



## 融合无人机点云数据的雪岭云杉天然林立地质量评价

王艺霏 严国华 刘太艳 许芳泽 向玮

### Site quality evaluation of natural *Picea schrenkiana* forests in the Tianshan Mountains integrating UAV point cloud data

Wang Yifei, Yan Guohua, Liu Taiyan, Xu Fangze, Xiang Wei

引用本文:

王艺霏, 严国华, 刘太艳, 许芳泽, 向玮. 融合无人机点云数据的雪岭云杉天然林立地质量评价[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(9):97–110. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260111

Wang Yifei, Yan Guohua, Liu Taiyan, Xu Fangze, Xiang Wei. Site quality evaluation of natural *Picea schrenkiana* forests in the Tianshan Mountains integrating UAV point cloud data[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2026, 48(9):97–110. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260111

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260111>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于非线性混合效应模型的云南松林树高曲线

Tree height curves of *Pinus yunnanensis* forest based on nonlinear mixed effects model

北京林业大学学报, 2025, 47(3): 49–60. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240063>

#### 气候敏感的杉木树高胸径非线性混合效应模型研建

Development of climate-sensitive nonlinear mixed-effects tree height–DBH model for *Cunninghamia lanceolata*

北京林业大学学报, 2023, 45(9): 52–61. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230052>

#### 基于非线性混合效应模型的东北红松树高胸径关系

Relationship between tree height and DBH of *Pinus koraiensis* in northeastern China based on nonlinear mixed effects model

北京林业大学学报, 2025, 47(3): 38–48. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240321>

#### 基于非线性分位数混合效应构建杉木树高曲线模型

Construction of *Cunninghamia lanceolata* tree height curve model based on nonlinear quantile mixed effect

北京林业大学学报, 2023, 45(11): 33–41. <https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220496>

#### 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>

#### 不同优势木选取策略下赣南栲栳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>

DOI:10.12171/j.1000-1522.20260111

## 融合无人机点云数据的雪岭云杉天然林立地质量评价

王艺霏 严国华 刘太艳 许芳泽 向 玮

(北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**【目的】构建基于立地形法的雪岭云杉天然异龄林树高-胸径关系立地质量评价模型, 验证其在无年龄数据条件下评价雪岭云杉天然异龄林立地质量的可行性, 为天然林可持续经营与生产力预测提供技术参考。【方法】结合样地实测胸径数据与机载 LiDAR 提取的树高信息, 计算 5 种优势木组合的平均树高与平方平均胸径指标, 筛选最优导向曲线; 以生长量特征确定基准胸径, 采用立地形法划分立地等级, 并将立地等级作为随机效应纳入树高-胸径非线性混合效应模型, 综合评价模型性能。【结果】(1)由调整最大树法与胸径排序得到的  $H_5-D_{g,5}$  组合拟合的 Schumacher 导向曲线效果最佳 ( $R^2 = 0.794\ 3$ ,  $RMSE = 1.309\ 3$ ); (2)确定基准胸径为 34 cm, 在此基础上含胸径平移倒数的指数型树高-胸径模型被确定为最优基础模型, 其建模集  $R^2$  为 0.833 9,  $RMSE$  为 2.984 3, 检验集  $R^2$  为 0.858 5,  $RMSE$  为 2.822 3; (3)构建非线性混合效应模型后, 模型精度提高。建模阶段, 传统估计法与树高排序形成的  $H_2-D_{g,2}$  组合表现最佳 ( $R^2 = 0.845\ 8$ ,  $RMSE = 2.875\ 6$ ); 检验阶段, 调整最大树法与树高排序形成的  $H_6-D_{g,6}$  组合表现最优 ( $R^2 = 0.875\ 6$ ,  $RMSE = 2.645\ 5$ )。【结论】立地形法结合树高-胸径模型可实现缺乏年龄数据条件下雪岭云杉天然异龄林的立地质量分级; 优势木筛选方式对导向曲线构建及模型性能具有重要影响; 将立地等级作为随机效应引入模型, 可有效提高树高-胸径模型的拟合精度和预测能力, 该研究方法可为雪岭云杉天然异龄林立地质量评价提供技术支撑。

**关键词:** 立地形法; 树高-胸径模型; 立地质量; 雪岭云杉林; 非线性混合效应模型

**中图分类号:** S757 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2026)09-0097-14

**引文格式:** 王艺霏, 严国华, 刘太艳, 等. 融合无人机点云数据的雪岭云杉天然林立地质量评价 [J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(9): 97-110. Wang Yifei, Yan Guohua, Liu Taiyan, et al. Site quality evaluation of natural *Picea schrenkiana* forests in the Tianshan Mountains integrating UAV point cloud data [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(9): 97-110.

## Site quality evaluation of natural *Picea schrenkiana* forests in the Tianshan Mountains integrating UAV point cloud data

Wang Yifei Yan Guohua Liu Taiyan Xu Fangze Xiang Wei

(State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to construct a site quality evaluation model for uneven-aged natural *Picea schrenkiana* forests in the Tianshan Mountains, based on the site form method and the height-DBH relationship. It also seeks to verify the model's applicability in the absence of stand age data, thereby providing technical support for sustainable forest management and productivity prediction. [Method] Field-measured diameter at breast height (DBH) data were integrated with tree height data derived from airborne LiDAR point clouds. Five dominant-tree combinations were used to calculate dominant height and quadratic mean diameter, and the optimal guide curve was selected accordingly. The reference diameter was determined based on growth characteristics, and site classes were classified using the site form method. Site

收稿日期: 2026-03-09 修回日期: 2026-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(32160366)。

第一作者: 王艺霏。主要研究方向: 森林可持续经营。Email: 1131757986@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 向玮, 博士生导师, 教授。主要研究方向: 林分生长模型研究。Email: wxiang@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <https://j.bjfu.edu.cn>; <https://journal.bjfu.edu.cn>

class was then incorporated as a random effect into a height-DBH nonlinear mixed-effects model, and model performance was comprehensively evaluated using multiple statistical criteria. [Result] (1) The Schumacher guide curve fitted using the  $H_5-D_{g,5}$  combination, derived from the adjusted largest trees method with DBH-based ranking, achieved the best performance ( $R^2 = 0.794\ 3$ , RMSE = 1.309 3); (2) The reference diameter was determined to be 34 cm. On this basis, the exponential height-DBH model incorporating a shifted reciprocal term of DBH was identified as the optimal base model, with  $R^2 = 0.833\ 9$  and RMSE = 2.984 3 for the modeling dataset, and  $R^2 = 0.858\ 5$  and RMSE = 2.822 3 for the validation dataset; (3) The introduction of the nonlinear mixed-effects model improved model accuracy. The  $H_2-D_{g,2}$  combination, derived from the conventional estimation method with tree-height-based ranking, performed best during the modeling stage ( $R^2 = 0.845\ 8$ , RMSE = 2.875 6), whereas the  $H_6-D_{g,6}$  combination, derived from the adjusted largest trees method with tree-height-based ranking, showed the best performance during the validation stage ( $R^2 = 0.875\ 6$ , RMSE = 2.645 5). [Conclusion] The combination of the site form method and height-DBH models enables reliable site quality classification for uneven-aged natural *Picea schrenkiana* forests in the absence of age data. The selection of dominant tree combinations significantly influences guide curve construction and model performance. Incorporating site class as a random effect effectively improves the fitting accuracy and predictive ability of height-DBH models, demonstrating that this approach provides a practical and reliable technique for site quality evaluation in uneven-aged forests.

**Key words:** site form method; height-DBH model; site quality; *Picea schrenkiana* forest; nonlinear mixed-effects model

立地质量是指特定立地上既定森林或其他植被类型的生产潜力,其量化评价是预测森林生产力和优化经营策略的核心基础<sup>[1]</sup>。传统立地质量评价多采用地位指数法,通过构建优势木年龄与树高的关系曲线来表征立地生产力,但该方法依赖精确的林木年龄数据,在年龄获取困难的异龄天然林中适用性受限。为此, Vanclay 等<sup>[2]</sup>于 1988 年首次提出立地地形法(site form, SF),将基准胸径对应的优势木高作为立地质量评价指标,为异龄林立地质量评价提供了重要的替代方案。该方法更强调林分结构特征对生长潜力的表达,其合理性已在多种混交林研究中得到验证:沈剑波<sup>[3]</sup>基于广东省针阔混交异龄林,证实立地地形法可有效实现复杂林分的立地质量分级;雷相东等<sup>[4]</sup>基于林分潜在生长量优化了立地质量评价方法,进一步拓展了其应用场景;曾翀等<sup>[5]</sup>在天然落叶松云冷杉(*Larix-Picea-Abies*)林研究中发现,指数类模型能精准拟合树高-胸径关系,为立地地形导向曲线拟合提供了重要参考。此外,非线性混合效应模型能够在建模过程中考虑由立地异质性引起的参数变异,从而提高树高-胸径模型的拟合与预测精度<sup>[6-7]</sup>,在森林生长模型研究中得到广泛应用。然而,不同优势木筛选方法对导向曲线稳定性的影响仍存在差异,立地分级与混合效应模型的结合方式仍有待在不同林型中进一步检验。

树高是反映立地生产力差异的重要指标,也是立地质量评价的关键变量。然而,传统人工测高方

法效率低、误差大,限制了其在大范围森林调查与立地评价中的应用。近年来,机载激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)技术的快速发展实现了森林结构参数的高精度、非接触式批量提取,大幅提升了单木树高的获取效率与精度<sup>[8]</sup>。研究<sup>[9-10]</sup>表明, LiDAR 技术已能够有效支撑天然林单木尺度树高提取及高径关系建模,为基于树高及树高-胸径关系的天然林立地质量评价提供了可靠的数据基础与技术支撑。

雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)是新疆山地天然林的优势树种,在水源涵养、水土保持及维持生态平衡方面发挥着不可替代的关键作用<sup>[11]</sup>。开展雪岭云杉林立地质量评价,不仅是认识其生长潜力的重要基础,也是服务天然林保护修复与可持续经营决策的重要前提。已有研究<sup>[12-14]</sup>基于 LiDAR 技术对雪岭云杉树高估测进行了探索,为单木树高获取提供了技术支撑。然而,针对雪岭云杉天然异龄林,尚缺乏一种在无林龄数据条件下开展立地质量评价的有效方法。

因此,本研究以新疆农业大学实习林场雪岭云杉天然林为对象,基于样地实测和点云数据,采用立地地形法构建基于树高-胸径关系的雪岭云杉天然异龄林立地质量评价模型;分析不同优势木组合对导向曲线构建和模型精度的影响,并验证该方法在无林龄数据条件下开展天然异龄林立地质量评价的可行性,以期天然林立地质量评价、生产力预测与可持续经营提供技术支撑。

1 研究区概况

研究区位于我国天山山脉中段北麓的西北温带森林分布区(43°16′~43°26′N, 86°46′~86°57′E), 海拔 1 700~2 900 m, 坡度 5°~40°, 地形起伏较大。该区属温带大陆性气候, 降水集中于 7、8 月, 年平均降水量 600 mm, 年平均气温约 3 ℃, 无霜期约 140 d, 年均日照约 1 300 h。土壤类型为灰褐色森林土, 植被以雪岭云杉为建群种的天然林为主, 该树种是新疆山地森林中分布最广、蓄积量最大的树种<sup>[10]</sup>。伴生树种包括天山桦(*Betula tianschanica*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、山杨(*Populus davidiana*)和花楸(*Sorbus pohuashanensis*)等。

2 数据与方法

2.1 数据采集

2.1.1 样地设置与调查

2023 年夏季, 在研究区典型区域布设 23 个样地, 样地规格为 30 m×30 m, 面积为 0.09 hm<sup>2</sup>(表 1)。

采用罗盘法进行样地围测, 确保样地边界相对闭合差小于周长的 1/200。使用华测 i90 惯导 RTK、围尺和超声波测高仪(Vertex IV), 对样地内胸径 ≥ 5 cm 的雪岭云杉进行每木定位与检尺, 记录单木坐标、胸径(diameter at breast height, DBH)及树高等信息。

2.1.2 机载 LiDAR 数据

2023 年 6 月, 采用华测 AS-1300HL 机载激光雷达传感器获取研究区数据。该传感器最大测距范围为 1 350 m, 精度为 10 mm, 最高采集频率达 820 kHz, 影像正射分辨率为 0.05 m, 具备多次回波功能, 可有效穿透植被以获取垂直结构信息。对 LiDAR 点云数据进行预处理, 经分类和去噪后生成数字表面模型(digital surface model, DSM)与数字高程模型(digital elevation model, DEM); 将二者作差得到冠层高度模型(canopy height model, CHM), 并基于 CHM 提取单木树高信息。

2.2 优势高计算方法

优势高是表征林分生长潜力和立地质量的重要

表 1 23 个样地基本概况  
Tab. 1 Basic information of the 23 sample plots

| 样地号 | 海拔/m  | 坡向 | 坡度/(°) | 平均胸径/cm | 平均树高/m | 郁闭度  | 密度/(株·hm <sup>-2</sup> ) | 公顷胸高断面积/(m <sup>2</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) |
|-----|-------|----|--------|---------|--------|------|--------------------------|---------------------------------------------|
| 1   | 1 902 | 东北 | 28     | 26.35   | 19.2   | 0.65 | 533                      | 25.44                                       |
| 2   | 1 930 | 东北 | 27     | 33.96   | 24.5   | 0.53 | 333                      | 22.14                                       |
| 3   | 1 887 | 东北 | 25     | 30.79   | 24.1   | 0.52 | 433                      | 25.64                                       |
| 4   | 1 861 | 东北 | 27     | 26.11   | 21.6   | 0.43 | 411                      | 17.25                                       |
| 5   | 1 936 | 东北 | 31     | 26.69   | 23.1   | 0.67 | 688                      | 31.69                                       |
| 6   | 1 948 | 东北 | 12     | 33.65   | 27.3   | 0.39 | 300                      | 22.73                                       |
| 7   | 1 926 | 东北 | 26     | 25.67   | 24.0   | 0.62 | 666                      | 29.32                                       |
| 8   | 2 134 | 西北 | 21     | 26.08   | 21.5   | 0.67 | 644                      | 30.27                                       |
| 9   | 2 154 | 西北 | 32     | 32.51   | 27.3   | 0.59 | 477                      | 32.29                                       |
| 10  | 2 150 | 东北 | 36     | 23.69   | 19.2   | 0.69 | 822                      | 23.99                                       |
| 11  | 2 101 | 西北 | 22     | 27.33   | 21.5   | 0.54 | 577                      | 24.12                                       |
| 12  | 2 119 | 西北 | 9      | 32.88   | 24.3   | 0.37 | 277                      | 18.87                                       |
| 13  | 2 045 | 东北 | 23     | 35.18   | 27.0   | 0.25 | 244                      | 18.36                                       |
| 14  | 1 988 | 东北 | 30     | 23.18   | 22.9   | 0.42 | 455                      | 14.07                                       |
| 15  | 2 055 | 西南 | 11     | 34.08   | 24.7   | 0.67 | 411                      | 27.36                                       |
| 16  | 2 056 | 西南 | 30     | 33.24   | 22.2   | 0.40 | 333                      | 23.14                                       |
| 17  | 2 077 | 东北 | 34     | 29.75   | 23.3   | 0.29 | 455                      | 21.62                                       |
| 18  | 2 110 | 东北 | 14     | 35.11   | 25.7   | 0.73 | 566                      | 33.34                                       |
| 19  | 2 152 | 东北 | 20     | 32.69   | 21.8   | 0.33 | 377                      | 22.38                                       |
| 20  | 2 076 | 东北 | 12     | 26.14   | 17.3   | 0.39 | 255                      | 13.72                                       |
| 21  | 2 055 | 东北 | 23     | 31.18   | 25.2   | 0.56 | 500                      | 27.15                                       |
| 22  | 2 003 | 东北 | 12     | 33.97   | 26.2   | 0.34 | 333                      | 24.17                                       |
| 23  | 1 953 | 东北 | 18     | 26.98   | 20.4   | 0.58 | 544                      | 21.60                                       |

指标,其估计精度在很大程度上取决于优势木筛选标准与林分结构特征的匹配程度。基于 Zhou 等<sup>[15]</sup>提出的适用于天然林的优势高计算体系,结合本研究数据特征(包含优势木平均树高与平均胸径指标),筛选出 3 类优势高基础估计方法。

(1)传统优势高估计法(conventional estimation, CE)。该方法从样地中选取最粗或最高的前  $a$  株林木作为优势木,计算其平均树高作为优势高。优势木数量  $a$  通常依据样地面积按比例确定。该方法形式简洁,是优势高估计中应用最为广泛的基础方法。

(2)调整最大树法(adjusted largest trees, ALT)。该方法首先依据样地面积确定理论优势木株数,并引入调整系数对选取株数进行修正,使其满足单位面积标准优势木数量要求,从而增强不同样地面积条件下计算结果的可比性。

(3)U 估计法(U-estimator, UE)。该方法基于组合统计思想,从样地中抽取  $k$  株林木构成组合,计算各组合中最大树高的均值作为优势高估计值。通过引入组合统计过程,可在一定程度上降低单一排序选取方式带来的随机误差。

在上述 3 类基础方法框架下,根据优势木筛选依据的不同,进一步设置两种优势木选取策略:(1)按胸径由大到小排序选取优势木(记为 C1);(2)按树高由高到低排序选取优势木(记为 C2)。

最终衍生出的 5 种优势高计算方法见表 2。

## 2.3 优势木算术平均树高与平方平均胸径计算

### 2.3.1 算术平均树高

算术平均树高(arithmetic mean dominant height)记为  $H$ ,是指筛选出的所有优势木树高的算术平均值,用于反映优势层树木高度的平均水平,单位为 m,计算公式如下。

$$H = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k H_i \quad (1)$$

式中: $k$  为优势木株数; $H_i$  为第  $i$  株优势木的 LiDAR 提取树高(m)。

### 2.3.2 平方平均胸径

平方平均胸径(quadratic mean diameter at breast height)记为  $D_g$ ,定义为筛选出的所有优势木胸径平方的算术平均值的平方根,用于反映优势木的径阶特征,单位为 cm,结果保留 2 位小数,计算公式如下。

$$D_g = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k D_i^2} \quad (2)$$

式中: $D_i$  为第  $i$  株优势木的实测胸径(cm)。

### 2.3.3 不同方法的 $H$ 与 $D_g$ 计算

依据 CE 法、ALT 法及 UE 法,分别归纳不同方法的优势木筛选规则及优势木算术平均树高  $H$  与平方平均胸径  $D_g$  的计算方法(表 3),得到 CE、ALT 法优势木数量分别为 9 和 13.8,UE 法最大抽样次数为 2 000。

针对 ALT 法优势木数量为非整数的情况,采用线性内插法进行修正。首先将样地内个体按胸径( $D$ )降序排序,对  $a_{ALT} = 13.8$  分别向下和向上取整,得到  $k_1 = 13$ 、 $k_2 = 14$ ;随后计算内插权重  $w$  为 0.8,并将其代入结合 C1、C2 策略的 ALT 法优势高计算公式,从而求得优势木的算术平均树高( $H_5$ 、 $H_6$ )以及平方平均胸径( $D_{g,5}$ 、 $D_{g,6}$ )。

