

兴安落叶松与白桦混交林合理经营密度研究

胡静杉,铁 牛*

(内蒙古农业大学 林学院,内蒙古 呼和浩特 010019)

摘 要:为确定兴安落叶松与白桦混交林的合理经营密度,运用半峰宽原理计算小、中、大不同径级的林分合理经营密度。结果表明:1)利用胸径与冠幅的相关关系,拟合发现白桦以线性函数效果最好,而兴安落叶松以二次函数效果最好。2)建立不同径级层林分的最大密度模型,通过拟合发现各径级胸径与最大林分密度以指数函数效果最佳。3)通过半峰宽公式计算出小、中、大径级层林分合理经营密度区间分别为 0.434~1.336、0.725~2.057 N_{max} 和 0.645~1.469 N_{max} ,最小到最大合理经营密度株数配比在 5:3:2、6:3:1、7:2:1 等比例之间变化。
关键词:针阔混交林;半峰宽原理;林分最大密度模型;合理经营密度;森林经营
中图分类号:S757 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)02-0180-06

Rational Operating Density of Mixed Forest of *Larix gmelinii* and *Betula platyphlla*
HU Jing-shan, TIE Niu*
(Inner Mongolia Agricultural University, Forestry College of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to determine the reasonable management density of mixed forest of *Larix gmelinii* and *Betula platyphlla*, the principle of peak width at half height was adopted to calculate the reasonable management densities of the stands with different diameter classes (small, medium, and large). The results showed that 1) by using the correlationship between the diameter at breast height (DBH) and crown width, linear function was suitable to simulate *B. platyphlla*, while quadratic function was the best choice to simulate *L. gmelinii*. 2) The maximum density models for the stands with different diameter classes were established. It was found by simulation that exponential function was most suitable. 3) The reasonable management densities of the stands with different diameter classes that were calculated by the formula of peak width at half height for small diameter class ranged from 0.403—1.336 N_{max} , 0.725—2.057 N_{max} for medium diameter class, and 0.645—1.469 N_{max} for large diameter class. The proportions between the small-, medium-, and large-diameter trees varied among 7:2:1, 6:3:1, and 5:3:2.
Key words: mixed forest; peak width at half height; maximum stand density model; optimum density; forest management

林分密度是对林分进行经营管理的核心指标之一^[1],不但是数量指标,也是质量指标,其大小与林分生长有着密切的关系。作为森林经营管理过程中能够人为可控的主要指标,通过控制和调整林分的密度,可以改善林分的生长环境,从而促进林分的生长,优化林分的结构,提高林分的质量^[2-3]。

目前,很多林业学者对人工林的林分密度进行了广泛研究^[4],但是因为天然针阔混交林的结构是比较复杂的,对其研究较少,这也是当前研究的热点。大兴安岭林区是为我国北方重要生态屏障,其中兴安落叶松与白桦混交林分布广泛,面积约占林区面积的 67%。但存在林分树种单一、林分密度

收稿日期:2020-06-05 修回日期:2020-06-21
基金项目:大兴安岭火烧及采伐迹地幼苗更新和植被恢复影响机制及抚育技术(2017YFC0504003-2);大兴安岭白桦次生林生态修复关键技术研究与示范(2020GG0067)。
作者简介:胡静杉,硕士在读。研究方向:森林经营及可持续发展。E-mail:736028346@qq.com
*通信作者:铁 牛,博士,教授,博士生导师。研究方向:森林经营及可持续发展。E-mail:wangtieniu@126.com

大、结构不合理、稳定性差、森林生态功能不能充分发挥等一系列问题^[5]。如何利用有限的林地资源,让林分有充足的营养空间,探究林分合理经营指数更为重要。因此,确定林分合理经营密度是优化林分结构,对林分合理经营的重要部分^[6]。

本研究以兴安落叶松与白桦混交林为研究对象,利用林分胸径与冠幅的关系,描述不同树种之间的差异,依据胸径和冠幅建立林分最大密度模型,可以准确预测林分总体平均水平,通过半峰宽公式计算出小、中、大各径级层的合理经营密度,为该地区兴安落叶松与白桦混交林的可持续发展及合理经营提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

