

柳杉人工林全周期经营目标树密度研究

蒲秀青^{1,2} 谭伟^{1,22} 王贵林^{1,2} 姜仕昆^{1,2} 谭茜^{1,2} 梅本清^{1,2}

(1. 贵州大学林学院 贵州贵阳 550025; 2. 贵州大学林业信息工程研究中心 贵州贵阳 550025)

摘要:【目的】以贵州省平坝区柳杉人工林为研究对象,开展柳杉人工林全周期目标树密度经营研究对提升林分质量,培育优质大径材和森林可持续经营具有重要意义。【方法】基于2016年-2022年6a连续调查数据,共60块面积0.06hm²(20m×30m)固定标准地数据,通过等树高线、等直径线、最大密度线、等稀疏线、等疏密度线模型,构建林分密度控制图,并基于林分密度控制图,得到柳杉人工林各生长阶段目标树密度。【结果】在近自然经营理论体系下,以目标树经营技术为核心,结合柳杉实际生长情况,将柳杉人工林生长分为五个阶段,并得到柳杉各生长阶段目标树密度:当柳杉处于建群和竞争阶段不满足目标树的选择标准,不选择目标树;当柳杉生长进入质量阶段时,满足目标树选取,目标树密度为295~590株/hm²;目标树生长阶段为90~180株/hm²,大径材储备阶段60~120株/hm²。【结论】本文基于林分密度控制图,研究柳杉人工林各生长阶段目标树密度,为柳杉人工林密度调控提供一种新的方法,为柳杉人工林可持续经营提供理论参考。

关键词: 柳杉人工林; 全周期经营; 密度控制图; 目标树

Study on the target tree density of Cryptomeria plantation during the whole cycle

Abstract: 【Objective】 Taking the Cryptomeria plantation in Pingba district of Guizhou Province as the research object, the study on target tree density management of the whole cycle of cryptomeria plantation is of great significance for improving the stand quality, cultivating high-quality large-diameter timber and sustainable forest management. 【Methods】 Based on 6a continuous survey data from 2016 to 2022, a total of 60 pieces of fixed standard land data with an area of 0.06hm² (20m×30m) were used to construct a stand density control map by using the models of equal tree height line, equal diameter line, maximum density line, equal sparse line and equal sparse density line. The target tree density in each growth stage of Cryptomeria plantation was obtained. 【Results】 Under the near-nature management theory system, taking target tree management technology as the core and combining with the actual growth situation of Cryptomeria, the growth of cryptomeria plantation was divided into five stages, and the target tree density of each growth stage was obtained: when cryptomeria failed to meet the selection criteria of target trees in the group building and competition stages, no target tree was selected; When the growth of Cryptomeria entered the quality stage, the target tree selection was satisfied, and the target tree density was 295~590 trees·hm⁻². The target tree growth stage is 90~180 trees·hm⁻², and the large diameter wood reserve stage is 60~120 trees·hm⁻². 【Conclusion】 Based on the stand density control map, this paper studied the target tree density in each growth stage of Cryptomeria plantation, providing a new method for density control of cryptomeria plantation and theoretical reference for sustainable management of cryptomeria plantation.

Key words: Cryptomeria plantation; Full cycle operation; Density control chart; Target tree

森林近自然经营是一种模仿自然、接近自然的森林经营模式(邵青还, 2003)。目标树经营作为近自然

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑(2017)2520-1号)

*谭伟为通讯作者

经营的重要经营方法,其整个过程都基于目标树进行(王懿祥等,2014),在森林经营中,重心应放在目标树上,提早选择目标树,利用调查目标树得到的数据进行林分的经营规划和发展(马爱国,1992)。开展纯林近自然研究,以用材目标树作为经营利用对象,不仅获得较高的经济收益,同时在培育目标树的过程中,不断地采伐干扰木,使林分生长越来越好(蔡年辉等,2006)。在中国传统的林木经营方式中,针对用材林地区的森林经营作业主要是基于以数量成熟的轮伐期为明确的经营周期指标,整体调节着林木生长与发育的动态进程并完成了林木经济效益与产出目标(长晓红等,2016)。而近自然林业与传统林业不同,就近对自然经营作业方式而言,在林木生长与发育的全周期内,应同时注意林木的数量与质量指标的变化,由此才可形成自然经营作业或收获的全局构架(陆元昌等,2010)。