最终获得  $H_1$ - $D_{g,1}$ 、 $H_2$ - $D_{g,2}$ 、 $H_5$ - $D_{g,5}$ 、 $H_6$ - $D_{g,6}$ 、 $H_9$ - $D_{g,9}$  共 5 组优势木生长指标数据。

## 2.4 立地等级划分

基于优势木算术平均树高和平方平均胸径数据,经导向曲线拟合、基准胸径确定及立地形量化后,采

表 2 各优势高计算方法

Tab. 2 Dominant height calculation methods

| 基础优势高计算方法    | 优势木选择策略       | 优势高计算方法 | 优势高计算公式                                                                                          |
|--------------|---------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 传统优势高估计法(CE) | 按胸径由大到小排序(C1) | CE+C1   | $H_1 = \frac{1}{a} \sum_{m=1}^a h_{D,m}, a = \text{round}(S \times 100)$                         |
|              | 按树高由高到低排序(C2) | CE+C2   | $H_2 = \frac{1}{a} \sum_{m=1}^a h_{H,m}, a = \text{round}(S \times 100)$                         |
| 调整最大树法(ALT)  | C1            | ALT+C1  | $H_5 = \frac{1}{a} \sum_{m=1}^a h_{D,m}, a = 1.6S \times 100 - 0.6$                              |
|              | C2            | ALT+C2  | $H_6 = \frac{1}{a} \sum_{m=1}^a h_{H,m}, a = 1.6S \times 100 - 0.6$                              |
| U估计法(UE)     | C1            | UE+C1   | $H_9 = \frac{1}{f} \sum_{m=1}^f h_{H,m}, f = C_a^k, k = \text{round}\left(\frac{a}{100S}\right)$ |

注: $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_5$ 、 $H_6$ 、 $H_9$ 分别为不同方法计算的优势高(m); $S$ 为样地面积( $\text{hm}^2$ ); $a$ 为选取的优势木株数; $f$ 为林木组合数; $k$ 为每个组合中的林木株数; $h_{D,m}$ 为按胸径排序后选取的第  $m$  株优势木树高, $h_{H,m}$ 为按树高排序后选取的第  $m$  株优势木树高; $\text{round}(\cdot)$  为四舍五入取整函数。

表 3 优势木算术平均树高与平方平均胸径计算汇总

Tab. 3 Summary of calculations for arithmetic mean dominant height and quadratic mean DBH

| 计算方法 | 优势木筛选规则                                                                                                                                                         | 算术平均树高( $H$ )计算                                                                  | 平方平均胸径( $D_g$ )计算                                          |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| CE   | 按C1或C2筛选优势木数量( $a_{CE}$ , 不足取全部, 记实际株数 $k$ )                                                                                                                    | $H_{CE} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k H_i$                                          | $D_{g,CE} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k D_i^2}$         |
| ALT  | 按C1或C2筛选优势木数量( $a_{ALT}$ ), 若值为非整数, 则插值取整。<br>$k_1 = \text{floor}(a_{ALT})$ , $k_2 = \text{ceiling}(a_{ALT})$ ;<br>线性内插权重 $w = \frac{a_{ALT} - k_1}{k_2 - k_1}$ | $H_{ALT} = H_{k_1} + (H_{k_2} - H_{k_1}) \times w$                               | $D_{g,ALT} = D_{g,k_1} + (D_{g,k_2} - D_{g,k_1}) \times w$ |
| UE   | 按抽样数量 $k$ 随机抽样 $N$ 次( $N$ 为组合数或 $B_{\max}$ ), 每次取抽样组内最高树                                                                                                        | $H_{UE} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \max(H_j^{(1)}, H_j^{(2)}, \dots, H_j^{(k)})$ | $D_{g,UE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (D_j^*)^2}$     |

注: 所有公式计算结果保留2位小数。对于ALT法, 若样地个体数小于 $k_1$ , 为避免插值误差过大, 则转为CE法计算; floor (·) 为向下取整函数, ceiling (·) 为向上取整函数。 $B_{\max}$ 为UE法随机蒙特卡洛自助随机抽样的最大迭代次数;  $k$ 为优势木株数或UE的抽样株数;  $H_i$ 为第 $i$ 株优势木树高(m);  $H_{k_1}$ 、 $H_{k_2}$ 分别为前 $k_1$ 、 $k_2$ 株树高均值(m);  $H_j^{(i)}$ 为第 $j$ 次抽样第 $i$ 株树高(m);  $D_i$ 为第 $i$ 株优势木胸径(cm);  $D_{g,k_1}$ 、 $D_{g,k_2}$ 分别为前 $k_1$ 、 $k_2$ 株平方平均胸径(cm);  $D_j^*$ 为第 $j$ 次抽样最高树胸径(cm)。N为UE法蒙特卡洛自助抽样总次数。

用等距分级法划分立地等级。鉴于本研究样本规模及立地形分布特征, 若等级划分过细, 易导致组间差异减弱及参数估计不稳定, 不利于后续非线性混合效应模型中随机效应参数的稳健估计。因此, 综合立地梯度表达与模型应用需求, 最终划分为3个等级(等级越高, 立地生长潜力越优)<sup>[16-18]</sup>, 以表征研究区立地生产力的主要梯度特征。

#### 2.4.1 导向曲线的拟合

导向曲线是林分优势木平均高生长曲线簇中, 代表中等立地条件下优势木平均高随年龄或者平均胸径变化的平均生长曲线<sup>[19]</sup>。本研究以优势木平方平均胸径( $D_g$ )为自变量, 算术平均树高( $H$ )为因变量, 采用非线性最小二乘拟合方法, 从7类经典生长曲线中筛选最优导向曲线, 作为立地形计算的基准, 备选模型见表4。

#### 2.4.2 模型评价指标

采用拟合优度与精度检验指标综合评价备选模型性能。其中, 优势高-优势胸径备选模型的评价指标包括决定系数( $R^2$ )、调整决定系数( $R_a^2$ )、均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均绝对误差

(mean absolute error, MAE)、平均绝对相对误差(mean absolute relative error, MARE)及参数显著性; 基础树高-胸径模型在上述指标基础上, 增加赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)、相对均方根误差(relative root mean square error, rRMSE)、均值误差(mean error, ME)及平均相对误差(mean relative error, MRE), 以实现对模型拟合优度、精度及系统性误差的综合评价。所有数据处理与模型拟合均在 Excel 2021 与 R 4.5.2 软件中完成。

#### 2.4.3 基准胸径的确定

基准胸径是立地形定义的核心参数, 需满足树高生长趋于稳定且能灵敏反映立地质量差异的要求<sup>[3]</sup>。本研究基于选定的最优导向曲线模型(Schumacher 模型)及其拟合参数, 分别构建连年生长量函数(current annual increment function, CAI)和平均生长量函数(mean annual increment function, MAI)。其中, 连年生长量代表胸径每增加 1 cm 时优势高的瞬时增长量(instantaneous growth, IG), 平均生长量代表单位胸径对应的优势高平均增长量(average growth, AG)。联立上述两类生长量函数即

表 4 备选优势高-优势胸径模型

Tab. 4 Candidate dominant height-DBH models

| 序号 | 模型名称             | 计算公式                           | 参考文献 |
|----|------------------|--------------------------------|------|
| 1  | Richards         | $H = a (1 - e^{-bD_g})^c$      | [20] |
| 2  | Korf             | $H = ae^{-bD_g^{-c}}$          | [21] |
| 3  | Logistic         | $H = \frac{a}{1 + be^{-cD_g}}$ | [22] |
| 4  | Hossfeld IV      | $H = \frac{a}{1 + bD_g^{-c}}$  | [23] |
| 5  | Schumacher       | $H = ae^{-b/D_g}$              | [24] |
| 6  | Gompertz         | $H = ae^{-be^{-cD_g}}$         | [25] |
| 7  | Modified Weibull | $H = a (1 - e^{-bD_g^c})$      | [26] |

注:  $H$ 为优势木算术平均树高;  $D_g$ 为优势木平方平均胸径;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为模型待估参数。

可求解交点,该交点对应的胸径即为要确定的基准胸径。

对 Schumacher 模型关于  $D_g$  求一阶导数,得到优势高随  $D_g$  变化的瞬时增长率,并以优势高  $H$  与  $D_g$  的比值表征平均增长率,计算公式如下。

$$IG = \frac{dH}{dD_g} = ae^{-\frac{b}{D_g}} \times \frac{b}{D_g^2} \quad (3)$$

$$AG = \frac{H}{D_g} = \frac{ae^{-b/D_g}}{D_g} \quad (4)$$

代入参数拟合优势木生长曲线,将其作为立地形构建的导向曲线,用于确定基准胸径,并建立不同立地等级的平行曲线体系,同时验证模型的生物学合理性。

#### 2.4.4 立地形的计算

立地形(SF)定义为基准胸径对应的优势高。基于 Schumacher 方程拟合的优势高-优势胸径关系曲线,可得

$$SF = H_{D_g} \times e^{\left(\frac{b}{D_g} - \frac{b}{D_0}\right)} \quad (5)$$

式中:  $D_0$  表示基准胸径,  $H_{D_g}$  表示优势胸径  $D_g$  对应的优势高。

### 2.5 基础树高-胸径模型的筛选

基于立地形公式,根据 5 种优势木组合分别计算相应的立地形值,并采用等距分级法划分 3 个立地等级。将研究区 791 株雪岭云杉单木样本按 8:2

比例划分为建模数据集和检验数据集,前者用于模型拟合,后者用于评估模型泛化性能。样地数据基本统计量见表 5。建模集与检验集树高-胸径散点分布见图 1,两组样本分布特征相近,样本划分代表性良好。

