DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.001 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.001
赵孟凡, 王寒霄, 高昕莉, 等. 小流域水土保持措施碳汇能力监测评价:以陕西省延安市薛张小流域为例[J]. 水土保持研究,2026,33(6):101-110.
Zhao Mengfan, Wang Hanxiao, Gao Xinli, et al. Monitoring and evaluation of carbon sink capacity of soil and water conservation measures in small watersheds: a case study of Xuezhang small watershed in Yan′an City, Shaanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):101-110.

小流域水土保持措施碳汇能力监测评价
——以陕西省延安市薛张小流域为例

赵孟凡[1], 王寒霄[1], 高昕莉[1], 王 健[2], 刘加彬[2], 高 杨[1,3]
(1.西北农林科技大学 林学院 陕西省林业综合重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 陕西 杨凌 712100; 3.陕西黄龙山森林生态系统定位观测研究站, 陕西 延安 715701)

摘 要:[**目的**]明确小流域水土保持措施的碳汇效益,建立可操作的碳汇监测体系,从而支撑碳汇项目开发、碳市场交易及配套法规制定。[**方法**]结合遥感影像和实地采样获取的相关数据,核算陕西省延安市薛张小流域2005—2024年的碳汇量,分析评价了该小流域各水土保持治理措施碳汇能力。[**结果**]20年来,薛张小流域总碳汇量为46 260.37 t C,其中碳增汇量为43 619.48 t C,碳减排量为2 640.89 t C。从碳库角度看,土壤碳增汇量和植被碳增汇量几乎相同;但土壤碳库碳储量相对较大,是薛张小流域碳储量的重要组成部分;植被碳库碳储量的年均增长率相对较高,是小流域碳储量增加的关键。从水保措施角度看,水土保持乔木林的碳增汇量最大,占比达71.09%;淤地坝的碳减排量最大,占比达54.71%;水土保持治理措施固碳增汇和减蚀减排能力显著。[**结论**]薛张小流域水土保持措施综合治理的固碳效果显著,该研究所构建的水土保持碳汇监测体系具有可行性,可为碳交易的实现提供技术支撑和科学依据。

关键词:水土保持; 碳汇; 监测评价; 小流域; 黄土丘陵沟壑区
中图分类号:S157.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0101-10

Monitoring and evaluation of carbon sink capacity of soil and water conservation measures in small watersheds
—a case study of Xuezhang small watershed in Yan′an City, Shaanxi Province

Zhao Mengfan[1], Wang Hanxiao[1], Gao Xinli[1], Wang Jian[2], Liu Jiabin[2], Gao Yang[1,3]
(1.*Shaanxi Provincial Key Comprehensive Laboratory of Forestry, College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2.*College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3.*Forest Ecosystem Positioning Research Station of Huanglong Mountain, Yan′an, Shaanxi* 715701, *China*)

Abstract: [**Objective**] To identify the carbon sink benefits of soil and water conservation measures in small watersheds and to develop a feasible carbon sink monitoring system, thereby enabling the development of carbon sink projects, carbon market trading, and the enactment of related regulations. [**Methods**] Based on remote sensing images and field sampling data, this study calculated the carbon sink of the Xuezhang small watershed in Yan′an City, Shaanxi Province from 2005 to 2024, and analyzed the carbon sink capacity of various soil and water conservation measures in the watershed. [**Results**] Over the past two decades, the total carbon sink of the Xuezhang small watershed was 46 260.37 t C, including 43 619.48 t C from carbon sink enhancement and

收稿日期:2026-01-05 **修回日期:**2026-01-25 **接受日期:**2026-02-11
资助项目:国家自然科学基金"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:赵孟凡(2001—),男,陕西咸阳人,在读硕士研究生,研究方向为水土保持碳汇研究。E-mail:2023055664@nwafu.edu.cn
通信作者:高杨(1988—),女,山东禹城人,博士,副教授,主要从事水土保持碳汇研究。E-mail:gaoyang0912@nwafu.edu.cn

2 640.89 t C from carbon emission reduction. From the perspective of carbon pools, the carbon sink enhancement in soil and vegetation was nearly equal. However, the soil carbon pool had a relatively larger carbon stock, serving as a major component of the watershed's carbon storage. The vegetation carbon pool exhibited a relatively higher average annual growth rate, making it key to the increase in carbon storage. In terms of soil and water conservation measures, arbor forests for soil and water conservation contributed the most to carbon sink enhancement, accounting for 71.09%, while check dams contributed the most to carbon emission reduction, accounting for 54.71%. Soil and water conservation measures demonstrated significant capacity in carbon sequestration and sink enhancement, as well as erosion reduction and carbon emission reduction. [**Conclusion**] The comprehensive management of soil and water conservation measures in the Xuezhang small watershed has achieved significant carbon sequestration effects. The carbon sink monitoring system for soil and water conservation constructed in this study is feasible, which can provide technical support and scientific basis for the realization of carbon trading.

Keywords: soil and water conservation; carbon sink; monitoring and evaluation; small watershed; loess hilly-gully region

黄土丘陵沟壑区是中国水土流失问题最为突出的区域之一,该问题带来的危害具有显著的全域性与连锁性。在农业生产方面,表层有机质土壤的流失会导致土地肥力下降和作物减产;在水利建设方面,泥沙淤积河道水库,削弱水利设施调蓄能力并减少使用寿命;在生态保护方面,水土流失破坏植被与栖息地,影响水源涵养功能;此外,它还直接加剧滑坡、泥石流等地质灾害,威胁居民安全与基础设施稳定[1-3]。因此,在黄土丘陵沟壑区开展水土流失综合治理,是维系该区域生态平衡、推动社会经济可持续发展、积极应对气候变化的关键性综合举措。水土保持通过人为活动改变部分地形、土壤结构、土地利用方式等,对大气中CO_2的固定有着积极的作用[4],具有显著的碳汇潜力。它主要包括实施水土保持措施和治理所形成的增汇和减排。

水土保持碳汇评估是我国《2030年前碳达峰行动方案》中的十大行动方案之一,是新时期水土保持实现碳中和战略的重要工作内容。小流域水土保持措施综合治理包括林草措施、工程措施和农业措施等方面,对土壤、植被两大碳库的碳储量有着重大的影响,是开展水土保持碳汇监测的理想场所[5]。开展小流域水土保持碳汇监测工作,不仅对贯彻落实"两山"理念、健全水土保持生态产品价值实现机制具有示范作用,还对保障水土保持措施良好运行与维护、促进区域经济社会发展具有重要意义。

