

西北高山林区森林碳储量及固碳潜力评估

周子煜¹, 岳军伟^{1,2}, 唐永豪¹

¹商洛学院城乡规划与建筑工程学院, 陕西 商洛

²商洛市碳中和工程技术研究中心, 陕西 商洛

收稿日期: 2025年12月24日; 录用日期: 2026年3月2日; 发布日期: 2026年3月13日

摘要

森林是陆地生态系统最大的碳库, 在陆地生态系统碳循环研究中占有十分重要的地位。本文以我国的西北高山林区为研究对象, 利用6至9次全国森林资源清查资料, 研究该林区森林碳储量在时间尺度上的动态变化, 并估算其固碳潜力。结果表明: (1) 从龄级来看, 四次森林资源清查数据中西北高山林区森林碳密度过熟林最高, 碳储量中以成熟林为主。(2) 从森林起源来看, 四次森林资源清查数据中西北高山林区天然林的碳储量远大于人工林, 且随着时间的推移天然林和人工林的碳储量都呈现了一种上升的趋势。(3) 西北高山林区森林碳密度稳步增加, 从53.18 t/hm²增加到55.50 t/hm², 仅增加了4.37%; 碳储量从221.47 Tg增加到283.87 Tg, 增加了28.17%, 其增幅远高于碳密度增加幅度。(4) 从固碳潜力来看, 第九次清查数据中西北高山林区的固碳潜力为143.04 Tg。分析西北高山林区森林碳储量及其空间分布, 并评估其固碳潜力, 可以为该区域森林生态系统保护管理和碳汇决策提供参考。

关键词

西北高山林区, 碳储量, 碳密度, 固碳潜力

Assessment of Forest Carbon Storage and Carbon Sequestration Potential in Northwest Alpine Forest Region

Ziyu Zhou¹, Junwei Yue^{1,2}, Yonghao Tang¹

¹School of Urban and Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo Shaanxi

²Shangluo Carbon Neutrality Engineering Technology Research Center, Shangluo Shaanxi

Received: December 24, 2025; accepted: March 2, 2026; published: March 13, 2026

Abstract

Forest is the largest carbon pool in terrestrial ecosystem and plays an important role in the study

文章引用: 周子煜, 岳军伟, 唐永豪. 西北高山林区森林碳储量及固碳潜力评估[J]. 林业世界, 2026, 15(2): 274-283.

DOI: 10.12677/wjf.2026.152033

of carbon cycle in terrestrial ecosystem. Based on the data of six to nine national forest resource inventories, this paper studies the dynamic changes of forest carbon storage on a time scale and estimates its carbon sequestration potential in the northwest alpine forest region. The results indicate that: (1) From the perspective of age level, the carbon density of the over-mature forest was the highest in the four forest inventory data, and the carbon storage of the mature forest was the main one. (2) From the perspective of forest origin, the carbon storage of natural forest in the northwest alpine forest region is much greater than that of artificial forest in the four forest inventory data, and the carbon storage of both natural forest and artificial forest shows an upward trend over time. (3) The forest carbon density in the alpine forest areas of the northwest has increased steadily, rising from 53.18 t/hm² to 55.50 t/hm² with a moderate growth of merely 4.37%. In contrast, the carbon stock has surged from 221.47 Tg to 283.87 Tg, representing a substantial increase of 28.17%, which is far higher than the growth rate of carbon density. (4) In terms of carbon sequestration potential, the carbon sequestration potential of northwest alpine forest region was 143.04 Tg according to the 9th inventory data. The analysis of forest carbon storage and its spatial distribution, as well as the assessment of its carbon sequestration potential, can provide reference for forest ecosystem conservation management and carbon sink decision-making in the northwest alpine forest region.

Keywords

Northwest Alpine Forest Region, Carbon Reserve, Carbon Density, Carbon Sequestration Potential

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

森林是陆地生态系统最大的碳库，森林碳汇在我国实现“双碳”目标中起着十分关键的作用。森林碳储量即植物通过长期光合作用将 CO₂ 转化为存储于植物体内有机碳的含量[1]。森林碳储量是评估群落结构和生态系统功能完整性的重要指标，是研究森林碳循环生态过程、碳储量分布格局及碳汇能力的重要参数[2]。有关森林碳汇的研究可追溯至二十世纪五六十年代，近年来随着全球生态治理力度的持续加大，森林碳汇越来越成为学者们关注的热点，研究内容涉及森林碳汇的计量与监测、影响机理分析和潜力预测等方面。其中，区域尺度森林碳储量及其固碳潜力是学者们关注的热点和重要内容[3] [4]。Pan *et al.* [5]利用森林资源清查数据和长期生态系统碳研究资料，估算了 1990 年至 2007 年间全球森林碳汇，为 2.4 ± 0.4Pg C/a (1Pg = 10⁹ t)。Fang *et al.* [6]利用森林资源清查资料，估算了 1949~1998 年间中国森林生物量碳储量的变化，结果表明，1949~1980 年间，中国森林释放了约 0.68Pg C，20 世纪 70 年代末以后，碳储量显著增加，到 1998 年增加 4.75Pg C。张聪等[7]基于第 6~9 次全国森林资源清查数据和异速生长方程构建了起源、龄组 2 个主要林分特征的尺度兼容和树种分类的森林碳储量模型。这些研究为进一步深入研究森林碳汇功能及监测森林碳储量变化提供了借鉴方法和大量基础数据，但由于选用研究方法 & 数据的不同，其估算结果也存在较大差异。