基于 LiDAR 提取的单木树高与样地实测胸径数据,参考国内外经典树高-胸径模型研究成果[5,20,22,24,27-34],选取 30 种经典模型作为候选基础模型。模型类型涵盖线性、幂函数、指数及分式等多种形式(表 6),其核心结构统一表示为

$$H = f(D; \theta) \quad (6)$$

式中:  $\theta$  为模型待估参数向量,其具体组成随模型形式而异(如线性模型中  $\theta = (a, b)$ , 指数模型中  $\theta = (a, b, c)$  等)。

采用线性或非线最小二乘法对 30 种树高-胸径模型进行拟合与比较,选取  $R^2$ 、RMSE、rRMSE、MAE、AIC 作为评价指标,综合筛选拟合精度最优的模型,作为后续研究的基础模型。

### 2.6 非线性混合效应模型

为量化立地等级引起的参数随机波动,以候选基础模型为固定效应框架,将核心参数设为随立地等级变化的随机效应,捕捉不同立地等级下参数的随机变异。

$$\begin{cases} \text{固定效应: } H = f(D; a, b, c) \\ \text{随机效应: } a_i = a + u_i (u_i \sim N(0, \sigma_u^2)) \end{cases} \quad (7)$$

表 5 样地数据基本统计量

Tab. 5 Basic statistics of sample plot data

| 数据   | 样本数 | 变量    | 平均值   | 最小值  | 最大值   | 标准差   |
|------|-----|-------|-------|------|-------|-------|
| 建模数据 | 633 | 树高/m  | 21.17 | 5.17 | 40.00 | 7.31  |
|      |     | 胸径/cm | 26.02 | 5.00 | 56.50 | 10.93 |
| 检验数据 | 158 | 树高/m  | 21.68 | 4.20 | 35.28 | 7.45  |
|      |     | 胸径/cm | 27.65 | 5.00 | 53.20 | 10.99 |

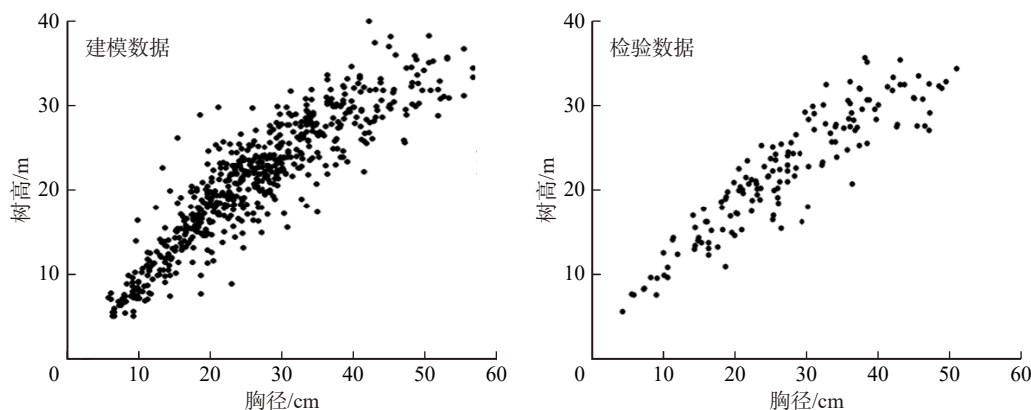


图 1 建模和检验数据的树高-胸径散点图

Fig. 1 Scatter plots of tree height-DBH of modeling and validation data

表6 备选基础模型

Tab. 6 Alternative base models

| 编号 | 模型类型      | 模型表达式                                        |
|----|-----------|----------------------------------------------|
| 1  | 线性模型      | $H = a + bD$                                 |
| 2  |           | $H^{-1} = a + bD^{-1}$                       |
| 3  |           | $H = a + bD + cD^2$                          |
| 4  |           | $H = a + bD^{-1} + cD^2$                     |
| 5  |           | $H = a + b \ln D$                            |
| 6  |           | $\ln(H - 1.3) = a + b \ln D$                 |
| 7  |           | $\ln(H - 1.3) = a + bD^{-1}$                 |
| 8  | 幂函数类      | $H = aD^b$                                   |
| 9  |           | $H = 1.3 + aD^b$                             |
| 10 |           | $H = 1.3 + a\left(\frac{D}{D+1}\right)^b$    |
| 11 |           | $H = 1.3 + 10^a D^b$                         |
| 12 |           | $H = 1.3 + a(1 - e^{-bD})$                   |
| 13 |           | $H = 1.3 + e^{\left(\frac{a+b}{D+1}\right)}$ |
| 14 |           | $H = 1.3 + aD^{bD^{-c}}$                     |
| 15 | Weibull类  | $H = a(1 - e^{-0.05D})$                      |
| 16 |           | $H = 1.3 + \frac{a}{1 + b^{-1}D^{-c}}$       |
| 17 |           | $H = 1.3 + \frac{D^2}{a + bD + cD^2}$        |
| 18 | 指数/双指数类   | $H = 1.3 + D^2(a + bD)^2$                    |
| 19 |           | $H = 1.3 + \frac{aD}{D+1} + bD$              |
| 20 |           | $H = 1.3 + a + \frac{b}{D+c}$                |
| 21 |           | $H = 1.3 + ae^{-be^{-cD}}$                   |
| 22 |           | $H = 1.3 + ae^{\left(\frac{b}{D+c}\right)}$  |
| 23 |           | $H = 1.3 + ae^{-bD^{-c}}$                    |
| 24 | Logistic类 | $H = 1.3 + \frac{a}{1 + be^{-cD}}$           |
| 25 |           | $H = 1.3 + a(1 - e^{-bD^c})$                 |
| 26 | Richards类 | $H = 1.3 + a(1 - e^{-bD})^c$                 |
| 27 | 双曲线类      | $H = \frac{aD}{D+b}$                         |
| 28 |           | $H = 1.3 + \frac{aD}{D+b}$                   |
| 29 |           | $H = 1.3 + e^{a+bD^c}$                       |
| 30 |           | $H = 1.3 + ae^{b/D}$                         |

注:  $D$ 为单木胸径(cm)。

式中:  $a$ 为参数  $a$  的总体固定效应;  $a_i$ 为第  $i$  个立地等级的实际参数;  $u_i$ 为第  $i$  个立地等级对参数  $a$  的随机效应;  $\sigma_u^2$ 为随机效应方差。

### 3 结果与分析

#### 3.1 最优导向曲线筛选与基准胸径确定

综合比较 7 类候选模型的参数显著性、拟合优度及误差指标(表 7), Schumacher 模型整体表现最

优, 故确定其为雪岭云杉立地地形构建的基础导向曲线。

在 5 种优势木组合中, 基于导向曲线拟合得到的基准胸径介于 25 ~ 34 cm(表 8), 表明优势木筛选方式影响基准胸径的确定。其中,  $H_5-D_{g,5}$  组合对应的 Schumacher 导向曲线的综合参数显著性最强, 且拟合效果最佳( $R^2 = 0.794\ 3$ ,  $RMSE = 1.309\ 3$ ,  $MAE = 1.077\ 0$ ,  $MARE = 4.015\ 3$ ), 能较好地反映优势木树高-胸径关系。因此, 确定  $H_5-D_{g,5}$  组合为计算优势木生长指标的最优方法。

基于  $H_5-D_{g,5}$  组合拟合的 Schumacher 模型参数( $a = 67.970$ ,  $b = 33.823$ ), 进一步计算连年生长量与平均生长量并构建生长动态曲线(图 2)。结果表明, 雪岭云杉优势木连年生长量随胸径增加呈先升后降趋势, 在中径级达到峰值后逐渐回落; 平均增长量随胸径增加先升后降, 并在约 34 cm 处达到最大值; 该最大值点与瞬时增长量和平均增长量曲线的交点基本重合。本研究样本胸径范围为 5.00 ~ 56.50 cm, 其中中径级(20 ~ 40 cm)个体占比最高。交点位于样本主要分布区间内, 具有较好的数据支撑, 可降低极端径级样本较少对基准胸径确定的影响, 因此将 34 cm 作为后续立地地形曲线构建的基准胸径。

#### 3.2 基础树高-胸径模型的筛选

30 种备选模型的拟合结果如表 9 所示。综合考量误差指标、拟合优度  $R^2$ 、 $R_a^2$  及 AIC, 含胸径平移倒数项的指数型模型(Model 22)被确定为最优基础模型。该模型在建模数据集的  $R^2$  最高( $R^2 = 0.833\ 9$ ), RMSE、AIC 及 MARE 均处于最低或较低水平( $RMSE = 2.984\ 3$ ,  $AIC = 3\ 185.557$ ,  $MARE = 11.433\ 6\%$ ), 其余误差指标整体表现较优( $ME = 0.001\ 7$ ,  $MAE = 2.219\ 4$ ,  $MRE = 0.106\ 8\%$ ,  $rRMSE = 0.172\ 3$ ), 无明显系统性偏差, 能够精准捕捉雪岭云杉树高随胸径增长的变化规律。在检验阶段, 该模型仍保持较高的预测精度:  $R^2 = 0.858\ 5$ ,  $RMSE = 2.822\ 3$ ,  $AIC = 781.218\ 1$ ,  $MAE = 2.152\ 3$ ,  $rRMSE = 0.133\ 9$ ; 各项指标均优于建模数据集, 且显著高于其他候选模型在检验阶段的表现。此外, 该模型在  $H_5-D_{g,5}$  组合(ALT 法 + C1 策略)数据下也表现出最优的拟合精度与稳定性(表 7、8)。

