

基于简单竞争指数的南方红豆杉人工林树冠形状模拟

欧建德

(福建明溪县林业局,福建 三明 365200)

摘要:以福建省明溪县南方红豆杉人工林为对象,用逐步回归方法建立以单木大小、单木竞争指数为自变量,南方红豆杉冠幅、冠长、冠形率和树冠率等为因变量的树冠形状数学模型,并根据数学模型的判定系数,筛选出树冠形状优化模型。采用独立样本的检验方法,对优选南方红豆杉树冠形状模型进行t检验与偏差检验。结果表明,导入简单竞争指数自变量后的南方红豆杉冠幅、冠长和树冠率模型的判定系数明显高于与竞争无关的相应树冠形状模型,且当选南方红豆杉树冠形状优化模型。竞争对南方红豆杉冠幅、冠长生长有着显著的抑制作用,竞争对南方红豆杉冠形率有明显的促进作用,降低单木竞争指数可显著促进南方红豆杉冠幅、冠长生长。优选的南方红豆杉树冠形状模型均通过t检验,且偏差检验结果均较理想,可以用于生产中的树冠形状预测。

关键词:南方红豆杉;竞争指数;树冠形状;模拟;优化

中图分类号:S791.49 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)05-0110-06

Crown Shape Simulation of *Taxus chinensis* var. *mairei* Plantation Based on Simple Competition Index

OU Jian-de

(Forestry Bureau of Mingxi County, Sanming 365200, Fujian, China)

Abstract: Taking the *Taxus chinensis* var. *mairei* plantation in Mingxi County of Fujian Province as research object, the estimation mathematical models of crown shape were built by using the method of stepwise regression, in which a function taking individual tree size and individual tree competition index as variables, the crown width, crown length, crown shape rate and crown rate as dependent variables was involved, the optimal crown shape model was selected according to the decision coefficient of the mathematical model. T-test and deviation test were carried out on the optimal model of the *T. chinensis* var. *mairei* crown shape by using the test method of independent samples. The results showed that after introducing variables of simple competition index, the determination coefficients of crown width, crown length and crown rate models were significantly higher than those of competition-unrelated model, and those models were selected as the optimal crown shape models. Competition had significant inhibiting effects on the crown width, crown length growth and crown rate, but the competition had no significant effect on the crown shape rate. Those optimal crown shape models passed the t-test, and the deviation test results were satisfactory, which can be used to predict the crown shape in production. Reducing the simple competition index can significantly promote the crown width, crown length growth and crown rate of *T. chinensis* var. *mairei*.

Key words: *Taxus chinensis* var. *mairei*; competition index; crown shape; simulation; optimization

森林冠层是树木转换、利用太阳能形成生产力的主要场所^[1],森林树冠生长与结构特征改变着森林系统利用地上空间及资源的能力,影响着森林生态系统与土壤、大气等外界系统进行热量、水分和其他物质交换^[1-2],与林木生长有着密切相关。树木的生产力取决于树冠结构^[3],树冠结构影响干形^[4-6]。调控树冠形态^[7-10]已成为提高林木培育成效重要技术,科学预估单木树冠形状是其重要内容。在森林中,个体竞争的结果决定了单木树冠在林层中的大小及位置^[11],必然影响着树冠形状结构。当前国内外基于竞争因素树冠形状模拟研究^[11-13]尚少。

南方红豆杉(*Taxus chinensis* var. *mairei*)是中国南方重要珍贵用材树种,当前基于用材林培育目标的研究大多围绕遗传改良^[6,14-15]、培育^[8,16-20]等方面进行,迄今尚未见其树冠模拟方面研究报道。科学调控树冠形状可提高南方红豆杉培育成效^[8],开展树冠形状模拟研究显得十分重要。冠幅、冠形率与树冠率是描绘树冠形态的重要因子^[10],亦是树冠形态调控的主要指标^[8]。本研究以福建明溪县南方红豆杉人工林为对象,建立并优化以单木大小、单木竞争指标为自变量的树冠形状预估模型,揭示竞争影响树冠形状规律,为预估南方红豆杉树冠形态以及调控树冠形态技术提供技术与理论支持。

