction, and carbon sequestration. The proportion of carbon sequestration capacity was the largest within 27 years of terrace operation, and the increase in the surface soil was more significant. The proportion of carbon preservation in the carbon sink capacity of terraces gradually increases with an increase in terrace operation years.

Keywords: soil and water conservation; terrace; carbon sink; monitoring and evaluation; loess hilly and gully region

土壤侵蚀是全球普遍关注的环境问题之一,对全球碳循环产生了显著影响。梯田作为防治坡面土壤侵蚀的重要工程措施,在黄土高原地区得到广泛应用。针对梯田的研究,多集中在其蓄水保土和减水减沙效益评估^[1-2]、增进土壤质量^[3]、积累土壤有机碳^[4-5]、改善土壤养分等^[6]方面,较少有对梯田修建后所发挥的固碳作用、增汇能力及其变化特征进行系统研究,更少从梯田所发挥保土的角度研究其在保碳效益和减排方面的作用。为此,本文以黄土丘陵沟壑区典型县吴起县不同年份的旱作梯田为对象,通过野外实地采样,结合李智广等^[7]、成辉等^[8]提出的保土保碳、减蚀减排、增绿增汇的概念框架,系统探讨和分析评价梯田在保碳、减排和增汇等方面的作用,以期了解和掌握梯田的碳汇特征,为制定水土保持行业梯田碳汇方法学提供关键的理论支持和科学依据,为生态低碳小流域建设和新时代水土保持治理提质增效提供可靠的技术和方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区陕西省吴起县(107°38′57″—107°32′49″E, 36°33′33″—37°24′27″N)属黄土高原丘陵沟壑区第二副区,总面积 3 791.5 km²,县内有无定河和北洛河 2 条水系。气候属半干旱温带大陆性季风气候,多年平均降水量 483.4 mm,相对集中在 7—9 月,其占全年降水量的 62.4%。年平均气温 7.8 °C,年潜在蒸发量为 891.23 mm。植被以山杏(*Armeniaca sibirica*)、刺

槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主。土壤主要以黄绵土、新积土为主。经全面了解和野外调查,吴起县梯田上主要种植作物为玉米、荞麦、土豆等,采样实测梯田土壤质地为壤土,其中砂粒含量为 33.58%、粉粒含量为 54.49%、黏粒含量为 11.93%。吴起县自 1960 年开始修建梯田,主要为土坎水平梯田。据吴起县自然资源局统计数据,2023 年该县梯田面积为 1.70×10^4 hm²,占基本农田的 56.44%。

1.2 土样采集与处理

采用区域随机布点法,在研究区选择施肥、管理、轮作(玉米—土豆)等营造方式一致的梯田地块,使其在空间上均匀分布,尽可能避免农作物管理差异对梯田碳汇作用的影响。选择修建后运行 5 个年份区间的梯田为研究对象,分别为 1~7 a (T_5), 8~12 a (T_{10}), 13~17 a (T_{15}), 18~22 a (T_{20}), 23~27 a (T_{25}),以无实施任何水土保持措施、管理方式一样的坡耕地(SL)为对照。于 2023 年 11 月,开展野外调查与土壤样品采集。坡耕地和种植作物梯田样地共计 30 个,包括 5 个对照(SL),6 个 T_5 ,5 个 T_{10} ,4 个 T_{15} ,5 个 T_{20} ,5 个 T_{25} ,其分布如图 1 所示。每个样地选择典型地段设置 3 个样点进行重复采样,对梯田样地,在同一田面按照梯田修筑时的里(挖方)、中、外(填方)采样。采样前,去除地表的植被和其他杂物,每个采样点采集的土壤质量一致,并将每个采样点的土壤样品按分层(0—20, 20—40, 40—60, 60—80,

80—100 cm)进行混合,取约 1 kg 土壤样品装入带有标签的自封袋中,共采集 150 份混合样品。同时,在每块梯田田面和坡耕地的中部,挖土壤剖面,用 100 cm³ 环刀在每个土层采集 1 个原状土样,共计 150 个环刀样品。

