黄土高原淤地坝碳汇量精准测量与计算
——以陕西省榆林市高西沟小流域为例

霍少峰[1], 赵孟凡[2], 王 健[1], 李荣融[1], 周米京[1], 刘加彬[1]
(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院,
陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: [目的]针对黄土高原淤地坝碳汇核算中存在的测量方法缺失等问题,以陕西省榆林市米脂县高西沟小流域淤地坝系为对象,构建小流域尺度淤地坝碳汇精准测量方法体系,阐明坝地土壤有机碳(SOC)垂直分布规律,为淤地坝碳汇交易提供科学依据。[方法]以米脂县高西沟小流域淤地坝系为对象,基于1978年1:10 000地形图与2024年航空测绘数据,通过拟合坝高-面积曲线,计算泥沙淤积量;采用机械钻机实施全深度分层采样,获取研究区5座淤地坝312个土样并测定SOC含量,结合泥沙淤积量计算高西沟淤地坝系总碳汇量(包括减蚀减排量与增绿增汇量)。[结果]高西沟淤地坝系累计淤积泥沙量为1.39×10^6 m^3,保碳量20 459.37 t(以二氧化碳当量计),减蚀减排量7 160.78 t,增绿增汇量为489.75 t,碳汇量总计7 650.53 t。高西沟淤地坝坝地SOC垂直分布呈现显著表聚效应,但中层出现SOC含量异常峰值,可能揭示区域洪水沉积历史对坝地SOC垂直分布格局的塑造作用。[结论]航空测绘结合早期大比例地形图的方法可直接应用于小流域淤地坝系泥沙淤积量计算,对黄土高原淤地坝碳汇监测具有重要参考价值。

关键词: 小流域; 淤地坝; 碳汇; 黄土高原; 土壤有机碳
文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2025)06-0290-08 **中图分类号:** S157.2

文献参数: 霍少峰, 赵孟凡, 王健, 等.黄土高原淤地坝碳汇量精准测量与计算[J].水土保持通报,2025,45(6):290-297. Huo Shaofeng, Zhao Mengfan, Wang Jian, et al. Precise measurement and caculation of carbon sink on check dams in Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2025,45(6):290-297.
DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.029 **CSTR:32312.14.stbctb.2025.06.029**

Precise measurement and caculation of carbon sink on check dams in Loess Plateau
—A case study at Gaoxigou small watershed, Yulin City, Shaanxi Province

Huo Shaofeng[1], Zhao Mengfan[2], Wang Jian[1], Li Rongrong[1], Zhou Mijing[1], Liu Jiabin[1]
(1.*College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2.*College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: [Objective] A precise mesurement method for check dam carbon sinks at the small watershed scale was established and the vertical distribution patterns of soil organic carbon (SOC) in the dam land were elucidated to provide a scientific basis for carbon sink trading of check dams. [Methods] Taking the check dam system at Gaoxigou small watershed of Mizhi County, Shanxi Province as a case study, based on the 1:10 000 topographic map of 1978 and aerial survey data in 2024, the sediment deposition volume was calculated by fitting the dam height-area curve. A mechanical drilling rig was employed to conduct full-depth stratified sampling, obtaining 312 soil samples from five check dams in the study area for SOC content measurement. Combined with the sediment deposition data, the total carbon sink of Gaoxigou check dam system (including both erosion and emission reduction as well as vegetation and carbon sink increase) was calculated. [Results] The total sediment deposition of Gaoxigou check dam system was 1.39×10^6 m^3, with a carbon storage of 20 459.37 t (using carbon dioxide

收稿日期:2025-05-30 **修回日期:**2025-08-20 **采用日期:**2025-08-21
资助项目:国家自然科学基金面上项目"半干旱区引黄灌溉农田土壤无机碳的累积机制研究"(32371965)
第一作者:霍少峰(1999—),男(汉族),山西省吕梁市人,硕士研究生,研究方向为干旱区土壤碳汇。Email:hsf2010@nwafu.edu.cn。
通信作者:刘加彬(1986—),男(汉族),山东省高密市人,副教授,硕士生导师,主要从事干旱区生态系统碳循环研究。liujb@nwafu.edu.cn。

equivalent as the measurement unit). The erosion and emission reduction was 7 160.78 t, and the vegetation and carbon sink increase was 489.75 t, resulting in a total carbon sink of 7 650.53 t. The vertical distribution of SOC in the dam land of Gaoxigou check dams exhibited a significant surface aggregation effect. However, an anomalous peak in SOC content was observed in the middle layer, potentially indicating the shaping effect of regional flood deposition history on the SOC vertical distribution patterns in the dam land. [Conclusion] The integration of aerial survey with early large-scale topographic maps can be directly applied to calculate the sediment deposition of check dam systems in small watersheds, providing important reference value for monitoring the carbon sink of check dams on the Loess Plateau.