1 研究区概况

研究地在福建省西北部的明溪县(26°8'—26°39'N,117°4'—118°47'E),以低山丘陵地貌为主,地处武夷山脉南面,属中亚热带海洋性季风气候,年均

温18.1℃,年均降水量1786 mm,5—6月最多,全年平均蒸发量1364 mm,年均日照时数1750.7 h,无霜期283 d,年均相对湿度81%^[20]。供试材料取自明溪县城关乡王桥(26°20'N,117°9'E)的15年生南方红豆杉人工纯林分,现有林分密度2850株·hm⁻²,平均胸径5.7 cm,平均树高10.2 m。海拔320 m,平均坡度20°左右,土壤为山地红壤,立地肥沃,土壤pH 4.9^[8]。林下植被主要有狗骨柴(*Tricalysia dubia*)、白背叶(*Mallotus apelta*)、毛冬青(*Ilex pubescens*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、福建莲座蕨(*Angiopteris fokiensis*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)等^[8]。

2 材料与方法

2.1 数据调查

2.1.1 南方红豆杉生长及树冠形状调查 2017年12月于15年生南方红豆杉造林地内选择典型地貌设置30 m×30 m样地,采用每木检尺方法,对样地内南方红豆杉个体分别用围尺、激光测高仪和皮尺测量,逐株测量胸径、树高、枝下高、东西和南北冠幅等,分别精确至0.1 cm、0.1 m、0.1 m、0.1 m;共调查了231株南方红豆杉个体,并用全站仪测量每棵树木的相对坐标^[11]。分别按照冠长=树高-枝下高^[21-22],冠幅=(东西冠幅+南北冠幅)/2^[21-22],冠形率=冠长/冠幅^[21-22],树冠率=冠长/树高^[21-22],计算冠长、冠幅、冠形率、树冠率。样地基本情况见表1。

表1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sample plots

性状	树龄/a	胸径/cm	树高/m	冠幅/m	冠长/m	冠形率	树冠率
最大值	15	14.3	7	3.9	5.5	2.833	0.66
最小值	15	4	2.7	1.6	1.3	0.605	0.27
均值	15	9.7	5.6	2.6	3.7	1.444	0.81

2.1.2 南方红豆杉简单竞争指标 采用邻近木法确定对象木周围的竞争木时,取离对象木最近的4棵树来计算 Hegyi 简单竞争指标(CI)^[11]。Hegyi 简单竞争指标(CI)的表达式^[11]为:

$$CI_i = \sum_{j=1}^N (D_j/D_i)/(DIST)_{ij} \quad (1)$$

式中,CI_i 是对象木 i 的简单竞争指标;D_i 是对象木的直径;D_j 是对象木周围第 j 株竞争木的直径(j=1,2,3,...,N);DIST_{ij} 表示对象木 i 与竞争木 j 之间的距离^[11]。

2.2 树冠形状模型的拟合与优选

随机选择70%(162棵)南方红豆杉单株的数据作为建模数据。树冠形状模型表达式如下:

$$Y=aD+bH+cCI+d \quad (2)$$

式中,a、b、c、d 是待解的系数,Y 表示冠幅(CW)、冠长(CL)、冠形率(CSR),CI 表示竞争指数,D 和 H 分别是对象木的胸径和树高^[11]。

运用 SPSS 21.0 软件按照逐步回归方法进行数学模型拟合。根据拟合模型判定系数 R² 的大小,筛选出优化树冠形状模型。

2.3 优选树冠形状模型检验

采用独立样本进行检验,即利用随机选择30%(69棵)南方红豆杉单株的数据作为检验数据,用优选后的树冠形状模型分别计算出检验树木树冠形状预测值后^[11],采用 SPSS21.0 软件中的配对样本

t 检验方法,进行预测值与实测值的 *t* 检验。通过计算平均偏差(M_E)、平均绝对偏差(M_{AE})、平均相对偏差(M_{PE})、平均相对偏差绝对值(M_{APE})等系列偏差指标,评价模型预测能力^[23-25],计算公式详见参考文献[23]、[24]、[25]。

