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

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

钟珊月 臧颢 宁金魁 吴亚通 陈鼎泸 钟梁

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

Zhong Shanyue, Zang Hao, Ning Jinkui, Wu Yatong, Chen Dinglu, Zhong Liang

引用本文:
钟珊月, 臧颢, 宁金魁, 吴亚通, 陈鼎泸, 钟梁. 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[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(11):38–47. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250247
Zhong Shanyue, Zang Hao, Ning Jinkui, Wu Yatong, Chen Dinglu, Zhong Liang. 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. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250247

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250247

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

基于蓄积潜在生产力的小兴安岭阔叶混交林立地质量评价
Site quality evaluation of broadleaved mixed forest in Xiaoxing’an Mountains of northeastern China based on volume potential productivity
北京林业大学学报, 2024, 46(12): 21–29. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240168

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

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

格氏栲天然林凋落物浸提液对杉木种子萌发和胚根生长的影响
Effects of litter extracts from *Castanopsis kawakamii* natural forest on seed germination and radicle growth of Chinese fir
北京林业大学学报, 2020, 42(4): 51–59. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190292

格氏栲天然林林窗对凋落物难降解物质分解的影响
Effects of forest gaps on decomposition of recalcitrant litter substances in *Castanopsis kawakamii* natural forests
北京林业大学学报, 2025, 47(7): 73–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240369

不同种源栎属和锥属橡实品质差异及综合评价研究
Comparison and comprehensive evaluation of acorn qualities of *Quercus* and *Castanopsis* from different provenances
北京林业大学学报, 2022, 44(7): 36–51. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210117

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250247

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

钟珊月[1] 臧 颢[1] 宁金魁[1] 吴亚通[1] 陈鼎泸[2] 钟 梁[2]
（1. 江西农业大学林学院，江西 南昌 330045；2. 崇义县林业技术推广中心，江西 赣州 341300）

摘要:【目的】分析立地质量评价指标和林分因子的关系，旨在确定最优的优势木选取策略以及立地质量评价方法。**【方法】**基于赣南 109 块样地数据，采用 4 种立地质量评价方法（立地形法、传统的地位指数法、胸径地位指数法、最粗木胸径地位指数法），结合 4 种优势木选取策略（不区分树种、仅槠栲类、槠栲类 + 断面积占比最高的其余树种、槠栲类 + 断面积占比前二的其余树种）及 2 种加权方法（不加权的算术平均和断面积加权平均），共计算得到 6 种优势高、6 种优势木平均胸径和 2 种最粗木胸径，以及相应的年龄。以 Richards 方程为基础模型，运用代数差分法推导出 4 种立地质量评价方法对应的差分形式，代入基准胸径和基准年龄，计算出各方法的立地质量评价指标。采用秩相关分析，评估立地质量评价指标与林分密度、林分蓄积量之间的关系，进而确定适用于赣南槠栲天然次生林的最优优势木选取策略和立地质量评价方法。**【结果】**不同方法估计的优势高、优势木平均胸径、最粗木胸径之间存在一定差异，与林分蓄积均呈显著相关，与林分密度的相关性表现不一致。4 种立地质量评价方法中，基于优势高−年龄的地位指数与林分密度相关性不显著（$p > 0.05$），且与林分蓄积量存在显著的相关性（r 范围为 0.145 ~ 0.190，p 值为 0.003 ~ 0.026），符合立地评价指标与林分密度无关，与林分蓄积量相关的要求。**【结论】**在赣南地区，建议采用区分树种选取优势木，并应用算术平均计算优势高−年龄的地位指数进行立地质量评价，该方法能够更加科学地指导造林规划，提高森林生产力。

关键词：槠栲天然林；优势木选取策略；立地质量评价；立地形；地位指数；赣南
中图分类号：S758 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)11−0038−10
引文格式：钟珊月，臧颢，宁金魁，等. 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［J］. 北京林业大学学报，2025，47(11)：38−47. Zhong Shanyue, Zang Hao, Ning Jinkui, 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.

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

Zhong Shanyue[1] Zang Hao[1] Ning Jinkui[1] Wu Yatong[1] Chen Dinglu[2] Zhong Liang[2]
(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China;
2. Chongyi County Forestry Technology Promotion Center, Ganzhou 341300, Jiangxi, China)

Abstract: ［**Objective**］This paper investigates different dominant tree selection strategies and four site quality evaluation methods using natural secondary forests of *Castanopsis* spp. as the research objects. By analyzing the relationship between site quality evaluation indicators and stand factors, the aim was to determine the optimal dominant tree selection strategy and site quality evaluation method. ［**Method**］Based

收稿日期: 2025−07−01 **修回日期:** 2025−10−21
基金项目: 国家自然科学基金项目（31960313、31700563），江西省林业局科技创新专项（201901）。
第一作者: 钟珊月。主要研究方向：森林资源管理与监测。Email: 2559486836@qq.com 地址：330045 江西省南昌市经济技术开发区方志敏大道 1101 号江西农业大学林学院。
责任作者: 臧颢，博士，副教授。主要研究方向：森林可持续经营。Email: b12345abba@163.com 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

on data from 109 sample plots in southern Jiangxi Province of eastern China, four site quality evaluation methods (site form method, traditional site index method, DBH site index method, and DBH site index method of the thickest tree) were applied. These were combined with four dominant tree selection strategies (no species distinction, only *Castanopsis* spp. species, *Castanopsis* spp. species plus the species with the highest basal area proportion, and *Castanopsis* spp. species plus the top two species by basal area proportion) and two weighting methods (unweighted arithmetic mean and basal area-weighted mean). This resulted in the calculation of six types of dominant height, six types of average DBH of dominant trees, and two types of DBH of the thickest trees, along with their corresponding ages. The Richards equation was used as the base model, and the algebraic difference approach was employed to derive the difference forms corresponding to four site quality evaluation methods. By substituting the reference DBH and reference age, the site quality evaluation indicators for each method were calculated. Rank correlation analysis was used to assess the relationship between site quality evaluation indicators and stand density and stand volume, thereby identifying the optimal dominant tree selection strategy and site quality evaluation method for natural secondary forests of *Castanopsis* spp. in southern Jiangxi Province. [**Result**] Significant differences were observed among estimates of dominant height, dominant average DBH, and maximum DBH using different methods, all significantly correlated with stand volume but inconsistently correlated with stand density. Among the four site quality evaluation methods, the site index based on dominant height-age relationship demonstrated no significant correlation with stand density ($p > 0.05$), while exhibiting significant correlations with stand volume ($r = 0.145$–0.190, $p = 0.003$–0.026). This pattern aligns with the fundamental requirement for site evaluation indicators: independence from stand density while maintaining correlation with stand volume. [**Conclusion**] In southern Jiangxi Province, it is recommended to adopt a site quality evaluation approach that involves species-specific selection of dominant trees and application of the arithmetic mean to calculate dominant height-age-based site index. This method can more scientifically inform forest management planning and enhance forest productivity.

