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

融合机载LiDAR的天然混交林优势高估算方法

陶薇 向玮 陶然 周梦丽 胡志强 徐伟

Estimation methods of top height in natural mixed forests integrating airborne LiDAR

Tao Wei, Xiang Wei, Tao Ran, Zhou Mengli, Hu Zhiqiang, Xu Wei

引用本文:
陶薇, 向玮, 陶然, 周梦丽, 胡志强, 徐伟. 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. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250355
Tao Wei, Xiang Wei, Tao Ran, Zhou Mengli, Hu Zhiqiang, Xu Wei. Estimation methods of top height in natural mixed forests integrating airborne LiDAR[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(3):165–177. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250355

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250355

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

天山云杉天然林优势高估计方法
Estimation methods for dominant height in natural forest of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica*
北京林业大学学报, 2025, 47(12): 48–55. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250299

基于无人机激光雷达的天然林林隙识别
Forest gap identification in natural forest based on UAV LiDAR
北京林业大学学报, 2022, 44(6): 44–53. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210524

基于无人机激光雷达的人工林碳储量线性与非线性估测模型比较
Comparison in linear and nonlinear estimation models of carbon storage of plantations based on UAV LiDAR
北京林业大学学报, 2021, 43(12): 9–16. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200417

天然混交林林分发育阶段划分方法的比较
Comparison of methods for dividing developmental stages of natural mixed forest stands
北京林业大学学报, 2024, 46(7): 139–152. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230174

移动式激光雷达在人工林样地调查中的路径规划方法
Path planning method of mobile lidar in plantation sample plot survey
北京林业大学学报, 2024, 46(5): 154–162. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220273

基于激光雷达技术估算钱江源国家公园森林的地上生物量
Utilizing LiDAR technology to estimate forest aboveground biomass in Qianjiangyuan National Park, Jiangxi Province of eastern China
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 77–84. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220383

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250355

融合机载 LiDAR 的天然混交林优势高估算方法

陶　薇[1,2]　向　玮[1,2]　陶　然[1,2]　周梦丽[3]　胡志强[1,2]　徐　伟[4]
（1. 北京林业大学林学院，北京 100083；2. 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 450046；4. 汪清林业分公司，吉林 延吉 133200）

摘要:【目的】针对天然混交林结构复杂、优势高估算困难的问题，本研究旨在利用机载 LiDAR 技术获取的高精度树高数据，系统评估多种优势高估算方法在针叶混交林、阔叶混交林及针阔混交林中的适用性，并为不同林分类型筛选出最优的估算方法。**【方法】**基于 42 块天然混交林样地数据，结合机载 LiDAR 点云提取的高精度单木树高信息，构建了由 3 类基础估算算法（传统估算法、调整最大树法和 U 估计法）与 4 种优势木选择标准组合而成的 10 种优势高估算方法（TH1 ~ TH10）。通过不确定性分析、差异性检验及相关性分析等统计手段，并与普适方法进行对比，系统评价其在不同林分条件下的表现。**【结果】**（1）在 3 种林分类型中，所得优势高估计值各有不同但总体呈现一致的规律性，总体呈现“传统估算方法 > 调整最大树法 > U 估计法”的趋势，另外，将树种差异纳入考量会导致估算值偏低。（2）各方法间差异显著性因林分类型而异。阔叶混交林中仅挑选最高树且不考虑树种差异的传统估算方法（TH2）与综合考虑最高树及不同树种差异的 U 估计法（TH10）差异显著；针叶混交林中 TH10 与其他多种方法存在显著区别；针阔混交林的情况最为复杂，呈现多组显著乃至极显著的差异组合。（3）所有估算方法在各林分类型中均呈正相关，其中阔叶混交林内各方法间关联性最强（$r = 0.71 \sim 0.99$）。（4）3 种林分类型中，绝大多数优势高方法估计值与加权林分密度指数（SDI）仅表现出微弱的正相关，表明这些方法受密度影响较小。（5）不确定性分析显示，TH9（仅挑选最粗树的 U 估计法）与 TH2 在针叶混交林中表现最佳，TH10 和 TH6 则分别在阔叶混交林和针阔混交林中表现出最低的不确定性，结果最为可靠。（6）各优势高估算方法均与林分平均高呈中度至极强正相关，但与林分生物量和断面积生长量的相关性则普遍较弱，在 3 种林分类型中表现出一致的规律。**【结论】**本研究证实，在天然混交林优势高估算中，通过机载 LiDAR 数据针对不同林分类型匹配特定算法，比采用单一通用方法更为科学可靠。推荐如下最优方案：针叶混交林宜采用仅挑选最高树且不考虑树种差异的传统估算方法（TH2），针阔混交林宜采用仅挑选最高树且不考虑树种差异的调整最大树法（TH6），阔叶混交林宜采用综合考虑最高树及树种差异的 U 估计法（TH10）进行优势高估算。研究进一步明确了天然混交林条件下优势高估算方法的合理选型，为机载 LiDAR 数据在复杂森林结构的应用提供了重要的参考价值。

关键词：激光雷达；天然混交林；优势高；林分分类；精度评估；不确定性分析
中图分类号：S758　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)03−0165−13
引文格式：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 Wei, Xiang Wei, Tao Ran, 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.

Estimation methods of top height in natural mixed forests integrating airborne LiDAR

Tao Wei[1,2]　Xiang Wei[1,2]　Tao Ran[1,2]　Zhou Mengli[3]　Hu Zhiqiang[1,2]　Xu Wei[4]
(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing 100083, China;
3. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China;
4. Wangqing Forestry Branch Company, Yanji 133200, Jilin, China)

收稿日期: 2025−09−12　**修回日期:** 2025−12−08
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: 陶薇。主要研究方向：林分生长模型研究。Email：taowei_bjfu@163.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，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

Abstract: [**Objective**] Given the complex structure of natural mixed forests and the difficulty of accurately estimating top height, this study aims to utilize high-precision tree height data derived from Airborne LiDAR to systematically evaluate the applicability of multiple top height estimation methods in coniferous mixed forests, broad-leaved mixed forests, and coniferous–broadleaved mixed forests, and to identify the optimal estimation method for each forest type. [**Method**] Based on data from 42 natural mixed forest plots, combined with high-precision individual-tree height information extracted from Airborne LiDAR point clouds, ten top height estimation methods were developed by integrating three basic estimation approaches—the conventional estimation method, the adjusted largest trees method, and the U-estimator method (UE)—with four dominant tree selection criteria. Uncertainty analysis, difference testing, and correlation analysis were applied, and the results were compared with a general method applicable to all forest types to systematically evaluate the performance of these methods under different forest conditions. [**Result**] (1) Across the three forest types, the estimated top height values differed among methods but exhibited a generally consistent pattern, following the trend of conventional estimation methods > adjusted maximum tree methods > U-estimator methods. In addition, incorporating tree species differences tended to result in lower top height estimates. (2) Differences among estimation methods varied with forest type. In broad-leaved mixed forests, only TH2 (the conventional estimation method selecting the highest trees without considering species differences) and TH10 (the U-estimator method considering both the highest trees and species differences) showed significant differences. In coniferous mixed forests, TH10 differed significantly from several other methods. The coniferous–broad-leaved mixed forests exhibited the most complex pattern, with multiple pairs of methods showing significant or highly significant differences. (3) All estimation methods were positively correlated across forest types, with the strongest inter-method associations observed in broad-leaved mixed forests (r = 0.71–0.99). (4) In all three forest types, the majority of top height method estimates showed only weak positive relationships with the weighted stand density index (SDI), indicating that these methods were relatively insensitive to stand density. (5) Uncertainty analysis indicated that TH9 (the U-estimator method selecting only the largest-diameter trees) and TH2 performed best in coniferous mixed forests, while TH10 and TH6 exhibited the lowest uncertainty in broad-leaved mixed forests and coniferous–broad-leaved mixed forests, respectively, yielding the most reliable results. (6) All top height estimation methods are moderately to very strongly positively correlated with the average stand height, but their correlations with stand biomass and basal area growth are generally weak, showing a consistent pattern across the three stand types. [**Conclusion**] This study demonstrates that, for top height estimation in natural mixed forests, matching forest-type-specific algorithms based on Airborne LiDAR data is more scientifically reliable than applying a single universal method. Specifically, the conventional estimation method that selects only the highest trees without considering species differences (TH2) is recommended for coniferous mixed forests, the adjusted maximum tree method with the same selection criterion (TH6) for coniferous–broad-leaved mixed forests, and the U-estimator method that accounts for both the highest trees and species differences (TH10) for broad-leaved mixed forests. These findings further clarify the rational selection of top height estimation methods under natural mixed forest conditions and provide valuable reference for the application of Airborne LiDAR data in forests with complex structural characteristics.

