

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240173

## 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

罗光成<sup>1,2</sup> 雷相东<sup>1</sup> 史景宁<sup>3</sup> 何潇<sup>1</sup> 向玮<sup>2</sup> 李玉堂<sup>4</sup>

(1. 林木资源高效生产全国重点实验室, 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 北京林业大学林学院, 北京 100083;  
3. 河北农业大学经济管理学院, 河北 保定 071000; 4. 吉林省林业调查规划院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**【目的】为验证基于林分潜在生长量的立地质量评价方法的可行性, 并优化此方法, 采用潜在生长量法估算林分断面面积和蓄积潜在生产力, 为长白落叶松人工林立地质量评价和抚育经营提供科学依据。【方法】基于吉林省一类调查和二类调查局级固定样地数据, 采用广义代数差分法建立长白落叶松人工林优势高生长模型, 根据地位指数划分立地等级。建立含立地等级哑变量的断面积和蓄积生长模型, 利用黄金分割法搜索最优密度, 求解潜在生产力, 并通过自然稀疏线进行验证; 以现实林分年龄和林分密度指数计算现实生产力; 结合现实生产力和潜在生产力两者差异综合评估生产力提升空间。【结果】(1)长白落叶松人工林的优势高、断面积、蓄积生长模型拟合效果良好, 调整决定系数为 0.877、0.985、0.966; 均方根误差为 1.037 m、0.886 m<sup>2</sup>/(hm<sup>2</sup>·a)、9.756 m<sup>3</sup>/(hm<sup>2</sup>·a); 相对均方根误差为 7.353%、6.588%、11.890%。5 个立地等级的地位指数平均值大小为 19.8、17.8、15.7、13.5 和 11.6 m。(2)同一林龄, 断面积和蓄积潜在生产力对应的最优林分密度指数不同。基准年龄 30 年时断面积潜在生产力为 0.861 ~ 0.941 m<sup>2</sup>/(hm<sup>2</sup>·a), 蓄积潜在生产力为 5.319 ~ 8.775 m<sup>3</sup>/(hm<sup>2</sup>·a)。与近熟林、成熟林、过熟林相比, 中龄林和幼龄林现实生产力与潜在生产力差异较大, 表明它们具有较大的生产力提升空间。(3)在林分生长过程中, 潜在生产力对应的最优密度始终不大于林分自然稀疏的最大密度。【结论】约束林分初始株数后计算的潜在生产力更符合实际, 进一步验证了基于潜在生长量的立地质量评价方法的可行性。在中幼龄阶段, 长白落叶松的现实生产力与潜在生产力差异显著, 该差异随立地质量的下降而增大。研究结果给出了潜在生产力对应的最优林分密度, 可为长白落叶松人工林的抚育经营提供依据。

**关键词:** 潜在生产力; 现实生产力; 广义代数差分法; 立地质量评价; 自然稀疏线

**中图分类号:** S757; S758.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2025)01-0001-10

**引文格式:** 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 Guangcheng, Lei Xiangdong, Shi Jingning, 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.

### Site quality evaluation of *Larix olgensis* plantations based on potential productivity in Jilin Province of northeastern China

Luo Guangcheng<sup>1,2</sup> Lei Xiangdong<sup>1</sup> Shi Jingning<sup>3</sup> He Xiao<sup>1</sup> Xiang Wei<sup>2</sup> Li Yutang<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;  
2. School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;  
3. College of Economics and Management, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China;  
4. Jilin Forestry Investigation and Planning Institute, Changchun 130022, Jilin, China)

**Abstract:** [Objective] This paper verifies the feasibility of site quality evaluation method based on

收稿日期: 2024-05-31 修回日期: 2024-09-06

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD2200501)。

第一作者: 罗光成。主要研究方向: 森林生长模型与模拟。Email: guangcheng\_luo@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 雷相东, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 森林生长模型与模拟。Email: xdlei@caf.ac.cn 地址: 100091 北京市海淀区香山路东小府 2 号中国林业科学研究院资源信息研究所。

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

potential annual increment of forest and optimize this method. The potential annual increment method was used to estimate the potential productivity of basal area and stand volume, providing a scientific basis for site quality evaluation and silvicultural management of *Larix olgensis* plantations. [Method] The dominant height growth model of *L. olgensis* plantations was developed using generalized algebraic difference method based on the permanent sample plot data from the national forest inventory and forest management unit-level inventory in Jilin Province of northeastern China. Site grades were ranked according to the site index. The growth models of basal area and volume, incorporating site grades as dummy variables, were constructed, and the optimal stand density index was searched using golden section method. The corresponding potential productivity was calculated and verified by self-thinning line. Realized productivity was calculated from the actual stand age and stand density index. The productivity improvement gap was comprehensively evaluated by combining the difference between realized and potential productivity. [Result] (1) The models of dominant height, basal area and volume growth of *L. olgensis* plantations showed good performance. The adjusted coefficients of determination values were 0.877, 0.985 and 0.966. The root mean square error values were 1.037 m, 0.886 m<sup>2</sup>/(ha·year) and 9.756 m<sup>3</sup>/(ha·year), while the relative root mean square error values were 7.353%, 6.588% and 11.890%. The average site index values for the five site grades were 19.8, 17.8, 15.7, 13.5 and 11.6 m, respectively. (2) For the same stand age, the optimal stand density index differed for basal area and volume potential productivity. At the base age of 30 years, the potential productivity for stand basal area ranged from 0.861 to 0.941 m<sup>2</sup>/(ha·year), while the potential productivity for volume ranged from 5.319 to 8.775 m<sup>3</sup>/(ha·year). The productivity gap between realized and potential productivity was larger in young and middle-aged stands compared with near-mature, mature and overmature stands, indicating a greater potential for productivity improvement. (3) During stand growth, the optimal stand density corresponding to potential productivity was always less than or equal to the maximum density determined by self-thinning process. [Conclusion] The potential productivity calculated after constraining the initial stand density is more realistic, further validating the feasibility of site quality evaluation method based on potential mean annual increment. During the young and middle-aged stages, the realized productivity of *L. olgensis* differs significantly from its potential productivity, with the difference increasing as site quality declines. The results provide the optimal stand density corresponding to potential productivity, offering a basis for tending operations and management of *L. olgensis* plantations.