3 结果与分析

3.1 冠幅模型拟合建立与比较

采用逐步回归法对南方红豆杉冠幅进行回归拟合,拟合结果见表 2。结果表明,对冠幅进行拟合时,变量 CI 、 D 依次进入,拟合的系列模型中均没有出现 H ,说明 H 对冠幅的影响不显著,系列冠幅拟合模型中的参数的常量、 D 、 CI 的 *t* 检验统计量与显著性检验的 *P* 值均 <0.01 ,表现均理想;系列冠幅拟合模型均通过回归模型方差分析检验。冠幅模型 1 与模型 2 的调整的判定系数 R^2 分别达 0.236、0.272,模型 2 的判定系数 $>$ 模型 1,表明采用模型 2

拟合南方红豆杉冠幅的效果更好,优选冠幅模型: $CW=2.609+0.083D-0.393CI$ 。

优选冠幅模型配对 *t* 检验和偏差检验结果见表 3。由表 3 看出,优选模型的 *t* 检验的 *P* 值达 0.636, >0.05 ,表明冠幅拟合值与实测值间无显著性差异;优选模型的冠幅预测值为 2.64 m,仅较实测值的 2.66 m 小约 0.02 m,远小于实测过程的 0.1 m 精度要求。优选模型的 M_E 、 M_{AE} 、 M_{PE} 、 M_{APE} 分别为 -0.025、0.342 m、-1.589% 和 13.213%,优选模型系列偏差指标表现理想,能够用于生产中的冠幅生长预测。

为直观比较导入竞争因子对冠幅拟合的影响,以胸径为自变量拟合冠幅模型(表 1)。可以看出冠幅模型 3: $CW=1.152+0.148D$,模型调整的判定系数 $R^2=0.163$,明显小于优选冠幅模型的 0.272,说明冠幅模型导入竞争因子后的拟合效果更佳,可提高拟合精度。

表 2 南方红豆杉冠幅数学模型拟合结果

Table 2 Fitting results of mathematical model for the crown width of *T. chinensis* var. *mairei*

模型编号	模型参数	回归系数检验				回归模型方差分析	
		参数值	<i>t</i> 检验统计量	<i>P</i>	R^2	<i>F</i> 检验统计量	<i>P</i>
1	常量	3.646	23.917	0.000	0.236	50.614	0.000
	CI	-0.504	-7.114	0.000			
2	常量	2.609	6.951	0.000	0.272	31.110	0.000
	CI	-0.393	-5.004	0.000			
	D	0.083	3.010	0.003			
3	常量	1.152	4.535	0.000	0.163	32.323	0.000
	D	0.148	5.685	0.000			

表 3 优化的南方红豆杉树冠形状模型检验结果

Table 3 Test results of optimized crown shape model of *T. chinensis* var. *mairei*

树冠形状	模型	<i>t</i> 检验偏差检验				M_E	M_{AE}	$M_{PE}/\%$	$M_{APE}/\%$
		均值	<i>t</i> 值	<i>P</i>					
冠幅/m	$CW=2.609+0.083D-0.393CI$	实测值 拟合值	2.66 2.64	0.476 0.636	0.636	0.025	0.342	-1.589	13.213
冠长/m	$CL=1.700+0.531H-0.471CI$	实测值 拟合值	3.63 3.70	-1.326 0.189	0.189	-0.072	0.352	-4.266	10.804
冠形率	$CSR=0.525+0.618H+0.055D$	实测值 拟合值	1.397 1.440	-1.344 0.183	0.183	-0.043	0.208	-7.451	16.978
树冠率	$CR=0.969-0.084CI-0.023H$	实测值 拟合值	0.659 0.674	-1.567 0.122	0.122	-0.015	0.062	-4.529	10.839

3.2 冠长模型拟合与比较

南方红豆杉冠长回归拟合结果见表 4。可以看出对冠长进行拟合时,变量 H 、 CI 依次进入,且随变量 CI 进入与增加,系列冠长拟合模型的调整判定系数 R^2 由模型 4 的 0.302 逐渐增加至模型 5 的 0.409,表明冠长模型拟合效果随单木竞争指标进入而变好,模型 $CL=1.700+0.531H-0.471CI$ 是

