

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.025

贺国凯, 王凯博, 任宗萍, 等. 黄土高原典型小流域水土保持土壤碳库演变特征及其碳汇潜力[J]. 水土保持学报, 2024, 38(6): 161-169.

HE Guokai, WANG Kaibo, REN Zongping, et al. Evolution characteristics of soil and water conservation carbon pool and its carbon sink potential in typical small watershed of the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 161-169.

黄土高原典型小流域水土保持土壤碳库演变特征及其碳汇潜力

贺国凯¹, 王凯博², 任宗萍¹, 徐国策¹, 董彭蓓¹, 王璞¹

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710054; 2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061)

摘要: [目的] 为探究流域尺度综合水土保持措施下土壤碳库的演变特征, 评估流域水土保持碳汇潜力。[方法] 以黄土高原典型水土流失治理小流域滕子沟为研究对象, 分析流域 1977—2022 年水土保持措施配置时空变化, 明确不同水土保持措施配置下土壤有机碳(SOC)库演变规律, 结合情景分析评估不同水土保持配置下流域土壤碳汇潜力。[结果] (1) 与 1977 年相比, 流域水土保持措施总面积增加 32.9%, 其中坝地、坡面林地、梯田草地和梯田林地面积分别增加 0.5%, 5.0%, 11.1%, 16.3%, 水土保持措施类型以梯田草地和坡面草地为主。(2) 与坡面裸地相比, 不同水土保持措施 SOC 密度均有所增加, 并且梯田措施的 SOC 密度高于坡面措施, 梯田草地、梯田林地、坡面草地、沟道草地、坡面林地和坝地分别增加 318.1%, 255.3%, 150.0%, 130.9%, 103.9%, 73.9%。(3) 研究区水土保持碳储量从 1977 年的 264.5 t 增加到 2022 年的 332.8 t, 增加 25.8%, 其中 1977—2004 年仅增加 3.5%, 2004—2015 年增加 22.4%, 随后趋于稳定。(4) 在崩边线以下保持不变的情况下, 崩边线以上采取全梯田草地措施配置, 土壤有机碳汇潜力最大, 相比 2022 年增加 20.5%。[结论] 通过优化水土保持措施配置, 即使在水土保持治理良好的小流域仍有一定碳汇潜力。

关键词: 水土保持碳汇; 土壤碳库; 固碳潜力; 黄土高原

中图分类号: S157.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2024)06-0161-09

Evolution Characteristics of Soil and Water Conservation Carbon Pool and Its Carbon Sink Potential in Typical Small Watershed of the Loess Plateau

HE Guokai¹, WANG Kaibo², REN Zongping¹, XU Guoce¹, DONG Pengbei¹, WANG Pu¹

(1. State Key Laboratory of Ecological Water Conservancy in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: [Objective] To investigate the evolution of soil carbon pool under catchment scale integrated soil and water conservation measures and evaluate the potential of soil and water conservation carbon sink. [Methods] Typical small watershed for soil and water loss control in the Loess Plateau was taken as the research object. Based on the analysis of the spatio-temporal changes of soil and water conservation measures in the watershed, the evolution law of soil organic carbon (SOC) pool under different soil and water conservation measures was clarified, and the potential of soil carbon sink under different soil and water conservation arrangements was evaluated with scenario analysis. [Results] (1) Compared with 1977, the total area of soil and water conservation measures in the basin increased by 32.9%, with the area of dam land, slope woodland, terraced grassland and terraced woodland increasing by 0.5%, 5.0%, 11.1% and 16.3%, respectively. The types of soil and water conservation measures were mainly terraced grassland and slope grassland. (2) The SOC density of different soil and water conservation measures increased compared with the bare land on the slope, and the SOC density of terraced measures was higher than that of slope measures.

收稿日期: 2024-06-08 修回日期: 2024-08-13 录用日期: 2024-08-19 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-09-18

资助项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目 (U2243225)

第一作者: 贺国凯 (2000—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持土壤碳汇研究。E-mail: 1350356272@qq.com

通信作者: 任宗萍 (1982—), 女, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事土壤侵蚀与生态水文研究。E-mail: renzp@xaut.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

Terraced grassland, terraced woodland, slope grassland, channel grassland, slope woodland and dam land increased by 318.1%, 255.3%, 150.0%, 130.9%, 103.9% and 73.9%, respectively. (3) Soil and water conservation carbon storage in the study area increased from 264.5 t in 1977 to 332.8 t in 2022, with an increase of 25.8%, of which only 3.5% increased from 1977 to 2004, 22.4% increased from 2004 to 2015, and it then tended to be stable after 2015. (4) Under the condition that the soil below the ridge crest line remained unchanged, the soil organic carbon sequestration potential was the highest when the terraced grassland measures were adopted above the ridge crest line, with an increase of 20.5% compared with 2022. [Conclusion] The results indicate that, even in small watersheds with well-established soil and water conservation measures, optimizing the configuration of soil and water conservation measures can further enhance carbon sequestration potential.

Keywords: soil and water conservation carbon sink; soil carbon pool; carbon sequestration potential; the Loess Plateau

Received: 2024-06-08

Revised: 2024-08-13

Accepted: 2024-08-19

Online(www.cnki.net): 2024-09-18

为应对气候变化,实现社会经济可持续发展,我国提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的战略目标。作为陆地生态系统中最大的碳库,土壤碳库的碳储量约为大气碳库的3倍、陆地植被碳库的2.5倍,在调节碳循环和生态系统功能方面起着至关重要的作用^[1]。因此,增加土壤碳库容量,提升土壤碳汇功能对于我国“双碳”目标的实现具有重要意义。