综上, 确定 Model 22 为基础模型, 并将建模数据集分别拟合至基础模型与非线性混合效应模型中。

$$H = 1.3 + ae^{\left(\frac{b}{D+c}\right)} \quad (9)$$

#### 3.3 非线性混合效应模型拟合

基于立地类型划分立地等级, 以 Model 22 指数函数模型为固定效应框架, 将参数  $a$  设置为按立地

表 7 优势树高-优势胸径模型的评价指标

Tab. 7 Evaluation statistics of dominant height-DBH models

| 优势木选取类型       | 模型名称             | 决定系数<br>( $R^2$ ) | 调整决定系数<br>( $R_a^2$ ) | 均方根误差<br>(RMSE) | 平均绝对误差<br>(MAE) | 平均绝对相对误差<br>(MARE)% | 参数显著程度 |     |     |
|---------------|------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|---------------------|--------|-----|-----|
|               |                  |                   |                       |                 |                 |                     | $a$    | $b$ | $c$ |
| $H_1-D_{g,1}$ | Schumacher       | 0.705 4           | 0.691 3               | 1.647 2         | 1.367 8         | 4.772 8             | ***    | *** | /   |
|               | Richards         | 0.715 0           | 0.686 5               | 1.620 1         | 1.365 7         | 4.767 5             | ***    |     |     |
|               | Modified Weibull | 0.716 5           | 0.688 1               | 1.615 7         | 1.360 8         | 4.752 4             | ***    | *   |     |
|               | Logistic         | 0.716 1           | 0.687 7               | 1.617 0         | 1.362 0         | 4.756 1             | ***    |     |     |
|               | Korf             | 0.713 6           | 0.684 9               | 1.624 1         | 1.368 4         | 4.777 5             | *      |     |     |
|               | Hossfeld IV      | 0.714 6           | 0.686 0               | 1.621 2         | 1.366 9         | 4.772 6             | ***    |     |     |
|               | Gompertz         | 0.715 1           | 0.686 6               | 1.619 8         | 1.365 3         | 4.766 3             | ***    |     |     |
| $H_2-D_{g,2}$ | Schumacher       | 0.679 4           | 0.664 2               | 1.631 8         | 1.289 9         | 4.549 6             | ***    | *** | /   |
|               | Richards         | 0.698 7           | 0.668 5               | 1.582 1         | 1.319 2         | 4.640 6             | ***    |     |     |
|               | Modified Weibull | 0.699 7           | 0.669 7               | 1.579 3         | 1.316 4         | 4.630 3             | ***    | *   |     |
|               | Logistic         | 0.699 3           | 0.669 2               | 1.580 5         | 1.316 9         | 4.632 2             | ***    |     | *   |
|               | Korf             | 0.697 2           | 0.666 9               | 1.586 0         | 1.312 4         | 4.622 5             | ***    |     |     |
|               | Hossfeld IV      | 0.697 1           | 0.666 8               | 1.586 1         | 1.309 3         | 4.612 7             | ***    |     |     |
|               | Gompertz         | 0.698 7           | 0.668 6               | 1.582 0         | 1.318 9         | 4.639 8             | ***    |     |     |
| $H_5-D_{g,5}$ | Schumacher       | 0.794 3           | 0.784 5               | 1.309 3         | 1.077 0         | 4.015 3             | ***    | *** | /   |
|               | Richards         | 0.798 2           | 0.778 1               | 1.296 6         | 1.056 1         | 3.920 6             | ***    |     |     |
|               | Modified Weibull | 0.798 6           | 0.778 4               | 1.295 5         | 1.055 3         | 3.921 5             | ***    |     | *   |
|               | Logistic         | 0.798 5           | 0.778 4               | 1.295 7         | 1.056 9         | 3.929 9             | ***    |     | *   |
|               | Korf             | 0.798 0           | 0.777 8               | 1.297 5         | 1.056 0         | 3.916 0             | *      |     |     |
|               | Hossfeld IV      | 0.798 1           | 0.778 0               | 1.296 9         | 1.056 5         | 3.921 6             | **     |     |     |
|               | Gompertz         | 0.798 3           | 0.778 1               | 1.296 5         | 1.056 4         | 3.922 6             | ***    |     |     |
| $H_6-D_{g,6}$ | Schumacher       | 0.699 7           | 0.685 4               | 1.459 3         | 1.133 6         | 4.233 8             | ***    | *** | /   |
|               | Richards         | 0.714 5           | 0.685 9               | 1.422 9         | 1.140 8         | 4.235 0             | ***    |     |     |
|               | Modified Weibull | 0.715 1           | 0.686 6               | 1.421 3         | 1.140 1         | 4.234 1             | ***    |     | *   |
|               | Logistic         | 0.714 6           | 0.686 0               | 1.422 6         | 1.139 8         | 4.233 7             | ***    |     |     |
|               | Korf             | 0.713 6           | 0.685 0               | 1.425 0         | 1.132 8         | 4.211 4             | ***    |     |     |
|               | Hossfeld IV      | 0.713 9           | 0.685 2               | 1.424 4         | 1.134 0         | 4.217 7             | ***    |     |     |
|               | Gompertz         | 0.714 5           | 0.685 9               | 1.422 9         | 1.140 7         | 4.234 9             | ***    |     |     |
| $H_9-D_{g,9}$ | Schumacher       | 0.689 6           | 0.674 8               | 1.520 8         | 1.220 1         | 4.507 6             | ***    | *** | /   |
|               | Richards         | 0.704 2           | 0.674 6               | 1.484 6         | 1.242 1         | 4.557 2             | ***    |     |     |
|               | Modified Weibull | 0.704 5           | 0.674 9               | 1.483 9         | 1.240 6         | 4.554 5             | ***    |     | *   |
|               | Logistic         | 0.704 1           | 0.674 5               | 1.484 9         | 1.241 3         | 4.557 3             | ***    |     | *   |
|               | Korf             | 0.703 8           | 0.674 2               | 1.485 5         | 1.238 1         | 4.548 0             | ***    |     |     |
|               | Hossfeld IV      | 0.704 0           | 0.674 4               | 1.485 0         | 1.242 6         | 4.558 5             | ***    |     |     |
|               | Gompertz         | 0.704 2           | 0.674 6               | 1.484 6         | 1.242 1         | 4.557 3             | ***    |     |     |

注: 参数显著性下“/”表示该模型不包含该参数; 空白表示该参数不显著, \*\*\*和\*分别表示在0.001和0.05水平下达到显著。

等级分组的随机效应, 构建非线性混合效应模型, 并比较不同  $H-D_g$  组合的拟合效果(表 10)。构建的混合效应模型为

$$H_{ij} = 1.3 + (a + u_i)e^{b/(D_{ij}+c)}, u_i \sim N(0, \sigma_u^2) \quad (9)$$

式中:  $H_{ij}$ 为第  $i$  个立地等级中第  $j$  株树的树高(m);  $D_{ij}$ 为第  $i$  个立地等级中第  $j$  株样木的胸径(cm);  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为模型固定效应参数, 其中参数  $a$  同时引入立地等级层面的随机效应;  $u_i$ 为第  $i$  个立地等级对参

表 8 不同优势木模型的拟合结果  
Tab. 8 Fitting results of various dominant tree models

| 优势木选取类型       | 最佳导向曲线     | 参数 $a$ | 参数 $b$ | 基准胸径/cm |
|---------------|------------|--------|--------|---------|
| $H_1-D_{g,1}$ | Schumacher | 65.583 | 32.948 | 33      |
| $H_2-D_{g,2}$ |            | 59.064 | 26.899 | 27      |
| $H_5-D_{g,5}$ |            | 67.970 | 33.823 | 34      |
| $H_6-D_{g,6}$ |            | 56.666 | 25.651 | 26      |
| $H_9-D_{g,9}$ |            | 55.685 | 25.219 | 25      |

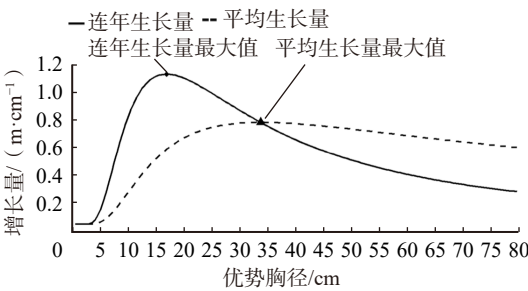


图 2 优势木连年生长量与平均生长量随优势胸径变化曲线  
Fig. 2 Curves of current annual increment and mean annual increment of dominant trees with dominant DBH

数  $a$  的随机效应;  $\sigma_u^2$  为随机效应方差。

整体而言,引入立地等级随机效应后,非线性混合效应模型的拟合精度显著优于基础模型。在各  $H-D_g$  组合下,模型的  $R^2$  均有所提升, RMSE 和 AIC 均呈下降趋势,表明将立地等级作为随机效应纳入模型能有效改善树高-胸径关系的拟合稳定性。从不同  $H-D_g$  组合的拟合表现来看,  $H_2-D_{g,2}$  组合的建模效果最佳( $R^2=0.845\ 8$ , RMSE = 2.875 6 m);与基础模型相比,其  $R^2$  提升 0.011 9, RMSE 降低 0.108 7, AIC 下降 32.979 0。

两个模型在最优建模数据集下的拟合散点与残差诊断结果(图 3、4)表明,非线性混合效应模型的分级拟合曲线与观测值贴合度更高,3 类立地曲线呈现清晰的梯度特征,能够反映不同立地生长潜力的差异。此外,非线性混合效应模型的残差分布更为集中,离散程度收敛,表明其在不同立地条件下具有更好的适应性与泛化能力。

参数估计结果(表 11)显示,引入立地等级随机效应后,混合效应模型中固定效应参数  $b$  和  $c$  的标准误由基础模型的 3.121 0 和 1.437 0 分别降至 2.912 3 和 1.356 0, 95% 置信区间亦相应收窄,表明参数估计稳定性有所提高。不同立地等级的随机效应点估计呈递增趋势,但 3 个随机效应的 95% 置信区间均包含 0,表明当前分级条件下随机效应差异仍存在一定的不确定性。

