

福建省福建柏人工林立地类型划分及质量评价

李秉钧,蔡宗明,刘 聘,荣俊冬,陈礼光,郑郁善*

(福建农林大学 林学院,福建 福州 350002)

摘 要:对福建省内的福建柏人工林进行立地类型划分和立地质量评价与分级,筛选出较适宜福建柏造林的立地条件,以期为该地区福建柏人工林的经营和管理提供科学依据。在福建省内 6 个地区的福建柏人工林设置了 104 块标准样地并调查这些样地的立地因子和林分生长状况,应用数量化理论 I,筛选出主导因子来划分立地类型,构建数量化预测方程,进而确定立地质量等级并进行数量化评价。结果表明,海拔、土层厚度、坡度、坡位、土壤类型、腐殖质层厚度以及坡向 7 个环境因子与福建柏树高模型数量化拟合复相关系数为 0.745 1,模型的 F 检验达到极显著水平 ($P < 0.01$);海拔、土层厚度、坡位是影响福建柏林分生长的主导因子,根据这 3 个主导因子可划分出 25 个立地类型;从立地质量划分结果来看,福建柏立地质量优良水平的标准地占 80%。福建柏最适宜在中低海拔、较厚的土层和腐殖质层、中坡位、坡度较缓以及阴坡、半阴坡或半阳坡的环境中生长,大部分林分立地质量良好,数量化理论方法可应用于评价立地质量和预测福建柏人工林生长趋势。

关键词:福建柏;数量化理论 I;立地因子;立地质量评价

中图分类号:S791.43

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)05-0086-07

Site Classification and Evaluation of *Fokienia hodginsii* Plantation in Fujian Province

LI Bing-jun, CAI Zong-ming, LIU Pin, RONG Jun-dong, CHEN Li-guang, ZHENG Yu-shan*

(Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China)

Abstract: The site type classification and site quality evaluation were carried out on *Fokienia hodginsii* plantations in different regions of Fujian Province, and the more suitable growth environment indices were determined to provide a scientific basis for the improvement of production potential. A total of 104 standard plots were set up in *F. hodginsii* plantations in 6 regions of the province. The site factors and stand growth status of these plots were investigated. By applying the theory of quantification I, the dominant factors were screened out to divide the site type, and then the quantitative prediction equation was constructed and the site quality grade was determined, and the site quality was quantitatively evaluated. The results showed that the 7 environmental factors, including altitude, soil layer thickness, slope, slope position, soil type, humus layer thickness and slope aspect had a complex correlation coefficient of 0.745 1 for the quantitative fitting of *F. hodginsii* height model, and the F test of the model reached a very significant level ($P < 0.01$). Altitude, soil thickness and slope position were the dominant factors affecting the growth of *F. hodginsii* stand. According to these three dominant factors, 25 site types were divided. According to the site quality score of each standard site, the site quality of all standard sites was divided into three grades: excellent, good and poor. From the results of site quality division, the standard land with good site quality of *F. hodginsii* accounted for 80%. *F. hodginsii* is most suitable to grow in the sites with the characteristics of middle and low altitude, thick soil layer and humus layer, middle slope position, gentle slope, shady

收稿日期:2022-06-28 修回日期:2022-10-13

基金项目:福建省种苗科技攻关六期项目;福建省科技厅重大专项(2018NZ0001-1);福建农林大学科技发展创新基金(KF2015085)。

第一作者:李秉钧,在读博士。研究方向:森林培育。E-mail:764189491@qq.com

* 通信作者:郑郁善,教授。研究方向:森林培育。E-mail:zys1960@163.com

slope, semi-shady slope or semi-sunny slope. Most sites of *F. hodginsii* in Fujian Province have good quality. The quantitative theory method can be applied to evaluate the site quality and predict the growth trend of *F. hodginsii* plantation.