在区域尺度碳储量估算上，国内外学者基于森林资源清查数据进行了广泛探索，逐渐形成了平均生物量法、生物量转换因子法、生物量转换因子连续函数法等计算方法。李海奎等[8]基于森林清查资料利用生物量经验回归估算出全国森林植被碳储量，并比较了 IPCC 法、生物量经验回归法和转换因子连续函数法的适用性和稳定性；欧强新等[9]基于决策树模型研究了马尾松生物量转换和扩展因子估算差异的

来源, 筛选出对其影响最为显著的林分特征因子。

西北高山林区在我国构建“两屏三带”为主体的生态安全战略格局中具有重要地位。涉及新疆、甘肃、陕西 3 省(自治区), 包括新疆天山, 阿尔泰山、甘肃白龙江、祁连山等林区、陕西秦岭、巴山等林区。森林面积 5.62×10^6 公顷, 森林覆盖率 51.54%, 森林蓄积 6.43×10^8 立方米, 每公顷蓄积 125.72 立方米。本文以该区域林分为对象, 通过广泛查阅相关文献, 收集第 6 至第 9 次全国森林资源清查资料, 如森林面积、蓄积等数据, 研究该林区森林碳储量在时间、空间尺度上的动态变化, 并估算其固碳潜力。研究结果可以为该区森林生态系统管理及提高碳汇能力提供理论参考。

2. 研究概况

本研究所用的数据来源于国家林业局森林资源连续清查数据(第 6 次至第 9 次)。包括西北高山林区龄级、面积、蓄积以及天然林和人工林的面积和蓄积等。

2.1. 计算方法

2.1.1. 森林生物量估算

由于在西北高山林区的森林资源清查中, 清查资料只给出了不同龄组的总面积和总蓄积量数据以及天然林、人工林总面积和总蓄积量数据, 缺乏分树种的统计资料, 因此无法应用分树种估算生物量的 IPCC 方法及生物量生长方程法来计算生物量。该方程是方精云等[10]依据中国 1949~1999 年 50 年间的森林资源清查数据所建立的林分总蓄积量和总生物量之间的回归方程, 经检验该方程的预测精度在大区域尺度下误差较小, 具体方程如下:

$$y = 0.5751x + 38.706 \quad (n = 120, r^2 = 0.83) \quad (1)$$

式中: y 是单位面积生物量(t/hm^2), x 是林分单位面积蓄积量(m^3/hm^2)。

2.1.2. 碳密度和碳储量估算

碳密度, 也即单位面积碳储量, 由单位面积生物量乘以碳转换系数得到。本研究中缺乏具体树种数据, 统一采用 0.5 的碳转换系数。森林碳储量数据则由碳密度乘以森林面积得到, 公式如下

$$C = D \times S/10^6 \quad (2)$$

式中: C 为碳储量(Tg), D 为碳密度(t/hm^2), S 为森林面积(hm^2)。

2.1.3. 森林固态潜力

生态系统固碳潜力是指在当前气候和自然干扰情况下, 生态系统在未来一段时间内最大可能固碳量。根据 Liu 等[11]相关学者对固碳潜力的描述, 本文不同龄级固碳潜力计算公式如下:

$$CP_i = (D_c - D_i) \times S_i/10^6 \quad (3)$$

式中: CP_i 代表不同龄级 i (幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林)的固碳潜力(单位: Tg); D_c 是森林植被碳密度参考值(t/hm^2), 通常取当前龄级中的碳密度的最大值, 第 9 次森林资源清查时, 过熟林碳密度最大, 因此采用过熟林碳密度作参考值; D_i 为当前龄级 i 的森林植被碳密度(t/hm^2); S_i 为当前龄级 i 的森林面积(hm^2)。

3. 结果与分析

3.1. 不同龄组森林碳储量

森林的碳密度是与其林龄密切相关, 4 次森林资源清查数据显示, 森林碳密度随林龄增大而增加, 不同龄组中, 幼龄林的碳密度最小, 过熟林的碳密度最大(见表 1)。其他学者研究则显示了不同的结果, 朱