2023年,中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《关于加强新时代水土保持工作的意见》^[2]中明确提出要加强水土保持碳汇能力研究。水土保持碳汇是在对自然因素和人为活动造成的水土流失采取预防和治理措施后,产生碳汇的过程或能力^[3]。水土保持措施最初是为了控制严重的土壤侵蚀和减少泥沙输送而进行的^[4],其包括梯田、林草、淤地坝等坡面和沟道措施。除了有效防控水土流失外,已有研究^[5]发现,不同水土保持类型的土壤碳储量存在明显差异,水土保持措施能够显著增强土壤有机碳库。梯田和林草措施通过提高土壤中的水分和养分可用性促进SOC积累,与对照裸地相比其SOC储量分别提高0.11、0.53倍^[6]。淤地坝通过拦蓄作用使得黄土高原1970—2020年SOC流失量减少 2.16×10^7 t;同时也避免土壤流失过程中的SOC矿化,降低 $4.33 \times 10^6 \sim 8.66 \times 10^7$ t的碳排放量^[7-8]。国外研究^[9-10]也发现,植被措施能够显著增加土壤有机碳储量,林地和草地较耕地分别增加11.56%、13.56%。然而,现有研究多集中在单一水土保持措施碳汇效益研究,基于模型模拟法、相关关系统计法等方法评估土壤碳汇机理,缺少对流域尺度综合水土保持措施下土壤碳库时空演变特征系统分析^[11],尤其是缺乏对流域水土保持碳汇潜力的综合评估,制约了新时代面向国家“双碳”战略目标的水土保持工作有序开展。

开展水土保持碳汇计量、监测与评估是服务我国“双碳”战略的重要举措之一^[12]。黄土高原是我国水土流失治理的重点区域,新中国成立以来,先后在该区域实施小流域治理、淤地坝建设、坡耕地整治和退耕还林(草)等一系列大型生态工程。目前潼关以上地区保存各类水土保持措施面积约1474万hm²,其中梯田面积349万hm²、人工林草面积1005万hm²、坝地18万hm²、封禁治理面积102万hm²^[13]。实施水土保持措施后黄土高原固碳能力显著提高,1982—1999年SOC储量增量为 4.35×10^6 t,1999—2017年为 15.83×10^6 t,增加约260%^[14]。为此,本研究以黄土高原长期治理小流域为例,在分析流域不同水土保持措施时空变化的基础上,探明流域水土保持土壤碳库演变特征,并结合情景分析,评估不同水土保持配置下流域土壤碳汇潜力,旨在为黄土高原水土保持碳汇计量与评估提供科学依据,并对未来水土保持措施实施和政策制定提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省绥德县滕子沟小流域(110°19'41"—110°20'16"E,37°33'28"—37°33'59"N),属黄土高原丘陵沟壑区第一副区(图1)。该流域是无定河一级支流韭园沟的一条支沟,早在1953年被列为水土保持试验示范流域,长期开展水土保持综合治理,具有相对完备的水土保持措施类型,是研究黄土高原水土保持碳库演变规律的理想流域。流域面积约为0.54 km²,主沟道长1.12 km,海拔912~1080 m。流域多年平均降水量500 mm,年平均气温9.3℃,属温带大陆性季风气候。流域内土壤类型以黄绵土为主,质地疏松,易发生水土流失。

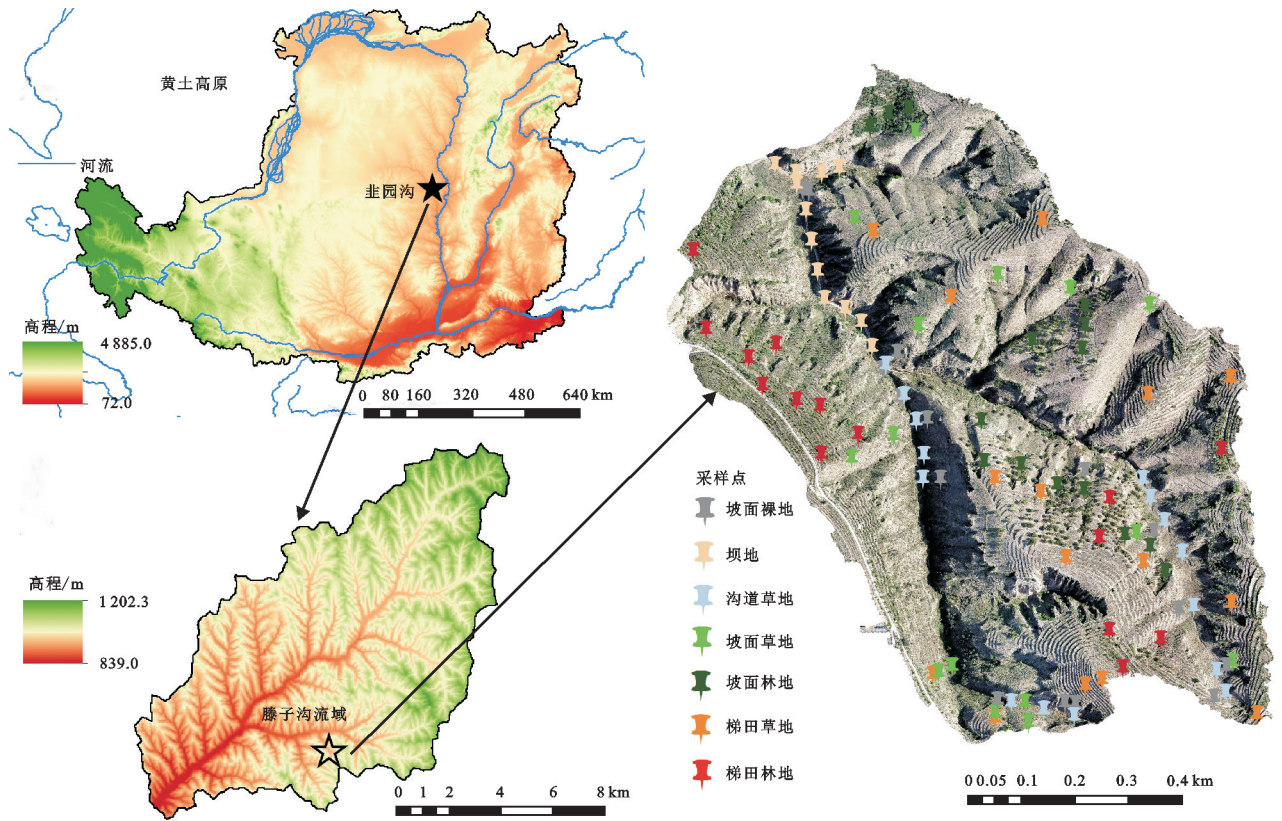


图 1 研究区位置及流域采样点分布

Fig.1 Location of the study area and distribution of the sampling points in the watershed