尽管已有对小流域水土保持相关措施尤其是林草措施碳汇作用和机理的研究[6],但针对小流域水土保持措施综合治理碳汇量监测体系的构建和碳减排量的计算鲜有报道,且目前核算过程中还存在传统地面采样难以还原研究区具体情况和估算尺度过大的问题[7]。本研究以位于黄土丘陵沟壑区的陕西省延安市宝塔区薛张小流域作为研究区,全面调查2005—2024年小流域水土保持措施综合治理的实施情况,针对土壤和植被两个重要的碳库,构建遥感数据、实测数据相结合的监测体系,开展不同水土保持措施碳增汇和碳减排能力的监测与评价,旨在为小流域水土保持项目的碳汇监测和评估提供技术支持,并为碳交易的实现和相关法规的制定提供科学依据。

1 小流域概况

薛张小流域位于陕西省延安市宝塔区东北区域(109.506°—109.594°E,36.737°—36.823°N),距离市区约30 km,地处陕北黄土高原丘陵沟壑区,总面积25.8 km^2。

薛张小流域位于黄土高原腹地,境内梁、峁、沟、壑、渠具有,沟壑纵横,梁峁起伏,地表支离破碎,地势起伏较大,高程为979~1 343 m,最大高差约400 m。气候属暖温带大陆性季风气候,多年平均气温9.2 ℃,1月平均气温-5.5 ℃,7月平均气温23.1 ℃。年平均降水量561.3 mm,降雨集中在每年的7—9月,7月最多。2000年以前,薛张小流域水土流失极其严重,水土流失面积为25.1 km^2,占总土地面积的97.29%。此外,流域内煤炭、石油、天然气等矿产资源丰富,开采频繁,对当地的生态环境造成了一定的影响。

2005年以来,延安市水务局全面实行沟道治理和坡面治理相结合、造林与种草相结合、生态效益与经济效益相结合的水保措施,主要包括:梯田、水土保持林、封禁草地、淤地坝等水保措施,同时实施修筑混凝土道路、治理油井井场、煤矿以及天然气井场等。其中水土保持措施量为营造水土保持乔木林870.88 hm^2,营造水土保持灌木林612.22 hm^2,封禁管护草地605.15 hm^2,实施坡改梯项目237.12 hm^2,修

建中型淤地坝 6 座,共实施面积 2 325.37 hm^2。经调查,该研究区乔木种类主要为刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、侧柏(*Platycladus orientalis* L.)和杨树(*Populus tomentosa* L.),灌木种类主要为柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)。项目建设过程中,水土保持乔木林均采用鱼鳞坑整地,使流域水土流失得到有效防治。目前,薛张小流域建立了较为完善的水土流失综合防治体系,水土流失得到有效控制,水土流失综合治理程度达到92.64%,植被覆盖率达到65%以上,取得了良好的生态效益、经济效益和社会效益,为监测该流域水土保持碳汇量提供了有利条件。2019年,全国退耕还林还草工作会议在延安召开,薛张小流域因其卓越的水土流失综合治理成效,成为水土流失治理的典范,还被选为会议的现场考察点。

2　材料与方法

2.1　小流域碳汇能力监测评价流程

碳汇能力是指相对于基线情景下,一定时间内项目情景碳库的碳增汇量[8]。小流域碳汇能力监测评价主要包括研究区航测与遥感影像获取、碳层划分与主要水保措施识别、水土保持措施碳增汇能力评价分析、水土保持措施碳减排能力评价分析4个环节。本研究以薛张小流域为例,计算过去20 a小流域水土保持措施综合治理所产生的碳汇量。详细流程图如图1所示。

