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

# 天山云杉天然林优势高估计方法

冯垚 周梦丽 罗光成 许芳泽 陶然 向玮

# Estimation methods for dominant height in natural forest of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica*

Feng Yao, Zhou Mengli, Luo Guangcheng, Xu Fangze, Tao Ran, Xiang Wei

引用本文:
冯垚, 周梦丽, 罗光成, 许芳泽, 陶然, 向玮. 天山云杉天然林优势高估计方法[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(12):48–55. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250299
Feng Yao, Zhou Mengli, Luo Guangcheng, Xu Fangze, Tao Ran, Xiang Wei. Estimation methods for dominant height in natural forest of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12):48–55. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250299

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250299

**您可能感兴趣的其他文章**
**Articles you may be interested in**

基于不同立地等级的天山云杉天然林碳汇潜力
Carbon sink potential of natural forests of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* based on different site grades
北京林业大学学报, 2025, 47(4): 74–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240337

基于贝叶斯法的新疆天山云杉树高胸径模型研究
Tree height–DBH model for *Picea schrenkiana* in Tianshan Mountain, Xinjiang of northwestern China based on Bayesian method
北京林业大学学报, 2023, 45(1): 11–20. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220318

林隙大小对天山云杉幼树更新的影响
Effects of gap size on regeneration of saplings in *Picea schrenkiana* in Xinjiang of northwestern China
北京林业大学学报, 2023, 45(11): 23–32. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230116

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

不同优势木选取策略下赣南槠栲天然次生林立地质量评价方法比较
Comparison of site quality evaluation methods for natural secondary forest of *Castanopsis* spp. in southern Jiangxi Province of eastern China under different dominant tree selection strategies
北京林业大学学报, 2025, 47(11): 38–47. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250247

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
Site quality evaluation of *Larix olgensis* plantations based on potential productivity in Jilin Province of northeastern China
北京林业大学学报, 2025, 47(1): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240173

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250299

# 天山云杉天然林优势高估计方法

冯 垚[1,2] 周梦丽[3] 罗光成[2] 许芳泽[2] 陶 然[2] 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. 河南农业大学林学院，河南 郑州 450002）

**摘要:【目的】**为筛选天山云杉天然林最优的优势高估计方法，本研究比较分析了 7 种方法的优劣，以期为区域森林立地质量评价提供科学依据。**【方法】**基于新疆天山林区 3 块 1 $hm^2$ 样地，以传统方法、调整最大树法、小样地估计和 U 估计法为基础，采用胸径最大树与树高最高树两种优势木选择策略，构建 7 种林分优势高估计方法。通过相关性与差异显著性检验，分析各方法间的关系；设置不同子样地面积和密度梯度，确定优势高估计趋于稳定的阈值范围；采用偏差和分层标准差量化不确定性，并与林分蓄积、平均胸径、生物量等因子进行相关性分析，综合筛选最优估计方法。**【结果】**(1)各优势高估计方法的相关系数在 0.76～0.99 之间，且表现出显著差异；(2)优势高趋于稳定的样地面积阈值为 0.06～0.13 $hm^2$，林分密度阈值为 500～1 000 株/$hm^2$；(3)以最高树为选择策略的调整最大树法(5.99)和 U 估计方法(6.02)产生的不确定性最小；(4)各优势高估计方法与林分因子间有强相关性，以最高树为选择策略的调整最大树法为天山云杉天然林优势高估计的最优方法。**【结论】**本研究确定的调整最大树法(最高树策略)适用于天山云杉天然林优势高估计，可为该区域天然林立地质量评价提供技术支撑。

**关键词：**林分优势高；立地生产力；天山云杉；立地质量评价
**中图分类号：**S758 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)12−0048−08
**引文格式：**冯垚，周梦丽，罗光成，等. 天山云杉天然林优势高估计方法 [J]. 北京林业大学学报，2025，47(12)：48−55. Feng Yao, Zhou Mengli, Luo Guangcheng, et al. Estimation methods for dominant height in natural forest of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12): 48−55.

## Estimation methods for dominant height in natural forest of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica*

Feng Yao[1,2] Zhou Mengli[3] Luo Guangcheng[2] Xu Fangze[2] Tao Ran[2] 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. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

**Abstract:** [**Objective**] To select the optimal dominant height estimation method for natural *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* forests in the Tianshan Mountains, this study compared seven methods to provide a scientific basis for regional forest site quality evaluation. [**Method**] Based on three 1 ha sample plots in the Tianshan region of Xinjiang, seven stand dominant height estimation methods were constructed using the traditional method, modified largest tree method, small plot estimation, and U-estimation method as foundations, combined with two dominant tree selection strategies (largest DBH trees and tallest trees). The relationships among methods were analyzed through correlation and significance difference tests.