1.2 研究方法

1.2.1 不同时期水土保持措施类型图的获取 研究区不同时期的水土保持措施类型图是在各期土地利用类型图的基础上,结合水土保持措施类型重新划分获得。其中,2022 年土地利用图来源于无人机航拍结合实地勘察结果。1977 年、2004 年和 2015 年的土地利用图来自遥感影像解译,并参考 2022 年航拍图进行校正。基于无人机影像,结合各期土地利用图以及 2022 年实地勘察结果,将流域水土保持措施类型划分为坝地、沟道草地、坡面草地、坡面林地、梯田草地、梯田林地 6 类。由于退耕还林(草)工程实施后流域内坡耕地全部转化为其他土地利用类型,本研究以裸露坡面(坡面裸地)作为对照,对比分析不同水土保持措施的土壤碳汇潜力。

1.2.2 不同水土保持措施土壤样品采集与测定 于 2022 年 7 月对研究区进行全流域土壤样品采集。基于流域划分的不同水土保持措施类型,结合地形地类从沟头向沟口对全流域进行采样。尽可能在同一措施类型下采集不同建设年限、不同立地条件下土壤样品。使用硬质塑料铲清除表层枯枝落叶后采集表层 0—5 cm 厚土壤,每个样点采集 5 个样品,混合均匀后取 500 g 土壤装入自封袋中,作为 1 个样品。全流域共采集样品 105 个,每种类型采集 15 个重复样。将采集的土壤样品带回实验室,自然风干后研磨过 100 目筛装入透明封口袋备用。采用环刀法^[15]测定土壤质量密度,

采用重铬酸钾外加热法^[16]测定土壤有机碳。

1.2.3 土壤碳库的计算

(1)土壤有机碳密度的计算

土壤有机碳密度被用于衡量单位面积一定深度土体中的有机碳储量,计算公式为:

$$D_i = \rho_i h_i c_i (1 - \delta) / 100 \quad (1)$$

式中: D_i 为有机碳密度(kg/m^2); ρ_i 为土壤质量密度(g/cm^3); h_i 为土层厚度(cm); c_i 为有机碳含量(g/kg); δ 为表层 $>2 \text{ mm}$ 砾石含量($\%$)(本研究中砾石含量均为 0)。

(2)土壤有机碳储量的计算

土壤有机碳储量(SOC_i)是指土壤中所含的有机碳总量,计算公式^[17]为:

$$\text{SOC}_i = D_i A_i \quad (2)$$

式中: SOC_i 为有机碳储量(kg); D_i 为有机碳密度(kg/m^2); A_i 为流域内每种水土保持措施的面积(m^2)。

1.2.4 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵代表研究区土地利用类型中涉及的土地利用转移的数量和方向,可以直观反映土地利用格局的时空演变过程,其具体表达形式为:

$$Q_{ab} = \begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdots & Q_{1n} \\ Q_{21} & Q_{22} & \cdots & Q_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Q_{n1} & Q_{n2} & \cdots & Q_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: Q 为面积; a 为初始时期土地利用类型, $a \in [1, n]$; b 为终止时期土地利用类型, $b \in [1, n]$; Q_{ab} 指初始时期的第 a 种地类转化为终止时期的第 b 种地类的面积; n 为土地利用类型数量。

1.2.5 水土保持措施演变情景设定及碳汇潜力计算

(1) 情景设定

本文参考高海东等^[18]研究方法设置流域水土保持土壤碳库潜力情景。保持崩边线以下现状条件不变, 崩边线以上分别设置为全部修建梯田草地(A)、全部修建梯田林地(B) 2 种水保措施配置。其次, 本文考虑在梯田、坡面措施组合的情况下碳库潜力的变化, 设置现状条件崩边线以上梯田、坡面措施面积不变的情况下, 将其设置为梯田包含的面积全种草+坡面包含面积全种草(C)、梯田包含的面积全种草+坡面包含面积全种林(D)、梯田包含的面积全种林+坡面包含面积全种草(E)、梯田包含的面积全种林+坡面包含面积全种林(F) 这 4 种措施配置, 即全梯田草地(A)、全梯田林地(B)、梯田草地+坡面草地(C)、梯田草地+坡面林地(D)、梯田林地+坡面草地(E)、梯田林地+坡面林地(F) 6 种情景措施配置。

(2) 水土保持土壤碳汇潜力的计算

本文中水土保持土壤碳汇潜力是指在区域内特定土壤、气候等环境条件不变的情况下, 在未来一段时间内水保措施调整后土壤有机碳储量的增加值。其计算公式为:

$$SOCP = SOC_m - SOC \quad (4)$$

式中: $SOCP$ 为研究区内的土壤有机碳汇潜力(t); SOC_m 和 SOC 分别为流域内水土保持措施调整后和调整前的总土壤有机碳储量(t)。土壤碳汇潜力通过调整前后有机碳储量差值大小进行评估, $SOCP$ 值越大, 表示其碳汇潜力越大。考虑到相似气候和土壤条件下, 土壤有机碳含量主要受土地利用类型影响^[19], 本研究采用 2022 年实测不同水土保持措施下 SOC 含量平均值计算各时期流域土壤碳储量。在采样过程中针对同一水土保持措施下进行不同建设年限, 不同立地条件样品的多点采集, 在计算中采用平均值, 研究结果总体能够反映流域内水土保持措施下土壤碳库演变趋势及其潜力特征。

