

DOI: 10.20103/j.stxb.202407021537

王成雨, 扶欣然, 李佳怡, 梁瑞婷, 文毅, 孙玉军, 王轶夫, 陈玲. 基于 3-PGmix 模拟杉木人工林轮伐期和间伐措施对蓄积量的影响. 生态学报, 2025, 45(6): 2780-2797.

Wang C Y, Fu X R, Li J Y, Liang R T, Wen Y, Sun Y J, Wang Y F, Chen L. Effects of thinning measures on rotation period and stock volume of *Cunninghamia lanceolata* plantations based on 3-PGmix simulations. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(6): 2780-2797.

基于 3-PGmix 模拟杉木人工林轮伐期和间伐措施对蓄积量的影响

王成雨, 扶欣然, 李佳怡, 梁瑞婷, 文毅, 孙玉军, 王轶夫, 陈玲*

北京林业大学森林资源和环境管理国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083

摘要: 我国杉木人工林的轮伐期按其经营规程是 25—30 年, 然而多代轮作后立地条件有所改变, 有必要针对不同立地条件采用不同的间伐措施, 合理调整轮伐期, 以期获得最高的林分蓄积量。以江西省吉水县和福田县杉木人工林为研究对象, 基于 3-PGmix 生长过程模型, 设定了四类不同的立地等级 (I、II、III、IV), 两次间伐 (第一次设为第 10 年; 第二次分别设为第 15 年的短间隔间伐和第 20 年的长间隔间伐) 以及三种间伐强度 (轻度 10%、中度 20% 和重度 30%), 通过模拟和比较林分年平均最大生长量以及蓄积量, 获得不同立地条件下相应合理的间伐措施以及轮伐期。结果表明: (1) 在不同的立地等级下, 林分年平均最大生长量表现出明显差异, 在 I 类立地等级下高达 $25.09\text{m}^3/\text{hm}^2$, 而 IV 类立地等级下仅为 $8.6\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。(2) 未间伐林地在四类立地等级下对应的最优轮伐期分别为 17.7 年、18.7 年、21.6 年和 25.4 年, 且与林地蓄积量表现出协同性, 即林分蓄积量随着轮伐期的增加而减小。而间伐林分的轮伐期随立地等级的增加而增大, 随间伐强度的增加而增加。(3) 不同的间伐措施对林地总蓄积量造成的影响在不同的立地条件下表现不同: 从林地蓄积量来看, 长间隔间伐优于短间隔间伐; 对于 I 类和 II 类立地等级的林分最优间伐方案是初次和二次间伐分别为 20% 和 30%, III 类立地等级的林分最优间伐方案是初次和二次间伐分别为 10% 和 20%; 最优间伐方案下, 将此类立地等级对应的最优轮伐期依次设为 28.5 年、29.4 年和 30.9 年时, 可将林分总蓄积量最大化。对于 IV 类立地等级的林地, 应优先考虑改良土壤肥力。本研究的模拟结果能为不同立地条件下的杉木人工林间伐措施以及轮伐期的合理调整提供参考意见, 从而助力我国杉木人工林的精细化经营以及森林质量精准提升。

关键词: 3-PGmix 过程模型; 杉木人工林; 立地等级; 间伐措施; 轮伐期; 蓄积量

Effects of thinning measures on rotation period and stock volume of *Cunninghamia lanceolata* plantations based on 3-PGmix simulations

WANG Chengyu, FU Xinran, LI Jiayi, LIANG Ruiting, WEN Yi, SUN Yujun, WANG Yifu, CHEN Ling*

State Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources and Environmental Management, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The rotation period for *Cunninghamia lanceolata* plantations is set at 25—30 years according to its forest management guidelines. However, subsequent rotations have altered site conditions. Therefore, it is necessary to adopt different thinning measures and rotation periods for various site conditions, in order to optimize the growth rate and stock volume. This study employs the process-based growth model 3-PGmix, categorizing four site quality levels (I, II, III, IV) and simulating two times of thinning (the first at year 10; the second at either year 15 for short interval thinning or year 20 for long interval thinning) with three thinning intensities (light at 10%, moderate at 20%, and heavy at 30%) for

基金项目: 江西省林业局科技创新专项 (202133)

收稿日期: 2024-07-02; 网络出版日期: 2024-12-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenling_2012@bjfu.edu.cn

Cunninghamia lanceolata plantations in Jinshui and Futian county of Jiangxi province, to identify appropriate thinning measures and rotation periods for different site conditions by comparing the annual maximum growth rate and stock volume of stands. The results showed that: (1) There are significant differences in the annual maximum average growth rate among the different site quality levels, with the highest being $25.09 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ under site condition I, and the lowest being $8.6 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ under site condition IV. (2) The optimal rotation periods for the four site quality levels of unthinning forest stand are 17.7 years, 18.7 years, 21.6 years, and 25.4 years, respectively, and the stand stock volume decreased with the increase of rotation period. The rotation period of thinning stands decreased with the increase of site grade and increased with the increase of thinning intensity. (3) The effects of different thinning measures on forest stock are different under different site conditions. From maximizing forest stock, long-interval thinning outperforms short-interval thinning. For site quality level I and II, the optimal thinning method is 20% initial thinning and 30% secondary thinning. For site quality level III, it is 10% for the initial thinning and 20% for the secondary. According to the simulated rotation period, the optimal thinning period is 28.5 years, 29.4 years and 30.9 years, which can maximize stock volume. The improvement of soil fertility should be the main concern for the forest stand with site quality level IV. The simulation results of this study can provide valuable reference for adjusting thinning measures and rotation periods under different site quality levels, thereby contributing to the refined forest management and quality improvement of *Cunninghamia lanceolata* plantations in China.

Key Words: 3-PGmix model; *Cunninghamia lanceolata*; site quality levels; thinning measures; rotation period; stock volume

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)作为我国南方地区特有且广泛分布的速生丰产商品用材树种之一,其种植面积超过我国人工林总面积的 25%^[1],其提供的木材在我国基础设施建设、建材和家居等各方面均起着举足轻重的作用^[2],因此,如何提高杉木蓄积量已成为人工林经营领域面临的重要课题。大量研究已经证明,通过改良立地条件和采取合理的经营措施可以有效地提高林地蓄积量^[3-4],其中,间伐措施和轮伐期的制定作为提高人工林蓄积量的森林经营措施,已被广泛应用并取得了显著的成果^[5-7]。按照经营规程,我国杉木人工林的轮伐期是 25—30 年^[8],不同立地条件的林分势必有不同的轮伐期。因此,针对不同立地条件采用不同的间伐措施,合理调整轮伐期,则有望提升杉木人工林的林分蓄积量。

在杉木人工林的间伐方面,已有研究人员提出适度的间伐措施可以改善林地环境和提高林地蓄积量^[9-10]。但现阶段关于如何获取合理经营措施的研究,主要集中在设置对照样地,在相近立地等级的样地上采取不同的间伐措施,对林木生长进行长期监测的方式^[10-11]。近些年来,使用模型来探究森林间伐逐渐成为一种趋势,相较于传统样地调查不仅可以减少对环境的破坏、避免森林小环境对实验的干扰,而且也解决了周期长、成本高等问题^[12-13]。如 Liu 等基于过程模型 Biome-BGCMuSo 模拟了在未来气候条件下,不同强度的间伐措施对森林碳汇的影响^[14];解雅琳使用 3-PGmix 模型探究了不同间伐措施在未来气候变化条件下对落叶松人工林蓄积量的变化情况^[15];李佳怡等使用 3-PG 模型探究了间伐对于生物量的影响^[16],但尚未发现使用模型并考虑立地等级来探究间伐对于林分生长影响的研究。

林分轮伐期的研究,一般需要通过数十年时间尺度上的长期监测数据,根据其年轮条或对伐倒木进行树木解析来获取林木年轮数据^[17-18]。霍常富等人利用 Schumacher 多元回归模型,证明了杉木人工林蓄积量与轮伐期存在协同关系^[19],储安婷等基于 Faustmann-Hartman 模型,分析了林业碳汇对我国人工林最优轮伐期的影响^[20],丁伟林等使用 4 种理论生长方程对最优轮伐期进行探究,发现 Logistic 模型模拟的轮伐期效果最佳^[18],但是这些统计模型的创建仍需要大量的样地监测数据,这也是模型难以推广的主要原因。目前,利用有限的地面监测数据,基于树木生理生长过程模型研究林分间伐措施与轮伐期对林分蓄积量影响的研究,还鲜有报道。

鉴于此,本研究通过使用 3-PGmix 生长过程模型,结合 39 块样地数据,综合考虑林地轮伐期和间伐措施,

探究江西省杉木人工林不同立地条件对林地蓄积量的影响,以期获取不同立地条件下合理的杉木人工林经营措施,从而进一步提高杉木人工林的蓄积量。

1 研究区概况

1.1 研究区概况

选取的杉木人工林样地位于江西省吉安市安福县和吉水县(26°52'N—27°36'N, 114°38'—115°36'E, 图 1),以丘陵为主,海拔多在 900m 以下。属亚热带区域,气候温和,雨量充沛,光照充足,四季分明,具有东亚季风湿润气候特征。年日照时数为 1578.8h,年平均气温为 18.5℃,年极端最高气温为 37.9℃,年极端最低温度为 -0.4℃,年平均降水量为 1617.9mm。研究区内除了杉木,还包括马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、木荷(*Schima superba* Gardner & Champ)、湿地松(*Pinus elliotii* Engelm)、苦槠(*Castanopsis sclerophylla* (Lindl.) Schottky)等。