Key words: LiDAR; natural mixed forest; top height; forest classification; accuracy assessment; uncertainty analysis

林分优势高是评价立地质量、反映林木生长状况和林分生产力的重要指标，在现代森林资源监测、生态系统功能评估以及碳储量动态分析中具有核心地位[1−2]。作为反映林分中优势木的高度水平的关键参数，优势高能够有效表征立地条件对森林生长的潜在影响，是森林经营决策与生态研究的基础数据。

传统的优势高获取主要依赖人工测量(如使用测高仪逐木检尺)，虽然精度较高，但存在劳动强度

大、作业效率低、覆盖范围受限及野外安全风险高等问题。近年来，以机载激光雷达（LiDAR）技术为核心的现代林业遥感手段取得了突破性进展[3]，为高效、精准地获取森林三维结构参数提供了新手段[4]。机载 LiDAR 系统通过主动发射激光脉冲并接收回波，能够生成高密度的植被冠层点云数据，进而精确反演出单木树高等关键信息[5−6]。庞勇等[7−9]的研究已证实，利用机载 LiDAR 数据提取单木树高具有高度的可行性与精度。这一技术突破为进一步深化森林参数的遥感反演，尤其是为复杂林况下优势高的估算，奠定了坚实的数据基础。除机载 LiDAR 外，近年来多种信息化测树技术在森林参数获取中也取得了显著进展。星载 LiDAR（如 GEDI）实现了全球尺度森林冠层高度与生物量的反演，为大范围森林资源监测提供了重要数据支持[10]；地基 LiDAR（TLS）则具备毫米级精度，能精确重建单木三维结构，广泛应用于树高、胸径及冠层形态分析[11]。与此同时，背负式与手持式 LiDAR 系统（MLS、HLS）在机动性与空间分辨率之间取得平衡，适用于小范围林分的结构精细化调查。摄影测量技术同样可生成高精度冠层模型，与 LiDAR 数据形成有效互补[12]。这些多源信息化技术的快速发展，为优势高估算的自动化与多尺度应用提供了新途径。

尽管测树技术不断进步，但在混交林中准确估算优势高仍面临显著挑战[13−14]。当前学界对“优势高”的定义尚未形成统一标准，例如：《测树学》将其定义为林分中所有优势木或亚优势木高度的算术平均高[15]，国际组织建议采用 100 棵/hm^2 最高树的平均高度[16]，而欧洲部分国家则常以 0.01 hm^2 样地最高树的平均值作为代表[17]。定义差异导致优势高计算方法多样化，也使得不同研究间结果难以直接比较[18]。此外，现有研究多集中于结构单一的纯林或单一类型的混交林，缺乏针对多种林分类型的系统比较[19−20]。部分研究仍依赖人工实测树高数据，缺乏利用高精度 LiDAR 点云进行系统性方法评估的研究。因此，探索一种能够适应天然混交林复杂结构特征、兼具稳定性与可靠性的优势高估算方法体系，仍是待解决的关键问题[21]。

基于上述问题，本研究以多林分类型的天然混交林为对象，融合机载 LiDAR 提取的精确树高数据替代传统人工测量，系统比较不同优势木选取标准与计算方法在不同林分类型中的表现。在统一的优势高定义框架下，构建 10 种优势高估算方法，评估其在 3 类典型混交林（针叶、阔叶、针阔混交林）中的适用性与稳定性，旨在为天然混交林优势高的科学估算与立地质量评价提供方法学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于吉林省汪清林业局金沟岭林场（图 1）（43°17′ ~ 43°25′N，130°05′ ~ 130°20′E），海拔 300 ~ 1 200 m，林地平均坡度介于 10° ~ 25°，属温带大陆

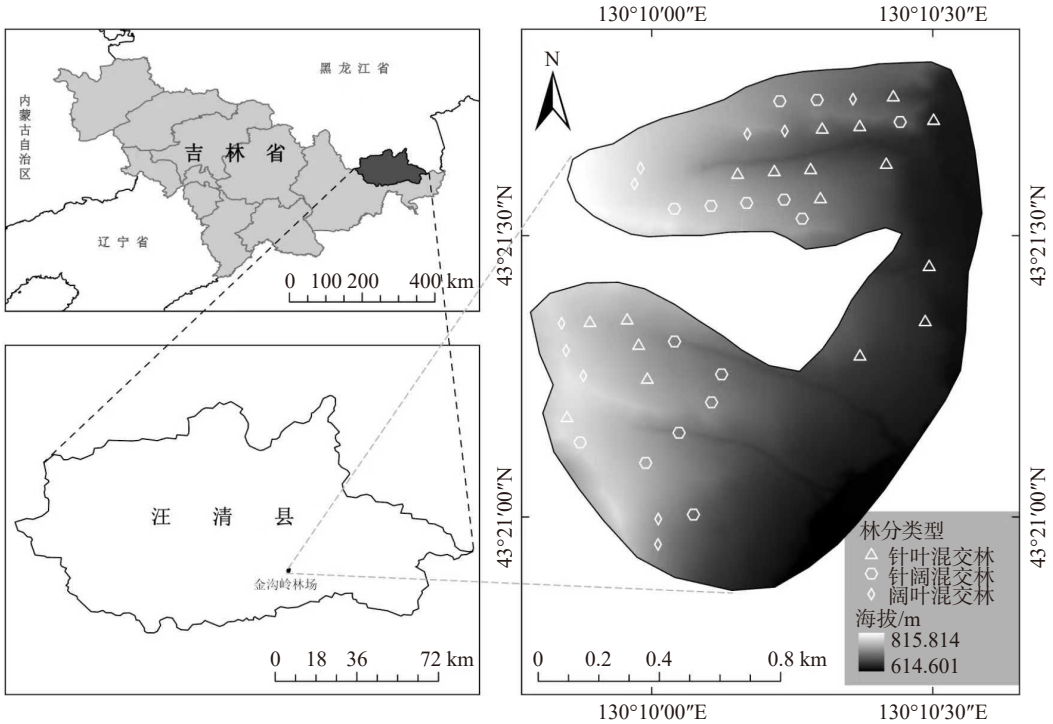


图 1　研究区位置及样地分布示意图

Fig. 1　Location of the study area and distribution of sample plots

性季风气候，年平均气温 3.9 ℃，年平均降水量 600～700 mm，多集中在 7 月，主要的土壤种类为暗棕壤。研究区内主要针叶树种有臭冷杉(*Abies nephrolepis*)、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、红松(*Pinus koraiensis*)。主要阔叶树种有硕桦(*Betula costata*)、椴树(*Tilia tuan*)、裂叶榆(*Ulmus laciniata*)、青楷槭(*Acer tegmentosum*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及数据来源

研究样地位于吉林省汪清林业局金沟岭林场，均为采用“检查法”布设的天然混交林固定监测样地。为获取单木树高信息,本研究使用大疆 Matrice 350 RTK 无人机搭载禅思 Zenmuse L2 激光雷达传感器进行机载 LiDAR 数据采集。通过优化飞行参数与航线重叠率，点云密度达到约 1 100 点/m^2，并配合中海达 D8 GNSS RTK 系统完成样地内单木定位[22]。点云树高数据通过 LiDAR360(GreenValley International)软件手动分割提取获得[23−24]。

