北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于不同立地等级的天山云杉天然林碳汇潜力

王正婷 罗光成 赵善超 马茜芮 依里帆·艾克拜尔江 向玮

Carbon sink potential of natural forests of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* based on different site grades

Wang Zhengting, Luo Guangcheng, Zhao Shanchao, Ma Xirui, Erfan· Akberjan, Xiang Wei

引用本文:
王正婷, 罗光成, 赵善超, 马茜芮, 依里帆·艾克拜尔江, 向玮. 基于不同立地等级的天山云杉天然林碳汇潜力[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(4):74–81. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240337
Wang Zhengting, Luo Guangcheng, Zhao Shanchao, Ma Xirui, Erfan· Akberjan, Xiang Wei. Carbon sink potential of natural forests of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* based on different site grades[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4):74–81. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240337

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240337

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长白落叶松人工林林分碳储量生长模型系研究

Stand carbon stock growth model system for *Larix olgensis* plantation

北京林业大学学报, 2021, 43(11): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210040

基于混合效应模型的新疆天山云杉单木胸径预测模型构建

Predicting model construction of single tree DBH of *Picea schrenkiana* in Xinjiang of northwestern China based on mixed effects model

北京林业大学学报, 2020, 42(7): 12–22. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190236

1949—2018年中国森林资源碳储量变化研究

Changes in forest resource carbon storage in China between 1949 and 2018

北京林业大学学报, 2021, 43(5): 1–14. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200237

基于NbS的北京市乔木林固碳能力分析

Carbon sequestration capacity of Beijing arbor forest based on NbS

北京林业大学学报, 2021, 43(6): 13–22. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200145

大兴安岭盘古林场森林碳汇木材复合经营规划

Forest carbon sink–timber compound management planning of Pangu Forest Farm in Great Xing’an Mountains of northeastern China

北京林业大学学报, 2020, 42(8): 1–11. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190331

温带长白山天然阔叶林沼泽湿地生态系统碳储量

Carbon storage of natural broadleaved forested marsh wetland ecosystem in temperate Changbai Mountain of northeastern China

北京林业大学学报, 2018, 40(8): 1–11. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180005

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240337

基于不同立地等级的天山云杉天然林碳汇潜力

王正婷[1,2] 罗光成[2] 赵善超[3] 马茜芮[2] 依里帆·艾克拜尔江[4,5] 向 玮[2]
（1. 新疆农业大学林学与风景园林学院，新疆 乌鲁木齐 830052；2. 北京林业大学林学院，林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083；
3. 新疆维吾尔自治区天然林保护中心，新疆 乌鲁木齐 830000；4. 新疆西天山国家级自然保护区管理中心，
新疆 伊宁 835000；5. 新疆西天山森林生态系统定位观测研究站，新疆 巩留 835400）

摘要:【目的】明确不同立地条件下新疆天山云杉天然林的碳汇潜力，为新疆天然林的生态功能提升、科学管理以及区域碳中和目标实现提供理论依据和技术支撑。**【方法】**基于新疆天山云杉天然林 150 块样地数据，通过林分断面积和碳储量模型的参数估计，利用黄金分割法求解最优林分密度指数，系统评估不同立地条件下林分碳汇潜力。**【结果】**(1)建立的林分优势高模型(R^2 = 0.965)将天山云杉样地划分为 5 个立地等级(Ⅰ—Ⅴ)，各等级下样地数量分别为 15、30、60、27、18 个。(2)林分断面积和碳储量生长模型具有良好的拟合精度，其中断面积模型 R^2 = 0.936(RMSE = 2.931 $m^2/(hm^2·a)$，rRMSE = 0.134)，碳储量模型 R^2 = 0.861(RMSE = 5.488 $t/(hm^2·a)$，rRMSE = 0.164)。(3)基准年龄时，立地等级Ⅰ—Ⅴ的碳储量分别为 149.487、143.191、138.103、122.681、116.196 t/hm^2，对应最优林分密度为 1 022、1 166、1 343、1 568、1 862 株/hm^2。(4)随林龄增长，各立地等级碳汇潜力呈下降趋势，其中幼龄林阶段衰减速率最大，中龄林后趋缓；立地质量与碳储量呈正相关，但低立地质量林分具有更高密度调控空间。**【结论】**立地质量分级可有效表征天山云杉天然林碳汇潜力差异，建议重点加强占样本总量 40% 的中等立地质量林分(Ⅲ级)幼龄林阶段的精准调控，以充分挖掘其碳汇提升潜力。

关键词：碳储量生长模型；碳汇潜力；天山云杉；立地等级
中图分类号：S757.4 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)04−0074−08
引文格式：王正婷，罗光成，赵善超，等. 基于不同立地等级的天山云杉天然林碳汇潜力［J］. 北京林业大学学报，2025，47(4)：74−81. Wang Zhengting, Luo Guangcheng, Zhao Shanchao, et al. Carbon sink potential of natural forests of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* based on different site grades［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4): 74−81.