本研究地区位于大兴安岭西北坡根河林业局潮查林场,地理坐标为 121°30′—121°31′E,50°49′—50°51′N。海拔 810~1 116 m,年降水量 450~550 mm,年温差比较悬殊,最低气温为-50℃,最高气温可达 40℃,年平均气温-5℃,属寒温带大陆性季风气候,昼夜温差比较大。冬季时间长且寒冷,夏季时间短且降水量多。

土壤以棕色针叶林土为主,土层深度 30~45

cm,以兴安落叶松(*Larix gmelinii*)构成的针叶林为主要森林类型,伴生树种有白桦(*Betula platyphlla*)和山杨(*Populus davidi-ana*)。林下植被主要有杜鹃(*Rhododendron* sp.)、杜香(*Ledum palustre*)、笃斯越桔(*Vaccinium uliginosum*)柴桦(*Betula fruticosa*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 选取 2015 年设置的 1 块原始林固定样地(50 m×210 m),将样地划分为 105 个小样方(10 m×10 m),建立单木胸径与冠幅模型,并对模型精度进行检验。所选数据中,80%用于模型的拟合,20%用于模型的检验。选取 1996 年设置的 1 块皆伐样地和 2007 年设置的 2 块皆伐样地(40 m×50 m),将 3 块样地共划分为 60 个小样方(10 m×10 m),通过对所选数据建立最大密度模型,从而确定兴安落叶松与白桦混交林合理经营指数。

对上述样地进行每木检尺,记录调查样地内所有乔木胸径(D)≥5 cm 树种名称、胸径、树高、第 1 枝下高、冠幅(东西×南北)、株数。按照小、中、大径级比将林分分为 3 层,5.0~12.9 cm 为小径级层,13.0~24.9 cm 为中径级层,25.0~36.9 cm 为大径级层,样地基本概况如表 1 所示。

表 1 样地基本概况
Table 1 Basic information of sample plots

林分类型	样方数 /个	面积 /hm ²	平均胸径 /cm	平均树高 /m	坡向	坡度 /(°)	海拔/m	郁闭度	蓄积量 /(m ³ ·hm ⁻²)	株数密度 /(株·hm ⁻²)
原始林	105	1.05	13.5	13.8	阴坡	13	820	0.6	171.6	1 304
皆伐林	20	0.2	8.14	8.6	阳坡	5	820	0.7	64.8	2 448
皆伐林	20	0.2	9.20	8.2	阴坡	5	814	0.7	69.2	2 795
皆伐林	20	0.2	8.62	9.2	阴坡	1	823	0.8	58	2 120

1.2.2 建立胸径-冠幅模型 使用 SPSS 20.0 软件建立不同树种的胸径和树冠面积模型,计算出林分中不同树种的树冠面积^[7-8],从而得出林分最大密度模型。

1.2.3 模型的检验 所选数据中,80%用于模型的拟合,20%用于模型的检验。对上述拟合模型进行检验,检验结果通过决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和偏差(Bias)表示,其计算公式如下:

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^m(y_i-\hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m(y_i-\bar{y}_i)^2}$$
 (1)

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

$$Bias=\frac{\sum_{i=1}^m y_i-\hat{y}_i}{m-n}$$
 (3)

式中, y_i 为实际值, \hat{y}_i 为拟合值, \bar{y}_i 为平均值, $m-n$ 为自由度。

1.2.4 确定林分合理密度指数 基于拟合度最好的胸径-冠幅模型,将林分划分径级代入式(4)计算林分最大密度模型,从而可计算出各径级层的林分平均经营指数及经营指数范围。计算林分最大密度与林分经营指数的公式如下:

$$N_{max}=\frac{10\ 000}{S_{冠}}$$
 (4)

$$D_p=\frac{N_r}{N_{max}}$$
 (5)