将土壤混合样品带回实验室,剔除作物根系和其他杂物,自然风干后研磨过 0.149 mm 细筛,采用《土壤检测 第 6 部分:土壤有机质的测定 NY/T1121.6-2006》中的重铬酸钾—硫酸氧化方法测定土壤有机碳含量(SOC)。环刀样品放入烘箱中,105 °C 烘干至恒重,取出称重测定土壤容重。

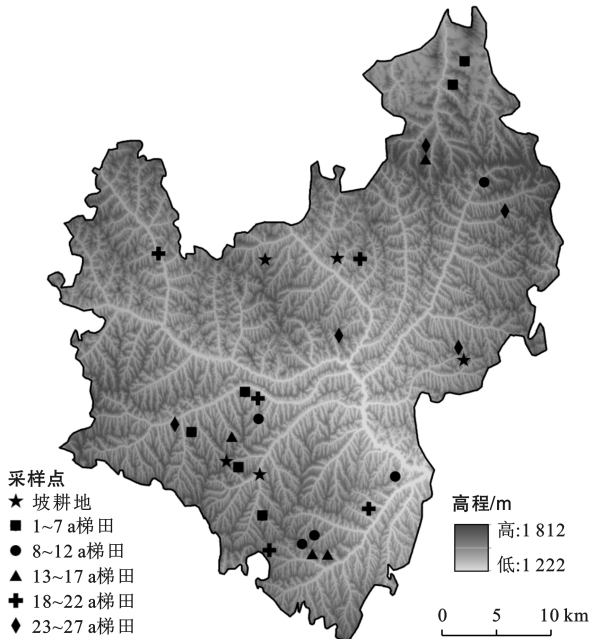


图 1 吴起县坡耕地和不同年份梯田采样点分布

Fig.1 Distribution of soil sampling plots on slope cropland and terrace with different construction years at Wuqi County

1.3 研究方法

1.3.1 梯田的保土保碳量计算 梯田的保土保碳作用是指在坡耕地修建梯田后,相较于坡耕地所减少土壤流失量(即保土量)中含有的有机碳量(以二氧化碳计)。根据数据的可得性,可采用公式(1)—(2)计算保碳量:

$$C_{CP-T} = (M_{SL} - M_T) \cdot \omega_{SL} \cdot y \cdot 10^{-5} \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

$$C_{CP-T} = M_{SL} \cdot (1 - E) \cdot \omega_{SL} \cdot y \cdot 10^{-5} \times \frac{44}{12} \quad (2)$$

式中: C_{CP-T} 为梯田保土保碳量(t/hm^2); M_{SL} 为坡耕地多年平均土壤侵蚀模数[$t/(km^2 \cdot a)$]; M_T 为梯田多年平均土壤侵蚀模数[$t/(km^2 \cdot a)$]; ω_{SL} 为坡耕地土壤有机碳含量(g/kg); y 为梯田修建后运行时长(a); E 为中国土壤流失方程(Chinese soil loss equation,

CSLE)中梯田措施的因子值^[9]; 44/12 为土壤有机碳转为二氧化碳的系数。

1.3.2 梯田的减蚀减排量计算 梯田的减蚀减排作用是指梯田所拦蓄的土壤(即坡耕地所流失土壤)在侵蚀搬运过程中被矿化氧化、导致土壤有机碳的释放产生的 CO_2 量。减排量的计算公式为:

$$C_{RE-T} = C_{CP-T} \cdot P_{se} \quad (3)$$

式中: C_{RE-T} 为梯田减蚀减排量(t/hm^2); P_{se} 为 SOC 矿化的比例(%). 根据 Lal 等^[10]提出的土壤有机碳在搬运过程中有 20%~40% 被矿化分解,根据保守性原则^[11],本文中 P_{se} 取值 20%。