锦奇等[12]对亚热带森林碳储量研究显示,不同龄组植被碳密度并没有随着林龄的增加而增加,植被碳密度最大的是近熟林(95.62 t/hm²)。也有研究显示森林固碳能力随林龄呈“先升后降”,31~50年林龄碳吸收率最高[13][14]。本研究中碳密度随林龄增加现象的是西北高山林区林木自身生长的碳积累规律与西北高山独特的水热、干扰环境共同作用的结果。一方面,西北高山林区低温、短生长季导致林木生长速率缓慢,以云杉、冷杉、落叶松等为优势树种的寒温性针叶林天然寿命可达200~500年,无明显的“衰老死亡期”,中龄林(50~100年)后仍能保持低速但稳定的生长,胸径、树高、单木生物量持续增加,碳储存能力逐年提升(区别于低海拔速生阔叶树,中龄林后生长停滞、生物量不再增加)。另一方面,本区地处偏远、地形复杂,且多为国家级自然保护区(如祁连山、秦岭、天山自然保护区),商业采伐、开垦、放牧等人类活动被严格限制,避免了因人为干扰导致的碳库流失(如伐木导致乔木碳库减少、翻耕导致土壤碳释放),林分能自然生长至成熟林阶段,碳库持续积累。两方面原因的综合作用,导致了西北高山林区碳密度随林龄“持续增加”而非“先升后降”的变化趋势。同一龄级碳密度从第6次到第9次均有小幅上升,表明西北高山地区森林固碳能力不断增强,林分整体质量也在不断提升。

第6~9次森林资源清查时森林碳密度如表2所示,整体来看,历次清查时幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林占同时期森林总碳储量的比重基本一致,分别约为10%、25%、20%、25%、20%。从4次森林清查时期各龄组碳储量来看,5个龄组中的任一龄组的森林碳储量从第6到第9次清查期都呈现出不断增长的趋势。这充分表明我国实施的“天然林保护”和“退耕还林”工程在固碳增汇方面起到实实在在的作用,同时,人工造林在增加森林碳汇中发挥着越来越重要的作用,有研究表明我国人工林碳储量从1990年的675.6 ± 12.5 TgC增至2020年的1873.1 ± 16.2 TgC,年均增加约40 TgC,占同期中国森林碳汇总增量的42%~45% [15],政策驱动的造林工程是碳储量增长的核心动力。

Table 1. Carbon density of forests in different age groups in the alpine forest areas of the northwest (t/hm²)

表 1. 西北高山林区不同龄组森林碳密度(t/hm²)

组龄	第6次	第7次	第8次	第9次
幼龄林	27.03	27.17	27.74	30.3
中龄林	45.15	44.9	44.94	45.42
近熟林	54.9	56.35	58.14	61.55
成熟林	69.07	70.72	68.86	72.12
过熟林	79.49	83.52	83.60	83.47

Table 2. Carbon stock of forests in different age groups in the alpine forest areas of the northwest (Tg)

表 2. 西北高山林区不同龄组森林碳储量(Tg)

龄组	第6次	第7次	第8次	第9次
幼龄林	19.97	24.24	26.63	30.02
中龄林	56.23	57.29	61.11	70.82
近熟林	44.47	48.12	50	56.16
成熟林	53.93	60.19	66.79	70.05
过熟林	46.87	49.18	53.51	56.82

从不同龄组森林碳储量占同时期总碳储量的比重来看,幼龄林所占比重在不断地增长,而过熟林所占的比重在不断地下降,这表明西北高山林区的人工造林面积扩大很快,对碳储量的增加起着重要作用。

Cheng *et al.* [15]的研究结果显示, 人工林面积扩展贡献总碳储存增加量的 53% ($637.2 \pm 5.4 \text{ TgC}$)。虽然过熟林对整个森林碳储量起着很大的作用, 但在 4 次森林清查数据中, 过熟林碳储量所占的比重在总碳储量中逐步地下降, 这种下降并非过熟林碳储量绝对减少(多数情况下仍呈缓慢增加趋势), 而是其增速低于中、幼龄林, 导致过熟林在总碳储量中的相对比重下降, 是西北高山林区森林生态系统正向演替的体现—中幼龄林快速恢复增长, 形成更合理的龄级结构, 整体碳汇能力提升。这要求我们应加强对过熟林的保护, 以维持其长期碳储存功能和生态系统稳定性, 同时优化中幼龄林经营, 如混交造林、抚育间伐等, 提升整体碳汇潜力。

3.2. 不同起源森林碳储量

从图 1 中可见, 第 6 次到第 9 次的 4 次森林资源清查中, 西北高山林区天然林碳密度变幅为 55~60 t/hm^2 , 人工林碳密度为 25~35 t/hm^2 , 各次调查期的天然林碳密度都明显高于人工林碳密度。同时, 4 次清查数据中, 随着时间的推移, 西北高山林区天然林和人工林的森林碳密度整体呈现缓慢增长的趋势。值得注意的是, 第 8 次森林资源清查时的人工林碳密度与第 7 次清查时相比, 有小幅下降。原因可能是两次清查间隔期内, 西北高山林区新造人工林集中进入中幼龄阶段, 该阶段林木以营养生长为主, 碳积累速率较慢, 单位面积碳储量低于近熟林和成熟林, 导致林分整体碳密度均值偏低。另外, 第 8 次清查