式中, N_{max} 为最大林分密度/株·hm⁻², $S_{冠}$ 为林分树冠面积/m², D_p 为平均经营指数, N_r 为林分实际密度/株·hm⁻²。

因为考虑到树与树之间可能存在重叠现象,就这一问题,本研究使用树冠竞争因子^[9],即林分中所

有树木可能拥有的潜在最大树冠面积之和与林地实际面积的比值。计算公式如下：

$$CCF = \left(\left(\sum_{i=1}^m S_{冠}^2 \times \frac{\pi}{4} \right) / S_{地} \right) \times 100\% \quad (6)$$

式中,CCF 为树冠竞争因子, $S_{冠}$ 为林分冠幅面积/ m^2 , $S_{地}$ 为林地实际面积/ m^2 。

利用半峰宽原理来计算出合理经营密度的上限和下限,从而达到减小经营指数分布大、小两端极值误差的作用,计算公式如下：

$$D_{下} = D_p - \frac{1}{2} PWH \quad (7)$$

$$D_{上} = D_p + \frac{1}{2} PWH \quad (8)$$

式中, $D_{上}$ 、 $D_{下}$ 、 D_p 分别为合理经营密度上限、下限及平均经营指数,PWH 为峰宽,其值等于 $2.235 \times S$ (其中 S 为林分平均经营指数的标准差),合理的

经营密度范围应在 $[D_{上}, D_{下}]$ 内^[10-11]。

2 结果与分析

2.1 不同树种的胸径-冠幅模型

原始林样地主要树种是白桦和兴安落叶松,其中白桦有 870 株,兴安落叶松有 1 264 株。因此本研究以胸径 D 为自变量,冠幅 S 为因变量,建立回归模型。利用胸径与冠幅的相关关系,拟合发现白桦以线性函数效果最好,回归方程为: $S = 0.793D - 0.709$;而兴安落叶松以二次函数效果最好,回归方程为: $S = -1.789 + 1.064D - 0.005D^2$,相关系数分别为 0.69 和 0.78。从表 2 可知,Sig. 值均 < 0.05 ,自变量系数均完全通过 T 检验与 P 检验,这说明拟合效果较好,在研究区可用。模型参数结果如表 2 所示。

表 2 兴安落叶松与白桦混交林主要树种树冠面积模型参数

Table 2 Model parameters with canopy area of the dominant species in mixed forest of Larch and birch

树种	参数	标准化参数			T 检验	Sig.
		系数	标准误	Beta		
兴安落叶松	D	1.034	0.080	1.050	12.948	0.000
	D^2	-0.004	0.002	-0.173	-2.129	0.034
	常数	-1.600	0.662		-2.417	0.016
白桦	D	0.793	0.019	0.872	41.205	0.000
	常数	-0.709	0.276		-2.573	0.010

注:兴安落叶松与白桦混交林胸径-冠幅模型的有效使用区间应是胸径在 5~60 cm。

2.2 模型检验

将剩余 20% 的原始林数据对已构建的不同树种胸径树冠面积模型进行检验,结果如表 3 所示。白桦和兴安落叶松 2 种树种的决定系数(R^2)分别为 0.67 和 0.72,均方根误差(RMSE)分别为 4.12 和 7.00,数值相对较低,实测值与预测值偏差(Bias)分别为 1.44 和 2.57,模型的拟合效果良好。

表 3 兴安落叶松与白桦混交林主要树种树冠面积模型检验参数

Table 3 Text parameters with canopy area of the dominant species in mixed forest of Larch and birch

树种	株数	R^2	RMSE	Bias
白桦	135	0.67	4.12	1.44
兴安落叶松	134	0.72	7.00	2.57

2.3 建立不同径级层林分的最大密度模型

通过对兴安落叶松与白桦皆伐林 60 个样方按规定划分径级层,林分实际密度与树冠相应指标如表 4 所示,小、中、大各径级层林分密度范围分别为 200~1 175、100~500 株· hm^{-2} 和 100~200 株· hm^{-2} ;冠幅面积范围分别为 1.08~13.68、8.19~26.95 m^2 和 27.44~27.84 m^2 ;树冠竞争因子随冠