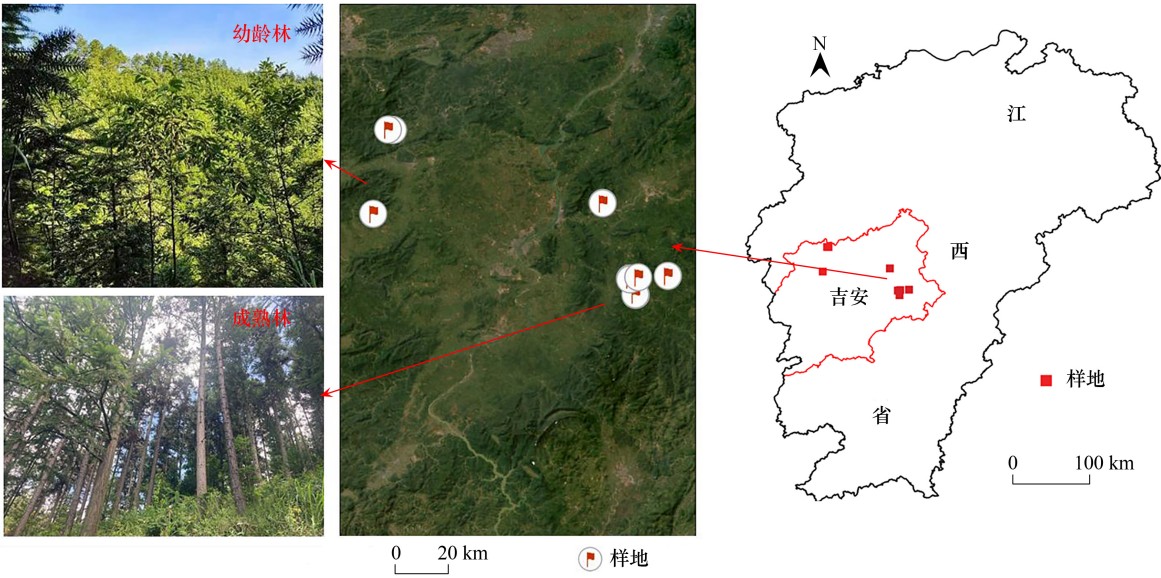


图 1 研究区位置示意图
Fig.1 Sketch map of the location of study area

1.2 数据收集与处理

1.2.1 样地调查数据

本研究以杉木人工林为研究对象,数据分别采集于 2022 年 8 月和 2023 年 7 月。在研究区设置并调查了 39 块杉木人工林固定样地,其中中龄林样地 18 块,近成熟林和幼龄林样地各 9 块,成熟林样地 3 块,样地大小为 20m×30m。样地调查因子包括平均胸径、平均树高,样地平均木和优势木的年轮条,样木调查因子包括胸径、树高、单木位置和冠幅等,并记录样地经纬度、海拔、坡度、坡向和土壤类型等因子。样地信息如表 1 所示。

表 1 样地林分变量信息统计
Table 1 Stand variable information of sample plots

类型 Type	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	标准差 Standard deviation
林木年龄 Stand age/a	16.6	32	7	7
林木胸径 Tree diameter at breast height/cm	13.2	25	7.1	5.7
林木高 Height of stand/m	10.9	19.2	5.1	4.9
林分蓄积 Stand volume/(m ³ /hm ²)	210.4	425.5	53	116.2
林分总生物量 Total stand biomass/(t/hm ²)	93.5	192.6	27.3	46.8

1.2.2 气候数据

本研究中 3-PGmix 模型所需的气象数据来自两个数据源,其中 ClimateAP (<https://climateap.net/china.aspx>) 提供的 1991—2020 年气象数据,包括月均最高温、月均最低温、月降雨量、月降水日数、霜冻日数;大气 CO₂ 浓度数据来自 NASA (<https://gml.noaa.gov/dv/site/>) 的地球观测系统提供基于卫星的二氧化碳浓度数据和全球碳循环的研究成果;辐射量由 3-PGmix 模型提供的工具包计算得到,如表 2 所示。

表 2 研究区 1990—2020 年气象数据均值

Table 2 Mean meteorological data of the study area from 1990 to 2020

月份 Month	月降雨量 Monthly precipitation/mm	月降水日数 Monthly rain days/d	月均最高温 Monthly average maximum temperature/°C	月均最低温 Monthly average minimum temperature/°C	太阳辐射量 Solar radiation/ (MJ m ⁻² d ⁻¹)	霜冻日数 Frost days/d
1	73	18.4	10.7	3.9	8.8	3
2	96	11.2	13.3	5.9	13.0	2
3	169	19.7	17.5	9.7	19.0	1
4	201	18	23.5	15.3	25.1	0
5	222	16.7	28.1	19.8	29.3	0
6	264	18.3	30.9	23.2	30.6	0
7	150	11.5	34.4	25.5	30.7	0
8	151	8.3	33.9	24.8	27.5	0
9	77	7.3	30.3	21.7	22.0	0
10	60	11.8	25.3	16.1	16.1	0
11	77	14.5	19.4	10.5	10.9	1
12	54	14.5	13.4	5.1	8.4	2

1.2.3 生物量和蓄积量估算

本研究根据样地调查数据分别计算出生物量和蓄积量,作为 3-PGmix 模型参数定标的依据。根据杉木立木生物量模型及碳计量参数行业标准^[21],选用二元模型计算杉木单株的地上(树干、树皮、树枝、树叶)和地下(树根)生物量,杉木的材积模型采用曾伟生杉木相容性立木材积表系列模型构建的二元材积模型^[22]。计算公式如下:

$$\begin{cases} M_A = 0.032718D^{2.11093}H^{0.60212} & D \geq 5\text{cm} \\ M_A = 0.173824D^{1.07322}H^{0.60212} & D < 5\text{cm} \end{cases}$$

$$M_1 = \frac{1}{1+g_1+g_2+g_3} \times M_A$$

$$M_2 = \frac{g_1}{1+g_1+g_2+g_3} \times M_A$$

$$M_3 = \frac{g_2}{1+g_1+g_2+g_3} \times M_A$$

$$M_4 = \frac{g_3}{1+g_1+g_2+g_3} \times M_A$$

$$g_i = a_{i_0} D^{a_{i_1}} H^{a_{i_2}}$$

式中, M_A 为生物量估计值; D 为胸径; H 为树高; M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 分别为树干、树皮、树枝、树叶的生物量; g_1 、 g_2 、 g_3 分别表示树皮、树枝、树叶生物量相对于树干生物量为 1 的比例函数, a_{i_0} 、 a_{i_1} 、 a_{i_2} 为比例函数的参数值。

将样地内每株单木材积累加即可得到样地的蓄积量,其中单木材积采用的计算公式如下:

$$V = 0.0000624D^{1.852}H^{1.008}$$

式中, V 表示单木材积(m³), D 为胸径(cm), H 为树高(m)。

2 研究方法

2.1 3-PGmix 模型的参数定标与验证

2.1.1 模型介绍

3-PGmix 模型是目前应用最广泛的过程模型之一,它是以月为时间尺度,林分为空间尺度,同时结合气象因子、立地条件、经营措施、树种特性来预测林分生产力的模型,也是一个考虑实际环境条件的完整森林碳分配与水平衡模型^[23-24];该模型以相对简单的结构体现森林生长的基本过程,其中主要由碳固定模块、生物量分配模块、土壤水分平衡模块三个子模块构成,可以有效模拟林木生长的环境,以及能量在结构上的分配^[25]。本研究通过在工作界面上输入气候、立地数据和林分参数等数据对林分的生长过程进行预测。

2.1.2 3-PGmix 模型的参数估计

3-PGmix 模型的主要参数包括气象参数、立地特征和生理参数,其中立地特征中土壤肥力等级 (Fertility Rating) 是 3-PGmix 模型的一个重要变量,是土壤的营养调节剂,生物量分配的关键因子^[26-27]。研究采取 Sands 提供的经验和校准方法^[28],并采用立地指数 (Site Index) 推导出土壤肥力等级^[29]。立地指数用于度量林地生产力,用给定基龄的优势树平均高度表示。使用基准年龄或参考年龄 (本研究中参考年龄为 25 年),以便对不同立地质量的林分进行比较。最后,利用各样地的立地指数与林分蓄积之间的关系,建立了幂函数方程:

$$FR=0.052\times SI^{0.93} \quad (R^2=0.96) \tag{3}$$

式中,FR 是杉木人工林的土壤肥力等级,取值范围为 0—1;SI 为立地指数,取值范围为 8—22。

在本研究中,根据具体情况采用了以下途径对 3-PGmix 模型进行参数化:(1)样地调查;(2)参考已发表研究中杉木的参数或其它相似树种参数;(3)模型默认值;(4)通过迭代优化参数值,得出最优拟合精度的参数^[30]。通过以上途径,本研究针对杉木人工林对 3-PGmix 模型的 23 个固定参数进行了标定,如表 3 所示。

表 3 杉木人工林 3-PGmix 模型参数

Table 3 Parameters of 3-PGmix model of *Cunninghamia lanceolata* plantations

参数 Parameter	符号 Symbol	值 Value	方法 Method
异速生长关系及分配 Allometric relationships & partitioning			
当胸径为 2cm 的叶干质量比 Foliage:stem partitioning ratio @ D=2 cm	p_2	0.2307	本研究
当胸径为 20cm 的叶干质量比 Foliage:stem partitioning ratio @ D=20 cm	p_{20}	0.1206	本研究
干质量与胸径的关系常数 Constant in the stem mass v. diam. relationship	a_s	0.05	本研究
干质量与胸径的幂指数 Power in the stem mass v. diam. relationship	n_s	2.5263	本研究
NPP 分配到根的最大比例 Maximum fraction of NPP to roots	η_{R_x}	0.6	本研究
NPP 分配到根的最小比例 Minimum fraction of NPP to roots	η_{R_n}	0.138	本研究
脱落物及根周转 Litterfall & root turnover			
最大叶脱落速率 Maximum litterfall rate	γ_{Fx}	0.024	本研究
林龄为 0 时的叶凋落速率 Litterfall rate at t=0	γ_{F0}	0.001	默认值
叶落速率达 1/2 时的年龄 Age at which litterfall rate has median value	$t_{\gamma F}$	48	本研究
月均根周转率 Average monthly root turnover rate	γ_R	0.015	本研究
生长最低温度 Minimum temperature for growth	T_{min}	3.7	参考文献 ^[16]
生长最适温度 Optimum temperature for growth	T_{opt}	17.6	参考文献 ^[16]
生长最高温度 Maximum temperature for growth	T_{max}	34.7	参考文献 ^[16]
霜冻调节 Frost modifier (fFrost)			
每霜冻损失生产力天数 Days production lost per frost day	k_F	0.2	默认值
土壤水分调节 Soil water modifier (fSW)			
f _q =0.5 时水分亏缺率 Moisture ratio deficit for f _q =0.5	c_θ	0.7	默认值
水分亏缺幂指数 Power of moisture ratio deficit	n_θ	9	默认值
大气 CO ₂ 调节 (fCO ₂) Atmospheric CO ₂ modifier (fCO ₂)			
CO ₂ =700ppm 时辅助增强因子 Assimilation enhancement factor at 700 ppm	f_{Ca700}	1.4	本研究
CO ₂ =700ppm 时冠层导度增强因子	f_{cg700}	0.7	本研究
Canopy conductance enhancement factor at 700 ppm			