目标树密度作为全周期经营的一个重要的经营参数,决定林分不同阶段的目标树密度(李琪媛,2020)。当前,研究目标树密度是从样地水平出发,利用生长、密度等模型,研究不同立地、不同发育阶段下的目标树密度。王旦媚(王旦媚,2023)利用固定样地数据,构建了动态规划模型,确定了不同立地条件下林分各生长阶段最适密度和目标树密度。颜佳睿(颜佳睿,2021)采用标准地调查数据,通过研究闽楠的生长规律,预估闽楠人工林在不同立地类型下全周期经营目标树密度与收获时的目标直径。以往研究除了基于模型,有部分学者利用林分密度控制图研究人工林目标树密度,从图上直接得到目标树密度。

人工林经营主要是通过调控密度来实现的,而林分密度控制图是建立密度与蓄积之间的数学模型,直观反映出林分生长各阶段密度(陈传松等,2019)。所谓林分密度控制图则是通过密度效应,C-D 竞争密度效应和自疏法则,从竞争密度效应的倒数方程导出的产量等值线,是基于林分密度构建的图表(尹泰龙,1984),对生产具有指导意义。利用闽东地区隐梅属人工林样地构建林分密度控制图,林小梅(林小梅,2002)提出了一种新的密度效应模型和最大密度线参数估计方法,在生产中具有实际应用价值。王雪等(王雪等,2021)从林分密度出发,构建密度控制图,通过确定竞争木与目标树的比例,预测森林各个发展阶段的目标树密度。现阶段我国人工林初植密度较大,可以通过研建林分密度控制图,为人工林近自然经营制定适当的林业措施,如抚育间伐等,从而促进林分快速地生长,提高林地生产力(王建军等,2019; Newton P F, 2021)。

柳杉(*Cryptomeria japonica*)作为我国主要的速生用材树种,因其生长快、干形通直饱满、优良的材料在我国南方大面积种植(杜志,2020)。但由于柳杉种植密度大,林木之间竞争激烈,林分提早进入自然稀疏,降林地生产力。而目标树经营作为近自然森林经营的核心,利用目标树经营技术科学调控柳杉人工林林分密度,对人工林经营发展具有指导作用。因此,研究柳杉人工林全周期经营目标树密度对提高柳杉生产力,培育大径级用材林具有重要意义。本研究以柳杉人工林为研究对象,从林分密度出发,建立密度控制模型,编制柳杉林分密度控制图,结合树高生长曲线,通过密度控制图确定柳杉人工林各生长阶段目标树密度,从而为培育柳杉大径材和柳杉人工林可持续发展提供理论参考。

1 研究区概况

研究区位于贵州省安顺市平坝区大坡国营林场(105°59'~106°34'E, 25°15'~26°37'N),总面积 680 hm²,森林资源丰富。地处十字、齐伯、乐平三乡的结合部和“安凤林区”中段,处在北亚热带地区,属季风湿润气候,全年温暖湿润,雨量充沛,年均气温 13℃,年平均降水量 1300mm,地貌以中中山为主,地势呈南北走向,海拔在 1400-1600m 之间。土壤主要以黄壤为主,土层多为中等至深厚,水湿条件良好,

同时土壤肥沃，富含大量矿质元素，比较适宜杉木（*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook）、柳杉（*Cryptomeria fortunei*）、马尾松（*Pinus massoniana* Lamb）、华山松（*Pinus armandii* Franch.）等各种针阔树种的生长。

2 研究方法

2.1 样地设置与调查

2016 年在大坡林场选取立地条件基本一致、林相相对整齐的柳杉人工林，共设置 20 个面积为 20m x 30m 的标准地。对标准地内林木标记，进行每木检尺，以 5cm 作为林木起测径阶，记录胸径、树高、林龄、郁闭度、冠幅等林分、林木因子，用 GPS 记录海拔、坡向、坡位等地形因子，林龄采用树木生长锥钻取树芯获取年轮，同时查阅大坡林场造林资料，获取柳杉生长林龄。2016 年——2020 年对固定样地进行连续调查，共获得 60 个样地数据。样地基本情况见表 1。

表 1 柳杉人工林样地基本信息统计
Tab.1 Basic information statistics of *Cryptomeria fortunei* plantation sample plots

林龄	龄组	平均胸径	平均树高	林分密度	样地数量
Age	Age Group	Mean diameter at breast height /cm	Mean tree height /m	Stand density/(株/hm ²)	Number of sample plots
9~10	幼龄林	9.5~11.5	8.1~9.9	2251~4119	5
11~20	中龄林	10.7~23.0	10.1~18.5	1100~2785	13
21~25	近熟林	20.6~26.4	15.7~23.7	1084~1784	19
26~35	成熟林	20.7~35.2	18.0~23.8	650~1784	14
36~50	过熟林	34.3~40.9	22.2~26.9	567~864	9