Key words: *Fokienia hodginsii*; quantification I theory; site factor; site quality evaluation

森林立地类型划分不仅能反映出森林多种地理环境因子的差异,还是研究森林生长和立地环境的基础方法^[1-2],在立地生产潜力评估方面有着不可替代的作用^[3]。通常可将立地质量评价用于预测或判断某个地区的宜林性或潜在的生产力,利用林地上的树种各生长指标来对立地质量进行衡量^[4],从而确定某一立地条件下不同树种的适宜程度,这也能更合理地筛选出适合当地立地条件的造林树种,达到适地适树和科学经营的目的,提高土地利用率和林木生产潜力。目前研究立地因子对立地质量影响的方法较为常见的是数量化理论法,国内许多学者也将此方法广泛应用于对林分质量评价和研究中,张伏全等^[5]应用数量化理论模型对滇西南地区龙竹立地质量进行了评价;陈昌雄等^[6]建立了南平市延平区天然常绿阔叶林树高与林地立地因子的回归模型,结合数量化理论模型,编制了地位指数表。此外,李斌成等^[7]、杜健等^[8]、唐城等^[9]也将数量化理论法应用于杉木、柚木和西南桦人工林立地类型和立地质量调查和评价中。可见数量化理论法和模型公式的建立在不同森林林分林地调查中已取得较为理想的效果。

福建柏(*Fokienia hodginsii*)又名建柏、滇柏等,是柏科(Cupressaceae)福建柏属(*Fokienia*)的常绿乔木,中国特有的单属种植物,为国家二级保护植物,是福建省珍稀乡土树种^[10-11]。主要分布在越南及中国西南部、南部至东部的海拔350~700 m的林地,在中国以福建中部最多。近些年来关于福建柏的研究多集中在材用林优良种质选育、栽培技术及遗传多样性等方面^[12-13],宏观栽培方向也多考虑于福建柏林分结构优化和营林模式的选择^[14-16],对其人工林立地质量方面的研究较少,作为福建省地区最为重要的人工林树种之一,关于福建柏在该地区林分立地质量和类型划分依据相关研究均鲜有报道。由于历史较为悠久,人为干扰程度高,导致目前现存福建柏林分大多为人工林,少部分为天然次生林,因此对福建柏林分立地类型划分和立地质量的研究是开展生长预测、立地潜在生产力评估、经营效果评价以及其他经营管理工作的重要基础。

本研究根据福建柏人工林的资源分布状况,在泉州、三明、南平、福州、龙岩、漳州6个地区设置104块标准样地,应用方差分析和数量化理论I方法建立福建柏林分优势高与立地因子的关系模型,

并筛选出对影响其生长的主导立地因子,从而对各地区福建柏人工林进行立地类型划分以及立地质量评价,旨在为福建柏人工林种植立地选择及营林措施方面提供科学依据。

1 研究区概况

福建省地处中国东南部(23°33'—28°20'N、115°50'—120°40'E),东隔台湾海峡,与台湾地区相望,东北与浙江省毗邻,西北与江西省交界,西南与广东省相连。福建境内山地、丘陵占全省总面积的80%以上,地势总体呈西北高东南低。气候属亚热带海洋性季风气候,温暖湿润,受季风环流和地形的影响,多年平均气温17~21℃,光照充足,年平均降水量1400~2000 mm,气候条件良好,适宜多种植物生长。红壤、黄壤为主要土壤类型,砖红壤性土与砖红壤化红壤也有分布。

2 材料与方法

2.1 样地调查及数据整理

根据福建柏人工林的资源分布状况,2020年1月在各个地区进行样地设置和筛选,利用激光罗盘仪、50 m皮尺及玻璃绳在泉州、三明、南平、福州、龙岩、漳州6个地区设置104块标准样地,其中泉州市安溪县丰田林场41块,南平市西芹林场、来舟林场共9块,三明市大田梅林林场、沙县官庄林场、三元区莘口林场共27块,福州市永泰县葛岭大湖林场6块,龙岩市漳平五一林场9块,漳州市南靖林场12块。样地必须满足:1)样地距离林缘20 m以上,调查线路避开河流、道路及砍伐地带,样地内应包含不同龄级20株以上福建柏;2)选择的林分基本上都为纯林。通过查找林场小班资料,可以确定每块标准地的林分年龄,每块样地的面积为400 m²(20 m×20 m);3)包括各种不同的立地条件,如林龄、生长情况和立地条件等,立地类型应具有多样性。