1.3 数据处理

本文采用 ArcGIS 10.8 软件对研究区 4 期土地利用、水土保持措施面积进行处理, 并利用 Excel 2016 软件建立土地利用转移矩阵; 利用 SPSS 25.0 软件对不同水土保持配置下 SOC 含量、SOC 密度进行单因素 ANOVA 检验; 使用 Origin 2022 软件进行统计图表制作。

2 结果与分析

2.1 小流域土地利用和水土保持措施演变特征

研究区不同时期土地利用类型均以草地为主, 占流域面积的 64.8%~88.6%。1977—2004 年耕地向草地转移 16.0%; 2004—2015 年有 27.4% 耕地转为草地, 但同时有部分草地转化为林地, 转化面积占比 3.5%; 2015—2022 年草地大幅转为林地, 转化面积占 12.7% (图 2a)。至 2022 年各土地利用面积占比表现为草地(78.7%)>林地(16.0%)>园地(5.2%)>耕地(0.1%)。

从水土保持措施类型看, 研究区以梯田草地和坡面草地为主(图 2b)。1977—2022 年坝地、坡面林地、梯田草地和梯田林地面积总体呈增加趋势。1977—2004 年坡面草地面积有 12.8% 转为梯田草地, 有 1.8% 梯田草地面积转化为梯田林地; 2004—2015 年无措施地类有 15.0% 转为坡面草地, 且坡面草地有 6.4% 转为梯田草地; 2015—2022 年则主要表现为草地向林地的转化, 梯田草地向梯田林地转化的面积高达 10.9%, 还有 1.3% 坡面林地转为梯田林地。

2.2 不同水土保持措施下土壤有机碳特征及其碳汇潜力

不同水土保持措施下 SOC 含量存在显著差异($p < 0.05$) (图 3a)。以坡面裸地为对照, 坝地(6.18 g/kg)、沟道草地(8.21 g/kg)、坡面草地(9.03 g/kg)、坡面林地(7.31 g/kg)、梯田草地(13.89 g/kg) 和梯田林地(11.80 g/kg) SOC 含量分别增加 75.2%、132.7%、155.9%、107.1%、293.7% 和 234.5%, 且梯田林地和梯田草地的 SOC 含量显著高于其他措施($p < 0.05$)。在水土保持工程措施一致的情况下, SOC 含量表现为草地>林地, 但林地、草地植被措施之间 SOC 含量无显著差异; 当均有植被措施时, SOC 含量则表现为梯田措施显著高于坡面措施($p < 0.05$)。梯田措施有机碳密度显著高于其他措施($p < 0.05$), 但梯田草地、梯田林地的碳密度之间没有显著性差异(图 3b)。

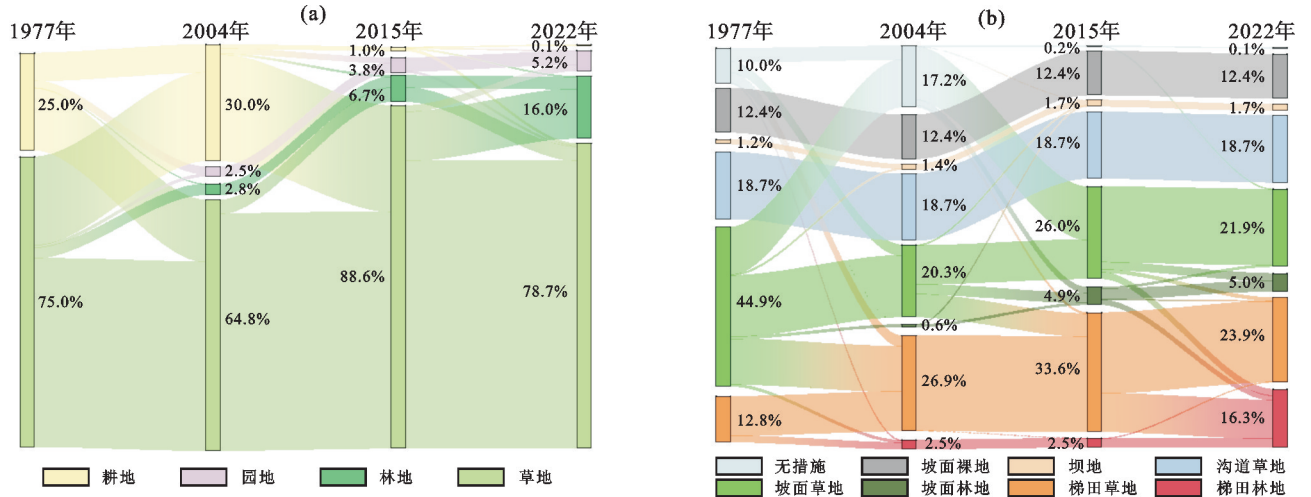
不同水土保持措施单位面积土壤碳汇潜力表现为梯田草地(0.72 kg/m²)>梯田林地(0.58 kg/m²)>坡面草地(0.34 kg/m²)>沟道草地(0.30 kg/m²)>坡面林地(0.24 kg/m²)>坝地(0.17 kg/m²) (图 4)。

2.3 不同水土保持措施下土壤有机碳库演变特征

与 1977 年相比, 2022 年研究区的总碳储量增加 25.8% (图 5), 其中 2004—2015 年碳储量增长速率最快, 为 22.4%。不同水土保持措施下碳储量有增有减, 坝地、坡面林地和梯田林地等呈增加趋势, 其中梯田林地最为突出, 增加 68.7 t, 其次为坡面林地, 增加量达到 12.0 t。坡面草地措施碳储量呈减少趋势, 从 132.9 t 减少至 64.7 t。梯田草地措施碳储量呈现先增加后减少的趋势, 并在