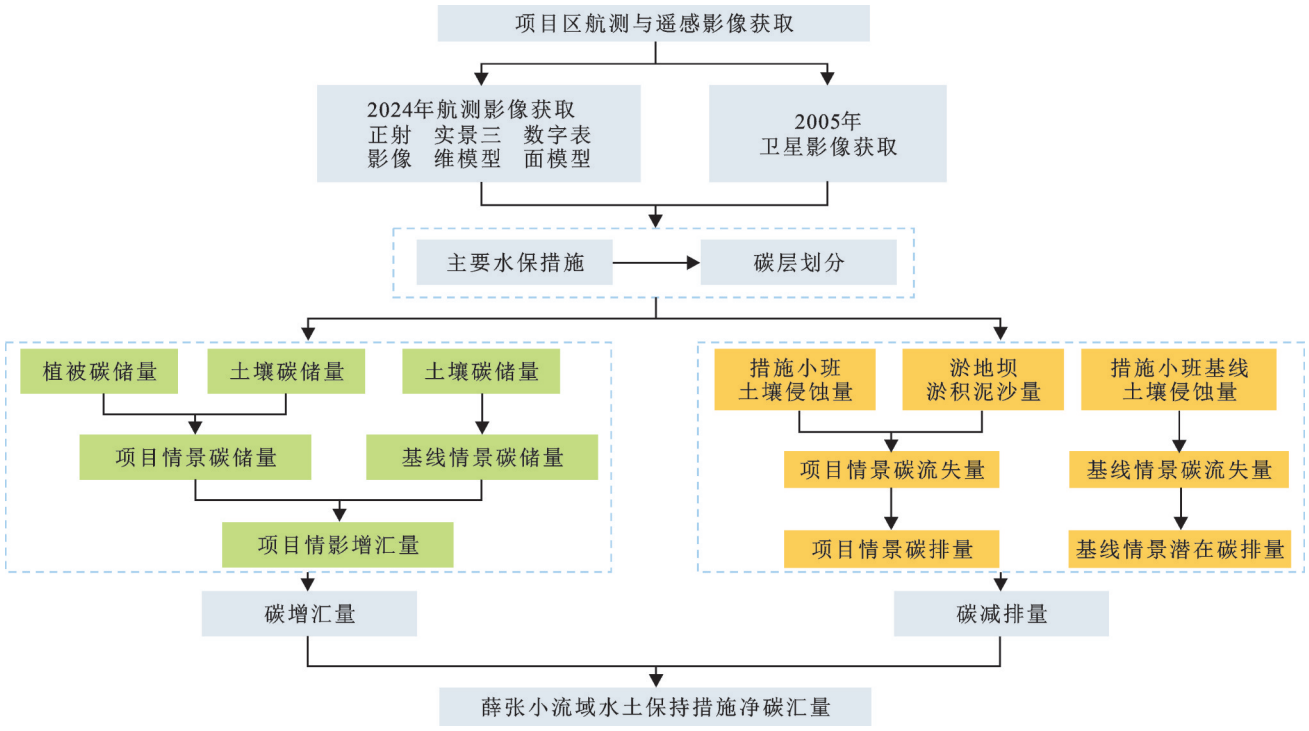


图1　薛张小流域碳汇的监测流程

Fig.1　Monitoring process of carbon sink in Xuezhang small watershed

2.2　遥感影像收集与处理

研究区地形复杂,面积较大。无人机续航能力无法支撑对整个测区进行航线规划,因此采取将测区分为4个子区域并逐区规划航线进行航测。无人机设备选择大疆Mavic 3,地面控制测量采用华测i90惯导智能RTK测量系统。为确保对测区黄土高原的沟壑纵横地形的精确量测,研究区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DEM数据为底图,采用Mavic 3E无人机的仿地飞行智能摆动拍摄模式,敷设井字形航线,累计航线长度820.1 km。经过控制点的布设测量和航测数据的采集等作业,完成外业数据采集。

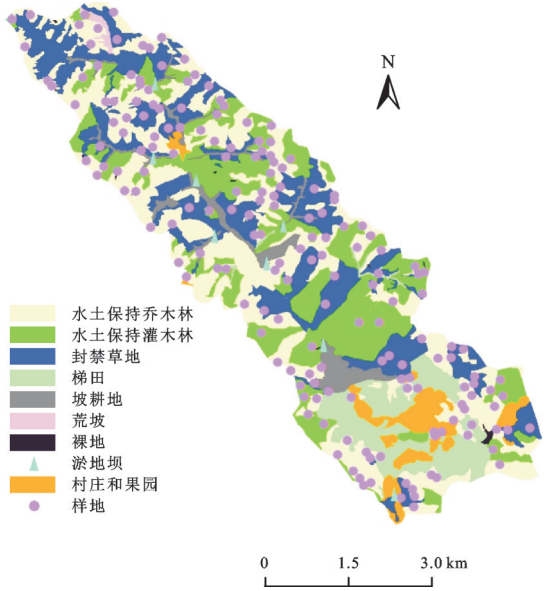
借助大势智慧等软件,采用摄影测量学原理与计算机视觉理论相结合的方法进行内业数据处理,得到空间分辨率为10 cm的正射影像图(Digital Orthophoto Map, DOM)、数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)以及实景三维模型。

2.3　小流域碳层划分、碳库划分和基线情景确定

2.3.1　*小流域碳层的划分*　根据实施的水保措施和土地利用类型,将研究区划分为8个碳层(图2)。综合考虑水保措施、植被类型、地形因素(坡位、坡度及坡向)和措施实施年限等,进一步将每个碳层细分,得到182个小班(表1)。

2.3.2　*小流域碳库的划分*　根据薛张小流域的生态系统结构和土地利用类型,碳库可以分为植物碳库和土壤碳库两类。依据前述的8个碳层对这两个碳

库的动态变化进行监测和评估。为了确保数据的准确性和可靠性，根据碳汇量监测的保守性原则，村庄、果园和硬化路面等其他土地利用类型将不被纳入监测和评价范围[9]。



注：基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2019)3333号的标准地图制作，底图未做修改。

图2 薛张小流域的碳层划分和样地分布

Fig.2 Division of carbon layers and distribution of sample plots in Xuezhang small watershed

表1 不同碳层的小班数量和面积

Table 1 Number and area of subcompartments in different carbon layers

碳层	小班数量/个	面积/hm^2
水土保持乔木林	94	870.88
水土保持灌木林	24	612.22
封禁草地	40	605.15
梯田	7	237.12
坡耕地	7	125.48
荒坡	2	60.81
裸地	8	7.89
淤地坝(单独计算)	6	—
合计	182	2519.55

注："—"代表未发现。

2.4 样地布设与调查

2.4.1 野外样地布设 在每个小班内，随机设置样地1块，样地边缘离小班边界10 m以上。其中，乔木(94块)、灌木(24块)的样地规格为20 m×20 m，封禁草地(40块)、梯田(7块)、坡耕地(7块)、荒坡(1块)、淤地坝(1块)和裸地(8块)的样地规格为10 m×10 m，共设立样地182块(图2)。

2.4.2 调查采样 野外调查于2024年7月进行。在每个乔木林样地和灌木林样地进行每木检尺，测定树高、胸径和地径，用于单株生物量的计算。在具有代表性的14个乔木样地中选择1株标准木并挖出，共挖出14株不同胸径的活立木，分别测定每株活立木的树干和树根质量，用于生物量模型的优选和校正；并从树干和树根上分别锯下约1 kg样品带回实验室，使用元素分析仪测定植物样本含碳率。

在每个样地内沿一条对角线，采用"S"形走势，确立5个土壤采集点。在每个土壤采集点，使用直径5 cm的土钻，按照20 cm为深度间隔，从上而下采集土样，深度范围为100 cm。将5个采集点相同土层的样品充分混合成1个土样，采用四分法从中取200～300 g带回实验室，每个样地共采集5个土样，整个流域合计采集910个土样。土样在实验室中放置于阴凉处风干，挑去土壤中的植物根系及石砾，研磨过0.1 mm筛待测。使用重铬酸钾氧化(外加热法)测定各土层土壤有机碳含量，使用环刀法测定各土层容重。

2.5 基线情景的确定与碳增汇量评价方法

根据现场勘察走访和延安市水土保持监测分站的工程记录，结合2005年影像资料的解译，研究区的基线土地利用类型主要包括坡耕地、荒坡和裸地，还未形成能够产生显著、稳定碳汇的人工林，水土流失极为严重。本研究基于实地调查，参考薛张小流域的水土保持治理规划和实施方案，选定小流域内未实施任何水土保持措施的区域作为基线情景[10]。其中，未治理的坡耕地面积为125.48 hm^2，荒坡面积为9.46 hm^2，裸地面积为7.89 hm^2。