**Key words:** potential productivity; realized productivity; generalized algebraic difference approach; site quality evaluation; self-thinning line

立地质量评价是森林经营中的一项基础性工作<sup>[1]</sup>,对研究与掌握森林生长环境及环境对森林生产力影响具有重要作用<sup>[2-4]</sup>。其评价结果有助于树种选择<sup>[5]</sup>、林木生长调控<sup>[6]</sup>、森林结构调整<sup>[7]</sup>、森林经营决策和木材产量预估<sup>[8]</sup>等。随着生态文明建设的推进,我国对森林质量提升有了更高的要求,需要精准评价立地质量。

国内外开展了大量立地质量评价和生产力估算的研究,主流的立地质量评价方法仍为地位指数法<sup>[9-10]</sup>。地位指数法以林分优势高作为评定指标,依据林分基准年龄时优势木树高的平均值来量化立地质量。因其直观易懂,外业调查工作量较小的优点,在国内外被广泛应用于人工林<sup>[11]</sup>。在构建地位指数模型时,广义代数差分法(generalized algebraic difference approach, GADA)具有拟合精度高且不受基准年龄影响等特点<sup>[12]</sup>。对于林分结构复杂、树种

组成较多的混交林,由于无法获得准确的林分年龄<sup>[13-14]</sup>,有学者提出以基准胸径对应的优势木树高即立地形作为立地质量评价指标<sup>[15-16]</sup>,或选用树种年平均蓄积生长量作为指标<sup>[2]</sup>。然而以上方法均基于现实林分获得的调查数据,无法回答潜在生产力问题,即单位时间单位面积的最大生长量。我国学者提出了基于林分潜在生长量的立地质量评价方法<sup>[17]</sup>,该方法通过划分立地等级,采用优化林分密度的方法得到特定年龄时的最大年生长量,以定量评价立地质量,并同时得到最优的林分密度<sup>[18]</sup>。潜在生长量法能有效地用于探究纯林的潜在生产力与现实生产力的关系<sup>[19]</sup>,也能计算混交林的蓄积潜在生产力<sup>[20]</sup>和生物量潜在生产力<sup>[21]</sup>。但其应用仍然有限,需要进一步的验证。

长白落叶松(*Larix olgensis*)是我国东北地区重要的造林树种,具有耐寒、适应性强等优点,精准估

算其潜在生产力对该地区的造林、营林和采伐等具有重要的实践意义。本研究以吉林省长白落叶松人工林为研究对象, 拟采用 GADA 法建立林分优势高生长模型划分立地等级, 建立包含立地等级、林分密度指数和林龄的林分断面积与蓄积生长模型, 利用黄金分割优化方法求解林分潜在生产力, 并分析林分最优密度与最大密度线的关系, 以期为长白落叶松的立地质量评价和质量提升提供依据。

## 1 研究区概况

研究区位于我国东北地区中部(121°38' ~ 131°19'E, 40°52' ~ 46°18'N), 海拔 180 ~ 1 800 m, 坡度 0° ~ 40°。温带大陆性季风气候, 雨热同期, 从东南向西北呈湿润、半湿润、半干旱变化, 年均气温 2 ~ 6 °C, 气温年较差 35 ~ 42 °C, 无霜期 100 ~ 160 d, 年均日照时数 2 259 ~ 3 016 h, 年均降水量 400 ~ 600 mm, 降雨集中在夏季。主要人工造林树种有长白落叶松、鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*)、红松(*Pinus koraiensis*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、大青杨(*Populus ussuriensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)等。

## 2 数据来源

数据来源于吉林省第 5 ~ 9 次(1994—2014 年)一类调查和部分两期(1998、2008)二类调查落叶松人工纯林固定样地数据, 样地面积为 0.06 hm<sup>2</sup>。基于每木检尺的数据, 计算林分平均胸径( $D_g$ )、林分断面积( $G$ )、林分蓄积( $M$ )、林分密度指数( $I_{SD}$ ), 并调查林分平均年龄( $A$ )。利用树高一胸径曲线<sup>[22]</sup>获得每株林木树高, 取样地内前 6 株最高林木的树高平均值作为林分优势高( $H_T$ )。此外, 其他调查因子包括海拔、坡度、腐殖质层厚度等立地因子, 林分因子概况见表 1。 $I_{SD}$  计算<sup>[23]</sup>见公式(1)。

$$I_{SD} = N \left( \frac{D_g}{D_0} \right)^{1.605} \quad (1)$$

表 1 吉林省长白落叶松人工林样地林分因子统计量

Tab. 1 Summary statistics of stand factors in *Larix olgensis* plantation plots in Jilin Province

林分因子	平均值	标准差	最小值	最大值
林分平均年龄/a	27	10	6	65
林分优势高/m	14.5	3.0	5.6	23.0
林分平均胸径/cm	13.0	3.8	5.7	28.1
林分断面积/(m <sup>2</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	13.45	7.24	0.79	37.13
林分蓄积/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	82.05	52.76	2.53	284.31
林分密度指数/(株·hm <sup>-2</sup> )	499	246	40	1 285

式中:  $N$  为林分每公顷株数,  $D_0 = 20$  cm。

## 3 研究方法

### 3.1 潜在和现实生产力的计算方法

采用文献 [17] 提出的方法计算潜在生产力。其基本假设: 在同一立地条件下, 相同林分类型(或树种组成接近), 如果有近似的林分结构和密度, 则有近似的生长过程, 包括林分平均树高、断面积、蓄积生长。

对于既定的林分生长类型, 当立地等级和林分年龄固定时, 连年生长量只与林分密度有关。因此, 潜在生长量求解转化为在林分密度区间寻找连年生长量的最大值问题。断面积潜在生产力与蓄积潜在生产力的计算过程类似, 其具体算法详见文献 [18] 和 [24]。现实生产力计算过程与潜在生产力类似, 两者区别在于潜在生产力输入的林分密度指数是一个区间, 计算求解断面积或蓄积连年生长量的最大值。现实生产力输入的则是现实林分密度指数, 其计算结果小于或等于潜在生产力。以上计算均在 R 平台中完成, 使用 forestat 包<sup>[25]</sup>里的 potential.productivity 函数和 realized.productivity 函数分别计算林分潜在生产力和现实生产力。