共获取初始样地 47 块，剔除不具代表性或点云质量不足的样地 5 块，最终保留 42 块有效样地用于分析。42 块样地涵盖针叶混交林、阔叶混交林、针阔混交林这 3 种典型天然混交林林分类型，能够较好地反映整个天然混交林生态系统。其中，针叶混交林的划分依据[25]为针叶树种断面积占比≥65%，对应样地数量为 17；阔叶混交林以阔叶树种断面积占比≥65% 为划分依据[25]，样地数量为 10；针阔混交林的划分依据[25]为针叶树种断面积占比 < 65%、阔叶树种断面积占比 < 65%，但二者断面积之和 > 65%，样地数量为 15。单木生物量与林分总生物量(所有单木生物量之和)依据树种异速方程[26−27]计算得出，并利用 2020 年和 2024 年的胸径数据估算胸高断面积生长量(basal area increment，BAI)。林分特征表见表 1。

表 1 研究样地林分特征统计

Tab. 1 Statistics of stand characteristics for sample plots

变量	统计量	针叶混交林	针阔混交林	阔叶混交林
针叶树种断面积占比/%	最小值	65.74	35.37	0
	最大值	98.02	64.91	32.76
	平均值	78.12	49.13	18.55
阔叶树种断面积占比/%	最小值	1.98	35.09	67.24
	最大值	34.26	64.63	100.00
	平均值	21.88	50.87	81.45
平均树高/m	最小值	10.18	12.59	12.44
	最大值	21.13	20.52	16.42
	平均值	17.04	15	14.92
平均胸径/cm	最小值	16.38	17.29	15.62
	最大值	33.03	32.59	28.61
	平均值	26.48	22.12	22.57
公顷生物量/(t·hm^{-2})	最小值	46.14	56.01	49.83
	最大值	251.78	170.99	164.44
	平均值	130.27	90.96	103.29
公顷胸高断面积/(m^2·hm^{-2})	最小值	9.43	12.76	14.25
	最大值	46.43	27.11	34.08
	平均值	26.07	18.77	22.03
公顷株数/(株·hm^{-2})	最小值	300	300	350
	最大值	775	950	800
	平均值	482	513	560

1.2.2 优势高估算方法

本研究在统一的定义框架下进行优势高估算，依据《测树学》中“优势木或亚优势木的平均高度”这一概念，将优势高具体定义为能够反映林分立地生产力和垂直结构特征的优势木平均高度[15]。在针对混交林开展优势高估算时，由于优势木选择策略不同，估算结果可能存在一定差异。基于这一认识，在此框架下，系统组合了 3 种基础估算方法(传统估算法、调整最大树法、U 估计法)与 4 种优势木选择标准，共形成 10 种估算方法(TH1～TH10，见表 2)，旨在比较不同方法在天然混交林中的适用性与稳定性。理论上，3 类基础估算方法与 4 种优势木选择标准可组合形成 12 种优势高估算方法。但在相关文献中[19−20]，部分组合通常被归并处理，而非作为独立方法进行分析。参考前人研究思路，并考虑方法体系的简洁性，本文最终选取 10 种具有代表性的优势高估算方法(TH1～TH10)开展比较研究。其中，关于优势木的挑选，本研究纳入了以下 4 种标准：仅挑选最粗树(SM1)；仅挑选最高树(SM2)；综合考虑最粗树及不同树种差异(SM3)；综合考虑最高树及不同树种差异(SM4)。所采用的 3 种基础优势高估算方法[19−20]如下。

(1)传统估算法(conventional estimation，CE)：通过计算样地内 N_{CE}(采用 CE 所筛选出参与计算的优势木数量)株优势木的算术平均树高，即可得到该样地的优势高(H_{CE})，其中优势木的筛选标准为样地内最粗树或最高树。

(2)调整最大树法(adjusted largest trees，ALT)：通过调整用于估算林分优势高的优势木株数，减少估算偏差。该方法从样地内挑选出 N_{ALT} 株优势木，并计算所挑选树木的算术平均树高以确定优势高(H_{ALT})。其中，优势木的筛选标准为样地内最粗树或最高树。特别地，当 N_{ALT} 的计算结果为非整数时，最终的 H_{ALT} 值将依据 N_{ALT} 相邻的两个整数，运用

表 2　天然混交林优势高估算方法

Tab. 2　Summary of estimation methods for top height in natural mixed forests

基础优势高估算方法	优势木选择方式	优势高估算方法	表达公式
CE	SM1	TH1	$H_{CE,SM1}=\sum_{p=1}^{n}(h_{DBH})_p/n,\ n=A\times100$
	SM2	TH2	$H_{CE,SM2}=\sum_{p=1}^{n}h_p/n,\ n=A\times100$
	SM3	TH3	$H_{CE,SM3}=\sum_{q=1}^{s}\sum_{p=1}^{n_q}(h_{DBH})_p/\sum_{q=1}^{s}n_q$ $n_q=(g_q/G)\times A\times100$
	SM4	TH4	$H_{CE,SM4}=\sum_{q=1}^{s}\sum_{p=1}^{n_q}h_p/\sum_{q=1}^{s}n_q$ $n_q=(g_q/G)\times A\times100$
ALT	SM1	TH5	$H_{ALT,SM1}=\frac{\sum_{p=1}^{n}(h_{DBH})_p}{n},\ n=1.6\times A\times100-0.6$
	SM2	TH6	$H_{ALT,SM2}=\sum_{p=1}^{n}h_p/n,\ n=1.6\times A\times100-0.6$
	SM3	TH7	$H_{ALT,SM3}=\sum_{q=1}^{s}\sum_{p=1}^{n_q}(h_{DBH})_p/\sum_{q=1}^{s}n_q$ $n_q=(g_q/G)\times1.6\times A\times100-0.6$
	SM4	TH8	$H_{ALT,SM4}=\sum_{q=1}^{s}\sum_{p=1}^{n_q}h_p/\sum_{q=1}^{s}n_q$ $n_q=(g_q/G)\times1.6\times A\times100-0.6$
UE	SM1	TH9	$H_{UE,SM1}=\sum_{p=1}^{w}h_p/w,\ w=C_N^m,\ m=\mathrm{round}\left(\frac{N}{100\times A}\right)$
	SM4	TH10	$H_{UE,SM4}=\sum_{q=1}^{s}\sum_{p=1}^{w_q}h_p/\sum_{q=1}^{s}w_q,\ w_q=C_{N_q}^{m_q},\ m_q=\mathrm{round}\left(\frac{N_q}{100\times A}\right)$

注：CE、ALT、UE分别为传统估算法、调整最大树法、U 估计法；SM1 ~ SM4为4种优势木选择方式；TH1 ~ TH10为10种优势高估算方法；A表示样地大小；n、n_q分别表示在某个样地中所有树种和第q个树种中所筛选出的林木株数；h_{DBH}、h分别表示根据胸径或树高所筛选树木的树高；s表示某样地中全部树种数量；g_q、G分别表示某样地中第q个树种、全部树种的胸高断面积之和；w、w_q分别表示某样地中所含全部树种或第q个树种的树高所形成的子集个数；m、m_q分别表示某样地中所含全部树种或者第q个树种树高所形成子集中每个子集的元素个数，即每个子集所含的树木株数；N、N_q分别表示某样地中所含全部树种或者第q个树种的林木株数。

线性内插法来计算最终的优势高值。

（3）U 估计（U-estimator，UE）：从样地的全部林木中抽取 m 株林木形成组合，统计每个组合中最高树木的树高，并计算其平均值，以此作为优势高（H_{UE}）。m 值的计算方法见表 2。若 m 值为非整数，按四舍五入规则取整。

1.2.3　林分平均高及林分密度计算

为便于分析林分优势高与林分平均高的相关性，本文对样地内活立木的林分平均高进行了计算。研究中计算了算术平均高和断面积加权平均高。其中，算术平均高能够反映林分内所有树木树高的平均水平，提供不受胸径影响的参考值；而断面积加权平均高通过引入树木胸高断面积的权重，更能反映林分整体的平均高度水平。

$$H_{am}=\frac{\sum_{a=1}^{n}h_a}{n} \tag{1}$$

表 3　各林分类型中 TH1 ~ TH10 与 SDI 关系的线性回归分析

Tab. 3　Linear regression results of the relationships between TH1−TH10 and SDI across different forest types