2005年以前，研究区裸地无任何植被；荒坡的植被(均为草本植物)覆盖度小于15%，且处于非封禁状态，家畜啃食严重；坡耕地处于耕种状态，主要种植作物为荞麦和马铃薯。如果对研究区维持以上土地利用和管理方式，裸地不可能产生生物质碳；在放牧状态下，由于每年新生的植物体被家畜不断啃食，致使荒坡生物质碳储量极有可能会随时间降低[11]，即荒坡生物质碳储量变化量为负值；坡耕地在非保护性耕作条件下，生物质碳储量极有可能会随时间降低[12]。因此，基线情境下，由于缺少稳定的固碳途径，且原有少量植被持续被破坏，基线情景增汇量极有可能为负值。按照保守性原则，研究区基线情景增汇量设为零。

2.6 项目情景碳增汇量评价方法

2.6.1 基线情景碳储量设定

(1) 植被碳库。由于2005年研究区土地利用类型为裸地、荒坡和坡耕地，几乎不存在植被碳储量，因此可忽略不计。(2) 土壤碳库。薛张小流域基线情景的植被和外源碳输入量极少，且存在的水土流失导致了碳密度降低。根据保守性原则，可假设2005—2024年期间未实施水保措施的裸地、荒坡和坡耕地的土壤碳密度没有变

化,将2024年7月实测的裸地、荒坡和坡耕地土壤有机碳含量和碳密度作为水土保持综合治理项目实施前的土壤有机碳含量和碳密度替代值。坡耕地、荒坡和裸地土壤0—20 cm土层土壤有机碳含量分别为3.20,2.14,1.64 g/kg,碳密度分别为30.00,21.70,18.58 t C/hm^2。

2.6.2　项目情景碳储量评价

(1)植被碳库。通过结合植被生物量和植被含碳率,计算植被碳储量。查阅黄土高原乔木树种的主要生物量模型,将实测的14株标准木树高和胸径值分别代入生物量模型,计算出树干生物量和树根生物量,将计算值与14株标准木实际称量的树干和树根质量进行对比,优选出匹配程度最高的生物量模型(表2)。灌木树种使用地径和整株生物量进行验证。

表2　不同树种的生物量计算公式

Table 2　Biomass calculation formulas for different tree species

植被类型		生物量计算公式	参考文献
乔木	刺槐	$B_{干}=0.08(D^2H)^{0.834}$ $B_{根}=0.012(D^2H)^{1.495}$ $B_{总}=0.08(D^2H)^{0.834}+0.012(D^2H)^{1.495}$	李福明等[13]
	侧柏	$B_{干}=0.0573(D^2H)^{0.8657}$ $B_{根}=0.0485(D^2H)^{0.6886}$ $B_{总}=0.0573(D^2H)^{0.8657}+0.0485(D^2H)^{0.6886}$	程伟等[14]
	杨树	$B_{干}=0.029D^{2.696}$ $B_{根}=0.179D^{1.608}$ $B_{总}=0.029D^{2.696}+0.179D^{1.608}$	李建华等[15]
灌木		$B_{总}=245.16/[1+\exp(4.82-0.4\mathrm{BD})]$	Ma等[16]

注:$B_{干}$,$B_{根}$,$B_{总}$分别为植被树干、根系、全株的生物量(kg);D为胸径(cm);H为树高(m);BD为基径(mm)。

将乔木和灌木样地实测的树高、胸径、基径等代入优选的生物量模型,计算出植被生物量,结合实测的不同器官含碳率(表3)和样地面积,从而得出各个样地的植被碳密度。将样地植被碳密度设为与其相对应的小班植被碳密度,根据小班面积进一步计算出薛张小流域项目情景下植被碳储量。

表3　不同树种的各器官含碳率

Table 3　Carbon content rates in various organs of different tree species　%

植被类型		各器官含碳率	
		树干	树根
乔木	刺槐	50.12	43.23
	侧柏	52.70	45.10
	杨树	42.70	45.87
灌木		49.24	

(2)土壤碳库。土壤碳储量计算公式如下[17]:

$$\mathrm{SOCD}=\sum_{i=1}^{n}\mathrm{SOC}_i\times\mathrm{BD}_i\times V_i \quad (1)$$

式中:SOCD为土壤碳储量(t C);n为土层数;SOC_i为第i层土壤碳含量(g/kg);BD_i为第i层土壤容重(g/cm^3);V_i为第i层土壤体积(每层深度为20 cm)(cm^3)。

将包括乔木样地、灌木样地、封禁草地、梯田的所有样地实测土壤有机碳含量、土壤容重分别代入公式后,结合样地面积计算出薛张小流域项目情景下各样地的土壤碳密度。将样地土壤碳密度设为与其相对应的小班土壤碳密度,再结合小班面积进一步计算出土壤碳储量。

2.7　水土保持措施碳减排能力评价方法

2.7.1　水土保持措施保土固碳量　采用中国土壤流失方程计算侵蚀量[18]:

$$A=R\times K\times L\times S\times B\times E\times T \quad (2)$$

式中:A为多年平均年土壤流失量[t/(hm^2·a)];R为降雨侵蚀力因子[MJ·mm/(hm^2·h)];K为土壤可蚀性因子[t·hm^2·h/(hm^2·MJ·mm)];L为坡长因子,无量纲;S为坡度因子,无量纲;B为覆盖与生物措施因子,无量纲;E为工程措施因子,无量纲;T为耕作措施因子,无量纲。

基线情景下年侵蚀量减去项目情景下年侵蚀量即为该小班的水土保持措施年保土量。根据各小班情况,保土量乘以土壤有机碳含量即为水土保持措施保土固碳量[19],按公式(3)进行计量。

$$\mathrm{FCS_F}=\sum_{j=1}^{n}(\mathrm{SF}_j\times\mathrm{SOC}_j/1000) \quad (3)$$