续表

参数 Parameter	符号 Symbol	值 Value	方法 Method
肥力效应 Fertility effects (fN)			
土壤肥力等级为 0 时 m 的值 Value of m when FR=0	m_0	0.5	参考文献 ^[31]
土壤肥力等级为 0 时'fNufr'的值 Value of fN when FR=0	f_{N0}	0.3	参考文献 ^[31]
(1-FR)对'fNufr'的幂指数 Power of (1-FR) in fN	n_{fN}	1	默认值
林龄调节 Age modifier (fAge)			
最大林龄 Maximum stand age used in age modifier	t_x	50	本研究
相对林龄对 fAge 的幂指数 Power of relative age in function for fAge	n_{age}	4	本研究
fAge=0.5 时的相对林龄 Relative age to give fAge=0.5	r_{age}	0.95	默认值
光截获 Light interception			
冠层吸收光合有效辐射的消光系数 Extinction coefficient for absorption of PAR by canopy	k_H	0.5	默认值
林冠郁闭是年龄 Age at canopy closure	t_c	7.3	本研究
树冠降水蒸发最大比例 Maximum proportion of rainfall evaporated from canopy	I_{Rx}	0.25	默认值
最大降水截留的叶面积指数 LAI for maximum rainfall interception	L_{Lx}	4	默认值
冠层水气压差减少 1/2 时 LAILAI for 50% reduction of VPD in canopy	L_{50D}	5	默认值
生产及呼吸 Production and respiration			
冠层量子效率 Canopy quantum efficiency	α_{Cx}	0.028	参考文献 ^[31]
NPP/GPP 比例 Ratio NPP/GPP	Y	0.47	默认值
胸径树高 Stem height			
茎高关系常数 Constant in the stem height relationship	a_H	36.41	本研究
胸径在茎高关系中的幂指数 Power of DBH in the stem height relationship	n_{HB}	16.18	本研究
竞争在净高关系中的幂指数 Power of competition in the stem height relationship	n_{HC}	0	默认值
茎体积关系中常数 Constant in the stem volume relationship	aH	0.0000639	本研究
茎体积关系中胸径平方与树高乘积的幂指数	$nVBH$	0.948	本研究
Power of DBH ² x height in the stem volume relationship			

D; 树木胸径 Tree diameter at breast height; LAI; 叶面积指数 Leaf area index; VDP; 饱和水气压差 Vapor pressure deficit; NPP; 净初级生产力 Net primary productivity; GPP; 总初级生产力 Gross primary productivity

2.1.3 精度验证

基于样地实地测量数据对 3-PGmix 模型输出数据进行参数定标的精度验证,使用决定系数(R^2)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)、均方根误差(RMSE)和相对均方根误差(RRMSE)为精度评价指标,具体公式如下:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n}$$
$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|}{n}$$
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n}}$$
$$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} \times 100\%$$

(4)

式中, y_i 为第 i 个样地各指标实测数据; $\hat{y}_i$ 为第 i 个样地各指标 3-PGmix 模型预测值; $\bar{y}$ 为样地各指标实测平均值; n 为样地个数。

2.2 样地间伐措施设置

确定最佳轮伐期的方式, 通常取决于样地蓄积量的年最大生产量, 即按照年平均生长量 (mean annual increment) 最大时的年龄来确定轮伐期^[32]。因此, 本研究用年平均生长量曲线的峰值点确定林地的轮伐期。本研究根据江西省杉木实生林地位指数表, 级距两米, 分级年龄是 25 年。根据样地平均树高划分为四个等级, 立地等级 I、II、III、IV 对应的树高范围分别为: 20.9—25.23m、16.56—20.89m、12.22—16.55m、7.88—12.21m。采用 3-PGmix 模型模拟不同间伐措施下不同立地等级 (I、II、III、IV) 林分的生长情况, 将不采取间伐措施的样地蓄积量作为对照组, 并获取不同立地等级的平均轮伐期。

本研究参考了杉木速生丰产林-DB43/T2542—2023、杉木大径阶培育技术规程-LY/T2809—2017 的技术方案^[8,33], 设置三种间伐强度: 轻度间伐 (LT, 10%); 中度间伐 (MT, 20%); 重度间伐 (HT, 30%), 以及无间伐 (NT, 0%)。研究区初始种植密度是根据林地实际种植密度进行设定。研究分别模拟了两次间伐, 第一次间伐时间在初植后第 10 年, 继而分别模拟间伐间隔 5 年 (即初植后第 15 年) 和间伐间隔 10 年 (即初植后第 20 年) 两种情况。将三种间伐强度相互组合, 分别是: LLT、LMT、LHT、MLT、MMT、MHT、HLT、HMT 和 HHT (LLT 表示初次和二次均轻度; LMT 表示初次和二次分别为轻度和中度, 依此类推)。最终, 由无间伐和 9 种间伐设置, 结合 4 个立地等级, 最终组合成 40 种模拟方案。

考虑到林木生长周期长的特征, 研究选取 30 年和 50 年作为时间结点, 两个时间结点可以覆盖杉木生长的不同阶段, 提供全面的生长数据。

3 结果分析

3.1 模型参数定标精度验证

利用随机获取的不同林龄样地数据进行模型的参数标定, 以获取适合研究区杉木人工林生长模拟预测的最优参数。将 39 个样地杉木人工林的平均胸径和树高实测数据, 结合生物量和蓄积量的计算值, 包括 15 个间伐样地的林分信息, 通过统计检验进行定标精度的验证。

从表 4 可以看出, 样地实测值与模型模拟值之间呈现出较强的一致性, 除间伐样地的树高 ($R^2 = 0.68$) 之外, 所有因子的 R^2 都在 0.77—0.98 之间, 尤其是胸径和蓄积的相关性十分显著。各因子的 MRE 均在 17.78%

表 4 模型评估结果

Table 4 Results of model evaluation

精度 Accuracy	统计量 Statistic	R^2	MAE	RMSE	MRE	RRMSE
校正精度 Calibration accuracy	胸径/cm	0.98	0.20	0.29	1.77%	2.30%
	树高/m	0.97	0.36	0.52	3.40%	4.88%
	总生物量/(t/hm ²)	0.90	10.28	14.09	11.02%	15.78%
	蓄积/(m ³ /hm ²)	0.98	4.06	5.73	2.53%	2.94%
验证精度 Validation accuracy	胸径/cm	0.96	0.81	1.18	5.08%	8.06%
	树高/m	0.94	0.93	1.18	8.09%	10.07%
	总生物量/(t/hm ²)	0.77	17.07	23.02	15.50%	22.58%
	蓄积/(m ³ /hm ²)	0.94	24.49	29.59	12.27%	13.39%
间伐样地预测精度 Prediction accuracy of thinning plots	胸径/cm	0.95	0.47	0.70	2.20%	3.53%
	树高/m	0.68	0.91	1.24	5.39%	7.48%
	总生物量/(t/hm ²)	0.91	25.39	26.53	17.78%	18.56%
	蓄积/(m ³ /hm ²)	0.98	4.36	6.41	1.30%	1.96%

R^2 : 决定系数 Coefficient of determination; MAE: 平均绝对误差 Mean absolute error; MRE: 平均相对误差 Mean relative error; RMSE: 均方根误差 Root mean square error; RRMSE: 相对均方根误差 Relative root mean square error

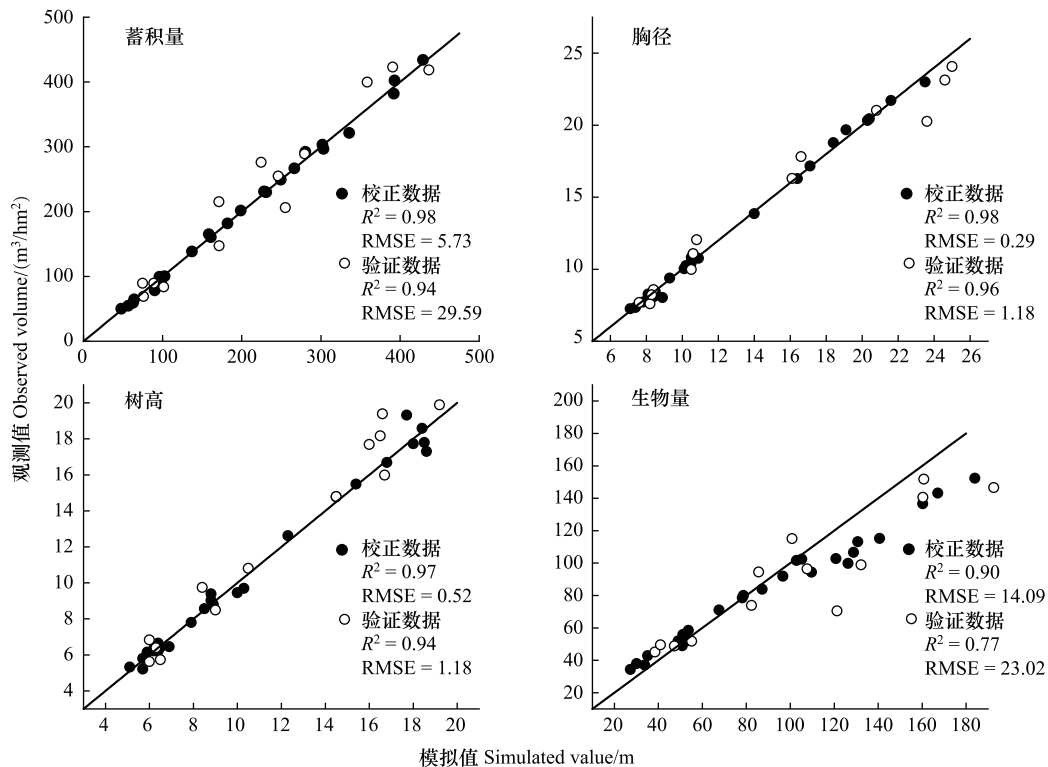


图2 校正和验证数据的实测值与模拟值之间的一致性

Fig.2 The consistency between simulated and observed values for calibration and validation data

R^2 : 决定系数; RMSE: 均方根误差

以内,生物量的 RRMSE 最高为 22.58%。通过数据拟合的结果(图 2),树高的验证值和生物量数据值在 1:1 参考线附近有较大的离散现象,使得 R^2 相对较小。各林分变量的预测值及其变化幅度与样地实测计算值之间基本保持一致,变化趋势相似,故 3-PGmix 模型可用于模拟预测本研究中的亚热带杉木人工林的生长。

