

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240168

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

周甲敏 刘兆刚 董灵波

(东北林业大学林学院, 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:【目的】立地质量评价是森林经营规划和决策的重要基础。建立林分蓄积生长模型, 引入林分蓄积潜在生产力, 对小兴安岭阔叶混交林进行立地质量评价, 旨在为该地区森林生长收获预测、森林经营规划以及可持续经营提供科学依据。【方法】利用黑龙江省2010—2015年两期连续清查中的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, 划分立地等级, 并计算各立地等级阔叶混交林林分蓄积潜在生产力。结合林分现实生产力及其与蓄积潜在生产力之间的差异, 对当前林龄林分的实际状况和可提升空间进行评价。【结果】(1)小兴安岭阔叶混交林林分蓄积生长模型拟合效果较好, 林分基准年龄(30 a)时, 各立地等级的蓄积潜在生产力范围为 $3.87 \sim 6.10 \text{ m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 阔叶混交林林分平均可提升空间介于 $50.78\% \sim 62.97\%$ 之间, 且随着立地等级的降低而逐渐增大。(2)小兴安岭阔叶混交林林分蓄积潜在生产力随林龄的增大而逐渐减小, 最终趋于平缓。其与现实生产力的差异随林龄的增大而逐渐减小。(3)各林龄林分蓄积潜在生产力和现实生产力均呈现随立地等级降低而下降的趋势, 立地质量中等的林分占总样本量的 77.24% , 且各个立地等级的林分蓄积潜在生产力始终大于现实生产力。【结论】林分蓄积潜在生产力可以作为小兴安岭阔叶混交林立地质量评价的指标。针对小兴安岭阔叶混交林, 各立地等级处于发育初期的林分蓄积潜在生产力比近成熟林的更大, 且林分可提升空间也更大; 随着立地质量的降低, 林分可提升空间逐步扩大。因此, 应根据林分发育时期和立地条件, 采取差异化抚育措施, 且需注重立地质量中等的林分, 优先进行中幼龄林抚育, 提升林分的整体生产力。

关键词: 立地质量评价; 潜在生产力; 现实生产力; 阔叶混交林

中图分类号: S757; S758.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2024)12-0021-09

引文格式: 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 Jiamin, Liu Zhaogang, Dong Lingbo. 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.

Site quality evaluation of broadleaved mixed forest in Xiaoxing'an Mountains of northeastern China based on volume potential productivity

Zhou Jiamin Liu Zhaogang Dong Lingbo

(School of Forestry, Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management of Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: [Objective] Site quality evaluation is an important foundation for forest management planning and decision-making. This article introduces the potential productivity of stand volume by establishing a stand volume growth model to evaluate the site quality of broadleaved mixed forest in the Xiaoxing'an Mountains of northeastern China, providing a scientific basis for predicting forest growth and harvest, forest management planning, and sustainable management in the region. [Method] Using data from the two

收稿日期: 2024-05-31 修回日期: 2024-08-16

基金项目: “十四五”国家重点研发计划(2022YFD2200502)。

第一作者: 周甲敏。主要研究方向: 森林可持续经营。Email: 1564196927@qq.com 地址: 150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路26号东北林业大学林学院。

责任作者: 刘兆刚, 博士, 教授。主要研究方向: 森林可持续经营。Email: lzg19700602@163.com 地址: 同上。

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

consecutive inventory periods of the Xiaoxing'an Mountains broadleaved mixed forest in Heilongjiang Province from 2010 to 2015, a model for average tree height and volume growth of the forest stand was established. Site levels were classified, and potential productivity of each site level for broadleaved mixed forest stands was calculated. We evaluated the actual condition and potential improvement space of the current aged stand based on the difference between actual productivity of the forest and its potential productivity for accumulation. [Result] (1) The fitting effect of volume growth model of broadleaved mixed forest in the Xiaoxing'an Mountains was good, and the range of potential productivity at the baseline age of forest was between 3.87–6.10 m³/(ha·year). The average improvement space of broadleaved mixed forest ranged from 50.78% to 62.97%, and gradually increased with decrease of site level. (2) The potential productivity of broadleaved mixed forest in Xiaoxing'an Mountains gradually decreased with increase of stand age, and eventually tended to flatten out. The difference between realized productivity and the potential productivity gradually decreased with increase of stand age. (3) The potential productivity and realized productivity of each age group showed a decreasing trend with decrease of site grade. Forests with moderate site quality accounted for 77.24% of total sample size, and potential productivity of each site grade was always greater than the realized productivity. [Conclusion] The potential productivity of stand volume can serve as an indicator for site quality evaluation of broadleaved mixed forest in the Xiaoxing'an Mountains. For the broadleaved mixed forest in Xiaoxing'an Mountains, stands at the initial stage of development within various site classes exhibit greater potential productivity of stand volume compared with those nearing maturity, and the potential for improvement in stand productivity is also larger. As site quality decreases, the scope for stand improvement gradually expands. Therefore, differentiated management measures should be adopted based on stand development stage and site conditions, with emphasis on stands of medium site quality. Priority should be given to tending of middle-aged and young forests to enhance overall stand productivity.