1.3.3 梯田的土壤增汇量计算 梯田的土壤增汇作用是指相较于坡耕地,修建梯田后土壤碳库的增加量(以二氧化碳计)。增汇量的计算公式为:

$$C_{CS-T} = \sum_i (D_{Ti} - D_{SLi}) \times \frac{44}{12} \quad (4)$$

式中: C_{CS-T} 为梯田土壤增汇量(t/hm^2); D_{Ti} 为梯田第 i 层土壤有机碳密度(density of soil organic carbon, DSOC)(t/hm^2); D_{SLi} 为坡耕地第 i 层 DSOC (t/hm^2); i 为某深度的土层。本研究将 100 cm 深度的土壤平均分为 5 层, $i = 1, 2, 3, 4, 5$ (分别代表 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 深度的土层)。

1.3.4 数据处理与分析方法 使用 Excel 2021 软件进行数据处理,显著差异性使用 SPSS 20 中的 LSD 方法分析,图表制作使用 Origin 2021。

2 结果与分析

2.1 梯田保土保碳量

梯田的保土量可通过径流小区实测坡耕地和梯田的土壤流失量之差计算(简称实测法)。获取与吴起县地貌和气候类型相似、地理位置接近的辛店沟坡面径流场(绥德县)径流小区的监测数据分析,结果表明:坡耕地土壤流失模数在 3 043.00~3 319.00 $t/(km^2 \cdot a)$ 之间,梯田土壤流失量均值为 $8.00 \pm 1.41 t/(km^2 \cdot a)$ (表 1)。由此可得出,梯田保土效益范围为 3 035.00~3 311.00 $t/(km^2 \cdot a)$,平均值为 $3 173.00 \pm 195.16 t/(km^2 \cdot a)$ 。梯田的保土量也可通过 CSLE 模型中 E 因子计算获得(简称模型法)。以吴起县 2020, 2021 和 2022 年的土壤侵蚀栅格数据为底图,利用 ArcGIS 10.8 获取大于 6° 的坡耕地土壤侵蚀数据,得出 2020, 2021 和 2022 年坡耕地的土壤侵蚀模数分别为 4 401, 4 022, 3 631 $t/(km^2 \cdot a)$,平均值为 $4 018.00 \pm 385.02 t/(km^2 \cdot a)$ 。吴起县梯田基本为土坎水平梯田,根据 CSLE 中水土保持工程措

施因子,梯田 E 因子值为 0.084^[12]。由此计算得出,梯田保土效益为 $3\,680.49 \pm 352.67 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。上述实测法和模型法所得梯田保土效益没有显著差异 ($p = 0.17$),两者的平均值表明,吴起县梯田的保土效益为

$3\,426.75 \pm 253.75 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。实测吴起县坡耕地 0—100 cm 土层土壤有机碳含量为 2.05 g/kg,由此得出,梯田在修建不同时段上,即 $T_5, T_{10}, T_{15}, T_{20}, T_{25}$ 的保碳量分别为 1.29, 2.58, 3.86, 5.15, 6.44 t/hm^2 。

表 1 吴起县梯田两种保土量计算方法

Table 1 Quantity of soil conservation by terraces using two approaches at Wuqi County $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$

方法	区域	土壤流失量		保土量
		坡耕地	梯田	
实测法	辛店沟坡面径流场	3181.00 ± 195.16	8.00 ± 1.41	3173.00 ± 195.16
模型法	吴起县	4018.00 ± 385.02	337.51 ± 32.35	3680.49 ± 352.67

注:①数值为平均值±标准误;②实测法中所用辛店沟坡面径流场的土壤流失数据和模型法中所用 E 因子值,均来源于水利部水土保持监测中心《全国水土流失动态监测项目成果汇编(2020,2021 和 2022 年)》。