Keywords: small watershed; check dam; carbon sink; Loess Plateau; soil organic carbon

淤地坝是在黄土高原水土流失区干、支、毛沟内为控制侵蚀、滞洪拦泥、淤地造田、减少入黄泥沙而修建的水土保持沟道治理工程,广泛应用于黄土高原水土流失严重地区。淤地坝的碳汇作用主要集中在三方面[1]:①淤地坝可拦截沟道侵蚀泥沙,封存泥沙中的土壤有机碳(SOC),发挥保碳作用[2];②淤地坝的存在可减少土壤侵蚀,显著延长碳封存周期,起到减排作用[3];③淤地坝良好的水肥条件可促进植被生长,提升坝地 SOC 储量,起到增汇作用[4]。相关研究表明,淤地坝埋藏的 SOC 分解速率仅为暴露在有氧条件下的 11.4%[5]。据估算,黄土高原 5 万余座淤地坝在 1970—2020 年间淤积了约 10.2 Pg 侵蚀泥沙,保存了约 21.6 Tg SOC,坝地年均固碳潜力约为 0.43 Tg C,相当于中国湖泊和水库年均固碳量的 24% 和 36%[6]。现有的淤地坝碳汇研究基本集中于黄土高原全域尺度的淤地坝碳汇总量估算[7-9],而关于小流域尺度淤地坝碳汇量的具体核算方案几乎未见报道。精确测算小流域淤地坝碳汇量,既是完善区域水土保持碳汇核算体系的核心环节,又能弥补淤地坝碳汇理论的不足,同时能够为淤地坝碳汇交易市场提供可靠的计量依据,从而进一步支撑生态补偿机制的优化。

黄土高原北部丘陵沟壑区沟道发育密集,水土流失严重,修建了大量淤地坝以控制水土流失。陕西省榆林市米脂县高西沟小流域,多年来通过持续实施打坝淤地综合治理,成为全国水土保持工作的先进典型,为开展淤地坝碳汇监测研究提供了理想区域与典型样本。

本研究以高西沟小流域淤地坝系为研究对象,采用航空测绘,结合大比例地形图,计算淤地坝泥沙淤积量;同时,通过对淤地坝坝地土壤全深度采样,测定坝地 SOC 含量与容重,在此基础上核算高西沟小流域淤地坝系碳汇量,研究结果将为推动黄土高原淤地坝碳汇交易的实施、完善水土保持碳汇理论、指导生态工程优化布局提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

高西沟小流域位于陕西省榆林市米脂县城东北 20 km 处(110.172°—110.196°E,37.861°—37.875°N),总面积 4 km^2,属典型黄土高原丘陵沟壑区,处于温带半干旱半湿润森林草原带(图 1a)。小流域气候为大陆性温带半干旱季风气候,四季分明,温差较大,日照充足。年平均气温 8.4 ℃,极端最高气温 36.6 ℃,极端最低气温 −26.0 ℃,年平均日照时数 2 761 h,无霜期 162 d,年降水量 451.6 mm,主要集中在夏季。研究区表层土壤黏粒含量为 4.21%±1.25%,粉粒含量 26.58%±5.72%,砂粒含量 69.21%±8.45%。

1958 年开始,高西沟村开始进行水土流失治理,其中淤地坝建设是主要沟道治理措施。1974 年后,修建淤地坝 5 座(1 座大型坝,3 座中型坝和 1 座小型坝)(图 1b)。其中,2 号淤地坝修建完成于 1976 年,淤满于 1995 年;1 号淤地坝修建完成于 1978 年,淤满于 1994 年;3 号淤地坝修建完成于 1979 年,淤满于 1988 年;4 号淤地坝修建完成于 1979 年,淤满于 1991 年;5 号淤地坝修建完成于 1981 年,淤满于 1993 年(表 1)。淤满后,淤地坝坝地作为农田用于种植农作物,无乔灌木生长。

1.2　研究方法

1.2.1　航空测绘

坐标系统采用 2000 国家大地坐标系,高程采用大地高,使用大疆的经纬 M300RTK 及 DJI P1 进行测绘,保证测区高程相对精度良好。

2024 年 11 月,在高西沟小流域进行现场踏勘后,完成控制点布设与检查点采集,采用无人机仿地飞行的倾斜摄影测量方式采集影像,以空间分辨率 12.5 m 的数字高程模型(DEM)数据为底图,敷设井字形航线,累计航线长度 1 000 km 以上。经过控制点的布设测量和航测数据的采集等作业,完成外业数据的获取。内业数据处理过程中,航测影像的三

维重建处理采用大势智慧软件，首先对获取的姿态测量单元数据、影像数据等进行预处理，在软件算法影像匹配完成后，进行空中三角测量与影像拼接，最后进行航测精度验证。本次航空测绘成功获取到空间分辨率小于0.1 m的正射影像、数字表面模型和实景三维模型。