Key words: site quality evaluation; potential productivity; realized productivity; broadleaved mixed forest

立地质量是指在特定立地上,既定森林或其他植被类型的生产潜力^[1],这种潜力会随着林分类型的不同而有所差异^[2]。森林立地生产力是立地植物生物量生产潜力的量化指标,包括立地潜在生产力和现实生产力^[2-3]。立地质量与森林生产力在评估应用中有交叉,但二者并不等同^[4]。立地质量的核心在于评估特定森林类型在特定立地上的最大潜在生产力^[5-6]。然而,当前研究主要聚焦于立地的现实生产力,缺乏能够直接反映其潜在生产力的有效指标和方法,这使得现有评价方法难以直接应用于林分生长和收获评估^[2,7]。因此,准确评估立地质量对于优化森林结构、实施适地适树策略以及最大化林分生产潜力至关重要^[8-9]。

立地质量评价一直是国际林业研究的热点领域,众多学者提出了多种评价指标^[10]。20世纪初,德国和美国等发达国家就开始了立地质量评价工作。根据不同国家的生态环境特点,主要发展出了3种评价方法:以地位指数为评价指标的直接评价法、间接评价法和以材积作为评价指标的方法^[11-12]。我国立地质量评价的研究始于20世纪50年代,最初主要采用传统的地位级和立地指数评价方法。近年

来,我国在这一领域的研究迅速发展^[13-14]。林业学者们创新性地将神经网络和遥感技术应用于立地指数模型中,提出以林分生长量和生物量作为指标的评价方法^[15-16]。这些方法都是以林分实际调查数据为基础,反映了林分现实生产力,但在实际森林经营管理过程中,林分会受到人为和各种自然因素的干扰^[2,17],致使林分生产力并未得到充分发挥。因此,仅凭当前生产力来评价立地质量,并不能准确反映其所能达到的最大生产力^[18]。这一认识强调了在立地质量评价时,需综合考虑多种干扰因素^[19-20],并探索更为全面、准确的评价方法和指标,以科学地评估立地的生产潜力和可持续发展能力。

Milner等^[12]提出将林分最大年平均蓄积生长量作为潜在生产力指标,但这一方法并未得到广泛应用。目前针对立地质量评价的研究主要集中于人工林,对于天然次生林立地质量的研究缺少一种较成熟且应用广泛的评价方法^[2,21]。天然次生林是我国森林资源的主体,对其进行立地质量评价是天然次生林恢复和科学经营的重要前提^[22]。为此,雷相东等^[3,18]提出了一种基于潜在生产力的立地质量评价方法,该方法将林分潜在生产力定义为某种确定的林分类型,

在同一立地类型上可能达到的最大年生长量(蓄积、断面积和生物量生长量)一般与林龄有关。以吉林省为例,通过优化林分生长模型中的可控因子,估算了各立地等级的潜在生产力,实现了有林地和宜林地立地质量评价的统一性^[3,23]。此后,许多林业学者也将此方法应用到实际生产中。段光爽等^[24]以华北落叶松(*Larix gmelinii*)和白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)混交林为研究对象,利用 Forstat 软件构建了林分断面积和蓄积生长模型,分析了这两种林分类型在不同立地等级下的断面积和蓄积潜在生产力,并将林分断面积和蓄积潜在生产力作为立地质量评价的指标。刘丹^[25]在吉林省的研究中构建了林分蓄积生长模型,将各立地等级在基准年龄时的蓄积年生长量最大值定义为潜在生产力,并据此编制了各生长过程组的蓄积量潜在生长力总表。该方法已成功应用于小班层面,实现了树种潜在分布和蓄积潜在生产力的定量适地适树评价。

科学评价林地立地质量并预测其生产潜力对于适地适树和森林经营决策至关重要^[25-26]。无论是天然林还是人工林,明晰立地的潜在生产力是制定有针对性的森林经营管理和修复调整措施的前提^[3]。小兴安岭作为我国的重要林区和绿色宝库,随着国家对森林经营和森林质量提升的日益重视,评估其林地生产潜力变得尤为迫切。本文通过建立林分平均高和蓄积生长模型,对小兴安岭地区阔叶混交林进行立地等级的划分,并预估其林分蓄积的潜在生产力。以基准年龄时的蓄积生产潜力作为立地质量评价指标,结合林地的现实生产力,对潜在生产力进行验证,并评估林分的提升空间,从而量化小兴安岭阔叶混交林的生产潜力发挥程度。这将为小兴安岭地区合理利用和科学经营森林,以及天然次生林的修复提供理论基础和实践依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

小兴安岭位于我国黑龙江省的东北部(46°28'~49°21'N, 127°42'~130°14'E)。该地区为丘陵地形,北部多为丘陵台地、宽谷;中部为山势较为平缓的低