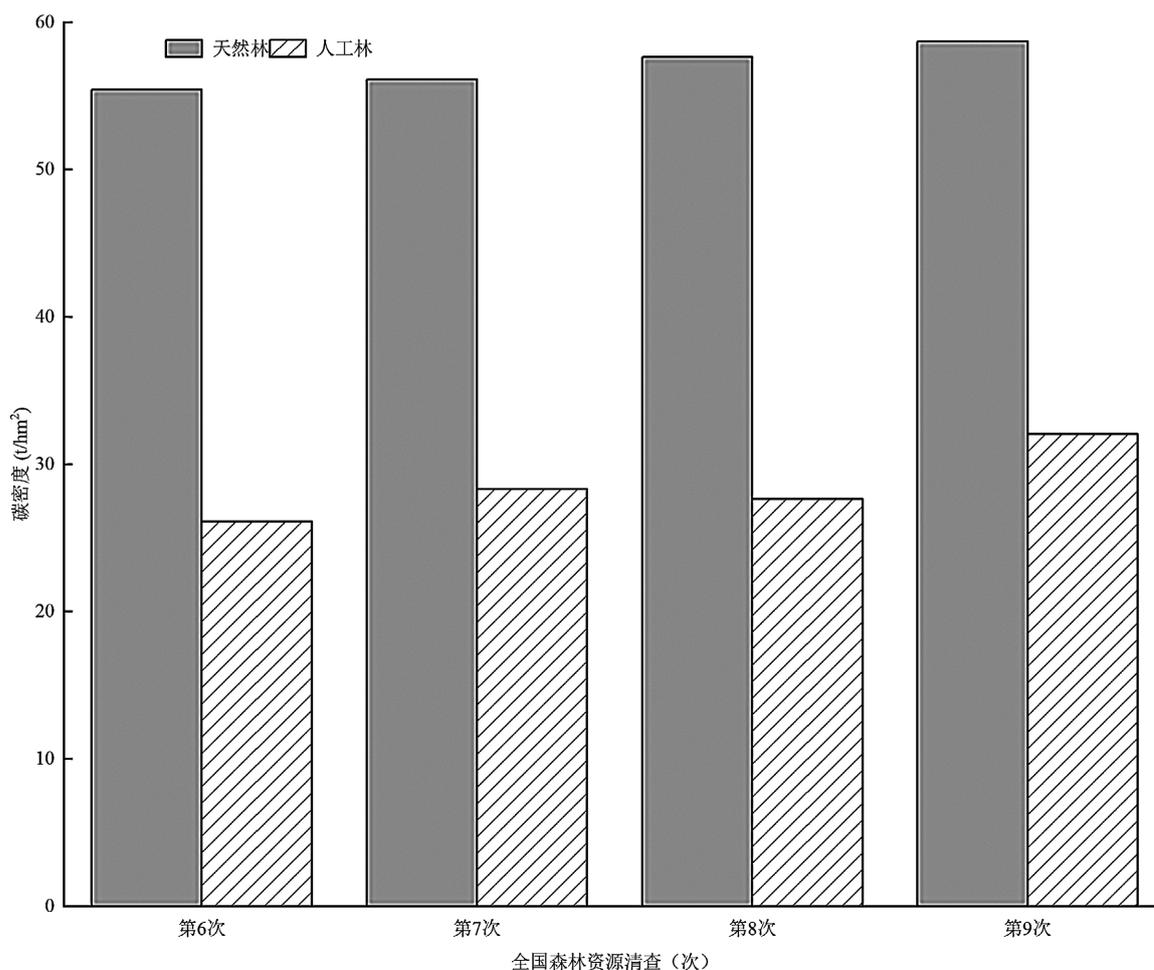


Figure 1. Carbon density of forests with different origins

图 1. 不同起源森林碳密度

首次大规模将卫星遥感技术应用于全国范围的森林资源调查，运用卫星遥感与样地实测结合的技术，数据精度提升，尽可能修正了第7次清查中部分高估的碳密度数值，使第8次清查时的人工林碳密度稍有下降。因此，对本区的人工林，要实施精准抚育，根据林龄、密度制定差异化采伐与管护方案，促进林木生长，提高林分单位面积固碳能力。

4次清查数据显示西北高山林区天然林碳储量均高于200 Tg，人工林碳储量均低于20 Tg，天然林碳储量远高于人工林(见图2)，展示了天然林在维持固碳增汇的生态系统服务功能中的居于不可替代的主体地位。人工林碳储量在森林总碳储量中的比例大幅增加，从第6次清查时的3.81%，增加到第9次清查时的6.94%，增幅超过80%。这一占比显著提升，直观反映人工林对西北高山林区森林碳汇贡献度持续增强，体现区域造林绿化与森林资源培育成效。从第6次到第9次森林资源清查的近20年，伴随三北防护林、退耕还林还草等重点生态工程推进，西北高山林区开展造林、修复退化林地等行动，人工林面积稳步扩大，成为推动区域森林碳储量增长的重要力量。同时，人工林经营管理技术升级，推广良种选育、精准抚育等措施，提升了人工林成活率、保存率和林分质量，强化其碳固定能力。值得注意的是，占比提升与人工林碳密度阶段性小幅波动并不矛盾，前者源于面积扩大与碳储量增长，后者受龄组结构、环境胁迫等因素影响，二者揭示西北高山林区人工林碳汇功能发展特征：有规模扩张优势，但仍需优化林分结构、提升经营水平挖掘碳密度提升潜力，以更好发挥其在区域碳循环调控与生态屏障建设中的核心作用。