幅面积的增大而增大,分别为 0.253、0.258 和 0.432。

本研究以胸径 D 为自变量,最大林分密度 N_{max} 为因变量,建立回归模型。利用最大林分密度、林分平均经营指数和树冠竞争指数,通过拟合可知各径级胸径与最大林分密度以指数函数效果最好,小、中、大各径级层的拟合方程分别为 $N_{max} = -0.19\ln(D) + 4468.28$ 、 $N_{max} = -0.09\ln(D) + 3 188.70$ 和 $N_{max} = -0.04\ln(D) + 1 169.81$,且显著性差异明显。参数及检验结果如表 5 所示。

2.4 不同径级层林分的合理经营密度确定及检验

由表 6 可知,利用模型可得出小、中、大各径级层的林分最大密度分别为 292~2 632、304~952 株· hm^{-2} 和 241~350 株· hm^{-2} ,合理经营指数范围分别为 0.076~2.536、0.105~2.955 和 0.325~1.659,从而得出林分合理经营密度范围分别为 0.434~1.336、0.725~2.057 N_{max} 和 0.645~1.469 N_{max} ,最小到最大合理经营密度株数配比在 5:3:2、6:3:1、7:2:1 比例间变化。

将小、中、大各径级层的林分按不同经营指数组计算频数,结果如表 7 所示。各径级层林分经营指数

D_N 均在 0.5~1.0 和 1.0~1.5 组中分布较多。样本密度。因此,先将经营指数的频数分布进行假设检验,本研究则采用 K-S 检验,结果如图 1~图 3 所示。

表 4 各径级层林分实际密度与树冠相应指标

Table 4 Actual density of stand and corresponding indexes of tree crown of various diameter class layers					
径级层	胸径范围 /cm	样方数 /个	林分密度范围 /(株·hm ⁻²)	冠幅面积范围 /m ²	树冠竞争因子
小径级层	5~12.9	60	200~1 175	1.08~13.68	0.253
中径级层	13~24.9	60	100~500	8.19~26.95	0.258
大径级层	>25	60	100~200	27.44~27.84	0.432

表 5 各径级胸径与最大林分密度参数及检验

Table 5 Parameters for the mean DBH and maximum density of various diameter class layers							
径级层	参数	标准化参数			T 检验	Sig.	R ²
		系数	标准误	Beta			
小径级层	ln(<i>D</i>)	-0.19	0.005	-0.74	-34.79	0.00	0.546
	常数	4 468.28	351.64		24.08	0.00	
中径级层	ln(<i>D</i>)	-0.09	0.01	-0.76	-8.38	0.00	0.571
	常数	3 188.70	575.32		5.54	0.00	
大径级层	ln(<i>D</i>)	-0.04	0.01	-0.83	-3.69	0.00	0.643
	常数	1 169.81	333.73		3.51	0.00	

表 6 各径级层最大密度与经营密度范围统计

Table 6 Statistics of maximum density and density for management of various diameter layers				
径级层	平均胸径范围 /cm	林分最大密度范围 /(株·hm ⁻²)	经营指数范围 /平均值	经营密度范围
小径级层	5~12.9	292~2 632	0.076~2.536/0.880	0.434~1.336
中径级层	13~24.9	304~952	0.105~2.955/1.391	0.725~2.057
大径级层	>25	241~350	0.325~1.659/1.013	0.645~1.469

表 7 各径级层经营指数频数正态分布的假设检验

Table 7 Hypothesis test for normal distribution of density for management of various diameter class layers								
径级层	D_N 分组	频数	频率/%	累计频率/%	偏度	偏度标准误	峰度	峰度标准误
小径级层	0~0.5	184	18.20	17.01	0.588	0.077	0.148	0.154
	0.5~1.0	481	47.58	44.46				
	1.0~1.5	269	26.60	24.86				
	1.5~2.0	64	6.33	5.91				
	2.0~2.5	11	1.09	1.02				
	2.5~3.0	2	0.20	0.18				
中径级层	0~0.5	2	3.77	0.18	0.415	0.327	0.051	0.644
	0.5~1.0	12	22.64	1.11				
	1.0~1.5	20	37.74	1.85				
	1.5~2.0	11	20.76	1.02				
	2.0~2.5	6	11.32	0.56				
	2.5~3.0	2	3.77	0.18				
大径级层	0~0.5	1	5.56	0.09	-0.019	0.536	-0.216	1.038
	0.5~1.0	9	50.00	0.83				
	1.0~1.5	6	33.33	0.56				
	1.5~2.0	2	11.11	0.18				