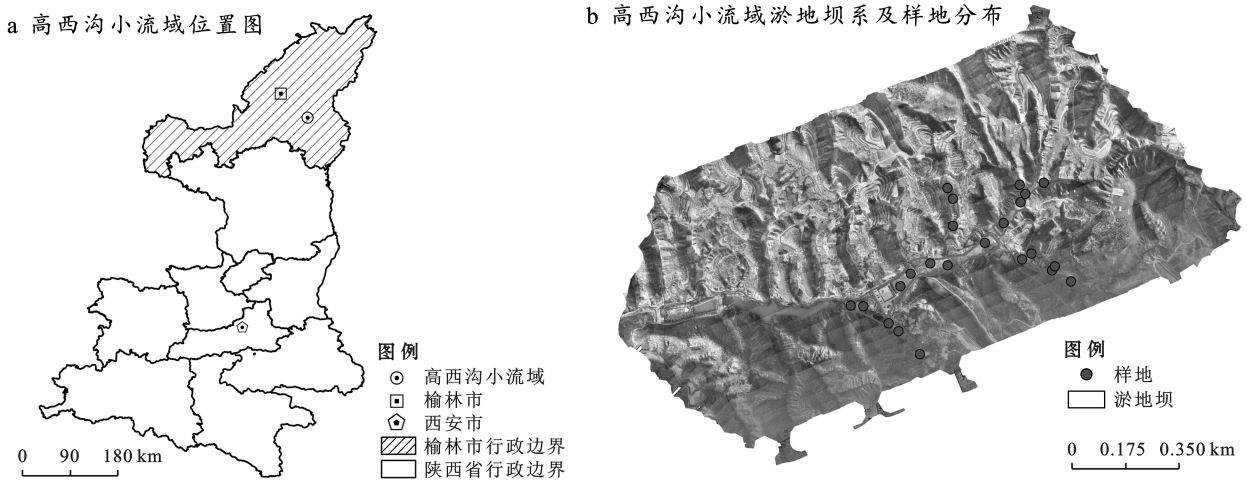


图1 高西沟小流域位置、淤地坝系及样地分布

Fig.1 Location distribution of check dam system and sample plots at Gaoxigou small watershed

表1 高西沟小流域淤地坝系信息

Table 1 Information of check dam system at Gaoxigou small watershed

序号	地理坐标		建设年份	淤满年份	坝地面积/hm²	坝高/m	型号
	经度(E)	纬度(N)					
1	110.184237°	37.863962°	1978年	1994年	3.06	11	中型
2	110.182782°	37.867206°	1976年	1995年	5.78	26	大型
3	110.185733°	37.870180°	1979年	1988年	1.09	12	小型
4	110.188405°	37.870236°	1979年	1991年	2.62	10	中型
5	110.190278°	37.868385°	1981年	1993年	4.14	12	中型

1.2.2 航测影像解译

在实地调查的基础上，结合流域航测结果(数字表面模型、实景三维模型和全景图)，根据淤地坝拦蓄泥沙的淤积厚度和坝地种植作物等因素，纳入淤地坝保碳增汇监测的坝地总面积为16.69 hm²。航测结果显示高西沟淤地坝系5座淤地坝均已淤满。

1.2.3 坝地土壤样品采集和测定

综合考虑淤积深度、土壤碳含量垂直分布特征和采样效率，按照每60 cm深度为一层采样。结合坝高，5座坝土层分别为18层(1号坝)、40层(2号坝)、18层(3号坝)、16层(4号坝)、18层(5号坝)。按照坝地的面积大小确定样地数量，沿着坝地的前部、中部、后部选择样地，并在样地中布设采样点进行采样。在1号淤地坝区域设置样地5个，其中，前部2个，中部2个，后部1个；2号淤地坝区域设置样地5个，其中，前部2个，中部2个，后部1个；3号淤地坝区域设置样地3个，其中，前部1个，中部1个，后部1个；4号淤地坝区域设置样地5个，其中，前部2个，中部2个，后部1个；5号淤地坝区域设置样地5个，其中，前部2个，中部2个，后部1个，共设立样地23个(图1b)。所有样地边缘离地块边界10 m以上。样地规格为20 m×20 m。

在每个样地内沿对角线，采用“S”形走势，选择5个土壤采集点。在每个土壤采集点使用土钻采集样品，采集深度超过5 m时，使用机械钻机。在每个样地，将5个采集点相同土层的样品充分混合成1个土样，5座淤地坝合计采集312个土样。

在样地内采用环刀法测定土壤容重。SOC含量测定采用重铬酸钾外加热氧化法。

1.3 碳汇量计算

淤地坝修建完成第t年的碳汇量计算公式为

$$C_{\mathrm{pro},t}=CR_{\mathrm{pro},t}+CI_{\mathrm{pro},t}-CE_{\mathrm{pro},t}-CE_{\mathrm{dam}}-\Delta C_{\mathrm{bsl},t} \quad (1)$$

式中：$C_{\mathrm{pro},t}$表示第t年淤地坝碳汇量(t，以CO_2当量计下同)；t表示自淤地坝修建完成以来的年数；$CR_{\mathrm{pro},t}$表示第t年的减排量(t)；$CI_{\mathrm{pro},t}$表示第t年淤地坝增汇量(t)；$CE_{\mathrm{pro},t}$表示第t年的淤地坝碳排放量

(t); CE_{dam}表示修建过程中化石燃料产生的建设排放量(t); $\Delta C_{bsl,t}$表示第t年的基线清除量(t)。

淤地坝碳汇作用(保碳、减排、增汇)的评估以基线情景(维持淤地坝修建前的土地利用与管理方式,即在没有人为干预下,未修建淤地坝的沟道随着时间变化到某个时刻所形成的情景)为基础。淤地坝建设前,高西沟小流域地形较为复杂,地势起伏大,地表破坏严重,植被覆盖度低于30%。由于当时坡面植被稀疏,且缺少林草和梯田等坡面治理措施,基线情景下增汇量为0。此外,沟道无治理措施,处于持续扩张和下切的状态,导致水土流失严重,侵蚀模数大于16 000 t/(km^2·a)[10]。因此,基线情景下的排放清除量极有可能为负值。按照保守性原则,基线排放清除量($\Delta C_{bsl,t}$)设置为0。