**收稿日期:** 2025−08−06 **修回日期:** 2025−12−06
**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:** 冯垚。主要研究方向：林分生长模型。Email: yfeng_7@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，博士生导师，教授。主要研究方向：林分生长模型。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

Different sub-plot sizes and density gradients were established to determine the threshold ranges where dominant height estimation stabilized. Uncertainty was quantified using bias and stratified standard deviation, and correlation analysis with stand volume, mean DBH, biomass, and other factors was conducted to comprehensively select the optimal method. [**Result**] (1) Correlation coefficients among the different dominant height estimation methods ranged from 0.76 to 0.99, with significant differences detected among them. (2) The threshold plot area for stable dominant height estimation was 0.06−0.13 ha, and the stand density threshold was 500−1 000 tree/ha. (3) The modified largest tree method (5.99) and U-estimation method (6.02) using the tallest tree selection strategy produced the smallest uncertainty. (4) All dominant height estimation methods showed strong correlations with stand factors, and the modified largest tree method (tallest tree strategy) was identified as the optimal method for natural *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* forests. [**Conclusion**] The modified largest tree method (tallest tree strategy) identified in this study is suitable for dominant height estimation in natural *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* forests and can provide technical support for site quality evaluation of natural forests in this region.

**Key words:** stand dominant height; site productivity; *Picea schrenkiana* var. *tianschanica*; site quality evaluation

衡量立地生产力是森林经营的重要基础，而立地质量评价是其中的核心环节[1−2]。林分优势高因对密度竞争不敏感且与立地质量密切相关[3]，因此常被用作反映立地生产力的重要指标[4]，在森林产量预测和生物量估计中发挥着重要作用[5]。对于同龄林而言，通常采用立地指数法来评价立地质量，即依据优势高与林分年龄的关系，选定基准年龄来计算立地指数[6−7]。然而，在异龄林中，由于林分年龄难以确定，因此常以基准胸径替代基准年龄进行立地质量评价[8]。尽管这些方法存在一定局限性，但因其操作性强，仍是立地质量评价的主要手段[9]。

优势高的估计方法在不同地区存在差异。欧洲多采用每公顷 100 株胸径最大树的平均高作为优势高[10]，德国采用样地内胸径最大的 20% 树木的算术平均高作为优势高[11−13]，美国则将优势木或亚优势木的算术平均高视为优势高[14]。国内林分优势高的定义尚未形成统一标准，多数研究选择林分中 3 ~ 5 株胸径最大或树高最高的林木，以其算术平均高作为林分优势高[15]，也有研究提出取 2 株最高树与 1 株最大胸径树的平均高作为优势高[16]。

传统优势高估计方法易受样地面积和林分密度影响，导致结果不稳定[17]。为降低样地面积对优势高的影响，Rennolls[18]提出小样地法：在样地内随机设置 0.01 $hm^2$ 小样方，取其中树高最高或胸径最大林木的平均高作为优势高。但该方法需精确测定单株林木坐标，野外调查成本高、效率低[17]。为此，García 先后提出了 U 估计法（U-estimator，UE）[19]和调整最大树法（adjusted largest trees，ALT）[20]，这两种方法均不需要林木空间分布的具体信息，且通过数理统计修正即可获得近似无偏估计，实用性更强[17]，已有研究证实了这两种方法的有效性[17,21]。然而，但 Ochal 等[17]对挪威云杉（*Picea abies*）的研究发现，U 估计法虽受样地面积影响较小，但在低密度林分中会产生负偏差。由此可见，这些方法的适用性可能因地域和树种而异。

新疆天山云杉（*Picea schrenkiana* var. *tianschanica*）是天山地区森林生态系统的建群种，在水源涵养、水土保持及生物多样性维持中发挥着关键作用[22−23]。然而，针对天山云杉天然林优势高估计方法的系统性研究仍为空白，制约了该区域立地质量的精准评价。

本研究以新疆天山云杉天然林为研究对象，基于样地数据，比较不同优势高估计方法间的差异，量化样地面积和林分密度对优势高值产生的不确定性，检验优势高与立地生产力评价指标的相关性，旨在筛选出最优的优势高估计方法，以期为天山云杉天然林的林分优势高估计提供科学依据。

## 1　研究区概况

本研究选取新疆维吾尔自治区昌吉市的新疆农业大学实习林场（43°16′ ~ 43°26′N，86°46′ ~ 86°57′E）为研究区。该林场位于头屯河上游，地势南高北低，总面积约 10 047 $hm^2$，其中林地覆盖面积达 5 110 $hm^2$。该区域属于典型的温带大陆性气候，年降水量相对丰富，介于 550 ~ 700 mm 之间，且主要集中在夏季（占全年降水量的 65% 以上）。年平均气温约为 3 ℃，昼夜温差显著。

## 2　数据与方法

### 2.1　数据来源

2021 年，在海拔梯度 1 870 ~ 1 990 m 的范围内

连续设置 3 块 100 m × 100 m 的天山云杉天然纯林样地，坡向均为西北，坡度分别为 21°、20°和 19°。调查每块样地的立地因子，包括经纬度、海拔、坡度、坡向和坡位等。同时，对样地内胸径大于 5 cm 的林木进行每木检尺，记录其胸径、树高及坐标等信息（表 1）。

### 2.2 不同样地面积和林分密度模拟

基于 Ochal 等[17]提出的方法，利用 R 软件，将树木坐标信息随机生成面积为 0.01、0.02、0.03、……、0.5 $hm^2$ 的正方形小样地，每个面积随机重复 300 次，共生成 45 000 块小样地。具体步骤如下。

