

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

钟小剑^{1,2,3}, 成辉^{2,4}, 李智广², 吴娟⁵, 卢顺发⁵, 李登秋^{1,3}, 谢锦升^{1,3}

(1.福建师范大学地理研究所,福建福州350117; 2.水利部水土保持监测中心,

北京100053; 3.福建森林碳计量技术开发应用工程研究中心,福建福州350117;

4.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌712100; 5.福建省水土保持试验站,福建福州350003)

摘要: [目的] 监测并评价土壤和植被的碳汇,为实施水土保持项目碳汇动态监测和评价提供技术和方法,为水土保持项目参与碳排放权交易与研究制定相关规则提供理论和方法支撑。[方法] 采用实地采样分析、激光雷达、遥感等相关参数,核算福建省长汀县罗地河小流域2001—2022年植被碳库和土壤碳库的储碳量,评价小流域水土保持各治理措施的碳汇能力。[结果] ①21 a综合治理后,罗地河小流域各种水土保持措施均有显著提升碳汇的作用和能力,小流域碳储量增加 3.97×10^4 t,年均增长 1.89×10^3 t/a。②碳库角度上看,2001—2022年土壤和植被的碳储量分别增加73.73%和346.41%。小流域碳汇量达到 3.05×10^4 t,其中土壤碳汇 1.66×10^4 t,植被碳汇 1.39×10^4 t。③各种措施提升碳汇增量的能力存在差异,其中板栗和施肥马尾松林增汇最为明显,其次是针阔混交林、抚育管护马尾松林、水平阶整地马尾松林,最后是封禁治理及杨梅。[结论] 各种水土保持措施的保碳、固碳和增汇作用明显,而板栗和施肥马尾松林等实施整地、造林、配以施肥养育措施的林地碳汇能力增加更加显著,是提高水土保持水效益,增加碳汇量的有效措施。

关键词: 水土保持; 小流域; 综合治理; 碳汇能力; 福建省长汀县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0304-08

中图分类号: S157.2

文献参数: 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[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 304-311. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20231011.001; Zhong Xiaojian, Cheng Hui, Li Zhiguang, et al. Monitoring and evaluating carbon sink capacity for comprehensive management of soil and water conservation in small watersheds [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 304-311.

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

Zhong Xiaojian^{1,2,3}, Cheng Hui^{2,4}, Li Zhiguang², Wu Juan⁵, Lu Shunfa⁵, Li Dengqiu^{1,3}, Xie Jinsheng^{1,3}

(1. Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350117, China; 2. Soil and Water

Conservation Monitoring Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China; 3. Fujian Forest Carbon Measurement Technology Development and Application Engineering Research Center, Fuzhou, Fujian 350117, China;

4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Fujian Experimental Station of Soil and Water Conservation, Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract: [Objective] The carbon sinks of soil and vegetation were monitored and evaluated in order to provide technology and methodology for implementing dynamic monitoring and evaluation of carbon sinks for soil and water conservation projects, and to provide theoretical and methodological support for soil and water conservation projects to participate in carbon emissions trading, and to research and formulate relevant rules. [Methods] The carbon storage capacity of the vegetation carbon pool and soil carbon pool in Luodihe small

收稿日期: 2023-07-18

修回日期: 2023-08-11

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“亚热带森林恢复过程中植物来源的底物质量对稳定性土壤有机质的影响机制”(32030073); 水利部重大科技项目“南方红壤区典型侵蚀退化地不同治理措施碳汇效应与计量技术研究示范”(SKS-2022083); 福建省水利科技项目“南方红壤侵蚀区水土保持项目碳汇核算研究”(MSK202311)

第一作者: 钟小剑(1984—), 男(汉族), 江西省于都县人, 博士, 助理研究员, 主要从事生态系统修复与碳汇经营。Email: xj.zhong@fjnu.edu.cn.

通信作者: 李智广(1966—), 男(汉族), 陕西省岐山县人, 博士, 正高级工程师(二级), 主要从事水土保持监管、监测、信息化、项目建设管理和科技研究等。Email: lizhiguang@mwr.gov.cn.

watershed at Changting County, Fujian Province during 2001—2022 was calculated through field sampling analysis and LiDAR collection of relevant parameters. Carbon sink capacity of various soil and water conservation management measures in the small watershed was evaluated. [Results] ① After 21 years of comprehensive management, various soil and water conservation measures in the study area have significantly improved the role and capacity of carbon sinks. The carbon storage of the small watershed increased by 3.97×10^4 t, with an average annual increase of 1.89×10^3 t/yr. ② The carbon storage of soil and vegetation carbon pools increased by 73.73% and 346.41%, respectively, during 2001—2022. The carbon sink of the small watershed reached 3.05×10^4 t, of which 1.66×10^4 t was attributed to the soil carbon sink and 1.39×10^4 t was attributed to the vegetation carbon sink. ③ There were differences in the ability of various measures to increase the carbon sinks. Chestnut forest land and fertilized *Pinus massoniana* forest land increased carbon sink the most obviously, followed by coniferous and broad-leaved mixed forest, nursery and managed *P. massoniana*, horizontal grade land preparation of *P. massoniana* forest, and finally close management and bayberry forest land. [Conclusion] Various soil and water conservation measures had obvious effects on carbon retention, carbon sequestration, and carbon sink increase. The carbon sink capacity of forest land such as chestnut forest and fertilized *P. massoniana* forest land with land preparation, afforestation, and fertilization and breeding measures was even more significant. These practices provide an effective means for improving the efficiency of soil and water retention and for increasing carbon sink.