南方红豆杉冠长优选模型。系列冠长拟合模型(模型 4、5)均通过回归模型方差分析检验;系列冠长模型中的变量 H 、 CI 的 *t* 检验统计量与显著性检验的 *P* 值均 <0.01 ,表明树高和单木竞争指标对冠长生长有着显著性影响;模型 4 中 CI 的显著性检验的 *P* 值为 0.000, <0.10 ,表明简单竞争指标 CI 对冠长生长有着显著影响,说明冠长模型拟合中导入

竞争因子十分重要。

优选冠长模型的配对 *t* 检验和偏差检验结果见表 3。可以看出, 优选模型 *t* 检验的 *P* = 0.189, >0.05, 表明冠长拟合值与实测值间无显著性差异; 且模型的冠长预测值为 3.70 m, 仅较实测值的 3.63

m 稍大、约 0.07 m, 小于实测过程的 0.1 m 冠长精度要求。由表 3 可见, 模型的 M_E 、 M_{AE} 、 M_{PE} 、 M_{APE} 等分别为 -0.072 m、0.352 m、-4.266% 和 10.804%, 表明优选冠长模型拟合效果理想, 能够用于预测冠长生长。

表 4 南方红豆杉冠长数学模型拟合结果

Table 4 Fitting results of mathematical model for the crown length of *T. chinensis* var. *mairei*

模型编号	模型参数	回归系数检验				回归模型方差分析	
		参数值	<i>t</i> 检验统计量	<i>P</i>	R^2	<i>F</i> 检验统计量	<i>P</i>
4	常量	1.188	3.951	0.000	0.302	70.791	0.000
	<i>H</i>	0.446	8.414	0.000			
5	常量	1.700	5.821	0.000	0.409	56.237	0.000
	<i>H</i>	0.531	10.372	0.000			
	<i>CI</i>	-0.471	-5.468	0.000			

3.3 冠形率模型拟合与比较

南方红豆杉冠形率回归拟合结果见表 5, 由此看出, 对冠形率进行拟合时, 变量 *H*、*D* 依次进入, 且随变量 *D* 进入与增加, 系列冠形率拟合模型调整的判定系数 R^2 由最初模型 6 的 0.212 增加至模型 7 的 0.232, 模型拟合效果变好。系列冠形率拟合模型(模型 6、7)均通过回归模型方差分析检验, 模型中变量 *H*、*D* 的 *t* 检验统计量与显著性检验的 *P* 值均 < 0.05, 表明树高和胸径对冠形率有着显著性影响; 根

据系列冠形率模型调整的判定系数, 模型 $CSR = 0.525 + 0.618H + 0.055D$ 是冠形率优选模型。

由表 3 可见, 模型 *t* 检验的 *P* 值是 0.183, > 0.05, 表明冠形率拟合值与实测值间无显著性差异, 通过 *t* 检验。且优选模型冠形率预测值为 1.440, 仅较实测值 1.397 稍大 0.03, 基本满足预测精度要求。由表 3 可见模型的 M_E 、 M_{AE} 、 M_{PE} 、 M_{APE} 分别为 -0.043、0.208、-7.451%、16.978%, 偏差指标表现较理想, 能够预测冠形率。

表 5 南方红豆杉冠形率数学模型拟合结果

Table 5 Fitting results of mathematical model for crown shape rate of *T. chinensis* var. *mairei*

模型编号	模型参数	回归系数检验				回归模型方差分析	
		参数值	<i>t</i> 检验统计量	<i>P</i>	R^2	<i>F</i> 检验统计量	<i>P</i>
6	常量	0.387	2.371	0.019	0.212	44.358	0.000
	<i>H</i>	0.192	6.160	0.000			
7	常量	0.525	3.263	0.001	0.232	25.380	0.000
	<i>H</i>	0.618	7.090	0.000			
	<i>D</i>	0.055	-2.287	0.024			

3.4 树冠率模型拟合与比较

南方红豆杉树冠率回归拟合结果见表 6。结果表明, 对树冠率进行拟合时, 变量 *CI*、*H* 依次进入, 且随变量 *H* 进入与增加, 系列树冠率拟合模型 R^2 由最初模型 8 的 0.223 逐渐增加至模型 9 的 0.253, 表明模型的拟合效果逐渐变好。系列树冠率拟合模型(模型 8、9)均通过回归模型方差分析检验, 模型中变量 *CI*、*H* 的 *t* 检验统计量与显著性检验的 *P* 值均 < 0.01, 表明简单竞争指数、树高对树冠率有着显著性影响; 根据拟合模型调整的判定系数, 模型 $CR = 0.969 - 0.084CI - 0.023H$ 是冠长优选模型。