Carbon sink potential of natural forests of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* based on different site grades

Wang Zhengting[1,2] Luo Guangcheng[2] Zhao Shanchao[3] Ma Xirui[2] Erfan· Akberjan[4,5] Xiang Wei[2]
(1. College of Forestry and Landscape Architecture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China;
2. School of Forestry, Beijing Forestry University, State Key Laboratory of Efficient
Producton of Forest Resources, Beijing 100083, China;
3. Natural Forest Protection Center of Uygur Autonomous Region of Xinjiang, Urumqi 830000, Xinjiang, China;
4. Xinjiang Administration Center of West Tianshan National Nature Reserve, Yining 835000, Xinjiang, China;
5. Xinjiang West Tianshan Forest Ecosystem Observation and Research Station, Gongliu 835400, Xinjiang, China)

Abstract: ［**Objective**］ This paper aims to clarify the carbon sink potential of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* natural forests in Xinjiang of western China under different site conditions, and to provide theoretical basis and technical support for the enhancement of ecological functions of natural forests in

收稿日期: 2024−10−13 **修回日期:** 2024−12−04
基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD2200502-04)，国家自然科学基金项目(32160366)。
第一作者: 王正婷。主要研究方向：林分生长模型研究。Email：wztxjau@163.com 地址：830052 新疆乌鲁木齐市农东大东路 311 号新疆农业大学林学与风景园林学院。
责任作者: 向玮，教授。主要研究方向：林分生长模型研究。Email：wxiang@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

Xinjiang, scientific management, and the achievement of regional carbon neutrality. [**Method**] Based on the data from 150 sample plots of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* natural forests in Xinjiang, we systematically assessed the carbon sink potential of stand under different stand conditions by estimating the parameters of stand basal area and carbon storage growth model, and solving the optimal stand density index using the golden section method. [**Result**] (1) The established stand dominant height model (R^2 = 0.965) divided the *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* forest sample plots into five site grades (I−V), and the number of sample plots under each grade was 15, 30, 60, 27, 18, respectively. (2) The growth models of stand basal area and carbon storage had good fitting accuracy, in which the basal area model R^2 = 0.936 (RMSE = 2.931 m^2/(ha·year), rRMSE = 0.134) and the carbon storage model R^2 = 0.861 (RMSE = 5.488 t/(ha·year), rRMSE = 0.164). (3) When the age was fixed, stands with better stand quality had higher carbon sink potential, and stands with poor stand quality had higher potential for enhancement. At the base age, the carbon storage of site grades I−V was 149.487, 143.191, 138.103, 122.681, 116.196 t/ha, and the optimal stand densities corresponded to 1 022, 1 166, 1 343, 1 568, and 1 862 tree/ha, respectively. (4) With the growth of forest age, the carbon sink potential of each grade showed a decreasing trend, among which the decay rate was the largest in young forest stage, and slowed down after the middle-aged forest; the quality of stand was positively correlated with carbon storage, but the low stand quality had a higher density of regulating space. [**Conclusion**] Stand quality classification can effectively characterize the differences in carbon sink potential of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* natural forests, and it is recommended to focus on strengthening the precise control of young forest stage of medium stand quality stands (grade III), which accounts for 40% of the total samples, in order to fully explore its potential for carbon sink enhancement.

Key words: carbon storage growth model; carbon sink potential; *Picea schrenkiana* var. *tianschanica*; site grade

立地生产力是制定森林经营方案的关键量化指标[1]，对于森林的可持续经营具有重大意义[2−3]。森林碳汇作为能够反映生产力的指标，与立地类型和立地质量密切相关[4−5]。在全球气候变暖和我国“双碳”政策背景下，评估森林碳汇已成为研究热点。目前国内外评估森林碳汇的方法主要分为两大类：碳储量变化法和模型模拟法[6−7]。碳储量变化法通过定量核算碳储量及碳汇贡献程度来进行评估[8−9]。例如，基于连续清查样地的方法[10−11]和利用二类调查数据的蓄积量扩展因子法[12]。模型模拟法包括多种类型的模型[13]，如基于树木生长规律的生长模型[14]、遥感模型[15]、基于生态系统的过程模型[16]等。这两类方法计算得出的碳汇及其潜力，往往未能充分考虑立地条件的多样性或差异性[17]。同一树种在不同区域的碳汇估计结果会随立地质量、气候条件的不同而变化[18]，忽略立地质量差异的碳汇估算方式必然是粗略且不精准的。因此，深入揭示不同立地条件下的森林碳汇及其潜力的变化规律，是当前亟待解决的重要科学问题。

天山云杉（*Picea schrenkiana* var. *tianschanica*）作为新疆森林生态的基石，以其独特的生态适应性和生长特性，在新疆天山地区发挥着重要的生态功能[19]。因其林分结构与年龄组成复杂，目前还没有统一的方法对天山云杉林的立地质量进行划分。而立地质量是对立地条件在促进植被生长方面适宜性的总结与分类[20]，当以森林生产力作为森林经营目的时，立地质量的划分以及不同立地条件下的森林碳汇评估显得尤为重要[21−22]。有研究采用林分优势高等级代替立地质量分级[23−24]，量化立地条件对林木生长的影响。为进一步解释不同立地条件下各林分碳汇及其潜力的变化，对与立地质量有关的变量或参数，可通过分级构造哑变量来反映立地质量的多样性[25−26]。此外，也有研究表明，通过立地分类和生产力计算[27]，能够对森林碳汇潜力进行更加科学和精准的估算[28]。因此，结合立地质量估计碳汇是掌握新疆天山云杉天然林碳汇潜力的关键。