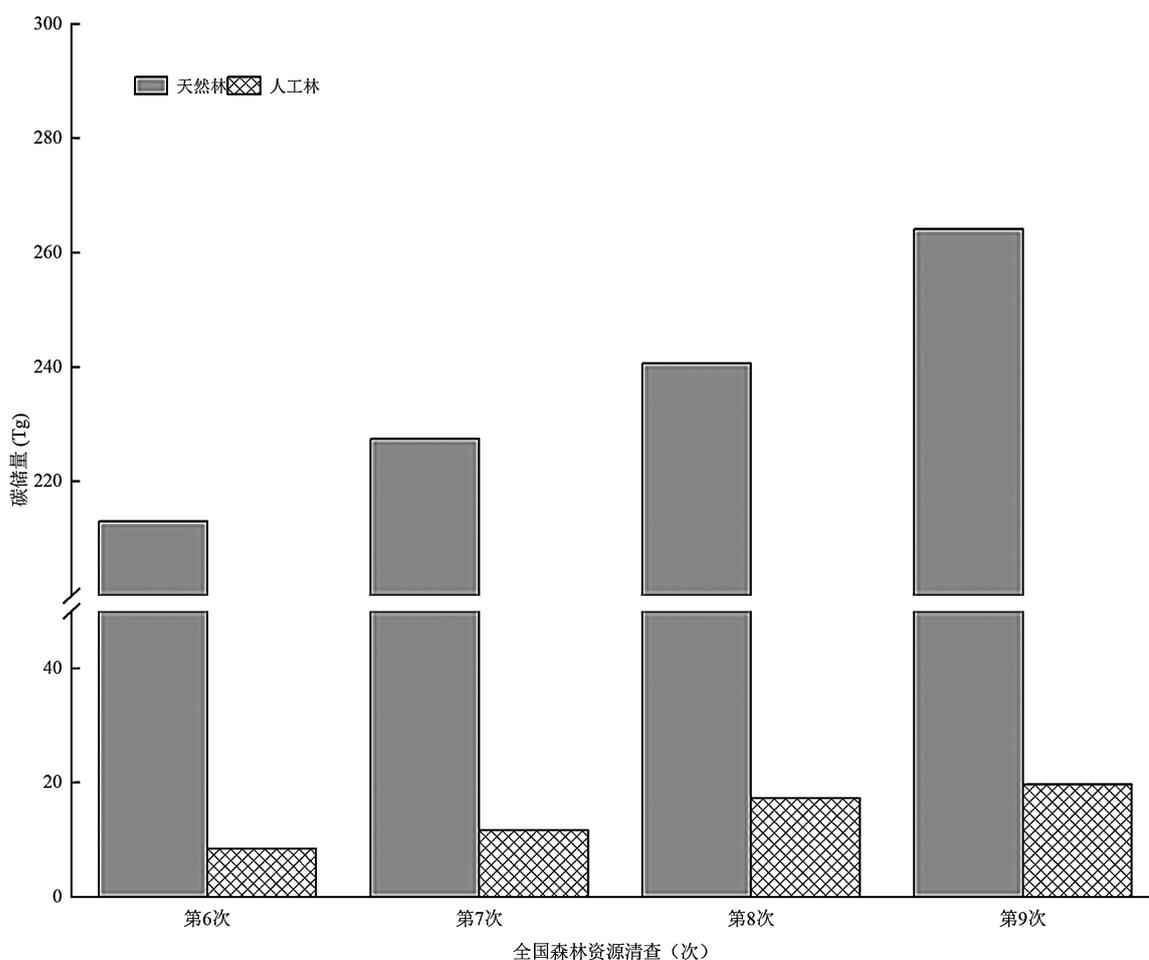


Figure 2. Carbon stock of forests with different origins

图2. 不同起源森林碳储量

3.3. 森林植被的固态动态变化

从图3可以看出,从第6次到第9次森林资源清查时期,西北高山林区森林碳密度稳步增加,但增幅较小,从 53.18 t/hm^2 增加到 55.50 t/hm^2 ,仅增加了4.37%。与此同时,碳储量也呈现出不断增长的趋势,从 221.47 Tg 增加到 283.87 Tg ,增加了28.17%,其增幅远高于碳密度增加幅度。在森林固碳增汇功能研究中,碳储量和碳密度是研究森林碳循环过程、碳分布格局及碳汇能力的重要参数[2]。这种“碳密度缓增而碳储量快增”的差异化特征,核心源于森林面积增加与林分碳密度提升的非同步性,林地面积快速增长是碳储量高速增长的主导因素。统计资料显示,第6次资源清查时,本区森林面积为 $4.16 \times 10^6 \text{ hm}^2$,而到第9次森林资源清查时,森林面积扩大到 $5.11 \times 10^6 \text{ hm}^2$,增加了22.81%,可见森林面积增加是碳储量快速增长的主要驱动因子。