优势高估算方法	针叶混交林		针阔混交林		阔叶混交林	
	K	R^2	K	R^2	K	R^2
TH1	0.005 1	0.25	−0.002 4	0.08	0.012 8	0.53
TH2	0.011 4	0.58	0.007 0	0.30	0.006 1	0.33
TH3	0.004 2	0.20	0.001 7	0.06	0.016 2	0.70
TH4	0.010 3	0.53	0.012 8	0.49	0.010 2	0.49
TH5	0.007 5	0.38	0.001 1	0.04	0.013 9	0.60
TH6	0.012 1	0.58	0.006 9	0.32	0.007 5	0.40
TH7	0.012 3	0.50	−0.003 7	0.11	0.011 5	0.43
TH8	0.016 8	0.63	0.003 4	0.11	0.007 8	0.30
TH9	0.009 8	0.53	0.010 4	0.37	0.001 0	0.53
TH10	0.007 1	0.37	0.005 8	0.25	0.009 5	0.53

注：K值表示TH1 ~ TH10与SDI的线性回归斜率，用于表征不同优势高估算方法对林分密度变化的响应趋势；R^2为回归模型的决定系数，表示SDI对优势高估算值变异的解释程度。

式中：H_{am} 为算术平均高，n 为样地内活立木的树木数量，h_a 为样地中第 a 株树木的树高。

$$H_{wm}=\frac{\sum_{a=1}^{n}(g_a\times h_a)}{\sum_{a=1}^{n}g_a} \tag{2}$$

式中：H_{wm} 为加权平均高，g_a 是第 a 株树木的胸高断面积。

本研究采用加权林分密度指数(I_{SD})[28]用以分析林分密度对优势高估算方法的影响，由于林分密度指数值为一个连续型数值，故将林分密度指数按照组间距为 100 株/hm² 进行分组，其表达式如下所示。

$$I_{SD}=\sum_{i=1}^{t}N_i\times(D_i/25)^{1.605} \tag{3}$$

式中：t 为径阶数，D_i 为第 i 径阶的径阶中值，N_i 为每公顷第 i 径阶的林木株数。

1.2.4 不确定性评价

方差法[29]可以作为衡量不确定性的度量方法。本研究基于林分密度的分组，用以估算各组优势高得到的平均值($\overline{H_q}$)与方差($\widehat{\mathrm{Var}_q}$)。

$$\overline{H_q}=\frac{\sum_{m=1}^{a_{plot}}H_m}{a_{plot}} \tag{4}$$

$$\widehat{\mathrm{Var}_q}=\frac{\sum_{m=1}^{a_{plot}}(H_m-\overline{H_q})^2}{a_{plot}} \tag{5}$$

式中：a_{plot} 为每组的样地数，H_m 为第 q 组中第 m 个样地的优势高值。

计算各组组间差异(W_1)与组内差异(W_2)。

$$\overline{H_k}=\frac{\sum_{q=1}^{a_g}\overline{H_q}}{a_g} \tag{6}$$

$$W_1=\frac{\sum_{q=1}^{a_g}(\overline{H_q}-\overline{H_k})^2}{a_g} \tag{7}$$

$$W_2=\frac{\sum_{q=1}^{a_g}\widehat{\mathrm{Var}_q}}{a_g} \tag{8}$$

式中：$\overline{H_k}$是指基于分组后各组优势高平均值的均值，a_g为组数。

通过计算总差异值 W，用以量化不确定性。

$$W=\left(1+\frac{1}{a_g}\right)\times W_1+W_2 \tag{9}$$

为验证本研究按林分类型分别筛选最优估算方法的科学性，除采用上述方法对各林分类型进行独立分析外，本研究还将全部 42 块样地数据视为一个整体进行综合评价，以筛选出一种在所有林分类型中普适性最优的估算方法，并将其结果与分类型筛选出的最优方法进行对比分析。

上述操作与绘图均在 R 4.4.2 中进行。

2 结果与分析

2.1 各林分类型中不同优势高估算方法的结果比较

不同优势高估算方法所得结果存在显著差异(图 2)，但在针叶混交林、阔叶混交林和针阔混交林这 3 种林分类型中表现出高度一致性。在针叶混交林中，TH2(SM2，仅选取最高树)的优势高中值最大，为 24.50 m，而 TH10(SM4，综合考虑最高树及不同树种差异)的优势高中值最小，为 18.95 m；在阔叶混交林和针阔混交林中，各优势高估算值的总体趋势与针叶混交林类似，即 TH2 的优势高中值最大，分别为 21.65 m 和 22.33 m，而 TH10 的优势高中值最小，分别为 17.76 m 和 18.35 m。此外，不同基础优势高估算方法的结果也存在差异。在阔叶混交林中，传统法(TH2)的中值为 21.65 m，高于调整最大树法(TH6)的中值 20.83 m，并显著高于 U 估计法(TH10)的中值 17.76 m。这一趋势在针叶混交林(TH2 = 24.50 m > TH6 = 23.97 m > TH10 = 18.95 m)和针阔混交林(TH2 = 22.33 m > TH6 = 21.59 m > TH10 =

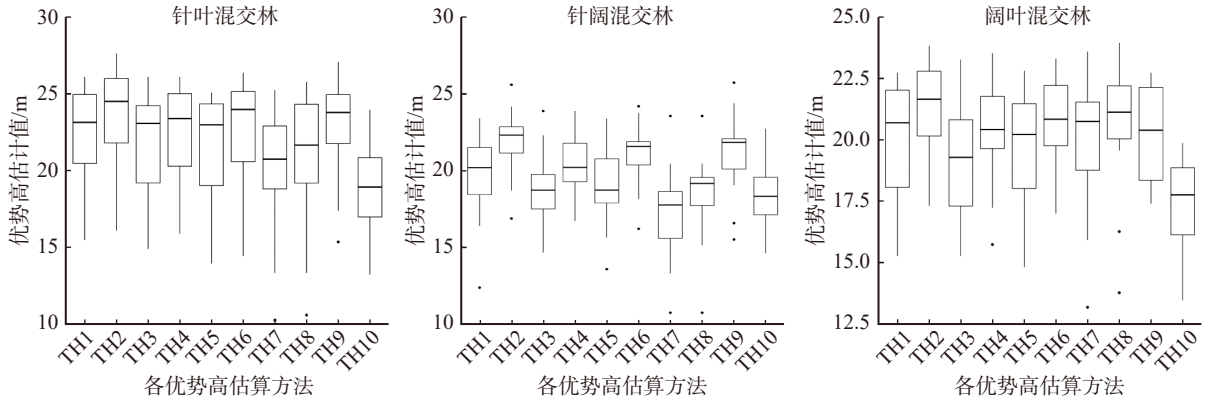


图 2 不同林分类型各优势高估计方法箱线图

Fig. 2 Box plot of top height estimation methods for different stand types

18.35 m)中同样存在。考虑树种差异后，优势高估算值会有所降低。以针阔混交林为例，当仅选择最高树不考虑树种差异的 TH2 方法时，其中值为 22.33 m，而考虑树种差异的 TH4 中值则降至 20.23 m。在调整最大树法中，不考虑树种差异的 TH6(21.59 m)也高于考虑树种差异后的 TH8(19.19 m)。这一规律在针叶和阔叶混交林中也同样适用。