2.2 林分密度控制图模型

林分密度控制图是林分密度管理通过密度调节来控制树木竞争，以图形方式说明了林分发育各个阶段的产量、密度和死亡率之间的关系，可用于根据特定的疏伐时间表预测未来的林分发展，并优化森林管理（Newton P F, 1997）。林分密度控制图相关模型包含以下几种：

等树高线： $M = a_{11} \times H^{b_{11}} \times N - a_{12} \times H^{b_{12}} \times N^2$

等直径线： $M = a \times D^b \times N^c$

最大密度线： $M = a \times N^{-b}$

等疏密度线： $M = K_p \times N^{(1-k_3)}$

自然稀疏线： $M = k_5 \times (N_0 - N)N_0^{-K_3}$

式中：M 为林分公顷蓄积量（m³/hm²）；H 为林分优势树高（m）；D 为林分平均直径（cm）；N 为林分密度（株/ hm²）；N₀ 林分初植密度（株/ hm²）；a₁₁、a₁₂、b₁₁、b₁₂、a、b、c、k₃、k₅、k_p 均为参数，其中 P 为林分疏密度，取值范围为 0.2~1。

2.3 优势木树高生长曲线

通过已往研究，选用 7 种常用的树高生长方程拟合柳杉优势木树高与林龄的关系。根据调查所得到的

优势木树高与林龄数据，采用 R 语言软件分析优势木树高与林龄的回归关系，拟合各生长方程的参数，筛选出最优的生长方程。最后采用 Origin2022 软件绘制柳杉人工林优势木树高生长曲线，预测柳杉树高的生长与变化情况。树木生长方程如表 2 所示

表 2 树高生长方程^①
Tab.2 Tree height growth equation

编号	树高生长方程	公式
NO.	Tree height growth equation	Formulas
M1	Richards	$H = a(1 - e^{-bA})^c$
M2	Logistic	$H = \frac{a}{1 + be^{-cA}}$
M3	Gompertz	$H = ae^{-be^{-cA}}$
M4	Korf	$H = ae^{-bA^{-c}}$
M5	Mitscherlich	$H = a(1 - be^{-cA})$
M6	Schumacher	$H = ae^{-b/A}$
M7	单分子	$H = a + be^{-c/A}$

①H 为林分优势树高 (m)，A 为林分年龄 (a)，e 为自然常数，a、b、c 为模型参数。

2.4 目标树密度

目标树的生长需要一定的空间，过大的林分密度影响目标树的生长，较小的密度难以充分发挥林地生产力，最佳的林分密度才能保证最高的林地产出（张丽楠等，2013）。确定目标树密度的基本原则是去劣留优，选择目标树的同时，应在邻近目标树附近对应选择 1~2 棵干扰树，以确定目标树与干扰树的数量比例，利用林分密度控制图确定柳杉人工林各生长阶段采伐树木，进而确定各阶段目标树密度（王雪等，2021）。

2.5 数据处理

利用 R 语言软件对柳杉人工林树高与林龄非线性回归分析，拟合树高生长方程参数和林分密度控制图模型参数；利用 Origin2022 的 Function 功能板块绘制树高生长曲线和柳杉人工林林分密度控制图。

3 结果与分析

3.1 密度控制模型

利用 R 语言软件，将调查所得到的 60 个样地数据，用密度控制模型，进行非线性回归分析，拟合出各密度模型的参数值。林分密度控制模型相关参数见表 3。利用 Origin2022 软件绘制柳杉人工林林分密度控制图。图 1 为柳杉人工林林分密度控制图。

表 3 林分密度控制模型的相关参数
Tab.3 Parameters associated with the stand density control model

模型	参数	参数值
Model	Parameters	Parameters value
等树高线 Contour line	a11	1.14E-06
	b11	4.293
	a12	2.66E-12

	b12	5.833
等直径线	a	2.77E-04
Equivalent diameter curve	b	2.396
	c	9.72E-01
最大密度线	a	4.07E+08
Maximum density line	b	1.787662
等疏密度线	k0.2	7.31E+06
Isometric density line	k0.3	1.60E+07
	k0.4	2.84E+07
	k0.5	4.53E+07
	k0.6	6.80E+07
	k0.7	1.02E+08
	k0.8	1.41E+08
	k0.9	2.06E+08
	k1.0	4.07E+08
	k3	2.79
自然稀疏线	k3	2.79
Natural sparse line	k4	4.07E+08
	k5	2.51E+09

