

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.06.016

雷琼地区尾细桉人工林立地类型划分及其质量评价

张沛健^{1,2}, 卢万鸿², 徐建民^{1*}, 林志锋³, 陈马兴⁴, 李孔生⁴

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东 广州 510520; 2. 国家林业和草原局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022;
3. 海南金华林业有限公司, 海南 儋州 578101; 4. 中林集团雷州林业局有限公司, 广东 湛江 524043)

摘要: [目的] 对雷琼地区尾细桉人工林进行立地类型划分和立地质量评价, 为雷琼地区尾细桉造林立地选择及生产潜力的提升提供科学依据。[方法] 在雷州半岛和海南岛 1~18 年生的尾细桉人工林内采用典型抽样方法设置 112 块样地, 调查样地内尾细桉的生长指标, 记录立地因子, 采集土样测定土壤理化性质, 利用数量化理论 I 的方法建立尾细桉优势木高年均生长量与立地因子的关系模型, 采用 K-均值聚类分析和相关性分析法对尾细桉人工林进行立地类型划分及质量评价。[结果] 海拔、坡度、土壤厚度、成土母岩、pH 值、土壤质地、土壤密度 7 个立地因子与优势木高生长量拟合的复相关系数为 0.712, 达极显著相关 ($P < 0.01$); 土壤质地、成土母岩和土壤密度是主要影响尾细桉优势木高生长的立地因子, 依此将雷琼地区尾细桉人工林划分归类为 12 个立地类型; 根据适宜性和生产力情况对立地质量进行评价, 分为高产组、中产组、低产组和劣产组 4 个等级, 最适宜、较适宜和适宜等级总占比为 91.89%, 表明雷琼地区尾细桉种植基本合理; 土壤 pH 值、有机质、全磷、全钾和速效钾对尾细桉人工林生长影响显著。[结论] 雷琼地区适宜尾细桉生长, 营造尾细桉人工林时应选择酸性壤土、中低密度的立地, 在造林及抚育管理中应及时补充磷肥和钾肥, 可充分发挥林地生产潜力; 对不适宜立地及时进行改种, 提高造林的科学性和合理性。

关键词: 雷琼地区; 尾细桉人工林; 立地类型; 立地质量评价

中图分类号: S792.39; S714.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)06-0130-10

立地类型及其林地质量是多种地理环境因素的综合反映^[1], 是研究森林生长和立地环境的一个重要手段^[2], 对评价立地生产潜力尤为重要^[3]。立地质量评价是实现科学造林、合理高效利用林地的重要保证^[4], 对树种选择、营林技术、地力改良等具有重要指导作用。而数量化理论方法是研究立地因子对立地质量影响最常应用的方法, 国内许多学者已运用该方法对柚木 (*Tectona grandis* L.F.)^[5]、西南桦 (*Betula alnoides* Buch.-Ham. ex D. Don)^[6]、杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)^[7] 等树种进行了立地类型划分及评价的研究, 均取得了较好的效果。

桉树 (*Eucalyptus robusta* Smith) 因速生丰产、轮伐期短等优点, 成为我国重要的工业原料林树种, 为我国木材、纸浆生产做出了重要贡献。华南作为我国桉树纸浆林发展的主要栽培区^[8], 通过多年来的测定和推广种植, 尾细桉 (*Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis*) 无性系成为了华南沿海地区桉树纸浆林重要的种植品系, 亦是台风频繁的雷琼地区造林的首选品种^[9]。由于对尾细桉生长与立地生产力间的关系认识不足, 营林过程中出现林分退化、生产力低下等现象, 影响了尾细桉纸浆材林的经济、生态和社会效益。近些年, 桉树人工林立地分类及质量的研究也一直受到学者们的关注。

收稿日期: 2021-03-11 修回日期: 2021-09-03

基金项目: “十三五”国家重点研发计划 (2016YFD0600503-2)