Keywords: soil and water conservation; small watershed; comprehensive management; carbon sink capacity; Changting County, Fujian Province

水土保持措施具备良好的碳汇能力,其通过拦蓄泥沙、保育土壤和培育植物等途径调节地表径流,进而减少因土壤流失而造成的碳排放,有利于巩固和增加生态系统碳库的容量。小流域综合治理涉及植物措施、工程措施和耕作措施等方面,其深刻影响着土壤、植被、水体等3大碳库的库容,是开展水土保持碳汇监测与核算的理想场所。既往研究中,已有学者对水土保持的碳汇功能和机理^[1-2]、相关措施尤其是植物措施的碳汇作用等进行探究^[3-4],但鲜见专门针对水土保持项目或小流域综合治理碳汇的综合监测方法与核算体系的研究^[5]。建立水土保持项目碳汇监测与评价方法,不仅是实现水土保持项目碳汇进入碳交易市场交易或用于自愿减排的先决条件之一,而且还可以为有效评价“山水林田湖草生命共同体”的综合治理成效提供科学依据,为“绿水青山就是金山银山”提供转化途径,是实施碳达峰碳中和战略的重要举措。为准确核算水土保持治理项目碳汇量,本文以中国水土保持高质量发展先行区南方红壤丘陵区福建省长汀县的罗地河小流域为对象,在全面调查小流域综合治理以来的水土流失治理情况,针对小流域的土壤和植被两个核心碳库,构建遥感、激光雷达和实测数据相结合的一体化监测方法,开展土壤和植被碳汇监测与评价,旨在为实施水土保持项目碳汇动态监测和评价提供技术和方法,为水土保持项目参与碳排放权交易与研究制定相关规则提供理论和方法支撑。

1 小流域概况

罗地河小流域位于福建省长汀县河田镇南部,距县城 26 km,东邻南山镇,南与三洲镇接壤,西与策武镇交界,总面积 24.67 km²。海拔在 275~520 m,为盆地地形,东高西低,东西狭长,500 m 以下的丘陵、低山和盆谷分别占 76%,19%和 5%。流域位于中亚热带季风气候区,年平均气温 18.8 °C,≥10 °C 活动积温 5 800 °C,无霜期 270 d,年均降雨量 1 700 mm,降雨分布不均,4—6 月是雨季、降水量占全年的 51.8%,7—9 月多台风暴雨,多年平均年径流深 1 050 mm,径流系数 0.6。流域属花岗岩侵蚀区,风化剧烈,以山地红壤为主,土层薄,保水保肥性差,抗蚀力弱,极易发生水土流失。1985 年遥感普查显示,流域水土流失面积 12.46 km²,水土流失率高达 50.5%,植被稀少、覆盖率不足 10%,红土裸露,干热化严重^[6]。由于长期的人为扰动,原始植被多被破坏。经调查,目前该区植被多为次生马尾松林(*Pinus massoniana*),树种单一,结构简单,林下植被多为散生的芒萁(*Dicranopteris pedata*)和小叶赤楠(*Syzygium buxifolium*),经济林主要为板栗(*Castanea mollissima*)和杨梅(*Morella rubra*)。2001 年以来,该流域连续实施水土保持重点治理,取得了良好的效益,目前水土保持率达 95.4%。小流域土地利用与治理措施相结合的土地覆被类型包括施肥马尾

松林、抚育管护马尾松林、水平阶整地马尾松林、针阔混交林、封禁治理、板栗果园和杨梅果园 7 种,其面积分别为 43.80, 854.72, 360.80, 3.04, 424.72, 202.00, 99.36 hm^2 。未治理地和其他土地(含居民点、硬化路面、溪流和农田)的面积分别为 8.60, 469.96 hm^2 。其中,据长汀县水土保持中心治理记录和走访调研,针阔混交林面积小且马尾松为优势树种,为了加速演替,提升森林质量,林内栽种枫香(*Liquidambar formosana*)小树苗(胸径小于 2 cm),标识为针阔混交林。板栗果园和杨梅果园每年施一定量的有机肥和少量化肥(挖穴施肥)。项目期内,小流域内进行了必要的水土保持措施,除了杨梅果园进行种树更新,其他未进行任何林木砍伐、间伐(图 1)。