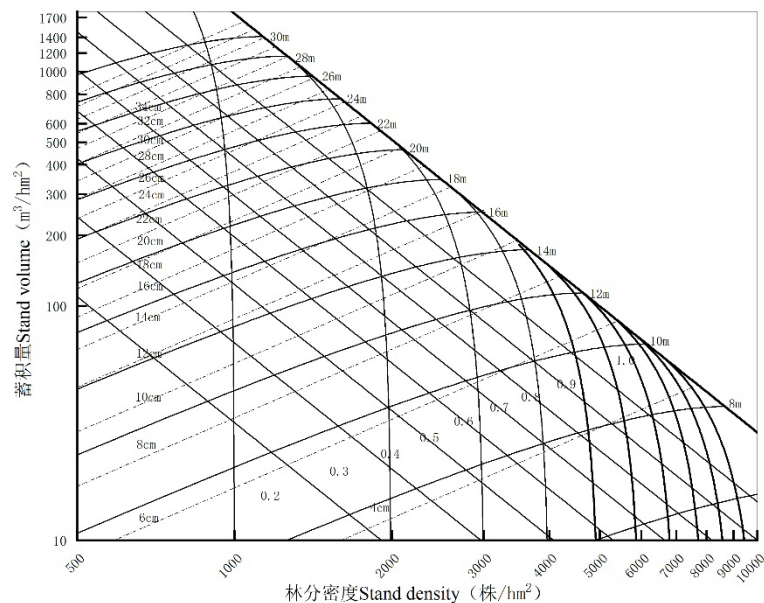


图 1 柳杉人工林林分密度控制图
Fig.1 Control chart for Cryptomeria plantation stand density

3.2 树高生长曲线

根据 7 个方程拟合结果得到，Richards 生长方程拟合效果最佳，R² 为 0.9304，所以选择 Richards 生长方程为最优树高生长曲线，其方程式为：

$$H = 28.3963(1 - e^{-0.0867A})^{1.3739} \quad , \quad R^2=0.9304$$

式中：H 为林分优势木树高；A 为林分林龄。各方程参数见表 4

表 4 柳杉人工林树高生长方程拟合结果

Tab.4 Fitting results of tree height growth equation of Cryptomeria plantation

模型 Model	a	b	c	R2
M1	28.3963	0.0867	1.3739	0.9304
M2	27.4752	4.0589	0.1357	0.9278
M3	27.9556	2.1205	0.1062	0.9296
M4	35.8946	11.9386	0.9486	0.9024
M5	27.8269	1.4577	0.1041	0.9153
M6	34.6562	9.3385	—	0.9231
M7	2.0645	33.7838	15.2353	0.8995

将所得到的树高生长方程，利用 Origin2022 软件绘制柳杉人工林树高生长曲线。柳杉人工林优势树高生长曲线见图 2。

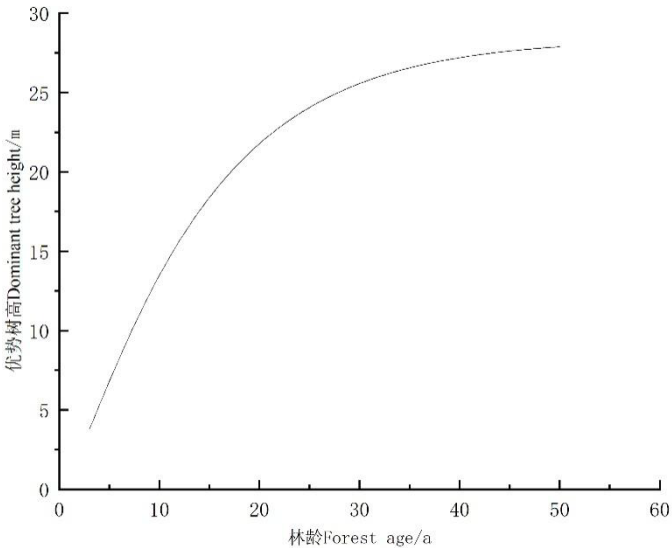


图 2 柳杉人工林优势树高生长曲线

Fig.2 Height growth curve of dominant trees in Cryptomeria plantation

由树高生长曲线可以看出，柳杉人工林树高生长幼年时期生长速度最快，在 10 年左右生长速率最大，进入中年期后生长速度较幼年期有所下降，在 25 年时，生长速率较低，增长较慢，因此，将 25a 定为柳杉的基准年龄。最后根据生长曲线预测得到，柳杉在 15、25、35、45a 的优势树高。结果见表 5

表 5 柳杉人工林树高生长预测结果

Tab.5 Prediction results of tree height growth in Cryptomeria plantation

林龄 Age	优势树高 Dominant tree height
15	18.35
25	24.03
35	26.54
45	27.61

3.3 柳杉人工林密度控制图的应用

森林发展类型设计的首要条件是划分林分发育阶段，熟悉林分所处的发育阶段，才能准确定位林分的经营目标（陆元昌等，2014）。要确定柳杉人工林生长发育周期经营目标树密度，需界定柳杉生长发育发展阶段。按照森林发展演替进程，可将柳杉人工林的生长阶段划分为五个阶段（表 6）。