淤地坝修建完成后,淤地坝拦截沟道所有的侵蚀泥沙。由于淤地坝沉积区具备低氧、高水分、高容重和深埋等物理环境,严重限制微生物活动,坝地内仅发生非常微弱的有机碳分解矿化,碳排放量($CE_{pro,t}$)几乎为0。

淤地坝建设期间未使用车辆与其他机械设备,未产生化石燃料排放,建设排放量(CE_{dam})为0。

1.3.1　保土保碳量计算

淤地坝修建完成后,第t年的保碳量计算公式为

$$CP_{pro,t}=\sum_{i=1}^{n}V_{t,i}\times\rho d_{t,i}\times \mathrm{SOC}_{t,i}\times 10^{-3}\times\frac{44}{12} \quad (2)$$

式中:CP_{pro},表示第t年淤地坝保碳量(t); t表示自淤地坝修建完成以来的年数; i表示第t年淤地坝淤积泥沙分层采样的总层数,$i=1,2,3\cdots n$,无量纲; $V_{t,i}$表示第t年淤地坝第i层淤积泥沙的体积(已淤库容)(m^3); $\rho d_{t,i}$表示第t年淤地坝第i层淤积土壤容重(g/cm^3); $SOC_{t,i}$表示第t年淤地坝第i层淤积泥沙有机碳含量(g/kg)。

层间淤积泥沙体积(V)计算公式为

$$V=\left\{\left[k\times\left(h_j+a\right)^2+c\right]-\left[k\times\left(h_{j-1}+a\right)^2+c\right]\right\}\times\Delta h\div 2 \quad (3)$$

式中:k表示所拟合的坝高(相对高差)—面积曲线的系数,无量纲; h_j表示第j层泥沙淤积厚度(m); a表示所拟合的坝高—面积曲线的横向平移量(m); c表示所拟合的坝高—面积曲线的纵向平移量(m^2); Δh表示第j层和第$j-1$层的高差(m)。

坝高—面积曲线借助1978年绘制的万分之一地形图来拟合,先绘制等高线,计算等高线与坝体所截封闭曲线的面积;根据面积随高度变化的关系拟合曲线,将该曲线的变化率作为坝高—面积曲线的系数;再根据航测所得当前淤地坝坝地面积调整合适的横向平移量和纵向平移量;结合曲线所得面积与其每层的高度,得出每层淤积泥沙体积,进一步计算出每座淤地坝的淤积量。

1.3.2　减蚀减排量计算

在基线情景下,高西沟小流域的干、支、毛沟内没有修建淤地坝,流域内的侵蚀泥沙在搬运过程中会发生分解矿化氧化,向大气排放CO_2。减排量计算公式为

$$CR_{pro,t}=\sum CP_{pro,t}\times P_{base,t} \quad (4)$$

式中:$CR_{pro,t}$表示基线情景下第t年的减排量(t); t表示自淤地坝修建完成以来的年数; $CP_{pro,t}$表示项目第t年淤地坝碳储量(t); $P_{base,t}$表示基线情景下,第t年土壤有机碳在搬运过程中矿化氧化的比例(%)。

1.3.3　增绿增汇量计算

淤地坝修建完成后,第t年增汇量计算公式为

$$CI_{pro,t}=V_{t,30}\times(\rho d_{t,30}\times \mathrm{SOC}_{t,30}-\rho d_{30}\times \mathrm{SOC}_{30})\times 10^{-3}\times\frac{44}{12} \quad (5)$$

式中:$CI_{pro,t}$表示第t年淤地坝增汇量(t); t表示自淤地坝修建完成以来的年数; $V_{t,30}$表示第t年淤地坝0—30 cm淤积泥沙的体积(已淤库容)(m^3); $\rho d_{t,30}$表示第t年淤地坝0—30 cm淤积土壤容重(g/cm^3); $SOC_{t,30}$表示第t年淤地坝0—30 cm淤积泥沙有机碳含量(g/kg)。ρd_{30}表示第t年相邻坡地0—30 cm土壤容重(g/cm^3); SOC_{30}表示第t年坡地0—30 cm土壤有机碳含量(g/kg)。

1.4　数据处理

本研究基础数据处理采用Excel 2019软件。在对同一淤地坝不同土层SOC含量进行正态性检验后,使用单因素方差分析(one-way ANOVA)评估同一淤地坝不同土层间SOC含量的差异,若差异显著,采用最小显著差异检验(LSD)进行事后检验,显著性水平设定为$p<0.05$。统计分析在SPSS 26.0软件中进行,图形绘制使用Origin 2021软件。

2　结果与分析

2.1　淤地坝系泥沙淤积量

通过对1978年1:10 000地形图等高线与坝体所截封闭面积与高度变化的拟合,1号坝至5号坝坝高—面积曲线的系数分别为7.867,0.868,19.840,5.039,21.399(表2)。根据航测结果得到当前1号坝至5号