3.2 未间伐样地轮伐期与林分蓄积量的关系

林地轮伐期是林地最大年平均生长量对应的生长年份,根据 3-PGmix 模型的模拟结果,确定无间伐措施的林分年平均生长量和不同立地等级下的平均轮伐期(图 3)。结果表明,在四类立地等级下,随着立地等级的降低,平均轮伐期增大,而最大年平均生长量呈现降低的趋势;在四类立地等级林地的平均轮伐期的大小顺序依次为 17.7 年、18.7 年、21.6 年和 25.4 年;其中 I 类立地等级的最大年平均生长量 $25.09\text{m}^3/\text{hm}^2$,IV 类立地等级的最大年平均生长量仅为 $8.6\text{m}^3/\text{hm}^2$,不同立地等级间存在较大的差异。同时,根据样地数据模拟林分蓄积与轮伐期,发现二者之间存在较强的关联性(图 4),轮伐期较小的林地对应较高的林分蓄积量,而较大的轮伐期则对应较小的林分蓄积量,根据线性方程拟合的结果 R^2 为 0.77,MAE 为 $66.3\text{m}^3/\text{hm}^2$,MRE 为 13.3%,表明林分轮伐期和林分蓄积量之间存在较强的相互作用。

3.3 间伐措施与林分蓄积量

在四类不同立地等级中,对照组在 30 年的蓄积量依次为 $654.2\text{m}^3/\text{hm}^2$ 、 $558.3\text{m}^3/\text{hm}^2$ 、 $403.9\text{m}^3/\text{hm}^2$ 和 $251.9\text{m}^3/\text{hm}^2$;在 50 年的蓄积量分别为 $755.7\text{m}^3/\text{hm}^2$ 、 $650.8\text{m}^3/\text{hm}^2$ 、 $477.4\text{m}^3/\text{hm}^2$ 和 $301.1\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。后续间伐措施对林分蓄积的影响分析,均以此为参考进行定量评估。从图 5 可以看出,间伐林分的整体蓄积量低于对照组,不同的立地等级之间存在较大的蓄积量差异。在间伐后的短时间内,杉木的生长速率明显超过未间伐样地,在 I 类、II 类和 III 类中表现的更为明显。在初次间伐强度相同的情况下,蓄积量随着二次间伐强度的增加而减小,在第 30 年与第 50 年,蓄积量的变化呈现出相同的趋势。根据表 5 可知,MMT₅ 与 HHT₅ 是四类立

地等级中,蓄积量减少幅度最大的两种间伐措施(相对减少量接近),但在不同立地等级的减少幅度上存在较大差异。在第30年与第50年的蓄积量的对比中,50年的相对减少幅度出现明显降低。

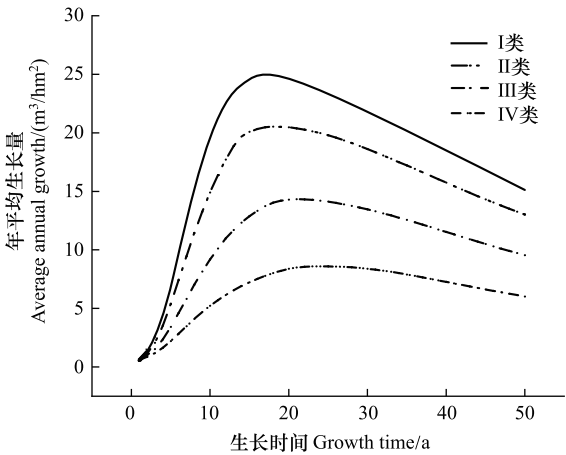


图3 对照组四种立地条件下的年平均生长量

Fig.3 Average annual growth of the control group under four site quality levels

I类:一类立地等级;II:二类立地等级;III:三类立地等级;IV:四类立地等级

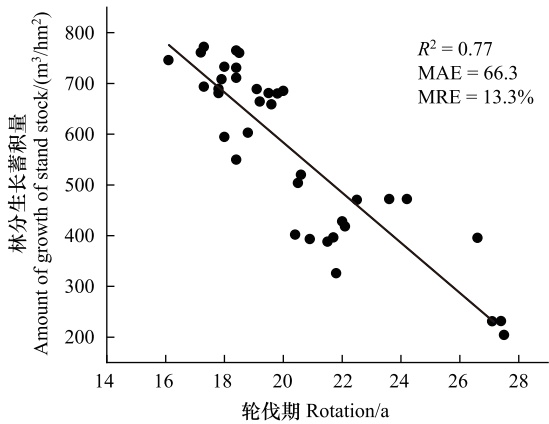


图4 轮伐期与蓄积量的线性关系

Fig.4 Linear relationship between rotation period and stock growth
MAE:平均绝对误差;MRE:平均相对误差

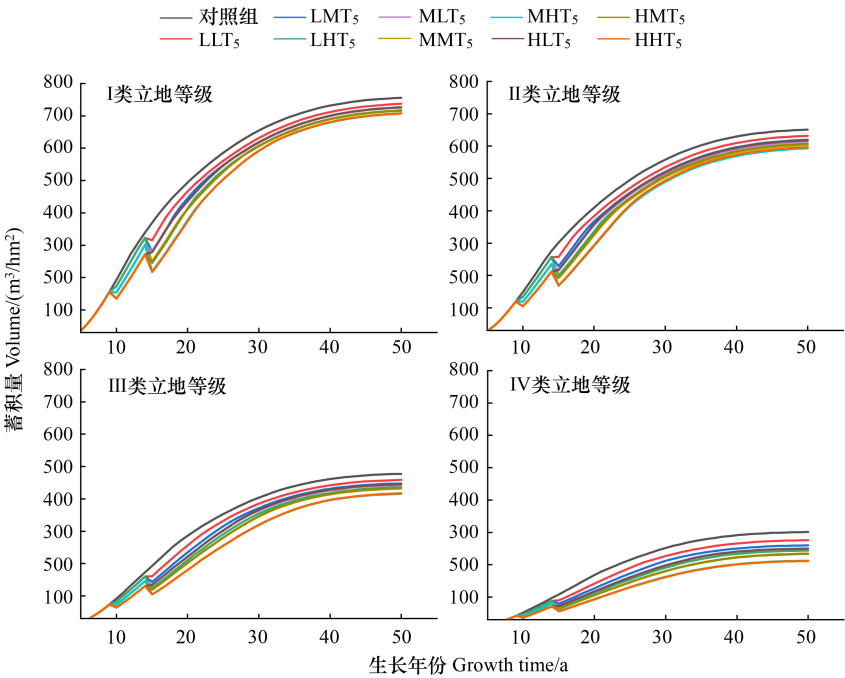


图5 四种立地等级林地在短间隔不同间伐措施下林分立木蓄积量的变化情况

Fig.5 Standing stock volumes under short-interval thinning measures over four site quality levels

LLT₅:初次间伐10%间隔5年后再次间伐10%;LMT₅:初次间伐10%间隔5年后再次间伐20%;LHT₅:初次间伐10%间隔5年后再次间伐30%;MLT₅:初次间伐20%间隔5年后再次间伐10%;MMT₅:初次间伐20%间隔5年后再次间伐20%;MHT₅:初次间伐20%间隔5年后在次间伐30%;HLT₅:初次间伐30%间隔5年后再次间伐10%;HMT₅:初次间伐30%间隔5年后再次间伐20%;HHT₅:初次间伐30%间隔5年后再次间伐30%

表 5 短间隔间伐措施下林分立木蓄积量的相对增量/%
Table 5 Relative increment of stand stock under short-interval thinning measures

年份/a Years	类别 Type	LLT ₅	LMT ₅	LHT ₅	MLT ₅	MMT ₅	MHT ₅	HLT ₅	HMT ₅	HHT ₅
30	I	-3.5	-5.5	-7.4	-5.6	-7.3	-9.6	-5.5	-7.2	-9.5
	II	-4.2	-6.	-9.3	-7.7	-9.7	-12.4	-6.9	-8.9	-11.7
	III	-4.7	-8.0	-12.2	-9.9	-14.5	-21.0	-9.5	-14.3	-20.8
	IV	-10.0	-15.9	-24.3	-21.2	-28.2	-35.5	-21.5	-28.5	-35.7
50	I	-2.4	-3.9	-5.3	-4.0	-5.2	-6.5	-3.9	-5.1	-6.4
	II	-2.9	-4.8	-6.8	-5.5	-7.2	-8.9	-5.0	-6.7	-8.3
	III	-3.9	-6.2	-8.6	-7.2	-9.6	-12.9	-6.7	-9.2	-12.6
	IV	-5.0	-7.7	-11.0	-8.4	-11.3	-14.7	-12.5	-15.5	-19.1

LLT₅:初次间伐 10%间隔 5 年后再次间伐 10% First thinning 10% and again thinning 10% after 5 years; LMT₅:初次间伐 10%间隔 5 年后再次间伐 20% First thinning 10% and again thinning 20% after 5 years; LHT₅:初次间伐 10%间隔 5 年后再次间伐 30% First thinning 10% and again thinning 30% after 5 years; MLT₅:初次间伐 20%间隔 5 年后再次间伐 10% First thinning 20% and again thinning 10% after 5 years; MMT₅:初次间伐 20%间隔 5 年后再次间伐 20% First thinning 20% and again thinning 20% after 5 years; MHT₅:初次间伐 20%间隔 5 年后再次间伐 30% First thinning 20% and again thinning 30% after 5 years; HLT₅:初次间伐 30%间隔 5 年后再次间伐 10% First thinning 30% and again thinning 10% after 5 years; HMT₅:初次间伐 30%间隔 5 年后再次间伐 20% First thinning 30% and again thinning 20% after 5 years; HHT₅:初次间伐 30%间隔 5 年后再次间伐 30% The first 30 First thinning 30% and again thinning 30% after 5 years

对林分总蓄积量进行分析(图 6),在间伐的作用下,IV 类立地等级的林地总蓄积量未出现提高,与未间伐样地相比,总蓄积量为负增长;III 类立地等级的总蓄积量与未间伐样地保持持平状态。根据表 6 可以看出,在四类立地等级中,总蓄积量表现最好的间伐方式为:I 类为 MHT₅、II 类 MHT₅、III 类 LHT₅、IV 类 LLT₅,30 年总蓄积量的相对增量依次为:14.2%、10.6%、3.5%、-4%,50 年总蓄积量的相对增量依次为:14.1%、10.9%、4.6%、-3.3%。可见,50 年较 30 年的总蓄积量相对增量,除 I 类立地等级降低了 0.1%外,其它相对增加量均有所回升。