* 通讯作者: 徐建民, 博士生导师, 研究员, 主要从事林木遗传育种和森林培育研究。E-mail: jianmxu@163.com

国外对桉树立地潜在生产力预测、立地等级及划分、立地质量对生产力的影响等方面进行了研究^[10-12]。国内对广西、云南、福建等地区的桉树立地分类与评价研究已有报道^[13-16]。雷琼地区桉树人工林面积达 38.5 万 hm^2 , 而尾细桉作为该地区重要的种植品系, 关于尾细桉人工林在该区域的立地分类和质量评价研究尚未见报道。

本研究以雷琼地区具有一定规模的 1~18 年生尾细桉 (TH91-LH 系列无性系) 人工林为研究对象, 通过调查 112 块样地的林木生长量及地形、地貌和土壤理化性质等立地因子, 应用数量化理论方法研究优势木高生长量与立地因子的关系, 采用聚类分析和相关性分析进行立地划分与生产力评价, 旨在为尾细桉人工林种植的立地选择和合理经营等提供科学依据。

1 研究区概况

试验区位于雷琼沿海台地 (18°10'~21°55' N, 108°37'~111°03' E), 属热带季风气候, 降雨充沛, 雨热同期, 干湿季分明, 全年无霜。太阳总辐射量大, 年均温度 23~26℃, 年均日照 1 800~2 500 h, 年均降水量 1 000~2 500 mm, 5—9 月为雨季, 降雨量约占全年的 80%, 热带风暴和台风灾害频繁发生。土壤类型以酸性砖红壤为主, 林下植被以飞机草 (*Chromolaena odorata* (L.) R. M. King & H. Rob.)、阔叶丰花草 (*Spermacoce alata* Aublet)、银柴 (*Aporosa dioica* (Roxb.) Mull. Arg.)、白楸 (*Mallotus paniculatus* (Lam.) Mull. Arg.) 居多。尾细桉人工林造林及抚育措施: 机耕整地后采用挖坑 (50 cm × 50 cm × 40 cm) 或开 30 cm 定植沟种植, 基肥为桉树专用复合肥 (N:P:K 为 6:23:8), 当年砍除杂灌草 1 次, 第 2、3 年各追施复合肥 (N:P:K 为 22:5:13) 1 次及各砍除杂灌草 2 次, 3 年后不再施肥, 人为除草、抚育措施基本一致。

2 研究方法

2.1 样地调查及采样方法

于 2018—2019 年选取雷琼沿海地区 1~18 年生尾细桉人工林, 采用典型抽样方法, 设置 112 块 20 m × 20 m 的临时标准样地 (图 1), 进行立地因子和生长量调查。记录每个样地的经纬度、地貌、海拔、坡度、土壤类型等立地因子, 对

样地内尾细桉的树高、胸径进行每木检尺, 选取 5 株优势木, 记录优势木树高和胸径; 在每个标准样地内沿对角线选取左下角、中间和右上角 3 个点挖取 60 cm 深的土壤剖面, 环刀取原状土, 带回实验室进行土壤物理性质分析; 同一土壤剖面从上到下取土壤样品, 混合均匀后装入密封袋, 带回实验室测定其化学性质; 在野外调查鉴别时, 用手测法来确定土壤质地, 主要是把指头大小的土壤放在手上, 稍加水来进行揉捏, 不成球、不成片的为砂土, 可捏成片、不断裂、黏性强的为黏土, 壤土介于砂土和黏土之间, 手捏勉强成团, 轻压即碎。