标准地内每木检尺,测量胸径和树高;运用GPS软件获取定位出所选标准地的地理坐标和海拔并进行记录,同时用罗盘仪精准测量出每块标准地的坡度、坡位及坡向并调查土壤类型等环境因子;在每个样地内上中下分别挖出3个宽1 m、深度1 m的土壤剖面,记录每个土壤剖面得出的土层厚度以及腐殖层厚度等信息(表1)。

2.2 立地因子分级标准

所选立地因子必须能对优势木树高具有较显著的影响;能较精准预测福建柏林分生产力与土壤质量。福建省森林覆盖面积大,山体数量多且山势复杂,这导致了不同福建柏林分所处环境的海拔、土壤、地形等立地因子有着较大的差异,此外由于福建省跨经纬度幅度较小,其主要气候因子,如温度、降

雨量等差异不大,因此选取海拔、土层厚度、坡位、坡度、土壤类型、腐殖质层厚度和坡向 7 个与优势木树高生长密切相关的立地因子。立地因子类目的划分依据国家森林资源连续清查技术规定以及实际测定结果,参考庄晨辉等^[17]对福建柏人工林分立地因子的分级标准,将各立地因子定量化处理后分级赋值。各因子分级标准见表 2。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic situation of survey sites

指标	林龄/a	胸径/cm	优势高/m	土壤厚度/cm	海拔/m	坡度/(°)	腐殖质层厚度/cm	郁闭度
极大值	67	33.6	35.9	120	760	36	32	0.90
极小值	8	7.3	8.1	35	120	5	3	0.55
平均值	27	20.4	22.3	72	395	29	9	0.71

表 2 各立地因子分级标准

Table 2 Classification standard for site factors

立地因子	类目等级			
	1	2	3	4
海拔(X_1)	$<400 \text{ m}(X_{11})$	$400\sim 800 \text{ m}(X_{12})$	$>800 \text{ m}(X_{13})$	
土层厚度(X_2)	$\leq 40 \text{ cm}(X_{21})$	$41\sim 80 \text{ cm}(X_{22})$	$>80 \text{ cm}(X_{23})$	
坡位(X_3)	上坡(X_{31})	中坡(X_{32})	下坡(X_{33})	
坡度(X_4)	$\leq 15^\circ(X_{41})$	$16^\circ\sim 25^\circ(X_{42})$	$26^\circ\sim 35^\circ(X_{43})$	$>35^\circ(X_{44})$
土壤类型(X_5)	红(X_{51})	黄红(X_{52})	黄(X_{53})	
腐殖质层厚度(X_6)	$\leq 10 \text{ cm}(X_{61})$	$11\sim 20 \text{ cm}(X_{62})$	$>20 \text{ cm}(X_{63})$	
坡向(X_7)	阴(X_{71})	半阴(X_{72})	阳(X_{73})	半阳(X_{74})

2.3 试验方法

数量化理论是多元统计分析方法的一种,根据各种研究目的,给出相应的统计分析方法^[18]。采用数量化理论 I 的方法将各样地的立地因子(0,1)化,

$$\text{定义 } \delta_i(j, k) = \begin{cases} 1 & \text{当第 } i \text{ 个标准地中, } j \text{ 项目的定性数据为 } k \text{ 类目时的反映} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

式中: $i=1,2,\dots,n$,为样地编号; $j=1,2,\dots,n$,为项目数; $k=1,2,\dots,n$ 为类目数; b_{jk} 代表第 j 个项目中第 k 个类目水平的得分值; b_0 为常数项; Y_i 为第 i 个标准地的优势木平均高。引入(0,1)化数量化函数,实现对定性因子的定量化推断以及定性与定量因子间的对比。代入各样地立地因子得表 3。

3 结果与分析

3.1 立地因子方差分析及主导因子的筛选

通过采集 104 个标准样地的海拔、土层厚度、坡度、坡位、土壤类型、腐殖质层厚度及坡向等数据,建立福建柏林分优势高与各立地因子的关系模型,然后采用 Forstat 和 SPSS 22.0 软件对各立地因子进行数量化综合系数检验和方差分析统计(表 4、表 5)。由表 4 可知,优势高与各立地因子关系模型