2.2 梯田减排量

以 20% 作为 SOC 在流失过程中的矿化氧化比例,对应 $T_5, T_{10}, T_{15}, T_{20}, T_{25}$ 梯田的保碳量 1.29, 2.58, 3.86, 5.15, 6.44 t/hm^2 ,由公式(3)可以计算出相应的减排量分别为 0.26, 0.52, 0.77, 1.03, 1.29 t/hm^2 。

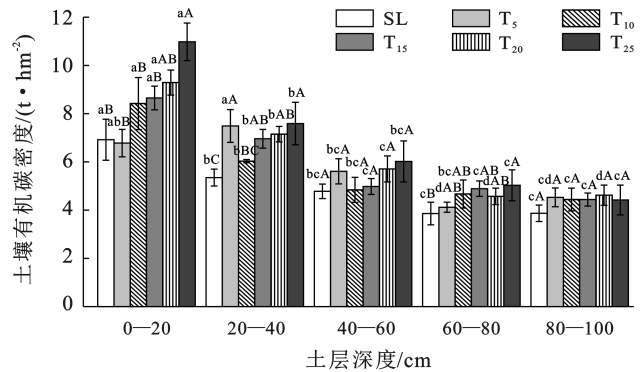
2.3 梯田增汇量

2.3.1 坡耕地和梯田土壤有机碳密度变化 坡耕地 DSOC(有机碳密度)随着土层深度增加而不断降低(图 2),0—20 cm 土层的 DSOC 为 $6.92 \pm 0.85 \text{ t}/\text{hm}^2$,显著高于其他土层,分别是 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 土层的 1.29, 1.45, 1.79, 1.79 倍。不同运行年份梯田 DSOC 随着土层深度增加表现为降低趋势,0—20, 20—40 cm 平均 DSOC 分别为 $8.82 \pm 0.68, 7.04 \pm 0.28 \text{ t}/\text{hm}^2$,显著高于 40—60, 60—80, 80—100 cm 的 DSOC(分别为 $5.43 \pm 0.22, 4.66 \pm 0.16, 4.49 \pm 0.38 \text{ t}/\text{hm}^2$)。不同年份梯田同一土层深度的 DSOC 均高于坡耕地(T_5 的 0—20 cm 除外),且随着运行年份增加,梯田表层(0—40 cm)DSOC 显著高于坡耕地,深层(40—100 cm)DSOC 无显著差异。

2.3.2 梯田土壤增汇量和增汇率变化 修建梯田后,随着运行年份增加,表层土壤增汇量显著增加,其中 0—20 cm 土层增汇量从 T_5 时的 $-0.51 \text{ t}/\text{hm}^2$ 增加至 T_{25} 时的 $14.89 \text{ t}/\text{hm}^2$,增汇率从 -2.02% 提升至 58.67% (图 3)。20—40 cm 的增汇量从 $7.85 \text{ t}/\text{hm}^2$ 增加至 $8.21 \text{ t}/\text{hm}^2$,增汇率从 40.00% 提升至 41.87% 。深层土壤增汇率与表层有相似的变化趋势,40—60, 60—80, 80—100 cm 增汇率分别从 T_5 的 $17.36\%, 6.74\%$ 和 17.05% 变为 T_{25} 的 $25.94\%, 30.31\%$ 和 14.21% 。

随着梯田土层深度增加,土壤增汇量表现为降低趋势,且表层土壤增汇量显著高于深层土壤(表 2)。从表 2 可以看出,0—20 cm 土层土壤增汇量为 $6.34 \text{ t}/\text{hm}^2$,分别是 40—60, 60—80, 80—100 cm 土层的

2.08, 2.13, 3.03 倍;20—40 cm 为 $6.60 \text{ t}/\text{hm}^2$,分别是 40—60, 60—80, 80—100 cm 土层的 2.17, 2.22, 3.16 倍。整个土层(0—100 cm)的土壤增汇量为 $21.04 \text{ t}/\text{hm}^2$,深层土壤的增汇量为 $8.10 \text{ t}/\text{hm}^2$,占整个土层增汇量的 38.50% 。