表 6 柳杉人工林各生长发育阶段特征

Tab. 6 Characteristics of growth and development stages of Cryptomeria plantations

生长阶段 Growth stage	林分特征 Stand characteristics	林龄范围 Age range	主要抚育措施 Main care measures
1	林分建群阶段	<5	柳杉初植密度3000株/hm ² （1.5m×2m），沿等高线种植，选择二级苗以上，并施以底肥，栽植后进行抚育管理，松土除草
2	竞争生长阶段	5-15	林分进入郁闭，产生竞争，导致部分林木枯死，为促进林分生长，对林分进行择伐，伐除被压木、枯死木等下层林木，此阶段择伐后林分密度1500株/hm ² 。
3	质量选择阶段	15-25	根据林木长势，视情况进行择伐定株，确定林分密度910株/hm ² ，在此阶段，开始选择目标树与干扰树，确定目标树与目标树密度，伐除干扰树，培育大径材
4	目标树生长阶段	35-45	当柳杉生长到45a时，林分已经达到目标成熟阶段，可以择伐达到目标直径的目标树，在择伐后在林下空地补植柳杉幼苗，培育下一代目标树。
5	大径材储备阶段	>45	林地空旷，林下光照充足，更多物种进入林分，提高了林分生物多样性，维护林分多功能,此阶段土地肥沃，能够培育优质的大径材。

假设选取初值密度为 3000 株的柳杉人工林为例，通过柳杉人工林密度控制图得到林分生长各阶段的择伐数量。

通过优势树高曲线，可查得柳杉 15a、25a、35a、45a 时的树高分别为 18.35m、24.03m、26.54m、27.61m。

当柳杉生长到 15 年时，通过已知的树高生长曲线，可知树高为 18.35m，从图 1 中查找 18m 的等树高线与林分密度为 3000 株/ hm² 的自然稀疏线相交，交点在 0.9 疏密度处，读出疏密度为 0.94，说明此时林分处于过饱和状态，若不对林分中部分林木进行择伐，则将会导致林分竞争加剧，出现枯死木，降低林地生产力。因此，需对林分进行择伐，降低其疏密度。根据林分密度控制图（图 1），找到 0.7 疏密度线与 18m 等树高线的交点，此时林分密度为 1500 株/ hm²，所以当柳杉人工林生长到 15a 时，林分保留密度为 1500 株/ hm²，择伐 1500 株/ hm²，从而降低竞争，提高生产林地生产力。

当柳杉生长到 25 年时，此时树高为 24.03m，从图 1 中找到林分密度为 1500 株/ hm² 与 24m 等树高线的自然稀疏线交点，读出疏密度为 0.92，此时由于择伐后的林分郁闭，林木之间又出现竞争，因此，需择伐一部分林木，降低林分疏密度，以保证目标树正常生长。择伐时可以找到图 1 中 0.7 的疏密度线与 24m

等树高线交点，读出林分密度为 910 株/ hm²，即柳杉人工林生长到 25a 时，需择伐林木 590 株/ hm²，保留 910 株/ hm²，以确保不会因密度过大而发生自然稀疏。

当柳杉生长到 35 年时，其树高生长到 26.54m，由于单位面积的立木变少，林分又发生郁闭。从图 1 中查出林分密度为 910 株/ hm² 的自然稀疏线与 26m 等树高线交点值为 0.78，即林分疏密度为 0.78，此时林分内目标树之间依然存在林木竞争，需将林分疏密度择伐至 0.7。通过找到图 1 中 0.7 林分疏密度线与 26m 等树高线的交点，读出林分密度为 730 株/ hm²。因此柳杉人工林生长到 35a 的阶段时，需择伐林木 180 株/ hm²，提高林木利用空间，以确保目标树正常生长，达到目标直径。

当林分生长到 45 年时，树高为 27.61m，从图 1 中读出林分密度为 730 株/ hm² 的自然稀疏线与 28m 等树高线交点值，得到林分疏密度为 0.76，说明此时林分由于择伐后林木生长林分郁闭，发生林木竞争，需将林分疏密度降低，以保证培育大径材目标树。因此，通过图 1 中找到 0.7 疏密度线与 28m 等树高线的交点，读出林分密度为 610 株/ hm²，所以柳杉人工林生长到 45a 的林龄阶段时，需择伐 120 株/ hm²，降低林木竞争，从而确保大径材的培育。对上面柳杉人工林生长各阶段择伐数目统计如表 7 所示。

