

黄土高原丘陵区新增造林的碳储量及其固碳潜力 ——以山西省右玉县为例

薛强¹, 王冰心¹, 郝志鹏², 于伟静¹, 刘孝贤³, 王沫竹⁴

[1. 龙源(北京)碳资产管理技术有限公司, 北京 100032;

2. 右玉县林业局, 山西 朔州 037200; 3. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; 4. 中国科学院植物研究所系统与进化植物学重点实验室, 北京 100093]

摘要: [目的] 定量评估黄土高原丘陵区新增造林碳储量及固碳潜力, 为该区及相似区域优化森林碳汇经营和碳汇交易提供理论支持。[方法] 以山西省右玉县为研究区, 通过整理 2012—2024 年人工造林项目数据, 采用生物量法和 Logistic 生长曲线模型法, 分别估算研究区域新增造林不同碳库(包括生物质、死有机质、土壤有机碳和总碳)的碳密度和碳储量, 并对未来固碳潜力进行预测。[结果] ① 2012—2024 年碳储量从 6.18×10^4 t 增长至 2.49×10^6 t (以 C 计), 增长 40.29 倍, 原非边界内的基线土壤碳储量纳入是碳储量增加的核心驱动因素。② 若不考虑新增造林基线土壤碳储量的贡献, 2024 年碳储量为 5.05×10^5 t, 生物质碳储量所占比例为 93.19%, 为主要碳库; 2024 年总碳密度为 14.98 t/hm², 低于全国现有森林碳密度; 树种方面, 樟子松 2024 年碳储量所占比例为 79.57%, 是主要固碳树种; 针阔混交林和樟子松碳密度显著高于其他树种, 表明这两种树种在当地具有更大的固碳潜力。③ 预计 2060 年碳储量和碳密度将分别达 4.78×10^6 t 和 1.42 t/hm², 碳密度将略高于全国森林碳密度; 樟子松仍为主要固碳树种, 但针阔混交林由于碳密度更高 (210.46 t/hm²), 其固碳潜力更大。[结论] 右玉县新增造林固碳效果显著, 未来可通过优化树种结构, 改造灌木林等措施进一步提升森林碳汇能力, 并依托全国碳市场推动碳汇生态产品价值实现。

关键词: 森林碳汇; 碳储量; 碳密度; 固碳潜力; 黄土高原丘陵区; 山西省右玉县

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0320-10

中图分类号: S757

文献参数: 薛强, 王冰心, 郝志鹏, 等. 黄土高原丘陵区新增造林的碳储量及其固碳潜力[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 320-329. Xue Qiang, Wang Bingxin, Hao Zhipeng, et al. Carbon storage and carbon sequestration potential of new afforestation areas in hilly region of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 320-329.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.016

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.016

Carbon storage and carbon sequestration potential of new afforestation areas in hilly region of Loess Plateau —A case study of Youyu County, Shanxi Province

Xue Qiang¹, Wang Bingxin¹, Hao Zhipeng², Yu Weijing¹, Liu Xiaoxian³, Wang Mozhu⁴

[1. Longyuan (Beijing) Carbon Asset Management Technology Co., Ltd., Beijing 100032, China;

2. Forestry Bureau of Youyu County, Shuozhou, Shanxi 037200, China; 3. School of Ecology and

Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. Key Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China]

Abstract: [Objective] The carbon storage and carbon sequestration potential of new afforestation in the hilly region of the Loess Plateau were quantitatively assessed, in order to provide theoretical support for optimizing forest carbon sink management and carbon sink trading in this region and similar regions. [Methods] Taking Youyu County, Shanxi Province as the study area, data from artificial afforestation projects from 2012 to 2024 were systematically compiled. The biomass method and the Logistic growth curve model method were used to

收稿日期: 2025-08-27

修回日期: 2025-09-29

采用日期: 2025-09-30

资助项目: 国家能源集团科技创新项目“林草措施固碳效应及价值实现路径研究”(LYH-2025-07)

第一作者: 薛强(1990—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 硕士, 工程师, 主要从事林草碳汇、碳核算、碳交易研究。Email: e0083525@ceic.com。

estimate the carbon density and carbon storage of different carbon pools (including biomass, dead organic matter, soil organic carbon, and total carbon) in the new afforestation area, and the future carbon sequestration potential was predicted. [Results] ① From 2012 to 2024, the carbon storage (calculated by carbon) increased from 6.18×10^4 t to 2.49×10^6 t, representing a 40.29-fold increase. The inclusion of baseline soil carbon storage outside the original boundaries was the core driving factor of the increase. ② If the contribution of baseline soil carbon storage from the new afforestation was excluded, the carbon storage in 2024 would be 5.05×10^5 t, with biomass carbon storage accounting for 93.19%, making it the main carbon pool. The total carbon density in 2024 would be 14.98 t/hm², lower than that of existing forests nationwide. In terms of tree species, the carbon storage proportion of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in 2024 was 79.57%, making it the primary carbon-sequestering species. The carbon density of mixed coniferous-broadleaf forests and *P. sylvestris* var. *mongolica* was significantly higher than that of other tree species, indicating that these two tree species had greater carbon sequestration potential locally. ③ By 2060, the carbon storage and carbon density were projected to reach 4.78×10^6 t and 1.42 t/hm², respectively, and the carbon density would be slightly higher than that of forests nationwide. *P. sylvestris* var. *mongolica* would remain the main carbon-sequestering tree species, but mixed coniferous-broadleaf forests would have greater carbon sequestration potential due to their higher carbon density (210.46 t/hm²). [Conclusion] The new afforestation in Youyu County has achieved remarkable carbon sequestration effectiveness. In the future, the forest carbon sink capacity can be further enhanced through measures such as optimizing tree species structure and transforming shrublands, and the value of carbon sink ecological products can be realized by leveraging the national carbon market.