### 3.4 模型精度与检验

基于  $H-D_g$  各组合的独立检验数据集,对基础

模型与非线性混合效应模型进行精度验证。结果表明,两类模型在独立样本中均具有较好的解释能力,  $R^2$  均大于 0.85(表 12),但非线性混合效应模型的整体预测性能优于基础模型。在不同  $H-D_g$  组合中,  $H_6-D_{g,6}$  组合的非线性混合效应模型表现最优,  $R^2$  达 0.875 6。此外,混合效应模型的 RMSE、MAE 及 rRMSE 均低于基础模型,表明引入立地等级随机效应后,模型在检验数据集上的预测精度与稳定性得到提升。

## 4 讨 论

本研究在天然异龄林条件下,系统比较了 5 种优势木筛选方法对导向曲线构建及树高-胸径模型性能的影响。既有研究<sup>[3,5]</sup>中,优势高的确定多采用固定株数法(CE)或基于胸径排序的筛选方式,该方法在同龄林或结构相对均一的林分中具有较好的稳定性。然而,在结构复杂、径级分布不均的天然异龄林中,传统方法易导致优势木代表性不足,进而影响优势高估计的稳定性<sup>[35]</sup>。ALT 法依据样地面积对优势木数量进行修正,本研究理论优势木数量为 13.8 株,通过线性插值处理非整数情况。相较 CE 法固定选取 9 株优势木,ALT 法扩大了优势木样本范围,提高了优势层结构信息的代表性。其中,ALT 与胸径排序(C1)结合形成的  $H_5-D_{g,5}$  组合在导向曲线拟合中表现最优。这表明,在雪岭云杉天然异龄林中,适当增强优势木对林分结构信息的表征能力,有助于提高立地评价曲线构建的稳定性。该结果与沈剑波<sup>[3]</sup>在南方针阔混交林中的研究结论一致。

进一步比较不同优势木组合在建模与检验阶段的表现发现,优势木筛选方式对模型性能的影响具有阶段性差异。既有研究主要围绕模型形式、林分因子及随机效应等方面开展树高-胸径的拟合与预测精度评价,但对不同优势木筛选策略影响模型拟合与预测性能的系统比较仍相对有限<sup>[6,36-37]</sup>。树高-胸径关系的拟合效果不仅取决于模型形式,还与样本选择方式及样本代表性密切相关<sup>[38]</sup>。本研究表明,基于树高排序的固定株数方法在建模阶段具有较高

表 9 备选模型拟合情况  
Tab. 9 Fitting results of candidate models

| Model | AIC         | ME       | MAE     | RMSE    | MRE/%    | MARE/%   | rRMSE   | $R^2$   | $R_a^2$ |
|-------|-------------|----------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|
| 1     | 3 284.150 5 | 0.000 0  | 2.520 0 | 3.228 5 | -0.782 4 | 13.116 1 | 0.176 0 | 0.805 3 | 0.804 7 |
| 2     | -           | -        | -       | -       | -        | -        | -       | -       | -       |
| 3     | 3 187.113 0 | 0.000 0  | 2.228 3 | 2.987 9 | 0.035 0  | 11.527 6 | 0.173 5 | 0.833 5 | 0.832 7 |
| 4     | 3 282.740 8 | 0.000 0  | 2.447 7 | 3.222 4 | 0.546 8  | 13.380 6 | 0.342 7 | 0.806 3 | 0.805 4 |
| 5     | 3 236.497 2 | 0.000 0  | 2.326 3 | 3.109 2 | 0.992 7  | 12.688 7 | 0.398 7 | 0.819 4 | 0.818 8 |
| 6     | -           | -        | -       | -       | -        | -        | -       | -       | -       |
| 7     | -           | -        | -       | -       | -        | -        | -       | -       | -       |
| 8     | 3 222.809 6 | -0.043 8 | 2.356 7 | 3.075 8 | -0.945 5 | 12.216 6 | 0.169 1 | 0.823 3 | 0.822 7 |
| 9     | 3 231.364 4 | -0.055 4 | 2.383 4 | 3.096 7 | -1.099 6 | 12.373 1 | 0.169 7 | 0.820 9 | 0.820 3 |
| 10    | 3 441.119 6 | 0.644 6  | 2.837 9 | 3.654 7 | 10.261 3 | 19.117 7 | 0.331 8 | 0.750 5 | 0.749 7 |
| 11    | 3 231.364 4 | -0.055 4 | 2.383 4 | 3.096 7 | -1.099 6 | 12.373 1 | 0.169 7 | 0.820 9 | 0.820 3 |
| 12    | 3 186.535 6 | 0.006 0  | 2.219 2 | 2.986 6 | 0.285 9  | 11.500 1 | 0.182 1 | 0.833 6 | 0.832 8 |
| 13    | 3 191.288 9 | -0.033 5 | 2.265 9 | 3.000 2 | -0.517 1 | 11.714 2 | 0.170 0 | 0.831 8 | 0.831 3 |
| 14    | 3 199.555 8 | -0.058 1 | 2.297 5 | 3.019 8 | -0.906 6 | 11.873 3 | 0.167 1 | 0.829 6 | 0.829 1 |
| 15    | 3 576.401 9 | 0.993 8  | 3.188 0 | 4.076 5 | 11.457 5 | 19.205 7 | 0.297 3 | 0.690 0 | 0.688 6 |
| 16    | 3 195.827 6 | -0.058 6 | 2.286 0 | 3.010 9 | -0.875 3 | 11.809 6 | 0.166 9 | 0.830 6 | 0.830 1 |
| 17    | 3 186.517 3 | -0.002 3 | 2.225 8 | 2.986 5 | 0.002 6  | 11.486 0 | 0.171 2 | 0.833 6 | 0.832 8 |
| 18    | 3 210.318 2 | 0.071 4  | 2.264 7 | 3.045 6 | 2.330 6  | 12.864 1 | 0.256 2 | 0.826 7 | 0.826 2 |
| 19    | 3 223.567 7 | 0.092 7  | 2.296 7 | 3.077 7 | 3.208 1  | 13.698 3 | 0.303 0 | 0.823 0 | 0.822 5 |
| 20    | 3 187.120 5 | 0.006 7  | 2.220 8 | 2.988 0 | 0.332 5  | 11.532 6 | 0.185 7 | 0.833 5 | 0.832 7 |
| 21    | 3 192.480 3 | -0.008 9 | 2.244 3 | 3.000 6 | -0.239 1 | 11.566 4 | 0.164 8 | 0.832 1 | 0.831 3 |
| 22    | 3 185.557 1 | 0.001 7  | 2.219 4 | 2.984 3 | 0.106 8  | 11.433 6 | 0.172 3 | 0.833 9 | 0.833 1 |
| 23    | 3 187.120 5 | 0.006 7  | 2.220 8 | 2.988 0 | 0.332 4  | 11.532 6 | 0.185 7 | 0.833 5 | 0.832 7 |
| 24    | 3 185.966 7 | 0.001 7  | 2.220 1 | 2.985 2 | 0.117 4  | 11.454 6 | 0.173 8 | 0.833 8 | 0.833 0 |
| 25    | 3 208.833 9 | -0.025 3 | 2.296 0 | 3.039 6 | -0.545 0 | 11.918 6 | 0.166 3 | 0.827 7 | 0.826 8 |
| 26    | 3 186.226 8 | 0.000 0  | 2.222 6 | 2.985 9 | 0.061 5  | 11.469 1 | 0.172 5 | 0.833 7 | 0.832 9 |
| 27    | 3 276.701 8 | -0.013 7 | 2.502 6 | 3.209 6 | -0.885 1 | 13.022 6 | 0.175 1 | 0.807 6 | 0.806 9 |
| 28    | 3 216.677 5 | 0.081 8  | 2.280 3 | 3.060 9 | 2.750 6  | 13.263 1 | 0.278 4 | 0.825 0 | 0.824 4 |
| 29    | 3 186.167 5 | 0.005 3  | 2.218 5 | 2.985 7 | 0.240 3  | 11.473 4 | 0.178 9 | 0.833 7 | 0.832 9 |
| 30    | 4 273.082 9 | 0.000 0  | 5.647 5 | 7.045 4 | 0.377 9  | 27.427 3 | 0.379 1 | 0.074 1 | 0.069 7 |

注：“-”表示该模型在拟合过程中未收敛或拟合失败，其余模型均成功拟合并参与比较。AIC. 赤池信息准则；ME. 均值误差；MRE. 平均相对误差；rRMSE. 相对均方根误差。下同。

表 10 两类树高-胸径模型的拟合统计量  
Tab. 10 Fitting statistics of two types of tree height-DBH models

| 模型        | 建模数据集         | $R^2$   | RMSE    | AIC       | MAE     | rRMSE   |
|-----------|---------------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| 基础模型      | $H_5-D_{g,5}$ | 0.833 9 | 2.984 3 | 3 185.557 | 2.219 4 | 0.172 3 |
| 非线性混合效应模型 | $H_1-D_{g,1}$ | 0.844 8 | 2.884 8 | 3 155.616 | 2.129 7 | 0.169 9 |
| 非线性混合效应模型 | $H_2-D_{g,2}$ | 0.845 8 | 2.875 6 | 3 152.578 | 2.118 0 | 0.169 7 |
| 非线性混合效应模型 | $H_5-D_{g,5}$ | 0.844 4 | 2.888 3 | 3 157.557 | 2.106 8 | 0.170 2 |
| 非线性混合效应模型 | $H_6-D_{g,6}$ | 0.842 6 | 2.905 3 | 3 164.724 | 2.130 9 | 0.168 9 |
| 非线性混合效应模型 | $H_9-D_{g,9}$ | 0.843 7 | 2.894 8 | 3 160.426 | 2.125 6 | 0.170 1 |