鉴于此，本研究以新疆天山云杉天然林为研究对象，构建立地条件约束的林分优势高生长模型，划分立地等级，将其作为哑变量，进一步构建林分断面积和林分碳储量生长模型。根据模型参数的估计值，采用黄金分割法计算最优林分密度指数，从而量化林分的碳汇潜力。本研究旨在精准掌握新疆天山云杉林的碳汇潜力现状，为缓解全球气候变暖、实现碳中和目标提供重要的科学依据。

1 研究区概况

研究区位于新疆天山山脉中部(81°37′～91°33′E，43°43′～44°34′N)。海拔高度为 1 700～3 200 m。年降水量 550～700 mm，年平均气温约 3 ℃，典型的温带大陆性气候。土壤母质主要为黄土状物质和钙质风化物，其土壤类型为普通灰褐色森林土[29]。森林生长状况较好，形成了连续的带状分布，乔木以天山云杉为主，还有少量的山杨(*Populus davidiana*)、花楸(*Catalpa ovata*)、山柳(*Salix pseudotangii*)等。林下灌木较少，主要有野蔷薇(*Rose multiflora*)、小叶忍冬(*Lonicera microphylla*)等。

2 研究方法

2.1 样地基本情况

本研究样地位于新疆天山山脉，设置 72 块 0.08 hm^2 样地，78 块 0.09 hm^2 样地，共计 150 块。林分类型均为天山云杉天然纯林。对样地进行每木检尺，使用胸径尺在树干高度 1.3 m 处测量胸径，布鲁莱斯测定树高，记录树种、树高、胸径、冠幅等信息。根据样地每木检尺数据统计各林分因子，包括林分优势高、林分断面积、林分平均胸径、林分密度和林分密度指数。林分年龄是通过钻取每个样地 3 株平均木树干 1.3 m 处的年轮样芯，经交叉定年后取算术平均值。林分优势高(H)和林分密度指数(S)分别采用式(1、2)[30]和式(3)[31]计算。

$$H = \sum_{i=1}^{N_{ALT}} H_i / N_{ALT} \tag{1}$$

$$N_{ALT} = 160A - 0.6 \tag{2}$$

$$S = N(D_g / D_0)^{1.605} \tag{3}$$

式中：N_{ALT} 为所选的最高树的林木株数，根据计算结果向下取整；H_i 为所选的第 i 株最高树的树高；A 为样地面积；D_g 为平均胸径；D_0 为基准胸径，根据样地中优势木分布频数最多的胸径，取整后确定基准胸径为 20 cm；N 为林分每公顷株数。

样地林分地上平均碳储量的计算方法如下。(1)对于样木数据中存在的个别树高缺失值，采用树高−胸径曲线模型[32]计算并补充单株树高。(2)使用单木生物量模型[33]计算每个样地的单木地上生物量。(3)将地上生物量与天山云杉的含碳率相乘，得到林分地上碳储量，累加得到样地总的林分地上碳储量。含碳率[34]取 0.52。(4)根据样地面积，把样地林分地上碳储量转化为每公顷林分碳储量。林分因子概况见表 1。

2.2 基于林分优势高的立地等级划分

立地条件约束的树高生长分级[20]具体为确定与林分优势高生长强相关的立地因子，将立地因子进行分级后，各因子在不同水平组合得到不同立地元素[1]。选用 Richards 方程[35]作为林分优势高的基础模型，利用最小二乘法拟合，建立含哑变量的林分优势高生长模型。

$$H = 1.3 + \left[a + \sum_{m=1}^{l}(m-1)dL_m\right](1 - e^{-bT})^c \tag{4}$$

式中：T 为林分年龄；a，b，c 为模型参数；d 为参数级距；$L_m = 1$ 表示该样地属于立地等级 m，$L_m = 0$ 表示该样地不属于立地等级 m；m 取 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ，l 为立地水平总数。

相同的立地元素为一个建模单元，针对特定的建模单元，计算其最小离差平方和，反复迭代直至稳定为一个分级。参考以往研究[20,22,24−25]和实际应用需要，将天山云杉天然林样地划分为 5 个立地等级。

2.3 碳汇潜力的计算

碳汇潜力(carbon sink potential，CSP)是指给定的林分类型 F 和立地等级 L，当林分年龄 T 为唯一值，林分碳储量仅取决于林分密度指数 S。因此，在给定的林分密度指数 S 区间寻求最大目标函数，使得年龄 T 时碳汇最大。详细计算步骤如下。首先，确定每个样地的立地等级 L 和林分类型 F；其次，给定各林分类型和立地等级对应的生长模型及参数估计结果；最后，给定所要计算的特定林分年龄 T_0，给定林分密度指数区间，范围[24]为 30～3 000 株/hm^2，进

表 1 天山云杉天然林样地林分因子概况

Tab. 1 Statistics of stand factors in natural *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* samples plots

林分因子	平均值	标准差	最小值	最大值
林分平均年龄/a	96	41	14	188
林分平均碳储量/(t·hm^{-2})	101.85	52.80	6.38	328.40
林分优势高/m	26.81	6.67	6.89	40.43
林分断面积/(m^2·hm^{-2})	28.72	12.43	1.75	61.84
林分密度指数/(株·hm^{-2})	732	332	56	202 5