### 3.2 优势高生长模型和立地等级划分

以 Richards 公式为基础模型, 指定其参数  $a = e^X$ ,  $c = f_1 + f_2 X^{[12]}$ , 采用 GADA 法推导林分优势高生长模型。

$$H_{T2} = e^X (1 - e^{-bA_2})^{f_1 + f_2 X} \quad (2)$$

$$X = \frac{\ln H_{T1} - f_1 \ln(1 - e^{-bA_1})}{1 + f_2 \ln(1 - e^{-bA_1})} \quad (3)$$

式中:  $H_{T1}$ 、 $H_{T2}$  分别表示林龄  $A_1$ 、 $A_2$  时的林分优势高; 当  $A_1$  为基准年龄,  $H_{T1}$  即为地位指数;  $X$  表示立地相关的参数;  $b$ 、 $f_1$  和  $f_2$  为模型参数。

参考文献 [26], 选定 30 a 作为基准年龄, 计算地位指数。参考以往研究 [17,20—21], 将所有样地划分为 5 个立地等级。

### 3.3 断面积和蓄积生长模型

断面积和蓄积生长模型均选用唐守正<sup>[27]</sup>提出的全林整体模型, 本研究选取样本量最多的立地等级 3 作为参考项。

$$G = \left( a_{13} + \sum_{m=1}^5 (3-m) a_1 S_m \right) \left( 1 - e^{-b_1 \left( \frac{I_{SD}}{10000} \right)^{c_1} A} \right)^{d_1} + \varepsilon_G \quad (4)$$

$$M = \left( a_{23} + \sum_{m=1}^5 (3-m) a_2 S_m \right) \left( 1 - e^{-b_2 \left( \frac{I_{SD}}{10000} \right)^{c_2} A} \right)^{d_2} + \varepsilon_M \quad (5)$$

式中:  $G$  为林分断面积,  $M$  为林分蓄积;  $a_{13}$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 、 $d_1$  为断面积生长模型参数,  $a_{23}$ 、 $b_2$ 、 $c_2$ 、 $d_2$  为蓄积生长模型参数,  $a_1$  与  $a_2$  分别为断面积与蓄积生长模型极值参数的级距;  $A$  为林分平均年龄; 将立地等级转换为哑变量  $S_m$ , 当样地的立地等级为  $m$  (取值 1、2、3、4、5) 时,  $S_m = 1$ , 否则  $S_m = 0$ ;  $\varepsilon_G$ 、 $\varepsilon_M$  为误差项。

在 R 平台中, 使用 `minpack.lm` 包<sup>[28]</sup>中 `nlsLM` 函数估计林分优势高、断面积和蓄积生长模型参数。

### 3.4 模型评估

采用留一交叉验证法对林分优势高、断面积和蓄积生长模型进行评价, 每次只留一个样本作为验证集, 其余样本作为训练集。利用调整决定系数 ( $R_a^2$ )、均方根误差 (RMSE)、相对均方根误差 (rRMSE) 评价模型拟合精度。

$$R_a^2 = 1 - \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p-1) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

$$rRMSE = RMSE / \bar{y} \times 100\% \quad (8)$$

式中:  $n$  为观测样本总量,  $p$  为模型参数个数,  $y_i$  是第  $i$  个数据的观测值,  $\hat{y}_i$  是第  $i$  个数据的预测值,  $\bar{y}$  是  $y_i$  的平均值。

### 3.5 生产力提升空间

采用潜在生产力与现实生产力之间差值评估林分断面积与蓄积生产力提升空间<sup>[18]</sup>, 并计算其占潜在生产力百分比进一步分析生产力相对提升空间。

$$\begin{cases} G_g = G_P - G_R \\ M_g = M_P - M_R \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} G_r = \frac{G_g}{G_P} \times 100\% \\ M_r = \frac{M_g}{M_P} \times 100\% \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $G_g$ 、 $M_g$  分别为林分断面积、蓄积生产力提升空间;  $G_P$ 、 $G_R$  和  $M_P$ 、 $M_R$  分别为断面积潜在、现实生产力和蓄积潜在、现实生产力;  $G_r$ 、 $M_r$  分别为断面积、蓄积生产力相对提升空间。

### 3.6 最优林分密度的检验

本研究利用高慧淋等<sup>[29]</sup>建立的长白落叶松人工林最大密度线模型, 探究潜在生产力估算过程中, 最优林分密度与自然稀疏线最大密度的关系, 进一步验证基于潜在生产力的立地质量评价方法。

$$\ln N = 11.790 - 1.586 \ln D_g \quad (11)$$

## 4 结果与分析

### 4.1 生长模型参数

使用最小二乘回归方法拟合, 获得林分优势高、断面积和蓄积生长 3 个模型的所有参数估计值 (表 2)。3 个模型的  $R_a^2$  分别为 0.877、0.985 和 0.966, RMSE 分别为 1.037 m、0.886 m<sup>2</sup>/(hm<sup>2</sup>·a) 和 9.756 m<sup>3</sup>/(hm<sup>2</sup>·a), rRMSE 分别为 7.353%、6.588% 和 11.890%, 模型拟合精度较高, 表明这 3 个生长模型都能很好地拟合吉林省长白落叶松人工纯林样地的数据。

表 2 模型参数估计与留一交叉法验证结果

Tab. 2 Parameter estimates and leave-one-out cross-validation results

生长模型	参数	估计值	留一交叉法验证结果		
			平均值	标准差	变异系数/%
优势高	$b$	0.056	0.056	0.000	0.00
	$f_1$	4.489	4.489	0.013	0.29
	$f_2$	-1.146	-1.146	0.004	0.35
断面积	$a_{13}$	45.554	45.555	0.119	0.26
	$a_1$	1.015	1.015	0.004	0.39
	$b_1$	32.543	32.544	0.386	1.19
	$c_1$	3.793	3.793	0.003	0.08
	$d_1$	0.268	0.268	0.000	0.00
蓄积	$a_{23}$	383.523	383.535	1.473	0.38
	$a_2$	47.019	47.020	0.188	0.40
	$b_2$	0.368	0.368	0.002	0.54
	$c_2$	1.477	1.477	0.001	0.07
	$d_2$	0.723	0.723	0.001	0.14