（1）根据小样地的面积（$A$）计算样地边长（$L$）。

$$L = 100\sqrt{A} \tag{1}$$

（2）在 1 $hm^2$ 样地中随机生成小样地的中心点（$X_c$，$Y_c$）。

$$X_c \in \left(\frac{L}{2},\ 100-\frac{L}{2}\right),\quad Y_c \in \left(\frac{L}{2},\ 100-\frac{L}{2}\right) \tag{2}$$

（3）如果坐标为$x_i$和$y_i$的林木满足式（3），则统计该样地内的林木数量，作为随机生成小样地中的林木数。

$$\left(X_c-\frac{L}{2}\right)<x_i\leqslant\left(X_c+\frac{L}{2}\right),\quad \left(Y_c-\frac{L}{2}\right)<y_i\leqslant\left(Y_c+\frac{L}{2}\right) \tag{3}$$

### 2.3 优势高估计方法

目前常用的计算优势高的基础方法有以下 4 种[19−20]。

（1）传统方法：对于面积为 $A$（$hm^2$）的样地，其优势高定义为该样地内 100$A$ 株胸径最大或树高最高树木的算术平均高。

（2）调整最大树法：对于面积为 $A$（$hm^2$）的样地，优势高为样地内（1.6 × $A$ × 100 − 0.6）株胸径最大或树高最高树木的算术平均高。由于计算所得的树木数量可能为小数，因此取其最近的两个整数值，并通过线性插值法计算优势高。

（3）小样地估计法：将面积为 $A$（$hm^2$）的样地划分为 100$A$ 个面积为 0.01 $hm^2$ 的小样地，且小样地与大样地的直角坐标系保持一致。从每个 0.01 $hm^2$ 的小样地中选取 1 株胸径最大或树高最高的树木，以其算术平均高作为优势高。

（4）U 估计法：在面积为 $A$（$hm^2$）的样地中，从所有林木中抽取 $W$ 株形成子集，从每个子集中选取最高树木并计算其树高均值作为优势高。其中，$W = n/(100A)$，$n$ 为样地中的树木总量。$W$ 值为小数时，四舍五入取整。

上述 4 种基础方法结合最大胸径（C1）和最高树高（C2）两种优势木选择策略[24]，可归纳为 7 种具体方法（表 2）。

**表 1 新疆天山云杉天然林样地林分因子统计量**

Tab. 1 Statistics of stand variables for *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* natural forest sample plots

| 林分因子 | 样地号 | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| 林分平均胸径/cm | 19.5 | 23.1 | 24.6 |
| 林分平均高/m | 16.1 | 19.2 | 20.1 |
| 株数密度/（株·$hm^{-2}$） | 635 | 484 | 475 |
| 林分断面积/（$m^2$·$hm^{-2}$） | 26.13 | 27.30 | 29.80 |
| 林分蓄积量/（$m^3$·$hm^{-2}$） | 287.32 | 346.80 | 376.32 |
| 林分生物量/（t·$hm^{-2}$） | 131.63 | 142.04 | 155.94 |

### 2.4 林分平均高及林分密度计算

为探讨优势高与算术平均高和加权平均高之间的关系，分别对每个样地的算术平均高和加权平均高进行了计算。

$$H_{am} = \frac{\sum_{i=1}^{n'} h_i}{n'} \tag{4}$$

式中：$H_{am}$ 为算术平均高，$h_i$ 为第 $i$ 株树的树高，$n'$为林木株数。

$$H_{wm} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (B_{Ai} \times h_i)}{\sum_{i=1}^{n} B_{Ai}} \tag{5}$$

式中：$H_{wm}$ 为加权平均高，$B_{Ai}$为第 $i$ 株树的胸高断面积。

采用加权林分密度指数（$I_{SD}$）确定样地的林分密度[25]。

$$I_{SD} = N\left(\frac{D_g}{25}\right)^{1.605} \tag{6}$$

式中：$N$ 为每公顷林木株数，$D_g$ 为林分平方平均胸径。

### 2.5 优势高不确定性的量化

为消除样地面积和林分密度对不同优势高估计方法的影响，本研究首先分别量化了样地面积和林分密度所产生的不确定性。将样地以 0.01 $hm^2$ 为步长分为 50 组，同时将林分密度以 100 株/$hm^2$ 为步长分为 11 组[7]。由于无法直接测得“真实”优势高，我们采用间接指标：在每块 1 $hm^2$ 的样地内，随机抽取 100 个 0.01 $hm^2$ 的小样方，各选取其中胸径最大的 1 株树，并以这 100 株树的平均高作为该 1 $hm^2$ 样地的参考优势高（$H_{1ha}$）。随后，通过以下步骤量化面积和密度带来的不确定性[17]。