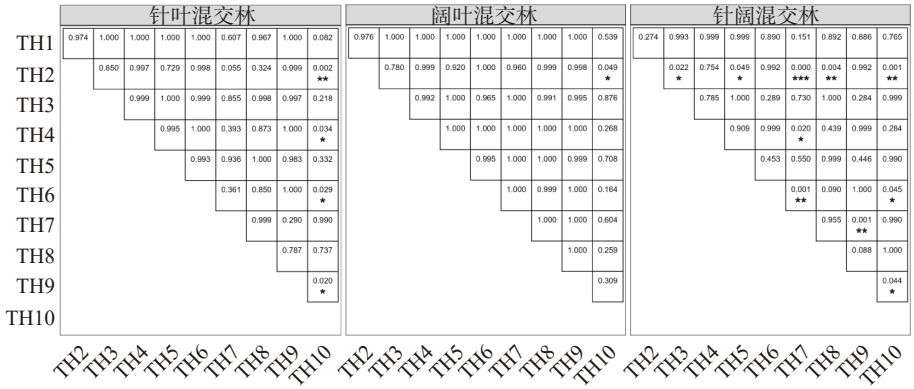
总体来看，不同优势高估算方法的表现规律在针叶、阔叶和针阔混交林这 3 种林分类型中具有高度一致性。优势高估算结果的中值普遍遵循传统估算法大于调整最大树法大于 U 估计法的趋势，且考虑树种差异后会导致优势高估算值的降低。

2.2　各林分类型优势高估算值的差异性分析

方差分析(ANOVA)结果表明，不同林分类型中各优势高估算方法间的差异性表现各异。图 3 展示了 3 种林分类型中各优势高估算方法两两进行 *T* 检验结果。在阔叶混交林中，除 TH2 与 TH10 之间存在显著差异外，其余各方法间均无显著差异。由于该林型样本量较小($n = 10$)，统计检验结果可能存在不确定性。在针叶混交林的优势高估算中，TH9 与 TH10、TH6 与 TH10、TH4 与 TH10 这 3 组方法间呈现显著差异；TH2 与 TH10 存在极显著差异，其余优势高估算方法间均无显著差异。而在针阔混交林的优势高估算中，差异表现更为复杂，其中 TH2 与 TH3、TH2 与 TH5、TH4 与 TH7、TH6 与 TH10、TH9 与 TH10 这 5 组方法间存在显著差异；TH8 与 TH2、TH2 与 TH10、TH6 与 TH7、TH9 与 TH7、TH7 与 TH2 这 5 组方法间的差异达到极显著水平。除此之外，其余方法组合间均无显著性差异。

2.3　各林分类型优势高估算值间的相关性分析

对不同林分类型的优势高估算值进行皮尔逊相关性分析(图 4)，结果表明，不同林分类型中各优势高估算方法的皮尔逊相关系数存在差异。在阔叶混交林中，所有优势高估算方法间的相关系数普遍处于较高水平，介于 0.71(TH8 与 TH10)至 0.99(TH1 与 TH5)之间，表明该林分类型下，不同估算方法所得结果具有高度一致性。相比之下，针叶混交林中各方法间的相关性表现出更大的不同，相关系数范围更广，从中度正相关(TH1 与 TH10，$r = 0.53$)到高度正相关(TH2 与 TH6，$r = 1.00$)。在针阔混交林中，各估算方法间的相关性进一步减弱，出现了 3 种林分类型中的最低相关系数值(TH3 与 TH9，$r = 0.45$)。尽管相关性随林分类型变化，但各估算方法间普遍存在正相关关系，表明这 10 种优势高估算方法在估



*、**、***分别表示在 $p < 0.05$、$p < 0.01$ 和 $p < 0.001$ 水平上差异显著。

图 3　各林分类型 TH1 ~ TH10 的差异性

Fig. 3　The differences among TH1−TH10 of various stand types

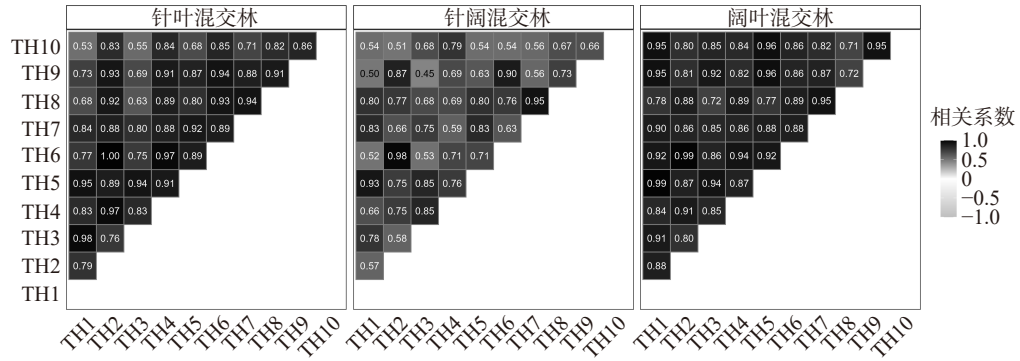


图 4　各林分类型 TH1 ~ TH10 的相关性

Fig. 4　The correlation values of TH1−TH10 for various stand types

算林分优势高时具有一致性。

2.4 各林分类型中林分密度对优势高估算方法的影响

各优势高方法所得估计值在 3 种林分类型中普遍表现出随加权林分密度指数增长而缓慢上升的趋势，但相关性均较弱(图 5)。为避免图表过于冗杂，各方法的具体回归统计量参数，包括斜率(K 值)和决定系数(R^2)，详见表 3。在针叶混交林与阔叶混交林中，所有优势高估算方法所得值均与加权林分密度指数呈正相关，但关联强度有所不同。针叶混交林的 R^2 介于 0.20 ~ 0.63 之间，而阔叶混交林的相关性更强，R^2 为 0.30 ~ 0.70。然而，在针阔混交林中，部分方法表现出现分化，其中大多数优势高估算方法所得值与加权林分密度指数也呈现正相关关系，但 TH1 和 TH7 则呈现出相反的趋势。此外，在该林分类型下各优势高估算方法所得值与加权林分密度指数之间相关强度最弱，仅为 0.04 ~ 0.49。

2.5 各林分类型中林分密度对 TH1~TH10 的不确定性分析

不同林分类型中，林分密度对各优势高估算方法不确定性值的影响程度存在显著差异(图 6)。针叶混交林的不确定性值最高且范围最宽(7.40 ~ 17.50)，其中 TH8(17.50)和 TH7(14.27)两种方法不确定性值最高，而 TH9(7.40)与 TH2(8.27)的不确定性值最低。相比之下，阔叶混交林和针阔混交林的不确定性值总体较低且较为接近，最低的不确定性值分别出现在 TH10(2.79)和 TH6(2.94)。此外，TH7 在阔叶与针阔混交林中均表现出最高的不确定性，表现最差。

2.6 各林分类型中优势高估算方法与林分因子间的相关关系

总体上看，所有优势高估算方法与林分平均高(AMH 和 WMH)均表现出中等至极强的正相关关系(表 4)。其中，各估算方法与林分加权平均高(WMH)的相关性更强，在 3 种林分类型中，其相关系数(r 值)均普遍高于其他林分相关因子。相比之下，各估算方法与林分生物量(BIO)和断面积生长量(BAI)的相关性则较弱。具体来看，不同林分类型中各估算方法的表现存在显著差异。在阔叶混交林中，所有方法与 WMH 的相关系数均在 0.75 以上，与 AMH 的相关性也普遍较高，r 值范围为 0.69 ~ 0.89；针叶混交林的相关性与阔叶混交林相似，但具体数值有所差异，该林分类型中各方法与 WMH 的相关性依然最强，各方法与林分生物量(BIO)的相关性 r 值在 0.37 ~ 0.65 之间。尽管与 BAI 的相关性在 4 个

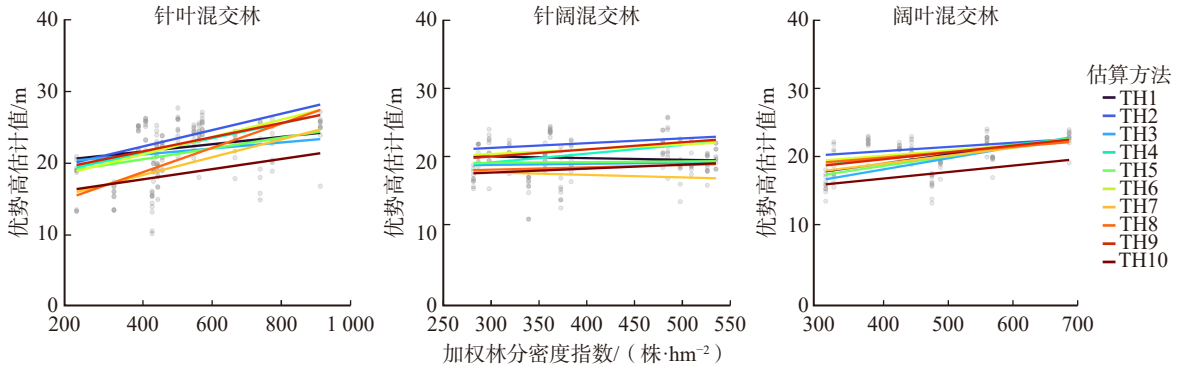


图 5 不同林分类型中林分密度对各优势高估算方法的影响

Fig. 5 The impact of stand density on various top height estimation methods in different stand types