Keywords: forest carbon sink; carbon storage; carbon density; carbon sequestration potential; hilly region of Loess Plateau; Youyu County, Shanxi Province

气候变化已成为人类面临的最严重且最具挑战性的环境问题之一^[1-2],保护和增强森林碳汇、减少毁林和森林退化造成的碳排放是应对这一问题的重要举措。这一举措已被纳入《联合国气候变化框架公约》《京都议定书》和《巴黎协定》等应对气候变化公约,成为气候变化领域和国际社会关注的热点^[3-4]。2020年9月中国提出2030年“碳达峰”与2060年“碳中和”的战略目标^[5],并将增加森林面积、巩固和提升现有森林固碳能力作为实现碳中和的重要路径。自20世纪80年代以来,中国通过实施“三北”防护林工程、退耕还林工程、防沙治沙工程等一系列造林和生态恢复工程,新造人工林面积显著增加,人工林保存面积达 9.24×10^7 hm²,占中国森林总面积的 37.41%^[6];人工林蓄积量达 3.39×10^9 m³,占森林总蓄积量的 19.27%^[7],新造人工林在森林碳汇中发挥着重要贡献作用。

森林碳储量和固碳潜力研究作为森林碳汇能力研究的基础,对厘清碳汇机理及动态变化有着重要意义。当前森林碳储量的估算方法主要有生物量法、样地清查法、模型模拟法、微气象学法、遥感估算法等^[8-9],这些方法在适用场景和精度表现上各有侧重。生物量法是通过直接或间接方式获得生物量,再与含碳率相乘得到碳储量;其中直接获得生物量的方式需采伐树木进行测量,虽然精度高但工作量

大且具有破坏性,不适于大中尺度估算;间接获得生物量可通过建立异速生长模型实现,成本低且适用于大中尺度碳储量估算和预测,是当前最为广泛应用的方法。样地清查法精度高但需要大量人力和物力开展野外调查,适用于小尺度场景。微气象学法是通过监测植被与大气间碳交换通量的方式实现,易受下垫面和人为因素影响,更多用于碳循环过程研究。遥感估算法快速、便捷,但其估算结果精度低,一般用于全球、国家等大尺度的估算。近些年,国内外学者采用不同方法对全球^[4,10]、国家^[11]、区域等^[12-13]尺度的森林碳储量及固碳潜力进行了研究,但由于研究方法的不同以及区域性的差异,加之目前森林碳储量研究多围绕乔木层碳库、单一树种或土壤碳库估算,很少涉及生物质、死有机质、土壤有机碳等总碳库的综合性研究,导致研究结果存在较大差异。此外,已有研究主要关注森林生态系统的碳储量研究,对于人工新造林碳储量的研究较少。为此,本研究将生物量法和 Logistic 生长曲线模型法进行结合,系统性地将乔木、灌木纳入研究范围,并构建了涵盖生物质碳库、死有机质碳库、土壤有机碳库的总碳库测算体系,从而实现了对特定区域新增造林碳储量和碳密度的长周期估算和预测。

黄土高原丘陵区是中国重要的生态安全屏障,也是世界上水土流失、风沙侵蚀最为严重和生态环

境最为脆弱的地区之一。历经几十年的生态保护修复工程实施,该区域生态环境显著改善^[14]。右玉县位于山西省西北部,地处毛乌素沙地边缘,属于典型的黄土高原丘陵区,新中国成立初,沙化面积高达76.4%,林木绿化率不足0.3%,经过70 a来坚持不懈植树造林,改善生态环境,林木绿化率提高到目前的54%,森林生态系统固碳能力得到显著提升。当前,中国已建立以强制碳市场和自愿碳市场双轮驱动的碳市场制度体系,其中林业碳汇是自愿碳市场的重要交易产品类型,自愿碳市场对碳汇量的“可测量,可追溯,可核查”原则,驱使林业碳汇需要更为可靠和准确的碳储量评估和预测方法。基于此,本研究以右玉县为例,通过采用生物量法、模型法对当地2012—2024年人工新增造林碳储量、碳密度进行了估算和预测,分析其不同碳库、树种的碳储量和碳密度贡献值及动态变化,并对2060年前的碳汇潜力进行预测分析,旨在为量化和评估黄土高原丘陵区人工造林固碳成效,精准提升当地森林固碳能力,以及借助碳市场推动碳汇生态产品价值实现提供科学依据。同时,本研究可为全球生态环境脆弱区生态治理及其价值转化提供可借鉴的中国方案,对提升中国绿色低碳发展理念的国际影响力具有重要意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

右玉县地理坐标为112°23'33"—112°38'35"E, 39°41'18"—40°17'54"N,地处黄土高原东北缘,国土面积1 969 km²,辖4镇4乡1个风景名胜区。地形地貌类型以黄土丘陵和土石山区为主,地势东西高,中间低,海拔1 226~1 969 m,境内无大面积平坦塬面,也无高海拔山地,整体以缓坡丘陵为主,受长期水土侵蚀影响,境内沟壑发育且密集,形成“梁峁相间,沟谷交错”的破碎景观。气候为温带大陆性季风气候,年平均降水量410 mm,主要集中在6—9月,年平均相对湿度为60%,年平均蒸发量达1 761.3 mm;无霜期仅为104 d左右;平均风速2.7 m/s,风大且频繁。土壤主要以栗钙土和风沙土为主,成土母质以黄土和第四纪风积沙为主,质地较粗,团粒结构较差。右玉县植被类型垂直分布规律明显。河道及冲刷沟附近有部分野生灌木,主要为乌柳(*Salix cheilophila*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*);丘陵中部等宜林区有人工栽植小叶杨(*Populus simonii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、榆(*Ulmus pumila*)、沙棘、柠条(*Caragana korshinskii*)等树种,

呈零星分布;丘陵顶部分布有天然草地,属温带和暖温带半干旱植被类型。

1.2 数据来源

本研究使用的人工造林数据为右玉县林业局提供的2012年至目前的人工新增造林数据[根据《温室气体自愿减排交易管理办法(试行)》,全国温室气体自愿减排项目开工建设时间需晚于2012年11月8日。本研究人工造林工程项目开工时间与其保持一致],涵盖的项目类型主要有“三北”防护林工程、京津风沙源治理工程、天保工程植苗造林工程、新一轮退耕还林工程,进一步对各工程项目的《造林作业设计》《施工合同》《验收报告》进行梳理和筛选,得到各工程项目的造林年度、造林树种、造林面积、混交比例、栽植密度、初植苗龄等信息,汇总形成工程项目信息表(表1),造林面积合计33 725.37 hm²。

表1 右玉县2012—2024年人工新增造林工程项目信息
Table 1 Information of artificial new afforestation projects in Youyu County (2012—2024)