式中:$\mathrm{FCS_F}$为水土保持措施保土固碳量(t C);n为水土保持措施小班数;SOC_j为土壤有机碳含量(采用实

测淤地坝、坡耕地、荒坡和裸地的土壤有机碳含量）（g/kg）；SF_j为某小班水土保持措施保土量（t）。

考虑到林草措施生长并实现保土作用有一个过程，根据保守性原则，林草措施的保土固碳量计算采用50%折减[20]。

2.7.2 水土保持措施减蚀减排量 在保土固碳量的基础上，乘以固碳流失过程中土壤有机碳被氧化的比例，即为水土保持措施减蚀减排量[21]：

$$CS_E = \sum CS_m \times P_{se,m} \quad (4)$$

式中：CS_E为水土保持措施减蚀减排量（t C）；m=1，2，3，…为水土保持措施类型，薛张流域内主要的措施有林草措施、梯田和淤地坝；CS_m为水土保持措施年保土固碳量（t C）；$P_{se,m}$为对应流失过程中土壤有机碳被氧化的比例，根据保守性原则，比例设置为20%[22]。

3 结果与分析

3.1 小流域2024年碳密度空间分布

薛张小流域2005年的土壤碳密度为22.03 t/hm²，2024年的土壤碳密度为31.41 t/hm²，提升了9.38 t/hm²；2005年植被碳密度为0，2024年植被碳密度为9.37 t/hm²，提升了9.37 t/hm²。通过遥感影像解译、野外调查和内业测定，各种水土保持措施的碳密度空间分布见图3。薛张小流域碳密度空间分布差异较大，主要集中在20～50 t/hm²，以梯田、水土保持灌木林和封禁草地为主；高碳密度区域（>50 t/hm²）分布在研究区边缘，主要以水土保持乔木林为主；低碳密度区域（<20 t/hm²）分布呈现出零散状态，以裸地为主。

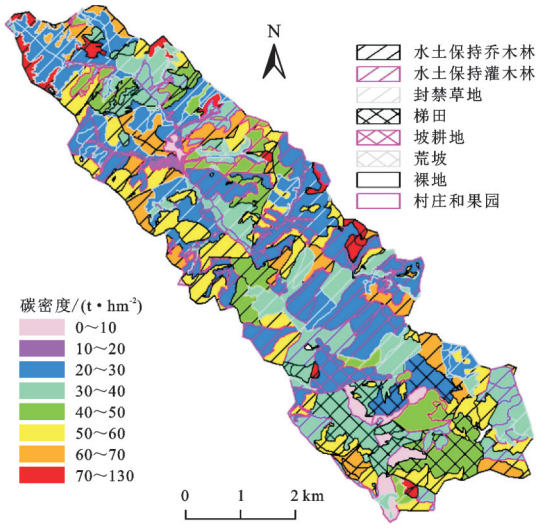


图3 2024年薛张小流域的碳密度分布

Fig.3 Carbon density distribution in Xuezhang small watershed (2024)

3.2 小流域水土保持措施碳增汇能力

2005—2024年薛张小流域各种水土保持治理措施的碳密度和碳增汇量见表4。小流域的土壤碳密度变化在3.86～11.02 t/hm²，植被碳密度的变化在0～25.16 t/hm²，总碳密度变化在3.86～36.18 t/hm²。其中，水土保持乔木林的土壤具有较强的固碳能力，碳密度变化量（11.02 t/hm²）最大，是水土保持灌木林和封禁草地的变化量（8.94，9.53 t/hm²）的1.23倍和1.16倍；梯田的碳密度变化量最小（3.86 t/hm²），远小于其他治理措施的变化。

表4 不同水保措施的碳密度和碳增汇量

Table 4 Carbon density and carbon sink enhancement of different soil and water conservation measures

水保措施	基线土地利用类型	面积/hm²	基线情景		项目情景			土壤增汇量/t C	植被增汇量/t C	总增汇量/t C
			土壤碳密度/(t·hm⁻²)	碳储量/t C	土壤碳密度/(t·hm⁻²)	植被碳密度/(t·hm⁻²)	碳储量/t C			
水保乔木林	荒坡	763.59	21.70	18560.90	32.33	25.16	49570.12	9271.93	21737.29	31009.22
	裸地	107.29	18.58							
水保灌木林	荒坡	567.55	21.70	13143.98	30.41	0.10	18193.03	4993.55	55.50	5049.05
	裸地	44.67	18.58							
封禁草地	荒坡	437.64	21.70	12607.51	30.35	0	18575.06	5967.55	0	5967.55
	裸地	167.51	18.58							
梯田	坡耕地	237.12	30.00	6908.48	33.86	0	8502.13	1593.66	0	1593.66
合计	—	2325.38	—	51220.87	—	—	94840.34	21826.69	21792.79	43619.48

注：“—”代表未发现。

3.3 小流域水土保持措施碳减排能力

2005—2024年薛张小流域各项水土保持措施保土固碳量为13 204.46 t C，其中水土保持乔木林、水土保持灌木林、封禁草地、梯田和淤地坝的保土固碳量分别为1 404.21，807.29，844.63，2 924.53，7 223.80 t C。薛张小流域各项治理措施减蚀减排量达2 640.89 t C（表5）。减蚀减排量最大的为淤地坝，占比高达54.71%；水土保持乔木林、水土保持灌木林和封禁草地分别占比10.63%，6.11%和6.40%，三者相加与梯田22.15%的占比几乎相同。

表 5　不同水保措施的减蚀减排量

Table 5　Erosion reduction and emission reduction under different soil and water conservation measures　t C

水保措施	2005年碳流失量	2024年碳流失量	总保土固碳量	总减蚀减排量
水保乔木林	146.79	6.36	1404.21	280.84
水保灌木林	153.14	12.41	807.29	161.46
封禁草地	276.24	191.77	844.63	168.93
梯田	175.87	29.64	2924.53	584.91
淤地坝	—	—	7223.80	1444.76
合计	—	—	13204.46	2640.90

注:“—”代表未发现。

3.4　小流域总碳汇量和碳储量变化

2005—2024年薛张小流域总碳汇量为46 260.37 t C,其中碳增汇量为43 619.48 t C,占总量的94.29%,碳减排量为2 640.89 t C,占比5.71%。这说明碳增汇量是小流域碳汇量的主要部分,远大于碳减排量。