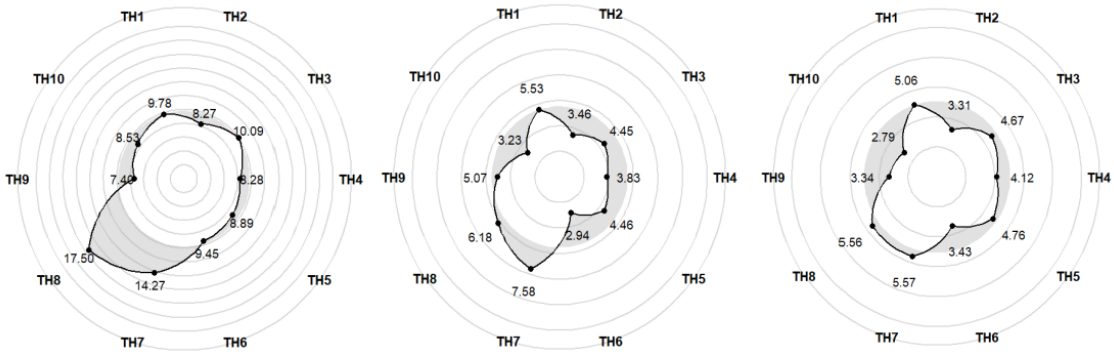


图 6 各林型中林分密度对 TH1~TH10 的不确定性值

Fig. 6 Quantification of the uncertainty values of TH1−TH10 for stand density in various stand types

表 4　各林分类型 TH1 ~ TH10 与林分主要变量因子的相关性

Tab. 4　Correlations between TH1−TH10 and main stand variable factors for each stand types

优势高估算方法	阔叶混交林				针叶混交林				针阔混交林			
	AMH	WMH	BIO	BAI	AMH	WMH	BIO	BAI	AMH	WMH	BIO	BAI
TH1	0.89	0.99	0.52	0.23	0.66	0.87	0.40	0.29	0.37	0.85	−0.08	0.21
TH2	0.69	0.87	0.26	0.10	0.84	0.93	0.65	0.26	0.62	0.63	0.32	0.01
TH3	0.76	0.89	0.58	0.12	0.68	0.87	0.37	0.31	0.58	0.83	0.12	0.30
TH4	0.72	0.82	0.28	−0.12	0.86	0.94	0.62	0.27	0.63	0.72	0.50	0.19
TH5	0.86	0.98	0.55	0.19	0.82	0.95	0.50	0.34	0.58	0.90	0.07	0.27
TH6	0.75	0.90	0.31	0.06	0.88	0.92	0.63	0.25	0.69	0.61	0.36	0.01
TH7	0.84	0.88	0.31	0.04	0.83	0.86	0.55	0.39	0.47	0.75	−0.14	0.30
TH8	0.72	0.76	0.12	−0.11	0.84	0.81	0.62	0.30	0.52	0.72	0.05	0.17
TH9	0.85	0.95	0.45	0.20	0.87	0.86	0.57	0.23	0.75	0.61	0.43	0.07
TH10	0.89	0.95	0.48	0.19	0.87	0.73	0.38	0.03	0.68	0.67	0.42	0.11

注：AMH为林分算术平均高，WMH为林分加权平均高，BIO为林分总生物量，BAI为胸高断面积生长量。下同。

因子中最低，但均为正值；针阔混交林中的相关性则表现出更大的波动性，与 WMH 的相关性仍然是 4 个因子中最高的，但整体强度和稳定性略低于前两种林型。此外，该林型中多个估算方法与 BIO 和 BAI 的相关性普遍较低。

2.7　不区分林分类型的最优优势高估算方法筛选

为筛选出一种适用于所有林分类型的通用优势高估算方法，本研究将 42 块样地数据合并，进行了总体不确定性与相关性分析。首先，对 10 种估算方法进行总体不确定性分析，结果显示（图 7），调整最大树法中的 TH6（W = 6.60）和 U 估计法的 TH10（W = 5.40）的不确定性值最低，表明这两种方法在所有样地中的估算结果最为稳定。

在总体样本与林分关键变量因子的相关性分析中（表 5），TH6 的各项相关系数均大于 TH10。综合考量估算结果的稳定性与反映林分生产力的能力，当不区分林分类型时，仅选取最高树且不考虑树种差异的调整最大树法（TH6）是综合表现最佳的优势高估算方法。

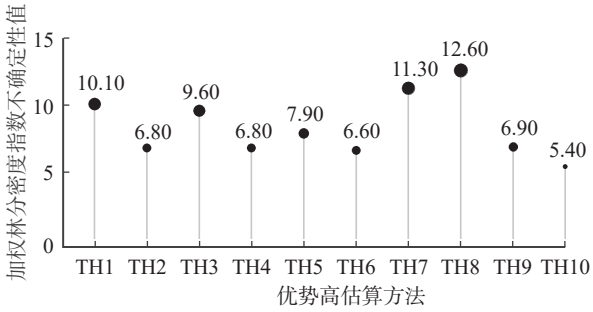


图 7　10 种优势高估算方法的不确定性值

Fig. 7　Uncertainty values of ten top height estimation methods

3　讨　　论

林分优势高是衡量林分生长状况、评价立地条件的核心指标。如何更有针对性地筛选出适用于不同林分类型的天然混交林优势高估算方法，仍然是一个亟待解决的问题。本研究系统比较了不同优势高估算方法在 3 种典型混交林（针叶混交林、阔叶混交林及针阔混交林）中的表现。结果显示，尽管 TH1 ~ TH10 所得的优势高估计值虽各有不同，但在 3 种不

表 5　不分林分类型的 TH1~TH10 与林分主要变量因子间的相关性

Tab. 5　Correlation between TH1−TH10 and main variables of forest stands, regardless of stand type

林分主要变量因子	优势高估算方法									
	TH1	TH2	TH3	TH4	TH5	TH6	TH7	TH8	TH9	TH10
AMH	0.65	0.80	0.71	0.81	0.78	0.84	0.71	0.74	0.81	0.80
WMH	0.90	0.85	0.89	0.87	0.94	0.84	0.80	0.75	0.82	0.70
BIO	0.41	0.56	0.46	0.59	0.49	0.57	0.41	0.47	0.56	0.40
BAI	0.35	0.28	0.39	0.31	0.38	0.25	0.32	0.24	0.29	0.13

同林分类型中表现出一致的规律。具体而言，在 3 种林分类型中，传统估算方法所得的优势高估计值普遍高于调整最大树法，而 U 估计法的估算结果则普遍偏低。此外，引入树种差异的估算方法，其优势高估算值均有所降低，这与周梦丽等[19−20]的研究结论一致。