经留一交叉验证法检验, 3 个模型的标准差和变异系数 (最大值为 1.19%) 也很小, 模型拟合结果比较稳定 (表 2)。

### 4.2 立地分级

根据优势高模型的参数拟合结果, 将落叶松人工林样地划分为 5 个立地等级, 分别计算每个立地等级的地位指数算术平均值。立地等级 1~5 的地位指数算术平均值分别为 19.8、17.8、15.7、13.5、11.6 m (表 3)。根据断面积生长模型和蓄积生长模型拟合获得立地等级 3 的极值参数  $a_{13}$ 、 $a_{23}$  与参数的级距  $a_1$ 、 $a_2$ , 分别计算其余各立地等级的极值参数。

根据模型 (2) 的参数估计值与各立地等级的地位指数平均值, 绘制长白落叶松林分优势高生长曲线, 曲线可以很好地与各立地等级样地相对应 (图 1)。其中, 立地等级 1 的立地质量最好, 立地等级 5 的立地质量最差。

表 3 5 个立地等级的地位指数与极值参数  
Tab. 3 Site index and asymptote parameters for 5 site grades

立地等级	地位指数/m		断面积生长模型		蓄积生长模型	
	范围	平均值	极值参数	值	极值参数	值
1	≥18.6	19.8	$a_{11}$	47.584	$a_{21}$	477.561
2	[16.6 ~ 18.6)	17.8	$a_{12}$	46.569	$a_{22}$	430.542
3	[14.6 ~ 16.6)	15.7	$a_{13}$	45.554	$a_{23}$	383.523
4	[12.6 ~ 14.6)	13.5	$a_{14}$	44.539	$a_{24}$	336.504
5	<12.6	11.6	$a_{15}$	43.524	$a_{25}$	289.485

4.3 潜在生产力和现实生产力

当不约束林分初始株数, 随着林分年龄的增加, 断面积和蓄积最大年生长量, 即断面积和蓄积潜在生产力均逐渐减小, 呈单调递减趋势(图 2c、2f)。约束林分初始株数后, 断面积和蓄积最大年生长量呈现先增加达到峰值后再下降的趋势, 更符合生物学规律。因此, 采用约束林分初始株数密度来求解潜在生产力。

约束林分初始株数与否, 均存在最优密度使生长量达到最大(图 2a、2b、2d、2e)。当不对林分初始株数进行约束时, 随着林龄变大, 年生长量最大值对

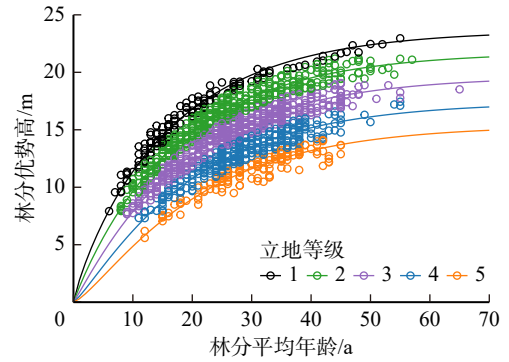
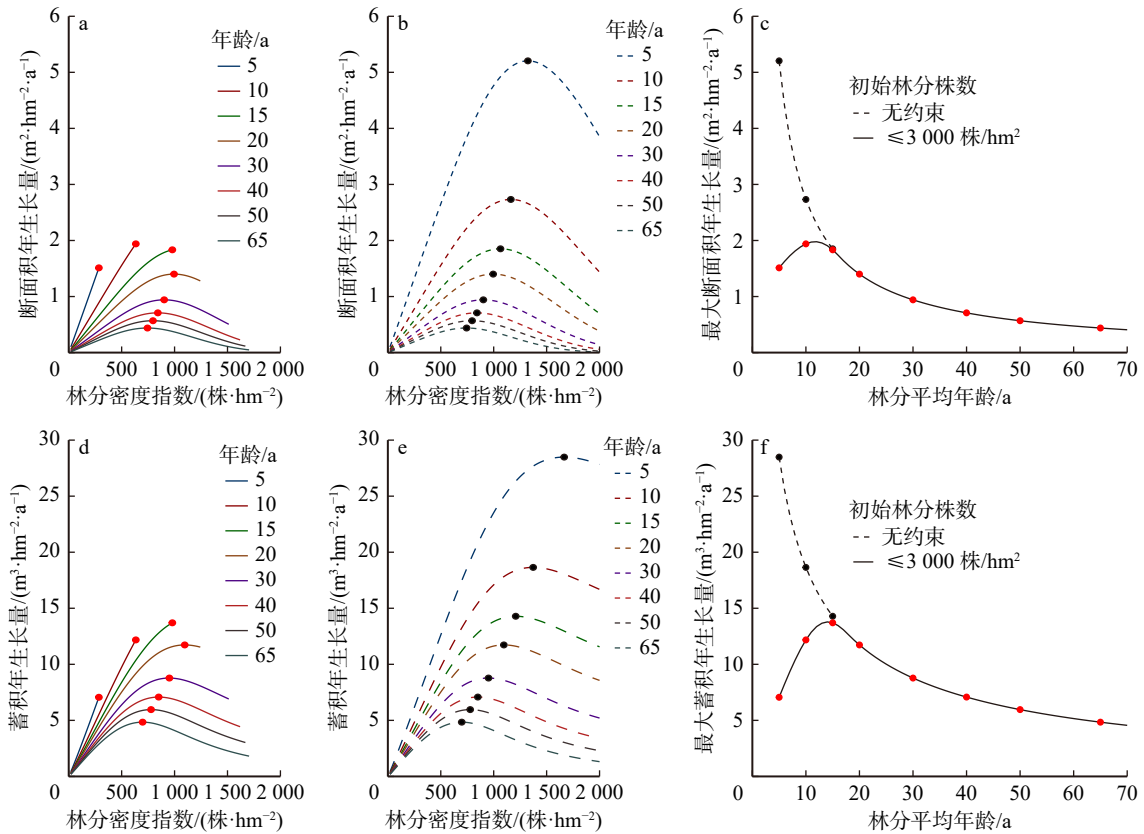