构建(0,1)矩阵,与样地立地指数值进行线性回归,筛选出主导立地因子。

$$\text{数量化理论 I 的模型为: } Y_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta(j, k) b_{jk} + b_0$$

的 F 检验水平达到极显著($P < 0.01$),说明模型可在实际生产中应用。结合表 4 各因子 P 可以看出,海拔、土层厚度、坡位的 P 均小于 0.05,达到显著性,这也说明海拔、土层厚度和坡位对福建柏树高的生长起到了决定性的作用,因此,将海拔、土层厚度、坡位 3 个因子作为影响福建柏林分生长的主导因子。

3.2 数量化预测方程的建立

采用数量化理论 I 模型公式,将各立地因子表示为(0,1)矩阵 \mathbf{X} ,将优势高数据表示为矩阵 \mathbf{Y} ,然后通过最小二乘原理拟合得到 b_{jk} 的估计值,即为某一立地因子对应水平下的得分。

$$\hat{y}_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta_i(j, k) \hat{b}_{jk}, \text{ 其中, } \hat{b}_{jk} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}(\mathbf{X}'\mathbf{Y}).$$

表 3 立地因子原始数据反映

Table 3 Raw data reflection table of site factors

样地	优势高/ m	海拔 X_1			土层厚度 X_2			坡位 X_3			坡度 X_4				土壤类型 X_5			腐殖质层厚度 X_6			坡向 X_7			
		X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{41}	X_{42}	X_{43}	X_{44}	X_{51}	X_{52}	X_{53}	X_{61}	X_{62}	X_{63}	X_{71}	X_{72}	X_{73}	X_{74}
1	11.5	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0
2	23.4	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0
3	13.5	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
4	12.6	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
5	12.6	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
6	5.2	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
7	8.1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
8	8.3	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
...
104	16	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0

表 4 福建省福建柏人工林原始数据分类

Table 4 Primary data classification of *F. hodginsii* plantations in Fujian

项目	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
海拔	32.612 4	2	16.306 2	3.162 3	0.004 7
土层厚度	24.793 1	2	12.396 6	2.871 7	0.010 3
坡位	15.334 7	1	15.334 7	1.682 2	0.043 7
坡度	7.116 3	2	3.558 2	1.765 7	0.282 1
土壤类型	3.347 2	1	3.347 2	0.834 7	0.421 0
腐殖质层厚度	5.668 3	2	2.834 2	2.196 3	0.353 3
坡向	8.667 9	2	4.334 0	1.237 4	0.326 2
残差	162.233 4	40	2.35		
模型	310.217 8	11	45.381 7	27.66	0.001 8
校正计	744.383 3	51			
截距	1 440.562 0	1			
校正计和截距合计	2 184.945 3	52			

表 5 福建柏人工林各立地因子方差分析

Table 5 Variance analysis of factors in *F. hodginsii* plantations in Fujian

立地因子	水平	相关系数	标准差	<i>T</i>	<i>P</i>
截距		13.476 2	2.271	3.384	0.006 3
海拔/m	≤400	2.874 2	1.247 1	2.703 4	0.014 5
	400~800	1.983 6	1.122 3	2.037 1	0.262 3
	>800	0.811 5	0.413 6	0.926 9	0.441 7
土层厚度/cm	≤40	1.054 5	0.397 4	1.216 8	0.389 0
	40~80	2.782 6	1.537 9	2.803 4	0.010 5
	>80	2.178 6	0.966 4	2.063 1	0.018 6
坡位	上	1.387 6	1.134 1	1.274 6	0.317 6
	中	2.500 1	0.867 9	2.321 9	0.103 7
	下	1.928 1	1.244 7	1.837 7	0.111 7
坡度/(°)	≤15	2.432 8	1.289 6	2.501 1	0.023 7
	15~25	1.873 6	0.746 3	1.746 3	0.267 8
	25~35	1.615 0	1.007	1.588 9	0.300 7
	>35	-0.105 7	0.100 8	-0.114 7	0.741 9
土壤类型	红壤	1.677 3	1.238 9	1.743 9	0.247 6
	黄红壤	1.713 0	0.463 7	1.897 0	0.318 6
	黄壤	2.025 4	1.333 6	2.176 3	0.133 7
腐殖质层厚度/cm	≤10	1.104 0	0.886 3	1.347 9	0.354 1
	11~20	1.810 9	0.647 5	1.684 4	0.211 7
	>20	1.500 8	1.027 4	1.553 7	0.243 6
坡向	阴	1.709 4	1.270 1	1.600 7	0.236 4
	半阴	1.654 3	0.731 3	1.541 1	0.318 7
	半阳	0.935 7	0.241 0	1.086 3	0.599 6
	阳	1.516 2	0.397 1	1.778 6	0.357 1