注:不同小写字母表示同一年份不同深度土壤有机碳密度具有显著差异 ($p < 0.1$),不同大写字母表示同一深度不同年份间土壤有机碳密度具有显著差异 ($p < 0.1$)。

图 2 吴起县坡耕地和梯田土壤剖面有机碳密度的时间变化

Fig.2 Temporal changes of DSOC in soil profile in slope cropland and terraces at Wuqi County

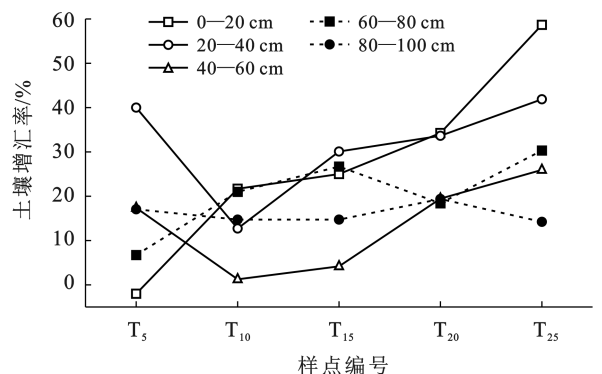


图 3 吴起县梯田不同土层土壤增汇率的时间变化

Fig.3 Temporal changes of soil carbon sequestration rate in different soil layers of terrace at Wuqi County

表2 吴起县不同年份梯田土壤增汇量

Table 2 Soil carbon sequestration of terraces in different years at Wuqi County

t/hm²

土层深度/cm	不同年份梯田土壤增汇量					中位数
	T ₅	T ₁₀	T ₁₅	T ₂₀	T ₂₅	
0—20	-0.51	5.50	6.34	8.69	14.89	6.34
20—40	7.85	2.49	5.90	6.60	8.21	6.60
40—60	3.04	0.22	0.73	3.41	4.55	3.04
60—80	0.95	2.97	3.78	2.60	4.29	2.97
80—100	2.42	2.09	2.09	2.75	2.02	2.09
总计	13.75	13.27	18.84	24.05	33.96	21.04

3 讨论

3.1 梯田保碳减排增汇效益差异性

本研究通过实测法与模型法评价吴起县梯田的保土能力,分别得出的梯田保土量为 $3\ 173.00 \pm 195.16\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 $3\ 680.49 \pm 352.67\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,两种方法得出的保土能力没有显著性差异。在评价梯田保土能力时,选择模型法更为方便快捷。实测法只能反映局部状况,受降雨、地形、土壤质地等因素的影响较大,模型法能反映更广的区域和时间,体现更普遍的规律和状况。使用模型法时,应选择多个年份的土壤侵蚀模数,并去除极端降雨、灾害等情况,所得出的结果才能更加符合多年来梯田保土的普遍状况。

本研究采用两种方法所得保土量的平均值 $3\ 426.75 \pm 253.75\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 作为吴起县梯田的保土效益,由保碳模型计算得出: T₅, T₁₀, T₁₅, T₂₀, T₂₅ 的保碳量分别为 1.29, 2.58, 3.86, 5.15 和 6.44 t/hm², 对应的减蚀减排量分别为 0.26, 0.52, 0.77, 1.03, 1.29 t/hm²。梯田年均保碳量和减排量分别为 0.26, 0.05 t/(hm² · a)。野外采样数据分析得出 T₅, T₁₀, T₁₅, T₂₀, T₂₅ 梯田的年均增汇量(0—100 cm)分别为 2.75, 1.33, 1.26, 1.20 和 1.36 t/(hm² · a),均值为 $1.58 \pm 0.29\ \text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