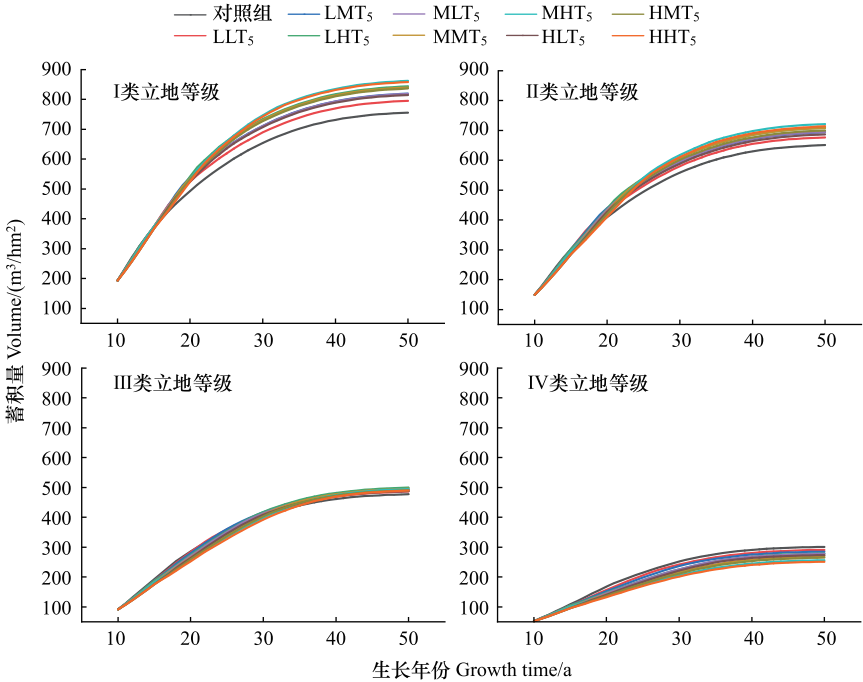


图 6 四种立地等级林地在短间隔不同间伐措施下蓄积总量的变化情况

Fig.6 The total stock volumes under short-interval thinning measures over four site quality levels

表 6 短间隔间伐措施下林分总蓄积量的相对增量/%

Table 6 Relative increment of the total stand stock under short-interval thinning measures

年份/a Years	类别 Type	LLT ₅	LMT ₅	LHT ₅	MLT ₅	MMT ₅	MHT ₅	HLT ₅	HMT ₅	HHT ₅
30	I	5.4	8.7	12.2	8.6	11.7	14.2	8.1	11.1	13.6
	II	3.9	6.4	9.0	6.7	9.0	10.6	5.4	7.7	9.3
	III	2.1	3.3	3.5	2.3	1.4	-1.4	1.0	-0.1	-2.9
	IV	-4.0	-6.0	-10.4	-10.3	-14.1	-18.1	-12.1	-15.9	-20.0
50	I	5.3	8.5	11.7	8.4	11.2	14.1	7.9	10.7	13.6
	II	4.0	6.6	8.9	6.8	8.8	10.9	5.5	7.6	9.7
	III	1.8	3.3	4.6	3.1	3.8	3.6	2.2	2.8	2.5
	IV	-3.3	-5.3	-7.5	-7.9	-10.3	-14.9	-9.2	-11.9	-16.6

如表 7 所示,10 年间隔间伐后的林分,到第 30 年样地蓄积量的减少幅度最高的间伐方案是 HHT₁₀,其中 I 类为 11.6%,II 类为 14.2%,III 类为 24.3%,IV 类为 38.2%;到 50 年样地蓄积量减少幅度的间伐方案也是 HHT₁₀,其中 I 类为 7.9%,II 类为 10.3%,III 类为 15.5%,IV 类为 32.3%。四类立地等级的蓄积量相对于未间伐样地在蓄积量相对较少的趋势上表现出一致性,而且随着间伐强度的增加,这一趋势则更加明显。林分生长到第 50 年时,蓄积的相对减少量较 30 年有所降低。根据林分蓄积量的曲线图可知(图 7),林分在第 10 年第一次间伐后,I 类和 II 类立地等级的林分蓄积增长速度略高于未间伐林分,在二次间伐后,林分蓄积量的增长幅度明显高于未间伐林分,但林分蓄积量始终未超过未间伐林分。III 类和 IV 类林分,在第 10 年的初次间伐之后,林分蓄积量开始降低,直到在 20 年间伐后出现短暂的升高,而后进入相对缓慢的生长期。

表 7 长间隔间伐措施林分蓄积量的相对增量/%

Table 7 Relative increment of stand stock under long interval thinning measures

年份/a Years	类别 Type	LLT ₁₀	LMT ₁₀	LHT ₁₀	MLT ₁₀	MMT ₁₀	MHT ₁₀	HLT ₁₀	HMT ₁₀	HHT ₁₀
30	I	-3.7	-6.0	-8.1	-4.9	-7.2	-9.5	-6.1	-8.3	-11.6
	II	-4.5	-7.4	-10.1	-6.1	-9.0	-12.0	-7.7	-10.6	-14.2
	III	-5.6	-9.7	-15.5	-7.6	-12.3	-19.5	-10.4	-16.7	-24.3
	IV	-11.0	-18.2	-27.4	-15.6	-24.0	-32.6	-22.5	-30.2	-38.2
50	I	-2.7	-4.5	-6.2	-3.6	-5.4	-7.1	-4.4	-6.2	-7.9
	II	-3.3	-5.6	-7.9	-4.4	-6.8	-9.2	-5.7	-8.0	-10.3
	III	-4.7	-7.7	-11.1	-6.0	-9.0	-12.8	-7.5	-10.9	-15.5
	IV	-9.3	-15.4	-21.7	-13.5	-19.1	-26.6	-17.8	-24.3	-32.3

LLT₁₀:初次间伐 10%间隔 10 年后再次间伐 10% First thinning 10% and again thinning 10% after 10 years;LMT₁₀:初次间伐 10%间隔 10 年后再次间伐 20% First thinning 10% and again thinning 20% after 10 years;LHT₁₀:初次间伐 10%间隔 10 年后再次间伐 30% First thinning 10% and again thinning 30% after 10 years;MLT₁₀:初次间伐 20%间隔 10 年后再次间伐 10% First thinning 20% and again thinning 10% after 10 years;MMT₁₀:初次间伐 20%间隔 10 年后再次间伐 20% First thinning 20% and again thinning 20% after 10 years;MHT₁₀:初次间伐 20%间隔 10 年后再次间伐 30% First thinning 20% and again thinning 30% after 10 years;HLT₁₀:初次间伐 30%间隔 10 年后再次间伐 10% First thinning 30% and again thinning 10% after 10 years;HMT₁₀:初次间伐 30%间隔 10 年后再次间伐 20% First thinning 30% and again thinning 20% after 10 years;HHT₁₀:初次间伐 30%间隔 10 年后再次间伐 30% The first 30 First thinning 30% and again thinning 30% after 10 years

从图 8 可以看出,在 I 类、II 类、III 类立地条件下,各类间伐措施随着立地等级的下降,与未间伐样地的总蓄积量的差距逐渐减小。在 IV 类立地条件下,总蓄积量出现负增长。根据表 8 可以看出,在四类立地等级中,第 30 年总蓄积量的相对增量范围在-16.4%—18.4%,其中各类立地等级中表现最好的间伐方式为:I 类 HHT₁₀、II 类 MHT₁₀、III 类 LHT₁₀、IV 类 LLT₁₀,总蓄积量的相对增量依次为:18.4%、14.4%、7.4%、-2.7%;第 50 年总蓄积量的相对增量范围在-14.1%—18.1%,其中各类立地等级表现最好的间伐方式为:I 类 HHT₁₀、II 类

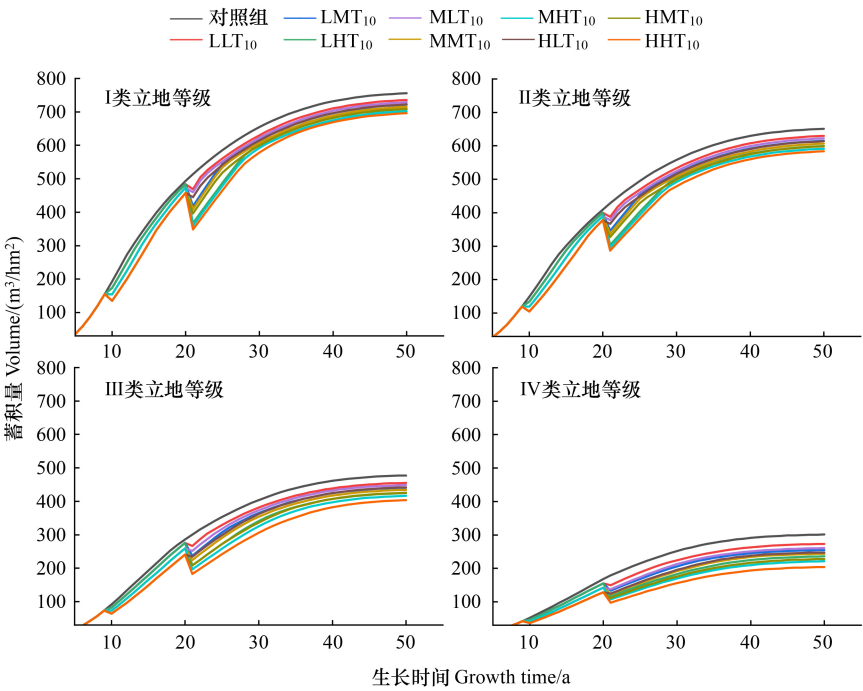


图 7 四种立地等级林地长间隔不同间伐措施下林分立木蓄积量的变化情况

Fig.7 Standing stock volumes under long-interval thinning measures over four site quality levels

LLT₁₀:初次间伐 10%间隔 10 年后再次间伐 10%;LMT₁₀:初次间伐 10%间隔 10 年后再次间伐 20%;LHT₁₀:初次间伐 10%间隔 10 年后再次间伐 30%;MLT₁₀:初次间伐 20%间隔 10 年后再次间伐 10%;MMT₁₀:初次间伐 20%间隔 10 年后再次间伐 20%;MHT₁₀:初次间伐 20%间隔 10 年后再次间伐 30%;HLT₁₀:初次间伐 30%间隔 10 年后再次间伐 10%;HMT₁₀:初次间伐 30%间隔 10 年后再次间伐 20%;HHT₁₀:初次间伐 30%间隔 10 年后再次间伐 30%

HHT₁₀、III 类 LHT₁₀、IV 类 LLT₁₀,总蓄积量的相对增量依次为:18.1%、14.1%、8.3%、-2.3%。可见,相较于 5 年间隔间伐的间伐措施,10 年间隔的间伐措施在总蓄积量上表现出更大的优势。