2015 年达到 166.4 t 的峰值。水土保持措施对流域总碳储量的贡献表现为 1977 年坡面草地贡献最大,占该年总

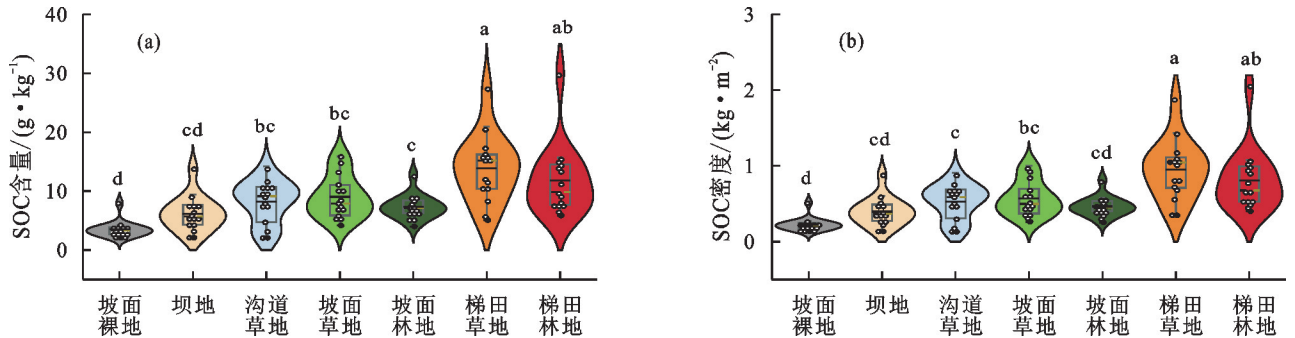
碳储量的 50.3%;2004—2022 年,梯田草地对总碳储量的贡献最大,约为 35.5%~49.7%。



注:图 b 中无措施对应流域内的坡耕地。

图 2 1977—2022 年滕子沟流域土地利用和水土保持措施演变特征

Fig.2 Evolution characteristics of land use and soil and water conservation measures in Tengzigou watershed from 1977 to 2022



注:有相同标记字母的差异不显著,不同标记字母为差异显著 ($p < 0.05$)。

图 3 不同水土保持措施下有机碳含量与密度特征

Fig.3 Characteristics of organic carbon content and density under different soil and water conservation measures

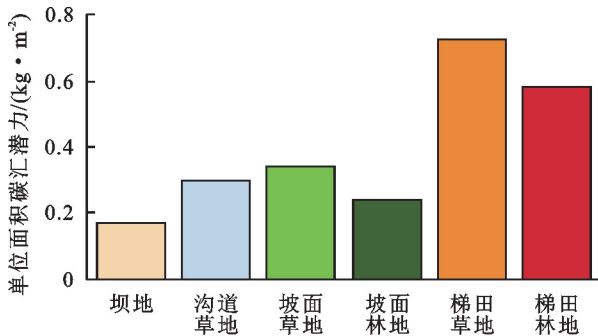


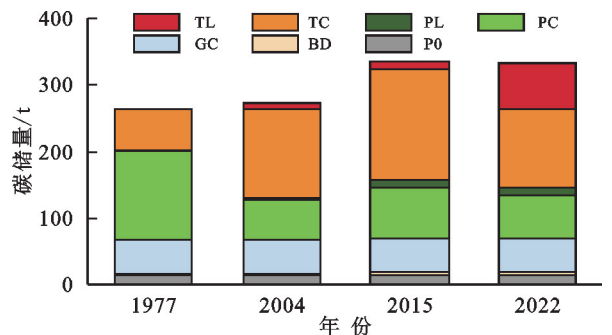
图 4 不同水土保持措施单位面积土壤有机碳汇潜力

Fig.4 Potential of soil organic carbon sink per unit area under different soil and water conservation measures

2.4 小流域水土保持碳汇潜力

相比现状条件,全梯田草地(A)土壤碳汇潜力最高,达到 68.3 t,其次为全梯田林地措施(B)和梯田草地+坡面草地配置(C),分别为 18.4,14.7 t,梯田草地+坡面林地措施配置(D)下土壤碳汇潜力最小,仅有 0.2 t(图 6)。梯田林地+坡面草地(E)和梯田林地+坡面林地(F)配置相比现状碳汇潜力分别减少 15.1,29.7 t。A、B、C、D 4

种情景下土壤碳储量与现状相比分别增加 20.5%,5.5%,4.5%,0.1%,E、F 情景下分别减少 4.5%和 8.9%。



注:TL 为梯田林地;TC 为梯田草地;PL 为坡面林地;PC 为坡面草地;GC 为沟道草地;BD 为坝地;P0 为坡面裸地。

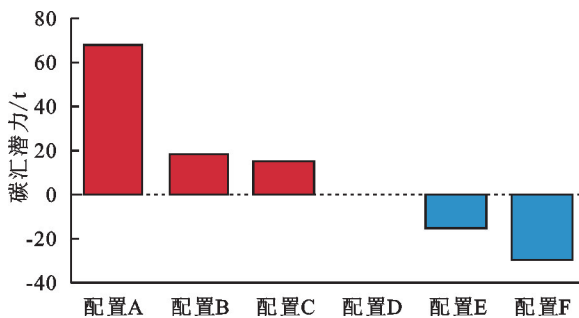
图 5 1977—2022 年不同水土保持措施碳储量演变
Fig.5 Carbon storage evolution of different soil and water conservation measures from 1977 to 2022