山丘陵;南部属于山势险峻的低山地带。小兴安岭属于北温带大陆性季风气候,春秋短暂,夏季炎热多雨,冬季寒冷多雪,具有明显的四季物候变化特征。年平均气温-1~1℃,无霜期 110~125 d,年平均降水量 500~700 mm,雨水较为充沛。该区地带性土壤类型为暗棕壤,少量为草甸土和沼泽土。小兴安岭拥有广袤的天然林,主要优势树种为水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、山杨(*Populus davidiana*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、红松(*Pinus koraiensis*)、云杉(*Picea asperata*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)等。灌木层主要为毛榛子(*Corylus mandshurica*)、刺五加(*Acanthopanax senticossus*)等,草本主要有苔草(*Carex* spp.)、酢浆草(*Oxalis corniculata*)、荨麻(*Urtica fissa*)等。

1.2 数据来源

本研究数据来源于黑龙江省两期(2010—2015年)森林资源连续清查中,小兴安岭地区的 295 块阔叶混交林样地的调查结果。样地面积为 0.06 hm²,林分起源为天然林。统计林分因子(优势树种、林分起源、林分平均年龄和林分平均高)、地形因子(海拔、坡向、坡度和坡位)和土壤因子(土层厚度、枯枝落叶厚度和腐殖质厚度)等。通过异常值筛选,最终使用两期共 536 个观测值用于建模,对应的林分数据统计见表 1。

1.3 研究方法

Fu 等^[7]和雷相东等^[3]提出基于林分潜在生产力的立地质量评价方法。该方法基于一个假设:在同一立地条件下,相同的林分类型(树种组成接近)如果有相近似的林分结构和林分密度,则有近似的生长过程,包括林分平均高生长、断面积生长和蓄积生长。针对特定的林分生长类型及其对应的立地等级,通过构建林分平均高生长模型来区分不同的立地等级,并利用林分蓄积生长模型来评估样地的潜在生产力^[24]。

$$H = f_H(T|F, L) \quad (1)$$

表 1 小兴安岭阔叶混交林林分数据

Tab. 1 Stand data of broadleaved mixed forest in Xiaoxing'an Mountains

指标 Index	蓄积/(m ³ ·hm ⁻²) Volume/(m ³ ·ha ⁻¹)	平均年龄/a Mean age/year	密度指数/(株·hm ⁻²) Density index/(plant·ha ⁻¹)	平均树高 Mean tree height/m
最大值 Max. value	247.11	100	1 974.47	22.8
最小值 Min. value	11.65	15	277.59	6.1
平均值 Mean	112.79	44	1 051.42	13.7
标准差 SD	51.44	15	367.94	3.0

$$M = f_M(T, S | F, L) \quad (2)$$

式中: H 为林分平均高, M 为林分蓄积量, S 为林分密度指数, T 为平均林龄, F, L 示固定的林分类型和立地类型, f_H 为固定林分类型和立地类型关于 T 的林分平均高函数, f_M 为固定林分类型和立地类型关于 S 和 T 的林分蓄积函数。

1.3.1 立地等级划分

以林分平均年龄为自变量, 林分平均高为因变量, 在不考虑样地和各立地因子等条件约束的情况下, 选取 Korf、Richard、Hossfeld、Logistic、Gompertz 5 种曲线拟合林分平均高生长模型^[2](表 2)。利用 Forstat3.0 软件^[27]选择林分平均高最适模型进行拟合, 得到小兴安岭阔叶混交林各地位级导向曲线模型及曲线簇, 确定各样地立地等级。

表 2 林分平均高与平均年龄模型

Tab. 2 Stand average height and average age model

模型 Model	表达式 Expression
Korf	$H = ae^{-bT^{-c}}$
Richard	$H = a(1 - e^{-cT})^b$
Hossfeld	$H = \frac{a}{1 + bT^{-c}}$
Logistic	$H = \frac{a}{1 + be^{-cT}}$
Gompertz	$H = ae^{-be^{-cT}}$

注: H : 林分平均高; T : 林分平均年龄; a, b 和 c 为模型参数。Notes: H : average stand height; T : average stand age; a, b and c are model parameters.

考虑小兴安岭阔叶混交林林分实际状况和应用需求, 将立地划分为 5 个等级 (L), L 取值 1~5, 数值越小表明立地条件越好。

1.3.2 林分蓄积生长模型和参数估计

采用唐守正等^[28-29]模型构建林分蓄积生长模型, 并进行潜在生产力和现实生产力的估算。

$$M = a_L \left(1 - \exp\left(-b' \frac{S}{1000}\right)^{c'} T \right)^{d'}, L = 1, 2, \dots, 5 \quad (3)$$

式中: M 为林分蓄积 (m^3/hm^2); a_L, b', c', d' 为第 L 个立地等级生长模型的估计参数。

由于立地等级不同, 同一林分类型的蓄积生长量可能有所不同。因此, 将立地等级作为哑变量引入林分蓄积生长模型 3(表 3)。

采用决定系数 (R^2) 和均方根误差 (root mean square, RMSE) 评价模型。

1.3.3 林分潜在生产力和现实生产力预估

潜在生产力是指在最佳条件下, 特定林分类型在特定立地类型上可能实现的最大林分蓄积年生长量, 这与林龄密切相关^[3]。根据林分蓄积年生长量达到最大值时的最适林分密度指数, 确定基准年龄时