造林时间	树种	面积/hm ²	混交比例	密度/(株·hm ⁻²)
2012年	樟子松	866.67	纯林	1 650
2013年	樟子松	466.67	纯林	1 650
2014年	樟子松	800.00	纯林	1 650
2015年	樟子松	200.00	纯林	1 650
2016年	樟子松	466.67	纯林	1 650
	樟子松+柠条	666.67	5:5	1 650
2017年	樟子松	366.67	纯林	1 110
	樟子松+柠条	533.33	5:5	1 650
	樟子松+沙棘	42.00	5:5	1 650
2018年	油松	40.00	纯林	1 110
	樟子松+白蜡	173.33	5:5	1 650
	樟子松+沙棘	1 480.00	5:5	1 650
	樟子松+柠条	825.13	5:5	1 650
	樟子松+油松	3 085.47	5:5	1 110
2019年	樟子松	1 518.57	纯林	1 110
	樟子松+沙棘	80.00	5:5	1 650
	樟子松+柠条	2 333.33	5:5	1 650
	樟子松+油松	7 620.53	5:5	1 650
2020年	沙棘	400.00	纯林	1 650
	樟子松+白桦	133.33	5:5	1 110
	樟子松+沙棘	10 626.67	5:5	1 110
	樟子松+油松	116.67	5:5	1 650
2021年	樟子松+榆树	666.67	5:5	1 110
	樟子松	66.67	纯林	1 110
	油松+榆树	150.33	5:5	1 110

注:2021年后当地林业工程项目以封山育林、退化林修复、补植补造、森林质量提升为主,不涉及人工新造林。白桦(*Betula platyphylla*),白蜡(*Fraxinus chinensis*)。

1.3 研究方法

1.3.1 碳库选择及碳储量计算方法

森林碳储量包括生物质碳库、死有机质碳库、土壤有机碳库以及采伐后形成的木产品碳库^[15]。本研究不涉及采伐故不考虑木产品碳库,即总碳储量为生物质碳储量、死有机质碳储量、土壤有机碳储量之和。

1.3.2 生物质碳储量计算方法

根据各工程项目造林树种将其划分为樟子松、油松、针阔混交林、灌木 4 个类型,乔木树种初植苗龄均为 3 a,灌木为 1 a,生物质碳储量由对应生物量密度与造林面积及含碳率的乘积得到[公式(1)]。

$$C_{\text{Biomass}} = B_j \cdot A_j \cdot \text{CF}_j \quad (1)$$

式中: C_{Biomass} 为生物质碳储量; B 为生物量密度; A 为面积; j 为对应的树种; CF 为含碳率,本研究采用行业标准中参数^[16](表 2)。

乔木生物量密度采用拟合效果较好($R^2 > 0.90$)的生物量密度与林龄的 Logistic 生长曲线模型^[17]进行估算[公式(2)],各系数取值详见表 2。

$$B_{\text{AF}} = \frac{\omega}{1 + ke^{-at}} \quad (2)$$

式中: B_{AF} 为乔木生物量密度; t 为林龄; ω, k, a 均为常数。

灌木生物量密度由地上生物量密度、地下生物量与地上生物量的比例参数计算得到[公式(3)]。

$$B_{\text{SF}} = \text{AGB} \times (1 + \text{RSR}_{\text{SF}}) \quad (3)$$

式中: B_{SF} 为灌木生物量密度; AGB 为地上生物量; RSR_{SF} 为地下生物量与地上生物量的比值。灌木地上生物量密度随着林龄呈线性变化,且在达到成熟稳定后不再变化;本研究沙棘和柠条成熟稳定年龄分别为 50 和 40 a,成熟稳定时地上生物量密度为 13.90 和 11.90 t/hm²,成熟稳定时地下生物量与地上生物量的比值分别为 0.503 6 和 0.418 5,以上数据来

源于相关研究成果^[18]。成熟稳定年龄前对应年份灌木生物量密度采用内插法得到。

表 2 5 种树种生物质碳储量估算参数
Table 2 Estimation parameters of biomass carbon storage of five tree species

树种	ω	k	a	R^2	CF
樟子松	201.71	10.878 7	0.105 9	0.930	0.522
油松	87.98	12.236 0	0.114 4	0.977	0.521
针阔混交	290.96	8.577 4	0.056 0	0.993	0.498
沙棘	—	—	—	—	0.470
柠条	—	—	—	—	0.470

注: ω, k, a 均为常数,CF为树种对应含碳率。

1.3.3 死有机质碳储量计算方法

乔木死有机质包括枯落物量和枯死木量,灌木死有机质仅包括枯落物量。死有机质碳储量采用《温室气体自愿减排项目方法学造林碳汇(CCER-14-001-V01)》^[19](以下简称《造林碳汇方法学》)中地上生物量与其比值的方式进行估算[公式(4)—公式(7)]。

$$C_{\text{DOM}} = A_j \times (\text{LI}_j \cdot \text{CF}_{\text{LI},j} + \text{DW}_j \cdot \text{CF}_{\text{DW},j}) \quad (4)$$

$$\text{LI}_j = \text{AGB}_j \cdot \text{DF}_{\text{LI},j} \quad (5)$$

$$\text{DW}_j = \text{AGB}_j \cdot \text{DF}_{\text{DW},j} \quad (6)$$

$$\text{AGB}_j = \frac{B_j}{1 + \text{RSR}} \quad (7)$$

式中: C_{DOM} 为死有机质碳储量;LI为枯落物量密度;DW为枯死木量密度; CF_{LI} 为枯落物含碳率; CF_{DW} 为枯死木含碳率; DF_{LI} 为枯落物量与地上生物量的比值; DF_{DW} 为枯死木量与地上生物量的比值,均采用《造林碳汇方法学》中参数估算; AGB 为地上生物量; B 为生物量密度; RSR 为地下生物量与地上生物量的比值。樟子松、油松和针阔混交林 AGB 采用公式(7)计算, RSR 来源于相关文献^[20]。灌木各年度 AGB 采用本研究内插法得到。以上参数详见表 3。

表 3 5 种树种死有机质碳储量估算系数/参数

Table 3 Estimation coefficients/parameters of biomass carbon storage of five tree species

树种	RSR	DF_{LI}	DF_{DW}	CF_{LI}	CF_{DW}
樟子松	0.200 0	6.01%/9.80%/14.59%	3.36%	0.37	0.37
油松	0.310 0		3.36%	0.37	0.37
针阔混交	0.256 1	8.98%	3.28%	0.37	0.37
沙棘	—	16.30%	—	0.37	—
柠条	—	16.30%	—	0.37	—

注:①RSR为地下生物量与地上生物量的比值; DF_{LI} 为枯落物量与地上生物量的比值; CF_{DW} 为枯死木含碳率; CF_{LI} 为枯落物含碳率; CF_{DW} 为枯死木含碳率。②表中樟子松和油松 DF_{LI} 取值根据林龄划分,1~20 a 为 6.01%,21~40 a 为 9.80%,40 a 以上为 14.59%。