表 7 柳杉人工林各生长阶段择伐株树

Tab.7 The trees of Cryptomeria were selected for each growth stage

林龄 Ag e	优势树高 Dominant tree height	采伐株树 Cut / (株/hm ²)	保留密度 Retention density/ (株/hm ²)
15	18.35	1500	1500
25	24.03	590	910
35	26.54	180	730
45	27.61	120	610

根据目标树经营方案，标记 1 棵目标树的同时，在邻近目标树周围选择 1~2 棵林木作为干扰树，即标记需要择伐的树木。因此目标树与干扰树比值为 1：1~1：2 之间，具体见表 8。

表 8 目标树取值密度

Tab. 8 Target tree density value

比值范围 Ratio range	目标树 Target tree/ (株/hm ²)	采伐树 Cutting trees/ (株/hm ²)
1 : 1	590	590
	180	180
	120	120
1 : 2	295	520
	90	180
	60	120

根据目标树经营技术方案，得到柳杉人工林全周期经营各生长阶段目标树密度。如表 9 所示

表 9 柳杉全周期经营目标树密度

Tab.9 Full cycle management target tree density of cryptomeria

发展阶段 Development stage	林分生长阶段 Stand growth stage	林龄范围 Age range	目标树密度 Target tree density
1	林分建群阶段	<10	

2	竞争生长阶段	5~15	
3	质量选择阶段	15~25	295~590
4	目标树生长阶段	25~35	90~180
5	大径材储备阶段	35~45	60~120

4 讨论

人工林近自然化改造经营是我国人工林经营改造可行的方法，经营过程主要以目标树为核心进行，以目标树为构架的全林经营（陆元昌等，2009；胡雪凡，2019）。传统森林经营是研究森林永续利用，而目标树经营是通过不断采伐干扰树，不断改善林分结构，促进森林生长发育，增强生物多样性，既突出了目标树的经济价值，又体现了森林的生态功能。（杨学民等，2003；戎建涛，2014；郭诗宇，2021）。本研究提出基于林分密度控制图方法，通过目标树经营技术体系划分柳杉不同生长阶段，得出柳杉人工林各生长阶段目标树密度，与宋玉福（宋玉福，2015）通过目标树选择模型得出落叶松云冷杉混交林每公顷保留 100 株目标树最佳结论一致，而与王雪（王雪等，2021）的研究结果相比有所偏小，分析原因，由于柳杉属于深根树种，且大坡林场海拔较高，随着土壤深度的增加，土壤肥力下降（张荣等，2020），导致单木之间营养竞争大，因此目标树密度较小。

目标树经营技术是一种降低与邻木冠层竞争、扩大目标树生长空间来提高单木质量的营林技术，目标树的生长需要一定的空间，合理的目标树密度是目标树经营的关键（Mercker D C，2007；张晓红等，2023）。石乐（石乐，2018）选用 W-V-Hegyi 竞争指数计算备选目标树的竞争力，用大小比数计算林木的优势度，对林木的空间优势程度进行了量化，确定目标树密度，而本研究基于林分密度控制图，确定柳杉人工林各生长阶段的目标树密度，相比可借鉴方其方法确定目标树，让目标树的选取更加合理。同时本研究将柳杉生长分为不同的生长阶段，以初植密度为起点，确定了各生长阶段目标树密度和采伐强度，与李琪媛、颜佳睿（李琪媛，2020；颜佳睿，2021）通过建立胸径生长模型，确定全周期经营目标树直径与各阶段目标树密度不同，本方法在实际目标树经营中将更加实用。

本研究选取的贵州省安顺市平坝区大坡林场，大坡林场由于处在煤系地层地段，由煤系地层发育而来的土壤非常适合柳杉生长，柳杉林分生长平均值整体高于其他地区。因此，所构建的模型略高于其他地区，后续建议增加其他区域的观测数据或者同区域不同立地条件下的柳杉生长数据，提高模型的适用性。

5 结论

目标树经营是为实现森林规划目标而定的，旨在针对性提升森林质量，在全周期森林经营活动中占据主导地位。本研究以近自然目标树经营技术为指导，结合柳杉人工林实际生长情况，将柳杉人工林生长过程分为 5 阶段，即林分建群阶段、竞争生长阶段、质量选择阶段、目标树生长阶段、大径材储备阶段。再基于林分密度控制图，得到柳杉各生长阶段目标树密度。从林分密度控制图上得到柳杉人工林全周期经营各阶段目标树密度为：质量选择阶 295~590 株/ hm²，目标树生长阶段 90~180 株/ hm²，大径材储备阶段 60~120 株/ hm²。因此，合理的目标树密度区间能为经营者提供合理的林分密度调控方案，为提升人工林质量，培育优质大径级的木材和森林可持续经营提供理论依据。

参 考 文 献

蔡年辉,李根前,陆元昌.2006.云南松纯林近自然化改造的探讨[J].西北林学院学报, (04):85-88+120.