表 3 哑变量设置

Tab. 3 Dummy variable setting

立地等级 Site class	变量 Variable			
	x	y	z	v
1	0	0	0	0
2	0	0	0	1
3	0	0	1	0
4	0	1	0	0
5	1	0	0	0

注: x, y, z, v 代表哑变量参数, 均通过显著性检验 ($P < 0.05$)。Note: $x, y, z,$ and v represent dummy variable parameters, all of which pass significance test ($P < 0.05$)

林分的潜在生产力。根据实际林龄和最适林分密度指数可进一步确定特定年龄时林分的蓄积潜在生产力。

林分的实际生产力是根据实际林分平均年龄、林分密度指数和立地等级, 利用蓄积生长模型计算出蓄积年生长量^[2,24]。通过比较实际生产力和潜在生产力, 评估林分蓄积年生长量的可提升空间, 从而对现实林分进行评价。

潜在生产力具有稳定性和极大性两个重要特性。稳定性是因为潜在生产力与林分类型、立地类型和林龄紧密相关, 一旦这些因素确定, 潜在生产力也随之固定; 极大性则表示潜在生产力代表了在特定条件下可能达到的最大年生长量, 在良好的林分经营条件下, 现实生产力可以接近甚至达到潜在生产力^[7,24]。

模型构建、参数估计及林分蓄积潜在生产力和现实生产力的预估均在 R 4.3.2 中实现。

2 结果与分析

2.1 基于林分平均高生长模型的立地等级划分

针对小兴安岭阔叶混交林, Korf 模型 R^2 最大, RMSE 最小, 林分平均高拟合结果最好。因此选用 Korf 方程进行立地等级的划分(表 4)。

表 4 阔叶混交林树高曲线拟合

Tab. 4 Fitting of tree height curve for broadleaved mixed forest

模型 Model	拟合精度 Fitting accuracy	
	R^2	RMSE
Korf	0.335 9	2.441 5
Richard	0.333 4	2.445 9
Hossfeld	0.328 4	2.455 2
Logistic	0.335 1	2.442 9
Gompertz	0.330 5	2.451 4

根据样地的平均高分布, 利用 Forstat3.0^[7,27] 选用 Korf 方程将样地分为 5 个立地等级(表 5), 各个立地等级林分平均高生长曲线见图 1。

表 5 地位级指数曲线参数

Tab. 5 Parameters of site class index curves

立地等级 Site class	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1	25.63	7.76	
2	22.82	8.55	
3	20.32	9.33	0.85
4	18.09	10.11	
5	16.11	10.90	

注: *a*、*b*、*c* 对应表 2 的模型参数。Note: *a*, *b*, and *c* correspond to the model parameters in Tab. 2.

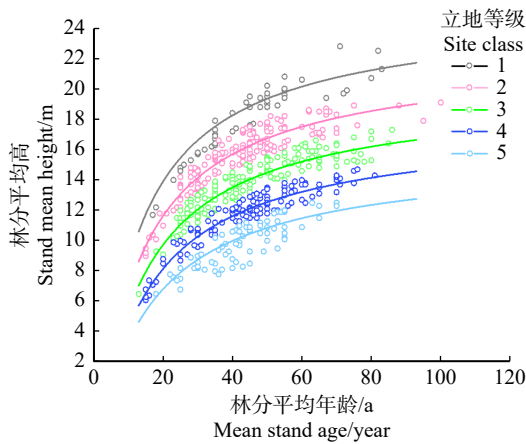


图 1 阔叶混交林 5 个立地等级林分平均高生长曲线

Fig. 1 Average height growth curves of broadleaved mixed forest at 5 site classes

2.2 林分蓄积生长模型参数估计

基于小兴安岭阔叶混交林样地数据, 将立地等级 *L* 作为哑变量引入林分蓄积生长模型(公式 3)的参数 a_L 中, 拟合得到各模型参数的估计值(表 6)。统计分析结果表明, 各参数均具有显著的统计学意义($P < 0.01$)。小兴安岭阔叶混交林林分蓄积基础生

表 6 阔叶混交林不同立地等级林分蓄积生长模型参数估计值

Tab. 6 Parameter estimates for growth model of volume by each site class for broadleaved mixed forest

立地等级 Site class	a_L	b'	c'	d'
1	880.20			
2	803.71			
3	720.70	0.001 7	1.44	0.71
4	637.10			
5	558.80			

注: a_L 、 b' 、 c' 、 d' 为生长模型参数。Notes: a_L , b' , c' , d' are growth model parameters.