Key words: *Castanopsis* spp. natural forest; selection strategy of dominant trees; site quality evaluation; site form; site index; southern Jiangxi Province

天然林立地质量评价作为天然林可持续管理的核心支撑，既是科学评估森林生长潜力的基础工具，也是维系生物多样性、优化生态服务功能的重要途径[1−2]。人工林中，树高−年龄数据常被用来进行立地质量评价，例如罗光成等[3]通过建立吉林省长白落叶松林分优势高生长模型对立地等级进行划分，验证了基于潜在生长量进行立地质量评价方法的可行性。然而，天然林立地质量评价因年龄的异质性和树种的多样性尚未形成统一标准[4]，一些学者沿用了人工同龄林的研究方法，选择传统的地位指数法开展了天然林的立地质量评价研究。如周甲敏等[5]利用小兴安岭阔叶混交林数据，建立林分平均高和蓄积生长模型，将样地划分为 5 个立地等级，得出林分蓄积潜在生长力可作为立地质量评价指标的结论；郑聪慧等[6]以华北栓皮栎（*Quercus variabilis*）天然次生林为研究对象，采用优势高−年龄数据编制了地位指数表，结果显示地位指数与解析木树高生长趋势相符。年龄是地位指数法应用的基础变量[7]，但天然林中树木年龄并不相同且不易获取，因此增加了地位指数法在天然林中应用的难度及可信度。为了突破这一局限，Vanclay[8]提出了基于树高−胸径关系构建立地形的思路，随后 Huang 等[9]基于优势高−优势木平均胸径关系的立地形，为异龄林立地评价提供了新范式。这一方法得到了一些学者的认可，如马建路等[10]以 6 种红松（*Pinus koraiensis*）天然林为研究对象、董自华等[11]以山杨（*Populus davidiana*）和白桦（*Betula platyphylla*）次生林为研究对象，均采用立地形对所研究的森林类型进行了立地质量评价。除了立地形外，也有一些学者尝试直接使用胸径指标评价立地质量，如刘洵等[12]利用平均胸径−年龄的关系，将基准年龄对应的平均胸径定义为立地质量评价指标，并利用 6 期固定样地数据分析了该指标的变异情况；考虑到平均胸径易受密度的影响[13]，何静等[14]选用最粗优势木的胸径作为平均胸径的替代，通过最粗优势木胸径−年龄模型实现了栎类（*Quercus* spp.）天然林的立地评价，为该领域提供了新思路。

除了年龄外，天然林中树种的多样性也增加了评价的复杂性。由于目前的评价方法多依赖于优势

木的平均高或者平均胸径，这些指标多是算术平均值，忽视了天然林复杂的树种配置[15]，这直接影响优势高与胸径的估计精度。Vallet 等[16]通过 2008—2012 年法国国家森林调查数据证实，不同混交树种对优势高的影响并不一致；马建路等[10]在研究红松天然林立地质量时认为红松天然林中的不同树种配置反映了立地条件的差异，并根据伴生树种的不同区分了 6 种红松天然林，分别进行了立地质量评价。针对这一问题，也有学者提出使用树种断面积加权来体现树种配置上的差异性，如娄明华[17]、吴璧芸等[15]均使用树种断面积加权平均高替代算术平均高开展了立地形的研究。立地质量是既定森林的生产潜力，与森林类型紧密相关[18]，优势树种是区分天然林森林类型的核心，使用加权平均虽然一定程度上体现了树种配置的差异，但仍缺乏对优势树种的关注。Combaud 等[19]也发现，树种混交对优势树种和其他树种的影响并不一致。因此在评价天然林的立地质量时，是否应分树种选取优势木（特别是围绕优势树种组），并在此基础上计算优势高等指标是一个关键问题。

槠栲林通常指以壳斗科锥属（*Castanopsis*）物种为建群种形成的森林，也是南方常绿阔叶林的典型类型之一[20]。本研究以赣南崇义县的槠栲天然林为对象，对“在天然林优势木选取中，是否应重点考虑建群种”这一问题进行探讨，通过 4 种优势木选取策略及 4 种立地质量评价方法，比较不同方法估计优势高与优势木平均胸径的差异，并分析各种方法计算的立地质量评价指标与林分密度和林分蓄积量的关系，以此确定槠栲天然林优势木的合理选取策略和最优的立地质量评价方法，以期为天然林的经营管理提供参考。

1 研究区概况

研究区位于江西省赣州市崇义县（25°24′～25°55′N，113°55′～114°38′E），属中亚热带季风湿润区，全年热量充足，四季特征明显，日照时长相对较少，年均日照时数 1 473.3～2 077.5 h，年平均降水量 1 800 mm，年平均气温 21.5℃。但由于地形复杂，垂直高度变化显著，导致不同海拔区域以及向阳、背阳面之间气候差异明显。研究区森林资源丰富，森林覆盖率达 88.3%，主要树种有米槠（*Castanopsis carlesii*）、丝栗栲（*Castanopsis fargesii*）、黧蒴栲（*Castanopsis fissa*）、木荷（*Schima superba*）、拟赤杨（*Alniphyllum fortunei*）、南酸枣（*Choerospondias axillaris*）、鸭公树（*Neolitsea chui*）、枫香（*Liquidambar formosana*）等。

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究以江西省赣南地区的槠栲天然林为研究对象，设置样地共 109 块，样地的面积 0.06～0.08 hm^2。样地选择的标准为主林层存在槠栲类树种，且林分中槠栲类树种株数占比最大。记录样地的海拔、坡度和样地内的林木株数等，并对样地内胸径≥5 cm 的林木进行每木检尺，记录树种、胸径、树高、枝下高及冠幅等因子。其中，胸径采用围尺进行测量，精度为 0.1 cm。树高和枝下高采用超声波测高器进行测量，精度为 0.1 m。每块样地中选取 3 株优势木和 3 株平均木，分别在胸径处钻取树芯，通过 WinDENDRO 年轮分析软件确定树木的年龄，钻取对象按优势木或林分的树种情况，优先保证槠栲类、针叶、其他阔叶 3 类树种各钻取 1 株，若某类树种缺失，则按优势木或林分树种的株数比例分配名额。林分因子基本统计量见表 1。