1.3.4 土壤有机碳储量计算方法

人工造林后土壤有机碳(soil organic carbon,

SOC)储量呈现先减少后增加最后趋于稳定的趋势。由于造林整地活动扰动土壤造成土壤有机碳的分解

进而导致其储量降低^[21],随着森林凋落物和根系残体分解作用以及微生物作用土壤有机碳储量逐渐增加^[22],达到一定时期后处于饱和状态不再增加^[23]。本研究土壤有机碳储量采用《造林碳汇方法学》中方式估算,即土壤有机碳密度与面积的乘积得到土壤有机碳储量;鉴于研究区采用鱼鳞坑整地对土壤扰动有限,以及造林后初始阶段枯落物和根系输入甚微,设定造林后前 5 a 土壤有机碳密度变化率为 0;各树种土壤有机碳密度年变化率详见表 4。研究区造林整地前地类以荒山荒地为主,基线土壤有机碳密度采用相似区域研究^[24]实测数据 35.67 t/hm²。

表 4 5 种树种土壤有机碳密度年变化率参数

Table 4 Parameters of annual change rate of soil organic carbon density of five tree species

树种	整地造林后年限/a			
	0~5	6~20	21~40	≥41
樟子松	0	+0.15	+0.40	0
油松	0	+0.15	+0.40	0
针阔混交	0	+0.15	+0.40	0
沙棘	0	+0.10	+0.10	0
柠条	0	+0.10	+0.10	0

1.1.5 固碳潜力预测年份选取

依据相关规程^[25]龄组划分标准,本研究中涉及的乔木树种均在 40~60 a 达到成熟林,鉴于研究区立地条件较差,设定乔木树种在 60 a 达到成熟,成熟前其生物质碳储量和死有机质碳储量均会逐年增加。

相关研究成果表明黄土丘陵区沙棘和柠条分别在 50 和 40 a 后达到成熟稳定^[18],鉴于本研究中沙棘和柠条比例较低,认为其在达到成熟后生物质碳储量和死有机质碳储量趋于稳定。2060 年为中国实现“碳中和”的目标年,选取本研究固碳潜力预测年份为 2025—2060 年。

2 结果与分析

2.1 新增造林碳储量动态变化分析

右玉县 2012—2024 年新增造林碳储量呈现逐年增长的趋势(图 1)。在考虑基线碳储量情景下(以下简称“情景 1”),碳储量从 2012 年的 6.18×10^4 t 增长至 2024 年的 2.49×10^6 t;从碳库类型贡献率来看,土壤有机碳储量占据绝对优势为 79.85%~85.13%;造林面积的增大将原非边界内的基线土壤碳储量纳入,进而导致新增造林的土壤碳储量显著增长。若不考虑新增造林基线土壤碳储量的贡献(以下简称“情景 2”),碳储量从 2012 年的 1.08×10^4 t 增长至 2024 年的 5.05×10^5 t;从碳库类型贡献率来看,生物质碳储量占据绝对优势为 93.19%~94.76%;新增造林碳储量主要集中于以茎干为主的地上部分和以根系为主的地下部分构成的生物质碳储量,而以枯落物和枯死木构成的死有机质碳储量相对占比较低;由于未考虑基线土壤碳储量,且造林后幼树枯落物量和根系作用有限,共同导致土壤有机碳储量所占比例较低。

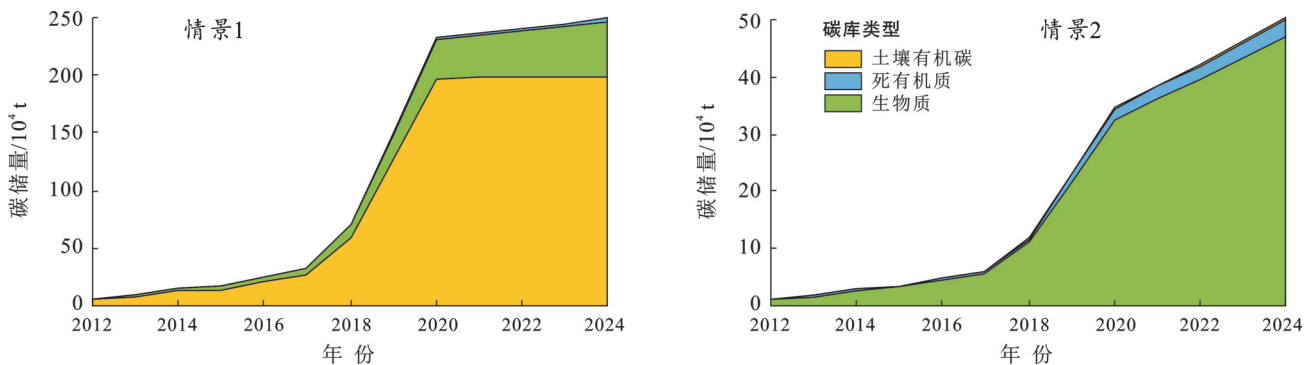


图 1 右玉县 2012—2024 年各碳库碳储量年度变化(以 C 计)

Fig.1 Annual changes in carbon storage of various carbon pools in Youyu County from 2012 to 2024 (calculated by carbon)

各树种碳储量总体呈现逐年增长趋势(图 2)。情景 1 下,樟子松、沙棘、油松、柠条和针阔混交林 2024 年碳储量较 2012 年分别增加了 1.42×10^6 t, 3.91×10^5 t, 3.78×10^5 t, 1.32×10^5 t 和 1.06×10^5 t。情景 2 下,各树种混交林 2024 年碳储量较 2012 年分别增加 3.91×10^5 t, 7 100 t, 5.68×10^4 t, 3 500 t 和 3.98×10^4 t。

各树种碳储量的增长主要得益于造林面积的增大,同时也与林木处于幼林龄阶段、生长迅速密切相关。从各树种类型碳储量贡献率来看,两种情景下樟子松贡献率均最高且占据绝对优势;其余 3 类树种自 2018 年后才占据一定比例,但贡献率始终处于较低水平,这在一定程度上表明右玉县新造林树种以樟子松为主,且树种结构较为单一。