图 1 长白落叶松人工林优势高生长的 5 个立地等级分布  
Fig. 1 Distribution of dominant height growth across 5 site grades in *Larix olgensis* plantations

应的林分密度指数单调递减(图 2b、2e)。当约束林分初始株数(根据吉林实际情况, 取  $\leq 3000$  株/ $\text{hm}^2$ )后, 林分发育早期(5、10、15 a)的最大年生长量(红点)均小于不做约束的(黑点), 两者差异随林龄变大减小, 林分生长至 20 a 以后完全一致(图 2)。

对于同一立地等级的林分, 采取不同林分变量(断面积和蓄积)作为对象求解潜在生产力时, 两者所得到的最优林分密度指数并不一致。随着林分发育, 两个林分变量的最优林分密度指数变化幅度也存在差异。以立地等级 1 为例, 从 20 ~ 80 a, 每增加



实线为约束(3000 株/ $\text{hm}^2$ )条件下的断面积、蓄积年生长量曲线, 虚线为无约束的年生长量曲线; 红点与黑点分别为各林龄约束与无约束的年生长量最大值。

图 2 立地等级 1 最优林分密度指数及潜在生产力

Fig. 2 Optimal stand density index and potential productivity for site grade 1

20 a, 较蓄积潜在生产力, 断面积潜在生产力对应的最优林分密度指数下降幅度更小(表4)。

表4 立地等级1最优林分密度指数

Tab. 4 Optimal stand density index for site grade 1

潜在生产力	不同林分年龄最优林分密度指数/(株·hm <sup>-2</sup> )			
	20 a	40 a	60 a	80 a
断面积	995	841	759	706
蓄积	1 096	850	722	638

中龄林与幼龄林阶段, 5个立地等级断面积和蓄积的现实生产力显著低于潜在生产力, 表明在早期发育阶段林分生长潜力未得到充分发挥(图3)。

林龄15 a时, 立地等级1~5的断面积和蓄积生产力相对可提升空间范围分别为37.02%~88.17%和38.17%~88.63%(表5)。同一立地等级, 断面积潜在生产力相对提升空间略小于蓄积。对于不同立地等

级, 断面积和蓄积的生产力相对提升空间均随立地质量降低而逐渐增大, 立地质量差的落叶松人工林样地仍具有很大的相对提升空间。

基准年龄30 a长白落叶松断面积和蓄积潜在生产力均随着立地质量的降低而下降(表6)。立地等级1的断面积潜在生产力最大(0.941 m<sup>2</sup>/(hm<sup>2</sup>·a)), 立地等级5的断面积潜在生产力最小(0.861 m<sup>2</sup>/(hm<sup>2</sup>·a)), 为立地等级1的91.50%。蓄积潜在生产力也是立地等级1最大(8.775 m<sup>3</sup>/(hm<sup>2</sup>·a)), 立地等级5最小(5.319 m<sup>3</sup>/(hm<sup>2</sup>·a))。与断面积潜在生产力不同的是, 蓄积潜在生产力受不同立地质量影响的变化幅度更大, 立地等级5的蓄积潜在生产力仅为立地等级1的60.62%。