长模型的决定系数 R^2 为 0.901 6, 均方根误差 RMSE 为 16.135 8m。引入立地等级作为哑变量后, 模型精度显著提升, 最终林分蓄积生长模型的 R^2 和 RMSE 分别提高至 0.992 1 和 4.560 0 m。

2.3 各立地等级潜在生产力和现实生产力预估

在给定林分密度指数 $30 \sim 3\,000$ 株/hm²^[24] 下, 基于各立地等级和林分蓄积生长模型参数估计值(表 6), 采用袁亚湘黄金分割法^[2-3], 计算小兴安岭阔叶混交林各立地等级不同林龄时的林分蓄积潜在生产力和现实生产力(图 2)。基准年龄为林分生长趋于稳定时的年龄。目前对于混交林基准年龄的确定没有统一的方法^[3], 本文假定阔叶混交林基准年龄为 30 年^[24], 计算基准年龄时各立地等级的林分蓄积潜在生产力和现实生产力, 并以此作为立地质量评价的标准(表 7)。

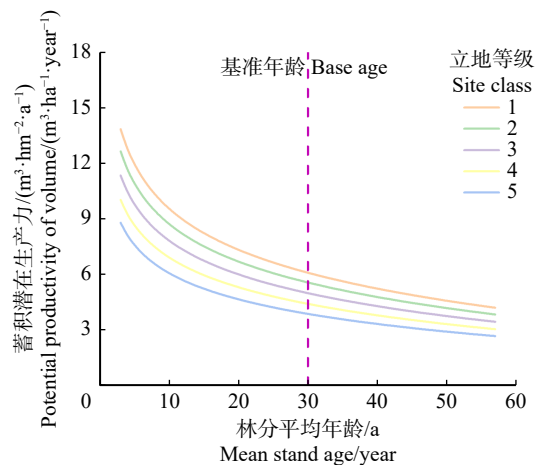


图 2 阔叶混交林 5 个立地等级林分蓄积潜在生产力和现实生产力曲线

Fig. 2 Potential productivity curves of forest volume in five site classes of broadleaved mixed forest

各立地等级的林分蓄积潜在生产力和林龄均呈负相关关系(图 2)。林分发育初期, 蓄积潜在生产力的下降较为陡峭, 随着年龄的增长, 曲线逐渐趋于平缓。这一现象可能与林分发育初期竞争较小、光照和营养等林分生长所需条件充足有关, 这些因素共同促进了林分的良好生长。表 7 表明, 基准年龄 30 a 时, 林分蓄积潜在生产力和相应的蓄积量均随着立地等级降低逐渐减小。立地等级为 1 时, 林分蓄积潜在生产力和蓄积量最大, 分别为 6.10 m³/(hm²·a) 和 294.79 m³/hm²; 立地等级为 5 时, 林分蓄积潜在生产力和蓄积量最小, 分别为 3.87 m³/(hm²·a) 和 187.15 m³/hm²。立地等级 5 的林分潜在生产力和蓄积量仅为等级 1 时的 63.44%, 表明立地等级为 5 时, 该立地生产力和蓄积量存在较大的提升空间。小兴安岭阔叶混交林中, 中等立地质量的样本占总样本量的 77.24%。相对而言, 立地等级最高 1 的样本量仅为 47 块, 占总样本量的 8.77%。因此, 在实际营林过程

表7 基准年龄30年时林分蓄积潜在生产力

Tab. 7 Potential productivity of stand volume at basic age of 30 years

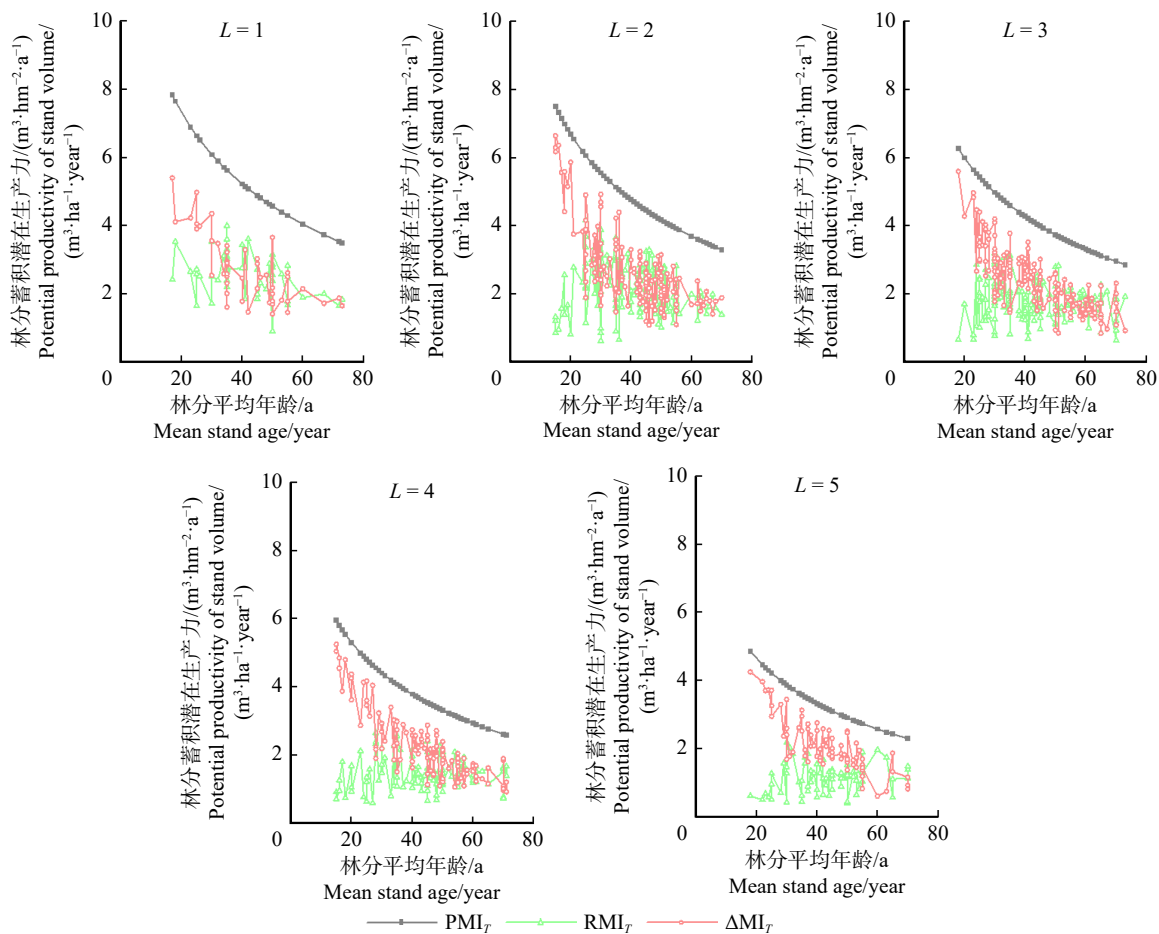
立地等级 Site class	蓄积潜在生产力/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) Potential productivity of volume/($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$)	蓄积量/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) Volume/($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$)	样本量 Sample size
1	6.10	294.79	47
2	5.56	269.17	148
3	4.99	241.37	152
4	4.41	213.37	114
5	3.87	187.15	75