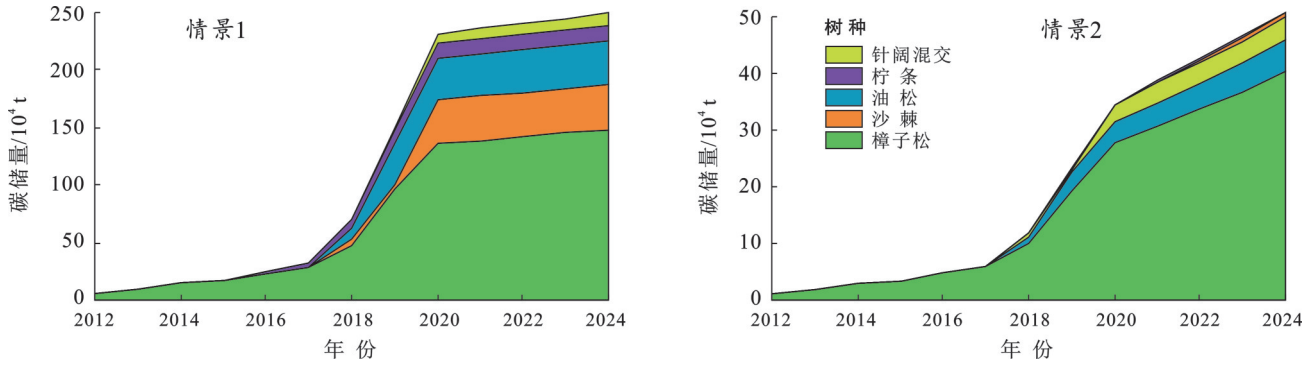


图 2 右玉县 2012—2024 年各树种碳储量年度变化(以 C 计)

Fig.2 Annual changes in carbon storage of various tree species in Youyu County from 2012 to 2024 (calculated by carbon)

2.2 新增造林碳密度动态变化分析

由图 3 可知,在情景 1 条件下,各碳库碳密度由大到小顺序为:土壤有机碳>生物质>死有机质;2012—2024 年总碳密度波动较小,维持在 69.23~73.88 t/hm²,该稳定趋势主要源于占总碳密度 79.85%~85.13% 的土壤碳密度的平稳变化;生物质和死有机质碳密度比例较低,分别为 14.04%~

19.09% 和 0.83%~1.11%。情景 2 条件下,各碳库碳密度由大到小顺序为:生物质>死有机质>土壤有机碳,2024 年碳密度分别为 13.96,0.82 和 0.20 t/hm²,所占比例分别为 93.19%,5.49% 和 1.31%;2012—2024 年总碳密度呈现先升后降再升的波浪式变化趋势,主要是因为碳密度受造林树种类型及其面积权重大小影响。

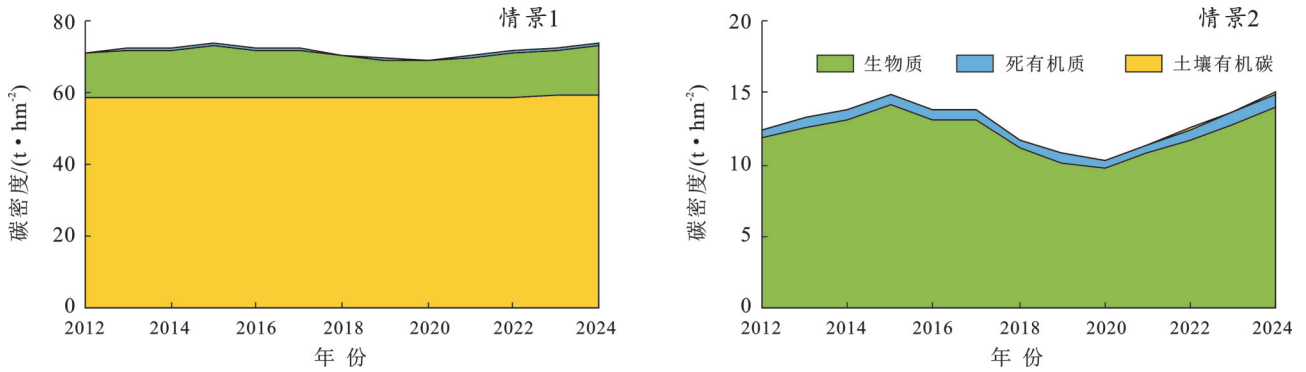


图 3 右玉县 2012—2024 年各碳库碳密度(以 C 计)年度变化

Fig.3 Annual changes in carbon density (calculated by carbon) of various carbon pools in Youyu County from 2012 to 2024

由图 4 可知,两种情景下各树种碳密度逐年变化幅度不大,总体呈现增长趋势,2024 年各树种碳密度由大到小顺序均为:针阔混交>樟子松>油松>柠条>沙棘。情景 1 条件下,由于各树种土壤碳密度基本一致,且土壤碳密度在总碳密度中占据绝对优势,最终导致不同树种间碳密度无明显差异。情景 2 条件下,通过控制变量消除了基线土壤碳储密度对树种碳密度的干扰,不同树种的碳密度贡献率呈现出显著变化,2017 年前樟子松碳密度贡献率占据绝对优势,2018 年后针阔混交林碳密度贡献率超过樟子松位居第一,油松处于居中水平,柠条和沙棘贡献率较低;以上说明针阔混交和樟子松在当地具有较高的固碳能力。

2.3 新增造林固碳潜力预测

基于右玉县 2012—2024 年新增造林项目,假定

区域造林面积和树种在未来均不发生变化,2025—2060 年碳储量和碳密度均显著增加,到 2060 年分别达 4.78×10^6 t 和 141.86 t/hm²,与 2024 年相比,碳储量和碳密度分别增加了 2.29×10^6 t 和 67.98 t/hm²,是 2024 年的 1.92 倍。

2060 年各碳库碳储量和碳密度由大到小排序为:土壤有机碳(2.27×10^6 t 和 67.41 t/hm²)>生物质(2.25×10^6 t 和 66.84 t/hm²)>死有机质(2.57×10^5 t 和 7.61 t/hm²),土壤有机碳和生物质具有较大的固碳潜力。而 2025—2060 年各碳库碳储量和碳密度年均增长量由大到小排序为:生物质(4.95×10^4 t 和 1.47 t/hm²)>土壤有机碳(7 800 t 和 0.23 t/hm²)>死有机质(6 400 t 和 0.19 t/hm²),生物质年均增长量显著高于土壤有机碳和死有机质,具有更大的固碳潜力(表 5)。