在本研究中, T₂₅ 梯田的运行年份最长,选择其年均增汇量表示全部梯田的年均增汇量。至 21 世纪初,黄土高原已修成梯田 $4.0 \times 10^6\ \text{hm}^2$ ^[13], 根据本研究的结果推算黄土高原梯田保碳量约为 $1.04 \times 10^6\ \text{t/a}$, 减排量为 $2.0 \times 10^5\ \text{t/a}$, 增汇量为 $5.44 \times 10^6\ \text{t/a}$, 分别相当于 2001—2020 年黄土高原土壤碳汇量 ($2.37 \times 10^6\ \text{t/a}$)^[14] 的 43.88%, 8.44% 和 229.54%。梯田保碳、减排和增汇效益能较大程度巩固土壤碳库碳储量,减少因侵蚀导致的土壤碳矿化,提升土壤增汇能力,有利于降低碳达峰时点的碳峰值,有利于实现碳中和。

3.2 梯田表层土壤增汇量变化趋势

本研究表明,坡耕地改造为梯田后,土壤具有增汇效益。随着运行年份的增加,表层土壤增汇量显著增加,且显著高于深层土壤。主要原因可能是:吴起县梯田种植作物多为玉米、土豆等浅根系作物,产生的有机物质主要富集在表层,对深层土壤影响较小^[15];在耕作过程中还产生了犁底层,阻碍了土壤有机物质向下迁移,对深层土壤有机碳的补给较少^[16]。值得注意的是,在 T₅ 的 0—20 cm 土层表现为碳损失状态(-0.51 t/hm²),出现这种现象的原因可能是:在建设梯田过程中,原坡耕地表层土壤被扰动,与深层未熟化的、有机质含量低的土壤混合,导致表层土壤有机碳下降有关。但随着耕作时间增加,梯田表层土壤养分和水分得以改善,表层土壤质量提高,将会产生显著的碳汇效益。这一点与邱宇洁等^[17]、Chen Die 等^[18] 和张玥等^[19] 的研究结果一致:前者在甘肃省庄浪县研究发现梯田修建后 0~8 a 内,其 DSOC 相较于坡耕地是一种碳损失状态;后者通过 Meta 分析提出,在梯田修建后的前 5 a 土壤难以发挥增汇效益,5 a 以上的梯田对碳固持更有效。

3.3 梯田深层土壤增汇量变化趋势

梯田深层土壤增汇量随时间变化趋于稳定,一方面因为作物生长产生的有机物质对深层土壤影响较小;另一方面是由于深层土壤孔隙度低、缺氧,水分和养分的可用性以及微生物生物量和活性均受到限制,降低了 SOC 的分解速率^[20-21]。深层土壤有机质输入较少,分解速率较低,两者共同作用下使得深层土壤的增汇效益维持稳定状态。尽管深层土壤的增汇量没有显著增长,但深层土壤长期累积碳储量高,仍发挥较大的碳汇效益。从中位数来看,0—20, 20—40, 40—60, 60—80, 80—100 cm 土层的增汇量分别为 6.34, 6.60, 3.04, 2.97, 2.09 t/hm²。表层土壤(0—40 cm)和深层土壤(40—100 cm)增汇量分别占整个土层增汇量的 61.50% 和 38.50%,说明梯田的修建,即使对深层土壤有机碳储量也有明显提升。

4 结论

(1) 作为重要的水土保持工程措施,梯田具有保土保碳、减蚀减排、增绿增汇等多种碳汇作用。梯田年均保碳量、减排量、增汇量(0—100 cm)分别为0.26,0.05,1.36 t/(hm²·a),梯田建设巩固和提升了生态系统碳汇作用,有利于实现碳中和。

(2) 梯田表层和深层土壤的增汇量占整个土层的比例为61.50%和38.50%,各土层均发挥了明显的增汇效益。

(3) 梯田表层土壤增汇率从1~7 a(T₅)的16.30%提升至23~27 a(T₂₅)的51.34%,深层土壤从1~7 a(T₅)的14.00%提升至T₂₅的23.66%。表层土壤增汇率随运行年份增加而显著增加,深层土壤增汇率稍有提升但总体上保持平稳。