近20年间,随着“三北防护林建设”“退耕还林还草”等生态工程在西北高山区域的持续推进,宜林荒山荒地、退化草地的造林绿化力度不断加大,人工林面积稳步扩张,同时天然林保护工程的实施有效遏制了林地退化,保障了天然林面积稳定,林地总面积的显著增长为碳储量提升奠定了基础。碳密度增幅偏低,一方面受林分结构制约,新增人工林多处于中幼龄阶段,碳积累速率较慢,且部分区域人工林存在树种单一、经营管理不足等问题,碳密度提升受限;另一方面,天然林虽碳密度基数较高,但受高山地区土壤贫瘠、极端气候(干旱、冻害)等环境因素影响,生长速率放缓,碳密度增长空间有限,因而整体碳密度增幅较小。

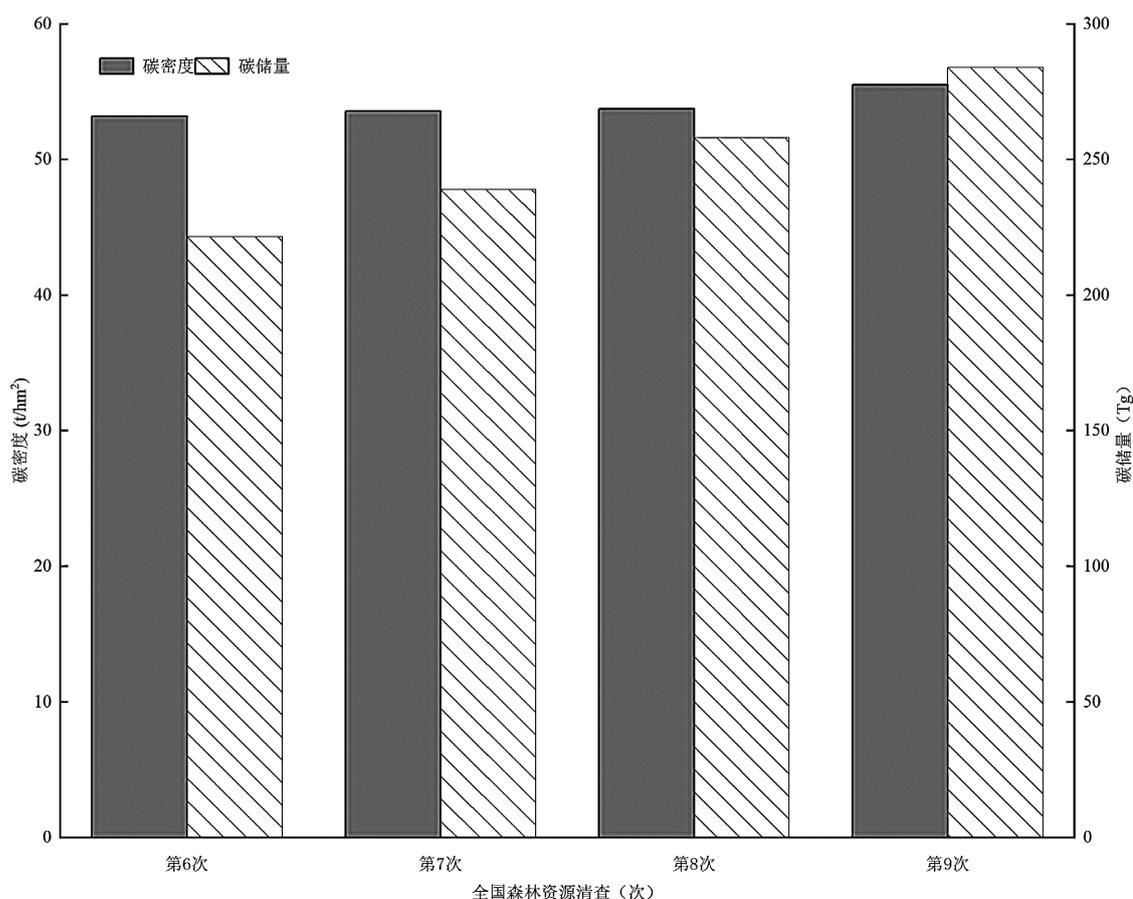


Figure 3. Forest carbon density and carbon stock in different periods

图3. 不同时期森林碳密度、碳储量

未来需在巩固林地面积成果的基础上,通过优化人工林树种结构、实施精准抚育管理、改良林地土壤条件等措施,针对性提升中幼龄林碳密度增长速率,同时强化天然林生态系统稳定性,推动区域森林碳汇从“面积增长”驱动向“量质双升”转变,进一步发挥其在区域碳循环调控与生态屏障建设中的重要作用。

3.4. 未来森林固碳潜力预测

对西北高山林区各龄级固碳潜力的估算要反映其现状水平,故本研究采用第9次的森林资源清查数据进行估算。由图4可以看出,第9次西北高山林区各龄组森林固碳潜力差异较大,基于过熟林碳密度作参考值,幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林的固碳潜力分别为52.68、59.33、20.00和11.03 Tg,则未来很长一段时间内,西北高山林区森林的总固碳潜力143.04 Tg。本区现有森林的碳密度均随林龄的增加而增加,说明处于不同林龄阶段的各类森林(人工林、天然林)均存在持续固碳的潜力[16]。