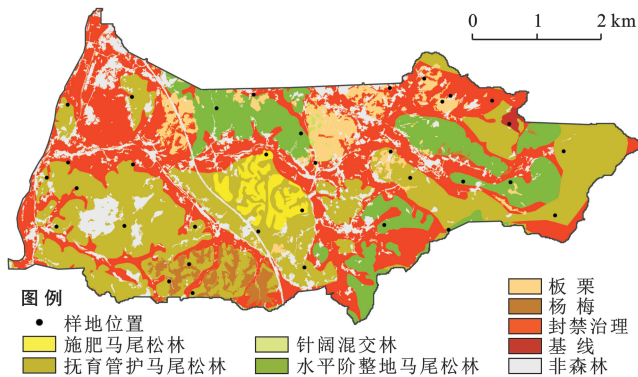


图 1 罗地河小流域土地覆被类型

Fig.1 Land cover types in Luodihe small watershed

2 研究方法

2.1 小流域碳库划分和基线情景确定

2.1.1 小流域碳库的划分 根据罗地河小流域生态系统结构和主要土地利用类型,将其碳库分为植物碳库和土壤碳库 2 个,各碳库的动态分别按照前述的 7 种土地覆被类型进行监测和评价。根据碳汇计量保守性原则,其他土地覆被类型(包括居民点、硬化路面、溪流和农田等),不纳入监测和评价当中。本研究未将施化肥带来的温室气体排放纳入到监测范围。

2.1.2 基线情景 2001 年初,罗地河小流域开始进行综合治理,大部分山地为零散分布的“老头松”,板栗和杨梅果园初具规模。由于属于事后监测,在实地调查的基础上,结合长汀县水土保持治理规划和实施记录,确定以流域内留置的一块未作任何治理的对照地作为基线情景,零散分布马尾松,其面积为 8.60 hm^2 。

2.2 小流域碳汇能力监测评价技术路线

小流域碳汇能力监测评价主要包括数据收集与预处理,野外采样与处理,植被和土壤碳储量建模,植被与土壤碳汇能力评价分析等 4 个环节,其技术路线见图 2。

2.3 数据采集与预处理

2.3.1 野外样地布设与调查采样 按照公里格网、采用系统网格布点方式布设样地,若遇到障碍物就近微调,共布设 34 个样地,其中 26 个马尾松样地(含禁封治理等),5 个板栗样地、2 个杨梅样地(图 1),1 个未治理地(基线情景),样地大小为 20 m×20 m。

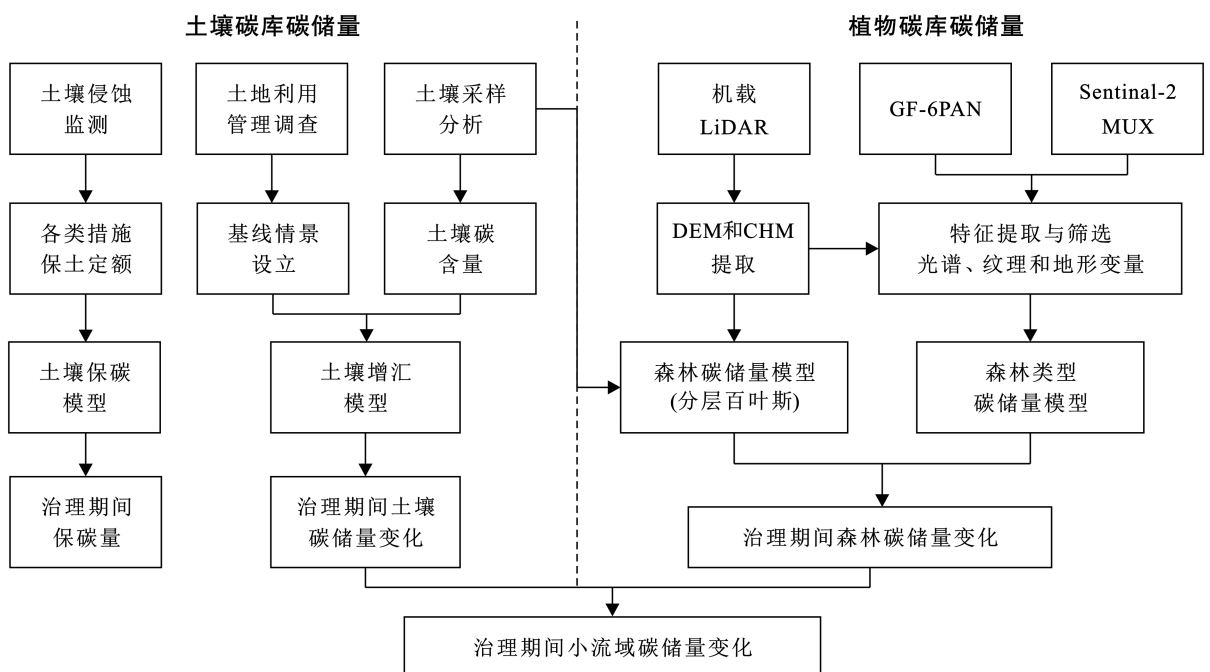


图 2 小流域碳汇监测与核算技术路线图

Fig.2 Technical roadmap for carbon sink monitoring and accounting in small watersheds

野外调查于 2022 年 8 月进行。调查时,对样地进行每木检尺,详细记录单木的树种、胸径以及样地的林龄、郁闭度、种植方式、林况及其他立地因子。胸径和树种,用于单株植被碳储量的核算,其他指标用于遥感碳储量模型的判断和建立。在每个植被样地中,均匀设置 3 个采样点,土壤取样避开施肥穴位,采集 0—20 cm 土样。将 3 个采样点的土样充分混合,采用四分法从中取 200~300 g 带回实验室,放置阴