中,应更加注重中等立地质量的林分,以提高森林整体生产力。

2.4 现实林分潜力提升分析

图3表明,各个立地等级的林分蓄积潜在生产力随着年龄的增大逐渐减小,最终趋于平缓,各个立地等级的现实生产力的变化趋势则表现出非一致性。同时,潜在生产力和现实生产力的差异程度呈现出随着林分发育阶段的推进而逐渐减小的趋势。当林分处于中幼龄期时,潜在生产力与现实生产力

之间的差异较大;随着林分逐渐接近成熟,二者之间的差异逐渐减小或趋于接近。图4显示,随着立地等级的降低,林分蓄积提升空间呈现出轻微上升的趋势。提升空间最大的为立地等级5,平均提升空间为62.97%;提升空间最小为立地等级1,平均可提升空间为50.78%。综上所述,对于小兴安岭地区阔叶混交林,立地质量较差的林分立地潜力发挥程度相对较低,其林分蓄积可提升空间相对较大,这是由于立地质量较差的林分现实生产力远低于其潜在生产



L 立地等级。 PMI_T 和 RMI_T 分别为林分平均年龄为 T 时, 林分蓄积潜在生产力和现实生产力, ΔMI_T 为林分平均年龄为 T 时, 林分蓄积年生长量可提升空间。 L , site class. PMI_T and RMI_T represent potential productivity and realized productivity of stand volume at mean stand age T , respectively. ΔMI_T represents space for improving annual growth of stand volume at mean stand age T .

图3 阔叶混交林各立地等级蓄积潜在生产力、现实生产力和林分可提升空间

Fig. 3 Realized productivity, potential productivity of stand volume and their difference by each site class in broadleaved mixed forest

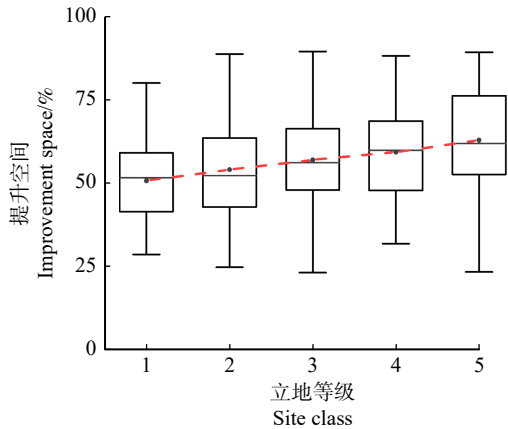


图 4 不同立地等级当前林龄生产力提升空间箱线图

Fig. 4 Box plot of current age productivity improvement space for different site classes

力, 表明有较大的提升空间。在这种情况下, 应考虑森林抚育措施及树种组成的合理性, 适当改变林分结构, 以提高立地潜力。

3 讨 论

3.1 林分蓄积潜在生产力在林业中的应用

根据本文结果可知, 小兴安岭阔叶混交林的林分蓄积潜在生产力均高于现实生产力。这一结果不仅验证了本文蓄积潜在生产力计算的合理性, 还支持了将基准年龄时的林分蓄积潜在生产力作为立地质量评价指标的可行性。该结论与段光爽等^[24]基于林分断面积和蓄积潜在生产力对崇礼区白桦山杨混交林进行立地质量评价的研究结果相一致, 均指出林分的生产潜力尚未得到充分发挥。雷相东等^[3]指出, 林分蓄积潜在生产力及其可提升空间随着年龄的增长而减小, 这一趋势在林分发育初期尤为显著。段光爽等^[24]在对白桦山杨混交林进行立地质量评价时发现, 林分潜在生产力(包括断面积和蓄积)随着立地等级的降低呈现出逐渐减小的趋势, 均与本文研究结论相符。这一现象可以归因于林分在发育初期, 竞争相对较小且所需养分充足, 因此立地质量好的地区能够更充分地发挥林分的生产潜力。