坝的坝地面积分别为3.06,5.78,1.09,2.62, 4.14 hm^2。据此调整合适的横向平移量和纵向平移量。利用表2坝高-面积曲线及公式(3),计算坝地泥沙淤积量。经计算,1号坝淤积量为1.80×10^5 m^3,2号坝淤积量为7.83×10^5 m^3,3号坝淤积量为6.69×10^4 m^3,4号坝淤积量为1.13×10^5 m^3,5号坝淤积量为2.43×10^5 m^3。高西沟淤地坝系泥沙淤积总量为1.39×10^6 m^3(图2)。

表2 高西沟淤地坝系坝高(相对高差)与面积关系曲线

Table 2 Dam height (relative elevation difference) and area curve of check dam system at Gaoxigou small watershed

	等高线与坝体所截封闭面积与高度变化的拟合公式	横向平移量/m	纵向平移量/m^2	坝高—面积曲线
1号坝	$y=7.867x^2+135.62x+370.25$	176.3	−245 489.06	$S=7.867\times(h+176.3)^2-245\ 489.06$
2号坝	$y=0.868x^2+2\ 297.30x+3\ 798.00$	1 351.1	−1 588 097.96	$S=0.868\times(h+1\ 351.065)^2-1\ 588\ 097.96$
3号坝	$y=19.840x^2-88.99x+586.89$	17.9	−6 511.71	$S=19.840\times(h+17.865)^2-6\ 511.71$
4号坝	$y=5.039x^2+1\ 455.50x-9\ 889.50$	207.8	−218 318.55	$S=5.032\times(h+207.8\ 083\ 335)^2-218\ 318.55$
5号坝	$y=21.399x^2+219.06x-3\ 078.40$	81.5	−145 458.54	$S=21.399\times(h+81.5)^2-145\ 458.54$

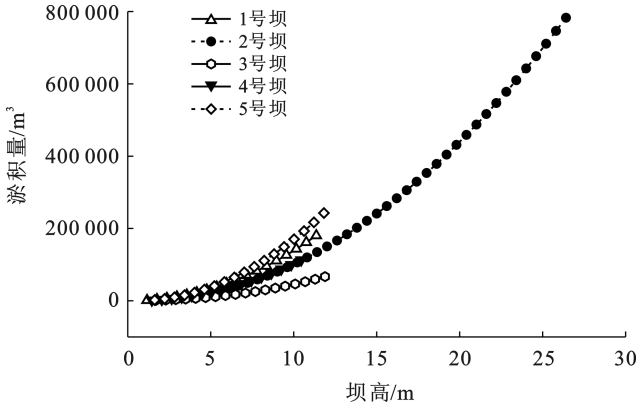


图2 坝地淤积量随坝高的变化

Fig.2 Variation of sediment deposition in dam land with dam height

2.2 坝地SOC含量和垂直变化特征

研究结果表明,除2号坝外,其余四座坝SOC含量均呈现表层富集,其SOC最高值均稳定分布于0—60 cm耕作层。虽然2号坝在1 200—1 260 cm深处出现异常高值,但其0—60 cm土层SOC含量仍显著高于深层土壤。即淤地坝SOC垂直分布以表层富集为主,深层SOC含量随土层加深呈现剧烈波动的特征(图3)。

2.3 淤地坝系保碳量、减排量、增汇量及碳汇量

根据表3,1号坝至5号坝各碳层的保碳量分别为2 433.86,12 065.26,893.00,1 711.59,3 355.67 t。高西沟淤地坝系保碳总量为20 459.37 t。

基线情景下,小流域淤地坝所淤积的全部泥沙将在搬运过程中发生侵蚀分解。由于小流域多为粗沙,土壤黏粉粒含量较低,团聚性较差,SOC缺乏细颗粒保护,发生土壤侵蚀后,SOC在搬运过程中矿化分解速率较大。本研究计算减蚀减排量过程中,SOC在侵蚀搬运过程中的矿化分解比例设置为35%。经计算,1号坝至5号坝减蚀减排量分别为851.85,4 222.84,312.55,599.06,1 174.48 t。高西沟淤地坝系减蚀减排量为7 160.78 t(表3)。

根据公式(5),计算得到1号坝至5号坝增绿增汇量分别为74.08,212.12,29.92,62.09,111.54 t。高西沟淤地坝系增绿增汇量为489.75 t(表3)。

