

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.03.009

CSTR:32310.14.stbcb.2026.03.009

赵利祥,李东耀,宋艳敏,等.丹江口小流域水土保持造林碳储量及空间分异特征[J].水土保持学报,2026,40(3):278-287.

ZHAO Lixiang, LI Dongyao, SONG Yantun, et al. Carbon storage and spatial differentiation of soil and water conservation afforestation in Danjiangkou small watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3): 278-287.

丹江口小流域水土保持造林碳储量及空间分异特征

赵利祥¹, 李东耀¹, 宋艳敏¹, 杨伟², 李海燕³, 郭忠录¹

(1.华中农业大学资源与环境学院,武汉430070; 2.湖北省水利水电科学研究院,武汉430070; 3.丹江口市水利与湖泊局,湖北丹江口442700)

摘要: [目的] 评估荒山造林与退耕还林2种水土保持造林方式的碳储量能力,为丹江口水库入库炭沟河小流域碳汇型造林模式优化提供科学依据。[方法] 以炭沟河小流域为研究区,通过实地监测乔木、灌草、枯落物及土壤碳密度,结合遥感与数字高程模型,分析不同造林模式下碳储量及其空间格局。[结果] 1) 荒山造林的碳密度(52.13~107.10 t/hm²)和碳储量(9.50万~57.12万t)均显著高于退耕还林(50.27~62.89 t/hm²和1.61万~8.66万t),其中荒山造林中阔叶混交林碳密度最高(107.10 t/hm²),针叶林碳储量最大(57.12万t); 2) 阔叶类乔木碳密度(5.93~108.66 t/hm²)显著高于针叶类(8.56~22.70 t/hm²),且土壤碳库是生态系统碳储量的主要贡献者; 3) 碳密度空间分布具有显著地形梯度效应,随海拔升高而增加,随坡度增大而降低(退耕还林区域坡度影响不显著)。[结论] 荒山造林(特别是针叶林与阔叶混交林)显著提升流域碳储量,其空间分布受地形因子调控。未来流域管理应统筹造林模式、植被配置及地形驱动的空间格局,以实现水土保持与碳汇功能的协同提升。

关键词: 水土保持造林; 碳密度; 碳储量; 空间分布; 地形梯度

中图分类号: S157.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2026)03-0278-10

Carbon Storage and Spatial Differentiation of Soil and Water Conservation Afforestation in Danjiangkou Small Watershed

ZHAO Lixiang¹, LI Dongyao¹, SONG Yantun¹, YANG Wei², LI Haiyan³, GUO Zhonglu¹

(1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Water Resources Research Institute, Wuhan 430070, China; 3. Danjiangkou Water Resources and Lakes Bureau, Danjiangkou, Hubei 442700, China)

Abstract: [Objective] This study aims to evaluate the carbon storage capacity of two soil and water conservation afforestation methods, namely barren land afforestation and the "Grain for Green" project, and to provide a scientific basis for optimizing carbon-sink afforestation models in the Tangou River small watershed, a tributary of the Danjiangkou Reservoir. [Methods] The Tangou River watershed was selected as the study area, and carbon storage and its spatial pattern under different afforestation models were analyzed by integrating field monitoring of carbon density in trees, shrubs, herbs, litter, and soil with remote sensing data and digital elevation models. [Results] 1) Both carbon density (52.13–107.10 t/hm²) and carbon storage (95 000–571 200 t) of barren land afforestation were significantly higher than those of the "Grain for Green" project (50.27–62.89 t/hm²; 16 100–86 600 t). Among barren land afforestation types, broadleaf mixed forests exhibited the highest carbon density (107.10 t/hm²), whereas coniferous forests showed the largest carbon storage (571 200 t). 2) Carbon density of broadleaf trees (5.93–108.66 t/hm²) was significantly higher than that of coniferous trees (8.56–22.70 t/hm²), and the soil carbon pool was the main contributor to ecosystem carbon storage. 3) The spatial distribution of

收稿日期: 2025-10-22

修回日期: 2025-11-30

录用日期: 2025-12-15

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-01-29

资助项目: 国家自然科学基金项目(42477354)

第一作者: 赵利祥(1998—),男,博士研究生,主要从事水土保持与生态效益评估研究。E-mail: lixiangzhao1102@163.com

通信作者: 郭忠录(1980—),男,博士,教授,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zgzhongzau@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

carbon density showed significant topographic gradient effects, increasing with elevation and decreasing with slope gradient, whereas the influence of slope was not significant in "Grain for Green" areas. [Conclusion] Barren land afforestation, particularly coniferous and broadleaf mixed forests, significantly enhances watershed carbon storage, and its spatial distribution is regulated by topographic factors. Future watershed management should coordinate afforestation models, vegetation configuration, and terrain-driven spatial patterns to achieve synergistic improvements in soil and water conservation and carbon-sink functions.

Keywords: soil and water conservation afforestation; carbon density; carbon storage; spatial distribution; topographic gradient

Received: 2025-10-22

Revised: 2025-11-30

Accepted: 2025-12-15

Online(www.cnki.net): 2026-01-29

森林作为陆地生态系统的重要组成部分,其碳汇功能在缓解气候变化中具有关键作用。森林生态系统通过光合作用固存二氧化碳,将碳以生物量和土壤有机碳的形式储存,是减缓全球变暖关键的自然解决方案。丹江口水库作为南水北调中线工程的核心水源地,其生态环境的优劣直接关系到引水安全和区域生态安全^[1]。水土保持造林通过提升植被覆盖、减少水土流失,不仅改善土壤结构,也增强区域碳储量能力。

随着国家“双碳”战略的深入实施,水土保持于2023年纳入国家标准委等部门发布的《碳达峰碳中和标准体系建设指南》。李智广等^[2]参考区域尺度碳汇监测方法,结合水土保持实情提出了水土保持碳汇能力评估指标体系,为落实水土保持国家碳汇核算规范提供了技术支撑。不同区域的学者和管理者立足区域水土保持措施特点,钟小剑等^[3]对福建长汀罗地河小流域7种治理措施的碳储量及碳汇能力进行监测评价,并提出了优化治理措施推动水土保持增汇的路径;高春泥等^[4]测算了长江上游九省的水土保持林和经果林草林的碳汇量及碳汇量变化,并刻画了各林种类型的净碳储量变化趋势;丁禹等^[5]则结合贵州省水土保持措施类型,分工程、林草和耕作措施对碳汇能力进行测算。