2.2 优势高与优势木平均胸径估计方法

由于天然林树种构成复杂，本研究在优势木选取中，提出了“聚焦建群树种，兼顾主要伴生树种”的策略，即优先选取槠栲类树种，并补充选择断面积占比最高的其他树种，以期所选个体更能代表林分主体。同时，设置了“不区分树种”的方案作为对比，以评估不同选取策略的差异，最终得到以下 4 种策略：（1）不区分树种，所有树木均可作为备选对象，记为 Z_1；（2）只以槠栲类树种作为备选对象，记为 Z_2；（3）以槠栲类树种和余下树种中断面积占比最大的树种为备选对象，记为 Z_3；（4）以槠栲类树种和余下树种中断面积占比最大的两个树种为备选对象，记为 Z_4。

每个样地选择的优势木数量按每 100 m^2 选一株最高林木确定，优势高、优势木平均胸径则分别采用算术平均和加权平均两种方法对选取的优势木进行计算，其中加权平均法是以挑选出的优势木中的某一树种在样地中的断面积为分子，以林分断面积为分母进行计算。具体计算方法见表 2。

对于最粗木，则分别按不区分树种的最粗木和槠栲类树种的最粗木分别界定，即不区分树种样地内最粗的一株林木或样地内槠栲类树种中最粗的一株林木的胸径、年龄作为最粗木胸径（D_{M1}、D_{M2}）、最粗木年龄（A_{M1}、A_{M2}）。优势木年龄按上述优势高估计方法计算，将优势高替换成优势木年龄（A_{T1}、A_{T2}、A_{T3}、A_{T4}、A_{T5}、A_{T6}）。

2.3 林分密度指标计算方法

本研究选择了 4 种林分密度指标[18]。

表 1　样地基本因子统计

Tab. 1　Basic factor statistics of sample plots

优势木树种	样地数	海拔/m	坡度/(°)	平均胸径/cm	优势木年龄/a	株数密度/(株·hm^{-2})	林分断面积/(m^2·hm^{-2})
纯槠栲 *Castanopsis* spp.	7	624(237)	36(5)	16.1(0.6)	33(6)	1 221(256)	25(6)
槠栲 + 阔叶	70	414(145)	27(9)	17.7(3.6)	38(13)	1 087(454)	26(9)
槠栲 + 针叶	4	348(169)	31(4)	16.0(1.2)	30(6)	1 086(443)	23(12)
槠栲 + 针叶 + 阔叶	28	474(168)	32(8)	16.8(1.1)	36(11)	1 131(307)	25(7)

注：括号前为均值，括号内为标准差。阔叶包括木荷(*Schima superba*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、黄樟(*Camphora parthenoxylon*)等；针叶包括杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)等。

表 2　优势高和优势木平均胸径计算

Tab. 2　Calculation of dominant height and average DBH of dominant trees

选取对象	优势高/m		优势木平均胸径/cm	
	算术平均	加权平均	算术平均	加权平均
Z_1	$H_{T1}=\sum h_i/n$		$D_{T1}=\sum d_i/n$	
Z_2	$H_{T2}=\sum h_{1i}/n_1$		$D_{T2}=\sum d_{1i}/n_1$	
Z_3	$H_{T3}=\dfrac{\sum h_{1i}+\sum h_{2i}}{n_1+n_2}$	$H_{T4}=\bar{h}_1w_1+\bar{h}_2w_2$	$D_{T3}=\dfrac{\sum d_{1i}+\sum d_{2i}}{n_1+n_2}$	$D_{T4}=\bar{d}_1w_1+\bar{d}_2w_2$
Z_4	$H_{T5}=\dfrac{\sum h_{1i}+\sum h_{2i}+\sum h_{3i}}{n_1+n_2+n_3}$	$H_{T6}=\bar{h}_1w_1+\bar{h}_2w_2+\bar{h}_3w_3$	$D_{T5}=\dfrac{\sum d_{1i}+\sum d_{2i}+\sum d_{3i}}{n_1+n_2+n_3}$	$D_{T6}=\bar{d}_1w_1+\bar{d}_2w_2+\bar{d}_3w_3$

注：Z_1为不区分树种，所有树木均可作为备选对象；Z_2为只以槠栲类树种作为备选对象；Z_3为以槠栲类树种和余下树种中断面积占比最大的树种为备选对象；Z_4为以槠栲类树种和余下树种中断面积占比最大的两个树种为备选对象。H_T为优势高，D_T为优势木平均胸径。n为优势木株数，h_i和d_i分别为第i株优势木树高和胸径，$n_1\sim n_3$为对应优势木的树种株数，h_{1i}和d_{1i}为第1个优势木的树种第i株优势木树高和胸径，h_{2i}和d_{2i}为第2个优势木的树种第i株优势木树高和胸径，h_{3i}和d_{3i}为第3个优势木的树种第i株优势木树高和胸径，$w_1\sim w_3$分别为对应优势木的树种在样地中断面积占比。

(1)株数密度，即单位面积上的林木株数，用每公顷林木株数 S_N 表示。

$$S_N=\frac{N_p}{S} \tag{1}$$

式中：N_p 为林木株数，S 为样地面积。

(2)每公顷断面积，即林地上每公顷的林木胸高断面积之和，常用 G(m^2/hm^2)表示。

$$G=\frac{\pi}{4}\cdot\frac{\sum D_i^2}{S} \tag{2}$$

式中：D_i 为样地中第 i 株林木胸径。

(3)林分密度指数，即现实林分的株数换算到标准平均胸径时单位面积林木株数。

$$S_{SDI}=S_N\left(\frac{D_I}{D_g}\right)^{-\beta} \tag{3}$$

式中：S_{SDI} 为林分密度指数；D_I 为标准平均胸径(本研究中取 15 cm)；D_g 为现实林分平均胸径；β 为 Reineke 自稀疏系数，一般取值 1.605。

(4)相对植距，即将林分中树木之间平均距离与优势木平均高的比值。

$$S_{RS}=\frac{\sqrt{\dfrac{10\,000}{S_N}}}{H_d} \tag{4}$$

式中：S_{RS} 为相对植距，H_d 为优势木平均高。

2.4　立地质量评价方法

本研究选用了 4 种方法进行立地质量评价，包括基于优势木树高−年龄的地位指数法、基于优势木树高−平均胸径的立地形法、基于优势木平均胸径−年龄的胸径地位指数法以及基于最粗木胸径−年龄的地位指数法。计算过程中，以 Richards 方程[21]为基础模型，利用代数差分法推导立地质量评价模型，将基础方程中的 a 作为自由参数，具体公式见表 3。

本研究通过平均绝对误差(E_{MAE})、均方根误差(E_{RMSE})和调整决定系数(R^2_{adj})检验模型精度。将优势木分布频数最多的胸径取整后确定为基准胸径[8, 27−28]，分布频数最多的年龄定为基准年龄。