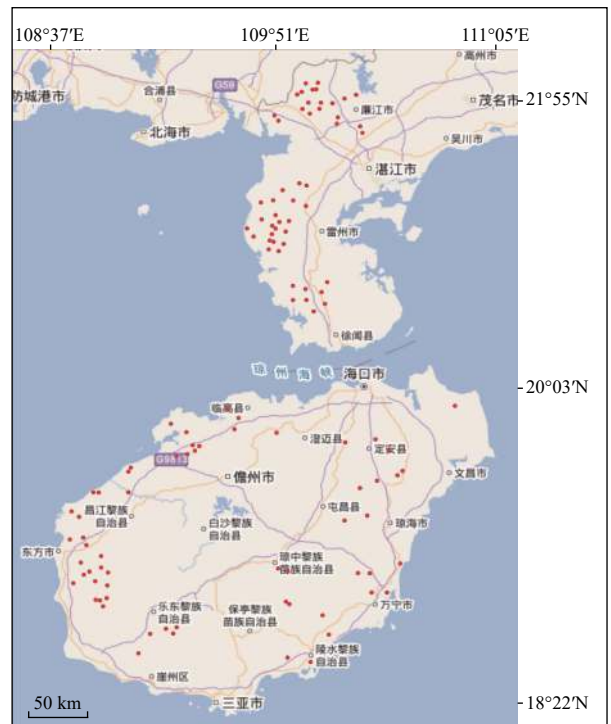


图 1 雷琼地区标准样地的位点

Fig. 1 Location of standard plot in Leiqiong region

2.2 土壤理化性质测定方法

采用环刀法测定土壤密度; 采用四分法取 1 kg 左右的混合土样, 经风干后研磨过筛再测定土壤化学性质, 各指标测定方法如下: pH 值采用电位法测定, 有机质含量采用重铬酸钾氧化-容量法测定, 全氮含量采用凯氏法测定, 全磷含量采用凯氏消煮-钼锑抗比色法测定, 全钾含量采用氢氧化钠碱熔-火焰光度法测定, 碱解氮采用碱解扩散法测定, 有效磷含量采用双酸浸提-钼锑抗比色法测定, 速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定^[17]。

2.3 立地划分及评价方法

2.3.1 立地因子的类目划分 在考虑立地因子时,

既要包含影响林木生长的主要因子,又要便于在林业实际中的应用。笔者根据各因子的变化幅度及对林木生长的影响,结合有关林业调查技术标准,选取海拔(X_1)、坡度(X_2)、土层厚度(X_3)、成土母岩(X_4)、pH值(X_5)、土壤质地(X_6)、土壤密度(X_7)7个立地因子,对各因子进行统计和分级处理,共划分24个类目,其中, X_1 分别为 < 100 m、 $100\sim 300$ m、 > 300 m, X_2 分别为 $0\sim 5^\circ$ (平坡)、 $6\sim 15^\circ$ (缓坡)、 $16\sim 25^\circ$ (斜坡)、 $> 25^\circ$ (陡坡), X_3 分别为 < 40 cm(薄土层)、 $40\sim 80$ cm(中土层)、 > 80 cm(厚土层), X_4 分别为玄武岩、花岗岩、砂页岩、浅海沉积物, X_5 分别为pH > 7.5 (碱性)、pH $6.5\sim 7.5$ (中性)、pH $4.5\sim 6.5$ (酸性)、pH < 4.5 (强酸性), X_6 分别为壤土、砂土、黏土, X_7 分别为 > 1.4 g.cm $^{-3}$ (高密度)、 $1.2\sim 1.4$ g.cm $^{-3}$ (中密度)、 < 1.2 g.cm $^{-3}$ (低密度)。

2.3.2 数量化理论 I 模型 数量化理论 I 是可以解决立地因子中的定量因子(如海拔)和定性因子(如成土母岩)共同影响的统计方法。结合类目划分表,对样地各立地因子数据进行(0,1)化,采用数量化理论 I 将(0,1)化后数据与各样地优势木高年均生长量建模,拟合得出模型回归系数及各项得分值、偏相关系数,对复相关系数进行 F 检验来验证模型的可靠性。

数量化理论 I 的数学模型如下:

$$y_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{r_j} \delta_i(j,k) b_{jk} + \varepsilon_i \quad (1)$$

其中,

$$\delta_i(j,k) = \begin{cases} 1 & \text{当第} i \text{块样地第} j \text{因子第} k \text{类目存在具体值时} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

式中: y 是自变量, i 为样地数($i=1, 2, \dots, n$), j 为立地因子数($j=1, 2, \dots, m$), k 为 j 因子下的类目($k=1, 2, \dots, r_j$), $\delta_i(j, k)$ 为第 i 个因子第 k 个水平的等级反映(0 或 1), b_{jk} 是