荒山荒坡造林和退耕还林是丹江口库区重要的水土保持措施^[1]。荒山造林通过快速恢复植被覆盖,增强土壤抗侵蚀能力;退耕还林则将坡耕地转为林地,减少农业扰动,促进生态恢复^[6-7]。这2种措施在控制水土流失的同时,通过植被和土壤的物理化学作用固定大气中的二氧化碳,展现出显著的碳固定潜力^[8]。然而,小流域尺度下碳储量的空间分布受地形和人为活动的强烈影响,高海拔区域可能因人为干扰弱更利于碳积累,陡坡区则因水土流失导致碳损失风险升高^[9-10]。不同造林方式和植被类型的碳储量的贡献及其空间响应机制尚待系统化^[11-12]。

本研究以丹江口水库流域为对象,通过样方调查与空间分析,系统评估荒山造林和退耕还林的碳储量能力,解析碳密度空间格局与地形因子的关系,以期流域水土保持与碳汇协同管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

炭沟河流域(32°14'10"~32°58'10"N,110°47'53"~111°34'47"E)地处秦岭山系武当山隆起与大横余脉之间,处于丹江口水库北侧,面积约为2750 hm²(图1)。海拔240~935 m,属汉江北岸丘陵山岗地。多年平均日照总时长1933 h,多年平均气温15.6℃,多年平均降雨量为797.6 mm。该流域内地质构造活动性比较强烈,岩体以泥质岩、红砂岩等为主,土壤以黄棕壤为主。土地利用主要为林地和耕地。炭沟河流域水土保持造林总面积为2143.52 hm²,主要为水土保持造林,其包含荒山造林(1969.37 hm²)和退耕还林(174.15 hm²)2个类型(表1)。



图1 炭沟河流域样方分布

Fig.1 Distribution of sample plots in Tangou River watershed

表1 不同水土保持造林方式各植被类型面积

Table 1 Area of vegetation types under different soil and water conservation afforestation methods km²

造林方式	类型	面积
荒山造林	针叶林	844.47
	栎树类	185.98
	阔叶林	83.43
	阔叶混交林	633.58
	灌木	211.91
退耕还林	针叶林	143.72
	灌木	30.43

1.2 研究方法

1.2.1 植被与土壤碳密度调查 根据研究区土地利用现状和林业“林地一张图”数据,采用均匀分布和代表性原则,共布设32个样方,其中20 m×20 m乔木样方24个(荒山造林20个,退耕还林4个)。荒山造林包括栎树类(6个)、阔叶混交林(5个)、针叶林(5个)、阔叶林(4个),退耕还林包括针叶林(4个)。此外,还分别在荒山造林和退耕还林各布设4个10 m×10 m的灌木样方(图2)。所有样方边缘距地块边界≥10 m,并记录各样方地理坐标、海拔、土壤类型等基础信息。

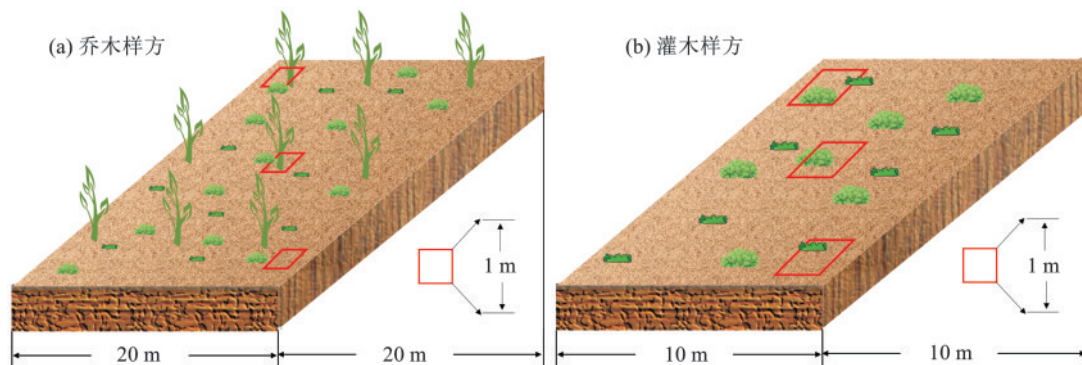


图2 样方布设及采样空间分布

Fig.2 Layout of sample plots and spatial distribution of sampling

1.2.2 碳储量计算模型 乔木碳密度基于《主要树种立木生物量模型与碳计量参数》(GB/T 43648—2024)^[17],结合实测数据构建乔木生物量估算模型(表2)。灌木、枯落物及灌木碳密度通过实验室测定各部位碳含量计算。土壤碳密度通过测定不同土层有机碳含量获得。水土保持造林碳储量(C)由各碳层碳密度(L_i)与面积(S_i)之积计算公式为:

$$C = \sum_{i=1}^n L_i \times S_i \quad (1)$$

式中: C 为水土保持造林碳储量,t; L_i 为各植被类型碳密度,t; S_i 为各碳层面积,t。

$$L_i = V_i + Shr_i + Lit_i + Soil_i \quad (2)$$

试验于2024年8月21日至9月3日开展。乔木样方测量胸径(DBH)和树高(H),采用对角线采样法收获3个1 m×1 m子区域的灌草和枯落物;灌木样方收获地上部分鲜重。植物样品按器官(茎、叶、枝)分采,测定含水量(烘干法)^[13]和有机碳含量(重铬酸钾-外加热法)^[14]。土壤采样遵循《森林土壤调查技术规范》(LY/T 2250—2014)^[15]和《土壤质量 自然、近自然及耕作土壤调查程序指南》(GB/T 36393—2018)^[16],每样方沿对角线设置3个采样点,采集0~10、10~20 cm土层样品,测定土壤体积质量、含水量及有机碳含量。本研究聚焦水土保持造林对土壤表层碳库的直接影响,且研究区土层普遍较薄,故选择0~20 cm作为代表性采样深度。

本研究区的水土保持造林工程主要于2000年前后实施。由于历史数据缺失,详细的土地利用历史难以精确追溯,本研究使用“林地一张图”中“小班(属性为30)”作为退耕还林地块。荒山造林地块多为长期未耕作的荒山坡,退耕还林地块前期用地类型为坡耕地。各林型优势树种为:针叶林以柏木为主;栎树类以麻栎、栓皮栎为主;阔叶林以杨树为主;阔叶混交林为栎树、刺槐、榆树、化香、泡桐等的混交;灌木林则以盐肤木、润楠、毛丹麻秆为主。

式中: V_i 为植被碳密度,t/hm²; Shr_i 为灌木碳密度,t/hm²; Lit_i 为枯落物碳密度,t/hm²; $Soil_i$ 为土壤碳密度,t/hm²。