根据各种水保措施的碳密度结合小班面积计算碳储量发现,2005年、2024年土壤碳库分别为5.12万t C和7.30万t C;植被碳库分别为0,2.18万t C。土壤碳储量均大于同期的植被碳储量,这表明土壤碳库对小流域碳库储量的贡献相对较大。2005—2024年小流域碳储量由5.12万t C增加到9.48万t C,增加了4.36万t C,年均增长率为4.26%。其中土壤碳增汇量为2.18万t C,占小流域碳增汇量的50.04%,年均增长率为2.13%;植被碳增汇量为2.18万t C,占小流域碳增汇量的49.96%,年均增长率为10.9%,土壤碳增汇量和植被碳增汇量几乎相同。然而,植被碳库储量的年均增长率高于土壤碳库,对小流域碳库碳储量的增加具有更重要的作用。

由此可知,在薛张小流域20 a的水土保持综合治理过程中,土壤碳密度高于植被碳密度,显示出土壤碳库在碳储量方面的优势。然而,植被碳库的提升幅度却超过了土壤碳库,这表明在实施水土保持治理措施后,植被碳库的碳汇能力得到了显著增强,从而在整体碳库碳增汇量的提高中发挥了更为积极的作用。

4　讨论与结论

4.1　讨 论

4.1.1　*薛张小流域碳密度空间分布*　延安市薛张小流域碳汇能力受水土保持治理措施影响较大,使得小流域内的碳密度存在空间差异,高碳密度区域分布于研究区边缘,说明薛张小流域中部区域的碳汇能力还有很大的提升空间。在水土保持综合治理的过程中,科学搭配治理措施,能够有效提升小流域的碳汇能力。从碳增汇量核算结果来看,水土保持乔木林具备较强的固碳能力和较高的固碳效率;从碳减排量核算结果来看,淤地坝和梯田具有更好的减蚀减排效果,这也与孙美美等[23]的研究结果相符。因此,在薛张小流域的低碳密度区域培育水土保持乔木林和修建更多淤地坝、梯田,优化水土保持治理措施结构,从而进一步提高小流域碳汇能力。

4.1.2　*小流域水土保持碳增汇能力分析*　水土保持措施能够改善土壤环境,有效调节水、肥、气、热等条件,从而促进植被的生长和发育,提高生态系统的生物量,显著增强植被和土壤对CO_2的固定能力[24]。随着小流域各项水土保持措施的实施,2005—2024年薛张小流域的碳汇量显著增加。根据各小班的碳密度和面积可计算出,小流域土壤碳增汇量范围为1 593.66～9 271.93 t C,植被碳增汇量范围为0～21 737.29 t C。其中水土保持乔木林的碳增汇量最高,达到31 009.22 t C,占总增汇量的71.09%;梯田的碳增汇量最低,仅为1 593.66 t C,占总增汇量的3.65%。在气候、水热条件总体一致的小流域范围内,各水土保持治理措施对碳增汇和碳减排的贡献不同,主要影响因素是该治理措施核算碳汇量时的碳库选择和其面积的大小[5]。草地和农田的地上生物量是高度动态和不稳定的,草地每年生长、枯萎、分解,碳循环速率快,周转周期较短,净固碳量很小[25],难以监测。因此,本研究的碳汇量监测在做碳库选择时只有水土保持乔木林和水土保持灌木林的植被碳库和土壤碳库在计算范围内,且水土保持乔木林植被碳增汇量远大于灌木林;封禁草地、梯田和淤地坝仅计算其土壤碳库。水土保持乔木林由于面积较大,且植被碳增汇量远大于其他水土保持治理措施,其碳增汇量最高。而梯田的面积相对较小,缺少植被碳库,碳密度变化量也较少,其碳增汇量最低。梯田的碳密度变化量较少可能是在坡耕地改建为梯田的过程中,土壤受到了较大扰动,导致土壤结构的破坏,从而影响了土壤的碳储存能力[26]。本研究土壤碳增汇量(21 826.69 t C)与植被碳增汇量(21 792.79 t C)几乎持平,而其他研究中土壤碳增汇量通常明显高于植被碳增汇量,这一差异源于黄土丘陵区土壤贫瘠(基线土壤碳密度仅22.03 t/hm^2),而水土保持措施显著促进了植被生长(植被碳密度从0提

升至9.37 t/hm²),导致植被碳增汇贡献凸显。

4.1.3 小流域水土保持碳减排能力分析 水土保持措施可以有效地改变微地形,提升植被覆盖率,拦截泥沙,从而显著降低土壤侵蚀的强度,并减少因土壤流失带来的碳排放[27]。这种水土保持的基本功能不仅巩固了土壤的固碳能力,减少了碳排放,还改善了土壤的碳汇能力,为植被创造了更优越的生长环境,促进了植被碳增汇量的增加。薛张小流域的水土保持措施综合治理中,淤地坝的碳减排效果最好,在总碳减排量中占比达到54.71%。这是由于淤地坝在拦沙滞沙方面发挥了显著作用,保土量远超其他治理措施,能够有效拦截来自流域内不同土地利用区的表层和上层侵蚀土壤或母质[28],从而使得淤地坝的土壤中有机碳含量较高。同时,梯田的面积仅为水土保持乔木林、灌木林和封禁草地面积总和的1/3,其碳减排量却是后三者之和。其原因一方面是由于林草措施生长保土作用实现有一个过程[20],根据保守性原则,对水土保持乔木林、水土保持灌木林和封禁草地计算所得保土固碳量采用50%进行折减;另一方面可能是因为梯田独特的分级设计使得坡度较缓[29],有效减少了水流的冲击力,降低了土壤侵蚀的风险,并通过精心管护进一步提升了减蚀减排效果。

4.1.4 小流域水土保持措施碳汇监测体系 本研究针对黄土丘陵沟壑区小流域地形复杂、措施类型多样的特点,突破传统地面采样的局限,采用"无人机仿地飞行倾斜摄影+RTK地面控制+实验室精准测定"的技术链,实现了小流域地形、植被覆盖和措施分布的高精度还原,提高了核算效率。同时,区别于以往区域尺度的宏观估算[30],本研究根据水保措施、植被类型、地形因素(坡位、坡度及坡向)和措施实施年限等,将研究区划分为8个碳层和182个小班,结合样地的土壤分层采样和植被标准木挖掘等,实现了小班尺度的精细化核算,使得核算结果更为科学合理。