#### 4.4 潜在生产力对应的林分最优密度与自然稀疏线的关系

长白落叶松人工林最大密度线随着林分平均胸

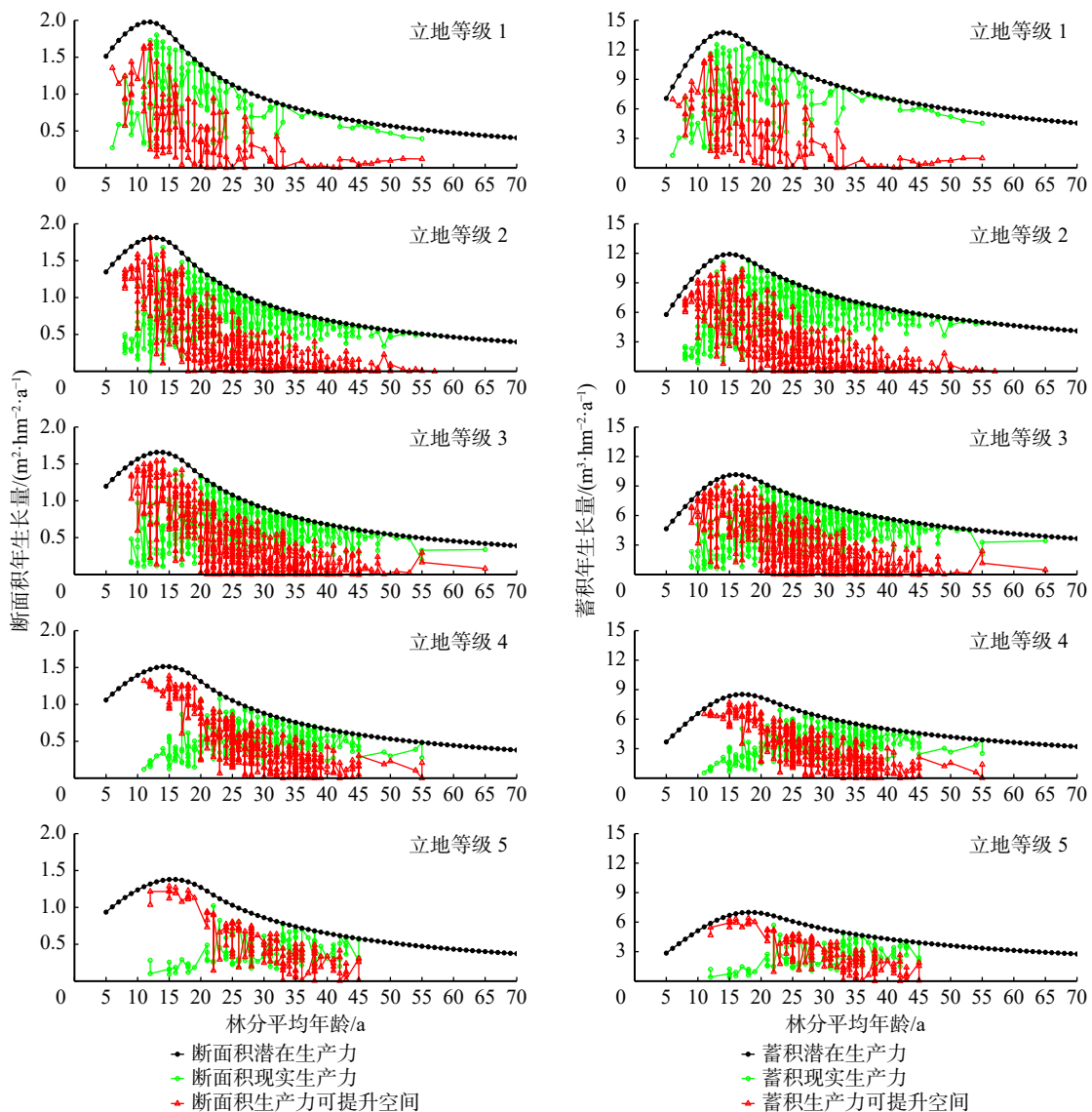


图3 长白落叶松林分断面积和蓄积的潜在生产力、现实生产力和可提升空间

Fig. 3 Potential productivity, realized productivity and their difference in basal area and volume for *Larix olgensis*

表 5 15 a 长白落叶松林分断面积和蓄积的潜在生产力、现实生产力和相对可提升空间

Tab. 5 Potential productivity, realized productivity and their difference in basal area and volume for *Larix olgensis* at 15 years

类别	指标	立地等级				
		1	2	3	4	5
断面积	现实生产力/( $\text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	1.155	0.814	0.709	0.370	0.163
	潜在生产力/( $\text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	1.834	1.748	1.638	1.513	1.378
	生产力相对提升空间/%	37.02	53.43	56.72	75.55	88.17
蓄积	现实生产力/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	8.473	5.504	4.365	2.019	0.761
	潜在生产力/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	13.704	11.911	10.107	8.350	6.692
	生产力相对提升空间/%	38.17	53.79	56.81	75.82	88.63

表 6 林分断面积和蓄积潜在生产力 (基准年龄 30 年)

Tab. 6 Potential productivity of basal area and volume (base age = 30 years)

潜在生产力	立地等级				
	1	2	3	4	5
断面积/( $\text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	0.941	0.921	0.901	0.881	0.861
蓄积/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	8.775	7.911	7.047	6.183	5.319

径自然对数( $\ln D_g$ )增大呈线性下降(图 4), 控制林分初始株数后, 在林分生长发育早期, 断面积与蓄积潜在生产力的最适林分株数均为恒定值(3 000 株/ $\text{hm}^2$ )。随着林分发育, 断面积潜在生产力最优密度线一直低于最大密度线。在横坐标  $\ln D_g$  为 2.4 附近, 蓄积潜在生产力最优密度线与最大密度线有轻微重合, 之后逐渐远离。林分生长至中龄林 20 a ( $\ln D_g \approx 2.4$ ) 后, 密度线斜率大小依次为林分自然稀疏、断面积潜在生产力、蓄积潜在生产力。

## 5 讨 论

在本研究中, 采用 GADA 法推导了长白落叶松林分优势高生长模型, 并选定基准年龄为 30 a 计算地位指数和划分立地等级。当数据为长期观测资料或解析木资料时, GADA 法的应用更为适宜<sup>[30-31]</sup>。与传统的导向曲线法相比, GADA 法推导的模型既能反映落叶松优势高在不同立地上生长的差异, 还

能描述曲线形状随立地的变化情况, 其绘制的优势高生长曲线更符合多态性, 存在渐近线和拐点等生长函数的理想特征<sup>[32]</sup>。本研究基于 Richards 方程推导的 GADA 模型拟合精度较高( $R_a^2 = 0.877$ ,  $r\text{RMSE} = 7.353\%$ ), 能很好地拟合该研究区落叶松林分优势高数据, 结果与以往研究一致<sup>[12]</sup>。利用此模型, 将吉林省长白落叶松人工林样地划分为 5 个立地等级。

本研究 5 个立地等级长白落叶松在 10~40 a 之间的平均蓄积潜在生产力为 5.74~10.32  $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 与吉林省长白落叶松人工林的研究结果<sup>[24]</sup>(4.20~9.45  $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ )基本接近, 在本研究中, 40 a 林分蓄积潜在生产力为 4.29~7.08  $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 略大于该研究<sup>[24]</sup>的结果(3.00~5.80  $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ), 这可能是由于建模样本数据不同, 得到的参数存在差异。林分发育早期(林龄 < 20 a), 不对林分初始株数进行约束, 通常会高估该林分的潜在生产力。以立地等级 1 为例, 当林分年龄为 5 a 时, 最大蓄积年生长量为 28.484  $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 最优林分密度指数为 1 666 株/ $\text{hm}^2$ (图 2e), 理论林分株数密度为 17 287 株/ $\text{hm}^2$ 。显然该理论值不符合林业生产实际。此外, 初植密度过大的林分, 不仅会显著限制林木生长和降低成活率<sup>[33]</sup>, 还会出现高径比偏大, 导致林分抗风害能力降低<sup>[34]</sup>。因此, 本研究选取 3 000 株/ $\text{hm}^2$ 作为林分初始株数的约束条件, 长白落叶松造林密度<sup>[35-36]</sup>或初植