1.2.3 空间分布特征分析 基于样方调查获得的碳密度数据(总碳密度、土壤碳密度和植被碳密度)和对应样方中心点的地理坐标,利用ArcGIS Pro 2.5.2软件进行IDW空间插值生成流域水土保持造林碳密度空间分布图。需要指出的是,研究区下垫面空间异质性高,基于有限样点的空间插值结果存在不确定性,其主要目的在于直观展示碳密度空间分布的宏观趋势。同时,借助R Studio平台的“Ggally”包,

基于 32 个实地样方的观测数据与其对应位置的地形属性 (DEM 和坡度), 结合造林方式进行相关性分析, 以探究地形地貌对碳密度格局的影响。

研究区下垫面属性空间异质性较高, 而野外调查的样点数量有限, 因此基于反距离权重法 (IDW) 得到的碳密度空间分布存在一定的不确定性, 其主

要目的在于直观展示碳密度空间分布的宏观趋势, 而非精确量化每个位置的具体数值。本研究中, 地形因子与碳密度的相关性分析 (图 8) 主要基于 32 个实地样方的观测数据与其对应位置的地形属性 (DEM、坡度) 进行, 该分析结果相对独立于空间插值过程, 旨在从统计上揭示变量间的关系。

表 2 炭沟河流域主要乔木树种生物量模型和含碳系数

Table 2 Biomass models and carbon content coefficients of major tree species in Tangou River watershed

树种	胸径 (D)/cm	地上生物量模型	地下生物量模型	含碳系数	样方数量
柏木	$D \geq 5$	$MA = 0.100 14D^{1.915} H^{0.615}$	$MB = 0.035 179D^{1.767} H^{0.642}$	0.48	9
柏木	$D < 5$	$MA = 0.120 88D^{1.798} H^{0.615}$	$MB = 0.042 467D^{1.650} H^{0.642}$	0.48	
栎树	$D \geq 5$	$MA = 0.131 88D^{1.829} H^{0.711}$	$MB = 0.114 600D^{2.092} H^{-0.052}$	0.48	6
栎树	$D < 5$	$MA = 0.154 44D^{1.730} H^{0.711}$	$MB = 0.053 436D^{2.566} H^{-0.052}$	0.48	
杨树	$D \geq 5$	$MA = 0.029 33D^{2.276} H^{0.592}$	$MB = 0.011 477D^{2.462} H^{0.085}$	0.47	4
杨树	$D < 5$	$MA = 0.098 37D^{1.524} H^{0.591}$	$MB = 0.059 655D^{1.438} H^{0.085}$	0.47	
榆树	$D < 5$	$MA = 0.102 66D^{1.985} H^{0.491}$	$MB = 0.043 234D^{2.060} H^{0.337}$	0.45	
刺槐	—	$MA = 0.202 2D^{2.333}$	$MB = 0.059 9D^{2.16}$	0.48	
泡桐	—	$MA = 0.071 1D^{2.333}$	$MB = 0.059 9D^{2.16}$	0.47	
樟树	—	$MA = 0.138 0D^{2.333}$	$MB = 0.059 9D^{2.16}$	0.49	5
其他硬阔类	—	$MA = 0.187 5D^{2.333}$	$MB = 0.059 9D^{2.16}$	0.48	
其他软阔类	—	$MA = 0.132 9D^{2.333}$	$MB = 0.059 9D^{2.16}$	0.50	

注: 数据来源《主要树种立木生物量模型与碳计量参数》(GB/T 43648—2024)^[17]。

2 结果与分析

2.1 植被及枯落物碳密度

由图 3 可知, 不同植被类型各层次碳密度存在差异, 阔叶类乔木 (栎树类、阔叶林和阔叶混交林) 的树木碳密度为 5.93~108.66 t/hm², 明显高于针叶林的 8.56~22.70 t/hm², 其中荒山造林-阔叶林的树木碳密度最高, 达 46.07 t/hm², 而退耕还林类和荒山造林类针叶林的碳密度差异较小, 栎树类、阔叶林和阔叶混交林的碳密度变化较大。相比之下, 灌草碳密度相对

变化较小, 退耕还林-栎树类的灌草碳密度最大 (7.05 t/hm²), 荒山造林-阔叶类的灌草碳密度最小 (6.15 t/hm²)。枯落物碳密度差异明显, 荒山造林-阔叶类的枯落物碳密度最高 (3.50 t/hm²), 阔叶混交林的枯落物碳密度最低 (2.79 t/hm²)。此外, 灌木样方碳密度要远小于乔木林下的灌草碳密度, 且不同造林方式的灌木碳密度变化不大。总之, 不同植被类型各空间层次的碳密度存在显著差异, 阔叶类植被在乔木碳密度方面表现突出, 灌草和枯落物碳密度也有明显变化, 而灌木样方碳密度相对较低且变化不大。

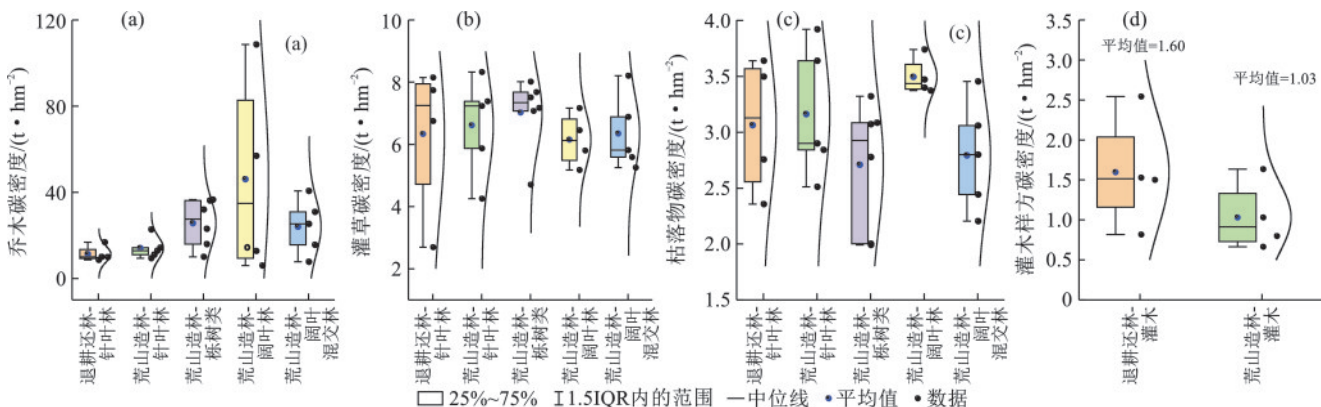


图 3 不同造林方式各植被类型空间层次碳密度

Fig.3 Carbon density at different spatial levels of vegetation types under different afforestation methods