2.5　相关性分析

一个理想的立地质量评价指标应满足与林分蓄积高度相关且与林分密度无关[8]。在此基础上，为避免立地质量评价指标与林分蓄积、林分密度可能存在的非线性关系[29]，本研究采用 Kendall 秩相关系数分析立地质量评价指标与林分蓄积、林分密度的相关性，进而明确合适的槠栲天然林立地质量评价方法。Kendall 秩相关根据是否存在重复数据分两种形式，相关系数 r 主要是通过一致对和不一致对的个数来计算[30−31]。

表 3 立地质量评价模型

Tab. 3 Site quality evaluation models

评价方法	基础模型	差分形式	参考文献
立地形	$H_T = a\left(1-e^{-bD_T}\right)^c$	$S_{F,T} = H_T\left(\frac{1-e^{-bD_0}}{1-e^{-bD_T}}\right)^c$	[8−10, 22]
地位指数	$H_T = a\left(1-e^{-bA_T}\right)^c$	$S_{I,T1} = H_T\left(\frac{1-e^{-bA_0}}{1-e^{-bA_T}}\right)^c$	[6, 23−24]
基于优势木平均胸径−年龄关系的地位指数	$D_T = a\left(1-e^{-bA_T}\right)^c$	$S_{I,T2} = D_T\left(\frac{1-e^{-bA_0}}{1-e^{-bA_T}}\right)^c$	[12, 25−26]
基于最粗木胸径−年龄关系的地位指数	$D_M = a\left(1-e^{-bA_M}\right)^c$	$S_{I,M} = D_M\left(\frac{1-e^{-bA_0}}{1-e^{-bA_M}}\right)^c$	[14]

注：H_T为优势高，D_T为优势木平均胸径，D_M为最粗木胸径，$S_{F,T}$、$S_{I,T1}$、$S_{I,T2}$、$S_{I,M}$分别为基于立地形、地位指数、优势木平均胸径−年龄关系地位指数、最粗木胸径−年龄关系地位指数的立地质量评价指标，A_M为最粗木年龄，A_T为优势木年龄，D_0为基准胸径，A_0为基准年龄，a、b、c为参数。

$$r = \begin{cases} \dfrac{2(N_c - N_d)}{n_0(n_0-1)}, & \text{不存在重复数据时} \\ \dfrac{N_c - N_d}{\sqrt{(N_0-N_1)(N_0-N_2)}}, & \text{存在重复数据时} \end{cases} \tag{5}$$

式中：n_0是样本大小，N_c表示一致对的数量，N_d表示不一致对的数量，$N_0 = \frac{1}{2}n_0(n_0-1)$，$N_1$和$N_2$分别表示变量$X$和$Y$中重复数据的数量。

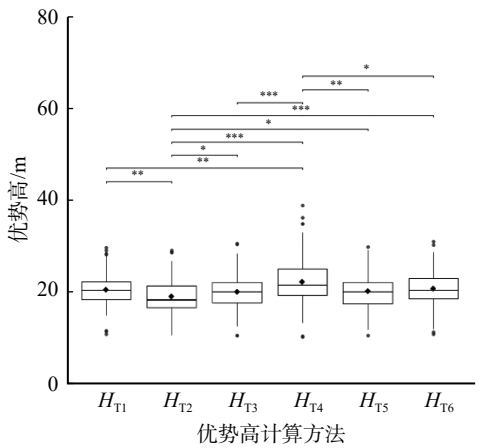
3 结果与分析

3.1 不同策略计算优势高、优势木平均胸径以及最粗木胸径的比较

3.1.1 优势高、优势木平均胸径以及最粗木胸径

不同优势高成对 t 检验结果（图 1）表明，H_{T2}、H_{T4} 分别与 H_{T1}、H_{T3}、H_{T5}、H_{T6} 均存在显著差异，且 H_{T2} 与 H_{T4} 也存在显著差异，其他优势高之间均无显著差异。其中，H_{T2} 与 H_{T4}、H_{T6} 的差异程度要强于 H_{T3}、H_{T5}。6 种优势高的中位数均低于优势高均值，且中位数存在一定差异，H_{T1} 的分布与 H_{T3}、H_{T5} 的分布相近，H_{T1} 的分布最集中，H_{T4} 的均值高于其他优势高均值。

图 2 显示：D_{T2} 与 D_{T1}、D_{T4}、D_{T6} 的分布存在显著差异，与 D_{T3}、D_{T5} 则无明显差异。6 种优势木平均胸径的分布相近，D_{T2} 的分布最集中。



*、**和***分别表示差异显著性 $p<0.05$、$p<0.01$ 和 $p<0.001$。下同。

图 1 优势高箱线图与 t 检验

Fig. 1 Boxplot and t-test for dominant height

图 3 显示：2 种最粗木胸径存在显著差异，D_{M1} 的平均值和中位数均高于 D_{M2}，整体分布范围也高于 D_{M2}。

3.1.2 优势高、优势木平均胸径以及最粗木胸径与林分因子的相关性

优势高、优势木平均胸径、最粗木胸径与林分蓄

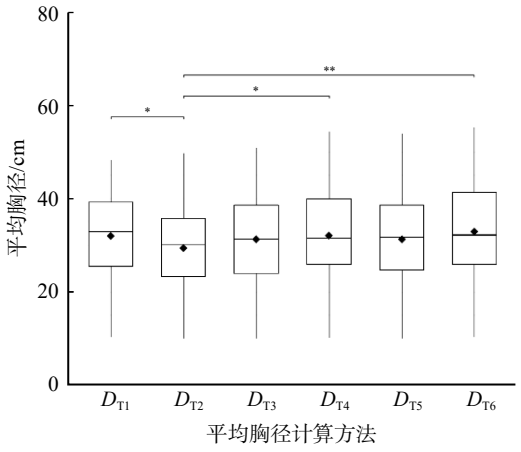
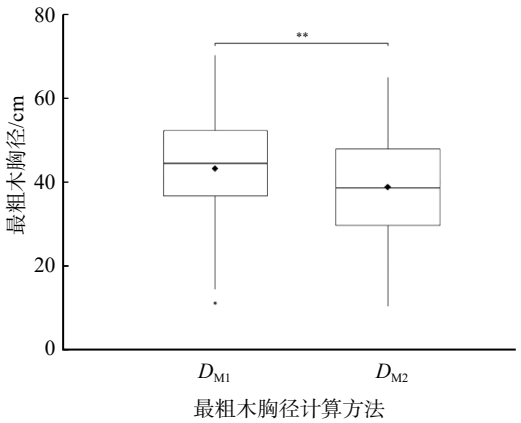