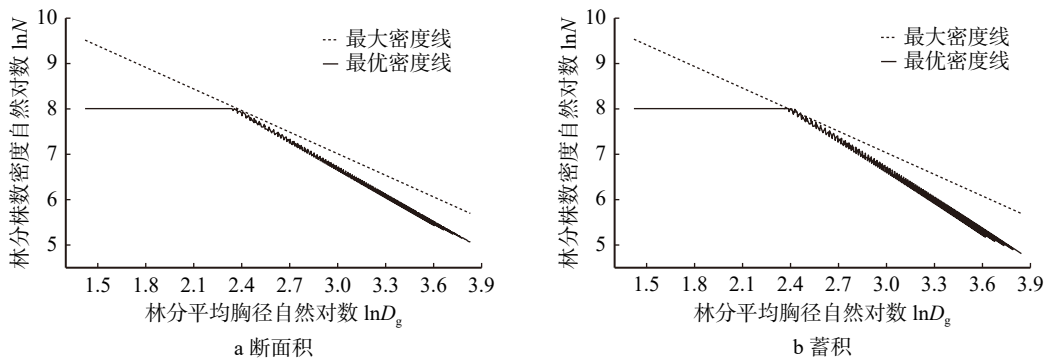


图 4 最大密度线与潜在生产力最优密度线

Fig. 4 Maximum density line and optimal density line for potential productivity

密度<sup>[37]</sup>一般为2 500~3 330 株/hm<sup>2</sup>。

就立地质量而言,立地质量好的林分断面积和蓄积潜在生产力均高于立地质量差的林分,但其生产力相对可提升空间均低于立地质量差的林分,这与以往研究结果一致<sup>[20]</sup>。因此,样地数量最多的中等立地质量林分是森林经营过程中需要重视的对象。在不同林分发育阶段,中幼龄林长白落叶松的断面积和蓄积潜在生产力较近熟、成熟、过熟龄林分更高<sup>[17-18]</sup>,生产力可提升空间也存在类似的变化趋势,与以往研究一致。以立地等级3为例,林分年龄为20 a的蓄积潜在生产力对应的最优林分密度指数为1 087 株/hm<sup>2</sup>,而本研究中对应样地的林分密度指数(137~878 株/hm<sup>2</sup>)均小于该值。因此,在林分幼龄阶段,应该采取适当的补植措施并做好防护,增加森林生长量和现存量,有效提高其现实生产力,减少可提升空间。

固定林分初始株数最大值为3 000 株/hm<sup>2</sup>后,发现中幼龄林阶段断面积和蓄积潜在生产力的最优林分密度均小于或等于林分自然稀疏的最大密度,表明林分受自然稀疏的影响较小(图4)。设定基准年龄30 a( $\ln D_g \approx 2.7$ )时,最优密度均远小于林分自然稀疏的最大密度,且此时林分生长已经处于相对稳定期。除林分密度外,林分结构<sup>[38-40]</sup>对森林生长也有重要影响,下一步可考虑优化林分直径结构或树高结构等,以进一步完善该方法。

## 6 结 论

本研究基于Richards公式,采用GADA法建立了吉林省长白落叶松林分优势高生长模型,将落叶松人工林样地划分为5个立地等级。利用哑变量方法建立含5个立地等级的断面积、蓄积生长模型,基于模型参数估计值,约束林分初始株数,利用黄金分割法迭代搜索得到最优密度和更符合林业实际的潜在生产力。分别求出林分断面积和蓄积潜在生产力对应的最优密度,为不同经营目标提供参考依据。

此外,本研究还比较了最大密度线和潜在生产力对应的最优密度的关系,验证了基于潜在生长量的立地质量评价方法的有效性。同时,研究发现中幼龄时期林分的生产力可提升空间较大。因此,应该加强对中幼龄林的抚育管理,以提高其生产力。

### 参 考 文 献

[1] 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.

[2] 高若楠,谢阳生,雷相东,等.基于随机森林模型的自然林立地生产力预测研究[J].中南林业科技大学学报,2019,39(4):39-46.  
Gao R N, Xie Y S, Lei X D, et al. Study on prediction of natural forest productivity based on random forest model[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(4): 39-46.

[3] 郭艳荣,吴保国,刘洋,等.立地质量评价研究进展[J].世界林业研究,2012,25(5):47-52.  
Guo Y R, Wu B G, Liu Y, et al. Research progress of site quality evaluation[J]. World Forestry Research, 2012, 25(5): 47-52.

[4] 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.

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

[6] 徐罗,亢新刚,郭韦韦,等.天然云冷杉针阔混交林立地质量评价[J].北京林业大学学报,2016,38(5):11-22.  
Xu L, Kang X G, Guo W W, et al. Site quality evaluation of natural spruce-fir and broadleaf mixed stands[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(5): 11-22.

[7] Vander Yacht A L, Kobe R K, Walters M B. Hardwood regeneration in red pine plantations: thinning and site quality effects on changes in density and species composition from edges to interiors[J/OL]. Forest Ecology and Management, 2022, 526: 120576[2024-03-11]. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120576>.

[8] Pan X, Sun S C, Hua W P, et al. Predicting the stand growth and yield of mixed Chinese fir forests based on their site quality, stand density, and species composition[J/OL]. Forests, 2023, 14(12): 2315[2024-03-08]. <https://doi.org/10.3390/f14122315>.

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

[10] Kitikidou K, Petrou P, Milios E. Dominant height growth and site index curves for Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) in central Cyprus[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(2): 1323-1329.

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

[12] 牛亦龙,董利虎,李凤日.基于广义代数差分法的长白落叶松人工林地位指数模型[J].北京林业大学学报,2020,42(2):9-18.  
Niu Y L, Dong L H, Li F R. Site index model for *Larix olgensis* plantation based on generalized algebraic difference approach derivation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(2):