凉处风干,挑去土壤中的植物根系(<2 mm)及石砾,研磨过 0.150 mm 筛待测。用环刀法测定各土层容重,用重铬酸钾氧化外加加热法测定土壤有机碳。

2.3.2 植物碳库各种治理措施数据提取

(1) 植物碳储量计算模型。采用林分生物量碳计量模型与其含碳率(表 1),通过样地调查的胸径、树种等,计算各株样木的碳储量,累计获得样地碳储量(表 2)。

表 1 生物量模型公式和各树种的含碳系数

Table 1 Biomass model formula and carbon content coefficients of various tree species

树种	生物量计算公式	含碳率	参考文献
马尾松	$W_{\text{地上}} = 482.474\ 450\ 8D^{0.141} \times V$	0.459 6	项佳等 ^[7]
	$V = 0.000\ 219\ 756D^{2.178}$		
	$W_{\text{地下}} = W_{\text{地上}} \times 0.081\ 54D^{0.286\ 46}$		
板栗	树干 $W = 50.054\ 4 \times \ln D - 80.049$	0.479 6	福建省优势树种(组)异速生长方程 ^[8]
	树枝 $W = 18.668\ 3 \times \ln D - 30.525\ 7$		
	树叶 $W = 7.247 \times \ln D - 11.907$		
	根 $W = -22.963 + 14.698 \times \ln D$		
杨梅	$W = 0.010D_{\text{地径}}^{2.995}$	0.4796	彭健健等 ^[9]

表 2 样地调查统计结果

Table 2 Statistical results of sample site survey

治理措施	代码	样本数	平均胸径/cm
施肥马尾松林	FP	2	8.90
抚育管护马尾松林	MP	15	10.86
水平阶整地马尾松林	BP	6	10.08
针阔混交林	LP	—	—
封禁治理	EF	3	10.32
板栗	LC	5	19.18
杨梅	WB	2	4.64
基线情景	CK	1	7.30

(2) 遥感影像收集与处理。研究区属南方丘陵山区,水热同期,下垫面复杂,极难获取同时相、无云朵遮挡的高质量遥感数据。为保证影像一致性和数据质量,同时影像获取时间与地面调查时间间隔内地表覆盖和植被类型未发生重大变化,最终选择了与野外调查时间相近的高分六号(GF-6)及哨兵 2 号(Sentinel-2)两种影像,时间均为 2021 年 2 月 15 日。使用 Gram-Schmidt 方法生成空间分辨率为 2 m 的融合影像;采用 eCognition 软件的多尺度参数评价工具 ESP 确定最优分割尺度为 150,形状和平滑度分别设置为 0.2,0.5。经预处理的融合影像供后续地表覆盖类型分类使用。

(3) 机载激光雷达数据采集与处理。2022 年 10 月初通过直升飞机并搭载 Riegl VUX-240 激光雷达扫描仪^[10]对罗地河全域扫描获得 LiDAR(light

detection and ranging)数据。使用 LiDAR 360 软件处理获得空间分辨率为 1 m 的数字高程模型(digital elevation model, DEM)和冠层高度模型(canopy height model, CHM)。

2.4 植被碳库碳储量评价方法

2.4.1 植被类型分类 基于前述处理后的影像,提取常用的光谱和纹理变量,使用随机森林分类方法进行地表覆盖类型分类^[11-12]。结合实地调查数据和研究目标,地表覆被分为马尾松林(含封禁治理等)、板栗、杨梅和其他利用类型(含居民点、硬化路面、溪流和农田),分类总体精度 92.86%,kappa 系数为 0.91。

2.4.2 2022 年植被碳储量建模 通过样地植被碳储量与遥感变量建立碳储量估测模型。①提取遥感变量。鉴于外业调查样地的大小为 20 m×20 m,通过 1 m 分辨率 CHM,以 20×20 个像素为统计单元,提取样地范围内林木高度的最大值、平均值、标准差、方差和高度百分位数($H_{10}, H_{20} \dots H_{98}$)作为遥感变量;②将野外调查的样地碳储量作为训练样本与样本所在范围提取的 CHM 变量建立逐步回归方程。其中,利用样地碳储量建立逐步回归方程筛选整体变量;根据治理措施(封禁、施肥、抚育管护、水平阶整地和基线情景)和森林类型(马尾松、板栗和杨梅),将训练样本分为 8 组,各自建立逐步回归方程筛选分层变量;③将被选入方程中的变量(整体变量: H_{40}, H_{ME} ;分层变量高度百分位 $H_{20}, H_{30}, H_{50}, H_{98}, H_{std}$)作为建立碳储量模型的变量,建立双因素贝叶斯分层模

型^[10]。采用留一交叉法进行模型的精度验证,模型验证精度超过 84%。用于森林碳储量模型的变量及

模型精度见表 3。上述过程由 R 程序中的 brms 包完成,而 brms 通过调用 Stan 程序完成计算。

表 3 森林碳储量估测模型及精度分析

Table 3 Forest carbon storage estimation model and accuracy analysis

模型	变量	建模 R^2	验证 R^2	RMSE	RMSEr
双因素分层贝叶斯	整体: H_{10}, H_{ME} ; 分层: $H_{20}, H_{30}, H_{50}, H_{98}, H_{std}$	0.94	0.84	5.51 t/hm ²	24.87%