根据调查的样地信息,参照各立地因子的类目划分表,各类目与福建柏优势高平均值的回归系数及有关参数可通过数量化理论 I 模型公式计算得出,以树高(Y)为因变量,以海拔(X_1)、土层厚度(X_2)、坡位(X_3)、坡度(X_4)、土壤类型(X_5)、腐殖质层厚度(X_6)和坡向(X_7)为自变量构建数量化理论模型,得到回归模型为

$$Y = 2.874 2X_{11} + 1.983 6X_{12} + 0.811 5X_{13} + 1.054 5X_{21} + 2.782 6X_{22} + 2.178 6X_{23} + 1.387 6X_{31} + 2.500 1X_{32} + 1.928 1X_{33} + 2.432 8X_{41} + 1.873 6X_{42} + 1.615 0X_{43} - 0.105 7X_{44} + 1.677 3X_{51} + 1.713 0X_{52} + 2.025 4X_{53} + 1.104 0X_{61} + 1.810 9X_{62} + 1.500 8X_{63} + 1.709 4X_{71} + 1.654 3X_{72} + 1.516 2X_{73} + 0.935 7X_{74}$$

整理各因子得分值可得到数量化立地质量得分表,模型的复相关系数为 $R=0.745 1$ 。

表 6 福建省福建柏人工林样地得分值

Table 6 Sample score values in *F. hodginsii* plantations in Fujian

因子	类目	变量	得分值
海拔/m	≤400	X_{11}	2.874 2
	400~800	X_{12}	1.983 6
	>800	X_{13}	0.811 5
土层厚度/cm	≤40	X_{21}	1.054 5
	40~80	X_{22}	2.782 6
	>80	X_{23}	2.178 6
坡位	上	X_{31}	1.387 6
	中	X_{32}	2.500 1
	下	X_{33}	1.928 1
坡度/(°)	≤15	X_{41}	2.432 8
	15~25	X_{42}	1.873 6
	25~35	X_{43}	1.615 0
	>35	X_{44}	-0.105 7
土壤类型	红壤	X_{51}	1.677 3
	黄红壤	X_{52}	1.713 0
	黄壤	X_{53}	2.025 4
腐殖质层厚度/cm	≤10	X_{61}	1.104 0
	11~20	X_{62}	1.810 9
	>20	X_{63}	1.500 8
坡向	阴	X_{71}	1.709 4
	半阴	X_{72}	1.654 3
	半阳	X_{73}	1.516 2
	阳	X_{74}	0.935 7

由表 6 可知,海拔在 400 m 下的样地得分最高,随着海拔的增加样地得分值呈显著下降趋势,处于中等水平的土层厚度(40~80 cm)和腐殖质层厚度(11~20 cm)的样地得分均高于其他样地,且较薄的土层厚度和腐殖质层厚度得分显著低于中高水平;此外,中坡位和缓坡(≤15°)以及黄壤的项目得分则显著高于同项目的其他水平,而福建柏在阴坡和半阴坡的得分显著高于阳坡。综合来看,福建柏

适宜的生长环境为中低海拔、较厚的土层和腐殖质层、中坡位、缓坡以及阴坡、半阴坡或半阳坡。

3.3 立地类型划分与立地质量评价

按海拔、土壤厚度和坡位 3 个主导因子进行分类,104 块样地共划分出 25 种立地类型,部分立地类型无样地存在。参照各立地因子分值计算出各立地类型的得分值,用其中最大得分值的代数和减去最小得分值的代数和,得出相差数后进行三等分,分成优、良、差 3 个立地等级(表 7)。由表 7 可以看出,福建省大部分福建柏林分样地立地质量评价可以达到良好,适宜福建柏林的生长和栽培。