3 讨论

3.1 不同水土保持措施对土壤有机碳库的影响

研究表明,不同水土保持措施均能有效提高流

域内土壤有机碳含量,并且土壤有机碳含量在草地措施下大于林地措施,是因为处于半干旱区的流域更适宜草地的生长^[20]。与林地相比,一方面,草地具有更优越的土壤水分条件和更快的生物量周转速率^[21],有利于改善微生物群落组成及其生物活性,从而促进土壤有机质的分解和转化,进而实现土壤增汇。庞大复杂的地下根系是草地植物的重要组成部分,其生物量往往大于地上生物量;草地植物枯死后,一部分凋落物经腐殖化作用,形成土壤有机碳固定在土壤中^[22],另一部分有机碳经过土壤动物和土壤微生物的矿化作用,被植物再次利用,从而构成生态系统内部碳的生物循环;另一方面,草地覆盖可增加地面粗糙度,降低水流流速和减少地表径流量^[23],减小水流对土体的分散作用和水流挟沙能力,从而减少地表土壤侵蚀,减少土壤有机碳输移而降低土壤有机碳矿化释放和淋滤,进而实现固持土壤有机碳,减少土壤碳库损失。在纵向和横向的综合影响下,造成林草措施的土壤有机碳含量大于裸地。



注:碳汇潜力以 2022 年为基准;配置 A 为全梯田草地;配置 B 为全梯田林地;配置 C 为梯田草地+坡面草地;配置 D 为梯田草地+坡面林地;配置 E 为梯田林地+坡面草地;配置 F 为梯田林地+坡面林地。

图 6 滕子沟流域不同水土保持配置下水土保持碳汇潜力

Fig.6 Carbon sink potential of soil and water conservation under different soil and water conservation configurations in Tengzigou watershed

本研究发现,在植被措施一致的情况下,土壤有机碳含量表现为梯田草地>坡面草地,且二者之间存在显著性差异($p < 0.05$)。是因为坡改梯后,能够更好地拦蓄降水、减少径流,既减少土壤流失,又降低流失迁移距离,显著降低土壤有机质被氧化、矿化的速率和总量,有利于稳定土壤碳库^[24]。同时,梯田措施改变地形结构(坡度、坡向等),引起水热条件的变化,更有利于植被的生长,促进土壤有机碳的积累^[25]。随着林草措施的实施,连续的植物源性碳被输入土壤,土壤可以长期保持相对较高的有机碳含量^[26]。一般而言,与单一措施相比,综合措施在减少土壤流失和径流方面更显著,从而能有效保证土壤碳固存。

总体来说,水土保持综合措施的实施对流域土壤有机碳库具有积极影响。

3.2 小流域水土保持土壤碳汇潜力

土壤碳汇潜力受土地利用变化的影响,在不同水土保持措施下有所差别^[27]。在城镇化和工业化的驱动下,外出务工劳动力人数增多,致使黄土高原梯田撂荒现象明显增加^[28],原用于农田、果园的梯田多数撂荒为梯田草地或改建为梯田林地。本文在现状调查的基础上,评估不同措施土壤碳汇潜力,结果表明,在不同情景水土保持措施下梯田草地+坡面草地(配置 C)与全梯田林地(配置 B)之间土壤碳汇潜力无明显差异,但全梯田草地(配置 A)能大幅度提升碳汇潜力,与前人^[29-30]的研究结果较为一致。这是由于改变微地形可以很大程度地抑制水土流失,梯田可以保证田间水肥不易流出,比坡面更能保持土壤水分和养分^[31],再者梯田通过固持土壤中的有机碳增强土壤渗透和孔隙度,意味着梯田林草措施更有助于提升水土保持碳汇潜力^[32],达到固碳最大化。

本研究发现,草地是影响流域土壤碳汇的重要因素,与前人^[33-34]的研究结果有所偏差,这可能是因为研究区地处半干旱区域,降雨较少,而草地植被有更好的适应性,气候和管理实践导致土壤有机碳年输入和分解速率发生变化^[35]。研究区林龄偏小,林地以果园为主、林下覆盖差等也是导致草地碳汇潜力高于林地的原因;生态类用地面积增减也是黄土高原碳储量发生变化的主要因素之一。表明除植被类型外,植被覆盖率对生态系统碳汇潜力的影响不容忽视^[36]。林地相较于草地大量消耗土壤水分,形成土壤干层,有些地区甚至导致植被退化,而梯田草地相对耗水较少^[37]。本研究也发现,梯田草地的碳汇效应较高,因此,在黄土高原北部地区应用梯田草地措施更为合适。

本研究重点关注流域内不同水土保持措施表层土壤碳库演变特征,主要因为表层土壤碳汇变化对水土保持措施响应最为敏感^[38]。同时,应用土壤有机碳深度转换函数^[39]换算不同水土保持措施 0—100 cm 土层土壤有机碳储量发现,0—100 cm 土层下流域 2022 年总有机碳储量比 0—5 cm 表层土增加 2 540.3 t,流域内土壤碳汇潜力相对提升 7.6 倍。

4 结论

(1)研究区水土保持措施类型以草地为主。与 1977 年相比,2022 年流域内坝地、坡面林地、梯田草地和梯田林地面积分别增加 0.5%,5.0%,11.1%,16.3%。

(2)与 1977 年相比,2022 年研究区的总碳储量增加

25.8%,其中2004—2015年土壤碳储量增长速率最快,达到22.4%。从土壤固碳的角度来看,梯田草地综合措施下固碳效益最好,更适用于该地区的碳库恢复。

(3)在不同情景下,崩边线以下保持不变情况下,崩边线以上采取全梯田草地措施配置时,土壤有机碳汇潜力最大,相比现状条件增加20.5%;梯田与林草措施配置能够有效提升流域水土保持土壤碳汇。

参考文献:

- [1] BENNETT A C, KNAUER J, BENNETT L T, et al. Variable influence of photosynthetic thermal acclimation on future carbon uptake in Australian wooded ecosystems under climate change[J]. *Global Change Biology*, 2024, 30(1): e17021.
- [2] 中共中央办公厅国务院办公厅印发《关于加强新时代水土保持工作的意见》[Z]. 中华人民共和国国务院公报, 2023(2): 5-8.
The General Office of the Central Committee of the CPC and the General Office of the State Council Print and Issue the Opinions on Strengthening Water and Soil Conservation in the New Era[Z]. State Council Communiqué of the People's Republic of China, 2023(2): 5-8.
- [3] 曹文洪, 张晓明, 张永娥. 水土保持碳汇若干关键问题研究[J]. *中国水利*, 2024(4): 1-6.
CAO W H, ZHANG X M, ZHANG Y E. Studies on key issues related to carbon sink of soil and water conservation[J]. *China Water Resources*, 2024(4): 1-6.
- [4] YAN Z H, LEI H M, GAO H D, et al. Simulating the hydrological impacts of intensive soil and water conservation measures in the Yellow River Basin using a distributed physically-based model[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 625: 129936.
- [5] 李金垚, 潘雯, 王佳, 等. 黔中石漠化地区水土保持措施对土壤有机碳的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(5): 38-43.
LI J Y, PAN W, WANG J, et al. Effects of different soil and water conservation measures on soil organic carbon of karst rocky desertification region in central Guizhou[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(5): 38-43.
- [6] ZHANG J G, LAN Z L, LI H W, et al. Coupling effects of soil organic carbon and moisture under different land use types, seasons and slope positions in the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2023, 233: e107520.
- [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 Z G, CHENG H, FANG N F, 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] FANG N F, ZENG Y, RAN L S, et al. Substantial role of check dams in sediment trapping and carbon sequestration on the Chinese Loess Plateau[J]. *Communications Earth and Environment*, 2023, 4(1): e65.
- [9] BEN ALI A, SHUKLA M. Assessment of soil organic and inorganic carbon stocks in arid and semi-arid rangelands of southeastern New Mexico[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 166: e112398.
- [10] CHALCHISSA F B, KURIS B K. Modelling soil organic carbon dynamics under extreme climate and land use and land cover changes in Western Oromia Regional State, Ethiopia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 350: e119598.
- [11] 姜德文. 引领新时代水土保持之科技前瞻[J]. *中国水土保持科学*, 2024, 22(2): 1-8.
JIANG D W. Scientific and technological prospects for leading soil and water conservation in the New Era[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(2): 1-8.
- [12] 李继伟, 邓蕾, 上官周平. “双碳”目标下水土保持碳汇计量、监测与评估的思考[J]. *中国水土保持科学*, 2024, 22(2): 154-158.
LI J W, DENG L, SHANGGUAN Z P. Thoughts on the measurement, monitoring and evaluation of carbon sink in soil and water conservation under the perspective of “Carbon Neutralization and Carbon Peak”[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2024, 22(2): 154-158.
- [13] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1): 11-19.
LIU G B, SHANGGUAN Z P, YAO W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(1): 11-19.
- [14] LI H W, WU Y P, LIU S G, et al. The Grain-for-Green project offsets warming-induced soil organic carbon loss and increases soil carbon stock in Chinese Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 837: e155469.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU R K. Methods for soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] 吴才武, 夏建新, 段峥嵘. 土壤有机质测定方法述评与展望[J]. *土壤*, 2015, 47(3): 453-460.
WU C W, XIA J X, DUAN Z R. Review on detection methods of soil organic matter(SOM)[J]. *Soils*, 2015, 47(3): 453-460.

- [17] 董凌勃,海旭莹,汪晓珍,等. 黄土高原退耕还草地植物群落动态对生态系统碳储量的影响[J].生态学报,2020,40(23):8559-8569.
DONG L B, HAI X Y, WANG X Z, et al. Effects of plant community dynamics on ecosystem carbon stocks since returning farmlands to grasslands on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(23):8559-8569.
- [18] 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.
- [19] ADIYAH F, MICHÉLI E, CSORBA A, et al. Effects of land use change and topography on the quantity and distribution of soil organic carbon stocks on Acrisol catenas in tropical small-scale shade cocoa systems of the Ashanti region of Ghana[J].Catena,2022,216:e106366.
- [20] 赵心睿,刘冀,杨少康,等. 北方地区典型林草地物候时空变化特征及其对气象因子的响应[J].生态学报,2023,43(9):3744-3755.
ZHAO X R, LIU J, YANG S K, et al. Spatio-temporal variations of typical woodland and grassland phenology and its response to meteorological factors in Northern China[J].Acta Ecologica Sinica,2023,43(9):3744-3755.
- [21] 安立伟,李志刚. 退化荒漠草地恢复对土壤有机碳及其驱动因子的影响[J].生态学报,2024,44(13):5519-5531.
AN L W, LI Z G. Effects of the degraded desert grassland restoration on soil organic carbon and its driving factors[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(13):5519-5531.
- [22] LIAO H, HAO X L, QIN F, et al. Microbial autotrophy explains large-scale soil CO₂ fixation [J]. Global Change Biology,2023,29(1):231-242.
- [23] 张义凡,陈林,张蚌蚌,等. 荒漠草原表层土壤有机碳粒径组分及碳库管理指数特征[J].水土保持学报,2023,37(5):283-290.
ZHANG Y F, CHEN L, ZHANG B B, et al. Characteristics of organic carbon particle size composition and carbon pool management index in surface soil of desert grassland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(5):283-290.
- [24] 李占斌,周波,马田田,等. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):312-318.
LI Z B, ZHOU B, MA T T, et al. Effects of ecological management on characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometry in Loess Hilly Region, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(6):312-318.
- [25] ZHANG X, LI X, JI X D, et al. Elevation and total nitrogen are the critical factors that control the spatial distribution of soil organic carbon content in the shrubland on the Bashang Plateau, China[J]. Catena, 2021, 204: e105415.
- [26] 黄尚书,成艳红,钟义军,等. 水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响[J].土壤学报,2016,53(2):468-476.
HUANG S S, CHENG Y H, ZHONG Y J, et al. Effects of soil and water conservation measures on soil labile organic carbon and soil enzyme activity in gentle slope land of red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(2):468-476.
- [27] LIU C C, LIU Y G, GUO K, et al. Aboveground carbon stock, allocation and sequestration potential during vegetation recovery in the karst region of southwestern China: A case study at a watershed scale[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 235: 91-100.
- [28] 董世杰,辛良杰,李升发,等. 中国梯田撂荒程度及空间格局分异研究[J].地理学报,2023,78(1):3-15.
DONG S J, XIN L J, LI S F, et al. The extent and spatial distribution of terrace abandonment in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(1): 3-15.
- [29] MARTINS M A S, MACHADO A I, KEIZER J J. Assessment of recent to medium-term impacts of bench terrace construction on forest ground cover and selected soil physical and fertility properties along a chrono-sequence in north-central Portugal[J]. Science of the Total Environment, 2024, 918: e170785.
- [30] 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 Z M, YANG M J, YANG Y K, 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.
- [31] ZHANG X, SHE D L, HOU X L, et al. Precipitation, topography, and soil conservation measures determine the spatiotemporal pattern of sediment yield at the regional scale[J]. Catena, 2024, 240: e107990.
- [32] CHEN D, WEI W, CHEN L D, et al. Response of soil nutrients to terracing and environmental factors in the Loess Plateau of China[J]. Geography and Sustainability, 2024, 5(2): 230-240.
- [33] QIN J H, LIU P J, MARTIN A R, et al. Forest carbon storage and sink estimates under different management scenarios in China from 2020 to 2100[J]. Science of the Total Environment, 2024: e172076.
- [34] 吴普侠,汪晓珍,吴建召,等. 中国退耕还林工程固碳现状及