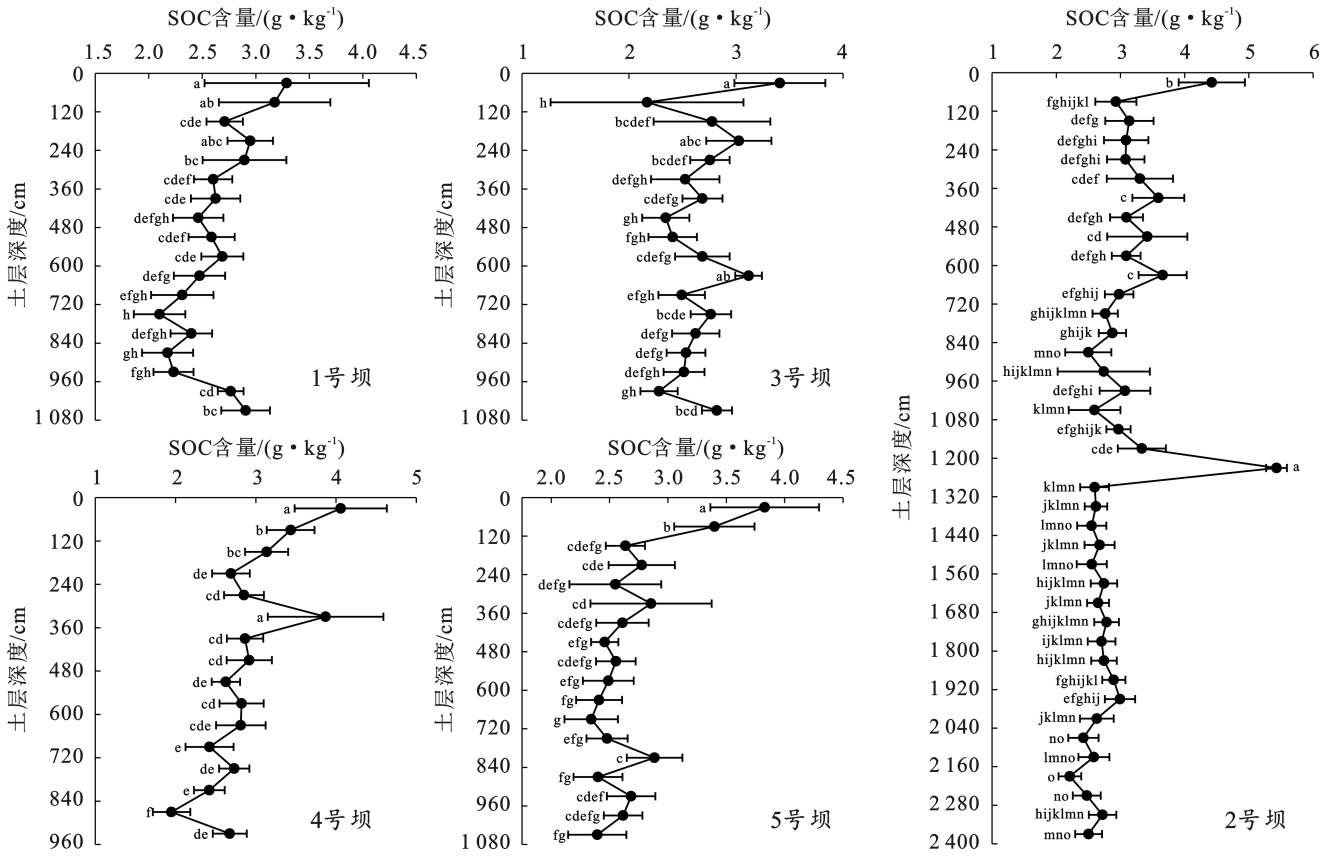
表3表明,1号坝到5号坝碳汇量分别为925.93,4 434.96,342.47,661.15,1 286.02 t。截止到2024年,高西沟淤地坝系碳汇总量为7 650.53 t。

3 讨 论

3.1 淤积量的准确测算

在黄土高原淤地坝保土保碳量监测中,如何精确测算泥沙淤积量始终是关键的科学问题。有研究通过^{137}Cs示踪技术计算泥沙沉积速率,进一步估算了小流域淤地坝泥沙淤积量[11],然而由于很难获取高降雨条件下形成的泥沙淤积数据,这种方法不能得到较为精确的泥沙淤积量。GPS技术和MAPGIS的分析功能相结合同样可用于估算坝地淤积量[12],但此方法并不能准确了解坝高-面积间的关系,因此计算得到的淤积量存在较大偏差。汪亚峰等[13]采用差分法GPS技术,结合大比例尺地形图,估算了泥沙淤积量。

本研究基于航空摄影测绘技术,获取了空间分辨率小于0.1 m的DSM数据,有效提升了坝地范围、边界与表面特征的测算精度。特别是在DSM数据处理阶段,已对作物植被进行了识别与去除处理,并对显著地物进行滤波,从而提取更加贴近地表真实形态的微地形高程数据。



注:图中不同的小写字母表示土层间具有显著差异($p<0.05$)。

图 3　坝地土壤有机碳(SOC)含量的垂直分布

Fig.3　Vertical distribution of soil organic carbon content in dam lands

表 3　高西沟淤地坝系碳汇量

Table 3　Carbon sink of check dam system at Gaoxigou small watershed　　单位:t

淤地坝编号	基线碳清除量	保碳量	减排量	增汇量	碳汇量
1	0	2 433.86	851.85	74.08	925.93
2	0	12 065.26	4 222.84	212.12	4 434.96
3	0	892.99	312.55	29.92	342.47
4	0	1 711.59	599.06	62.09	661.15
5	0	3 355.67	1 174.48	111.54	1 286.02
总 计	0	20 459.37	7 160.78	489.75	7 650.53