理想的优势高估算方法需要能提供稳定的估算结果。本研究将林分密度作为变量进行分组处理，以评估林分密度对不同优势高估算结果不确定性的具体贡献。3 种林分类型的不确定性分析结果显示，在针叶混交林内部的各优势高方法比较中，TH9 与 TH2 的不确定性值最小，表现最为稳定；在阔叶混交林内部的各优势高方法比较中，TH10 与 TH2 的不确定性值最小，表现出更高的可靠性。然而，由于阔叶混交林样地数量较少（$n = 10$），可能影响统计检验的稳健性，部分方法间的差异因此未达到显著水平。当前“无显著差异”的结论既可能源于方法间估算值的趋同，也可能因样本量限制而导致的检验效果不足。后续研究将尝试通过扩大样本量以增强结果的代表性。在结构更为复杂的针阔混交林中，TH6 和 TH10 显示出最低的不确定性。此外，本研究发现 TH7（综合最粗树及不同树种差异的调整最大树法）及 TH8（综合最高树及不同树种差异的调整最大树法）在各类混交林中不确定性结果均较高。原因在于这两种方法通过引入“树种差异”来优化优势高估算，但在结构复杂的天然混交林中反而引入了新的不确定性因素。两种方法均依据树种断面积比例分配优势木的选取数量，这一方法在理论上较为合理，但高度依赖样地内树种组成与空间分布。天然混交林的空间异质性极高，不同样地之间乃至同一样地内部，树种的多度、断面积占比及空间格局差异显著，增加了估算误差。由此可见，TH7 和 TH8 实质上是将确定性的计算逻辑应用于不确定的生态系统，其不稳定性正源于方法假设与林分真实结构的不匹配。相比之下，尽管 TH3、TH4 同样考虑了树种差异，但它们基于传统估算法，采用固定的优势木数量作为计算基础，减弱了因树种组成波动带来的影响，因而表现出相对较低的不确定性。因此，在未来的天然混交林优势高方法体系中，不建议优先采纳 TH7 和 TH8。

更优的优势高估算方法能够更精确地评估立地生产力，而后者又与林分的主要变量因子紧密相关[30]。本研究纳入分析的林分主要变量因子包括：林分算术平均高、林分加权平均高、林分生物量、断面积定期平均生长量。研究结果表明，不同林分变量因子与 10 种优势高估算方法之间的相关性在不同林分类型中表现各不相同。在 3 种林分类型中，各优势高估算方法与林分算术平均高和林分加权平均高之间均表现出较强的相关性，而与林分生物量（BIO）和断面积生长量（BAI）的相关性则相对较弱。此结果与大部分学者的研究相符[19−20,31]。具体原因主要源于二者所反映的林分特征存在差异。优势高侧重于反映林分的垂直结构与立地质量，属于相对稳定的结构性指标；而生物量与断面积生长量更受林分密度、树种组成及个体间竞争等动态因子的影响，二者作用机制不同，因此统计相关性较低。在天然混交林中，树种多样性和空间异质性显著，不同树种在光照、养分与空间资源利用上的策略差异，削弱了优势高与径向生长之间的联系[32]。例如，针叶树通常具有较高的高生长潜力但径向生长较慢，阔叶树则相反，径向扩展能力更强[33]。因此，优势高较大的林分并不一定拥有更高的生物量或断面积生长量。

在不同林分密度条件下，10 种优势高估算方法所估算的优势高值也呈现差异。总体来看，优势高估算值与加权林分密度指数（SDI）在 3 种林分类型中均存在普遍的正向关系。这符合林分生长的一般规律[34−35]。但在结构最为复杂的针阔混交林中，TH1 和 TH7 方法估算值随 SDI 增加而下降，表现出微弱的负相关。这一结果与林分密度越高、林木竞争越激烈从而优势木越高的普遍认知相反[36−37]，揭示了以胸径为主导的优势木选取标准存在显著局限性。TH1 和 TH7 均以“最粗树”作为优势木判别依据，而胸径与树高在林木生长中并非总是同步变化，尤其在树种组成复杂、竞争关系多样的针阔混交林中更为明显[38−39]。针叶树种（如红松、鱼鳞云杉）多为耐荫性，生长稳定但后期高生长趋缓；阔叶树种（如硕桦、青楷槭）多为喜光性，早期迅速伸长以争夺光照资源[40−41]。因此，林分中出现胸径较大但树高受限的“矮胖型”针叶树，以及胸径较小却在垂直结构上占优的“高瘦型”阔叶树。基于胸径的筛选往往将前者误判为优势木，忽视了真正主导冠层的个体。在高密度林分中，这一偏差更为突出。随着光竞争加剧，喜光阔叶树将生长资源优先分配于高生长，形成冠窄干直的形态；耐荫树种则通过扩大冠幅以获取散射光，表现为胸径增长但高生长受抑。结果，TH1 和 TH7 方法选出的“最粗树”往往是高生长受限的个体，导致估算出的优势高随林分密度上升反而下降。综上，胸径主导的优势木选择在针阔混交林中难以稳定识别真正反映立地生产力的优势木，其估算结果偏向高生长受限的树木。该现象仅出现在针阔混交林中，进一步说明在树种组成复杂、结构异质性显著的天然混交林中，应避免使用基于胸径等间接指标的优势高估算方法。

综合以上结果，本研究发现在针叶混交林中，TH9 和 TH2 均表现出较低的不确定性和与林分变量因子间的强相关性。尽管 TH2（8.27）的不确定性值略高于 TH9（7.40），但本研究最终推荐 TH2 作为针叶混交林中最优优势高估算方法。TH2 的优势在于在未来实际应用中，只需选择林内最高树即可实现优势高估算，而 TH9 则需考虑最粗树。从建立一个精确且可完全替代人工调查的遥感估算的角度来看，TH2 方法在实际应用中更为适用。在阔叶混交林中，TH10 表现出明显的优势。首先，该方法的不确定性值在所有方法中处于最低水平，且其与林分生物量、加权平均高等关键生产力指标也保持了较强的相关性。此结论与周梦丽的研究结果相符，该研究也强调了 U 估计法在类似的天然云冷杉阔叶混交林中的可靠性。在针阔混交林中，仅挑选最高树且不考虑树种差异的调整最大树法（TH6）在不确定性和与林分变量的相关性上均表现出色。有研究表明，对于树种组成复杂的混交林在估算优势高时，可以不考虑树种差异，因为林分的最高树能代表该立地的生长潜力[42]。TH6 方法完全依赖于树高这一单木参数，而精确获取树高正是机载 LiDAR 技术最核心的优势。因此，选择 TH6 不仅在理论上可靠，在技术应用上也实现了与现代遥感手段的最佳结合，为建立更高效、精准的森林资源监测提供了有力支持。

本研究证实了针对不同林分类型需采用不同优势高估算方法的必要性。根据不区分林分类型的总体分析结果（2.7）来看，TH6 被确定为适用于所有林分类型的最优方法。然而，将此方法与各林分类型下更有针对性的最优方法进行比较时，后者的优势十分明显。例如，在阔叶混交林中，TH6 的不确定性值（3.43）显著高于为其筛选的更有针对性的 TH10 方法（2.79）；在针叶混交林中，TH6 与林分生物量（BIO）的相关性（$r = 0.63$）也不及 TH2 方法（$r = 0.65$）。这一对比清晰地表明，任何通用方法都不可避免地会牺牲在特定林分类型下的估算精度与稳定性。

4　结　　论

本研究融合机载 LiDAR 点云提取的树高数据，对吉林省汪清林业局金沟岭林场内 42 块 0.04 hm^2（20 m × 20 m）的天然混交林（涵盖针叶、阔叶及针阔混交林）固定监测样地进行研究。旨在系统性地比较多种优势高估算方法在不同林分类型中的适用性，为每一种林分类型分别筛选并确立其最具针对性的优势高估算方法。结合不同基础估算方法与优势木选择标准，比较不同林分类型中各组合方法间的差异与相关性，并采用方差法量化对比了林分密度在 3 种林分类型中对各估算方法不确定性的影响，最后比较各类优势高估算方法与林分关键变量因子间的相关关系。得出以下主要结论：对于针叶混交林和针阔混交林，本研究最终分别推荐采用仅挑选最高树且不考虑树种差异的传统估算方法（TH2）和仅挑选最高树且不考虑树种差异的调整最大树法（TH6）作为其最优估算方法。这两种方法的共同点在于，其优势木选择标准均仅依赖于树高这一单木参数。这一特性与机载 LiDAR 技术能够直接精确测量林分垂直结构的优势高度契合，因此在未来大尺度林分优势高估算中具有重大应用价值。而对于阔叶混交林，本研究综合各优势高估算方法表现，最终推荐采用综合考虑最高树及不同树种差异的 U 估计法（TH10）。U 估计法在该林分类型下结合对树种信息的考量，能获得最可靠的优势高估算结果。需指出，本研究阔叶混交林样地数量较少，可能在一定程度上影响统计结果的稳健性，未来将通过扩大样本规模以提高差异性与相关性分析的可靠性。故天然混交林中最优优势高估算方法随林分类型而异，采用针对性的优势高估算策略是提升估算可靠性与科学性的根本途径。为复杂森林环境下的优势高精准估算提供了关键性的方法论支持。

参　考　文　献

[1] 刘世荣, 王晖, 李海奎, 等. 碳中和目标下中国森林碳储量、碳汇变化预估与潜力提升途径 [J]. 林业科学, 2024, 60(4): 157−172.
Liu S R, Wang H, Li H K, et al. Projections of China's forest carbon storage and sequestration and ways of their potential capacity enhancement [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(4): 157−172.