3 结论与讨论

3.1 讨论

通过对大兴安岭林区原始林胸径与冠幅的相关

关系进行分析,拟合发现:2 树种冠幅与直径均呈线性关系,即树冠面积越大,林分可接收的营养面积也越大,因为光合作用而产生的产物累计的越来越多,从而林木的胸径也会增大。白桦以线性函数效果最

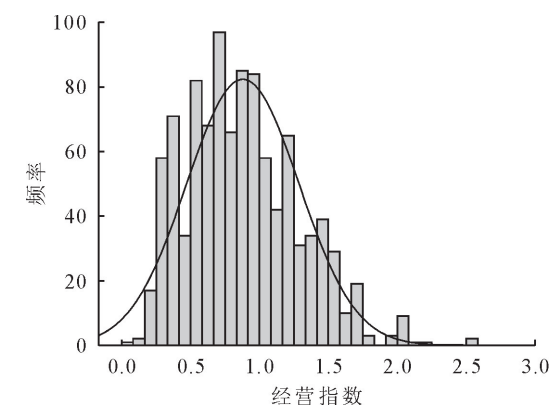


图 1 小径级经营指数
Fig. 1 Small trail level operations index

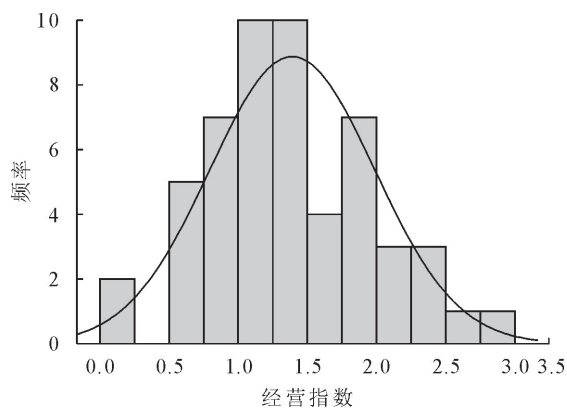


图 2 中径级经营指数
Fig. 2 Mid-range operating index

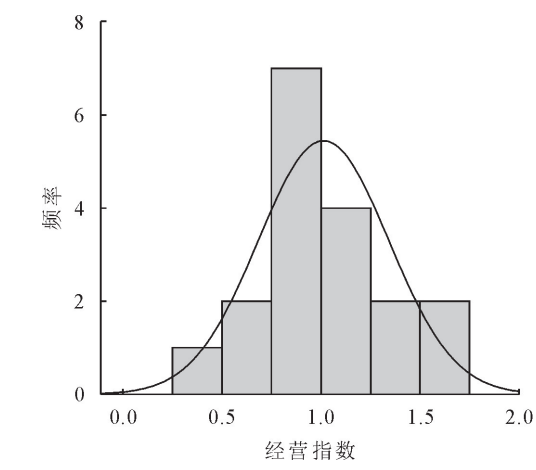


图 3 大径级经营指数
Fig. 3 Operating index for large diameter

好,回归方程为: $S = 0.793D - 0.709$;而兴安落叶松以二次函数效果最好,回归方程为: $S = -1.789 + 1.064D - 0.005D^2$,2 个方程相关系数分别为 0.69 和 0.78。白桦属阔叶树种,生长较快,则冠幅随胸径变化速度较快;而针叶树种兴安落叶松生长速度较白桦慢些,胸径达到一定值时,胸径变化则不明显。对模型进行检验,2 种树种的实测值与预测