图 2 优势木平均胸径箱线图与 t 检验

Fig. 2 Boxplot and t-test for average DBH of dominant trees



D_{M1}. 所有树种中的最粗木胸径，D_{M2}. 槠栲类树种中的最粗木胸径。

图 3 最粗木胸径箱线图与 t 检验

Fig. 3 Boxplot and t-test for DBH of the thickest tree

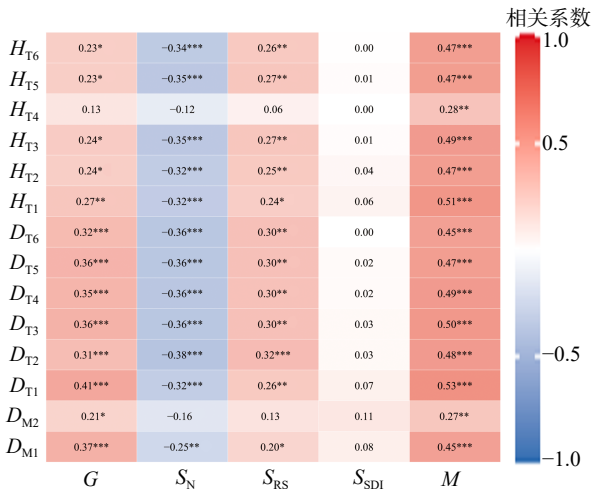
积均呈显著相关；林分断面积、株数密度、林分密度指数、相对植距与优势高、优势木平均胸径、最粗木胸径的关系表现不完全一致。H_{T4} 与 4 种林分密度指标均无显著相关；D_{M2} 与林分断面积显著相关，与株数密度、相对植距、林分密度指数均无显著相关；其余优势高、优势木平均胸径、最粗木胸径与林分断面积、株数密度、相对植距均显著正相关，与林分密度指数不相关(图 4)。

3.2　不同立地质量评价方法的比较

3.2.1　立地质量评价模型的构建

3.2.1.1　基于优势高–胸径方程的立地质量评价模型

以 Richards 方程为基础模型，根据优势高的 6 种估计方法，拟合 6 个优势高–胸径方程。通过对拟合结果(表 4)的综合分析可知，H_{T3}-D_{T3} 在 E_{RMSE}(2.166)和 E_{MAE}(1.479)上均达到最小值，相较于 H_{T2}-D_{T2} 分别降低了 0.9% 和 3.8%，R^2_{adj} 相较于 H_{T2}-D_{T2} 仅降低了 3.5%。将基准胸径代入由差分法推导的立地形模型中，即可获得立地形 $S_{F,T1}$ ~ $S_{F,T6}$。



G. 林分断面积；S_N. 株数密度；S_{RS}. 相对植距；S_{SDI}. 林分密度指数；*M*. 林分蓄积。

图 4　优势高、优势木平均胸径、最粗木胸径与林分因子的相关性

Fig. 4　Correlations between dominant height, average DBH of dominant trees, DBH of the thickest tree and stand factors

表 4　林分优势高–胸径关系模型拟合结果

Tab. 4　Fitting results of relationship model between dominant height and DBH of stand

数据集	模型参数			E_{RMSE}	R^2_{adj}	E_{MAE}
	a	*b*	*c*			
H_{T1}-D_{T1}	24.977	0.066	1.304	2.205	0.589	1.489
H_{T2}-D_{T2}	32.573	0.021	0.675	2.187	0.662	1.538
H_{T3}-D_{T3}	28.364	0.037	0.838	2.166	0.639	1.479
H_{T4}-D_{T4}	24.179	0.077	0.955	4.565	0.122	3.528
H_{T5}-D_{T5}	25.180	0.063	1.251	2.265	0.592	1.569
H_{T6}-D_{T6}	26.489	0.052	1.065	2.293	0.612	1.613

注：E_{RMSE}为均方根误差；E_{MAE}为平均绝对误差。

3.2.1.2　基于优势高–年龄方程的立地质量评价模型

以 Richards 方程为基础模型，根据优势高的 6 种估计方法，拟合 6 个优势高–年龄方程(表 5)。通过对比分析可知，H_{T1}-A_{T1} 的 E_{RMSE} 和 E_{MAE} 最小，较次优组分别降低了 12.2% 和 3.3%，R^2_{adj} 为 0.446，排名第 3。将基准年龄代入由差分法推导的地位指数模型中，即可获得地位指数 $S_{I,T11}$ ~ $S_{I,T16}$。

3.2.1.3　基于优势木平均胸径–年龄方程的立地质量评价模型

以 Richards 方程为基础模型，根据优势木平均胸径的 6 种估计方法，拟合 6 个优势木平均胸径–年龄方程(表 6)，其中，D_{T1}-A_{T1} 的 E_{RMSE} 最小，较平均值降低了 6.8%，R^2_{adj} 最大，较次优组 D_{T3}-A_{T3} 拟合精度提高了 0.15%，E_{MAE} 接近最优，仅比最优值高 0.05%。将基准年龄代入由差分法推导的地位指数模型中，即可获得地位指数 $S_{I,T21}$ ~ $S_{I,T26}$。

3.2.1.4　基于最粗木胸径–年龄方程的立地质量评价模型

以 Richards 方程为基础模型，根据最粗木胸径

表 5　林分优势高–年龄关系模型拟合结果

Tab. 5　Fitting results of relationship model between dominant height and age of stand

数据集	模型参数			E_{RMSE}	R^2_{adj}	E_{MAE}
	a	*b*	*c*			
H_{T1}-A_{T1}	23.092	0.082	1.506	2.560	0.446	1.911
H_{T2}-A_{T2}	23.666	0.052	1.065	2.940	0.390	2.206
H_{T3}-A_{T3}	22.920	0.084	1.894	2.669	0.452	1.977
H_{T4}-A_{T4}	23.101	0.127	3.323	3.379	0.209	2.659
H_{T5}-A_{T5}	23.123	0.078	1.588	2.668	0.434	2.012
H_{T6}-A_{T6}	23.578	0.085	2.216	2.737	0.448	2.129

表 6　林分优势木平均胸径–年龄关系模型拟合结果

Tab. 6　Fitting results of relationship model between average DBH and age of stand dominant trees

数据集	模型参数			E_{RMSE}	R^2_{adj}	E_{MAE}
	a	*b*	*c*			
D_{T1}-A_{T1}	42.745	0.063	2.171	5.051	0.650	4.119
D_{T2}-A_{T2}	47.788	0.046	1.984	5.843	0.600	4.498
D_{T3}-A_{T3}	41.279	0.074	3.084	5.284	0.649	4.117
D_{T4}-A_{T4}	42.464	0.076	3.649	5.582	0.634	4.499
D_{T5}-A_{T5}	44.683	0.053	2.000	5.195	0.646	4.249
D_{T6}-A_{T6}	45.595	0.066	3.143	5.712	0.646	4.609