行模型迭代。此时，碳储量生长量仅取决于林分密度指数，寻找一个最合理的林分密度指数 S_{opt} 使其达到最大，该最大值就是碳汇潜力。

$$B = f_B(T,S,\Phi_B,|F,L) \tag{5}$$

$$C = f_C(T,S,\Phi_C,|F,L) \tag{6}$$

$$C_I = f_C(T_0,S,\Phi_B,\Phi_C|F,L) \tag{7}$$

$$CSP = \max C_I = f(T_0,S_{opt},\Phi_B,\Phi_C|F,L) \tag{8}$$

$$S_{opt} \in [S_{min},S_{max}] \tag{9}$$

式中：B 为林分断面积；C 为林分碳储量；C_I 为碳储量生长量；f_B 和 f_C 分别为林分断面积、林分碳储量的生长函数；Φ_B 和 Φ_C 分别是断面积模型、碳储量模型的参数值。S_{min} 和 S_{max} 为林分密度的搜索区间。

2.4　碳汇及可提升空间

林分碳汇（carbon sink）是根据林分的林龄、林分密度指数和立地等级，结合林分碳储量模型计算得出下一年林分碳储量，与当年碳储量相减得到当前年龄的林分碳汇。计算过程参考 Fu 等[22,36]研究。碳汇潜力往往高于实际碳汇，计算碳汇可以掌握碳汇潜力和实际碳汇的差距，即碳汇的可提升空间。

2.5　模型建立

林分断面积（B）模型和林分碳储量（C）模型均选用唐守正[37]的全林整体模型。

$$B = a_i[1-\exp(-b_i(S/1\,000)^{c_i}T)]^{d_i}+\varepsilon_B \tag{10}$$

$$C = a_i[1-\exp(-b_i(S/1\,000)^{c_i}T)]^{d_i}+\varepsilon_C \tag{11}$$

式中：a_i、b_i、c_i、d_i 分别为各生长模型在等级 i 上的待估参数值，i 取 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ。ε_B 和 ε_C 为误差项。

2.6　基准年龄与龄组

基准年龄指林分生长趋于稳定时的年龄[38]。根据地位指数表编制技术规程[39]，天山云杉林起源为天然林，本研究中天山云杉的基准年龄定为 80 年[40]。本研究龄组划分[41]：幼龄林小于 60 年，中龄林 60 ~ 100 年，近熟林 100 ~ 120 年，成熟林 120 ~ 160 年，过熟林大于 160 年。

2.7　模型评价与数据处理

分别利用均方根误差（RMSE）、相对均方根误差（rRMSE）和决定系数（R^2）来评价模型拟合效果。另外，本研究的数据预处理、模型拟合及运算均在 R4.3.0 中进行，主要使用的 R 包为 forstat[42]。

3　结果与分析

3.1　立地等级划分及模型拟合结果

基于样地数据，对林分优势高模型、断面积模型和碳储量生长模型进行拟合，得到参数估计值如表 2 所示。参数估计值均在 0.05 水平下显著。观察模型评价指标，林分优势高模型、断面积模型和碳储量模型的 R^2 分别为 0.965、0.936 和 0.861，RMSE 分别为 1.230、2.931 和 5.488 t/(hm^2·a)，rRMSE 分别为 4.587、0.134 和 0.164，3 个模型的拟合结果均表现良好，说明模型的预测准确度高，能够很好解释模型实测数据中的变异性。

建立的林分优势高生长模型可以很好地将天山云杉样地划分为 5 个立地等级（图 1）。分级后各立地等级下（Ⅰ—Ⅴ）的样地数量分别为 15、30、60、27、18 个。其中立地等级Ⅰ的立地质量最好，地位指数为 33.28 m，立地等级Ⅱ—Ⅴ的地位指数依次为 29.87、26.45、23.04、19.62 m，指数级距约为 3.42。

3.2　碳汇潜力、碳汇及可提升空间

各立地等级中，幼林龄林分的碳汇及碳汇潜力与实际碳汇的差异较大，中龄林、近熟和成熟阶段，差异逐渐减小（图 2）。这表明幼龄林的固碳能力远高于成熟林。此外，碳汇潜力始终高于实际碳汇，其与实际碳汇之间的差距在幼龄阶段较大，随着林龄

表 2　模型的参数估计与拟合结果

Tab. 2　Parameter estimation and fitting results of models

模型参数		优势高模型			断面积模型				碳储量模型			
		a	b	c	a	b	c	d	a	b	c	d
立地等级	Ⅰ	44.456	0.005	0.804	42.937	0.032	4.139	0.213	539.604	0.29e^{-4}	11.327	0.103
	Ⅱ	37.887			39.568				511.800			
	Ⅲ	35.258			36.23				499.982			
	Ⅳ	30.629			32.892				450.428			
	Ⅴ	25.465			29.553				421.562			
决定系数 R^2		0.965			0.936				0.861			
均方根误差 RMSE		1.230			2.931				5.488			
相对均方根误差 rRMSE		4.587			0.134				0.164			