注： $n=633$ 。

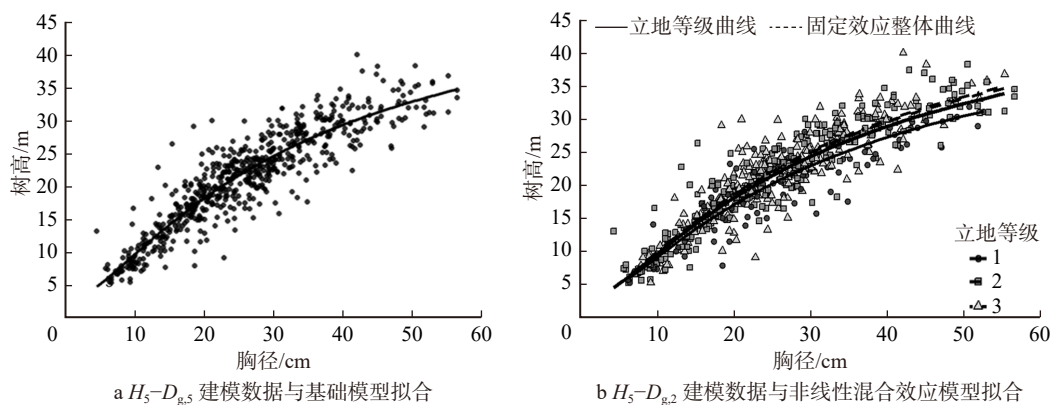


图 3 建模数据的基础模型与非线性混合效应模型拟合结果

Fig. 3 Fitting results of the base model and nonlinear mixed-effects model for the modeling data

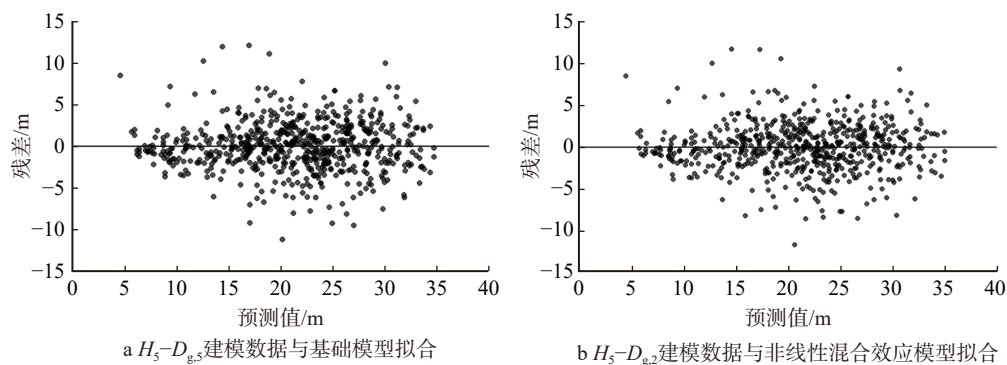


图 4 建模数据的基础模型与非线性混合效应模型残差分布

Fig. 4 Residual distributions of the base model and nonlinear mixed-effects model for the modeling data

表 11 2 种模型的参数估计

Tab. 11 Parameter estimation of the two models

| 模型        | 参数         | 估计值       | 标准差     | 置信区间      |           |
|-----------|------------|-----------|---------|-----------|-----------|
|           |            |           |         | 2.50%     | 97.50%    |
| 基础模型      | $a$        | 55.284 0  | 2.759 0 | 50.441 5  | 61.554 1  |
|           | $b$        | -31.950 0 | 3.121 0 | -39.126 1 | -26.524 1 |
|           | $c$        | 6.887 0   | 1.437 0 | 4.312 2   | 10.084 7  |
| 非线性混合效应模型 | $a_0$      | 53.707 2  | 2.900 4 | 48.025 1  | 59.389 3  |
|           | $b$        | -30.937 4 | 2.912 3 | -36.642 8 | -25.231 9 |
|           | $c$        | 6.491 4   | 1.356 0 | 3.834 9   | 9.147 9   |
|           | 随机效应 $u_1$ | -3.233 0  | 2.355 0 | -7.848 9  | 1.382 9   |
|           | 随机效应 $u_2$ | 1.366 8   | 2.355 0 | -3.249 1  | 5.982 7   |
|           | 随机效应 $u_3$ | 1.866 2   | 2.355 0 | -2.749 7  | 6.482 1   |

注： $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_3$ 分别对应1、2、3级立地等级的参数。

的拟合精度，这可能与其更集中反映优势木的生长特征有关。而在检验阶段，引入数量修正的 ALT 方法(ALT + C2)表现出更高的预测精度，说明该方法在面对样地间结构差异时具有更好的泛化能力。由此可见，在天然异龄林条件下，优势木筛选方式不仅影响模型拟合结果，也影响模型在样本中的稳定性和适用性。该结果进一步证实，针对结构复杂的天然异龄林，优势木样本的代表性是影响树高-胸径模

型预测能力的重要因素<sup>[39]</sup>。

在模型构建方面，引入立地等级作为随机效应后，非线性混合效应模型的拟合精度与稳定性均有所提高，表明立地差异是影响树高-胸径关系的重要因素。已有研究表明，天然混交林中树高-胸径关系除受个体大小影响外，还受到立地条件及林分结构差异的共同作用<sup>[9]</sup>。近年来，相关研究普遍认为，在树高模型中引入林分层次变量或随机效应，能够有效

表 12 2 种树高-胸径模型的检验

Tab. 12 Model test of two tree height-DBH models

| 模型        | 检验数据集         | $R^2$   | RMSE    | AIC       | MAE     | rRMSE   |
|-----------|---------------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| 基础模型      | $H_5-D_{g,5}$ | 0.858 5 | 2.822 3 | 781.218 1 | 2.152 3 | 0.133 9 |
|           | $H_1-D_{g,1}$ | 0.871 0 | 2.694 5 | 776.145 5 | 2.051 9 | 0.130 3 |
|           | $H_2-D_{g,2}$ | 0.869 3 | 2.711 8 | 777.977 5 | 2.048 5 | 0.130 3 |
| 非线性混合效应模型 | $H_5-D_{g,5}$ | 0.873 8 | 2.664 7 | 773.212 2 | 2.006 2 | 0.131 1 |
|           | $H_6-D_{g,6}$ | 0.875 6 | 2.645 5 | 771.375 8 | 1.977 8 | 0.128 2 |
|           | $H_9-D_{g,9}$ | 0.869 9 | 2.705 2 | 777.331 3 | 2.051 9 | 0.130 1 |

注:  $n=158$ 。

提高模型对复杂林分差异的解释能力。如, Cui 等<sup>[40]</sup>指出, 非线性混合效应模型能够有效整合不同样地间的结构差异, 从而提高天然林树高-胸径模型的预测精度; Feng 等<sup>[41]</sup>也认为, 引入随机效应或林分变量能够增强模型对复杂林分结构差异的解释能力, 提高树高预测的稳定性。本研究将立地等级作为综合性分组变量, 在一定程度上弥补了单一变量无法充分反映雪岭云杉天然异龄林差异特征的不足。但从参数估计结果来看, 尽管不同立地等级对应的随机效应参数整体呈递增趋势, 与立地生产力梯度基本一致, 但 3 个随机效应参数的 95% 置信区间均包含 0, 说明在当前的分组框架下, 立地等级对树高-胸径关系的解释作用仍存在一定的不确定性。类似现象在天然异龄林研究<sup>[42-43]</sup>中较为常见。因此, 后续研究有必要进一步引入海拔、坡度及林分密度等环境与林分结构变量, 以提升模型解释能力。

研究区雪岭云杉林分多分布于中高海拔山地, 受地形、土壤及水热条件影响, 林分结构异质性显著, 在不同立地等级间表现出不同的生长限制机制。因此, 针对结构复杂的天然异龄林, 构建兼顾优势木代表性与立地差异表达的评价方法, 更有利于天然异龄林的生长潜力识别与立地质量分级<sup>[44-45]</sup>。以在独立检验数据中预测精度最高的  $H_6-D_{g,6}$  优势木组合为例: I 级立地林分 ( $8.83 \leq SF \leq 14.38$ ), 部分样地存在密度偏高或个体发育受限的情况, 整体生长潜力较弱, 可采用抚育间伐和密度调控等措施, 缓解竞争、促进个体生长; II 级立地林分 ( $14.38 < SF \leq 19.93$ ) 的径级结构与密度分布相对均衡, 表现为稳定生长状态, 可通过适度间伐优化径级结构, 提高林分稳定性; III 级立地林分 ( $19.93 < SF \leq 25.47$ ) 的优势高与胸径均较高, 大径级个体比例较大, 林分生长空间充足, 具有较高的生产力水平, 宜以保留优势木和培育大径材为重点, 维持合理密度, 充分发挥生长潜力。总体而言, 本研究构建的立地质量评价方法能够较好地反映雪岭云杉天然异龄林的结构差异与

生长潜力, 可为该区域天然林的分类经营和可持续管理提供参考。

## 5 结 论

本研究基于样地实测数据与机载 LiDAR 点云数据, 系统分析了不同优势木筛选方式对导向曲线构建及树高-胸径模型性能的影响。结果表明, 优势木筛选方式对模型拟合精度和预测能力具有明显影响; 其中, 代表性更强、能充分反映林分结构差异的样本组合在模型泛化能力方面表现更优, 证实优势木筛选是天然异龄林立地质量评价的关键环节。在此基础上, 构建了基于树高-胸径关系的雪岭云杉天然异龄林立地质量评价方法。结果显示, 该方法在缺乏林木年龄数据条件下, 可通过优势木筛选与导向曲线构建确定基准胸径并分级立地质量; 所构建的立地形指标能较好表征雪岭云杉林分生产力梯度特征, 适用于天然异龄林立地质量评价。此外, 将立地等级作为随机效应引入树高-胸径模型后, 模型的拟合精度、稳定性和预测能力均得到提升。受样地分布范围限制, 研究结论在更大区域尺度的通用性尚需后续扩大采样验证。总体而言, 本研究为雪岭云杉天然异龄林立地质量评价提供了可行方法, 也为缺乏林龄数据条件下的天然林立地评价提供了参考。