注: H_{ME}, H_{std} 代表平均值、标准差; H_{20}, H_{50}, H_{98} 代表高度百分位数。

2.4.3 2001 年植被层碳储量建模 采用随机森林方法,通过提取 2001, 2022 影像的植被覆盖度产品、地形因子(高程、坡度、坡向)等遥感变量作为变量与 2022 年样地碳储量构建影像碳储量模型。将该模型应用于 2001 年并获取 2001 年植被碳储量空间分布。该过程由 R 程序中的 randomForest 包完成。其中, 2022 年和 2001 年植被覆盖度产品采用 Landsat 影像, 基于 NDVI(normalized difference vegetation index, 归一化植被指数), 使用像元二分模型取 [5%, 95%] 的置信区间计算得到。

2.5 土壤碳库碳储量及保土保碳能力评价方法

2.5.1 基线情景碳密度设定 罗地河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 2001—2022 年土壤碳密度没有变化, 将 2022 年 8 月实测的碳密度作为综合治理项目实施前(2001 年)的土壤碳密度和有机碳含量替代值, 土壤有机碳含量为 5.00 g/kg, 碳密度为 11.35 t/hm²。

2.5.2 2022 年土壤碳储量评价 基于基线情景样地和采样样地, 用反距离加权法, 对土壤碳储量进行空间插值, 获得 2022 年空间分辨率为 20 m 的土壤碳储量空间分布情况。

2.5.3 各种治理措施保土保碳能力评价 小流域综合治理保土保碳是指在实施综合治理后, 流域内各项

治理措施保土效益所巩固和储存的总碳量, 主要体现在小流域所拦储土壤中的有机碳。计算公式如下:

$$C_{S-sw} = \sum_{i=1}^n y_i \times (Q_{ii} \times \omega_{bs}) \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$= \sum_{i=1}^n y_i \times A_i \times (M_{bs} - M_{swi}) \times \omega_{bs} \times 10^{-3}$$

式中: C_{S-sw} 为小流域保土固碳量(t, 以 C 计); y_i 为综合治理运行年数(a); Q_{ii} 为第 i 种水土保持措施保土量(土壤侵蚀减少量, t/a); ω_{bs} 为基线情景土壤有机碳含量(g/kg, 以 C 计); A_i 为第 i 种水土保持措施面积(hm²); M_{swi} 为第 i 种水土保持措施下土壤侵蚀模数[t/(km² · a)]; M_{bs} 为基线情景土壤侵蚀模数[t/(km² · a)]; n 为水土保持措施数量。

通过查阅相关资料(2014—2021 年长汀县游坊小流域径流小区实际观测数据), 结合罗地河小流域的综合治理规划, 推算各种治理措施保土定额, FP, MP, BP, LP, EF, LC 和 WB 的保土定额分别为 52.25 ± 11.84, 52.25 ± 11.84, 51.88 ± 11.87, 51.88 ± 11.87, 52.40 ± 11.81, 52.40 ± 11.81, 52.19 ± 11.85 t/(hm² · a)(表 4)。

3 结果与分析

通过野外调查、遥感提取和水土保持试验观测, 所得土壤碳库、植被碳库和各种治理措施保土保碳能力等的主要数据见表 4。

表 4 罗地河小流域碳汇能力计算参数

Table 4 Calculation parameters of carbon sink capacity in Luodihe small watershed

治理措施	面积/hm ²	保土定额/ (t · hm ⁻² · a ⁻¹)	土壤碳密度/(t · hm ⁻²)		植被碳密度/(t · hm ⁻²)	
			2001 年	2022 年	2001 年	2022 年
FP	43.80	52.25 ± 11.84	11.35	21.84	1.58	16.81
MP	854.72	52.25 ± 11.84	11.35	20.09	1.70	14.87
BP	3.04	51.88 ± 11.87	11.35	16.55	3.62	16.55
LP	360.80	51.88 ± 11.87	11.35	19.45	3.16	17.20
EF	424.72	52.40 ± 11.81	11.35	20.16	4.04	10.10
LC	202.00	52.40 ± 11.81	11.35	20.25	7.81	25.04
WB	99.36	52.19 ± 11.85	11.35	13.61	6.73	5.88
CK	8.60	—	11.35	11.35	0.55	5.39

注: 治理措施代码具体含义见表 2。下同。

3.1 小流域水土保持措施保土保碳能力

2001—2022年,罗地河小流域各项水土保持措施保土保碳量为517.00 t/a(以C计),其中施肥马尾松林,抚育管护马尾松,水平阶整地马尾松林,针阔混交林,板栗,杨梅和封禁治理的保碳量分别为11.39, 222.23, 0.79, 93.81, 52.52, 25.83, 110.43 t/a(以C计),即罗地河小流域各项治理措施年减排量(保土保碳)达517.00 t(以C计)。保土保碳量最大的为抚育管护马尾松林,比例高达42.90%,杨梅和针阔混交林分别占4.50%,0.15%,面积小,保碳效益有限。水土保持措施最基本的功能与效益是减少土壤流失和存续土壤水分,这种保土持水的基本功能既巩固土壤的固碳作用减少排放、提升了土壤的碳汇能力,又为植被提供更好的生长条件、促进了植被的碳汇增量。