[2] Tewari V P, Kumar V S K. Development of top height model and site index curves for *Azadirachta indica* A. juss [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 165(1−3): 67−73.

[3] 黄华国. 林业定量遥感研究进展和展望 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12): 1−14.
Huang H G. Progress and perspective of quantitative remote sensing of forestry [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(12): 1−14.

[4] 庄永健, 冯仲科, 李亚藏, 等. 激光雷达技术测树方法原理与应用 [J]. 林业资源管理, 2016(6): 116−119.
Zhuang Y J, Feng Z K, Li Y Z, et al. Principle and application of laser radar technology for tree measurement [J]. Forest and Grassland Resources Research, 2016(6): 116−119.

[5] 刘清旺, 李增元, 陈尔学, 等. 利用机载激光雷达数据提取单株木树高和树冠 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(6): 83−89.
Liu Q W, Li Z Y, Chen E X, et al. Extracting height and crown of individual tree using Airborne LiDAR data [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(6): 83−89.

[6] Maltamo M, Næsset E, Vauhkonen J. Forestry applications of

airborne laser scanning: concepts and case studies[M]. Dordrecht: Springer, 2014: 460.

[7] Andrés H, Angeles V M, Cecilia r, et al. Stand characterization of eucalyptus spp. plantations in uruguay using Airborne LiDAR scanner technology [J]. Remote Sensing, 2020, 12(23): 3947.

[8] White J C, Coops N C, Wulder M A, et al. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: a review [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2016, 42(5): 619−641.

[9] 林鑫, 庞勇, 李春干. 无人机密集匹配点云与机载激光雷达点云的差异分析 [J]. 林业资源管理, 2020(3): 58−62.
Lin X, Pang Y, Li C G. Analysis of the deference between the UAV dense matching point cloud and Airborne LiDAR point cloud [J]. Forest and Grassland Resources Research, 2020(3): 58−62.

[10] Mcnicol I M, Mitchard E T, Aquino C, et al. To what extent can UAV photogrammetry replicate UAV LiDAR to determine forest structure? A test in two contrasting tropical forests [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021, 126(12): e2021J−e6586J.

[11] Stal C, Verbeurgt J, De Sloover L, et al. Assessment of handheld mobile terrestrial laser scanning for estimating tree parameters [J]. Journal of Forestry Research, 2021, 32(4): 1503−1513.

[12] Valladares F, Niinemets Ü. Shade tolerance, a key plant feature of complex nature and consequences[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2008, 39: 237−257.

[13] 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, 2025, 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, 2025, 61(2): 85−92.

[14] 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.

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

[16] 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.

[17] van Laar A, Akca A. Forest mensuration [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2007.

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

[19] 陶然, 向玮, 周梦丽, 等. 天然云冷杉针叶混交林优势高计算方法探究 [J]. 林业科学研究, 2025, 38(3): 60−71.
Tao R, Xiang W, Zhou M L, et al. Calculation methods of the dominant height of natural spruce-fir mixed-conifer forests [J]. Forest Research, 2025, 38(3): 60−71.

[20] 周梦丽. 天然云冷杉阔叶混交林发育阶段、优势高和竞争关系研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
Zhou M L. Development stage dominant height and competitive relationship of Natural Spruce-fir-broadleaf mixed forest [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020.

[21] Liu H, Mou C, Yuan J, et al. Estimating urban forests biomass with LiDAR by using deep learning foundation models [J]. Remote Sensing, 2024, 16(9): 1643.

[22] Hyyppa J, Kelle O, Lehikoinen M, et al. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(5): 969−975.

[23] 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.

[24] 梁广计. 基于机载 LiDAR 点云单木分割方法的研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2024.
Liang G J. Study on individual tree segmentation based on airborne LiDAR point cloud [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2024.

[25] 段光爽. 基于生长过程的吉林省林分类型分类与潜在生产力预估 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
Duan G S. Growth process-based clustering of forest stand types and their potential productivity estimation in Jilin Province [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2018.

[26] 姚丹丹, 雷相东, 张则路. 基于贝叶斯法的长白落叶松林分优势高生长模型研究 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(3): 94−100.
Yao D D, Lei X D, Zhang Z L. Bayesian parameter estimation of dominant height growth model for Changbai larch (*Larix olgensis* Henry) plantations [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(3): 94−100.

[27] 符利勇, 李永慈, 李春明, 等. 利用 2 种非线性混合效应模型 (2 水平) 对杉木林胸径生长量的分析 [J]. 林业科学, 2012, 48(5): 36−43.
Fu L Y, Li Y C, Li C M, et al. Analysis of the basal area for Chinese fir plantation using two kinds of nonlinear mixed effects model (two levels) [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(5): 36−43.

[28] Long J N, Daniel T W. Assessment of growing stock in uneven-aged stands [J]. Western Journal of Applied Forestry, 1990, 5(3): 93–96.

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

[30] 贾勃, 王新杰, 和敬渊, 等. 云冷杉针阔混交林更新幼树密度的影响因素 [J]. 森林与环境学报, 2022, 42(4): 418−424.
Jia B, Wang X J, He J Y, et al. Factors influencing the density of regeneration sapling in spruce-fir coniferous and broad-leaved mixed forest [J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(4): 418−424.

[31] 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.

[32] Vannoppen A, Kint V, Ponette Q, et al. Tree species diversity impacts average radial growth of beech and oak trees in Belgium, not their long-term growth trend [J]. Forest Ecosystems, 2019, 6(1): 10.

[33] Xu Q, 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.

[34] 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.

[35] Bontemps J, Bouriaud O. Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives [J]. Forestry, 2014, 87(1): 109−128.

[36] Oliver C, Larson B, Ball J. Forest Stand Dynamics. Update Edition [J]. Journal of Natural Resources and Life Sciences Education, 1997, 26(1): 81.

[37] Weiner J, Thomas S C. The nature of tree growth and the" age-related decline in forest productivity" [J]. Oikos, 2001, 94(2): 374−376.

[38] Pretzsch H. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures [J]. Forest Ecology and Management, 2014, 327: 251−264.

[39] Sharma M, Parton J. Height–diameter equations for boreal tree species in Ontario using a mixed-effects modeling approach [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 249(3): 187−198.

[40] Yu Q, Ryan M G, Ji W, et al. Assessing canopy height measurements from ICESat-2 and GEDI orbiting LiDAR across six different biomes with G-LiHT LiDAR [J]. Environmental Research: Ecology, 2024, 3(2): 25001.

[41] 梁鹏鸿, 王襄平, 吴玉莲, 等. 黑龙江胜山保护区阔叶红松林不同演替阶段径向生长与气候变化的关系 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(5): 425−435.
Liang P H, Wang X P, Wu Y L, et al. Growth responses of broad-leaf and Korean pine mixed forests at different successional stages to climate change in the Shengshan Nature Reserve of Heilongjiang Province, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(5): 425−435.

[42] Bravo-oviedo A, Pretzsch H, Ammer C, et al. European mixed forests: definition and research perspectives [J]. Forest Systems, 2014, 23(3): 518–533.

（责任编辑　范　娟
责任编委　张会儒）