（1）按分组计算各个方法的优势高估计值（$H_{cal}$）与优势高参考值（$H_{1ha}$）之间的偏差。

$$e_k = \frac{\sum_{i=1}^{n_{plot}} (H_{cali} - H_{1ha})}{n_{plot}} \tag{7}$$

**表 2　优势高估计方法**

Tab. 2　Dominant height estimation methods

| 基础优势高估计方法 | 优势木选择策略 | 优势高计算公式 |
|---|---|---|
| 传统方法 | C1 | $H1=\frac{\sum_{i=1}^{n}(h_{DBH})_i}{n}$，$n=100A$ |
| | C2 | $H2=\frac{\sum_{i=1}^{n}h_i}{n}$，$n=100A$ |
| 调整最大树法 | C1 | $H3=\frac{\sum_{i=1}^{n}(h_{DBH})_i}{n}$，$n=1.6\times A\times 100-0.6$ |
| | C2 | $H4=\frac{\sum_{i=1}^{n}h_i}{n}$，$n=1.6\times A\times 100-0.6$ |
| 小样地估计法 | C1 | $H5=\frac{\sum_{i=1}^{a}(h_{DBH})_i}{a}$，$a\leqslant\frac{A}{100}$ |
| | C2 | $H6=\frac{\sum_{i=1}^{a}h_i}{a}$，$a\leqslant\frac{A}{100}$ |
| U估计法 | C1 | $H7=\frac{\sum_{i=1}^{w}h_i}{w}$，$w=C_N^m$，$m=\frac{N}{100A}$ |

注：C1. 基于最大胸径的选择策略；C2. 基于最高树高的选择策略；H1 ~ H7. 7种优势高估计算法；*n*. 优势木株数；*A*. 样地面积；$h_{DBH}$.依据胸径选定的优势木树高；$h_i$. 优势木*i*的树高；*a*. 非空的 0.01 $hm^2$小样地数量；*w*. 从*N*株林木中选取*m*株林木形成的子集组合数；*m*. 每个子集中包含的元素数量；*N*. 样地林木总株数。

式中：$e_k$ 为第 $k$ 组的偏差，$H_{cali}$ 为各方法计算的第 $i$ 个样地的优势高值，$n_{plot}$ 为每组的样地个数。

（2）计算各组组内标准偏差。

$$S_{ezn}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{plot}}(e_{ki}-e_k)^2}{n_{plot}-1}} \tag{8}$$

式中：$S_{ezn}$ 为组内标准偏差，$e_{ki}$ 为第 $k$ 组第 $i$ 块样地优势高值与参考值之间的差值。

（3）计算各组的组间标准偏差。

$$S_{ezj}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{group}}\left(e_k-\frac{e_k}{n_{group}}\right)^2}{n_{group}-1}} \tag{9}$$

式中：$S_{ezj}$ 为组间标准偏差，$n_{group}$为依据样地面积或林分密度所划分的组数。

（4）通过式（10）来量化样地面积和林分密度产生的不确定性[26]。

$$U=\left(1+\frac{1}{n_{group}}\right)S_{ezj}+S_{ezn} \tag{10}$$

式中：$U$ 为样地面积或林分密度产生的不确定性。

（5）根据式（11），计算总的不确定性（$U_{total}$）。

$$U_{total}=\sqrt{U_A^2+U_{SDI}^2} \tag{11}$$

式中：$U_A$和$U_{SDI}$分别为样地面积和林分密度产生的不确定性。

### 2.6　优势高与立地生产力评价指标的相关性

选取林分平均胸径、林分平均高、林分蓄积及林分生物量作为森林立地生产力评价指标[4]，采用相关性分析方法探讨各林分优势高估计方法与上述立地生产力评价指标之间的相关性。为更全面地评估不同优势高估计方法的稳定性，本研究建立各方法所获优势高与林分平均高之间的线性回归模型[27]，通过拟合优度与误差指标比较，以筛选出最优的林分优势高估计方法。

采用皮尔逊相关系数法进行相关性分析，并通过成对 $t$ 检验评估组间差异性。所有数据处理与分析均在 R 4.4.0 环境中完成，主要使用的 R 包包括 sqldf 和 dplyr。

## 3　结果与分析

### 3.1　不同优势高方法估计的差异及相关性

不同估计方法所得的优势高结果存在一定差异（图 1），其范围为 29.39 ~ 33.02 m。与其他方法相比，

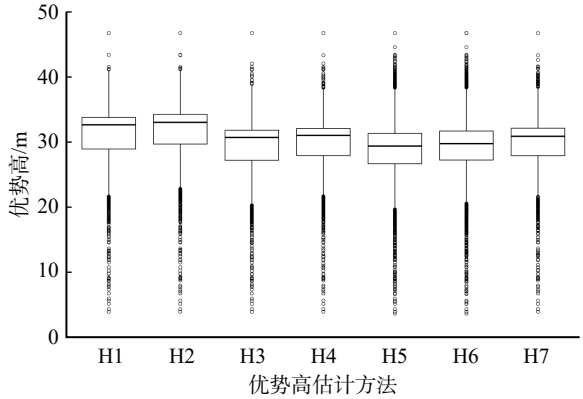



图 1　不同方法估计的天然林优势高

Fig. 1　Estimation of dominant height in natural forests using different methods

传统方法 H1 和 H2 所得到的优势高中位数最高。

成对 $t$ 检验与相关性分析发现，7 种优势高估算法间的差异显著，偏差范围为 0.01 ~ 3.12 m(表 3)。其中，H2 与 H5之间的差值最大，而 H4 与 H7 之间的差值最小。此外，除了小样地估计方法(即 H5 和 H6)外，其余方法之间均呈显著正相关，相关系数均超过 0.95(表 4)。