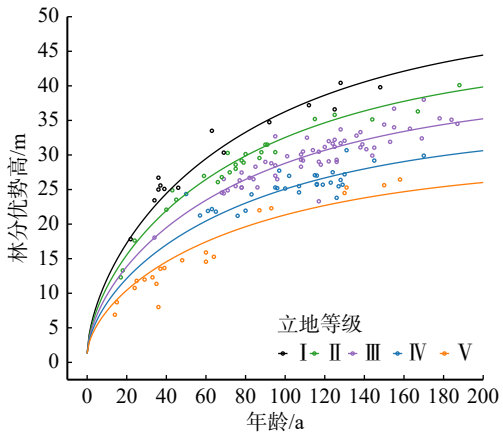


图 1 天山云杉林的 5 个立地等级

Fig. 1 Five site grades of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* forest

增加，碳汇逐渐接近碳汇潜力。在相同立地等级下，幼龄林时碳汇潜力下降趋势较快；中龄林、近熟和成熟阶段，随着林分年龄增加，碳汇潜力下降趋势逐渐变缓。在相同年龄下，立地等级Ⅰ—Ⅴ对应的碳汇潜力和其与碳汇之间的差异总体随着立地等级的升高呈现下降趋势，且立地质量越好的林分其碳汇潜力越高。基准年龄时，立地质量差的林分则拥有更高的可提升空间。

3.3 基准年龄时的碳汇潜力分析

在基准年龄（T = 80）时对应的碳汇潜力、林分碳储量和林分密度见表 3。可以看出，碳汇潜力对立地质量正向响应。立地等级Ⅰ的立地质量最好，其碳汇潜力为 1.054 t/(hm^2·a)，对应的林分碳储量为 149.487 t/hm^2；立地等级Ⅴ的立地质量最差，其碳汇潜力为 0.820 t/(hm^2·a)，仅占立地等级Ⅰ的 78%，相应的，其林分碳储量也最小，为 116.196 t/hm^2。可以看出，碳汇潜力越大的林分其相应的林分碳储量就越大。此外，立地等级Ⅰ到立地等级Ⅴ的最优林分密度指数依次为 1 022、1 166、1 343、1 568、1 862 株/hm^2，可以看出，立地质量越差的林分，其最优林分密度指数越高。

4 讨 论

目前，已经有许多模型用于计算林分生产力[16,43]，但很少应用于天山云杉的研究。本研究考虑林分密度对树木生长的影响，建立林分优势高、断面积和碳储量生长模型对新疆天山地区林分进行拟

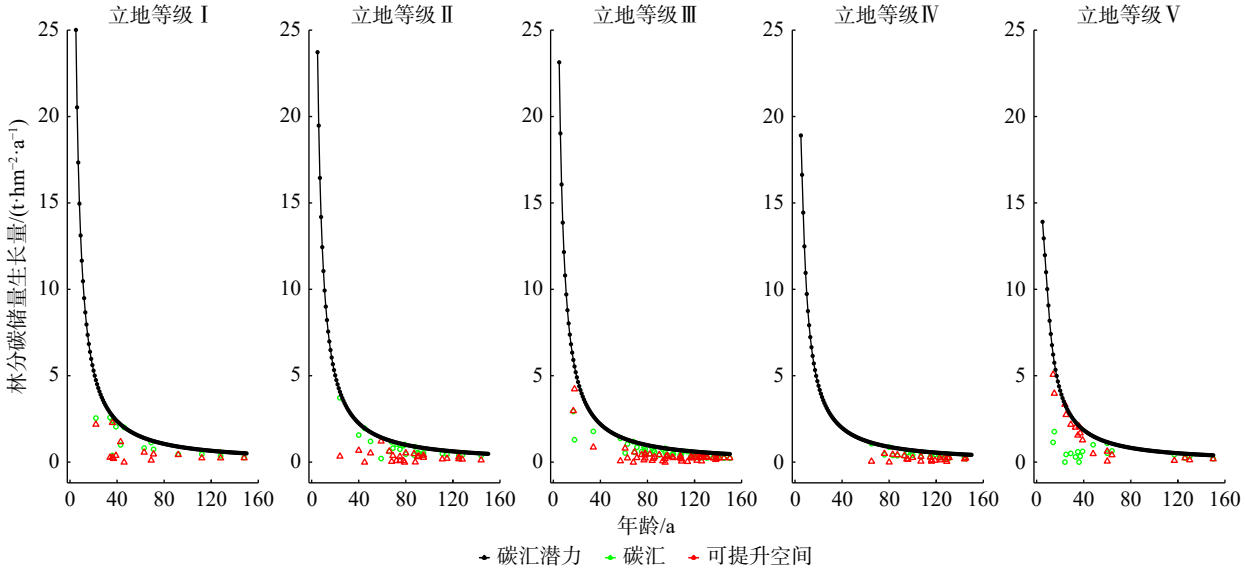


图 2 天山云杉林不同立地等级碳汇潜力、碳汇及可提升空间

Fig. 2 Carbon sink potential, carbon sink and room for improvement of different site grades of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* forest

表 3 不同立地等级碳汇潜力（基准年龄 80 年）

Tab. 3 Carbon sink potential at different site grades (base age = 80 years)