从林分生长的整个周期来看,在 30—50 年林地蓄积量生长趋于平缓。在 30—50 年之间的 20 年中,四类立地等级的样地的蓄积生长量依次为:101.5m³/hm²、82.5m³/hm²、73.5m³/hm²、49.2m³/hm²,所占比例为 15.5%、16.6%、18.2%、19.5%。样地蓄积量的相对增量在 30—50 年中是随着立地等级的降低而逐渐增加的,这是由于立地条件好的样地,蓄积量的基数较大,从而造成相对增幅较小。对于杉木人工林而言其蓄积生长主要集中在前 30 年。

表 8 长间隔间伐措施林分总蓄积量的相对增量/%

Table 8 Relative increment of the total stand stock under long interval thinning measures

年份/a Years	类别 Type	LLT ₁₀	LMT ₁₀	LHT ₁₀	MLT ₁₀	MMT ₁₀	MHT ₁₀	HLT ₁₀	HMT ₁₀	HHT ₁₀
30	I	6.7	11.9	17.2	8.3	13.2	18.3	9.8	14.6	18.4
	II	5.4	9.7	14.2	6.2	10.4	14.4	7.1	11.0	14.3
	III	3.6	6.3	7.4	3.4	5.2	4.5	2.4	2.2	0.6
	IV	-2.7	-3.6	-6.7	-5.7	-8.4	-11.3	-11.1	-13.7	-16.4
50	I	6.3	10.9	15.6	7.9	12.4	16.9	9.4	13.7	18.1
	II	5.2	9.1	12.9	6.2	9.8	13.5	7.0	10.5	14.1
	III	3.1	5.9	8.3	3.3	5.8	7.5	3.3	5.1	5.6
	IV	-2.3	-3.3	-4.4	-5.2	-6.1	-8.8	-8.3	-10.4	-14.1

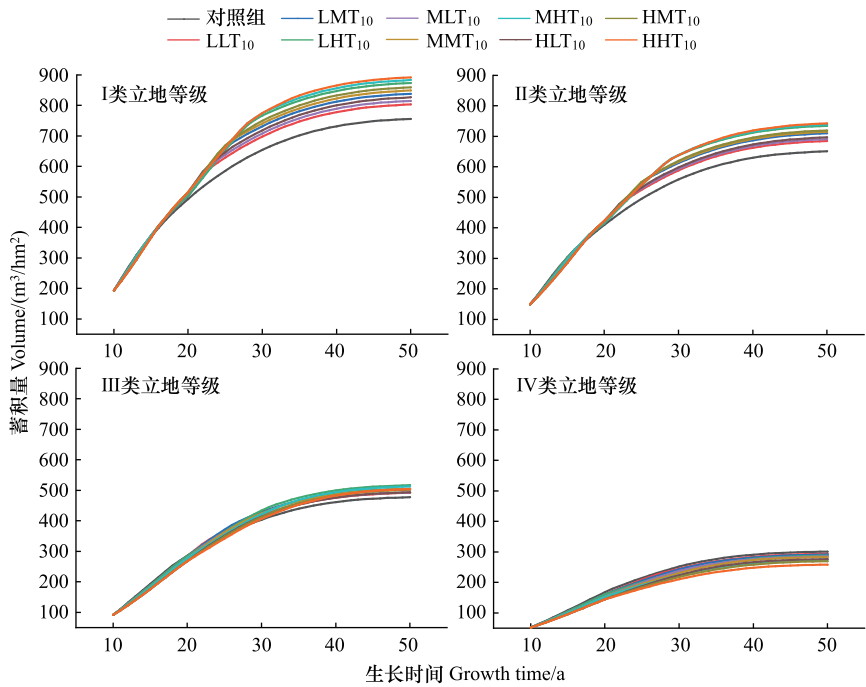


图 8 四种立地等级林地类型在长间隔间伐措施下总蓄积量的变化情况

Fig.8 The total stock volumes under long-interval thinning measures over four site quality levels

3.4 不同间伐措施对轮伐期和蓄积量的影响

在 I 类立地等级,初次轻度间伐及中度间伐的措施下,在间伐后的 10 年间隔出现最大的轮伐期为 18.9 年,最大平均生长量为 $24.3\text{m}^3/\text{hm}^2$,其它初次间伐和二次间伐的间隔均未能模拟出平均最大生长量的峰值点,通过图表不难看出其它间伐措施初次间伐的最大生长量不会超过 $24.3\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。研究在初次间伐的基础上,探究二次间伐的轮伐期时间以及对应林分蓄积量的大小。对比图 9—12,初次间伐和二次间伐林分蓄积的年平均增长量随着间伐强度增加而减小,林分轮伐期则呈现出增大的趋势。

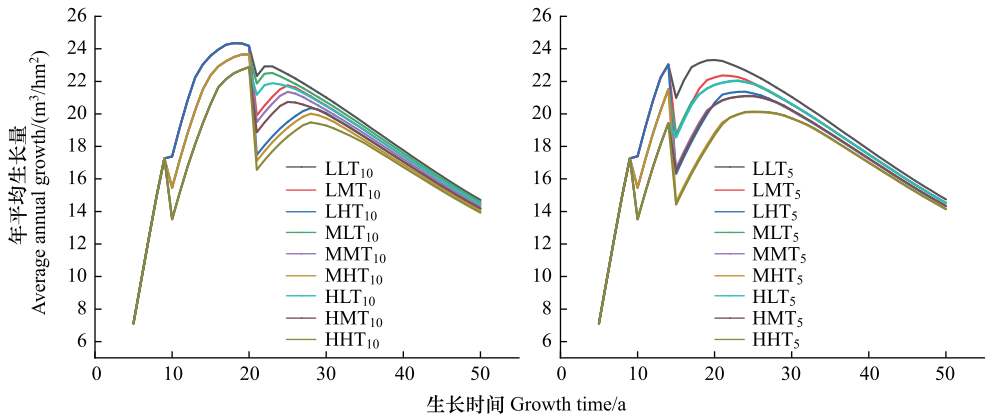


图 9 I 类立地等级不同间伐措施下蓄积量的年平均生长量

Fig.9 Average annual growth of stock volume at site level I under different thinning measures

在第二次间伐后,5 年间隔的间伐措施较 10 年间伐的间伐措施先达到最大平均生长量,且生长量略高。但对比 30 年、50 年林分蓄积量,两者没有表现出明显的差异(30 年蓄积量相对差异为 $-10.7\text{—}13.5\text{m}^3/\text{hm}^2$,50 年蓄积量相对差异为 $-14.3\text{—}14.2\text{m}^3/\text{hm}^2$)。

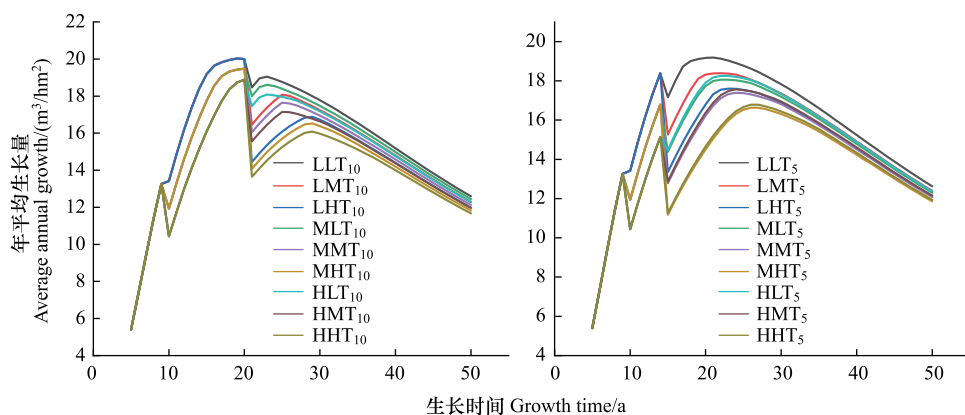


图 10 II 类立地等级不同间伐措施下蓄积量的年平均生长量

Fig.10 Average annual growth of stock volume at site level II under different thinning measures

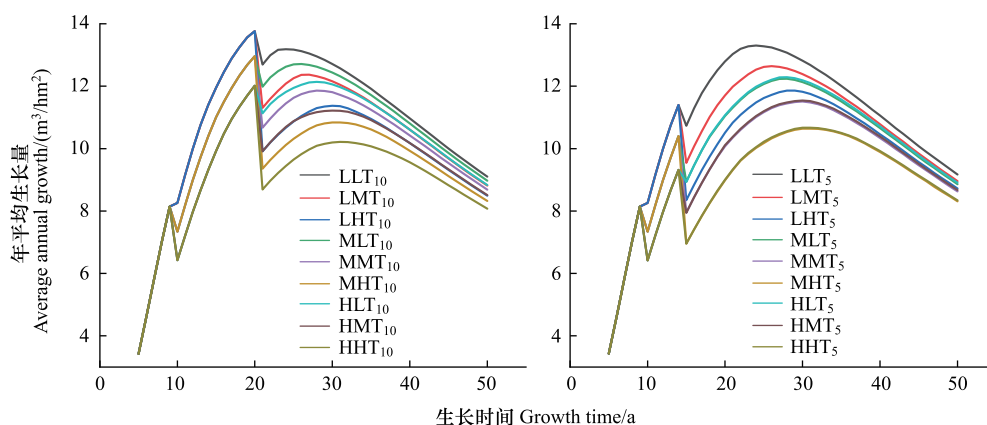


图 11 III 类立地等级不同间伐措施下蓄积量的年平均生长量

Fig.11 Average annual growth of stock volume at site level III under different thinning measures

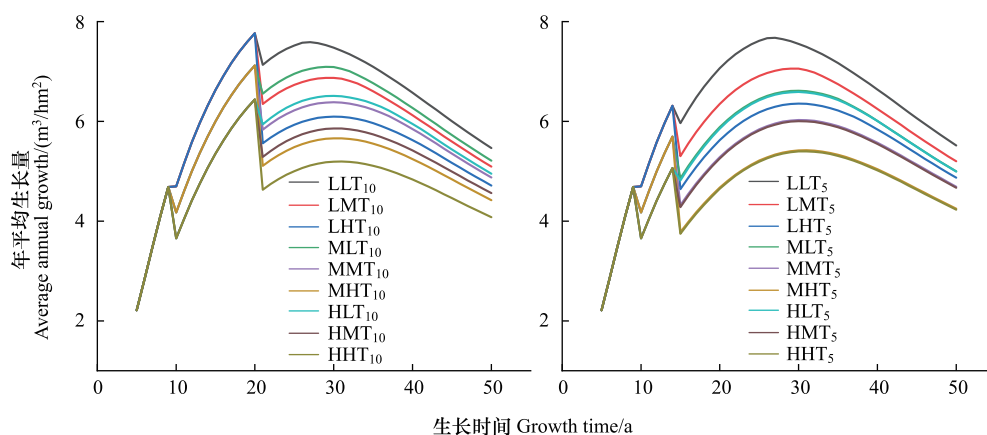


图 12 IV 类立地等级下不同间伐措施蓄积量的年平均生长量

Fig.12 Average annual growth of stock volume at site level IV under different thinning measures