2.2 土壤碳密度

由图 4 可知,在相同植被类型下,荒山造林的土壤碳密度普遍高于退耕还林,且不受土层变化影响。荒山造林-针叶林的土壤碳密度最大,平均为 76.45 t/hm^2 ;而退耕还林-针叶林的土壤碳密度最小,平均仅为 42.17 t/hm^2 。退耕还林类型中,针叶林土壤碳密

度要小于灌木;而荒山造林类型中则出现相反的趋势。荒山造林类型中,栎树类的平均土壤碳密度为 58.53 t/hm^2 ,阔叶混交林和阔叶林的平均土壤碳密度分别为 51.55 、 51.38 t/hm^2 。此外,土壤碳密度在不同植被类型和土壤层次之间差异明显,荒山造林的土壤碳密度整体优于退耕还林。

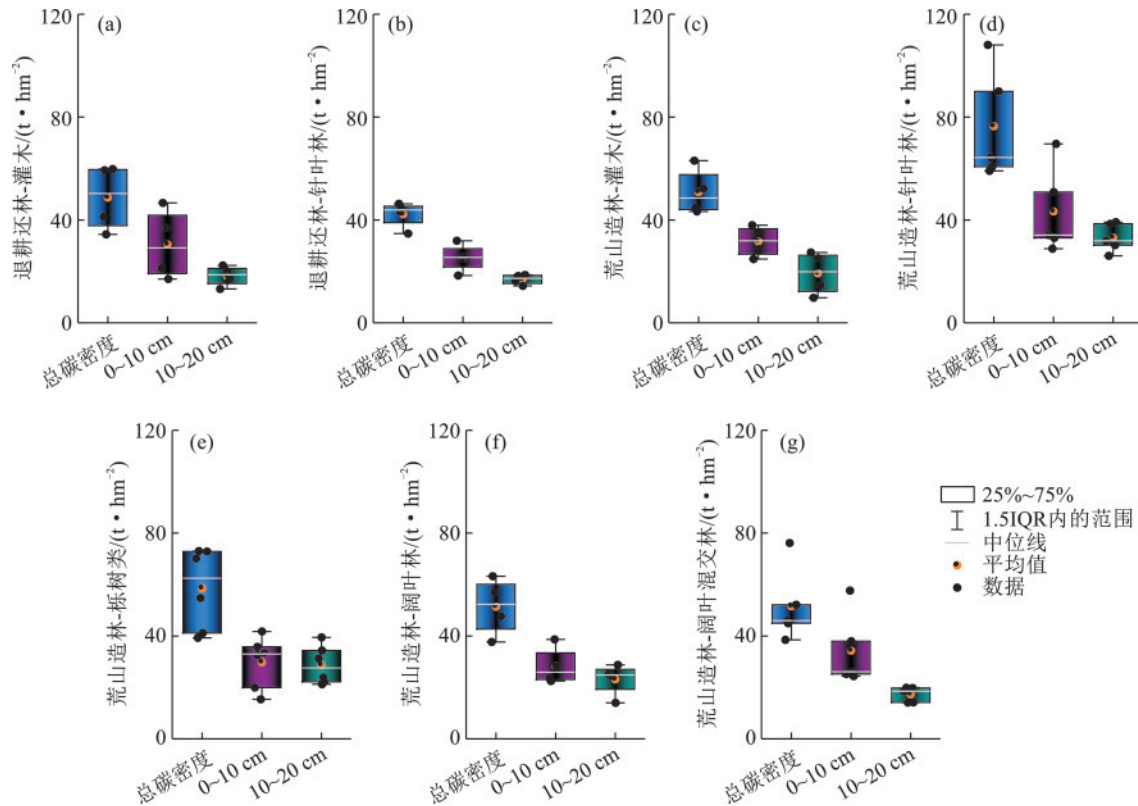


图 4 不同造林方式各植被类型土壤碳密度

Fig.4 Soil carbon density of vegetation types under different afforestation methods

2.3 碳储量分析

基于植被和土壤碳密度,进一步探究水土保持造林碳密度和碳储量变化特征。由图 5 可知,流域内不同造林方式及植被类型的碳密度和碳储量。整体来看,荒山造林的碳密度和碳储量均显著高于退耕还林,荒山造林的平均碳密度(87.82 t/hm^2)较退耕还林(56.58 t/hm^2)高 58.94% 。具体而言,从碳密度来看,退耕还林-针叶林的碳密度最高,为 62.89 t/hm^2 ,退耕还林-灌木的碳密度为 50.27 t/hm^2 ;而荒山造林的植被类型中,阔叶林的碳密度最高,达 107.10 t/hm^2 ,针叶林为 100.26 t/hm^2 ,栎树类为 93.90 t/hm^2 ,阔叶混交林为 84.73 t/hm^2 ,灌木为 52.13 t/hm^2 。从碳储量来看,荒山造林的针叶林碳储量最高,达 57.12 万 t ,退耕还林的针叶林和灌木的碳储量相对较低,分别为 8.66 万 、 1.61 万 t ,荒山造林的栎树类、阔叶林、阔叶混交林、灌木的碳储量依次为 9.50 万 、 10.01 万 、 20.50 万 、 20.44 万 t 。荒山

造林总碳储量达 117.57 万 t ,占流域水土保持造林总碳储量的 91.96% ,其中针叶林对总碳储量的贡献最大,占比为 44.68% 。总之,荒山造林的碳储存能力均优于退耕还林,针叶林和阔叶混交林是碳储量的重要贡献者。

2.4 植被及碳密度空间分布特征

由图 6 可知,炭沟河流域的水土保持林工程以荒山造林为主要形式,并辅以退耕还林。空间上,这 2 种造林方式分布迥异,荒山造林地块集中分布于流域北侧的高地,而退耕还林地块则主要位于流域南侧相对平缓的区域。该分布格局与流域“北高南低”的地形特征高度吻合,即造林方式的区域与原始地形条件密切相关。由图 7 可知,本流域碳密度空间异质性显著。总碳密度和土壤碳密度空间分布相对一致,植被碳密度呈东侧高,西侧低的分布格局。