3.2 小流域2022年碳密度空间分布

罗地河小流域碳密度空间分布差异较大(图3),主要集中在25~35 t/hm²,高碳密度区域(>65 t/hm²)零星分布,主要以抚育管护马尾松林地和板栗林地为主;低碳密度区域(<20 t/hm²)分布在研究区南部,以杨梅林地为主。植被碳库的碳密度集中在15~35 t/hm²,高碳密度区域(>65 t/hm²)零星分布,主要为抚育管护马尾松林地;低碳密度区域(<5 t/hm²)分布在研究区南部,以杨梅林地为主。0—20 cm土壤碳库碳密度集中在10~30 t/hm²之间,高碳密度区(>30 t/hm²)主要分布东南角及中北部,以抚育管护马尾松林地与板栗林地土壤为主;低碳密度区(<10 t/hm²)主要分布在南部,以杨梅林地土壤为主。

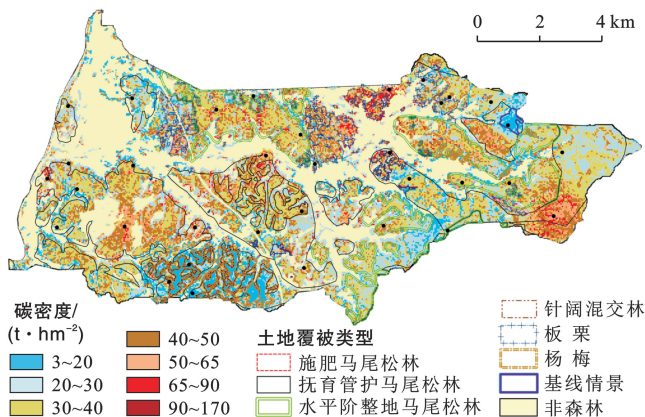


图3 2022年罗地河小流域碳密度

Fig.3 Carbon density of Luodihe small watershed in 2022

3.3 小流域碳密度及碳库变化

2001年罗地河小流域土壤碳密度为11.35 t/hm², 2022年土壤碳密度为19.68 t/hm²,提升了8.33 t/hm²; 2001年植被碳密度为3.33 t/hm², 2022年该值为

14.86 t/hm²,提升了11.53 t/hm²。根据各种治理措施的碳密度计算碳储量发现,土壤碳库2001,2022年分别为 2.27×10^4 , 3.93×10^4 t; 植被碳库分别为 0.66×10^4 , 2.97×10^4 t。土壤碳库均大于同期的植被碳库,说明土壤碳库对小流域碳库容量的贡献较大。

2001—2022年,小流域碳储量由 2.93×10^4 t增加到 6.90×10^4 t,增加了 3.97×10^4 t(图4)。其中土壤碳库增加了 1.66×10^4 t,年均增长率为2.66%,占小流域碳储量增加量的41.81%;植被碳库增加了 2.31×10^4 t,年均增长率为7.39%,占小流域碳储量增加量的58.19%。植被碳储量的年均增长率高于土壤,对提升小流域碳库具有重要作用。

由此可知,在罗地河小流域21 a的综合治理中,土壤碳密度比植被碳密度高,但植被碳库的提升程度高于土壤碳库。

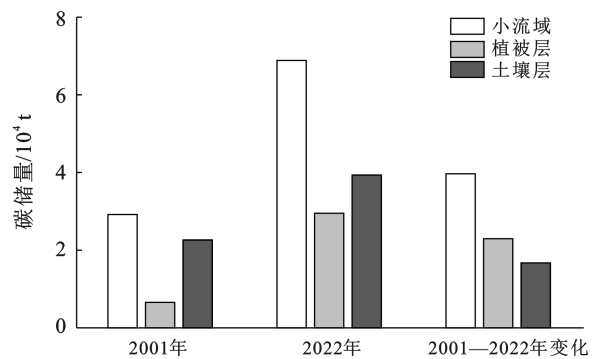


图4 罗地河小流域碳储量变化

Fig.4 Carbon storage changes in Luodihe small watershed

3.4 小流域碳汇能力变化

2001—2022年,罗地河小流域各种治理措施土壤碳密度变化在2.26~10.49 t/hm²,植被碳密度的变化在-0.85~17.23 t/hm²,小流域的碳密度变化在-0.85~26.13 t/hm²,其中板栗和施肥马尾松林的碳密度变化最大,具有较强的固碳能力;杨梅的碳密度变化为负值,主要原因是杨梅被在2019年前后进行了更新。因无法获取更新时的杨梅林的碳储量数据,无法反映杨梅林地碳汇的真实情况,若将小流域内其他治理措施的植被碳密度的平均值作为杨梅林地的植被碳密度,即该小地块的植被碳汇为821.71 t,土壤碳汇为224.55 t,即碳汇量为1046.26 t。碳汇计量以保守、客观为前提,本研究中,杨梅林地的碳汇量不纳入区域总碳汇量中。