4 结论与讨论

立地分类与质量评价是林地普查工作中不可或缺的一部分,能更好地了解植被生长情况及其综合立地条件之间的差异,并通过与立地因子实际调查结果对比,将立地划分成多种类型,并建立森林立地质量评价体系^[19]。本研究利用数量化理论 I 模型建立优势高与立地因子之间的多元线性回归,模型的 F 检验达到极显著水平($P<0.01$),可将模型应用于实际调查和栽培管理中。

通过对各立地因子及水平进行数量化综合系数检验和方差分析统计,确定海拔、土层厚度、坡位 3 个因子是影响福建柏林分生长的主导因子,其中海拔是最主要的立地因子。季碧勇^[20]研究表明,模型中海拔贡献率高,影响程度大。段高辉等^[21]的研究表明,海拔、坡向、坡位、土壤厚度是影响油松树高的主导因子,其中海拔的影响程度最高,李斌成等^[7]的研究也得出了相似结论,这均与本研究结果基本一致,可能因为海拔是影响森林生物量的重要环境因子之一,随着海拔的变化,林分生物量会有显著的差异^[22-23],生物量较高的林分往往具有更高的稳定性、较好的土壤养分环境以及林分结构,更优的生长环境和林分结构是促进林分生长的关键因素。此外,海拔梯度的变化对林分气候差异有着显著的影响^[24],高海拔地带气温和氧气浓度较低,这使得不同树种林分对于海拔梯度的适应区间有着明显的差异。李忠国^[25]筛选海拔、土层厚度和坡向为主导因子划分了落叶松林分的立地类型,这与本研究筛选出的主导因子有重叠性但也有一定的差异,说明不同地区的地貌、环境差异以及不同的树种特性、林分经营密度与模式可能都会影响这个地区林分生长的主导因子发生改变。土层厚度对福建柏林分也有着显著的影响,土层厚度较厚的林分生长往往优于薄土层的林分,这可能是因为较厚的土层具有更丰富的微生物种类和养分元素,更有利于大部分林木的生长^[26]。

表 7 福建省福建柏人工林立地分类与立地质量评价
Table 7 Site classification and evaluation of *F. hodginsii* plantations in Fujian

立地类型区	立地类型组	坡位	立地得分值	标准地数	评价结果
低海拔(≤400 m)	薄土层(≤40 cm)	上坡位	4.261 8	5	差
		中坡位	6.428 8	10	良
		下坡位	5.856 8	6	良
	中土层(40~80 cm)	上坡位	7.044 4	2	优
		中坡位	8.156 9	5	优
		下坡位	7.584 9	4	优
	厚土层(>80 cm)	中坡位	7.552 9	4	优
		下坡位	6.980 9	3	优
中海拔(400~800 m)	薄土层(≤40 cm)	上坡位	4.425 7	3	差
		中坡位	5.538 2	5	良
		下坡位	4.966 2	6	良
	中土层(40~80 cm)	上坡位	6.153 8	6	良
		中坡位	7.266 3	3	优
		下坡位	6.694 3	4	优
	厚土层(>80 cm)	上坡位	5.549 8	3	良
		下坡位	6.090 3	5	良
高海拔(>800 m)	薄土层(≤40 cm)	上坡位	3.253 6	5	差
		中坡位	4.366 1	2	差
		下坡位	3.794 1	2	差
	中土层(40~80 cm)	上坡位	4.981 7	1	良
		中坡位	6.094 2	2	良
		下坡位	5.522 2	1	良
	厚土层(>80 cm)	上坡位	4.377 7	4	差
		中坡位	5.490 2	6	良
		下坡位	4.918 2	7	良