的 2 种估计方法，拟合 2 个最粗木胸径−年龄方程（表 7）。根据拟合结果可知，D_{M2}-A_{M2} 的 E_{RMSE} 和 E_{MAE} 最低，相较 D_{M1}-A_{M1} 分别降低了 0.4% 和 0.7%，R^2_{adj} 最高，相较 D_{M1}-A_{M1} 提高了 13.2%。将基准年龄代入由差分法推导的地位指数模型中，即可获得地位指数 $S_{I,M1}$ 和 $S_{I,M2}$。

3.2.2 立地质量评价指标与林分密度的相关性

相关分析结果（图 5）显示，20 种立地质量评价指标与株数密度、相对植距和林分密度指数均无显著相关；$S_{I,M1}$ 与林分断面积呈显著相关，相关系数为 0.21。

3.2.3 立地质量评价指标与林分蓄积的相关性

通过立地质量评价指标与林分蓄积之间散点图（图 6）检验两者之间的关系，结果表明，以最粗木胸径−年龄计算的地位指数都与林分蓄积显著相关，相关系数为 0.238 和 0.169；基于优势木树高−年龄计算的地位指数中，不区分树种计算的地位指数（$S_{I,T11}$）、只考虑槠栲类树种的地位指数（$S_{I,T12}$）、区分 2 树种进行算术平均计算的地位指数（$S_{I,T13}$）、区分 3 树种进行算术平均计算的地位指数（$S_{I,T15}$）以及区分 3 树种进行加权平均计算的地位指数（$S_{I,T16}$）与林分蓄积均呈显著相关，相关系数在 0.145 ~ 0.190；基于优势木平均胸径−年龄计算的地位指数中，不区分树种计算的地位指数（$S_{I,T21}$）、只考虑槠栲类树种的地位指数（$S_{I,T22}$）、区分 2 树种进行加权平均计算的地位指数（$S_{I,T24}$）、区分 3 树种进行算术平均计算的地位指数（$S_{I,T25}$）以及区分 3 树种进行加权平均计算的地位指数（$S_{I,T26}$）与林分蓄积均呈显著相关，相关系数在 0.133 ~ 0.178；基于优势木树高−胸径计算的立地形与林分蓄积均无显著相关。

表 7 林分最粗木平均胸径−年龄关系模型拟合结果

Tab. 7 Fitting results of relationship model between average DBH and age of the thickest tree of stand

数据集	模型参数			E_{RMSE}	R^2_{adj}	E_{MAE}
	a	*b*	*c*			
D_{M1}-A_{M1}	51.916	0.076	3.212	8.389	0.469	6.821
D_{M2}-A_{M2}	56.909	0.057	3.645	8.351	0.531	6.775

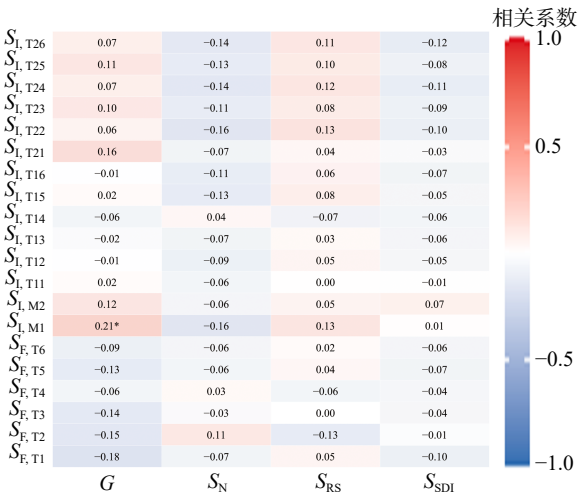


图 5 立地质量评价指标与林分密度的相关性

Fig. 5 Correlations between site quality evaluation indexes and stand density

4 讨 论

4.1 不同优势木选取策略计算结果的比较

当前天然林优势木的界定仍缺乏统一标准，既有研究多未区分树种进行优势木选取，未能充分考虑天然林树种组成的复杂性和多样性[32]。本研究以赣南槠栲天然次生林为对象，通过比较不同优势木选取策略下计算的优势高、优势木平均胸径及最粗木胸径的关系，发现各估计方法所得指标均呈显著相关，但区分树种与不区分树种所估计的指标之间存在差异。分析不同优势木选取策略计算的立地质量评价指标与林分因子的相关性，发现区分树种计算的指标与林分蓄积的相关性要大于不区分树种进行计算的指标，说明选取优势木时应区分树种，完全不考虑树种进行立地质量评价会导致对立地潜力的估计出现偏差。这与娄明华等[17]在蒙古栎（*Quercus mongolica*）阔叶混交林研究结果保持一致，印证了优势木选取时区分树种的必要性。同时，不同计算方法得到的优势高、优势木平均胸径、最粗木胸径之间也存在着显著差异，算术平均计算的立地质量评价指标与林分蓄积的相关性要大于加权进行计算的指标，说明在计算优势高、优势木平均胸径、最粗木胸径时，算术平均更优，这与吴壁芸等[15]在长白山森林研究中的结果形成对比。这一差异可能与树种的生物学特性有关：在异龄混交林中，林木大小分布往往不均匀，加权平均易受特大或特小个体影响，从而偏离林分真实生长趋势；而算术平均能更均衡地反映优势木群体的整体水平，更符合立地质量评价中对典型优势木生长表征的要求。因此，采用算术平均法能够更稳定、更合理地评估立地质量。

4.2 不同立地质量评价方法的比较

在天然林中，由于林分结构复杂，目前尚没有统一的立地质量评价方法。本研究对比了 4 种优势木选取策略和 4 种评价方法下立地质量评价指标的优劣，评价的标准为评价指标应与林分密度无关且与林分蓄积相关[33-34]。从结果看，4 种优势木选取策略计算的立地质量评价指标中，聚焦于建群树种（槠栲）并兼顾主要伴生树种（区分树种）的选取策略下，所得指标与林分密度无关，与林分蓄积具有更高的相