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净增加量。相较于基线情景的碳密度变化,土壤的碳密度增加量为2.26~10.49 t/hm²,植被碳密度的增加量为1.22~12.39 t/hm²。根据碳密度增加量和各种治理措施的面积可计算出,小流域土壤碳汇量范围为15.81~7 470.25 t,植被碳汇量范围

为 24.59~7 119.82 t,其中抚育管护马尾松的碳储量最高,主要原因是抚育管护马尾松面积远大于其他治理措施面积。但从碳密度增加量来说,板栗和施肥马尾松林提升了 26.13 t/hm²,25.72 t/hm²,是抚育管护马尾松(21.91 t/hm²)的 1.19 倍和 1.17 倍。由各种治

理措施的碳汇量可推算出小流域总的碳汇量为 3.05 × 10⁴ t(表 5),其中:土壤碳汇量为 1.66 × 10⁴ t,植被碳汇量 1.39 × 10⁴ t,分别占总碳汇量的为 54.43%和 45.57%。这说明土壤增汇量是小流域综合治理碳汇的重要组成部分。

表 5 罗地河小流域碳汇能力变化

Table 5 Changes in carbon sink capacity of Luodihe small watershed

治理措施	面积/hm ²	土壤碳密度增量/ (t·hm ⁻²)	植被碳密度增量/ (t·hm ⁻²)	土壤碳汇量/ (t,以 C 计)	植被碳汇量/ (t,以 C 计)	总碳汇量/ (t,以 C 计)
FP	43.80	10.49	15.23	459.46	455.08	914.54
MP	854.72	8.74	13.17	7 470.25	7 119.82	14 590.07
BP	3.04	5.20	12.93	15.81	24.59	40.40
LP	360.80	8.10	14.04	2 922.48	3 319.36	6 241.84
EF	424.72	8.81	6.06	3 741.78	518.16	4 259.94
WB	99.36	2.26	-0.85	224.55	—	224.55
LC	202.00	8.90	17.23	1 797.80	2 502.78	4 300.58
CK	8.60	0.00	4.84	0.00	0.00	0.00
合计	1 997.04	—	—	16 632.13	13 939.79	30 571.92

4 讨论与结论

4.1 讨论

小流域综合治理各项水土保持措施的持续实施,2001—2022 年罗地河小流域的碳储量显著增加。各治理措施对碳储量增加的贡献不同,这主要是相同区域在气候、水热条件总体一致的小流域范围内,影响贡献大小的主要因素是这一治理措施的面积大小,即在整个小流域所占的比例。本研究中抚育管护马尾松林比例最大(42.90%),保土保碳量 222.23 t/a(以 C 计),碳储量 29 881.01 t 及其增量 18 726.92 t,碳汇量 14 590.07 t 均为最大。而针阔混交林因为所占面积最小,各项指标均小。

长汀县罗地河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一定的空间差异,高碳密度区域零星分布,低碳密度区分布在研究区南部。空间上的差异一方面说明在综合治理的过程中,科学搭配治理措施,能够有效提升小流域的碳汇能力;另一方面罗地河小流域碳汇能力还有巨大的提升空间。从空间分布和监测数据均发现板栗林(LC)和施肥马尾松林(FP)具有较强的固碳能力和较高的固碳效率,表明实施整地、造林、配以施肥养育措施的林地碳汇效应更加显著。因此,在今后推行水土保持增汇行动、优化治理措施结构时,可适当扩大 LC 和 FP 的比例及其措施比例,进一步提升小流域碳汇能力和速率。在优化和提升植被措施时,应科学实施工程整地和施用有机肥,可更有效的巩固小流域碳汇作用、提升小流域增汇能力。

4.2 结论

通过监测 2001—2022 年罗地河小流域土壤碳库和植被碳库的碳储量变化,分析评价了水土流失综合治理的碳汇效益。

(1) 水土保持治理措施保土持水的基本功能有益于固碳作用和提升碳汇增量。罗地河小流域抚育管护马尾松林比例最大(42.90%),与之一致的土壤和植被碳储量及其增量均为最大,对小流域碳汇量贡献亦最大。小流域各项水治理措施年减排量达 517 t。

(2) 2001—2022 年,小流域碳储量增加 3.97 × 10⁴ t,其中植被和土壤碳储量贡献分别为 58.02%,41.98%。相较于基线情景,小流域产生的碳汇量为 3.05 × 10⁴ t,土壤和植被贡献分别为 54.43%,45.57%。水土流失综合治理提升了植被和土壤两个碳库的碳储量,具有显著的碳累积作用,土壤增汇成为水土流失严重小流域碳汇的重要途径和碳储量的重要组成。

(3) 小流域碳储量的空间分布与水土保持措施分布密切相关。植被的高碳密度区域主要为抚育管护马尾松林地、土壤的高碳密度区域主要为板栗林地和抚育管护马尾松林地,二者的低碳密度区域均主要为杨梅林地。

(4) 在 7 种治理措施中,板栗林(LC)和施肥马尾松林(FP)的土壤具有较强的固碳能力和较高的固碳效率,碳密度分别提升 26.13,25.72 t/hm²,提升幅度达 199.01%和 136.41%。