值偏差(Bias)分别为 1.44 和 2.57,均方根误差(Rmse)分别为 4.12 和 7.00,数值相对较低,且决定系数 R^2 分别为 0.67 和 0.72,模型的拟合效果较好。这与 Bragg^[12]的研究相一致,不同树种之间,冠幅随胸径变化情况还是有一定差异的,其中树种的冠幅的大小和林分胸径的关系最为密切,林分密度是对林分冠幅影响最显著的因子^[13-14]。

通过对皆伐林划分径级后,从而建立不同径级层林分的最大密度模型,拟合发现各径级胸径与最大林分密度均以指数函数效果最佳,利用模型可得出小、中、大各径级的林分最大密度分别为 292~2 632、304~952 株·hm⁻² 和 241~350 株·hm⁻²,合理经营指数范围分别为 0.076~2.536、0.105~2.955 和 0.325~1.659,当小、中、大径级经营指数分别小于 0.076、0.105 和 0.325 时,说明该林分分布较稀疏,林分的株数密度不合理,随着林分的生长,林分个体间的差异性会更加明显,导致林分结构不稳定,不利于林分的生长,在营林过程中应加大力度增加林分的密度;当小、中、大径级经营指数分别大于 2.536、2.955 和 1.659 时,说明林分分布较密集,竞争越强烈,越抑制林分的生长,林分株数密度结构也不合理,应进行抚育间伐及时调整林分到合理的株数密度。通过半峰宽公式计算出不同径级层林分密度的上下限,得出小、中、大各径级林分合理经营密度区间分别为 0.434~1.336、0.725~2.057 N_{max} 和 0.645~1.469 N_{max} ,小、中、大各径级最小到最大合理经营密度株数配比在 5:3:2、6:3:1、7:2:1 间变化。合理的林分密度确定是判定是否需要间伐和间伐强度的重要依据^[15-16]。在经营管理过程中,若以培育小径级林分为目标,应对林分进行较高的经营密度管理;若以培育大径级林分为目标,则应进行相对较低的经营密度管理。这与张梦弢等^[17]的研究结果相一致。

兴安落叶松与白桦混交林合理经营密度的确定是林分经营管理中的一个重要指标,在实际应用中,一般不能一次直接将林分间伐到合理的密度范围内^[19-20],若间伐强度太小,林分密度依然大,未能达到林分合理密度范围;若间伐的强度太大,使林分的生长环境改变,从而对林分的生长造成更不利的影响,所以应对实际的林分结构进行严谨分析,缓慢的进行间伐工作,及时增加保留木,使林分可以适应环境变化,慢慢调整到合适的生长密度^[20-23]。随着林分年龄的增长,林分径阶也在不断地变化,为保证林中有充足的采光,以供林分正常生长,需不断地根据径阶调控林内的林木株数。形成合理的林分结构并发挥有效功能,这对该地区的可持续发展及合理经

营起到重要作用。

3.2 结论

对大兴安岭林区原始林胸径与冠幅的相关关系进行分析,拟合发现,2 树种冠幅与直径均呈线性关系,白桦以线性函数效果最好,回归方程为: $S = 0.793D - 0.709$;而兴安落叶松以二次函数效果最好,回归方程为: $S = -1.789 + 1.064D - 0.005D^2$

对大兴安岭林区皆伐林划分径级后,从而建立不同径级层林分的最大密度模型。通过拟合发现,各径级胸径与最大林分密度均以指数函数效果最佳。

通过半峰宽公式计算出不同径级层林分密度的上下限,得出小、中、大各径级林分合理经营密度区间分别为 $0.434 \sim 1.336$ 、 $0.725 \sim 2.057N_{\max}$ 和 $0.645 \sim 1.469 N_{\max}$,小、中、大各径级最小到最大合理经营密度株数配比在 $5 : 3 : 2$ 、 $6 : 3 : 1$ 、 $7 : 2 : 1$ 间变化。

参考文献:

[1] 孙喜林,齐颜君,王丹,等. 林分密度的确定方法研究[J]. 现代农业科技,2013(4):179.

[2] 丁继伟. 五台山华北落叶松天然林林分密度效应及其调控机制的研究[D]. 大同:山西农业大学,2018(6):7-8.