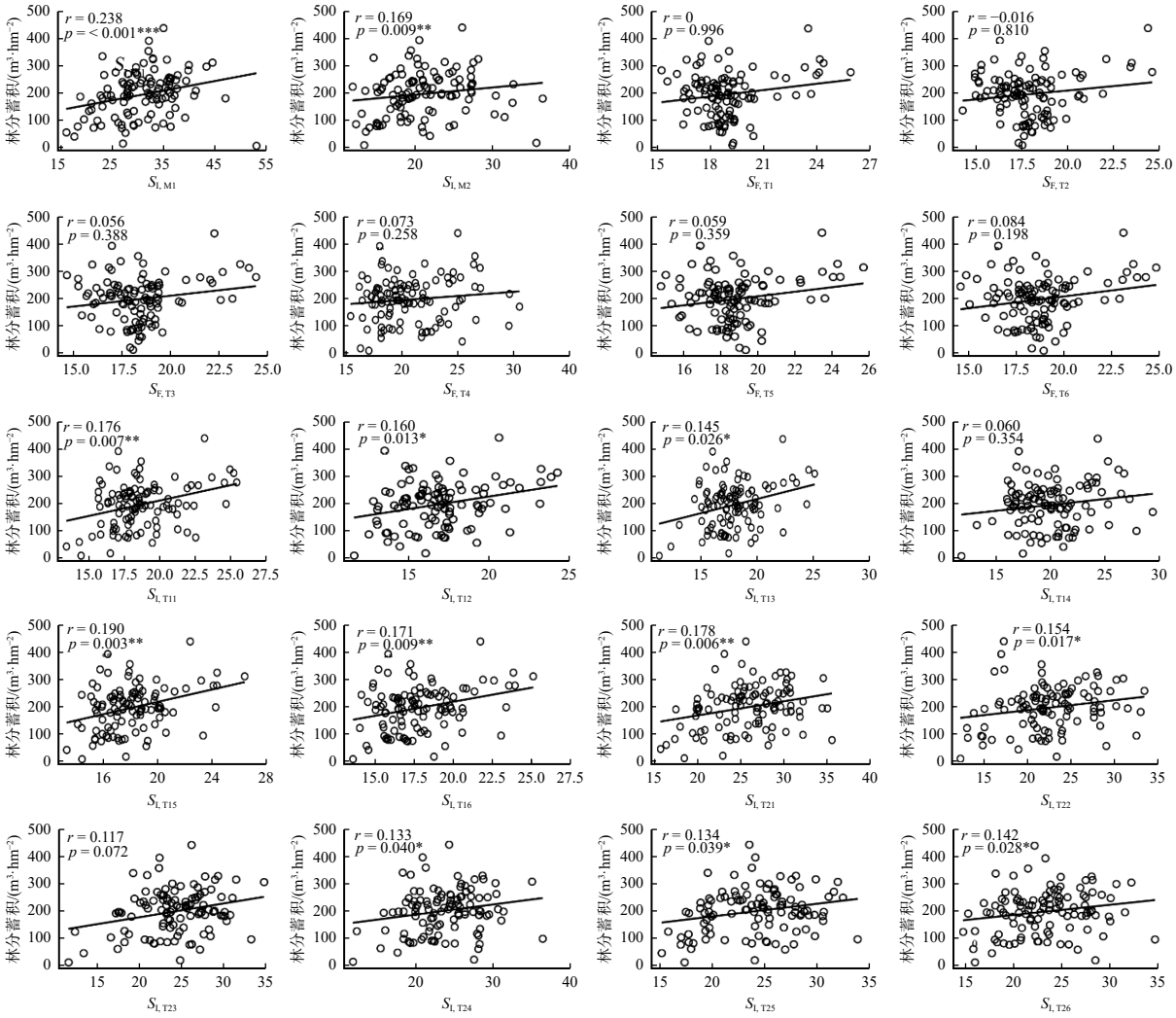


图 6　立地质量评价指标与林分蓄积的散点图

Fig. 6　Scatter plots of site quality evaluation indexes and stand volume

关性，相关系数 0.133 ~ 0.190，高于其他优势木选取策略对应的地位指数与林分蓄积的相关性，证实了树种差异在优势木选择中的重要性。这一结果与吴壁芸等[15]结论一致，说明在优势木选取中首先聚焦建群树种，进而科学区分并兼顾主要伴生树种的策略，能够更准确地反映立地生产潜力，从而支持了“聚焦建群树种，兼顾主要伴生树种”的必要性与科学性。

在 4 种评价方法中，基于树高−年龄的立地质量评价方法最优，该方法下得到的地位指数与林分密度均不相关，与林分蓄积相关性较高，相关系数范围为 0.145 ~ 0.190。该结果与部分研究存在分歧，Fu 等[35]对比了基于优势高−优势木平均胸径的立地质量评价模型和基于优势高−优势木年龄的立地质量评价模型，检验结果表明基于优势高−优势木平均胸径的立地质量评价模型预测精度较高。造成的差异可能是由于林分类型、树种组成不同。吴恒等[34]对秦岭地区天然次生林的研究中发现，不同树种适宜的评价方法会存在差异，进一步说明方法选择需匹配林分类型。因此，在赣南槠栲天然林，基于树高−年龄的地位指数更适合作为立地质量的评价指标。确定最优立地质量评价方法，可精准指导造林规划与树种选择，避免在低潜力林地配置高投入树种，从而减少资源浪费。同时，分树种评价能有效揭示伴生树种的生产力贡献，为近自然混交林设计提供依据，保障森林长期生产力。

5　结　　论

本研究以赣南槠栲天然林为研究对象，采用不同优势木选取策略计算优势高、优势木平均胸径、最粗木胸径，并运用 4 种方法进行立地质量评价，主要结论如下。

（1）从相关性分析结果看，区分树种（尤其是结合主要伴生树种）的立地质量评价方法比不区分树种的方法更能准确反映林分蓄积变化，其中“槠栲类树种加断面积占比前二的伴生树种”与蓄积的相关

性最高($r = 0.190$)，表明区分树种能显著 提升评价精度。因此，优势木选取有必要区分树种，并综合考虑优势树种与伴生树种的贡献。

(2)在区分树种计算时，只考虑槠栲类树种与考虑伴生树种进行算术平均计算的指标差异小于加权平均计算的结果。算术平均法所得指标与林分蓄积相关系数 0.134 ~ 0.190，优于加权平均法的 0.133 ~ 0.171，表明算术平均法在构建立地质量评价指标时更具稳定性。

(3)4 种立地质量评价方法中，基于优势高-年龄的地位指数与林分密度相关性不显著($p > 0.05$)，且与林分蓄积存在显著的相关性(r 的范围为 0.145 ~ 0.190，p 值范围为 0.003 ~ 0.026)，在槠栲天然林的立地质量评价中表现更佳。其中，“区分 3 树种+算术平均法”构建的地位指数 $S_{I,\ T15}$ 与林分蓄积相关性最强。

综上，槠栲天然林立地质量评价应采纳“聚焦建群树种、兼顾伴生树种”的优势木选取策略，并采用优势木树高−年龄法。该研究可为南方同类天然次生林提供方法论借鉴。

参 考 文 献

[1] Guo K, Wang B, Niu X. A review of research on forest ecosystem quality assessment and prediction methods[J]. Forests, 2023, 14(2): 317.

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

[3] 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.

[4] 孟宪宇, 张弘. 天然异龄兴安落叶松林地位质量评估方法的研究 [J]. 北京林业大学学报, 1993, 15(2): 46−53.
Meng X Y, Zhang H. Study on method for estimating site quality of uneven-aged natural *Larix gmelini* stands[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1993, 15(2): 46−53.