立地等级	林分碳储量/(t·hm^{-2})	碳汇潜力/(t·hm^{-2}·a^{-1})	林分密度/(株·hm^{-2})
Ⅰ	149.487	1.054	1 022
Ⅱ	143.191	1.010	1 166
Ⅲ	138.103	0.974	1 343
Ⅳ	122.681	0.865	1 568
Ⅴ	116.196	0.820	1 862

合。相较于其他定量计算碳汇[15−16]的方法，本研究模拟结果更加准确，同时也更能解释天山云杉林在生长方面的生物学意义。

相同立地等级下，随着林分年龄增加，碳汇增长速度逐渐减缓。这是因为幼龄林的碳储量累积速率较快，从而具有较高的碳汇，中龄林时碳储量累积速率逐渐达到峰值[44]，碳汇增长速度减小。这种趋势与林分蓄积生产力[20,25]、生物量潜在生产力[43]的变化趋势一致。碳汇潜力随着年龄的增大而减小。幼龄林阶段碳汇潜力较高，是由于该阶段的乔木数量较多或林分密度较高。碳汇潜力总是大于实际碳汇，但通过采取科学的林分管理措施，如抚育间伐，可以使林分的现实碳汇无限接近或达到碳汇潜力，这与生物量生产力[43]的变化相同。在森林经营过程中，应重点关注幼龄林的抚育间伐，通过适度调整林分密度，最大限度发挥林分的生产潜力，从而提升林分的碳汇能力。总体来看，立地质量好的林分在建模数据中占比为 10%，而立地质量中等的林分占比最大，为 40%，其碳汇潜力仅次于高立地质量林分。因此，在实际森林经营中，应优先关注立地质量中等的林分，提高森林整体质量和区域碳汇能力。此外，合理利用立地质量好的林分潜力，配合精准管理措施，也能够显著提升区域森林的生态功能。

不同立地等级下，立地等级越高(即立地质量越好)，其碳汇潜力越低，这与蓄积潜在生产力[23,45]的变化规律相似。而立地质量较差的林分，其潜在生产力有限，但通过合理的经营管理措施(如调控林分密度、提升土壤养分等)，仍具有较大的碳汇提升空间。由此可见，碳汇潜力的可提升空间反映了林分的改良潜力，较高的可提升空间意味着林分可通过管理干预提高现实碳汇；而较低的可提升空间则表明林分碳汇已接近其碳汇潜力，改进空间有限。

基准年龄($T=80$)时，碳汇潜力随立地质量的提升呈现正向响应关系。这一结果表明，良好的立地条件(如适宜的水分、养分、气候和土壤环境)可以提升天山云杉天然林的固碳能力。碳汇潜力较大的林分，其林分碳储量也相应更高。可见，碳汇潜力不仅反映了林分的碳吸收速率，还直接决定了林分的碳储量积累。因此，提高林分的碳汇潜力对于实现碳储量的稳步增长至关重要。研究进一步说明，立地质量越差的林分，其最优林分密度指数越高。在立地条件较差的地区，为了弥补自然条件的限制，应通过适度增加林分密度来提升林分的整体生产力和碳汇能力。立地质量差的林分通常受限于水分、养分等资源供给能力，个体树木的生长速度较慢，增加林分密度可以在一定程度上提高林分的光合作用效率和固碳能力。然而，过高的林分密度可能导致资源竞争加剧，甚至影响森林健康和长期稳定性，因此在实际的森林经营中，需要结合林分特性，优化密度调控。

5　结　　论

本研究利用林分优势高生长模型将立地等级划分为 5 个等级，并基于 Richard 模型，进一步建立了包含立地等级哑变量的林分断面积、林分碳储量生长模型。在模型参数估计的基础上，采用黄金分割法计算林分碳汇潜力。研究发现，结合立地质量分级可以有效分析天山云杉天然林的碳汇现状和提升潜力。中等立地质量林分占样本总量 40%，幼龄林阶段的样地碳汇提升潜力较大，可以采取适当的抚育管理措施，如调控林分密度，延长轮伐期来加强该类型林分的经营。

参　考　文　献

[1] 雷相东, 唐守正, 符利勇, 等. 森林立地质量定量评价: 理论、方法、应用 [M]. 1 版. 北京: 中国林业出版社, 2020.
Lei X D, Tang S Z, Fu L Y, et al. Quantitative evaluation of forest site quality: theory, method, application[M]. 1st ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2020.

[2] 张会儒, 雷相东, 张春雨, 等. 森林质量评价及精准提升理论与技术研究 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 1−18.
Zhang H R, Lei X D, Zhang C Y, et al. Research on theory and technology of forest quality evaluationand precision improvement[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 1−18.

[3] 何静, 李新建, 朱晋梅, 等. 基于最粗优势木胸径生长的湖南栎类天然林立地质量评价模型 [J]. 林业科学, 2022, 58(8): 89−98.
He J, Li X J, Zhu J M, et al. Site quality evaluation model of natural quercus forests in Hunan based on the growth of the thickest dominant tree diameter at breast height[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(8): 89−98.

[4] Gren I M, Amuakwa M F. Multifunctional forestry and interaction with site quality[J]. Forests, 2020, 11: 29.

[5] Giberti G S, Wellstein C, Giovannelli A, et al. Annual carbon sequestration patterns in trees: a case study from scots pine monospecific stands and mixed stands with sessile oak in central Poland[J]. Forests, 2022, 13(4): 582.