3.2 不同立地与发育时期抚育措施

针对小兴安岭阔叶混交林的不同立地质量, 抚育措施应有所区别。对于立地质量较好的林分, 由于其生产力提升空间有限, 应及早进行抚育间伐, 采用高频次、低强度、短间隔的抚育措施, 以优化林分结构, 提高林分质量, 进而更好地发挥其潜在生产力。而对于立地条件较差的林分, 应调整树种结构或延缓抚育间伐的时间, 选择更适合小兴安岭立地条件的树种, 或采取低频次、高强度、次数少、间隔长期的抚育措施, 以优化林分结构, 提升其生产力。

对于组成树种适宜这种立地条件, 而其他树种不适宜的情况, 则可考虑将这些林分转化为其他林种, 如水土保持林、防风固沙林等, 以发挥其生态效益和社会效益。

同时, 针对不同发育时期的立地, 抚育措施也应有所不同。小兴安岭阔叶混交林的林分蓄积潜在生产力随着林龄的增大呈现出下降的趋势。对于处于中幼林龄的林分, 由于其林分密度小, 光照、养分、空间充足, 竞争较小, 应适当加强管护。对于近成熟林, 应调整林分结构, 适当减小小径级材占比, 增加中等径级材的比例, 以提高林分生产力。小兴安岭阔叶混交林中立地质量最好的样地占比较小, 而立地质量处于中等的样地占比高达 77.24%。这表明, 小兴安岭阔叶混交林有较多的样地立地质量有待提高, 且应更重视立地质量处于中等的样地, 并根据林分发育时期和立地条件, 采取差异化抚育措施, 通过科学合理的抚育管理, 提高林分的整体生产力和健康水平, 从而实现森林资源的可持续经营。

3.3 立地等级划分模型精度差异性分析

本研究基于林分平均高生长模型划分立地等级, 模型决定系数(R^2)为 0.335 9, 拟合精度较低。与沈剑波等^[16]、董灵波等^[30]相关学者^[31-32]构建的林分平均高生长模型具有相似结果; 但与雷相东等^[3]对吉林省进行立地等级划分时构建的模型精度具有较大差别, 这可能与建模数据离散程度、来源或林分类型^[33-34]有关。本文在不引入其他变量的情况下, 采用 Korf 模型作为基础模型, 进行立地等级划分, 为进一步建立适用于小兴安岭阔叶混交林各立地等级的林分蓄积生长模型做铺垫。在后续研究中应考虑引入其他变量, 进一步提高模型精度, 并改进立地等级划分方法。本研究是在假定林分密度不变的前提下进行的, 考虑到本文的研究对象为基准年龄时的阔叶混交林, 此时的林分处于相对稳定期^[24], 因此假定林分密度不变计算林分蓄积潜在生产力的方法是较为可靠的。未来应进一步探究林分自稀疏规律, 并进入生产力计算中, 以完善基于潜在生产力的立地质量评价。

4 结 论

本研究构建不同立地等级的林分蓄积生长模型, 计算各立地等级林分蓄积潜在生产力, 对小兴安岭阔叶混交林进行立地质量评价。结果显示, 基准年龄为 30 a 时, 小兴安岭地区阔叶混交林各立地等级的林分蓄积潜在生产力范围为 3.87 ~ 6.10 $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 且随着立地等级的降低而逐渐减小。立地质量较差的林分生产力可提升空间较大, 林分提升空间最大

的为立地等级 5, 平均提升空间为 62.97%, 提升空间最小的为立地等级 1, 平均可提升空间为 50.78%; 该地区阔叶混交林的林分蓄积潜在生产力均高于现实生产力, 尤其在中幼林龄时期, 这种差异更为显著。随着林龄的增大, 二者之间的差异逐渐减小, 林分可提升空间也有同样的趋势。这表明林分潜在生产力和现实生产力在林分发育初期差异程度更大, 该时期应该加强森林抚育措施, 以提高林分现实生产力, 实现小兴安岭地区天然次生林的可持续经营。