要想实现本区森林的固碳潜力,需结合西北高山林区各龄组森林的生长特性与固碳潜力的差异化特征,实施针对性、精细化的森林经营管理策略,推动不同龄级林分的固碳效能最大化释放。如针对固碳潜力占比最高的幼龄林与中龄林,二者合计固碳潜力达112.01 Tg,是本区森林碳汇增量的主要来源,

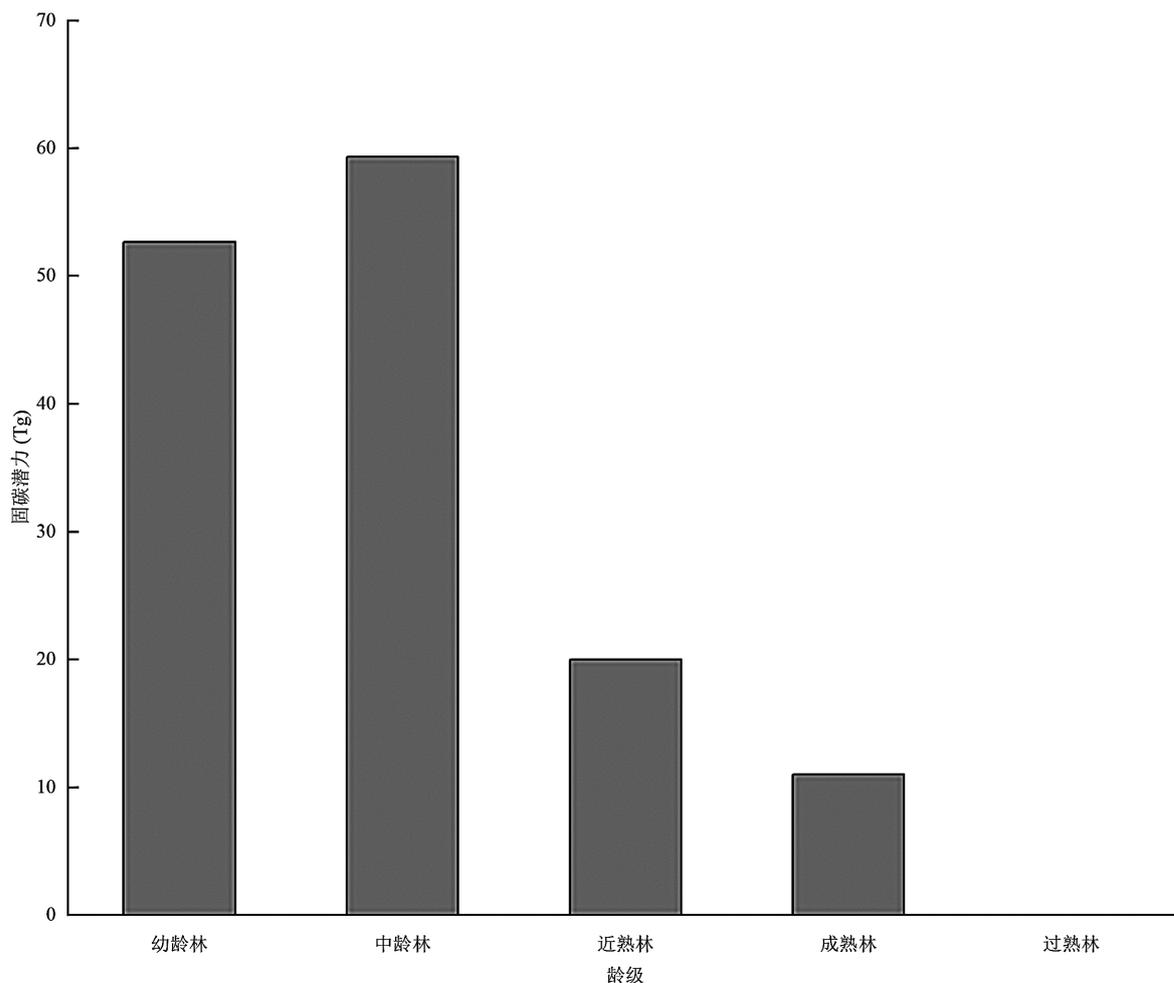


Figure 4. Carbon sequestration potential of forests of different age classes in the alpine forest areas of the northwest during the 9th national forest inventory

图4. 第9次清查时西北高山林区不同龄级森林固碳潜力

需围绕优化林分结构、改善生长环境开展科学抚育间伐,及时清除病弱木、过密木,保障林木光照与养分供给,促进其快速生长,充分挖掘幼中龄林的碳汇增长潜力。

同时,结合本区人工林、天然林均具备持续固碳潜力的现状,实施差异化的培育与保护措施:对人工林强化良种选育、精准造林与后期抚育配套,提升林分质量与固碳效率;对天然林继续严格落实保护措施,依托其自身的自然修复能力推动林分向更高龄级演替,稳步提升天然林碳密度。只有通过多维度、系统性的举措,才可能完全实现本区的总固碳潜力,推动区域森林碳汇功能的长期持续发挥。