在本研究中,高西沟小流域 1978 年的 1∶10 000 地形图的成图时间处于黄土高原大规模坝系建设完成初期,完整记录了淤积发生前的地形基准面,使得本研究获取了准确的坝高-面积曲线。在小流域坝地淤积量计算中,采用已有经验公式可显著提升工作效率,但需要系统评估不同公式的适用性及其误差特征。ZengYi 等[14]采用 GIS 中的淹没分析模块,对模拟构建的淤地坝进行淹没分析,对整个黄土高原淤地坝淤积量进行了计算,并在前期研究的基础上提出了公式(6)至公式(10),用于估算淤地坝淤积泥沙体积。

$$V=\begin{cases}(6.31\pm0.03)D_{\text{area}}{}^{(1.33\pm0.01)} & (0<D_{\text{area}}<2)\\(3.80\pm0.07)D_{\text{area}}{}^{(1.51\pm0.01)} & (2\leqslant D_{\text{area}}<7)\end{cases} \quad (6)$$

$$V=8.395\times D_{\text{area}}+0.438\times D_{\text{Depth}}-1.797 \quad (7)$$

$$V=8.715\times D_{\text{area}}+0.531\times D_{\text{Depth}}-1.088\times C_{\text{Perimeter}}-1.797 \quad (8)$$

$$V=1/3\times D_{\text{area}}\times D_{\text{Depth}} \quad (9)$$

$$V=0.376\times D_{\text{area}}\times D_{\text{Depth}} \quad (10)$$

将本研究中淤地坝实测坝高与淤积面积代入计算,结果显示,公式(6)—(10)的泥沙淤积量计算结果分别为 1.30×10^6,1.63×10^6,1.74×10^6,9.22×10^5 和 1.04×10^6 m³,与本研究 1.39×10^6 m³的相对误差依次为−6.08%,+17.37%,+25.44%,−33.44% 和 +24.92%。其中,公式(6)展现出相对最优的估算性能,其余公式均展现出较大的相对误差。这种误差分异现象表明了经验公式的应用需兼顾小流域地形异质性、数据精度及淤积过程动态特征。公式(6)可能最适宜用于估计黄土高原北部丘陵沟壑区淤地坝的泥沙淤积量。黄土高原地区地形差异较大,关于不同区域泥沙淤积量经验公式的验证及相关参数的修订,仍需要深入研究。

3.2 坝地SOC含量的垂直分布规律

在本研究中,坝地0—60 cm的SOC含量显著高于其它土层(图3),呈现出显著的表聚特征,其形成机制与外源碳输入坝地表层土壤密切相关[15]。坝地表层SOC含量显著高于下层土壤的关键原因在于植物残体、枯落物及径流携带的有机碎屑在重力与水力作用下持续向坝地表面汇集[16]。除表层的外源有机质输入形成显著富集外,本研究坝地中层SOC含量出现了异常高值(图3),这可能与洪水沉积过程密切相关[17]。早期洪水事件形成的高碳细粒层被后续沉积物覆盖并埋藏于中层,最终形成与表层富集区不同的碳库。

坝地SOC含量的垂直分布呈现出从上层到下层减小的趋势(图3)。这与侵蚀源区SOC含量密切相关。本研究区坝地埋藏的土壤主要来源于历史时期坡耕地侵蚀迁移的泥沙,因此坝地SOC含量本质上与侵蚀发生时坡耕地的SOC水平相等。早期黄土高原植被覆盖率低,坡耕地表层SOC含量普遍较低,导致同期形成的坝地沉积层SOC含量处于较低水平。新近淤积的坝地表层土壤因源区坡地SOC含量提升,其SOC含量同步增加,形成"近现代沉积层碳富集"的垂直分布格局。

3.3 淤地坝系减蚀减排量的测算

淤地坝系减蚀减排量需要在获得保土保碳量的基础上通过确定区域土壤侵蚀搬运过程中的SOC矿化比例得到。目前,关于SOC在侵蚀搬运过程中矿化比例的研究结果存在显著差异,具体数值受土壤类型、气候条件、土地利用方式及实验方法等多种因素影响。已有研究结果显示,SOC矿化比例可低至20%[18],高至50%[19]。因此,在黄土高原地区,20%~50%可视为SOC矿化比例的合理范围。本研究区位于黄土高原北部粗沙区,土壤黏粒含量较低,团聚体稳定性差。在雨滴击溅与径流剪切力作用下,团聚体容易崩解,导致SOC暴露于好氧环境中,加速其矿化[20]。同时,研究区处于典型雨热同期区,高温与高强度水蚀过程共同发生,进一步促进了SOC的矿化分解[21]。

结合上述区域特征与已有研究,最终估算研究区泥沙搬运过程中SOC矿化比例为35%。需特别指出的是,由于研究区坝地淤积时间较长,且SOC矿化的影响因素复杂及区域差异显著,侵蚀搬运过程中的SOC矿化比例精确测算存在较大的困难。因此,淤地坝减蚀减排量监测中,准确量化侵蚀搬运过程中SOC矿化比例有待进一步研究。

4 结 论

(1)截至2024年,高西沟小流域淤地坝系泥沙淤积量为1.39×10^6 m^3,保碳量为20,459.37 t,减蚀减排量为7,160.78 t,增绿增汇量为489.75 t,碳汇总量为7,650.53 t。

(2)在实地调查基础上,采用航空测绘结合大比例地形图获取坝高—面积曲线的方法是计算小流域淤地坝泥沙淤积量的有效方法。

(3)坝地SOC含量的垂直分布呈现出显著的表聚效应,同时区域洪水事件驱动的沉积历史差异造成了不同坝地具有其独特的SOC含量垂直分布格局。

参考文献(References)

[1] 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.