本研究还通过中国土壤流失方程精准核算基线与项目情景下的土壤侵蚀量差异,明确保土量是碳减排的基础载体,再结合实测的土壤有机碳含量,将保土量转化为保土固碳量,最终结合20%的碳氧化比例[22]核算出减蚀减排量,弥补了传统方法对碳汇评估"重增汇、轻减排"的缺陷,更为全面地评估水土保持措施碳汇量。在核算过程中,针对林草措施(乔木林、灌木林、封禁草地)与工程措施(梯田、淤地坝)的减蚀机理差异,采用差异化处理方式:林草措施因生长周期长、保土作用逐步显现,按保守性原则对保土固碳量进行1/2折减[20];工程措施(梯田、淤地坝)通过改变微地形直接拦截泥沙,保土作用立竿见影,未做折减。这种分类核算方式避免了"一刀切"的估算误差,使结果更贴合不同措施的实际减蚀效果。

然而,本次核算为2005—2024年的"静态快照式"监测,未捕捉碳汇能力的年际动态变化。因此,本研究采用的核算方法如何揭示碳汇能力的年际演变规律,有待进一步研究。

4.2 结 论

(1)水土保持措施综合治理具有显著的固碳作用。2005—2024年小流域碳储量增加了4.36万t C,其中土壤和植被碳储量贡献分别占总量的50.04%和49.96%。土壤碳储量是小流域碳储量的重要组成部分,而植被碳增汇对碳增汇量的提高发挥了重要作用。(2)水土保持治理措施碳增汇总量达43 619.48 t C,其中水土保持乔木林具有较强的固碳能力和较高的固碳效率,对小流域碳增汇量贡献最大(71.09%)。(3)水土保持治理措施有利于减少碳的流失,提高薛张小流域的碳减排量(2 640.89 t C),其中淤地坝占比最大(54.71%)。本研究精准揭示了不同水土保持措施的空间分布特征与碳汇贡献,为黄土丘陵沟壑区水土保持碳汇的生态价值核算提供了理论与技术支撑,也为推动碳交易实现提供了关键科学依据。

参考文献(References):

[1] 杨才敏.土壤有机质与水土流失的关系定量研究[J].水土保持研究,2008,15(5):177-179.
Yang C M. Quantitative study on the relation of soil organic content and soil and water losses[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008,15(5):177-179.

[2] 熊明,陈柯兵.丹江口水库泥沙淤积及影响研究[J].中国水利,2024,998(20):52-58,73.
Xiong M, Chen K B. Studies on sedimentation and its impact on the Danjiangkou Reservoir[J]. China Water Resources, 2024,998(20):52-58,73.

[3] 杨奇,宁堆虎,刘子兰,等.水土保持对土壤生物多样性影响研究进展[C]//中国水利学会.2022中国水利学术大会论文集:第七分册.北京:中国水利水电科学研究院,2022.
Yang Q, Ning D H, Liu Z L, et al. Research advances on the effects of soil and water conservation on soil biodiversity [C]//Chinese Hydraulic Engineering Society. Proceedings of 2022 China Water Resources Academic Conference: Volume 7. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022.

[4] 李智广,王海燕,王隽雄.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):312-317,380.
Li Z G, Wang H Y, Wang J X. Mechanisms, pathways and characteristics of carbon sinks related to soil and water conservation from perspective of carbon peak and

carbon neutralization[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(3):312-317,380.

[5] 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 G K, Wang K B, Ren Z P, 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.

[6] 张西宁,曹丹,李超,等.南小河沟流域水土保持碳汇能力评估研究[J].人民黄河,2025,47(3):117-122.
Zhang X N, Cao D, Li C, et al. Evaluation of carbon sink capacity of soil and water conservation in Nanxiaohegou Watershed[J]. Yellow River, 2025,47(3):117-122.

[7] 谢立军,白中科,杨博宇,等.碳中和背景下国内外陆地生态系统碳汇评估方法研究进展[J].地学前缘,2023,30(2):447-462.
Xie L J, Bai Z K, Yang B Y, et al. Carbon sequestration assessment methods at home and abroad for terrestrial ecosystems: research progress in achieving carbon neutrality[J]. Earth Science Frontiers, 2023,30(2):447-462.

[8] 余智涵,王晓雯,杨红强.基于林业碳汇额外性的碳基线情景与生态补偿水平[J].中国人口·资源与环境,2025,35(6):156-166.
Yu Z H, Wang X W, Yang H Q. Carbon baseline scenarios and ecological compensation levels based on forestry carbon sink additionality[J]. China Population, Resources and Environment, 2025,35(6):156-166.

[9] 钟小剑,成辉,李智广,等.小流域综合治理水土保持碳汇能力监测评价:以福建省长汀县罗地河小流域为例[J].水土保持通报,2023,43(5):304-311.
Zhong X J, Cheng H, Li Z G, et al. Monitoring and evaluating carbon sink capacity for comprehensive management of soil and water conservation in small watersheds: a case study at Luodihe small watershed of Changting County, Fujian Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5):304-311.

[10] 钟小剑,李智广,成辉,等.水土保持碳汇项目的基线问题[J].中国水土保持科学(中英文),2026,24(1):63-69.
Zhong X J, Li Z G, Cheng H, et al. The baseline problem of carbon sink projects from soil and water conservation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2026, 24(1):63-69.

[11] Ju X, Wang B Y, Wu L H, et al. Grazing decreases net ecosystem carbon exchange by decreasing shrub and semi-shrub biomass in a desert steppe[J]. Ecology and Evolution, 2024,14(6): e11528.

[12] 李娜,张哲,白伟,等.耕作方式下坡面土壤侵蚀对有机碳流失的影响[J].东北农业大学学报,2022,53(2):82-90.
Li N, Zhang Z, Bai W, et al. Effects of soil erosion on soil organic carbon loss in cinnamon soil slope land under different tillage methods[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2022,53(2):82-90.

[13] 李福明,冯泳翰,赵怡,等.蔡家川流域人工刺槐生物量模型的构建与比较[J].森林与环境学报,2024,44(1):62-70.
Li F M, Feng Y H, Zhao Y, et al. Construction and comparison of artificial *Robinia pseudoacacia* biomass model in Caijiachuan watershed[J]. Journal of Forest and Environment, 2024,44(1):62-70.