进一步的相关性分析揭示地形因子与碳密度之

间的关系(图 8)。海拔与总碳密度、土壤碳密度和植被碳密度均呈显著正相关($p < 0.01$),而坡度与碳密度的关系依赖于造林方式。在整个流域上,坡度与

总碳密度、土壤碳密度及植被碳密度均呈显著负相关($p < 0.01$)。但值得注意的是,在退耕还林区域,坡度与碳密度却呈显著正相关($p < 0.01$)。

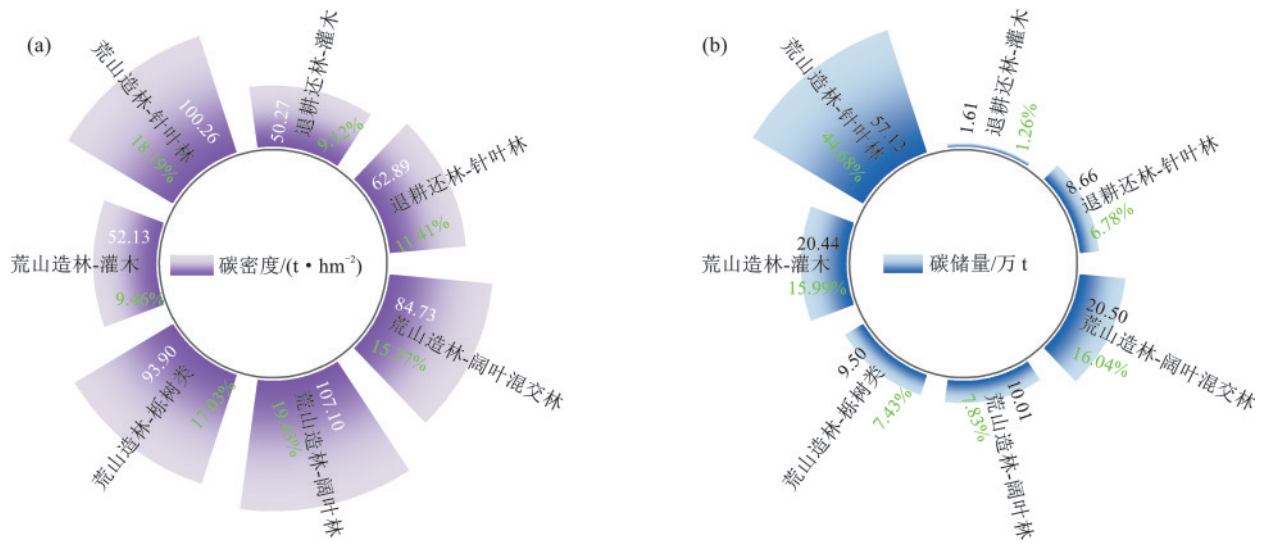


图 5 各碳层生态系统碳密度及碳储量
Fig.5 Ecosystem carbon density and carbon storage of different carbon layers

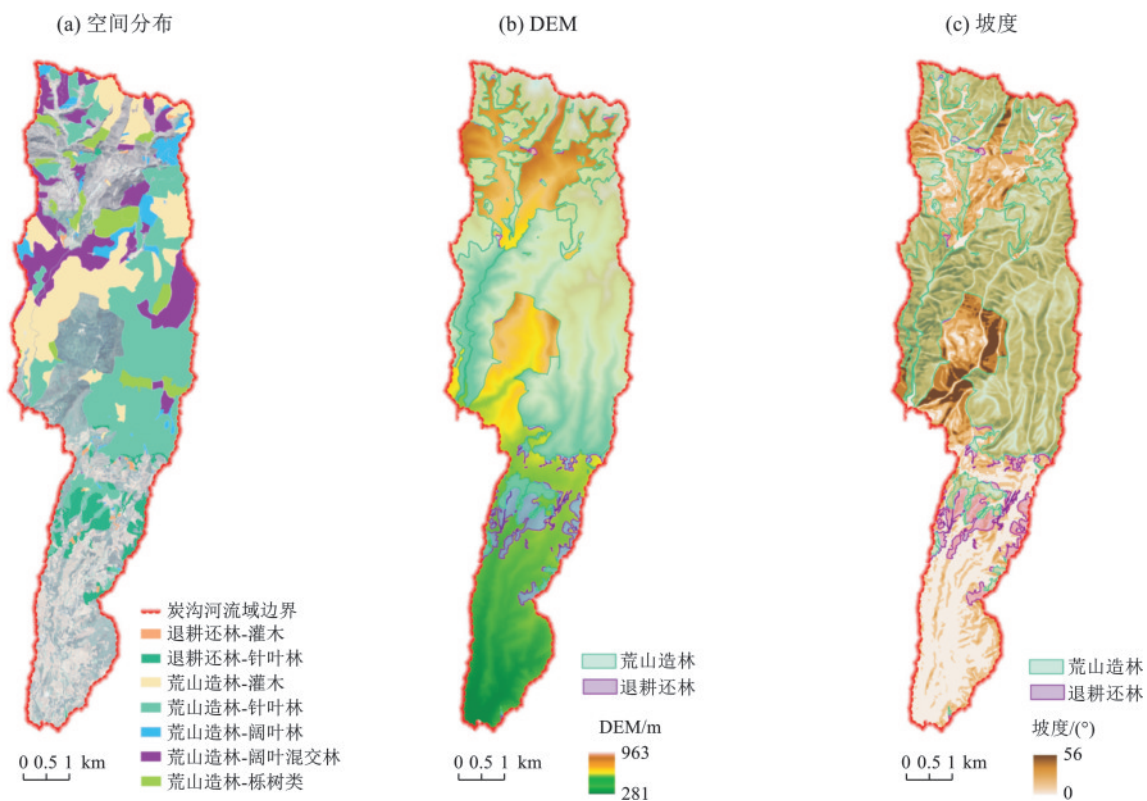


图 6 炭沟河流域各植被类型的空间分布、DEM 和坡度
Fig.6 Spatial distribution of vegetation types, DEM, and slope in Tangou River watershed

3 讨论

本研究系统评估了丹江口库区炭沟河小流域 2 种主要水土保持造林方式的碳储能力,并揭示其空间分异特征。与许多关注单一碳库或大尺度格局的研究不同,本研究尝试在异质性强烈的山地小流域尺度上,将

碳分配格局与地形因子、造林方式及植被类型进行关联整合分析。本研究结果不仅证实荒山造林在碳汇能力上的优势,更重要的是,揭示人为管理背景可以根本性地改变地形因子(尤其是坡度)对碳固存的效应,为精细化、分区化的碳汇型流域管理提供新的科学依据。