在同一立地条件相同的时间间隔,若初次轮伐期相同,轮伐期随着二次间伐的强度的增大(相对林木株数减少)而变长,蓄积量表现出下降的趋势(表 9),此现象与图 4 一致。

表 9 不同间伐措施施林分轮伐期与生长蓄积量

Table 9 Rotation period and growth stock of stand under different thinning measures

立地等级 Site quality levels	间伐方式 Thinning method	10 年间隔间伐 Thinning at 10-year intervals					5 年间隔间伐 Thinning at 5-year intervals						
		年平均最大 大蓄积量 Average annual maximum storage volume/ (m ³ /hm ²)	二次间伐 后轮伐期 Rotation period after secondary thinning/a	年平均最大 大蓄积量 Average annual maximum storage volume/ (m ³ /hm ²)	初次轮伐期 First rotation period/a	50 年蓄积量 of storage/ (m ³ /hm ²)	30 年蓄积量 of storage/ (m ³ /hm ²)	初次轮伐期 First rotation period/a	年平均最大 蓄积量 Average annual maximum storage volume/ (m ³ /hm ²)	二次间伐后 轮伐期 Rotation period after secondary thinning/a	年平均最大 蓄积量 Average annual maximum storage volume/ (m ³ /hm ²)	50 年蓄积量 of storage/ (m ³ /hm ²)	30 年蓄积量 of storage/ (m ³ /hm ²)
I	LLT	24.3	22.9	22.9	—	735.4	630.2	—	23.04	20.3	23.3	737.2	631.3
	LMT	24.3	21.8	21.8	—	721.8	615.2	—	23.04	21.8	22.4	726.5	618.3
	LHT	24.3	20.4	20.4	—	708.5	601.5	—	23.04	24.1	21.4	715.8	605.9
	MLT	23.7	22.5	22.5	—	728.8	622.0	—	21.51	23.5	22.0	725.7	617.4
	MMT	23.7	21.4	21.4	—	715.2	607.0	—	21.51	25.3	21.1	716.1	606.2
	MHT	23.7	20.0	20.0	—	701.9	592.1	—	21.51	25.9	20.1	706.6	591.4
	HLT	22.9	21.9	21.9	—	722.4	614.4	—	19.43	23.5	22.1	726.3	618.3
	HMT	22.9	20.7	20.7	—	709.1	599.9	—	19.43	25.2	21.1	716.9	607.3
	HHT	22.9	19.5	19.5	—	696.2	578.4	—	19.43	25.7	20.1	707.6	592.3
	LLT	20.0	19.1	19.1	—	629.5	533.4	—	18.39	21.2	19.2	631.7	534.8
II	LMT	20.0	18.1	18.1	—	614.7	517.2	—	18.39	22.4	18.4	619.7	520.4
	LHT	20.0	16.9	16.9	—	599.1	501.9	—	18.39	23.8	17.6	606.6	506.3
	MLT	19.5	18.6	18.6	—	622.1	524.2	—	16.79	23.1	18.1	614.8	515.6
	MMT	19.5	17.7	17.7	—	606.6	508.3	—	16.79	24.8	17.4	604.0	504.2
	MHT	19.5	16.5	16.5	—	591.3	491.5	—	16.79	26.9	16.6	593.1	489.2
III	HLT	18.9	18.1	18.1	—	613.7	515.3	—	15.13	22.9	18.3	618.1	519.7
	HMT	18.9	17.1	17.1	—	598.6	499.0	—	15.13	24.7	17.6	607.3	508.5
	HHT	18.9	16.1	16.1	—	583.6	479.2	—	15.13	27.2	16.8	596.7	493.3
	LLT	13.8	13.2	13.2	—	455.2	381.4	—	11.40	24.5	13.3	458.7	384.7
	LMT	13.8	12.4	12.4	—	440.7	364.7	—	11.40	26.5	12.6	447.8	371.7
	LHT	13.8	11.4	11.4	—	424.6	341.2	—	11.40	28.9	11.9	436.1	354.7
	MLT	13.0	12.7	12.7	—	448.6	373.1	—	10.40	28.3	12.2	443.2	363.9
	MMT	13.0	11.9	11.9	—	434.3	354.2	—	10.40	30.2	11.5	431.6	345.2
	MHT	13.0	10.8	10.8	—	416.2	325.2	—	10.40	31.1	10.6	415.6	319.2
	HLT	12.0	12.1	12.1	—	441.6	361.7	—	9.32	28.2	12.3	445.3	365.7
IV	HMT	12.0	11.2	11.2	—	425.5	336.5	—	9.32	30.5	11.5	433.4	346.1
	HHT	12.0	10.2	10.2	—	403.6	305.8	—	9.32	30.9	10.7	417.1	320.0
	LLT	7.8	7.6	7.6	—	273.2	224.3	—	6.31	27.2	7.7	275.9	226.6
	LMT	7.8	6.9	6.9	—	254.6	206.1	—	6.31	29.2	7.1	259.9	211.7
	LHT	7.8	6.1	6.1	—	235.6	182.8	—	6.31	30.9	6.4	243.6	190.7
	MLT	7.1	7.1	7.1	—	260.6	212.7	—	5.70	30.5	6.6	249.8	198.4
	MMT	7.1	6.4	6.4	—	243.6	191.5	—	5.70	30.8	6.0	234.5	180.8
	MHT	7.1	5.7	5.7	—	221.0	169.8	—	5.70	31.5	5.4	212.4	162.5
	HLT	6.4	6.5	6.5	—	247.4	195.3	—	5.06	30.2	6.6	249.6	197.6
	HMT	6.4	5.9	5.9	—	228.0	175.7	—	5.06	30.9	6.0	233.4	180.1
IV	HHT	6.4	5.2	5.2	—	203.8	155.8	—	5.06	31.4	5.4	211.4	161.9

在图 9—12 中,不同的间伐时期,蓄积量的峰值表现不同,在短间隔间伐措施下,林分的峰值均高于二次间伐前的水平;长间隔间伐蓄积量的峰值均小于二次间伐时的水平。在相同的立地条件下,不同强度的间伐方式,林分蓄积量的变化趋势是随着轮伐期的增加而降低,但降低的幅度较小。间伐过程中产生木材收获量可以弥补轮伐期后移所造成的立木蓄积量降低,从而使得最终的蓄积总量保持较高的水平。无论是长时间间隔,还是短时间间隔,较高水平林分蓄积总量均出现在二次间伐强度为重度的情况下。

由此可见,研究不同立地等级下林分的不同间伐措施对轮伐期的改变情况,可以解释不同间伐方式和林分轮伐期对林分蓄积量的影响。

4 讨论

4.1 模型性能评价

本研究中的模型参数是通过迭代拟合的方法获得最大决定系数对应的最优拟合参数,与前人使用的方法相同^[16,34]。验证数据集的预测值和观测值之间的线性回归表现出较强的线性相关性(R^2 值为 0.77—0.98, MRE 的值为 1.3%—15.5%,RRMSE 的值为 1.96%—22.58%)。与以往的研究结果相比,本研究拟合精度有所提高,如李佳怡等对杉木人工林的研究中得到的总生物量的 R^2 为 0.81^[16],本研究将 R^2 提升至 0.9;万敏等使用模型对杉木生物量进行的研究中^[23],胸径的 R^2 为 0.92,本研究将 R^2 提升至 0.96,将均方根误差从 18.97% 降至 8.06%。从模型拟合出的蓄积量变化趋势来看,不同立地等级的生长曲线均呈现出 S 型,与李佳怡等探究的杉木人工林的生长变化与模型土壤肥力等级参数(FR)的关系一致^[16]。林分轮伐期随立地等级的降低而增大,随最大年平均生长量的减少而增加,与解雅琳等使用模型探究轮伐期的结论相同^[35]。因此,本研究最终采用的 3-PGmix 模型输入参数可用于研究区杉木人工林的生长预测。

4.2 未间伐样地轮伐期对林分蓄积量的影响

解雅琳等使用 3-PGmix 模型对落叶松轮伐期的研究发现,立地等级影响着林地的轮伐期和林地的最大年平均生长量^[34],即立地条件越好,林分的轮伐期越短且最大年平均生长越大,说明林地的轮伐期在很大程度上受立地等级的影响,而罗亦伶^[1]和雷相东等^[36]的研究也表明立地等级决定了林地的生产力,进而说明轮伐期与林地的生产力可能存有关联性。本研究将轮伐期与林分蓄积量进行线性拟合,得到 R^2 为 0.77,平均绝对误差为 66.3 m³/hm²,平均相对误差为 13.3%,表明林分轮伐期与蓄积量之间存在协同关系,林分蓄积量随着林分最优轮伐期的减小而增大,这与霍常富等研究的杉木人工林蓄积量和生态系统碳数量成熟龄的关系的结论是吻合的^[19]。其研究的最优轮伐期的范围在 18—27 年之间,本研究获取轮伐期均值的范围为 17.7—25.4 年,存在较小差异,可能是立地指数之间存有差异造成的。因此,本研究的结果将轮伐期的使用范围进行了扩展,不仅是作为林地何时间伐的一个指标,也可以作为判定林地获取木材产量高低的依据。

4.3 间伐措施对林分蓄积量的影响

本研究模拟不同时间间隔和不同间伐强度对杉木人工林蓄积量的影响,根据模拟 50 年间林分总蓄积量的相对增量显示,10 年长间隔的间伐效果明显优于 5 年短间隔间伐,与解雅琳探究落叶松在不同间隔间伐措施下蓄积量的表现一致^[15]。在相同的样地采取不同的间伐措施,总蓄积量不同。不同的间伐措施改变的是林地株数密度,保留的株数不同,林木将对应不同的生长空间,故在总蓄积量上有不同的体现。除 IV 类立地等级,其它等级的林地总蓄积量较对照组均有不同程度的提高;在尹华山、汪建新、胡佳怡等的研究中采用轻度间伐强度会对林地的总蓄积量起到增加作用,若仅考虑蓄积量,间伐后的林分小于对照组^[10—11,37],这与本研究采取的间伐强度在 10%—30% 之间的结果保持一致,而陆乾采用的 50% 的间伐强度,发现总蓄积量是降低的^[38],重度间伐后空缺出较大林内空间不能及时被利用,而“林窗”的出现必定造成林内资源的浪费,使总蓄积量下降。李梁晨在研究林分间伐对于环境的影响时强调对林分采取间伐措施时应考虑林分的内在因素^[39],林分的生产力受立地条件的限制,对于立地等级差的林地,若采取间伐措施,不仅不能获取更多的蓄积量,反而会造成水土流失等问题,应重点考虑养护等经营措施。