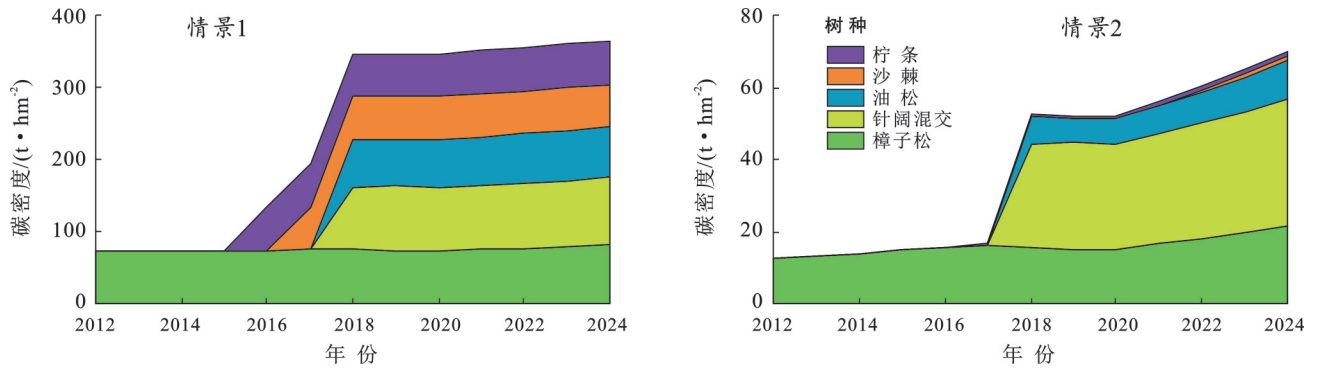


图 4 右玉县 2012—2024 年各树种碳密度年度变化

Fig.4 Annual changes in carbon density of various tree species in Youyu County from 2012 to 2024

表 5 右玉县 2025—2060 年各碳库碳储量和碳密度预测

Table 5 Prediction of carbon storage and carbon density of various carbon pools in Youyu County from 2025 to 2060

年份	碳库碳储量/ 10^4 t				碳库碳密度/ $(t \cdot \text{hm}^{-2})$			
	总碳储量	生物质	死有机质	土壤有机碳	总碳密度	生物质	死有机质	土壤有机碳
2025年	253.97	51.18	3.02	199.76	75.31	15.18	0.90	59.23
2030年	282.00	75.34	4.58	202.08	83.62	22.34	1.36	59.92
2035年	315.92	104.63	6.74	204.56	93.68	31.02	2.00	60.65
2040年	356.00	136.21	11.46	208.33	105.56	40.39	3.40	61.77
2045年	394.03	166.24	14.02	213.77	116.83	49.29	4.16	63.39
2050年	427.25	191.65	16.38	219.21	126.68	56.83	4.86	65.00
2055年	454.44	211.27	18.78	224.39	134.75	62.64	5.57	66.53
2060年	478.43	225.41	25.67	227.34	141.86	66.84	7.61	67.41
年均增长量	6.37	4.95	0.64	0.78	1.89	1.47	0.19	0.23

从树种类型看(表 6),各树种碳储量和碳密度均逐年升高,2060年碳储量由大到小排序为:樟子松>油松>沙棘>针阔混交>柠条,年均增长量排序为:樟子松>油松>针阔混交>沙棘>柠条。2060年碳密度由大到小排序为:针阔混交(210.46 t/hm^2)>樟子松(175.34 t/hm^2)>油松(127.84 t/hm^2)>沙棘

(70.76 t/hm^2)>柠条(70.60 t/hm^2),年均增长量排序为:针阔混交(3.23 t/hm^2)>樟子松(2.64 t/hm^2)>油松(1.63 t/hm^2)>沙棘(0.30 t/hm^2)>柠条(0.28 t/hm^2)。由此可见,樟子松仍然是右玉县未来主要的固碳树种,但针阔混交与其相比碳密度更高,具有更大的固碳潜力。

表 6 右玉县 2025—2060 年各树种碳储量和碳密度预测

Table 6 Prediction of carbon storage and carbon density of various tree species in Youyu County from 2025 to 2060

年份	树种碳储量/ 10^4 t					树种碳密度/ $(t \cdot \text{hm}^{-2})$				
	樟子松	油松	针阔混交	沙棘	柠条	樟子松	油松	针阔混交	沙棘	柠条
2025年	152.22	38.41	10.81	39.27	13.25	82.48	70.46	96.19	60.29	60.81
2030年	174.05	42.10	12.00	40.26	13.58	94.30	77.23	106.84	61.80	62.33
2035年	200.72	46.63	13.41	41.25	13.92	108.75	85.53	119.35	63.32	63.86
2040年	231.83	52.51	15.19	42.23	14.25	125.60	96.32	135.17	64.83	65.38
2045年	261.20	57.90	17.14	43.22	14.58	141.52	106.20	152.52	66.34	66.91
2050年	286.49	62.44	19.20	44.20	14.91	155.22	114.54	170.87	67.86	68.43
2055年	306.70	66.00	21.31	45.19	15.25	166.17	121.07	189.65	69.37	69.96
2060年	323.61	69.69	23.65	46.09	15.39	175.34	127.84	210.46	70.76	70.60
年均增长量	1.18	0.84	1.23	0.18	0.17	2.64	1.63	3.23	0.30	0.28

3 讨论

3.1 新增造林碳储量和碳密度现状特征

右玉县2012—2024年人工造林固碳效果显著。在考虑新增造林面积基线碳储量情景下,碳储量从2012年的 6.18×10^4 t增长至2024年的 2.49×10^6 t;土壤有机碳储量贡献率占据绝对优势(79.85%~85.13%),较相关研究结果^[25-26]略高;这一差异主要是因为造林后林木尚处于幼树阶段,生物量和枯落物处于较低水平,导致生物质和死有机质碳库贡献率相对偏低。造林面积增加使原非边界内的土壤有机质碳库被纳入,造成边界内总碳库的迅速增加^[27]。相比之下,消除新增造林基线土壤碳储量的干扰,更能反映造林活动实施期碳储量的变化。若不考虑新增造林基线土壤碳储量的贡献,碳储量从2012年的 1.08×10^4 t增长至2024年的 5.05×10^5 t,生物质碳储量贡献率占据绝对优势(93.19%~94.76%)。在考虑新增造林面积基线碳储量情景下,2024年碳密度为 73.88 t/hm^2 ,与类似生态区研究成果^[24]相近。若不考虑新增造林面积基线碳储量,2024年碳密度为 14.98 t/hm^2 ,仅是全国现有森林碳密度 47.49 t/hm^2 ^[28]的31.48%;由于森林碳密度主要受林龄影响,而新造林仍处于幼林龄阶段林木平均生物量较低,加之未考虑基线碳储量贡献,碳密度偏低;从树种类型看,针阔混交和樟子松碳密度显著高于其他树种,分别为 35.40 和 21.56 t/hm^2 ,这与韩泽华等^[13]关于黑龙江主要乔木林类型碳密度研究结果一致;沙棘和柠条灌木树种碳密度仅为乔木树种的3.07%~15.38%,与国家林业和草原局公布的2014—2018年全国乔木林与灌木林碳密度比值相近^[29]。