[2] 周仕轩,夏彬,郝旺林,等.黄土高原坝地深层土壤有机碳稳定性研究[J].水土保持学报,2022,36(4):284-289.
Zhou Shixuan, Xia Bin, Hao Wanglin, et al. Stability of deep soil organic carbon of dam land on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4):284-289.

[3] Zhang Haicheng, Liu Shuguang, Yuan Wenping, et al. Loess Plateau check dams can potentially sequester eroded soil organic carbon [J]. Journal of Geophysical Research:Biogeosciences, 2016,121(6):1449-1455.

[4] 文雯,周宝同,汪亚峰,等.黄土高原羊圈沟小流域土地利用时空变化的土壤有机碳效应[J].生态学报,2015,35(18):6060-6069.
Wen Wen, Zhou Baotong, Wang Yafeng, et al. Effects of spatio-temporal changes of land-use on soil organic carbon in Yangjuangou watershed in Loess Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(18):6060-6069.

[5] 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.

[6] Fang Nufang, Zeng Yi, Ran Lishan, et al. Substantial role of check dams in sediment trapping and carbon

sequestration on the Chinese Loess Plateau [J]. Communications Earth & Environment, 2023,4:65.

[7] Lü Yihe, Sun Ranhao, Fu Bojie, et al. Carbon retention by check dams: Regional scale estimation [J]. Ecological Engineering, 2012,44:139-146.

[8] 李勇,白玲玉.黄土高原淤地坝对陆地碳贮存的贡献[J].水土保持学报,2003,17(2):1-4.
Li Yong, Bai Lingyu. Variations of sediment and organic carbon storage by check-dams of Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(2): 1-4.

[9] Wang Yafeng, Chen Liding, Gao Yang, et al. Carbon sequestration function of check-dams: A case study of the Loess Plateau in China [J]. AMBIO, 2014, 43(7): 926-931.

[10] 景可,焦菊英.黄土丘陵沟壑区水土流失治理模式、治理成本及效益分析:以米脂县高西沟流域为例[J].中国水土保持科学,2009,7(4):20-25.
Jing Ke, Jiao Juying. Mode, cost and benefit of soil and water conservation on the Loess Plateau: A case study in Gaoxigou watershed in Mizhi County [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009,7(4):20-25.

[11] 杨明义,田均良,刘普灵.应用^{137}Cs研究小流域泥沙来源[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,13(3):49-53.
Yang Mingyi, Tian Junliang, Liu Puling. Studying sediment sources in small watershed using ^{137}Cs tracing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1999, 13(3): 49-53.

[12] 叶浩,石建省,侯宏冰,等.基于GIS/GPS的淤地坝泥沙淤积速率的评价方法探讨:以内蒙古南部砒砂岩区淤地坝为例[J].地质学报,2006,80(10):1633-1636.
Ye Hao, Shi Jiansheng, Hou Hongbing, et al. Exploration on the sedimentary rate assessment in silt retention dam based on GIS and GPS [J]. Acta Geologica Sinica, 2006,80(10):1633-1636.

[13] 汪亚峰,傅伯杰,侯繁荣,等.基于差分GPS技术的淤地坝泥沙淤积量估算[J].农业工程学报,2009,25(9):79-83.
Wang Yafeng, Fu Bojie, Hou Fanrong, et al. Estimation of sediment volume trapped by check-dam based on differential GPS technique [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(9):79-83.

[14] Zeng Yi, Meng Xiangdong, Zhang Yan, et al. Estimation of the volume of sediment deposited behind check dams based on UAV remote sensing [J]. Journal of Hydrology, 2022,612:128143.

[15] Deng Lei, Wang Kaibo, Chen Meiling, et al. Soil organic carbon storage capacity positively related to forest succession on the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2013,110:1-7.

[16] Wang Yafeng, Fu Bojie, Lü Yihe, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China [J]. Catena, 2011,85(1):58-66.

[17] Jacinthe P A, Lal R, Owens L B, et al. Transport of labile carbon in runoff as affected by land use and rainfall characteristics [J]. Soil and Tillage Research, 2004,77(2):111-123.

[18] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. Environment International, 2003,29(4):437-450.

[19] Zeng Yi, Fang Nufang, Shi Zhihua, et al. Soil organic carbon redistribution and delivery by soil erosion in a small catchment of the Yellow River basin [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2020, 125(5):e2019JG005471.

[20] 马红亮,陈灿灿,尹云锋,等.森林土壤不同粒径颗粒的碳矿化研究[J].土壤学报,2024,61(5):1247-1259.
Ma Hongliang, Chen Cancan, Yin Yunfeng, et al. Experimental study on carbon mineralization of different sizes particle in forest soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024,61(5):1247-1259.

[21] 黄锦学,熊德成,刘小飞,等.增温对土壤有机碳矿化的影响研究综述[J].生态学报,2017,37(1):12-24.
Huang Jinxue, Xiong Decheng, Liu Xiaofei, et al. Effects of warming on soil organic carbon mineralization: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1):12-24.