- 固碳潜力估算[J].水土保持学报,2022,36(4):342-349.
- WU P X, WANG X Z, WU J Z, et al. Estimation of carbon stock and carbon sequestration potential for China's grain for green project[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(4):342-349.
- [35] 翟淑君,列志暘,卢嘉华,等. 增温对南亚热带季风常绿阔叶林土壤有机碳及其组分的影响[J].生态学报,2024,44(13):5508-5518.
- ZHAI S J, LIE Z Y, LU J H, et al. Effects of warming on soil organic carbon and its fractions of evergreen broad-leaved forests in southern subtropical monsoon region[J]. Acta Ecologica Sinica,2024,44(13):5508-5518.
- [36] WANG T, DENG Z M, ZHANG C Y, et al. Vegetation types and flood water level are dominant factors controlling the carbon sequestration potential in Dongting Lake floodplain, China[J]. Science of the Total Environment, 2024, 921:e171146.
- [37] WANG L J, WANG K, SHENG M Y. Changes in land use are associated with the accumulation of soil phytolith-occluded organic carbon[J]. Ecological Indicators, 2023,151:e110300.
- [38] ZHOU Z H, REN C J, WANG C K, et al. Global turnover of soil mineral-associated and particulate organic carbon[J]. Nature Communications,2024,15(1):e5329.
- [39] DENG L, LIU G B, SHANGGUAN Z P. 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.
- (上接第160页)
- [16] 杨霞,陈丽华,康影丽,等.辽东低山区5种典型水源涵养林枯落物持水特性[J].生态学杂志,2019,38(9):2662-2670.
- YANG X, CHEN L H, KANG Y L, et al. Water-holding characteristics of litter in five typical water conservation forests in low mountainous areas of eastern Liaoning[J]. Chinese Journal of Ecology,2019,38(9):2662-2670.
- [17] 吕宸,龚伟,车明轩,等.海拔和坡向对高寒灌丛草甸凋落物水源涵养功能的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):219-225.
- LÜ C, GONG W, CHE M X, et al. Effects of altitude and slope direction on water conservation function of litter in alpine shrub meadow[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(6):219-225.
- [18] 杜晨曦,史常青,杨建英,等.小五台山典型林分枯落物持水恢复能力研究[J].水土保持学报,2021,35(3):236-243.
- DU C X, SHI C Q, YANG J Y, et al. Recovery characteristics of water-holding capacity of litter in typical stands of Xiaowutai Mountain[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(3):236-243.
- [19] FRESCHET G T, AERTS R, CORNELISSEN J H C. A plant economics spectrum of litter decomposability[J]. Functional Ecology,2012,26(1):56-65.
- [20] 李强,周道玮,陈笑莹.地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J].生态学报,2014,34(14):3807-3819.
- LI Q, ZHOU D W, CHEN X Y. The accumulation, decomposition and ecological effects of above ground litter interterrestrial ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14):3807-3819.
- [21] 陆梅,田昆,赖建东,等.高原湿地纳帕海周边山地不同植被类型枯落物持水特性[J].水土保持通报,2011,31(1):28-34.
- LU M, TIAN K, LAI J D, et al. Water holding characteristics of litters of different species in mountainous area of Napahai Plateau wetland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2011,31(1):28-34.
- [22] DENG W P, ZHENG X L, XIAO S S, et al. Effects of leaf type, litter mass and rainfall characteristics on the interception storage capacity of leaf litter based on process simulation[J]. Journal of Hydrology,2023,624:e129943.
- [23] LI X, XIAO Q F, NIU J Z, et al. Rainfall interception by tree crown and leaf litter: An interactive process[J]. Hydrological Processes,2017,31(20):3533-3542.
- [24] DU J, NIU J Z, GAO Z L, et al. Effects of rainfall intensity and slope on interception and precipitation partitioning by forest litter layer[J]. Catena,2019,172:711-718.
- [25] ROSALEM L M P, WENDLAND E C, ANACHE J A A. Understanding the water dynamics on a tropical forest litter using a new device for interception measurement[J]. Ecohydrology,2019,12(2):e2058.
- [26] NETO A J S, RIBEIRO A, DE CARVALHO LOPES D, et al. Simulation of rainfall interception of canopy and litter in *Eucalyptus* plantation in tropical climate[J]. Forest Science,2012,58(1):54-60.
- [27] HAVERD V, CUNTZ M. Soil-Litter-Iso: A one-dimensional model for coupled transport of heat, water and stable isotopes in soil with a litter layer and root extraction[J]. Journal of Hydrology,2010,388(3/4):438-455.