由表 3 可见, 模型 *t* 检验的 *P* 值是 0.122, > 0.05, 表明树冠率拟合值与实测值间无显著性差异, 均通过 *t* 检验。且优化模型冠形率预测值为 0.674, 仅较实测值 0.659 稍大 0.015, 基本满足预测精度要求。由表 3 可见, 其 M_E 、 M_{AE} 、 M_{PE} 、 M_{APE} 分别为 -0.015、0.062、-4.529%、10.839%, 模型偏差表现较理想, $CR = 0.969 - 0.084CI - 0.023H$ 能够用于预测树冠率。

为直观比较导入竞争因子对树冠率拟合的影响, 以树高为自变量拟合树冠率模型(表 6), 其冠幅模型 10: $CR = 0.878 - 0.039H$, R^2 为 0.098, 明显小于优选模型的 0.253, 说明树冠率模型导入竞争因子后的拟合效果更佳, 提高拟合精度。

由表 3 可见, 模型 *t* 检验的 *P* 值是 0.122,

表6 南方红豆杉树冠率数学模型拟合结果

Table 6 Fitting results of mathematical model for crown shape rate of *T. chinensis* var. *mairei*

模型编号	模型参数	回归系数检验			回归模型方差分析	
		参数值	t 检验 统计量	P	R ²	F 检验 统计量
8	常量	0.863	28.697	0.000	0.223	47.139
	CI	-0.096	-6.866	0.000		
9	常量	0.969	19.862	0.000	0.253	28.264
	CI	-0.084	-5.840	0.000		
	H	-0.023	-2.735	0.007		
10	常量	0.878	17.288	0.000	0.098	18.583
	H	-0.039	-4.331	0.000		

4 结论与讨论

竞争显著影响南方红豆杉冠幅、冠长生长和树冠率表现,冠幅、冠长、树冠率与简单竞争指数负相关;但相邻树木间竞争对南方红豆杉的冠形率无直接显著影响。简单竞争指数显著抑制了南方红豆杉的冠幅、冠长、树冠率等树冠形态。树冠形态是林木个体生长与竞争共同作用的结果。导入简单竞争指数自变量后明显提高了南方红豆杉冠幅、冠长、树冠率等树冠形状模型的预测精度。本研究筛选的系列优化的南方红豆杉树冠形状模型的预测性能较好,能较好地预估树冠形状,为南方红豆杉人工林的精确可视化奠定了基础。

简单竞争指数显著影响南方红豆杉冠幅、冠长生长,这与前人在拟合杉木(*Cunninghamia lanceolata*)^[11]树冠形状研究结论相验证;究其原因是相邻树木间竞争影响着树冠水平与垂直方向生长。导入竞争因子可提高南方红豆杉树冠形状模型的拟合效果,这与前人的杉木研究结论相一致^[11];这是相邻树木间竞争改变树冠生长环境所致。相邻树木间显著改变南方红豆杉冠幅、冠长生长以及树冠率的大小,且冠幅、冠长、树冠率均与简单竞争指数负相关,这与前人关于竞争显著影响杉木(*Cunninghamia lanceolata*)^[11]、峦大杉^[21](*C. konishii*)、乳源木莲(*Manglietia yuyuanensis*)^[26]树冠形状的结论相互验证。

影响南方红豆杉树冠形态的主导林木因素以及作用方向发生变化。影响冠幅的主导因子是胸径,而树高是冠长、冠形率、树冠率的主导因子。树高对冠长、冠形率等树冠形态表现出促进作用,但表现出抑制树冠率作用。

竞争对南方红豆杉不同树冠形状影响作用不同。简单竞争指数显著影响南方红豆杉冠幅、冠长和树冠率;但对冠形率无显著直接影响,冠形率对相邻树木间竞争不敏感,这与本试验样本株间密度相