**致谢** 感谢新疆农业大学刘正刚老师及研究生胡天祺提供研究区机载 LiDAR 影像和部分样地调查数据。

## 参 考 文 献

- [1] 孟宪宇. 测树学 [M]. 3 版. 北京: 中国林业出版社, 2006: 101.  
Meng X Y. Forest mensuration [M]. 3rd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006: 101.
- [2] Vanclay J K, Henry N B. Assessing site productivity of indigenous cypress pine forest in southern Queensland [J]. Commonwealth Forestry Review, 1988, 67(1): 53-64.
- [3] 沈剑波. 基于广东省针阔混交异龄林的立地质量评价方法研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.  
Shen J B. Study on site quality evaluation methods of uneven-

- aged coniferous and broad-leaved mixed stands in Guangdong Province[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2018.
- [4] 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.
- [5] 曾翀, 雷相东, 刘宪钊, 等. 落叶松云冷杉林单木树高曲线的研究[J]. *林业科学研究*, 2009, 22(2): 182–189.
- Zeng C, Lei X D, Liu X Z, et al. Individual tree height-diameter curves of larch-spruce-fir forests [J]. *Forest Research*, 2009, 22(2): 182–189.
- [6] 李欣宇, 叶尔江·拜克吐尔汗, 王娟, 等. 基于非线性混合效应模型的东北红松树高-胸径关系[J]. *北京林业大学学报*, 2025, 47(3): 38–48.
- Li X Y, Yierjiang B K T H, Wang J, et al. Relationship between tree height and DBH of *Pinus koraiensis* in northeastern China based on nonlinear mixed effects model [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2025, 47(3): 38–48.
- [7] 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.
- [8] Chen Q D, Gao T, Zhu J J, et al. Individual tree segmentation and tree height estimation using leaf-off and leaf-on UAV-LiDAR data in dense deciduous forests [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2787.
- [9] 杨军, 王帆, 宋仲禹. 基于背包激光雷达构建天然林蒙古栎胸径-树高模型[J]. *森林工程*, 2023, 39(5): 57–64.
- Yang J, Wang F, Song Z Y. Development of natural forest *Quercus mongolica* diameter-height curve model based on BLS [J]. *Forest Engineering*, 2023, 39(5): 57–64.
- [10] 胡天祺, 王振锡, 郝康迪, 等. 基于 WorldView-3 遥感影像与机载 LiDAR 的单木树高提取[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(10): 166–175.
- Hu T Q, Wang Z X, Hao K D, et al. Extraction of individual tree height using WorldView-3 remote sensing images and airborne LiDAR [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(10): 166–175.
- [11] 于生华. 天然林资源共享保护工程在我区经济社会发展中的地位 and 重要性[J]. *新疆林业*, 2015(1): 21–23.
- Yu S H. The position and importance of natural forest resources sharing and protection project in the economic and social development of our region [J]. *Forestry of Xinjiang*, 2015(1): 21–23.
- [12] 闫兆杰. 基于机载激光雷达的天山云杉树高估测研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2024.
- Yan Z J. Study on tree height estimation of *Picea schrenkiana* based on airborne lidar[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2024.
- [13] 闫兆杰, 苏香玲, 王振锡, 等. 基于不同点云密度 LiDAR 数据的天山云杉单木树高提取[J]. *新疆农业科学*, 2025, 62(4): 917–928.
- Yan Z J, Su X L, Wang Z X, et al. Single tree height extraction based on different LiDAR density data of Tianshan spruce [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2025, 62(4): 917–928.
- [14] 陶薇, 向玮, 陶然, 等. 融合机载 LiDAR 的天然混交林优势高估算方法[J]. *北京林业大学学报*, 2026, 48(3): 165–177.
- Tao W, Xiang W, Tao R, et al. Estimation methods of top height in natural mixed forests integrating airborne LiDAR [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2026, 48(3): 165–177.
- [15] 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.
- [16] 国家林业和草原局. LY/T 3315—2022 森林立地质量评价技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- National Forestry and Grassland Administration. LY/T 3315—2022 Technical regulation for forest site quality evaluation[S]. Beijing: China Standards Press, 2022.
- [17] 《中国森林立地分类》编写组. 中国森林立地分类[M]. 北京: 中国林业出版社, 1989: 42–46.
- Editorial Group of Forest Site Classification in China. Forest site classification in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1989: 42–46.
- [18] 沈国舫, 翟明普. 森林培育学[M]. 2 版. 北京: 中国林业出版社, 2011: 21–25.
- Shen G F, Zhai M P. Forest cultivation[M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011: 21–25.
- [19] 马伟, 孙玉军. 长白落叶松人工林立地指数表和胸径地位级表的编制[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(12): 21–25, 38.
- Ma W, Sun Y J. Compilation of site index table and site class table for *Larix olgensis* plantations [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, 41(12): 21–25, 38.
- [20] Richards F J. A flexible growth function for empirical use [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1959, 10(2): 290–301.
- [21] Korf V. Příspěvek k matematické definici vzrůstového zákona hmot lesních porostů [J]. *Lesnická Práce*, 1939, 18: 339–379.
- [22] Pearl R, Reed L J. On the rate of growth of the population of the United States since 1790 and its mathematical representation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1920, 6(6): 275–288.
- [23] Peschel W. Die mathematischen Methoden zur Herleitung der Wachstumsgesetze von Baum und Bestand und die Ergebnisse ihrer Anwendung [J]. *Tharandter Forstliches Jahrbuch*, 1938, 89: 169–274.
- [24] Schumacher F X. A new growth curve and its applications to timber yield studies [J]. *Journal of Forestry*, 1939, 37: 819–820.
- [25] Gompertz B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1825, 115: 513–583.

- [26] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1951, 18(3): 293–297.
- [27] Stage A R. Prediction of height increment for models of forest growth[M]. Ogden: Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U. S. Dept. of Agriculture, 1975.
- [28] Curtis R O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir [J]. *Forest Science*, 1967, 13(4): 365–375.
- [29] Meyer H A. A mathematical expression for height curves [J]. *Journal of Forestry*, 1940, 38(5): 415–420.
- [30] Sibbesen E. Some new equations to describe phosphate sorption by soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1981, 32(1): 67–74.
- [31] Winsor C P. The gompertz curve as a growth curve [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1932, 18(1): 1–8.
- [32] Ratkowsky D A. Handbook of nonlinear regression models[M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1990.
- [33] Wykoff W, Crookston N L, Stage A R. User's guide to the stand prognosis model[M]. Ogden: U. S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1982.
- [34] Xu Q G, Yang F, Hu S, et al. Tree height-diameter model of natural coniferous and broad-leaved mixed forests based on random forest method and nonlinear mixed-effects method in Jilin Province, China [J]. *Forests*, 2024, 15(11): 1922.
- [35] 董自华, 李大勇, 梁宇, 等. 冀北山地杨桦次生混交林地位指数模型构建 [J]. *林草资源研究*, 2024(3): 70–78.  
Dong Z H, Li D Y, Liang Y, et al. Construction of the site index model of secondary *Populus davidiana* × *Betula platyphylla* mingled forest in northern Hebei Mountains [J]. *Forest and Grassland Resources Research*, 2024(3): 70–78.
- [36] 姜鹏, 孙悦, 许佳明, 等. 基于非线性混合效应的华东地区主要优势树种林分水平树高-胸径模型 [J]. *自然保护地*, 2024, 4(3): 65–73.  
Jiang P, Sun Y, Xu J M, et al. Tree height-diameter models of main tree species in East China based on nonlinear mixed-effects model [J]. *Natural Protected Areas*, 2024, 4(3): 65–73.
- [37] 曹晓梅, 苗铮, 郝元朔, 等. 基于树种分类的帽儿山阔叶混交林树高-胸径模型 [J]. *应用生态学报*, 2024, 35(2): 307–320.  
Cao X M, Miao Z, Hao Y S, et al. Height-diameter model of broad-leaved mixed forest based on species classification in Maershan, Northeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(2): 307–320.
- [38] Wu B Y, Lei X D, Xu Q G, et al. Forest site classification and grading using mixed-variables clustering and nonlinear mixed-effects modeling based on forest inventory data [J]. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2025, 98(5): 812–826.
- [39] Siipilehto J, Sarkkola S, Nuutinen Y, et al. Predicting height-diameter relationship in uneven-aged stands in Finland [J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 549: 121486.
- [40] Cui K D, Wu X Y, Zhang C Y, et al. Estimating height-diameter relations for structure groups in the natural forests of Northeastern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2022, 519: 120298.
- [41] Feng Y, Chai Y, Qin Y P, et al. Plant functional traits and tree size inequality improved individual tree height prediction of mid-montane humid evergreen broad-leaved forests in southwest China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2024, 551: 121526.
- [42] 程雯, 武晓昱, 叶尔江·拜克吐尔汉, 等. 基于混合效应和分位数回归的温带针阔混交林树高与胸径关系研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2024, 46(2): 28–39.  
Cheng W, Wu X Y, Yierjiang B K T H, et al. Research on the relationship between tree height and DBH of temperate coniferous and broadleaved mixed forests based on mixed effects and quantile regression [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(2): 28–39.
- [43] Zhang W M, Xi Y B, Brandt M, et al. Stand structure of tropical forests is strongly associated with primary productivity [J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5: 796.
- [44] 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 Y, Zhou M L, Luo G C, 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.
- [45] 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.

(责任编辑 孟 瑶  
责任编辑 张会儒)