致谢:黄河流域水土保持生态环境监测中心徐佳、南昌工程学院黄智军、吴起高级中学冯学慧、西北农林科技大学王浩嘉、刘璇皓、耿文亮、张宇浩等人在采样和试验方面提供帮助,在此一并表示感谢。

参考文献(References)

- [1] 焦菊英,王万中.黄土高原水平梯田质量及水土保持效果的分析[J].农业工程学报,1999,15(2):65-69.
Jiao Juying, Wang Wanzhong. Analysis on the quality of horizontal terraces and the effect of soil and water conservation in Loess Plateau [J]. Transactions of the CSAE, 1999, (2):65-69.
- [2] 吴发启,张玉斌,王健.黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析[J].中国水土保持科学,2004,2(1):34-37.
Wu Faqi, Zhang Yubin, Wang Jian. Study on the benefits of level terrace on soil and water conservation [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(1): 34-37.
- [3] 薛蕊,刘国彬,张超,等.黄土高原丘陵区坡改梯后的土壤质量效应[J].农业工程学报,2011,27(4):310-316.
Xue Sha, Liu Guobin, Zhang Chao, et al. Effects of terracing slope cropland on soil quality in hilly region of Loess Plateau [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 310-316.
- [4] 张超,刘国彬,薛蕊,等.黄土丘陵区坡改梯田土壤碳库组分演变特征[J].水土保持研究,2010,17(1):20-23.
Zhang Chao, Liu Guobin, Xue Sha, et al. Evolution of soil carbon fraction after slope cropland changed into terrace in loess hilly region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(1):20-23.
- [5] Nie Xiaodong, Li Zhongwu, Huang Jinquan, et al. Soil organic carbon fractions and stocks respond to restora-

tion measures in degraded lands by water erosion [J]. Environmental Management, 2017, 59(5):816-825.

- [6] 王祖梅,杨茂进,杨雨珂,等.长期实施梯田和生草措施对红壤坡地果园土壤养分的影响[J].土壤通报,2024,55(2):412-419.
Wang Zumei, Yang Maojin, Yang Yuke, et al. Effects of terrace and grass growing measures on soil nutrients of slope orchards in red soil hilly region [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(2):412-419.
- [7] 李智广,成辉,方怒放,等.淤地坝保碳、减排、增汇作用与其能力评估[J].水土保持学报,2023,37(4):1-6.
Li Zhiguang, Cheng Hui, Fang Nufang, et al. The role of yudiba dams in protecting carbon, reducing carbon emission and enhancing carbon sequestration and its capability assessment [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4):1-6.
- [8] 成辉,钟小剑,李智广,等.崩岗治理碳汇作用与碳汇能力评估[J].中国水土保持科学,2024,22(2):146-153.
Cheng Hui, Zhong Xiaojian, Li Zhiguang, et al. Assessment on the role and capacity of carbon sink in managed Benggang [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024, 22(2):146-153.
- [9] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准:SL190—2007[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for classification and gradation of soil erosion: SL190—2007 [S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008.
- [10] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. Environment International, 2003, 29(4):437-450.
- [11] 中华人民共和国生态环境部.温室气体自愿减排交易管理办法(试行)[EB/OL].(2023-10-19)[2024-06-17].
https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue_10866/202312/content_6918861.html.
Ministry of Ecology and Environment, PRC. Interim rules for voluntary greenhouse emission reduction trading management [EB/OL]. (2023-10-19)[2024-06-17]. https://www.gov.cn/gongbao/2023/issue_10866/202312/content_6918861.html.
- [12] 水利部水土保持监测中心.水利部水土保持监测中心关于印发《2023年度水土流失动态监测技术指南》的通知:水保监[2023]68号[R].北京:水利部,2023.
Soil and Water Conservation Monitoring Center, Ministry of Water Resources. Notice of the Soil and Water Conservation Monitoring Center of the ministry of Water Resources on issuing the Technical Guide for Dynamic Monitoring of Soil and Water Loss in 2023: [2023] No. 68 [R]. Beijing: Ministry of Water Resources, 2023.