- 9–18.
- [13] 黄国胜, 马炜, 王雪军, 等. 基于一类清查数据的福建省立地质量评价技术 [J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(3): 1–8.  
Huang G S, Ma W, Wang X J, et al. Forestland site quality evaluation of Fujian Province based on continuous forest inventory data[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(3): 1–8.
- [14] 沈剑波, 雷相东, 雷渊才, 等. 长白落叶松人工林地位指数及立地形的比较研究 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(6): 1–8.  
Shen J B, Lei X D, Lei Y C, et al. Comparison between site index and site form for site quality evaluation of *Larix olgensis* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(6): 1–8.
- [15] Do H T T, Zimmer H C, Vanclay J K, et al. Site form classification: a practical tool for guiding site-specific tropical forest landscape restoration and management[J]. Forestry, 2022, 95(2): 261–273.
- [16] Castaño-Santamaría J, López-Sánchez C A, Obeso J R, et al. Development of a site form equation for predicting and mapping site quality. a case study of unmanaged beech forests in the Cantabrian Range (NW Spain)[J/OL]. Forest Ecology and Management, 2023, 529: 120711[2024-03-05]. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120711>.
- [17] 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.
- [18] Fu L Y, Sharma R P, Zhu G Y, et al. A basal area increment-based approach of site productivity evaluation for multi-aged and mixed forests[J/OL]. Forests, 2017, 8(4): 119[2024-03-12]. <https://doi.org/10.3390/f8040119>.
- [19] Liu X Z, Duan G S, Chhin S, et al. Evaluation of potential versus realized site productivity of *Larix principis-rupprechtii* plantations across northern China[J/OL]. Forest Ecology and Management, 2021, 479: 118608[2024-03-13]. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118608>.
- [20] 段光爽, 郑亚丽, 洪亮, 等. 基于潜在生产力的华北落叶松纯林和白桦山杨混交林立地质量评价 [J]. 林业科学, 2022, 58(10): 1–9.  
Duan G S, Zheng Y L, Hong L, et al. A potential productivity-based approach of site quality evaluation for larch pure forest and birch-aspen mixed forest[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(10): 1–9.
- [21] Yan X R, Feng L Y, Sharma R P, et al. Evaluating forest site quality using the biomass potential productivity approach[J/OL]. Forests, 2024, 15(1): 23[2024-03-17]. <https://doi.org/10.3390/f15010023>.
- [22] Zang H, Lei X D, Zeng W S. Height-diameter equations for larch plantations in northern and northeastern China: a comparison of the mixed-effects, quantile regression and generalized additive models[J]. Forestry, 2016, 89(4): 434–445.
- [23] Reineke L. Perfecting a stand-density index for even-aged forests[J]. Journal of Agriculture Research, 1933, 46(7): 627–638.
- [24] 雷相东, 唐守正, 符利勇, 等. 森林立地质量定量评价: 理论方法应用 [M]. 第1版. 北京: 中国林业出版社, 2020.  
Lei X D, Tang S Z, Fu L Y, et al. Quantitative evaluation of forest site quality: theory, method, application[M]. 1st ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2020.
- [25] Fu L Y, Liu S R, Tang S Z, et al. Forestat: forest carbon sequestration and potential productivity calculation [EB/OL]. (2023–10–10) [2024–04–06]. <https://cran.r-project.org/package=forestat>.
- [26] 全国森林资源标准化技术委员会. 地位指数表编制技术规程: LY/T 2415—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.  
Forest Resources. Technical regulations for drafting of site index table: LY/T 2415—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [27] 唐守正. 广西大青山马尾松全林整体生长模型及其应用 [J]. 林业科学研究, 1991, 4(增刊): 8–13.  
Tang S Z. Establishment and application of an integrated stand growth model of masson pine in Daqingshan[J]. Forest Research, 1991, 4(Suppl.): 8–13.
- [28] Elzhov T, Mullen K M, Spiess A, et al. Minpack.lm: R interface to the Levenberg-Marquardt nonlinear least-squares algorithm found in MINPACK, plus support for bounds[EB/OL]. (2023–09–11)[2023–10–15]. <https://cran.r-project.org/package=minpack.lm>.
- [29] 高慧淋, 董利虎, 李凤日. 基于分位数回归的长白落叶松人工林最大密度线 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3420–3426.  
Gao H L, Dong L H, Li F R. Maximum density-size line for *Larix olgensis* plantations based on quantile regression[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(11): 3420–3426.
- [30] Koirala A, Montes C R, Bullock B P. Modeling dominant height using stand and water balance variables for loblolly pine in the Western Gulf, US[J/OL]. Forest Ecology and Management, 2021, 479: 118610[2024-03-12]. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118610>.
- [31] Scolforo H F, de Castro Neto F, Scolforo J R S, et al. Modeling dominant height growth of eucalyptus plantations with parameters conditioned to climatic variations[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 380: 182–195.
- [32] Diéguez-Aranda U, González J G, Anta M B, et al. Site quality equations for *Pinus sylvestris* L. plantations in Galicia (northwestern Spain)[J]. Annals of Forest Science, 2005, 62(2): 143–152.
- [33] 尹明宇, 吴波, 乌云塔娜, 等. 初植密度对科尔沁沙地樟子松人工林生长和健康状况及土壤化学性质的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(7): 1–11.  
Yin M Y, Wu B, Wuyun T N, et al. Effects of initial planting

- density on growth, health status and soil chemical properties of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Sciences Edition), 2024, 52(7): 1–11.
- [34] Torita H, Masaka K. Influence of planting density and thinning on timber productivity and resistance to wind damage in Japanese larch (*Larix kaempferi*) forests[J/OL]. Journal of Environmental Management, 2020, 268: 110298[2024-03-13]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110298>.
- [35] 邵英男, 田松岩, 刘延坤, 等. 密度调控对长白落叶松人工林土壤呼吸的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(6): 51–59.
- Shao Y N, Tian S Y, Liu Y K, et al. Effects of density control on soil respiration in *Larix olgensis* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(6): 51–59.
- [36] 宋磊, 金星姬, Pukkala T, 等. 长白落叶松人工林多目标经营模式研究 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2023, 47(2): 150–158.
- Song L, Jin X J, Pukkala T, et al. Research on multi-objective management schedules of *Larix olgensis* plantations[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(2): 150–158.
- [37] 马炜, 孙玉军. 长白落叶松人工林密度表的编制及应用 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2012, 36(6): 69–75.
- Ma W, Sun Y J. Compilation and application of reasonable density table for plantations of *Larix olgensis* Herry[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2012, 36(6): 69–75.
- [38] 王冬至, 张志东, 牟洪香, 等. 结构方程模型在落叶松林经营中的应用 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(3): 69–75.
- Wang D Z, Zhang Z D, Mu H X, et al. Applications of structural equation model in the management of *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(3): 69–75.
- [39] Fadrique B, Santos-Andrade P, Farfan-Rios W, et al. Reduced tree density and basal area in Andean forests are associated with bamboo dominance[J/OL]. Forest Ecology and Management, 2021, 480: 118648[2024-03-02]. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118648>.
- [40] 林富成, 王维芳, 门秀莉, 等. 兴安落叶松人工林空间结构优化 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(4): 68–76.
- Lin F C, Wang W F, Men X L, et al. Spatial structure optimal of *Larix gmelinii* plantation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(4): 68–76.

(责任编辑 孟瑶 李 契  
责任编辑 惠刚盈)