### 3.2 样地面积和林分密度对优势高的影响

不同优势高估计方法在小样地面积增加时均表现出上升趋势(图 2)，并在达到某一节点后逐渐趋于稳定。具体而言，传统方法(H1 和 H2)在低面积阶段优势高估计值急剧上升，随后趋于平稳，且其稳定后的优势高明显高于其他方法。相比之下，调整最大树法(H3 和 H4)和 U 估计法(H7)则表现出更为平缓的上升趋势，并在后续达到稳定状态。而小样地估计法(H5 和 H6)的优势高值随样地面积增加变化不大。

从图 3 可以看出，各方法中林分密度对优势高的影响均呈现先增加后趋于稳定的趋势。在林分密度较低时(0 ~ 500 株/hm$^2$)，林分优势高快速上升；然而，当林分密度达到 500 ~ 1 000 株/hm$^2$ 时，这种上升趋势逐渐趋于平缓。此外，小样地估计法(H5 和 H6)在低密度区域(0 ~ 500 株/hm$^2$)的优势高显著低于其他方法。

### 3.3 不确定性分析

图 4 显示：在样地面积或林分密度引起的不确定性方面，H4 和 H7 的误差均低于其余方法，而 H5 和 H6 的误差则均高于其余方法。就总不确定性而言，H4 最低(5.99)，H7 次之(6.02)，H6 最高(7.16)。

### 3.4 优势高估计值与林分因子间的相关性

表 5 显示：7 种优势高估计方法的结果与林分平均高均呈现较强的相关性。其中，与算术平均高的相关系数介于 0.75 ~ 0.87，与加权平均高的相关系数介于 0.77 ~ 0.96。此外，各方法与林分蓄积量及生物量均表现出显著相关性，其中以 H4 的相关性最强，H7 次之。

由表 6 可知，不同优势高估计方法与林分平均高的拟合效果存在显著差异。其中，H7 方法的拟合优度最高($R^2$ = 0.751)，H4 方法次之($R^2$ = 0.722)；而小样地估计法(H5、H6)的拟合能力明显较弱，$R^2$ 仅约为 0.56。在预测误差方面，H7(RMSE = 1.404，MAE = 0.962)与 H4(RMSE = 1.473，MAE = 0.991)的误差最小，平均绝对偏差均低于 1.0 m；相比之下，H5 与 H6 的误差显著较大，RMSE 超过 2.3，MAE 约达 1.6 m。从模型综合性能评估来看，H7 和 H4 的 AIC 与 BIC 值显著低于其他方法。

**表 3 各优势高估计方法的差异性分析**

Tab. 3 Evaluating differences in dominant height estimation methods

| 优势高估计方法 | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 | H6 | H7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H1 | | **−0.57** | **1.78** | **1.38** | **2.56** | **2.12** | **1.37** |
| H2 | 0.52 | | **2.35** | **1.95** | **3.12** | **2.69** | **1.94** |
| H3 | 0.73 | 0.61 | | **−0.41** | **0.77** | **0.33** | **−0.41** |
| H4 | 0.86 | 0.59 | 0.39 | | **1.17** | **0.74** | **−0.01** |
| H5 | 2.25 | 2.21 | 2.16 | 2.16 | | **−0.43** | **−1.18** |
| H6 | 2.31 | 2.21 | 2.18 | 2.15 | 0.53 | | **−0.74** |
| H7 | 0.90 | 0.66 | 0.58 | 0.45 | 2.15 | 2.13 | |

注：加粗表示经成对$t$检验下的差异均值，非加粗数据表示标准差；两两之间差异均显著($p$<0.05)。

**表 4 各优势高估计方法的相关性分析结果**

Tab. 4 Results of the correlation analysis for dominant height estimation methods

| 优势高估计方法 | H1 | H2 | H3 | H4 | H5 | H6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| H2 | 0.99 | | | | | |
| H3 | 0.97 | 0.98 | | | | |
| H4 | 0.96 | 0.98 | 0.99 | | | |
| H5 | 0.77 | 0.78 | 0.78 | 0.78 | | |
| H6 | 0.75 | 0.77 | 0.77 | 0.78 | 0.99 | |
| H7 | 0.95 | 0.97 | 0.98 | 0.99 | 0.79 | 0.79 |