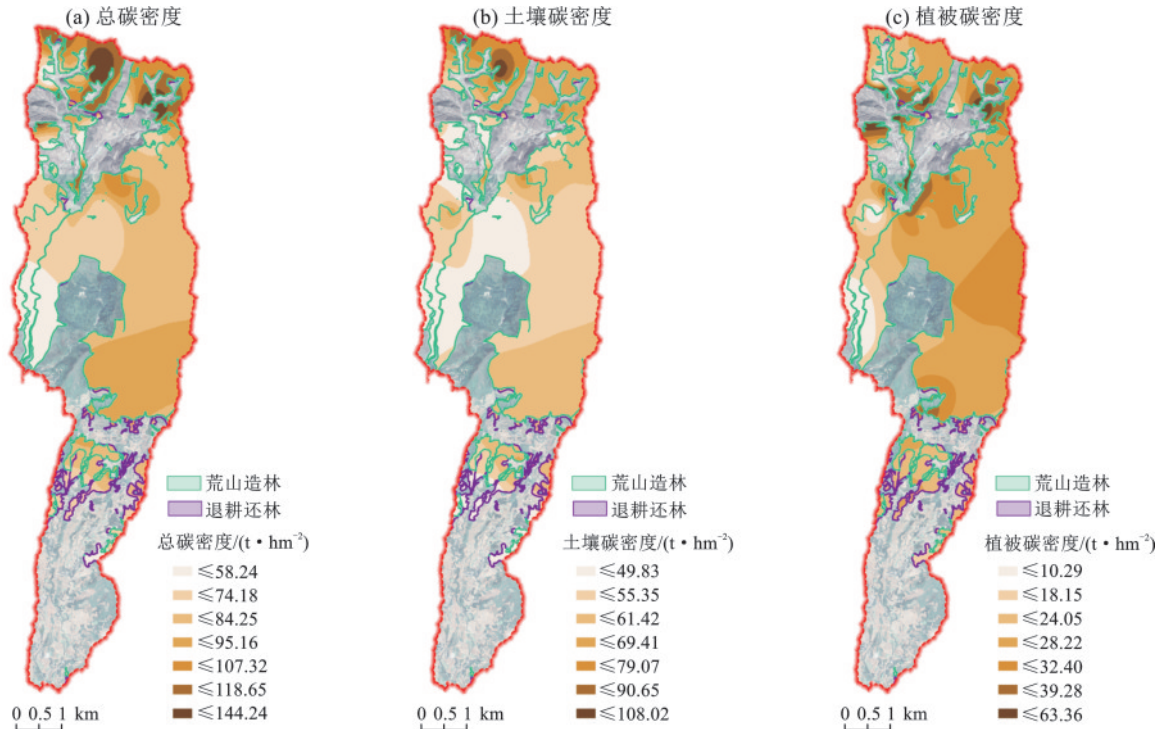
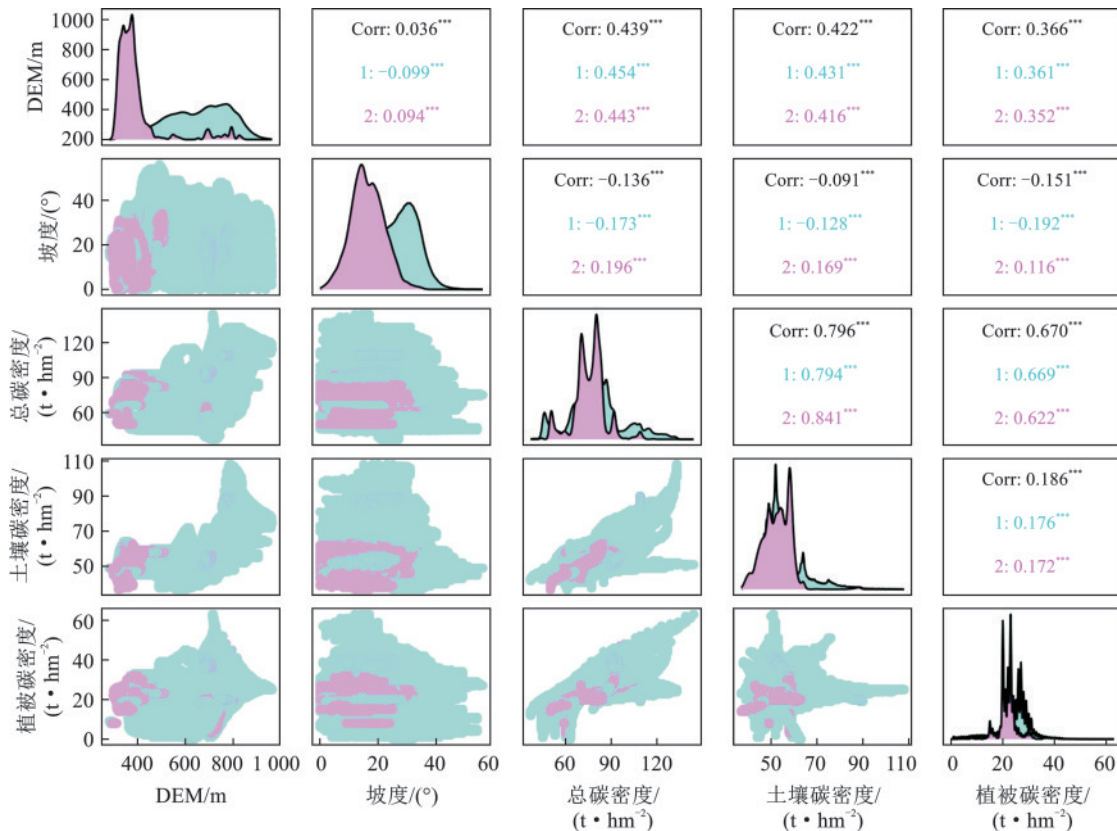


图 7 炭沟河流域总碳密度、土壤碳密度和植被碳密度的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of total carbon density, soil carbon density, and vegetation carbon density in Tangou River watershed



注: 1为荒山造林; 2为退耕还林; ***表示 $p < 0.01$ 。

图 8 水土保持造林方式与碳密度相关性分析

Fig.8 Correlation analysis between soil and water conservation afforestation methods and carbon density