参 考 文 献

- [1] 孟宪宇. 测树学 [M]. 3 版. 北京: 中国林业出版社, 2006.
Meng X Y. Forest mensuration[M]. 3rd ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006.
- [2] 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]. 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]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2020.
- [3] 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.
- [4] 朱光玉, 康立. 森林立地生产力评价指标与方法 [J]. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 275–281.
Zhu G Y, Kang L. A review of forest site productivity evaluation indicators and methods[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(6): 275–281.
- [5] Yang Z H. An NFI-based site quality evaluation of Chinese fir plantation[J]. Journal of Sustainable Forestry, 2020, 39(2): 137–152.
- [6] Skovsgaard J P, Vanclay J K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands[J]. Forestry: An International Journal of Forest Research, 2008, 81(1): 13–31.
- [7] 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[2024-05-12]. <https://doi.org/10.3390/f8040119>.
- [8] 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.
- [9] Costa R A V, Gastón A, Bloszies A S, et al. Nature vs. nurture: drivers of site productivity in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) forests in the southeastern US[J]. Forest Ecology and Management, 2024, 572(8): 122334.
- [10] 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.
- [11] Hemingway H, Kimsey M. Estimating forest productivity using site characteristics, multipoint measures, and a nonparametric approach[J]. Forest Science, 2020, 66(6): 645–652.
- [12] Milner K S, Running S W, Coble D W. A biophysical soil-site model for estimating potential productivity of forested landscapes[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1996, 26(7): 1174–1186.
- [13] 吴菲. 森林立地分类及质量评价研究综述 [J]. 林业科技情报, 2010, 42(1): 12–14.
Wu F. Summarize of forest site classification and quality appraisal[J]. Forestry Science and Technology Information, 2010, 42(1): 12–14.
- [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] 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.
- [16] 沈剑波, 王应宽, 雷相东, 等. 基于 BP 神经网络的广东省针阔混交异龄林立地质量评价 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 38–47.
Shen J B, Wang Y K, Lei X D, et al. Site quality evaluation of uneven-aged mixed coniferous and broadleaved stands in Guangdong Province of southern China based on BP neural network[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 38–47.
- [17] 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.
- [18] 雷相东, 符利勇, 李海奎, 等. 森林立地质量评价技术规程: LY/T 3315-2022[S]. 北京: 国家林业和草原局, 2020.
Lei X D, Fu L Y, Li H K, et al. Technical regulation for forest site quality evaluation: LY/T 3315-2022[S]. Beijing: National Forestry and Grassland Administration, 2020.
- [19] Facundo J O, Cecilia C, Matías G G, et al. Modeling potential site productivity for *Austrocedrus chilensis* trees in northern Patagonia (Argentina)[J/OL]. Forest Ecology and Management, 2022, 524(46): 120525[2024-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120525>.
- [20] Raul V, Duncan J G, Pedro M M, et al. Site quality for mahogany (*Swietenia macrophylla* King) in natural forests in Quintana Roo[J]. Journal of Sustainable Forestry, 2022, 41(1): 33–50.

- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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-aspens mixed forest[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(10): 1-9.
- [25] 刘丹. 基于分布适宜性和潜在生产力的定量适地适树研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2018.
Liu D. Quantitative assessment of matching trees to sites based on both distribution suitability and potential site productivity[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2018.
- [26] Roberto J P, Carola P, Javier J C, et al. Evaluation of the site form as a site productive indicator in temperate uneven-aged multispecies forests in Durango, Mexico[J]. Plants, 2022, 11(20): 2764.
- [27] 唐守正, 郎奎建, 李海奎. 统计和生物数学模型计算: ForStat 教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 343-347.
Tang S Z, Lang K J, Li H K. Computation for statistics and biomathematical models: ForStat course[M]. Beijing: Science Press, 2009: 343-347.
- [28] 唐守正, 李希菲, 孟昭和. 林分生长模型研究的进展 [J]. 林业科学研究, 1993, 6(6): 672-679.
Tang S Z, Li X F, Meng Z H. The development of studies on stand growth models[J]. Forest Research, 1993, 6(6): 672-679.
- [29] 唐守正, 李希菲. 用全林整体模型计算林分纯生长量的方法及精度分析 [J]. 林业科学研究, 1995, 8(5): 471-476.
Tang S Z, Li X F. Precision analysis on growth rates estimated by integrated whole stand growth and yield model[J]. Forest Research, 1995, 8(5): 471-476.
- [30] 董灵波, 邵威威, 田栋元, 等. 基于林木分级的大兴安岭天然兴安落叶松树高曲线研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(5): 88-96.
Dong L B, Shao W W, Tian D Y, et al. Height curve of natural *Larix gmelinii* in the Daxing'anling Mountains of northeastern China based on forest classification[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(5): 88-96.
- [31] 王鹤智. 东北林区林分生长动态模拟系统的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
Wang H Z. Dynamic simulating system for stand growth of forests in Northeast China[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [32] 刘鑫. 长白山天然云冷杉针阔混交林立地质量评价研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
Liu X. Evaluation of site quality in the natural spruce-fir mixed forests of Changbai Mountains[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [33] 宋长江. 帽儿山实验林场天然次生林立地质量综合评价 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
Song C J. Comprehensive evaluation of natural secondary forest site quality in Maoershan Experimental Forest Farm[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023.
- [34] Hua W P, Pan X, Zhu D H, et al. Developing growth and harvest prediction models for mixed coniferous and broad-leaved forests at different ages[J/OL]. Forests, 2023, 14(7): 1416[2024-05-12]. <https://doi.org/10.3390/f14071416>.

(责任编辑 孟瑶 李 契
责任编辑 惠刚盈)