注：$p$值均小于0.05。

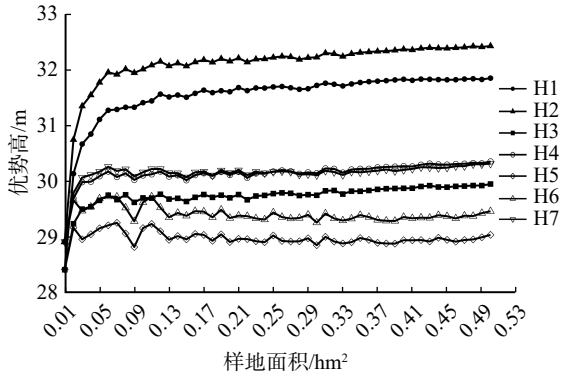



图 2 各优势高估计值随样地面积变化

Fig. 2 Variation of each dominant height estimated value with sample plot area

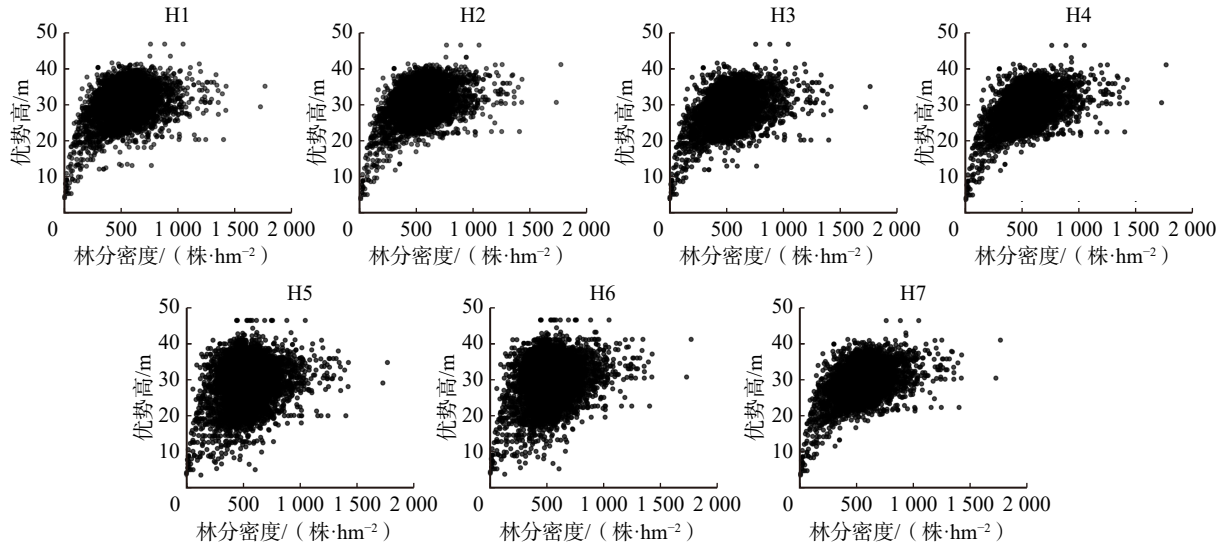



图 3　优势高估计值随林分密度变化的散点图

Fig. 3　Scatterplot of change in dominant height estimate with stand density index

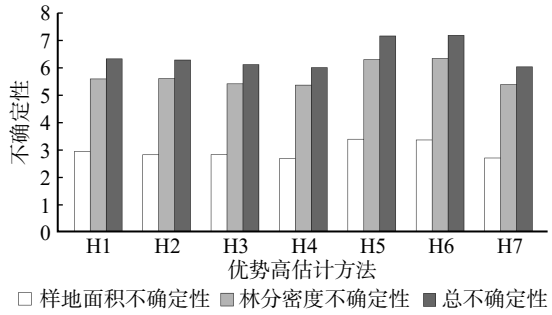



图 4　各优势高方法的不确定性

Fig. 4　Uncertainty of each dominant height method

**表 5　各优势高估计方法的优势高估计值与林分因子的相关性**

Tab. 5　Correlation between dominant height estimates and stand factors for each dominant height estimation method

| 优势高估计方法 | 林分平均胸径 | 林分算术平均高 | 林分加权平均高 | 林分蓄积 | 林分生物量 |
|---|---|---|---|---|---|
| H1 | 0.83 | 0.81 | 0.96 | 0.71 | 0.48 |
| H2 | 0.84 | 0.83 | 0.96 | 0.75 | 0.53 |
| H3 | 0.85 | 0.85 | 0.95 | 0.79 | 0.58 |
| H4 | 0.85 | 0.85 | 0.94 | 0.81 | 0.62 |
| H5 | 0.74 | 0.75 | 0.78 | 0.62 | 0.45 |
| H6 | 0.74 | 0.75 | 0.77 | 0.64 | 0.47 |
| H7 | 0.86 | 0.87 | 0.94 | 0.80 | 0.60 |

注: 指标之间均显著($p$<0.05)。

## 4　讨　　论

### 4.1　样地面积、林分密度以及估计方法对优势高计算的影响

优势高是衡量立地生产力的关键指标，其估计精度直接影响森林经营方案的科学性[28−29]。本研究

**表 6　各优势高估计方法的优势高估计值与林分平均高的回归分析**

Tab. 6　Regression analysis of dominant height estimates from various dominant height estimation method and stand average height

| 优势高估计方法 | $R^2$ | RMSE | MAE | AIC | BIC |
|---|---|---|---|---|---|
| H1 | 0.663 | 1.765 | 1.234 | 178 612.5 | 178 638.6 |
| H2 | 0.685 | 1.647 | 1.121 | 172 367.3 | 172 393.5 |
| H3 | 0.718 | 1.555 | 1.069 | 167 228.0 | 167 254.2 |
| H4 | 0.722 | 1.473 | 0.991 | 162 327.8 | 162 354.0 |
| H5 | 0.564 | 2.335 | 1.603 | 203 722.4 | 203 748.5 |
| H6 | 0.565 | 2.315 | 1.589 | 202 982.1 | 203 008.3 |
| H7 | 0.751 | 1.404 | 0.962 | 158 011.5 | 158 037.6 |

以新疆天山云杉天然林为研究对象，对 7 种不同的优势高估计方法进行比较分析。结果表明，不同方法之间具有较高的相关性($r$ = 0.76 ~ 0.99)，但估计值差异显著，各方法间的差值范围介于 0.01 ~ 3.12 m。这种差异主要源于算法本身的特性以及样地面积和树高对传统方法顺序统计量的影响[30]。值得注意的是，传统方法(H1、H2)的估计中位数显著高于其他方法，且变异幅度更大，这与 García[17,20]在挪威云杉中的研究结果一致，表明传统方法可能存在系统性高估。