[14] 程伟,高明镇,侯玉松,等.不同密度对侧柏人工林生物量影响分析:以淄川区国有林场为例[J].林业科技,2021,46(6):13-16.
Cheng W, Gao M Z, Hou Y S, et al. Effects of different densities on biomass of *Platycladus orientalis* plantation: a case study of state-owned forest farms in Zichuan District[J]. Forestry Science & Technology, 2021, 46(6):13-16.

[15] 李建华,李春静,彭世揆.杨树人工林生物量估计方法与应用[J].南京林业大学学报(自然科学版),2007,31(4):37-40.
Li J H, Li C J, Peng S K. Study on the biomass expansion factor of poplar plantation[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2007, 31(4):37-40.

[16] Ma J M, Yuan C, Zhou J Y, et al. Logistic model outperforms allometric regression to estimate biomass of xerophytic shrubs[J]. Ecological Indicators, 2021,132: 108278.

[17] 孙文义,郭胜利.黄土丘陵沟壑区小流域土壤有机碳空间分布及其影响因素[J].生态学报,2011,31(6):1604-1616.
Sun W Y, Guo S L. The spatial distribution of soil organic carbon and its influencing factors in hilly region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(6):1604-1616.

[18] 刘宝元.中国土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2024.
Liu B Y. Chinese soil loss equation[M]. Beijing: Science Press, 2024.

[19] 郑海金,杨洁,汤崇军,等.不同水土保持耕作措施对径流泥沙与土壤碳库的影响[J].水土保持通报,2011,31(6):1-4,10.
Zheng H J, Yang J, Tang C J, et al. Impacts of different soil and water conservation tillage measures on runoff, sediment and soil carbon stock[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011,31(6):1-4,10.

[20] Zhang L X, Zhang H. Vegetation reconstruction in upland and ravine regions of Loess Plateau in Northern Shaanxi, China[J]. Pakistan Journal of Botany, 2012, 44:101-106.

[21] 曾奕.黄土丘陵区侵蚀环境下的流域土壤有机碳动态

变化及其影响机制[D].武汉:华中农业大学,2021.
Zeng Y. Dynamic change of eroded organic carbon and its influence mechanism at watershed of the hilly region in Loess Plateau[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021.

[22] Liu C, Li Z W, Chang X F, et al. Soil carbon and nitrogen sources and redistribution as affected by erosion and deposition processes: a case study in a loess hilly-gully catchment, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018,253:11-22.

[23] 孙美美,宋变兰,时伟宇,等.黄土丘陵区刺槐、辽东栎林生态系统碳汇功能特征[J].水土保持研究,2020,27(2):55-61.
Sun M M, Song B L, Shi W Y, et al. Characteristics of carbon sink in black locust plantation and oak natural secondary forest in Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(2):55-61.

[24] Duan G H, Zheng C, Jiang Y M, et al. Effects of different soil and water conservation measures on plant functional traits in the Loess Plateau[J]. Frontiers in Plant Science, 2024,15:1381807.

[25] 郭丁,李旭东,王静,等.黄土高原草地和农田生态系统碳滞留时间及固碳潜力[J].中国沙漠,2018,38(2):363-371.
Guo D, Li X D, Wang J, et al. Estimation of carbon residence times and sequestration potential of grassland and cropland ecosystem in the Loess Plateau[J]. Journal of Desert Research, 2018,38(2):363-371.

[26] 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.
Yu K Y, Cheng H, Li Z G, 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.

[27] 钟小剑,吴娟,卢顺发,等.水土保持碳汇研究进展与趋势[J].福建师范大学学报(自然科学版),2024,40(3):40-44,64.
Zhong X J, Wu J, Lu S F, et al. Review and trends in soil and water conservation carbon sinks[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2024,40(3):40-44,64.

[28] Zeng Y, Jing T G, Xu B D, et al. Vectorized dataset of silted land formed by check dams on the Chinese Loess Plateau[J]. Scientific Data, 2024,11:348.

[29] 乔冰洁,杨勤科,王春梅,等.梯田对侵蚀地形指标的影响:以黄土丘陵第2副区为例[J].水土保持研究,2023,30(4):184-193.
Qiao B J, Yang Q K, Wang C M, et al. Influence of terrace on erosional topographic index: taking the second sub-region of loess hill as an example[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(4):184-193.

[30] 廖明蓉,邵景安,郭跃,等.重大森林恢复计划下的碳增汇效应:基于石柱县两次森林资源2类清查的分析[J].生态学报,2014,34(16):4707-4719.
Liao M R, Shao J A, Guo Y, et al. Estimating carbon sequestration of the major forest recovery plan: based on the analysis of forest inventory data of Shizhu County[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(16):4707-4719.

(上接第100页)

[26] Zhou H, Peng X, Peth S, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography[J]. Soil and Tillage Research, 2012,124:17-23.

[27] 李映雪,臧真凤,张瑜,等.退耕还草对土壤碳库活度及团聚体活性有机碳组分分布的影响[J].水土保持研究,2023,30(5):241-249
Li Y X, Zang Z F, Zhang Y, et al. Changes in soil carbon pool activity and distribution of labile organic carbon composition in soil aggregates following conversion of farmland to grassland on the Loess Plateau[J]. Research on Soil and Water Conservation, 2023,30(5):241-249

[28] 区晓琳,陈志彪,姜超,等.植被恢复对亚热带侵蚀红壤团聚体养分分布的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):230-238.
Qu X L, Zhi B C, Jiang C, et al. Effect of vegetation restoration on nutrient distribution within aggregate of subtropical eroded red soils[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(6):230-238.

[29] 王恩姮,赵雨森,陈祥伟,等.机械压实对黑土区耕作土壤团聚体特征的影响[J].土壤通报,2009,40(4):756-760.
Wang E H, Zhao Y S, Chen X W, et al. Effect of heavy machinery operation on soil aggregates character in phaeozem region[J]. Soil Bulletin, 2009, 40(4): 756-760

[30] 李彩霞,陈津赛,付媛媛,等.施氮和灌溉管理对麦田土壤团聚体组成及有机碳的影响[J].灌溉排水学报,2022,41(12):59-64,80.
Li C X, Chen J S, Fu Y Y, et al. Effects of nitrogen fertilization and irrigation on soil aggregation and soil organic carbon in winter wheat field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022,41(12):59-64,80.