- [13] 刘万铨.水土保持是黄土高原改善生态环境保证农业可持续发展的必由之路[J].中国水土保持,1999(4):3-6.
Liu Wanshuan. Soil and water conservation is the only way to improve ecological environment and ensure sustainable agricultural development in Loess Plateau [J]. Soil and Water Conservation in China, 1999(4):3-6.
- [14] 赵雅萍.黄土高原退耕还林(草)土壤碳汇评估及驱动因素分析[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2023.
Zhao Yaping. Evaluation of soil carbon sequestration and analysis of driving factors in the conversion of farmland to forests (grasslands) on the Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [15] Deng Lei, Liu Guobin, Shangguan Zhouping. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A synthesis [J]. Global change biology, 2014,20(11):3544-3556.
- [16] Sun Caili, Xue Sha, Chai Zongzheng, 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.
- [17] 邱宇洁,许明祥,师晨迪,等.陇东黄土丘陵区域改梯田土壤有机碳累积动态[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):87-98.
Qiu Yujie, Xu Mingxiang, Shi Chendi, et al. Dynamic accumulation of soil organic carbon of terrace changed from slope cropland in the hilly Loess Plateau of Eastern Gansu Province [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014,20(1):87-98.
- [18] Chen Die, Wei Wei, Daryanto S, et al. Does terracing enhance soil organic carbon sequestration?: A national-scale data analysis in China [J]. Science of the Total Environment, 2020,721:137751.
- [19] 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. In the past nearly 40 years, the preliminary estimation of soil carbon sequestration benefits of terrace construction on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):190-197.
- [20] Zeng Yi, Fang Nufang, Shi Zhihua. Effects of human activities on soil organic carbon redistribution at an agricultural watershed scale on the Chinese Loess Plateau [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020,303:107112.
- [21] 王震,刘颖,杨明义,等.坝地剖面泥沙有机碳分解特征及其影响因素[J].应用生态学报,2022,33(10):2635-2643.
Wang Zhen, Liu Ying, Yang Mingyi, et al. Characteristics and factors influencing organic carbon decomposition in sediment in check dams [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(10):2635-2643.

(上接第 286 页)

- [32] 李志安,邹碧,丁永祯,等.森林凋落物分解重要影响因素及其研究进展[J].生态学杂志,2004,23(6):77-83.
Li Zhian, Zou Bi, Ding Yongzhen, et al. Key factors of forest litter decomposition and research progress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004,23(6):77-83.
- [33] Wang Jianan, Jiang Yongjun, He Qiufang, et al. Response of soil microbial community in grassland to tunnel construction in the karst trough valley, Zhongliang Mountain, Chongqing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(16):6136-6145.
- [34] 刘芳,汪航飞,蒲春燕,等.不同施肥对葡萄苗根际微生物量、土壤酶活性和生理的影响[J].四川农业大学学报,2023,41(2):318-324.
Liu Fang, Wang Hangfei, Pu Chunyan, et al. Effects of different fertilization on rhizosphere microbial bio-
- mass, soil enzyme activity and physiology of grape seedlings [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023,41(2):318-324.
- [35] 覃蒙尔,李臻,窦莉,等.喀斯特地区植物根系分泌物酶活性对根际土酶活性和养分的影响[J].广西植物,2024,44(3):465-476.
Qin Menger, Li Zhen, Dou Li, et al. Effects of plant root exudates enzyme activities on rhizosphere soil enzyme activities and nutrients in karst areas [J]. Guihaia, 2024,44(3):465-476.
- [36] 郝建朝,吴沿友,连宾,等.土壤多酚氧化酶性质研究及意义[J].土壤通报,2006,37(3):470-474.
Hao Jianchao, Wu Yanyou, Lian Bin, et al. Properties of polyphenol oxidase in soil and its significance [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006,37(3):470-474.