3.1 土壤碳库稳定性的核心作用

本研究发现, 荒山造林的生态系统碳密度与碳储量均显著高于退耕还林(图 5), 此差异主要源于土壤

碳库的巨大贡献(图 4)。其核心机制在于 2 种造林方式初始土地利用历史所决定的人为扰动强度存在本质差异。荒山造林实施于未开垦或长期撂荒的土地,

其土壤生态系统长期未受剧烈扰动,有机质得以相对稳定地积累和存留^[18-19]。相比之下,退耕还林的前身为坡耕地,长期的耕作活动不仅破坏了土壤团聚体结构,还加速原有土壤有机碳的矿化分解,导致土壤碳库出现严重耗竭^[20-21]。尽管退耕后植被得以恢复,但土壤碳库的恢复是一个滞后且缓慢的生态过程^[22-23]。因此,退耕还林区较低的土壤碳密度在很大程度上反映其历史扰动造成的“碳债”,与前人^[24-25]关于土地利用历史对土壤碳长期影响的结论一致。此发现强调,在评估造林工程的碳汇潜力时,必须考虑其本底条件与历史扰动,对于准确预测其长期固碳轨迹至关重要。值得注意的是,在荒山造林中,尽管针叶林的乔木碳密度最低,但其凭借最大的分布面积和可观的土壤碳密度,成为流域总碳储量的最大贡献者(占比44.68%)。凸显在流域尺度的碳汇管理中,土壤碳库的稳定性与植被类型的面积权重,有时比单一林分的单位面积乔木碳密度更具决定性意义。

3.2 植被类型对碳分配格局的调控

植被类型是调控生态系统碳在各组分间分配的关键因子。本研究中,阔叶类乔木(栎树类、阔叶林及阔叶混交林)的树木碳密度显著高于针叶类(图3a),主要与树种本身的生物学特性(如生长速率、木材密度和凋落物质量)有关。然而,碳在生态系统中的最终归宿不仅取决于植被本身。乔木林(占流域碳储量82.75%)作为碳储量的主体贡献者,其林下形成的灌草层和枯落物层是土壤有机碳的重要来源。这些凋落物经长期分解和转化,不断向土壤碳库输入有机质^[12,26-27],形成“植被-土壤”协同固碳的良性循环。

3.3 碳密度空间格局的地形驱动与人为调控

碳密度空间格局与地形因子之间复杂且依赖于管理背景的关联。整体上,海拔与碳密度(尤其是土壤碳密度)的正相关(图8)符合高海拔区域因人为活动减弱、环境更利于有机质积累的普遍认知^[28-30]。而坡度与碳密度在整体上呈现的负相关,则与陡坡地区土壤易受侵蚀、碳损失风险升高密切相关^[31-32]。

然而,在退耕还林区域,坡度与碳密度呈现出显著的正相关(图8)。退耕还林工程多实施于靠近居民点、本底条件相对较好的缓坡区域。在这些区域内,相对更陡的坡位可能被识别为生态修复的重点和难点,从而获得更优化的水土保持工程措施和更精细的树种配置与管理。这种针对性的人为干预有效遏制坡度可能带来的土壤侵蚀,并为植被生长创造有利条件,从而实现比缓坡位置更高的碳积累效率。此现象清晰地表明,在人为积极且精准的干预

下,地形限制可以被打破。因此,炭沟河流域碳储量的空间异质性格局,是由自然地形因子(海拔、坡度)与人为造林活动(方式、区位、管理强度)共同塑造的结果(图6)。

3.4 研究局限性与展望

本研究亦存在局限性。首先,退耕还林样本仅包含针叶林与灌木类型,缺乏与荒山造林中阔叶林对应的类型,限制了对2种造林方式下同类植被固碳能力的直接配对比较。因此,本研究的结论更侧重于揭示现有造林配置下的碳分布模式及其与地形的相互作用机制。其次,在空间异质性强烈的山地小流域,基于有限样点的空间插值结果存在不确定性,尽管相关性分析主要基于样点数据,但未来研究可通过增加样点密度或结合遥感反演技术来提升空间估测的精度。此外,造林时间(林龄)的细微差异及更精确的土地利用历史信息未能完全量化,这些都可能对结果产生一定影响。未来的工作应致力于收集更完整的立地背景信息,并开展长期定位监测,以更精确地揭示碳汇动态及其驱动机制。

4 结论

1)造林方式显著影响固碳能力。荒山造林的碳密度(52.13~107.10 t/hm²)与碳储量(9.50万~57.12万t)均显著高于退耕还林,其中荒山造林中阔叶混交林的碳密度最高(107.10 t/hm²),针叶林的碳储量最大(57.14万t)。

2)植被-土壤固碳具有协同作用。阔叶类乔木植被碳密度(5.73~108.66 t/hm²)远超针叶林(8.56~22.70 t/hm²),荒山造林因土壤扰动较小更具长期固碳优势。

3)碳密度空间分布受地形显著调控。整体呈现随海拔升高而增加、随坡度增大而降低的趋势(退耕还林区域除外)。地形通过影响侵蚀过程、人为干扰强度及微环境,与造林方式和植被类型共同决定流域碳储量的空间格局。优化水土保持林布局需综合考虑造林模式、植被选择和地形条件。

参考文献:

- [1] 李海燕.丹江口市水土保持工作成效及发展对策[J].中国水土保持,2021(12):64-66.
LI H Y. Achievements and development countermeasures of soil and water conservation in Danjiangkou City [J]. Soil and Water Conservation in China, 2021(12): 64-66.
- [2] 李智广,王隽雄,王海燕.区域水土保持碳汇能力评估的指标体系[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21