4. 小结

(1) 不同龄组植被碳密度随林龄的增加而增加,表明西北高山地区森林固碳能力不断增强,林分整体质量也在不断提升。不同龄组的森林碳储量都呈现不断增长的趋势,但是从不同龄组森林碳储量占同时期总碳储量的比重来看幼龄林所占比重在不断增长,而过熟林所占的比重在不断地下降。

(2) 西北高山林区天然林和人工林的森林碳密度整体呈现缓慢增长的趋势。天然林在维持固碳增汇的生态系统服务功能中居于不可替代的主体地位;人工林碳储量在森林总碳储量中的比例大幅增加。

(3) 西北高山林区森林面积增加与林分碳密度提升未表现出同步性,林地面积快速增长是碳储量高速增长的主导因素。

(4) 未来很长一段时间内,西北高山林区具有较高的固碳潜力。要想实现本区森林的固碳潜力,需结合西北高山林区各龄组森林的生长特性与固碳潜力的差异化特征,实施针对性、精细化的森林经营管理策略,推动不同龄级林分的固碳能力得到充分发挥。

基金项目

陕西省教育厅青年创新团队科学研究计划项目“秦岭南麓不同林龄油松人工林土壤呼吸对凋落物输入变化的响应”(23JP041);商洛学院科研基金项目“南水北调工程水源区(商洛市)森林生态系统服务功能优化研究”(18SKY006);商洛学院大学生创新创业训练计划项目“秦岭南麓油松林土壤呼吸对枯落物输入变化的响应”(S202411396063)。

参考文献

- [1] 马学威,熊康宁,张俞,等. 森林生态系统碳储量研究进展与展望[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 62-72.
- [2] Avitabile, V. and Camia, A. (2018) An Assessment of Forest Biomass Maps in Europe Using Harmonized National Statistics and Inventory Plots. *Forest Ecology and Management*, **409**, 489-498. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.047>
- [3] Wang, J., Feng, L., Palmer, P.I., Liu, Y., Fang, S., Bösch, H., *et al.* (2020) Large Chinese Land Carbon Sink Estimated from Atmospheric Carbon Dioxide Data. *Nature*, **586**, 720-723. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2849-9>
- [4] 张颖, 李晓格, 温亚利. 碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(1): 38-47.
- [5] Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., *et al.* (2011) A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, **333**, 988-993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>
- [6] Fang, J., Chen, A., Peng, C., Zhao, S. and Ci, L. (2001) Changes in Forest Biomass Carbon Storage in China between 1949 and 1998. *Science*, **292**, 2320-2322. <https://doi.org/10.1126/science.1058629>
- [7] 张聪, 刘琪, 李海奎, 等. 我国尺度兼容和树种分类的材积源森林碳储量模型[J]. 林业科学, 2025, 61(1): 57-69.
- [8] 李海奎, 雷渊才, 曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量[J]. 林业科学, 2011, 47(7): 7-12.
- [9] 欧强新, 李海奎, 雷相东, 等. 基于清查数据的福建省马尾松生物量转换和扩展因子估算差异解析——3种集成学习决策树模型比较[J]. 应用生态学报, 2018, 29(6): 2007-2016.
- [10] 方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义[J]. 植物学报, 2001(9): 967-973.
- [11] Liu, Y., Yu, G., Wang, Q., Zhang, Y. and Xu, Z. (2014) Carbon Carry Capacity and Carbon Sequestration Potential in

China Based on an Integrated Analysis of Mature Forest Biomass. *Science China Life Sciences*, **57**, 1218-1229.

<https://doi.org/10.1007/s11427-014-4776-1>

- [12] 朱锦奇, 熊媛巧, 易扬, 等. 亚热带森林碳储量与固碳量的构成及影响因素: 以武宁县为例[J]. 水土保持学报, 2025, 39(3): 256-267, 277.
- [13] 沈会涛, 俞筱押, 秦彦杰, 等. 太行山东麓核桃林生态化学计量及碳储量随林龄变化特征[J]. 植物生态学报, 2025, 49(9): 1543-1555.
- [14] Shang, R., Chen, J.M., Xu, M., Lin, X., Li, P., Yu, G., *et al.* (2023) China's Current Forest Age Structure Will Lead to Weakened Carbon Sinks in the near Future. *The Innovation*, **4**, Article ID: 100515. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100515>
- [15] Cheng, K., Yang, H., Tao, S., Su, Y., Guan, H., Ren, Y., *et al.* (2024) Carbon Storage through China's Planted Forest Expansion. *Nature Communications*, **15**, Article No. 4106. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48546-0>
- [16] 刘迎春, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 基于成熟林生物量整合分析中国森林碳容量和固碳潜力[J]. 中国科学: 生命科学, 2015, 45(2): 210-222.