- (CAI N H, Li G Q, Lu Y C.2006. Discussion on near-naturalization transformation of pure pine forest in Yunnan [J]. Journal of Northwest Forestry College, (04):85-88+120. [in Chinese])
- 陈传松,袁小军,司芳芳等.2019.杉木人工林林分密度管理和研究现状[J].林业科技通讯,(05):37-39.
- (Chen C S, Yuan X J, Si F F, et al.2019. Stand density management and research status of Chinese fir plantation [J]. Forestry Technology Bulletin,(05):37-39. [in Chinese])
- 杜志,胡觉,肖前辉,等.2020.中国人工林特点及发展对策探析[J]. 中南林业调查规划, 39(01):5-10.
- (Du Z, Hu J, Xiao Q H, et al.2020. Characteristics and development strategies of plantation in China [J]. Forestry Survey and Planning in Central and South China, 39(01):5-10. [in Chinese])
- 郭诗宇,胡伯特·福斯特,陈幸良.2021.目标树经营: 德国经验与湖北实践[J].世界林业研究,34(02):14-20.
- (Guo S Y, Hubert Foster, Chen X L.2021. Target tree management: German experience and Hubei practice [J]. World Forestry Research,34(02):14-20. [in Chinese])
- 胡雪凡,张会儒,张晓红.2019.中国代表性森林经营技术模式对比研究[J].森林工程,35(04):32-38.
- (Hu X F, Zhang H R, Zhang X H.2019. Comparative study on representative forest management technology models in China [J]. Forest Engineering,35(04):32-38. [in Chinese])
- 李琪媛.2020.金洞林场杉木—闽楠混交林目标树密度研究[D].中南林业科技大学.
- (Li Q Y.2020. Study on target tree density of Chinese fir and Fujian nan mixed forest in Jindong Forest Farm [D]. Central South University of Forestry and Technology. [in Chinese])
- 林小梅.2002.闽东柳杉人工林林分密度控制图的研究[J].福建林业科技,(03):75-77+83.
- (Lin X M.2002. Study on stand density control map of Cryptomeria plantation in eastern Fujian [J]. Fujian Forestry Science and Technology,(03):75-77+83. [in Chinese])
- 陆元昌,雷相东,洪玲霞等.2010.近自然森林经理计划体系技术应用示范[J].西南林学院学报,30(02):1-6.
- (Lu Y C, Lei X D, Hong L X, et al.2010. Application demonstration of near-nature forest management planning system [J]. Journal of Southwest Forestry College,30(02):1-6. [in Chinese])
- 陆元昌,刘宪钊.2014.多功能人工林经营技术指南[M].北京:中国林业出版社.
- (Lu Y C, Liu X Z. 2014. Technical Guide for multi-functional plantation management [M]. Beijing: China Forestry Publishing House. [in Chinese])
- 陆元昌,张守攻,雷相东等.2009.人工林近自然化改造的理论基础和实施技术[J].世界林业研究,22(01):20-27.
- (Lu Y C, Zhang S G, Lei X D, et al.2009. Theoretical basis and implementation technology of near-naturalization transformation of artificial forest [J]. World Forestry Research,22(01):20-27. [in Chinese])
- 马爱国.1992.目标经营——介绍一种森林经营方法[J].世界林业研究,(03):50-55.
- (Ma G G.1992. Target management -- Introducing a forest management method [J]. World Forestry Research,(03):50-55. [in Chinese])
- 戎建涛.2014.中亚热带天然阔叶用材林目标树经营研究[D].中国林业科学研究院.
- (Rong J T.2014. Study on target tree management of natural broadleaf timber forest in Central and tropical regions [D]. Chinese Academy of Forestry. [in Chinese])
- 邵青还.2003.对近自然林业理论的诠释和对我国林业建设的几项建议[J].世界林业研究,(06):1-5.
- (Shao Q H.2003. Interpretation of near-nature forestry theory and some suggestions for forestry construction in China [J]. World Forestry Research,(06):1-5. [in Chinese])
- 石乐.2018.金洞林场闽楠人工林目标树密度及生长特征研究[D].中南林业科技大学.
- (Shi L.2018. Study on target tree density and growth characteristics of Minnan plantation in Jindong Forest Farm [D]. Central South University of Forestry and Technology. [in Chinese])
- 宋玉福.2015.目标树经营单木生长模型及干扰树采伐模拟[D].中国林业科学研究院.
- (Song Y F.2015. Single tree growth model of target tree management and simulation of interference tree harvesting [D]. Chinese Academy of Forestry. [in Chinese])
- 王旦媚.2023.金洞林场闽楠人工林近自然改造最适密度研究[D].中南林业科技大学.
- (Wang D M.2023. Study on the optimal density of Minnan artificial forest near nature reconstruction in Jindong Forest Farm [D]. Central South University of Forestry and Technology. [in Chinese])