- (1):64-72.
- LI Z G, WANG J X, WANG H Y. Index system for evaluating the carbon sink capacity of regional soil and water conservation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(1):64-72.
- [3] 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.
- [4] 高春泥, 马力, 尹元银, 等. 长江上游地区水土保持林草措施碳汇能力测算[J]. *中国水土保持*, 2023(9):20-24.
- GAO C N, MA L, YIN Y Y, et al. Calculation of carbon sink capacity of forest and grass measures for soil and water conservation in the upper reaches of the Yangtze River[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2023(9):20-24.
- [5] 丁禹, 李勇, 罗松平. 贵州省水土保持碳汇能力测算[J]. *中国水土保持科学*, 2025, 23(4):23-32.
- DING Y, LI Y, LUO S P. Calculation of carbon sink capacity of soil and water conservation measures in Guizhou[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(4):23-32.
- [6] 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.
- 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.
- [7] 董小波. 辽西油松2种造林方式水土保持效果的研究[J]. *防护林科技*, 2019(3):41-42.
- DONG X B. Soil and water conservation effect of pinus tabuliformis by two afforestation methods in western Liaoning Province [J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2019(3):41-42.
- [8] 王薇菡, 虞依娜, 谢嘉淇, 等. 中国南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳、氮、磷的积累及化学计量特征[J]. *生态学报*, 2023, 43(5):1793-1803.
- WANG W H, YU Y N, XIE J Q, et al. Characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus accumulation and their ecological stoichiometry in Chinese subtropical forest under different afforestation patterns [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5):1793-1803.
- [9] 赵利祥, 郭忠录, 聂小飞, 等. 极端降雨事件对南方红壤区径流和输沙的影响: 基于赣江支流濂江上游流域的长序列分析(1984—2020年)[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(6):2133-2143.
- ZHAO L X, GUO Z L, NIE X F, et al. Effects of extreme rainfall events on runoff and sediment in the southern red soil area: A long series analysis based on the upper Lianjiang River of Ganjiang River (1984—2020) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(6):2133-2143.
- [10] 逢晨, 崔君滕, 赵芸, 等. 青岛市森林生态系统碳储量及碳密度[J]. *温带林业研究*, 2025, 8(1):27-33.
- PANG C, CUI J T, ZHAO Y, et al. Study on carbon storage and carbon density of forest ecosystem in Qingdao [J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2025, 8(1):27-33.
- [11] 李小燕, 李智广, 成辉, 等. 水土保持碳汇作用的生态学机制[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 41(1):53-58.
- LI X Y, LI Z G, CHENG H, et al. Ecological mechanisms of carbon sinks in soil and water conservation [J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2025, 41(1):53-58.
- [12] 季文旭, 冯仲科, 张瀚月, 等. 基于立木胸径生长率模型的乔木林碳汇潜力评估[J]. *中国农业科技导报*, 2024, 26(1):99-109.
- JI W X, FENG Z K, ZHANG H Y, et al. Assessment of carbon sink potential of arbor forests based on DBH growth rate model for standing trees [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(1):99-109.
- [13] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- Soil Physical Laboratory, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing. *Soil physical properties determination method* [M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [15] 国家林业局. 森林土壤调查技术规程: LY/T 2250—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014: 1-7.
- State Forestry Administration of the People's Republic of China. *Technical regulations for forest soil survey: LY/T 2250—2014* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014: 1-7.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 土壤质量 自然、近自然及耕作土壤调查程序指南: GB/T 36393—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 4-11.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. *Soil quality—guidance on the procedure for investigation of natural, near-natural and cultivated sites: GB/T 36393—2018*

- [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018:4-11.
- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 主要树种立木生物量模型与碳计量参数: GB/T 43648—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024:88-235.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for major tree species: GB/T 43648—2024 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2024:88-235.
- [18] DEIGHTON H D, BELL F W, LINDO Z. Long-term effects of forest management on boreal forest soil organic carbon[J]. *Forests*, 2025, 16(6):e902.
- [19] HE W Y, QIAN H Y, JIANG H D, et al. Effects of afforestation on soil aggregate stability, carbon, and nitrogen in alpine sandy lands[J]. *Forests*, 2025, 16(5):e782.
- [20] WANG Y F, FU B J, LÜ Y H, 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.
- [21] 张鸿. 黄山栎树造林模式对土壤酶活性和土壤肥力的影响[J]. *安徽林业科技*, 2023, 49(3):16-19.
ZHANG H. Effects of afforestation patterns of *Koelreuteria integrifolia* on the soil enzyme activity and soil fertility [J]. *Anhui Forestry Science and Technology*, 2023, 49(3):16-19.
- [22] 邸涵悦. 丹江口库区典型小流域不同土地利用方式土壤有机碳及组分特征[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
DI H Y. Effects of different land use types on soil organic carbon and its fractions of a typical small watershed in Danjiangkou[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [23] 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.
- [24] 张逸如, 刘晓彤, 高文强, 等. 天然林保护工程区近20年森林植被碳储量动态及碳汇(源)特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(13):5093-5105.
ZHANG Y R, LIU X T, GAO W Q, et al. Dynamic changes of forest vegetation carbon storage and the characteristics of carbon sink(source) in the natural forest protection project region for the past 20 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13):5093-5105.
- [25] 刘成杰. 基于典型样地的山东省森林碳储量及碳密度研究[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2014.
LIU C J. Forest carbon storage and carbon density in Shandong Province based on typical sample plots [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2014.
- [26] 郑辉杰, 彭翔, 李涛, 等. 滨海盐碱地典型人工林土壤有机碳分布特征与关键影响因素研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2026, 42(5):671-679.
ZHENG H J, PENG X, LI T, et al. Characteristics of soil organic carbon distribution and influencing factors in typical artificial forests on coastal saline-alkali soils [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2026, 42(5):671-679.
- [27] 涂宏涛. 三种森林类型下灌草生物量及碳储量模型[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
TU H T. The model of biomass and carbon of shrub and herb under three forest types [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [28] 吕学洲, 贾炜玮. 小兴安岭林下植被及幼树碳储量分布及模型构建[J]. *西南林业大学学报*, 2025, 45(9):130-138.
LÜ X Z, JIA W W. Distribution and modelling of carbon stocks in understorey vegetation and young trees in the Lesser Khingan Mountains forests [J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2025, 45(9):130-138.
- [29] 季蕾, 亢新刚, 郭韦韦, 等. 金沟岭林场3种林型不同郁闭度林下灌草生物量[J]. *东北林业大学学报*, 2016, 44(9):29-33.
JI L, KANG X G, GUO W W, et al. Biomass of shrub and herb under three forest types with different canopy densities in Jingouling forest farm [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2016, 44(9):29-33.
- [30] 郭炳良, 唐相龙, 何悦铭. 兰州市碳储量地形梯度效应时空演变及影响因素[J]. *环境科学*, 2026, 47(1):396-407.
GUO B L, TANG X L, HE Y M. Spatiotemporal evolution and influencing factors of topographic gradient effect on carbon storage in Lanzhou City [J]. *Environmental Science*, 2026, 47(1):396-407.
- [31] 温羽婧, 李锐. 基于地形梯度的丘陵地区碳储量时空分异及分区研究: 以长株潭城市群为例[J]. *生态环境学报*, 2025, 34(9):1373-1385.
WEN Y J, LI N. Spatiotemporal differentiation and zoning of carbon storage in hilly areas based on topographic gradients: Take Chang-Zhu-Tan urban agglomeration as an example [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2025, 34(9):1373-1385.
- [32] 夏晓莹, 李思瑶, 王杰, 等. 地形因子对天山北坡天山云杉林土壤有机碳的影响[J]. *新疆农业科学*, 2023, 60(4):965-973.
XIA X Y, LI S Y, WANG J, et al. Effects of topographic factors on soil organic carbon in *Picea schrenkiana* forest on the northern slope of Tianshan Mountain [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2023, 60(4):965-973.