理想的优势高估计值应独立于样地面积[31]。本研究发现，当天山云杉天然林面积 < 0.06 hm² 时，优势高波动剧烈；当面积增至 0.06 ~ 0.13 hm² 后趋于稳定。这一范围略高于 Ochal 等[17]和 Zhou 等[21]的研究结果(0.05 ~ 0.10 hm²)，可能与天然林结构复杂性或样地布置差异有关。相比独立设置的小样地，本研究在 3 块 1 hm² 固定样地上生成嵌套子样地，有效

控制了林分本底差异。然而，重复取样可能导致树木重叠，从而削弱数据独立性。尽管随机中心点设置已降低该影响，在解释统计检验结果时仍需谨慎。

林分密度对优势高估计的稳定性具有显著影响。本研究表明，当密度 < 500 株/hm$^2$ 时，各方法的估计值快速上升；在 500 ~ 1 000 株/hm$^2$ 范围内趋于稳定。这与雷相东等[3]在云冷杉(*Abies fabri*)阔叶混交林中的研究结果一致，即竞争加剧导致林木生长速度下降，从而影响优势高估计的精度。当密度偏离上述阈值时，估计误差明显增大，说明 500 ~ 1 000 株/hm$^2$ 是天山云杉天然林优势高估计的最佳采样窗口。

### 4.2 不确定性及林分因子相关性分析

本研究通过量化样地面积和林分密度的不确定性，发现以最高树为选择策略的调整最大树法(H4)和 U 估计法(H7)产生的不确定性显著低于其他方法，而小样地估计法(H5、H6)的不确定性最高。这一结果与林分因子相关性分析的结论相互印证，进一步揭示了不同方法在天山云杉天然纯林中的适用性差异。其内在机制可从方法特性与林分结构适配性的角度进行深入探讨。

从不确定性量化结果来看，H4 的总不确定性最低(5.99)，主要原因是该方法的设计逻辑与天山云杉纯林的林分特征高度契合。García 提出的调整最大树法通过调整公式对优势木数量进行动态调整，既避免了传统方法中因优势木数量固定导致的样地面积依赖性，又无需获取林木空间坐标信息，解决了小样地估计法在实际调查中操作复杂的问题[20]。对于天山云杉纯林而言，其树种组成单一，林分垂直结构相对规整，林木生长的竞争环境具有一致性。调整系数 1.6 和−0.6 能够有效抵消样地面积变化带来的偏差，实现近似无偏估计。U 估计法(H7)的不确定性也较低(6.02)，其取所有子集最高树均值，在纯林中可能因纳入生长受限木而导致误差略增，因此不确定性高于 H4。小样地法(H5、H6)的不确定性最高(均为 7.16)，因其对林分结构敏感，即 0.01 hm$^2$ 小样地仅含少数几株树木，部分小样地难以捕获真实优势木，导致样地间变异放大[18]。

优势高作为立地生产力指标，与林分生产力因子密切相关。本研究分析了优势高与蓄积量、生物量等因子的相关性，发现 H4 和 H7 与蓄积量、生物量的相关性显著强于其他方法。在结构复杂的混交林中，优势高与生产力因子的相关性较弱[7]；而在天山云杉纯林中，H4 和 H7 表现出强相关性，表明其能够稳定有效地反映立地生产力，在立地质量评价中具有更优的应用潜力。综合不确定性分析与相关性结果，H4 为天山林区云杉天然林最优的优势高估计方法。

## 5 结 论

本研究基于 3 块 1 hm$^2$ 样地，以传统方法、调整最大树法、小样地估计法、U 估计法为基础方法，并考虑两种优势木选择策略，获得 7 种林分优势高估计方法并进行对比分析。结果表明：(1)各种优势高估计方法之间存在差异，而调整最大树法(H4)和 U 估计法(H7)之间的差异最小，相关性最高；(2)在样地面积为 0.06 ~ 0.13 hm$^2$、林分密度为 500 ~ 1 000 株/hm$^2$ 时，优势高估计值较为稳定；(3)以最高树为选择策略的调整最大树法(H4)在总不确定性方面表现最优，且与林分平均胸径、林分蓄积量、林分生物量呈现出良好的相关关系。

综上，在天然天山云杉林中，建议采用以最高树为选择策略的调整最大树法进行优势高估计，可为天然林立地质量评价提供可靠依据。

## 参 考 文 献


[1] Skovsgaard J P, Vanclay J K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands [J]. Forestry, 2008, 81(1): 13−31.

[2] Calegario N, Daniels R F, Maestri R, et al. Modeling dominant height growth based on nonlinear mixed-effects model: a clonal Eucalyptus plantation case study [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 204(1): 11−21.

[3] 雷相东, 朱光玉, 卢军. 云冷杉阔叶混交过伐林林分优势高估计方法的研究 [J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 36−41.
Lei X D, Zhu G Y, Lu J. Top height estimation for mixed spruce-fir-deciduous over-logged forests [J]. Forest Research, 2018, 31(1): 36−41.