[5] 周甲敏, 刘兆刚, 董灵波. 基于蓄积潜在生产力的小兴安岭阔叶混交林立地质量评价 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(12): 21−29.
Zhou J M, Liu Z G, Dong L B. Site quality evaluation of broadleaved mixed forest in Xiaoxing'an Mountains of northeastern China based on volume potential productivity[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(12): 21−29.

[6] 郑聪慧, 贾黎明, 段劼, 等. 华北地区栓皮栎天然次生林地位指数表的编制 [J]. 林业科学, 2013, 49(2): 79−85.
Zheng C H, Jia L M, Duan J, et al. Establishment of site index table for *Quercus variabilis* natural secondary forest in north China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(2): 79−85.

[7] Skovsgaard J, 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.

[8] Vanclay J K, Henry N B. Assessing site productivity of indigenous cypress pine forest in southern Queensland[J]. The Commonwealth Forestry Review, 1988, 67(1): 53−64.

[9] Huang S, Titus S J. An index of site productivity for uneven-aged or mixed-species stands[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1993, 23(3): 558−562.

[10] 马建路, 宣立峰, 刘德君. 用优势树全高和胸径的关系评价红松林的立地质量 [J]. 东北林业大学学报, 1995, 23(2): 20−27.
Ma J L, Xuan L F, Liu D J. Site quality estimation for natural Korean pine forest using total height and diameter of dominant tree[J]. Journal of Northeast Forestry University, 1995, 23(2): 20−27.

[11] 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.

[12] 刘洵, 曾思齐, 龙时胜, 等. 湖南省栎类天然次生林胸径地位指数表研制 [J]. 森林与环境学报, 2019, 39(3): 265−272.
Liu X, Zeng S Q, Long S S, et al. Establishment of a diameter at breast height site index table for natural secondary oak forest in Hunan Province[J]. Journal of Forest and Environment, 2019, 39(3): 265−272.

[13] Vanclay J K. Tree diameter, height and stocking in even-aged forests[J]. Annals of Forest Science, 2009, 66(7): 702.

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

[15] 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.

[16] Vallet P, Perot T. Tree diversity effect on dominant height in temperate forest[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 381: 106−114.

[17] 娄明华. 吉林天然栎类阔叶混交林的立地生产力基础模型研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
Lou M H. Modeling site productivity base model for mixed

Quercus broadleaved natural forest in Jilin[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016.

[18] 李凤日. 测树学 [M]. 4 版. 北京: 中国林业出版社, 2019: 135−136, 156−157.
Li F R. Forest mensuration[M]. 4th ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019: 135−136, 156−157.

[19] Combaud M, Cordonnier T, Pérot T, et al. How dominant height responds to mixing species: effect of traits and height difference between species[J]. Forest Ecology and Management, 2024, 572: 122298.

[20] 王景祥. 浙江森林 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1993: 137.
Wang J X. Zhejiang forests[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1993: 137.

[21] Richards F J. A flexible growth function for empirical use[J]. Journal of Experimental Botany, 1959, 10(2): 290−301.

[22] 陈永富, 杨彦臣, 张怀清, 等. 海南岛热带天然山地雨林立地质量评价研究 [J]. 林业科学研究, 2000, 13(2): 134−140.
Chen Y F, Yang Y C, Zhang H Q, et al. A study on site quality evaluation of natural tropical mountainous rain forest in Hainan Island[J]. Forest Research, 2000, 13(2): 134−140.

[23] Goelz J, Burk T E. Development of a well-behaved site index equation: jack pine in north central Ontario[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1992, 22(6): 776−784.

[24] 孟宪宇, 陈东来. 山杨次生林地位指数表编制方法的研究 [J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(3): 47−51.
Meng X Y, Chen D L. Study on constructive method of site index table for poplar secondary forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2001, 23(3): 47−51.

[25] 李铁华, 邓华锋. 淮北平原砂姜黑土兰考泡桐立地分类与评价及生长模型的研究 [J]. 中南林学院学报, 1997, 11(3): 12−17.
Li T H, Deng H F. Site type division, site quality appraisal and growth model establishment of *Paulownia elongata* forest in Shajiang black soil region of Huaibei Plain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 1997, 11(3): 12−17.

[26] 李振芳, 许业洲, 唐万鹏, 等. 湖北省泡桐人工林胸径地位级表的编制 [J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(9): 14−19.
Li Z F, Xu Y Z, Tang W P, et al. Establishing site class table for paulownia plantation in Hubei[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(9): 14−19.

[27] Aguirre A, Moreno-Fernández D, Alberdi I, et al. Mapping forest site quality at national level[J]. Forest Ecology and Management, 2022, 508: 120043.

[28] 雷相东, 唐守正, 符利勇. 森林立地质量定量评价: 理论 方法 应用 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2020: 10−11.
Lei X D, Tang S Z, Fu L Y. Quantitative evaluation of forest site quality: theory, methods, and application [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2020: 10−11.

[29] 邓立斌, 李际平. 基于人工神经网络的杉木可变密度蓄积量收获预估模型 [J]. 西北林学院学报, 2002, 17(4): 87−89.
Deng L B, Li J P. Variable density volume prediction model for Chinese fir based on artificial neural network[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2002, 17(4): 87−89.

[30] 商乃演, 李东海, 杨小波, 等. 濒危植物蝴蝶树所在群落不同林层优势树种生态位与种间联结 [J]. 生态学报, 2025, 45(7): 3389−3400.
Shang N Y, Li D H, Yang X B, et al. Niches and interspecific associations of dominant tree species of different forest layers in the communities with the endangered plant *Heritiera parvifolia*[J]. Acta Ecologica Sinica, 22025, 45(7): 3389−3400.

[31] 薛卫星, 李春辉, 艾训儒, 等. 鹅掌楸天然林优势树种生态位与种间联结性 [J]. 森林与环境学报, 2023, 43(1): 26−34.
Xue W X, Li C H, Ai X R, et al. Niche and interspecific association of dominant tree species in *Liriodendron chinense* natural forest[J]. Journal of Forest and Environment, 2023, 43(1): 26−34.

[32] del Río M, Pretzsch H, Alberdi I, et al. Characterization of the structure, dynamics, and productivity of mixed-species stands: review and perspectives[J]. European Journal of Forest Research, 2016, 135: 23−49.

[33] Padilla-Martínez J R, Paul C, Corral-Rivas J J, et al. Evaluation of the site form as a site productive indicator in temperate uneven-aged multispecies forests in Durango, Mexico[J]. Plants (Basel), 2022, 11(20): 2764.

[34] 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.

[35] Fu L, Lei X, Sharma R P, et al. Comparing height-age and height-diameter modelling approaches for estimating site productivity of natural uneven-aged forests[J]. Forestry, 2018, 91(4): 419−433.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　张会儒）