[6] 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 J H, Tian Y, Li Q, et al. The current and potential carbon sink in forest ecosystem in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(9): 3442−3457.

[7] 刘坤, 张慧, 孔令辉, 等. 陆地生态系统碳汇评估方法研究进展 [J]. 生态学报, 2023, 43(10): 4294−4307.
Liu K, Zhang H, Kong L H, et al. An overview of terrestrial ecosystem carbon sink assessment methods towards achieving carbon neutrality in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,

43(10): 4294−4307.

[8] 侯瑞萍, 夏朝宗, 陈健, 等. 长江经济带林地和其他生物质碳储量及碳汇量研究 [J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9483−9498.
Hou R P, Xia C Z, Chen J, et al. Carbon storage and carbon sink of forest land and other biomass in the Yangtze River Economic Belt[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9483−9498.

[9] Yao L, Liu T, Qin J, et al. Carbon sequestration potential of tree planting in China[J]. Nature Communications, 2024, 15(1): 8398.

[10] 任云卯, 温志勇, 王敏男, 等. 北京市森林碳汇能力评价 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(12): 108−119.
Ren Y M, Wen Z Y, Wang M N, et al. Evaluation of forest carbon sequestration capacity in Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(12): 108−119.

[11] 张煜星, 王雪军. 1973—2018 年我国桉树人工林生产力及碳汇能力 [J]. 林业科学, 2023, 59(3): 54−64.
Zhang Y X, Wang X J. Productivity and carbon sink capacity of eucalyptus plantations in China from 1973 to 2018[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(3): 54−64.

[12] Ma F Z , Zhang W W, Yan J L, et al. Early advantage for carbon sequestration of monocultures and greater long-term carbon sink potential of broad leaf mixed forests: 20-year evidence from the Shanghai Green Belt[J]. Ecological Indicators, 2024, 159: 111655.

[13] Zhao D, Cai J, Shen S J, et al. Nature-based solutions: assessing the carbon sink potential and influencing factors of urban park plant communities in the temperate monsoon climate zone[J]. Science of the Total Environment, 2024, 950: 175347.

[14] Qin J, Liu P, Martin A R, et al. Forest carbon storage and sink estimates under different management scenarios in China from 2020 to 2100[J]. Science of the Total Environment, 2024, 927: 172076.

[15] 朱宁宁, 杨必胜, 董震, 等. 森林植被碳储量的遥感估测流程与方法 [J]. 遥感学报, 2025, 29(1): 134−146.
Zhu N N, Yang B S, Dong Z, et al. A novel framework for forest vegetation carbon stock estimation based on remote sensing[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2025, 29(1): 134−146.

[16] 黄玫, 石岳, 孙文娟, 等. 云南省生态系统碳汇及其对碳中和的贡献 [J]. 植物生态学报, 2024, 48(10): 1243−1255.
Huang M, Shi Y, Sun W J, et al. Terrestrial carbon sink in Yunnan Province and its contribution to carbon neutrality[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(10): 1243−1255.

[17] 王绪高, 吕晓涛, 郗凤明, 等. 东北陆地生态系统碳汇现状与研究展望 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(9): 2322−2337.
Wang X G, Lü X T, Xi F M, et al. Current status and research prospects of terrestrial ecosystem carbon sink in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(9): 2322−2337.

[18] Dian Y, Guo Z, Liu H, et al. A new index integrating forestry and ecology models for quantitatively characterizing forest carbon sequestration potential ability in a subtropical region[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111358.

[19] 安冉, 许芳泽, 邓祥鹏, 等. 林隙大小对天山云杉幼树更新的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(11): 23−32.
An R, Xu F Z, Deng X P, et al. Effects of gap size on regeneration of saplings in *Picea schrenkiana* in Xinjiang of northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(11): 23−32.

[20] 雷相东, 符利勇, 李海奎, 等. 基于林分潜在生长量的立地质量评价方法与应用 [J]. 林业科学, 2018, 54(12): 116−126.
Lei X D, Fu L Y, Li H K, et al. Methodology and applications of site quality assessment based on potential mean annual increment[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(12): 116−126.

[21] Pretzsch H, Hilmers T. Structural diversity and carbon stock of forest stands: tradeoff as modified by silvicultural thinning[J/OL]. European Journal of Forest Research, 2024: 1−22[2025−01−22]. https://doi.org/10.1007/s10342-024-01691-z.

[22] Fu L Y, Sharma R P, Zhu G Y, et al. A basal area increment-based approach of site productivity evaluation for multi-aged and mixed forests[J]. Forests, 2017, 8(4): 119.

[23] 罗光成, 雷相东, 史景宁, 等. 基于潜在生产力的吉林省长白落叶松人工林立地质量评价 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(1): 1−10.
Luo G C, Lei X D, Shi J N, et al. Site quality evaluation of *Larix olgensis* plantations based on potential productivity in Jilin Province of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(1): 1−10.

[24] Yang B, Ma R, Zhai J, et al. Stand spatial structure is more important than species diversity in enhancing the carbon sink of fragile natural secondary forest[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111449.