立地因子 j 的第 k 水平的得分值, ε_i 是第 i 次抽样的随机误差。

数量化理论 I 计算方法与回归分析相似,复相关系数 R 是衡量预测精度的一种数值指标,其值越大,则估测相关越密切,说明模型对理论值的估计效果越好,模型检验的 F 值越大于 F 临界值,所得的数量化得分表就越可靠^[18-19]。偏相关系数是衡量预测精度与各项目对预测贡献大小的重要统计量^[20]。在实际应用中,可用各项的范围来衡量各项目对预测的贡献。范围越大,说明第 j 个立地因子对预测值的贡献越大。

2.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 24 进行数据统计与分析。应用数量化方法 I 通过赋值使定性因子定量化,对立地因子进行回归分析,确定变量对基准变量的影响程度并进行预测,划分立地类型,通过聚类分析进行立地质量评价,同时对林木生长量和土壤化学性质进行相关性分析,并绘制土壤化学性质与生产力等级的变化图。

3 结果与分析

3.1 基准年龄的确定

基准年龄指树高生长趋于稳定且能灵敏反映立地差异的年龄^[21],一般超过树种轮伐期一半。由表 1 可知:尾细桉 1~4 年生时优势木树高变异系数较大,从第 5 年生时树高生长变异趋于稳定,而现行桉树纸浆材的主伐年限约为 5~6 a。因此,雷琼地区尾细桉人工林的基准年龄确定为 5 a,其中,8 年生的平均树高生长大于 9 年生,可能是立地生产力不同造成的差异,选取林龄在 5 a 及以上的 74 个样地进行立地分类,能更科学的反映立地质量的差异。

3.2 数量化回归模型及检验

从立地因子对林木生长影响的角度出发,根据所选基准年龄 5 年生以上样地,结合立地因子类目

表 1 不同林龄优势木高及变异系数

Table 1 Coefficient of variation of dominant height in different age

项目 Item	林龄 Forest age/a																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18
平均高 Average high/m	6.96	10.85	13.38	15.67	17.52	19.00	19.30	20.84	20.28	20.31	21.08	21.92	23.71	22.42	24.14	24.85	25.07
标准差 Standard deviation	1.27	1.66	1.94	2.11	1.81	1.94	1.99	2.10	2.12	2.08	2.16	2.26	2.61	2.39	2.68	2.80	2.81
变异系数 CV/%	18.21	15.30	14.47	13.47	10.32	10.21	10.30	10.10	10.44	10.26	10.25	10.31	11.00	10.65	11.11	11.27	11.20
样地数 Sample number/个	11	7	10	10	11	7	8	5	4	3	7	4	9	5	4	4	3

划分,得出(0,1)反应矩阵表(表略),按照数量化理论I模型计算各类目与尾细桉优势木高年均

生长量的回归系数、得分范围值、偏相关系数及复相关系数。回归分析计算结果见表2。

表2 立地因子数量化回归分析结果

Table 2 Quantitative regression analysis results of site factors

项目 Item	类目 Category	代码 Code	得分 Score	得分范围值(所占比例/%) Score range value and Proportion	偏相关系数 Coefficient of partial correlation
常量 Constant			1.907		
海拔 Altitude/m	<100	X ₁₁	0	0.026 (0.67)	0.561**
	100~300	X ₁₂	-0.659		
	>300	X ₁₃	-0.685		
坡度 Slope/(°)	0~5	X ₂₁	0.407	0.376 (9.69)	0.199*
	6~15	X ₂₂	0.160		
	16~25	X ₂₃	0.031		
	>25	X ₂₄	0		
土层厚度 Soil depth/cm	<40	X ₃₁	-0.136	0.108 (2.78)	0.189*
	40~80	X ₃₂	0		
	>80	X ₃₃	-0.244		
成土母岩 Parent rock	玄武岩 Basalt	X ₄₁	-0.384	0.507 (13.06)	0.302**
	花岗岩 Granite	X ₄₂	0		
	砂页岩 Sand shale	X ₄₃	-0.183		
	浅海沉积物 Shallow sea sediments	X ₄₄	0.123		
pH值 pH value	>7.5	X ₅₁	-0.559	0.468 (12.06)	0.215*
	6.5~7.5	X ₅₂	0		
	4.5~6.5	X ₅₃	-0.091		
	<4.5	X ₅₄	0		
土壤质地 Soil texture	壤土 Loam	X ₆₁	0.569	1.908 (49.16)	0.609**
	砂土 Sandy	X ₆₂	0		
	黏土 Clay	X ₆₃	-1.339		
土壤密度 Soil density/(g·cm ⁻³)	>1.4	X ₇₁	0	0.488 (12.57)	0.401**
	1.2~1.4	X ₇₂	0.264		
	<1.2	X ₇₃	0.752		