(5) 本研究以罗地河小流域为例,通过基线选择、碳层划分、实地监测和碳储量建模,评估了 21 a 连续综合治理小流域产生的碳汇量,可为其他水土保

持碳汇项目提供技术和方法支撑。在借鉴罗地河小流域的评估方法时,应根据水土保持项目的水土流失治理、措施实施等具体情况,综合考虑选择基线和划分分层^[13-15],选择合适的方法(遥感、实测等),监测、评价和计量碳汇量^[16]。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 肖胜生,方少文,杨洁,等.水土流失区植被恢复过程中土壤碳汇的形成机理[J].中国水土保持,2011(12):25-28.
- [3] 赵敏,周广胜.中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因素分析[J].地理科学,2004,24(1):50-54.
- [4] 胡会峰,王志恒,刘国华,等.中国主要灌丛植被碳储量[J].植物生态学报,2006,30(4):539-544.
- [5] 李智广,成辉,刘朱婷,等.广东省 2021 年新增水土保持措施碳汇能力评估[J].中国水土保持,2023(3):1-5.
- [6] 陈志彪,朱鹤健,肖海燕,等.水土流失治理后的花岗岩侵蚀地植物群落特征[J].福建师范大学学报(自然科学版),2005,21(4):97-102.
- [7] 项佳,余坤勇,陈善沐,等.长汀红壤侵蚀区马尾松林生物量估算模型的构建[J].东北林业大学学报,2019,47(5):

58-65.

- [8] 张煜星,闫宏伟,黄国胜,等.森林资源连续清查技术规程:GB/T38590-2020[S].北京:国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会,2020.
- [9] 彭健健,王增,张勇,等.杨梅人工林相容性单株生物量模型构建[J].浙江农林大学学报,2022,39(2):272-279.
- [10] 国务院.国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知:国发[2021]23 号[R].2022 年 10 月 24 日.
- [11] 蒋先蝶.基于多源高分辨率数据的亚热带森林精细分类及生物量估测研究[D].浙江 杭州:浙江农林大学,2020.
- [12] 林文科,陆亚刚,蒋先蝶,等.协同多源遥感数据的北亚热带森林蓄积量贝叶斯分层估测[J].遥感学报,2022,26(3):468-479.
- [13] 陆日,王晨,陈烨,等.红树林保护碳汇项目碳信用计量方法:以深圳市福田区红树林保护区为例[J].林业科学,2023,59(3):44-53.
- [14] 刘欢,武曙红,于天飞.森林保护碳汇项目方法学研究[J].世界林业研究,2018,31(5):7-12.
- [15] 袁传武,张华,张家来,等.武汉市江夏区碳汇造林基线碳储量的计量[J].中南林业科技大学学报,2010(2):10-15.
- [16] 刘欢.我国森林保护碳汇项目方法学研究及案例分析[D].北京:北京林业大学,2023.

(上接第 303 页)

- [13] 夏四友,杨宇.基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区[J].地理学报,2022,77(3):679-696.
- [14] Marchi M, Jørgensen S E, Pulselli F M, et al. Modelling the carbon cycle of Siena Province (Tuscany, Central Italy) [J]. Ecological Modelling, 2012,225:40-60.
- [15] Liu Jinxun, Vogelmann J E, Zhu Zhiliang, et al. Estimating California ecosystem carbon change using process model and land cover disturbance data: 1951—2000 [J]. Ecological Modelling, 2011,222(14):2333-2341.
- [16] 蓝家程,傅瓦利,袁波,等.重庆市不同土地利用碳排放及碳足迹分析[J].水土保持学报,2012,26(1):146-150.
- [17] Jo H K. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for Middle Korea [J]. Journal of Environmental Management, 2002,64(2):115-126.
- [18] 易丹,欧名豪,郭杰,等.土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J].资源科学,2022,44(8):1545-1559.
- [19] 李经路,曾天.基于 Kaya 方法的云南碳排放因素分析[J].科技管理研究,2016,36(19):260-266.
- [20] 李经路,李晓玲.云南碳排放的变动趋势与影响因素研究[J].环境与可持续发展,2015,40(5):172-176.

- [21] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学(D 辑:地球科学),2007,37(6):804-812.
- [22] 肖红艳,袁兴中,李波,等.土地利用变化碳排放效应研究:以重庆市为例[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2012,29(1):38-42.
- [23] 李彦旻,沈育生,王世航.基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J].水土保持学报,2022,36(1):182-188.
- [24] 彭文甫,周介铭,徐新良,等.基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局[J].生态学报,2016,36(22):7244-7259.
- [25] 刘畅,祁毅,姚红,等.新时代背景下生态承载力研究要义与优化对策探讨[J].生态经济,2020,36(6):173-180.
- [26] 许锋.基于 Moran 指数和谱图论的空间自相关测度方法优化[J].城市发展研究,2021,28(12):92-101.
- [27] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- [28] 吾买尔艾力·艾买提卡力,阿巴拜克热·艾买提卡力,范昕,等.2000—2018 年环鄱阳湖生态城市群碳排放时空分异规律及影响因素分析[J].生态经济,2021,37(6):51-57.