- 王建军,陆元昌,赵秀海等.2019.马尾松人工林密度控制图及密度预警研究[J].北京林业大学学报,41(05):31-37.
- (Wang J J, Lu Y C, Zhao X H, et al.2019. Study on density control map and early warning of Masson pine plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University,41(05):31-37. [in Chinese])
- 王雪,李际平,曹小玉等.2021.基于林分密度控制图的闽楠人工林全周期经营目标树密度研究[J].中南林业科技大学学报,41(09):71-78.
- (Wang X, Li J P, Cao X Y, et al.2021. Study on full-cycle management target tree density of Nan plantation based on stand density control map [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology,41(09):71-78. [in Chinese])
- 王懿祥,张守攻,陆元昌等.2014.干扰树间伐对马尾松人工林目标树生长的初期效应[J].林业科学,50(10):67-73.
- (Wang Y X, Zhang S G, Lu Y C, et al.2014. Initial effects of disturbed tree thinning on target tree growth in Masson pine plantation [J]. Forestry Sciences,50(10):67-73. [in Chinese])
- 颜佳睿.2021.金洞林场闽楠人工林全周期经营目标树密度研究[D].中南林业科技大学.
- (Yan J R.2021. Study on target tree density of Minnan plantation in Jindong Forest Farm [D]. Central South University of Forestry and Technology. [in Chinese])
- 杨学民,姜志林.2003.森林生态系统管理及其与传统森林经营的关系[J].南京林业大学学报(自然科学版),(04):91-94.
- (Yang X M, Jiang Z L.2003. Forest ecosystem management and its relationship with traditional forest management [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition),(04):91-94. [in Chinese])
- 尹泰龙.1984.林分密度控制图[M].北京:中国林业出版社.
- (Yin T L.1984. Control map of stand density [M]. Beijing: China Forestry Publishing House. [in Chinese])
- 张丽楠,王得祥,郝亚中等.2013.陕西北林学院学报,28(01):146-150.
- (Zhang L N, Wang D X, Hao Y Z, et al.2013. Study on optimal management density of Larch plantation in Ningdong Forestry Bureau, Shaanxi Province [J]. Journal of Northwest Forestry College,28(01):146-150. [in Chinese])
- 张荣,李婷婷,金锁等.2020.不同海拔高度对周公山柳杉人工林植物多样性及土壤养分的影响[J].中南林业科技大学学报,40(05):38-46.
- (Zhang R, Li T T, Jin S, et al.2020. Effects of different altitude on plant diversity and soil nutrients of Cryptomeria plantations in Zhougongshan, China [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology,40(05):38-46. [in Chinese])
- 张晓红,张会儒,卢军等.2016.美国目标树经营体系及其经营效果研究进展[J].世界林业研究,29(01):91-96.
- (Zhang X H, Zhang H R, Lu J, et al.2016. Research progress of target tree management system and its management effect in the United States [J]. World Forestry Research,29(01):91-96. [in Chinese])
- 张晓红,周超凡,张状等.2023.基于光竞争截止系数的崇礼冬奥核心区华北落叶松人工林目标树抚育间伐模拟[J].林业科学,2023,59(02):30-39.
- (Zhang X H, Zhou Q Q, Zhang Z, et al.2023. Simulation of target tree thinning of Larch plantation in Chongli Winter Olympics core area based on light competition cutoff coefficient [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019,59(02):30-39.[in Chinese])
- Mercker D C.2007.Technical guide to crop tree release in hardwood forests[J].Publication PB1774. Knoxville, TN: University of Tennessee Extension. 24 p. [Published with the University of Kentucky Cooperative Extension and Southern Regional Extension Forestry].
- Newton P F.1997. Stand density management diagrams: Review of their development and utility in stand-level management planning[J]. Forest Ecology and Management,98(3):251-265.
- Newton P F.2021.Stand density management diagrams: modelling approaches, variants, and exemplification of their potential utility in crop planning[J]. Canadian Journal of Forest Research,51(2):236-256.