3.2 新增造林固碳潜力特征

右玉县2012—2024年人工造林碳储量预计在2060年达到 4.78×10^6 t,是2024年的1.92倍,2025—2060年新增固碳量 2.29×10^6 t,年均固碳量 6.37×10^4 t/a,固碳潜力较大。由于受限于研究区域未来造林规划资料的获取,且综合分析当前宜林地资源稀缺,本研究初步假设未来人工新造林地面积趋于稳定,故碳储量的增长主要归功于碳密度的提升。2026年各类碳库中土壤有机碳密度最大,但生物质碳储量和碳密度的年均增长量远高于土壤有机碳和死有机质,在核算边界内面积不再增加的前提下,生物质碳库在未来具有更大的固碳潜力。右玉县2012—2024年人工造林碳密度预计在2060年达到 141.86 t/hm^2 ,高于付晓等^[28]预测的全国平均值 67.4 t/hm^2 ,主要是因为上述研究未考虑死有机质

碳库和土壤有机质碳库,本研究生物质碳密度 66.84 t/hm^2 与其相比基本一致。固碳潜力主要取决于造林面积和碳密度,而碳密度又与树种组成、林龄结构密切相关。乔木林相较于灌木林具有更高的碳密度,固碳能力更强。但灌木作为先锋树种,凭借其独特的生物学特性(根系发达、萌蘖力强等)和生态学特性(抗逆性强、改良土壤等),在早期防风固沙、防治水土流失等生态治理方面发挥了关键作用,为后期乔木林营造奠定了基础,在生态功能维持和固碳增汇中具有不可替代的战略价值。右玉县2012—2024年人工造林乔灌混交面积 $1.66 \times 10^4 \text{ hm}^2$,灌木纯林面积 400 hm^2 ,今后对灌木林进行乔木林改造是提升固碳能力的重要途径。另外,2060年后各乔木树种将进入成熟林、过熟林生长期,碳汇潜力会有所降低,在未来森林经营中应对过熟林及时进行采伐更新,维持林分稳定。此外,针阔混交、樟子松具有显著的高碳密度,在未来新造林工程中,应在满足适地适树等原则的前提下,优先选择营造上述树种,提升区域碳汇能力。

3.3 研究的局限性

本研究仅为2012—2024年现有新增造林,未考虑2024年后未来的新增造林、抚育采伐和林分结构调整等森林经营活动,以及人为和自然因素等对碳储量和碳密度的影响,导致2024年后未来预测的碳储量和碳密度存在不确定性。本研究认为研究区鱼鳞坑整地方式对土壤扰动有限,整地造林后前5 a土壤有机碳储量变化率为0,但实际整地会造成土壤有机碳的降低,导致土壤有机碳储量略高于实际值。本研究各碳库和树种碳储量、碳密度采用模型进行计算,没有开展样地实测,导致计算结果与真值存在偏差。

4 结论

依据右玉县2012—2024年新增造林数据,采用生物量法、Logistic生长曲线模型法对其2060年前碳储量、碳密度进行了估算和预测。研究结果显示,碳储量和碳密度呈现逐年增长趋势,并在2024年达到 2.49×10^6 t和 73.88 t/hm^2 ,原非边界内的基线土壤碳储量纳入是碳储量和碳密度增加的核心驱动因素。相比之下,消除新增造林基线土壤碳储量的干扰,更能反映造林活动实施期碳储量的变化。若不考虑新增造林基线土壤碳储量的贡献,2024年碳储量为 5.05×10^5 t,生物质碳储量比例为93.19%,是固碳主体;从树种类型看,樟子松碳储量比例为79.57%,表明樟子松是该地区主要的固碳树种;针阔混交和樟子

松碳密度显著高于其他树种,表明上述树种在当地具有更大的固碳潜力;2024年碳密度为 14.98 t/hm^2 ,低于全国现有森林碳密度 47.49 t/hm^2 ,究其原因主要是新造林仍处于幼林龄阶段生物量较低,加之未考虑基线碳储量贡献,导致碳密度偏低。

预计未来碳储量和碳密度呈逐年增长趋势,到2060年可分别达 $4.78\times 10^6\text{ t}$ 和 141.86 t/hm^2 ,是2024年的1.92倍,碳密度将略高于全国森林碳密度 76.40 t/hm^2 [12];从树种来看,碳储量由大到小排序为:樟子松>油松>针阔混交>沙棘>柠条,碳密度由大到小排序为:针阔混交>樟子松>油松>柠条>沙棘,其中针阔混交和樟子松分别为 210.46 和 175.34 t/hm^2 ,未来樟子松仍然是主要固碳树种,但针阔混交与其相比碳密度更高,具有更大的固碳潜力。灌木林碳密度虽然显著低于乔木林,但其在早期生态治理方面发挥了关键作用,具有不可替代的战略价值。

总体看,右玉县新增造林碳汇潜力显著。今后应持续加大新增造林面积,加强人工林优化管理,通过灌木林进行乔木林改造,维持林分稳定,持续提升森林固碳能力。此外,应加强碳汇经营管理水平,借助全国碳市场将当地丰富的碳汇资源转化为具有经济价值的碳资产,从而促使碳汇生态产品价值的实现。

参考文献 (References)