对一致,个体简单竞争指数变化范围较小有关。简单竞争指数抑制树冠形态作用从大到小依次为冠长、冠幅、树冠率。与前人在竞争影响峦大杉^[21]树冠形状的研究结论一致。推测认为竞争影响南方红豆杉冠形率是通过竞争对冠幅、冠长影响程度差异来实现。

参考文献:

- [1] 李火根,黄敏仁.杨树新无性冠层特性与生长关系的研究[J].林业科学,1999,35(5):34-37.
LI H G, HUANG M R. The relationship between crown characteristics and stemwood growth of new Poplar clones [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1999, 35(5): 34-37. (in Chinese)
- [2] 段勘,马履一,贾黎明,等.北京地区侧柏人工林密度效应[J].生态学报,2010,30(12):3206-3214.
DUAN J, MA L Y, JIA L M, et al. The density effect of *Platycladus orientalis* plantation in Beijing area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(12): 3206-3214. (in Chinese)
- [3] BIGING G S, DOBBERTIN M. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees[J]. Forest Science, 1992, 38(3):695-720.
- [4] 赵丹宁,熊耀国,宋露露,等.白花泡桐树冠结构、生长性状的选择对于形改良的影响[J].林业科学研究,1995,8(1):82-87.
- [5] 邬荣领,王明麻,黄敏仁,等.黑杨派新无性系研究——V.树冠结构与干形改良[J].南京林业大学学报:自然科学版,1988(3):1-14.
- [6] 欧建德,罗宁,吴志庄.幼龄期南方红豆杉生长和形质性状的优树家系遗传变异[J].西北林学院学报,2017,32(2):117-122,129.
OU J D, LUO N, WU Z Z. Variation of the family genetics of the plus trees *Taxus wallichiana* var. *mairei* at young stage [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(2): 117-122, 129. (in Chinese)
- [7] 欧建德,吴志庄,康永武.杉莲混交林中乳源木莲树冠特征与生长形质综合表现通径分析[J].西北林学院学报,2019,34(4):114-121.
OU J D, WU Z Z, KANG Y W. Path analysis between canopy characteristics and comprehensive performance of growth, form quality of *Manglietia yuyuanensis* in mixed stands with *Cun-*