[25] 段光爽, 郑亚丽, 洪亮, 等. 基于潜在生产力的华北落叶松纯林和白桦山杨混交林立地质量评价 [J]. 林业科学, 2022, 58(10): 1−9.
Duan G S, Zheng Y L, Hong L, et al. A potential productivity-based approach of site quality evaluation for larch pure forest and birch-aspen mixed forest[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(10): 1−9.

[26] 吴璧芸, 雷相东, 何潇, 等. 长白山天然针阔混交林优势高估计方法及立地质量评价 [J]. 林业科学, 2024, 61(2): 85−92.
Wu B Y, Lei X D, He X, et al. Stand dominant height estimation methods and site quality assessment for natural mixed conifer-broadleaved forests in Changbai Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 61(2): 85−92.

[27] Xie D, Feng L, Yan X, et al. forestat: an R package for computing forest carbon sequestration and potential productivity[J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112477.

[28] Chisholm P J, Gray A N. Forest carbon sequestration on the west coast, USA: role of species, productivity, and stockability[J]. PLoS One, 2024, 19(5): e0302823.

[29] 席丽, 李思瑶, 夏晓莹, 等. 海拔、林龄和郁闭度对天山云杉林土壤肥力的影响 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(10): 2477−2485.
Xi L, Li S Y, Xia X Y, et al. Effects of altitude, stand age, and canopy density on soil fertility in *Picea schrenkiana* forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(10): 2477−2485.

[30] Zhou M, Lei X, Duan G, et al. The effect of the calculation method, plot size, and stand density on the top height estimation in natural spruce-fir-broadleaf mixed forests[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 453: 117574.

[31] Reineke L H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests[J]. Journal of Agricultural Research, 1933, 46: 627−638.

[32] 邓祥鹏, 许芳泽, 赵善超, 等. 基于贝叶斯法的新疆天山云杉树高−胸径模型研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(1): 11−20.
Deng X P, Xu F Z, Zhao S C, et al. Tree height-DBH model for *Picea schrenkiana* in Tianshan Mountain, Xinjiang of northwestern China based on Bayesian method[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(1): 11−20.

[33] 张绘芳, 高亚琪, 朱雅丽, 等. 新疆雪岭杉生物量模型对比研究 [J]. 西北林学院学报, 2015, 30(6): 52−58.
Zhang H F, Gao Y Q, Zhu Y L, et al. A comparative study on biomass models for *Picea schrenkiana* in Xinjiang[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(6): 52−58.

[34] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
Li H K, Lei Y C. Assessment of forest vegetation biomass and carbon stocks in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.

[35] 何潇, 周超凡, 雷相东, 等. 长白落叶松人工林林分碳储量生长模型系研究 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(11): 1−10.
He X, Zhou C F, Lei X D, et al. Stand carbon stock growth model system for *Larix olgensis* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(11): 1−10.

[36] 孟宪宇, 葛宏立. 云杉异龄林立地质量评价的数量指标探讨 [J]. 北京林业大学学报, 1995, 17(1): 1−9.
Meng X Y, Ge H L. A new quantitative measure for evaluating site quality of uneven-aged *Picea* stands[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1995, 17(1): 1−9.

[37] 唐守正. 广西大青山马尾松全林整体生长模型及其应用 [J]. 林业科学研究, 1991, 4(增刊): 8−13.
Tang S Z. Establishment and application of an integrated standgrowth model of masson pine in Daqingshan[J]. Forest Research, 1991, 4(Suppl.): 8−13.

[38] 孟宪宇. 测树学 [M]. 3 版. 北京: 中国林业出版社，2006.
Meng X Y. Forest mensuration[M]. 3rd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006.

[39] 全国森林资源标准化技术委员会. 地位指数表编制技术规程: LY/T 2415—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
National Technical Committee for Standardization of Forest Resources. Technical regulations for drafting of site index table: LY/T 2415−2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

[40] 丁良忱, 刘萍. 天山中东部雪岭云杉林立地等级表的编制 [J]. 新疆农业科学, 1986(6): 25−29.
Ding L C, Liu P. Compilation of a classification table for *Picea schrenkiana* forests in the central-eastern Tianshan Mountains[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 1986(6): 25−29.

[41] 全国森林资源标准化技术委员会. 森林资源规划设计调查技术规程: GB/T 26424—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
National Technical Committee for Standardization of Forest Resources. Technical regulations for inventory for forest managenment planning and design: LY/T 2908−2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.

[42] 何潇, 雷相东, 周超凡, 等. R 程序包 ForestStatTool 在林学单木和林分因子统计中的应用 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(10): 125−135.
He X, Lei X D, Zhou C F, et al. Application of R program package ForestStatTool in statistics of individual tree and stand factors in forestry[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10): 125−135.

[43] Yan X, Feng L, Sharma R P, et al. Evaluating forest site quality using the biomass potential productivity approach[J]. Forests, 2023, 15(1): 23.

[44] Li X, Aguila L C R, Wu D, et al. Carbon sequestration and storage capacity of Chinese fir at different stand ages[J]. Science of the Total Environment, 2023, 904: 166962.

[45] Liu X, Duan G, Chhin S, et al. Evaluation of potential versus realized site productivity of *Larix principis-rupprechtii* plantations across northern China[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 479: 118608.

（责任编辑　孟　瑶　李　契
责任编委　张会儒）