- [1] Wei Yiming, Chen Kaiyuan, Kang Jianing, et al. Policy and management of carbon peaking and carbon neutrality: A literature review [J]. *Engineering*, 2022, 14: 52-63.
- [2] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [3] 刘国华,傅伯杰,方精云.中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J].生态学报,2000,20(5):733-740.
Liu Guohua, Fu Bojie, Fang Jingyun. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20 (5) : 733-740.
- [4] Harris N L, Gibbs D A, Baccini A, et al. Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes [J]. *Nature Climate Change*, 2021,11(3):234-240.
- [5] 张希良,黄晓丹,张达,等.碳中和目标下的能源经济转型路径与政策研究[J].管理世界,2022,38(1):35-51.
Zhang Xiliang, Huang Xiaodan, Zhang Da, et al. Research on the pathway and policies for China's energy and economy transformation toward carbon neutrality [J]. *Management World*, 2022,38(1):35-51.
- [6] 中华人民共和国自然资源部.2024年中国自然资源公报 [R].北京:中华人民共和国自然资源部,2025.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. In 2024 China's Natural Resources Bulletin [R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2025.
- [7] 国家林业和草原局.中国林业和草原统计年鉴(2021) [M].北京:中国林业出版社,2022.
National Forestry and Grassland Administration. China Forestry and Grassland Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2022.
- [8] 邹文涛,曾伟生.森林生物量和碳储量估算研究进展[J].世界林业研究,2025,38(2):32-38.
Zou Wentao, Zeng Weisheng. Research advances in estimation of forest biomass and carbon storage [J]. *World Forestry Research*, 2025,38(2):32-38.
- [9] 胡海波,刘佳璇,丁冬霞,等.森林固碳计量方法研究综述[J].中南林业科技大学学报,2024,44(11):58-69.
Hu Haibo, Liu Jiayuan, Ding Dongxia, et al. A review of measurement methods of forest carbon sequestration [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2024,44(11):58-69.
- [10] Pan Yude, Birdsey R A, Fang Jingyun, et al. A large and persistent carbon sink in the world's forests [J]. *Science*, 2011,333(6045):988-993.
- [11] 廖亮林,周蕾,王绍强,等.2005—2013年中国新增造林植被生物量碳库固碳潜力分析[J].地理学报,2016,71(11):1939-1947.
Liao Lianglin, Zhou Lei, Wang Shaoqiang, et al. Carbon sequestration potential of biomass carbon pool for new afforestation in China during 2005—2013 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016,71(11):1939-1947.
- [12] 涂宏涛,周红斌,马国强,等.基于第九次森林资源清查的云南森林碳储量特征研究[J].西北林学院学报,2023,38(3):185-193.
Tu Hongtao, Zhou Hongbin, Ma Guoqiang, et al. Characteristics of forest carbon storage in Yunnan based on the ninth forest inventory data [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023,38(3):185-193.
- [13] 韩泽华,李国春,刘丹丹,等.黑龙江省主要乔木林类型碳储量及碳汇能力[J].北京林业大学学报,2024,46(11):10-23.
Han Zehua, Li Guochun, Liu Dandan, et al. Carbon storage and carbon sink capacity of major arbor forest types in Heilongjiang Province of northeastern China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46 (11):10-23.
- [14] 薛智超,甄霖,闫慧敏.基于土地多功能的黄土丘陵沟壑区生态保护与发展情景评估及多主体模拟[J].生态

- 学报,2023,43(15):6081-6098.
- Xue Zhichao, Zhen Lin, Yan Huimin. The scenario assessment of ecological protection and development in the loess hilly and gully area based on land use functions and agent-based modelling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(15):6081-6098.
- [15] 朱建华,田宇,李奇,等.中国森林生态系统碳汇现状与潜力[J].生态学报,2023,43(9):3442-3457.
- Zhu Jianhua, Tian Yu, Li Qi, et al. The current and potential carbon sink in forest ecosystem in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(9):3442-3457.
- [16] 国家林业局.造林项目碳汇计量监测指南:LY/T 2253—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- State Forestry Administration of the People's Republic of China. Guidelines on carbon accounting and monitoring for afforestation project: LY/T 2253—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [17] 徐冰,郭兆迪,朴世龙,等.2000—2050年中国森林生物量碳库:基于生物量密度与林龄关系的预测[J].中国科学:生命科学,2010,40(7):587-594.
- Xu Bing, Guo Zhaodi, Piao Shilong, et al. Biomass carbon stocks in China's forests between 2000 and 2050: A prediction based on forest biomass-age relationships [J]. *Scientia Sinica (Vitae)*, 2010,40(7):587-594.
- [18] 许小明,张晓萍,何亮,等.黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征[J].环境科学,2022,43(11):5263-5273.
- Xu Xiaoming, Zhang Xiaoping, He Liang, et al. Carbon sequestration characteristics of different restored vegetation types in loess hilly region [J]. *Environmental Science*, 2022,43(11):5263-5273.
- [19] 中华人民共和国生态环境部.温室气体自愿减排项目方法学:造林碳汇(CCER-14-001-V01)[S].北京:中华人民共和国生态环境部,2023.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Methodology for Voluntary Greenhouse Gas Emission Reduction Projects: Afforestation Carbon Sink(CCER-14-001-V01)[S]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2023.
- [20] 贺丽,严俊霞,段兰兰,等.山西高原主要林型生物量异速生长模型[J].中国水土保持科学,2023,21(6):102-110.
- He Li, Yan Junxia, Duan Lanlan, et al. Biomass allometric model of main forest types in Shanxi Plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023,21(6):102-110.
- [21] 王晓蕊,贾彦龙,许中旗,等.人工造林对冀北林草交错带土壤碳密度的影响[J].水土保持通报,2025,45(1):208-214.
- Wang Xiaorui, Jia Yanlong, Xu Zhongqi, et al. Effects of afforestation on soil organic carbon density in forest-steppe ecotone of northern Hebei Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025,45(1):208-214.
- [22] 王晖,刘世荣,周正虎,等.森林土壤储碳与增汇的不确定性分析[J].生态学报,2025,45(8):3626-3644.
- Wang Hui, Liu Shirong, Zhou Zhenghu, et al. Uncertainty analysis of soil carbon storage and sink in forests [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025,45(8):3626-3644.
- [23] Castellano M J, Mueller K E, Olk D C, et al. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept [J]. *Global Change Biology*, 2015,21(9):3200-3209.
- [24] 田震,高凡,赛硕,等.清水河县森林生态系统碳储量、碳密度分布特征[J].干旱区资源与环境,2024,38(6):166-173.
- Tian Zhen, Gao Fan, Sai Shuo, et al. Distribution of carbon stock and carbon density of forest ecosystems in Qingshuihe County, Inner Mongolia [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2024,38(6):166-173.
- [25] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会.森林资源连续清查技术规程:GB/T 38590—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical regulations for continuous forest inventory: GB/T 38590—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [26] Tang Xuli, Zhao Xia, Bai Yongfei, et al. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: New estimates based on an intensive field survey [J]. *PNAS*, 2018,115(16):4021-4026.
- [27] 冯源,肖文发,朱建华,等.造林对区域森林生态系统碳储量和固碳速率的影响[J].生态与农村环境学报,2020,36(3):281-290.
- Feng Yuan, Xiao Wenfa, Zhu Jianhua, et al. Impacts of afforestation on the carbon stocks and carbon sequestration rates of regional forest ecosystems [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020,36(3):281-290.
- [28] 付晓,张煜星,王雪军.2060年前我国森林生物量碳库及碳汇潜力预测[J].林业科学,2022,58(2):32-41.
- Fu Xiao, Zhang Yuxing, Wang Xuejun. Prediction of forest biomass carbon pool and carbon sink potential in China before 2060 [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022,58(2):32-41.
- [29] 国家林业和草原局.中国森林资源报告(2014—2018)[M].北京:中国林业出版社,2019.
- National Forestry and Grassland Administration. China Forest Resources Report (2014—2018) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019.