- ninghamia lanceolata*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 114-121. (in Chinese)
- [8] 欧建德,吴志庄.幼龄南方红豆杉人工林树冠形态特征与生长形质通径分析[J].南京林业大学学报:自然科学版,2019,43(4):185-191.
- OU J D,WU Z Z.Path analysis between canopymorphological characteristics and growth form quality of *Taxus chinensis* var. *mairei* plantation at young age [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2019, 43 (4): 185-191. (in Chinese)
- [9] 欧建德,吴志庄,康永武.乳源木莲树冠形态与生长形质通径分析[J].西南林业大学学报:自然科学版,2019,39(1):36-42.
- OU J D,WU Z Z,KANG Y W.Path analysis on crown morphology and growth shape of *Manglietia yuyuanensis* [J]. Journal of Southwest Forestry University:Natural Sciences Edition, 2019,39(1):36-42. (in Chinese)
- [10] 欧建德,吴志庄,康永武.峦大杉树冠特征与生长形质通径分析[J].东北林业大学学报,2018,46(11):8-11,40.
- OU J D,WU Z Z,KANG Y W.Path analysis between canopy characteristics and growth, form quality of *Cunninghamia konishii*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(11):8-11,40. (in Chinese)
- [11] 覃阳平,张怀清,陈永富,等.基于简单竞争指数的杉木人工林树冠形状模拟[J].林业科学研究,2014,27(3):363-366.
- QIN Y P,ZHANG H Q ,CHEN Y F, et al. Canopy shape simulation of Chinese fir plantation based on simple competition index [J]. Forest Research, 2014, 27 (3): 363-366. (in Chinese)
- [12] PURVES D W,LICHSTEIN J W,PACALA S W.Crown plasticity and competition for canopy space: a new spatially implicit model parameterized for 250 north American tree species[J]. PLoS One,2007,2(9):870-881.
- [13] DAVIES O,POMMERENING A.The contribution of structural indices to the modelling of Sitka spruce(*Picea sitchensis*) and birch (*Betula* spp) crowns[J]. For. Ecol. Manage. , 2008,256:68-77.
- [14] 欧建德,吴志庄.景观型南方红豆杉家系和单株选择[J].浙江农林大学学报,2016,33(1):102-108.
- OU J D,WU Z Z.Excellent families and plus trees of *Taxus wallichiana* var. *mairei* for landscaping [J]. Journal of Zhejiang A&F University,2016,33(1):102-108. (in Chinese)
- [15] 欧建德,罗宁.南方红豆杉珍贵用材优良家系和单株配合选择[J].中国农学通报,2017,33(22):41-46.
- OU J D,LUO N Combination selection of excellent families and plus trees of *Taxus wallichiana* var. *mairei* for precious timber [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33 (22):41-46. (in Chinese)
- [16] 康永武,罗宁,欧建德.造林密度对南方红豆杉人工林生长性状的影响[J].西南林业大学学报:自然科学版,2017,37(3):47-52.
- KANG Y W,LUO N ,OU J D.Effects of Planting density on the growth traits of *Taxus wallichiana* plantation [J]. Journal of Southwest Forestry University:Natural Sciences Edition,
- 2017,37(3):47-52. (in Chinese)
- [17] 欧建德,吴志庄.南方红豆杉苗龄型对苗木质量与造林成效的影响[J].东北林业大学学报,2016,44(11):10-12.
- OU J D,WU Z Z.Effect of seedling age types on the aeedling quality and post-transplanting performance of *Taxus wallichiana* var. *mairei* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016,44(11):10-12. (in Chinese)
- [18] 欧建德.基于多元统计分析的南方红豆杉幼林修枝技术[J].南京林业大学学报:自然科学版,2016,40(3):183-187.
- OU J D.Pruning techniques of *Taxus chinensis* var. *mairei* young plantations based on multivariate statistical analysis [J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Sciences Edition, 2016,40(3):183-187. (in Chinese)
- [19] 欧建德,吴志庄.南方红豆杉修枝经营措施优化及评价[J].南京林业大学学报:自然科学版,2017,41(1):117-122.
- OU J D ,WU Z Z.Optimization of pruning operation method for *Taxus wallichiana* var. *mairei* [J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Sciences Edition, 2017,41(1):117-122. (in Chinese)
- [20] 欧建德,吴志庄.南方红豆杉人工林树干形异常的诊断及处置[J].南京林业大学学报:自然科学版,2017,41(3):95-99.
- OU J D,WU Z Z.Early judgment and disposal technology for stem form abnormality of *Taxus chinensis* var. *mairei* plantation [J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Sciences Edition, 2017,41(3):95-99. (in Chinese)
- [21] 欧建德,吴志庄.峦大杉人工林树冠、根系生长和林木分级的早期密度效应[J].东北林业大学学报,2018,46(12):15-19.
- OU J D,WU Z Z.Early density effect on growth of crown and root, and forest classification of *Cunninghamia konishii* plantation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018,46 (12):15-19. (in Chinese)
- [22] 欧建德,吴志庄,康永武.峦大杉与杉木人工林的生长形质、林分分化和空间利用比较[J].东北林业大学学报,2018,46(7):7-11.
- OU J D,WU Z Z,KANG Y W.Comparison of growth, stand differentiation ,form quality and space utilization of *Cunninghamia konishii* and *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018,46(7):7-11. (in Chinese)
- [23] 欧建德,吴志庄.经营措施及地形因子与南方红豆杉树干关系[J].东北林业大学学报,2016,44(9):24-28.
- [24] 高志雄,王新杰,李海萍,等.福建地区杉木枝条基径最优模型[J].东北林业大学学报,2014,42(9):23-27.
- [25] 刘兆刚,舒扬,李凤日.樟子松人工林一级枝条基径和枝长模型的研究[J].植物研究,2008,28(2):244-248.
- [26] 欧建德,康永武.造林密度对乳源木莲人工林生长形质及林分分化的影响[J].西南林业大学学报:自然科学版,2019,39 (4):40-45.
- OU J D,KANG Y W.Planting density effects on the growth, stem-form quality and stand differentiation of *Manglietia yuyuanensis* plantation [J]. Journal of Southwest Forestry University:Natural Sciences Edition, 2019, 39 (4): 40-45. (in Chinese)