4.4 间伐措施与轮伐期对林分蓄积量的交互作用

为获取最优的经营方案,应综合考虑林分的轮伐期与间伐措施对于林分蓄积的影响。然而,根据模拟结果来看,间伐样地与未间伐样地的轮伐期表现不同,在林分蓄积量上也有所差异,间伐样地的轮伐期随立地等级的增加而增加,随间伐强度的增加(林分保留密度减少)而增加,与霍常富等在杉木人工林蓄积量和生态系统碳数量成熟龄的研究中林分密度与轮伐期的变化趋势的结果相同,但是霍常富的研究结果显示立地指数对二者成熟龄趋势不敏感^[19],本研究的结果与其生态系统碳成熟对立地指数的结果相同,与解雅琳对落叶松轮伐期的研究也体现出相似性^[35]。本研究通过不同立地等级间伐措施的对比分析,在 I 类、II 类立地等级下最优的间伐方式是初次间伐 20%,二次间伐 30%,与汪建新、陆乾、胡佳怡等提出的杉木林最优间伐措施在 20%—30% 相似^[10—11,38]。III 类立地等级为初级间伐 10%、二次间伐 20%,通过减少少量的林木,弥补了立地等级下降在生产力上的不足。10 年间隔措施对应的最优间伐时间依次为:28.5 年、29.4 年、30.9 年,5 年间隔措施对应的最优间伐时间依次为:25.9 年、26.9 年、31.1 年,对于杉木人工林合理的间伐时间的结论与王伟峰等的研究具有一致性^[40]。因此,通过模拟林分间伐和林分轮伐期对林分蓄积量的影响,获取的间伐方案,可以作为林地经营管理的依据。

5 结论

(1) 经参数定标后的 3-PGmix 生长过程模型可用于杉木人工林的生长预测。

(2) 未间伐林地轮伐期与林地生长的蓄积量表现出协同性,即林分蓄积量随着轮伐期的增加而减小。而间伐林分期轮伐期,呈现随立地指数的增加而减小,随间伐强度的增加而增加的趋势。

(3) 不同的间伐措施对林地蓄积量造成的影响在不同的立地条件下表现不同。从林地蓄积量来看,长间隔间伐优于短间隔间伐,对于 I 类和 II 类立地等级的林分最优间伐方案是初次间伐 20%,二次间伐 30%,III 类立地等级的林分最优间伐方案是初次间伐 10%、二次间伐 20%,根据轮伐期提供的最优间伐时间依次为:28.5 年、29.4 年、30.9 年,可将蓄积量的收益最大化。对于 IV 立地等级的林地,以改良土壤肥力为主,在立地条件改善之前,不建议采取常规间伐的经营方式。

(4) 本研究模拟了杉木人工林共 50 年的蓄积量变化情况,对于杉木人工林在 30—50 年蓄积量的生长效率明显降低,在不考虑培育大径阶杉木的情况下,应尽早采取采伐措施。

参考文献(References):

- [1] 罗亦伶. 立地条件对杉木生长和材性影响的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- [2] 彭万喜, 吴义强, 张仲风, 张当权, 李年存. 中国的杉木研究现状与发展途径. 世界林业研究, 2006, 19(5): 54-58.
- [3] Štefančík I, Vacek Z, Sharma R P, Vacek S, Rösslová M. Effect of thinning regimes on growth and development of crop trees in *Fagus sylvatica* stands of Central Europe over fifty years. Dendrobiology, 2018, 79: 141-155.
- [4] 明安刚, 张治军, 湛红辉, 张显强, 陶怡, 苏勇. 抚育间伐对马尾松人工林生物量与碳贮量的影响. 林业科学, 2013, 49(10): 1-6.
- [5] Rytter, Stener. Growth and thinning effects during a rotation period of hybrid aspen in southern Sweden. Scandinavian Journal of Forest Research, 2014, 29(8): 747-756.
- [6] Pretzsch H, Biber P, Schütze G, Uhl E, Rötzer T. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. Nature Communications, 2014, 5: 4967.
- [7] 王慧, 郭晋平. 我国森林抚育间伐研究进展. 山西林业科技, 2008, 37(2): 29-32.
- [8] 湖南省市场监督管理局. DB 43/T 2542—2023 杉木速生丰产林.
- [9] 李和之. 不同间伐强度对杉木生长的影响试验. 南方农业, 2023, 17(2): 79-81.
- [10] 胡佳怡. 杉木近熟林抚育间伐成效评价[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- [11] 汪建新. 抚育间伐对杉木人工林林分生长的影响. 安徽农业科学, 2021, 49(15): 129-130, 133.
- [12] 李华福, 谭文玮, 刘斌, 周欢, 林莉, 张征平. 不同抚育间伐强度对杉木林生长的影响. 安徽农业科学, 2022, 50(5): 105-108.
- [13] 郑鸣鸣, 任正标, 王友良, 宋重升, 林开敏, 陈志云. 间伐强度对杉木中龄林生长和结构的影响. 森林与环境学报, 2020, 40(04): 369-376.

- [14] Liu L, Chen Y M, Peng S Z, Han Q G. Improving forest carbon sequestration through thinning strategies under soil conservation constraints: a case study in Shaanxi Province, China. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112291.
- [15] 解雅琳. 基于 3-PG(mix)模型的气候变化和间伐对落叶松林生长收获的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [16] 李佳怡, 阮红玉, 邱思玉, 梁瑞婷, 朱兆廷, 文毅, 王成雨, 王轶夫, 孙玉军. 基于经验模型和机理模型的杉木人工林生物量估测对比研究. *生态学报*, 2024, 44(8): 3502-3514.
- [17] Stokland J N. Volume increment and carbon dynamics in boreal forest when extending the rotation length towards biologically old stands. *Forest Ecology and Management*, 2021, 488: 119017.
- [18] 丁伟林, 蒋彬彬, 刘灿辉, 康慧玲, 邓湘雯, 丁森林, 肖育生, 温旭丁. 陈山红心杉人工林最佳轮伐期的确定. *南方林业科学*, 2023, 51(1): 34-40, 78.
- [19] 霍常富, 王朋, 陈龙池, 汪思龙. 杉木人工林蓄积量和生态系统碳数量成熟龄的关系. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(9): 94-99.
- [20] 储安婷, 宁卓, 杨红强. 林业碳汇对人工林最优轮伐期的影响——以杉木和落叶松为例. *南京林业大学学报*, 2023, 47(3): 225-233.
- [21] 国家林业局. LY/T 2264—2014 立木生物量模型及碳计量参数-杉木. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [22] 曾伟生. 杉木相容性立木材积表系列模型研建. *林业科学研究*, 2014, 27(1): 6-10.
- [23] Forrester D I, Tang X L. Analysing the spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests and the effects of stand density using the 3-PG model. *Ecological Modelling*, 2016, 319: 233-254.
- [24] Forrester D I, Ammer C, Annighöfer P J, Avdagic A, Barbeito I, Bielak K, Brazaitis G, Coll L, del Río M, Drössler L, Heym M, Hurt V, Löff M, Matović B, Meloni F, den Ouden J, Pach M, Pereira M G, Ponette Q, Pretzsch H, Skrzyszewski J, Stojanović D, Svoboda M, Ruiz-Peinado R, Vacchiano G, Verheyen K, Zlatanov T, Bravo-Oviedo A. Predicting the spatial and temporal dynamics of species interactions in *Fagus sylvatica* and *Pinus sylvestris* forests across Europe. *Forest Ecology and Management*, 2017, 405: 112-133.
- [25] 万敏, 孙玉军, 孙钊, 庞荣荣. 应用 3-PG 模型预测杉木人工林生物量及蓄积量. *东北林业大学学报*, 2023, 51(11): 74-79, 94.
- [26] Reyer C P O, Flechsig M, Lasch-Born P, van Oijen M. Integrating parameter uncertainty of a process-based model in assessments of climate change effects on forest productivity. *Climatic Change*, 2016, 137(3/4): 395-409.
- [27] Gupta R, Sharma L K. The process-based forest growth model 3-PG for use in forest management: a review. *Ecological Modelling*, 2019, 397: 55-73.
- [28] Sands P J. Adaptation of 3-PG to novel species: guidelines for data collection and parameter assignment. CRC Sustain. Prod. For Technical Report 141. 2004.
- [29] Subedi S, Fox T, Wynne R. Determination of fertility rating (FR) in the 3-PG model for loblolly pine plantations in the southeastern United States based on site index. *Forests*, 2015, 6(9): 3002-3027.
- [30] Xie Y L, Wang H Y, Lei X D. Application of the 3-PG model to predict growth of *Larix olgensis* plantations in Northeastern China. *Forest Ecology and Management*, 2017, 406: 208-218.
- [31] 赵梅芳. 基于 3-PG 机理模型的杉木林碳固定及蒸散量模拟研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2008.
- [32] Olschewski R, Benítez P C. Optimizing joint production of timber and carbon sequestration of afforestation projects. *Journal of Forest Economics*, 2010, 16(1): 1-10.
- [33] 江西省质量技术监督局. DB 36/T 422—2016 杉木大径材培育技术规划.
- [34] 白羽, 庞勇, 夏晓运, 贾炜玮. 长白落叶松解析木数据参数化 3-PG 模型. *林业科学* 2022, 58(1), 98-110.
- [35] Xie Y L, Lei X D, Shi J N. Impacts of climate change on biological rotation of *Larix olgensis* plantations for timber production and carbon storage in Northeast China using the 3-PGmix model. *Ecological Modelling*, 2020, 435: 109267.
- [36] 雷相东, 符利勇, 李海奎, 李玉堂, 唐守正. 基于林分潜在生长量的立地质量评价方法与应用. *林业科学*, 2018, 54(12): 116-126.
- [37] 尹华山. 不同抚育间伐强度对杉木林生长的影响. *林业勘察设计*, 2024, 53(1): 5-8, 26.
- [38] 陆乾. 不同间伐强度对杉木人工林分生长质量的影响. *乡村科技*, 2023, 14(21): 99-101.
- [39] 李梁晨. 森林抚育间伐对生态环境的影响. *南方农业*, 2022, 16(4): 135-137.
- [40] 王伟峰, 段玉玺, 张立欣, 王博, 李晓晶. 不同轮伐期对杉木人工林碳固存的影响. *植物生态学报*, 2016, 40(7): 669-678.