此外,福建柏在阴坡和半阴坡的得分值显著高于阳坡,这表明了福建柏虽然是阳性树种,但是在阴坡的生长状况却优于阳坡,陈乾等^[27]的研究表明,福建柏苗期或幼龄期进行适度遮荫可以改变幼苗生理特性,提高光合能力促进生长,王梅等^[28]的研究也表明阴坡和半阴坡油松的生长状况优于阳坡,这与本研究结果相似,这种现象的原因可能是福建柏或其他阳性树种在生长前期需要从土壤中获得较多的养分和水分,而地处阴坡的样地由于日照时间短、日照面积小,能较好地减少水分和养分流失,保水保肥能力较强,从而减少植物体内水分的蒸发。从立地质量划分结果来看,研究区立地质量优良水平的标准地占 80%,说明研究区大部分福建柏林分立地质量良好,福建柏林分在福建省分布区域较好。立地评价较差的种植区域仍有较大的增长空间,如高海拔地区可以考虑种植一些云杉、高山栎、高山松等适应高海拔环境的树种,而土层厚度较薄的地区因成土母质少且发育程度低,枯枝落叶少,地形坡度大或降水集中形成冲蚀作用,因此可以考虑种植一些根系浅且发达的树种,如马尾松、枫香等。

由于数据的局限性,本研究未考虑福建省不同

地区的土壤质地、土壤养分及气候条件等的影响,在今后的研究中可考虑加入更多环境因子,综合考虑各环境因子对林分生长的影响,结合 RS 技术可以提取大部分气候、地形和土壤因子,通过 GIS 技术进行空间数据综合分析来划分立地类型及评价立地质量,为福建柏林分立地分类与立地质量评价提供理论基础。

参考文献:

[1] 王永昌,张金池. 基于遥感技术的云台山立地分类及质量评价[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2007,31(1):85-89.
WANG Y C,ZHANG J C. Site classification and quality evaluation of Yuntai Mountain based on remote sensing technology [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition,2007,31(1):85-89. (in Chinese)

[2] 邓送求,同家锋,关庆伟,等. 基于聚类分析的风景林立地类型划分[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2009,33(3):73-77.
DENG S Q,YAN J F,GUAN Q W, et al. Site type classification of scenic forest based on cluster analysis[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition,2009,33(3):73-77. (in Chinese)

[3] LOUW J,SCHOLES M. Forest site classification and evaluation:a south African perspective[J]. Forest Ecology and Man-