[4] 朱光玉, 康立. 森林立地生产力评价指标与方法 [J]. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 275−281.
Zhu G Y, Kang L. A review of forest site productivity evaluation indicators and methods [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(6): 275−281.

[5] Wang M, Borders B, Zhao D. Parameter estimation of base-age invariant site index models: which data structure to use? [J]. Forest Science, 2007, 53(5): 541−551.

[6] Skovsgaard J P, Vanclay J K. Forest site productivity: a review of spatial and temporal variability in natural site conditions [J]. Forestry, 2013, 86(3): 305−315.

[7] 沈剑波, 雷相东, 王虎威, 等. 针阔混交异龄林林分优势高的确定方法 [J]. 林业与环境科学, 2019, 35(1): 43−48.
Shen J B, Lei X D, Wang H W, et al. Stand dominant height estimation of uneven-aged mixed coniferous and broad-leaved stands [J]. Forestry and Environmental Science, 2019, 35(1): 43−48.

[8] 吴恒, 党坤良, 田相林, 等. 秦岭林区天然次生林与人工林立地质量评价 [J]. 林业科学, 2015, 51(4): 78−88.

Wu H, Dang K L, Tian X L, et al. Evaluating site quality for secondary forests and plantation in Qinling Mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(4): 78−88.

[9] Diéguez-Aranda U, Burkhart H E, Rodríguez-Soalleiro R. Modeling dominant height growth of Radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) plantations in north-western Spain [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 215(1-3): 271−284.

[10] Zeide B, Zakrzewski W T. Selection of site trees: the combined method and its application [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1993, 23(6): 1019−1025.

[11] Sterba H, Amateis R L. Crown efficiency in a loblolly pine (*Pinus taeda*) spacing experiment [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28(9): 1344−1351.

[12] Socha J, Orzeł S. Dynamiczne krzywe bonitacyjne dla drzewostanów sosnowych Puszczy Niepołomickiej [J]. Sylwan, 2011, 155(5): 301−312.

[13] Sharma R P, Brunner A, Eid T, et al. Modelling dominant height growth from national forest inventory individual tree data with short time series and large age errors [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(12): 2162−2175.

[14] Sharma R P, Brunner A, Eid T. Site index prediction from site and climate variables for Norway spruce and Scots pine in Norway [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2012, 27(7): 619−636.

[15] 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.

[16] 国家林业和草原局. 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 Forestry and Grassland Administration. Technical regulations for inventory for forest managenment planning and design: LY/T 2908−2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.

[17] Ochal W, Socha J, Pierzchalski M. The effect of the calculation method, plot size, and stand density on the accuracy of top height estimation in Norway spruce stands [J]. IForest-Biogeosciences and Forestry, 2017, 10(2): 498−505.

[18] Rennolls K. "Top Height"; Its definition and estimation [J]. The Commonwealth Forestry Review, 1978, 57(3): 215−219.

[19] García O. Estimating top height with variable plot sizes [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28(10): 1509−1517.

[20] García O, Batho A. Top height estimation in lodgepole pine sample plots [J]. Western Journal of Applied Forestry, 2005, 20(1): 64−68.

[21] Zhou M L, Lei X D, Duan G S, 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.

[22] 郭仲军, 黄继红, 路兴慧, 等. 基于第七次森林资源清查的新疆天然林生态系统服务功能 [J]. 生态科学, 2015, 34(4): 118−124.
Guo Z J, Huang J H, Lu X H, et al. Nature tree ecosystem services evaluation in Xinjiang based on the seventh national forest assessment data [J]. Ecological Science, 2015, 34(4): 118−124.

[23] 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.

[24] 钟珊月, 臧颢, 宁金魁, 等. 不同优势木选取策略下赣南楮栲天然次生林立地质量评价方法比较 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(11): 38−47.
Zhong S Y, Zang H, Ning J K, et al. Comparison of site quality evaluation methods for natural secondary forest of *Castanopsis* spp. in southern Jiangxi Province of eastern China under different dominant tree selection strategies [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11): 38−47.

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

[26] McRoberts R E, Westfall J A. Effects of uncertainty in model predictions of individual tree volume on large area volume EstimatesAvailable for purchase [J]. Forest Science, 2014, 60(1): 34−42.

[27] Balzter H, Luckman A, Skinner L, et al. Observations of forest stand top height and mean height from interferometric SAR and LiDAR over a conifer plantation at Thetford Forest, UK [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(6): 1173−1197.

[28] Tarmu T, Laarmann D, Kiviste A. Mean height or dominant height–what to prefer for modelling the site index of Estonian forests? [J]. Forestry Studies, 2020, 72(1): 121−138.

[29] Mailly D, Turbis S, Auger I, et al. The influence of site tree selection method on site index determination and yield prediction in black spruce stands in northeastern Québec [J]. The Forestry Chronicle, 2004, 80(1): 134−140.

[30] Sharma M, Amateis R L, Burkhart H E. Top height definition and its effect on site index determination in thinned and unthinned loblolly pine plantations [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 168(1−3): 163−175.

[31] Bruchwald A, Dudek A, Dudzinska T, et al. Model wzrostu dla drzewostanów świerkowych [J]. Sylwan, 1999, 143(1): 19−31.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　张会儒）