[3] 刘君然. 林分密度理论及应用[M]. 北京:中国林业出版社,1994.

[4] 李忠敏. 论林分密度在营林生产中的应用[J]. 农业开发与装备,2019(10):73-75.

[5] 蔡体久. 大兴安岭冻土和森林的奇迹[J]. 森林与人类,2013 (Supp. 1):129-134.

[6] BARRIO ANTA M, GONZALEZ A. Development of a stand density management diagram for even-aged pedunculate oak stands and its use in designing thinning schedules[J]. Forestry, 2005, 78(3):209.

[7] 巨文珍,王新杰,付尧,等. 长白落叶松林冠空隙度随林木因子的变化[J]. 东北林业大学学报,2010,38(7):1-4.

JU W Z, WANG X J, FU Y, et al. Variation of crown shyness with stand factors in *Larix olgensis* plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(7):1-4. (in Chinese)

[8] 雷相东,张则路,陈晓光. 长白落叶松等几个树种冠幅预测模型的研究[J]. 北京林业大学学报,2006,28(6):75-79.

LEI X D, ZHANG Z L, CHEN X G. Crown-width prediction models for several tree species including *Larix olgensis* in Northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(6):75-79. (in Chinese)

[9] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京:中国林业出版社,2006.

[10] 郑天汉. 福建柏人工林合理经营密度及其应用研究[J]. 福建

林业科技,1996(4):15-19.

[11] 林思祖. 杉木人工林合理经营密度[J]. 福建林学院学报, 1988, 8(4):333-339.

[12] BRABG D C. A local basal area adjustment for crown width prediction[J]. Northern Journal of Applied Forestry, 2001, 18 (1):22-28.

[13] XU H, SUN Y J, WANG X J, et al. Linear mixed-effects models to describe individual tree crown width for China-fir in Fujian Province, Southeast China[J]. PloS One, 2015, 10(4): e0122257.

[14] 韩艳刚. 樟子松人工固沙林冠幅-胸径模型[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5):132-140.

HAN Y G. Canopy-DBH Models for Sand-fixing Plantation of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* [J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5):132-140. (in Chinese)

[15] 张更新,张明铁. 兴安落叶松合理经营密度表的编制[J]. 林业科学研究,1992,9(2):243-248.

[16] DUCEY M J, KNAPP R A. A stand density index for complex mixed species forests in the Northeastern United States [J]. Forest Ecology and Management, 2010, 260(9):1613-1622.

[17] 张梦蛟,亢新刚,杜志,等. 云冷杉天然针阔混交林合理经营密度研究[J]. 山西农业大学学报,2019,39(1):47-53.

ZHANG M T, KANG X G, DU Z, et al. Optimal stand-density study of spruce-fir forest in Changbai Mountain[J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2019, 39(1):47-53. (in Chinese)

[18] 田猛,曾伟生,孟京辉,等. 福建杉木人工林密度控制图研制及应用[J]. 西北林学院学报,2015,30(3):157-163.

TIAN M, ZENG W S, MENG J H, et al. Development and application of density management diagram for *Cunninghamia lanceolata* plantation in Fujian[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(3):157-163. (in Chinese)

[19] 崔崧,肖锐,王文帆,等. 小兴安岭针阔混交林碳汇结构特征的研究[J]. 森林工程,2020,36(6):30-35.

[20] 丁继伟,张芸香,郭跃东,等. 华北落叶松天然林密度对林下植被物种组成和多样性的影响研究[J]. 西北林学院学报,2018, 33(4):10-16.

DING J W, ZHANG Y X, GUO Y D, et al. Influences of the density on understory species composition and diversity of *Larix principis-rupprechtii* natural forest [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4):10-16. (in Chinese)

[21] 白静. 油松人工林生长特征及其与林分结构关系研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.

[22] 孙清芳,刘滨凡,马燕娥. 山河屯林业局红松阔叶混交林林分空间结构特征[J]. 森林工程,2019,35(6):1-5.

[23] 郑海水,黎明,汪炳根,等. 西南桦造林密度与林木生长的关系[J]. 林业科学研究,2003,16(1):81-86.