- agement, 2002, 171(1/2): 153-168.
- [4] 翟明普, 沈国防. 森林培育学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016: 417.
- [5] 张伏全, 陈远材. 滇西南地区龙竹立地质量评价的研究[J]. 林业科学, 1994, 30(2): 104.
ZHANG F Q, CHEN Y C. Study on site quality evaluation of dendrocalamus giganteus in southwest Yunnan[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1994, 30(2): 104. (in Chinese)
- [6] 陈昌雄, 曹祖宁, 魏铨敢, 等. 天然常绿阔叶林数量化地位指数表的编制[J]. 林业勘察设计, 2009(2): 1-4.
CHEN C X, CAO Z N, WEI C G, et al. The establishment of quantitative site index table of natural evergreen broad-leaved forest[J]. Forestry Survey and Design, 2009(2): 1-4. (in Chinese)
- [7] 李斌成, 杜超群, 袁慧, 等. 湖北省杉木人工林地类型划分及评价[J]. 湖北林业科技, 2020, 49(2): 1-5.
- [8] 杜健, 梁坤南, 周再知, 等. 云南西双版纳柚木人工林地类型划分及评价[J]. 林业科学, 2016, 52(9): 1-10.
DU J, LIANG K N, ZHOU Z Z, et al. Site type classification and evaluation of teak artificial forest in Xishuangbanna[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(9): 1-10. (in Chinese)
- [9] 唐城, 王春胜, 庞圣江, 等. 广西大青山西南桦人工林地类型划分及评价[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(4): 52-57.
TANG C, WANG C S, PANG S J, et al. Site type classification and evaluation of betula alnoides artificial forest in Daqing Mountain of Guangxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4): 52-57. (in Chinese)
- [10] 周宗哲. 不同保留密度对福建柏人工林生长的影响[J]. 福建林业科技, 2014, 41(1): 88-91.
- [11] 肖永元. 修枝和间伐对福建柏生长的影响[J]. 福建林业科技, 2012, 39(3): 68-70.
XIAO Y Y. Effects of stem pruning and intermediate cuttings on the growth of *Fokienia hodginsii*[J]. Fujian Forestry Science and Technology, 2012, 39(3): 68-70. (in Chinese)
- [12] 万娟. 福建柏优树子代苗期遗传变异与遗传多样性 ISSR 分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [13] 黄树军. 福建柏材用林优良种质选育的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [14] 刘凯, 陈乾, 王希贤, 等. 不同林龄福建柏混交林与纯林土壤养分的动态变化[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2022, 51(2): 185-194.
LIU K, CHEN Q, WANG X X, et al. Dynamic changes of soil nutrients in different ages of mixed and pure forests of *Fokienia hodginsii*[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2022, 51(2): 185-194. (in Chinese)
- [15] 陈乾, 刘凯, 王希贤, 等. 福建柏混交林主要土壤理化性质与土壤含水量的关联研究[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2021, 50(6): 771-780.
CHEN Q, LIU K, WANG X X, et al. Study on the relationship between soil physicochemical properties and soil moisture content in *Fokienia hodginsii* mixed forest[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2021, 50(6): 771-780. (in Chinese)
- [16] 张瑞秀. 福建柏在混交林与纯林中的生长调查分析[J]. 福建林业, 2020(5): 36-38, 42.
ZHANG R X. Investigation on the growth of *Fokienia hodginsii* in mixed forest and pure forest[J]. Forestry of Fujian Province, 2020(5): 36-38, 42. (in Chinese)
- [17] 庄晨辉, 严思钟, 李闽丽. 福建柏立地质量评价研究[J]. 林业资源管理, 1998(2): 51-54.
ZHUANG C H, YAN S Z, LI M L. Study on site quality evaluation of *Fokienia hodginsii*[J]. Forest Resources Management, 1998(2): 51-54. (in Chinese)
- [18] 贾俊平. 统计学基础[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2010.
- [19] 李正茂, 李昌珠, 张良波, 等. 油料树种光皮树人工林立地质量评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2010, 3(3): 75-79.
LI Z M, LI C Z, ZHANG L B, et al. Evaluation of cornus wilsoniana plantation site quality[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2010, 3(3): 75-79. (in Chinese)
- [20] 季碧勇. 基于森林资源连续清查体系的浙江省立地分类与质量评价[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [21] 段高辉, 赵鹏祥, 周远博, 等. 黄龙岗林区油松人工林立地质量评价研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 161-166, 194.
DUAN G H, ZHAO P X, ZHOU Y B, et al. Study on site quality evaluation of *Pinus tabulaeformis* artificial forest in Huanglongshan forest region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(5): 161-166, 194. (in Chinese)
- [22] 沈泽昊, 胡志伟, 赵俊, 等. 安徽牯牛降的植物多样性垂直分布特征——兼论山顶效应的影响[J]. 山地学报, 2007, 25(2): 160-168.
SHEN Z H, HU Z W, ZHAO J, et al. Vertical distribution characteristics of plant diversity in Guniujiang of Anhui Province——on the influence of peak effect[J]. Mountain Research, 2007, 25(2): 160-168. (in Chinese)
- [23] CIMALOVÁ S, LOSOSOVÁ Z. Arable weed vegetation of the northeastern part of the czech republic: effects of environmental factors on species composition[J]. Plant Ecology, 2009, 203(1): 45-57.
- [24] 石梦婷. 陕西洛南油松人工林立地质量评价研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2022.
- [25] 李忠国. 北亚热带中山区日本落叶松人工林地分类与质量评价[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- [26] 张勇. 连云港云台山植物多样性及立地质量评价研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [27] 陈乾, 邓智文, 黄丽婷, 等. 遮荫对福建柏幼苗生理特性和叶绿素荧光特性的影响[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2021, 50(2): 223-229.
CHEN Q, DENG Z W, HUANG L T, et al. Effects of shading on physiological and chlorophyll fluorescence characteristics of *Fokienia hodginsii* seedlings[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition, 2021, 50(2): 223-229. (in Chinese)
- [28] 王梅, 张文辉. 不同坡向人工油松林生长状况与林下物种多样性分析[J]. 西北植物学报, 2009, 29(8): 1678-1683.
WANG M, ZHANG W H. Analysis on growth status and understory species diversity of artificial Chinese pine forest in different slope aspects[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(8): 1678-1683. (in Chinese)