注: *表示显著相关($P < 0.05$), **表示极显著相关($P < 0.01$)。下同。

Notes: *Indicates when $P < 0.05$, there is significant correlation, **indicates when $P < 0.01$, there is extremely significant correlation. The same below.

拟合建立的立地指数随立地因子变化的数量化回归方程如下:

$$Y = 1.907 - 0.659X_{12} - 0.685X_{13} + 0.407X_{21} + 0.160X_{22} + 0.031X_{23} - 0.136X_{31} - 0.244X_{33} - 0.384X_{41} - 0.183X_{43} + 0.123X_{44} - 0.559X_{51} - 0.091X_{53} + 0.569X_{61} - 1.339X_{63} + 0.264X_{72} + 0.752X_{73}$$

由表2可知:立地因子得分范围值大小依次为土壤质地>成土母岩>土壤密度>pH值>坡度>

土壤厚度>海拔,前3项因子得分占比达74.79%,土壤性质对尾细桉人工林生长的影响大于地势和地形条件。回归模型的复相关系数 $R = 0.712$,达极显著。将回归模型中7个立地因子(海拔 X_1 ,坡度 X_2 ,土层厚度 X_3 ,成土母岩 X_4 ,pH值 X_5 ,土壤质地 X_6 和土壤密度 X_7)与优势木高年均生长模型进行适用性检验,得出 $F_{(7, 66)} = 9.719 > F_{0.01(7, 66)} = 3.672$,即7个立地因子与优势

木高年均生长量之间的关系极紧密,用该方程来评价雷琼地区尾细桉人工林立地质量是可靠的。

3.3 立地类型划分及生产力等级评价

基于回归分析,选出土壤质地、成土母岩、土壤密度为主导因子,采用主导因子组合法划分立地类型。根据分类依据和对应的类目以及实际选用的

分类立地因子,理论上雷琼地区尾细桉林立地共可划分 3 个立地类型区、12 个立地类型组,36 个立地类型。本研究中,部分立地类型没有样地存在,所选用的 74 个样地实际共划分为 12 个立地类型(表 3)。

表 3 雷琼地区尾细桉人工林立地生产力等级划分

Table 3 Site productivity grade division of *E. urophylla* × *E. tereticornis* plantations in Leiqiong area

生产力等级 Site productivity	立地类型 Site type	优势高年均生长量预测/m Predicted of annual average growth of dominant height	优势高年均生长量实测/m Measured of annual average growth of dominant height	样地数量 Number of plots/个	评价 Evaluation
高产组 I High production group I	I 1 壤土浅海沉积物中密度	2.996	3.164	3	最适宜
	I 2 壤土玄武岩中、低密度	2.933	2.933	9	
中产组 II Middle production group II	II 1 壤土花岗岩高密度	2.624	2.475	6	较适宜
	II 2 壤土砂页岩高密度	2.624	2.609	3	
	II 3 壤土浅海沉积物高密度	2.606	2.675	9	
低产组 III Low production group III	III 1 壤土花岗岩中、低密度	2.308	2.383	12	适宜
	III 2 砂土浅海沉积物中、高密度	2.214	2.055	7	
	III 3 壤土砂页岩中密度	2.008	1.911	11	
	III 4 砂土花岗岩高密度	1.997	1.993	5	
	III 5 砂土砂页岩高密度	1.887	2.258	3	
劣产组 IV Poor production group IV	IV 1 砂土花岗岩中、低密度	1.606	1.614	4	不适宜
	IV 2 黏土浅海沉积物低密度	1.457	1.458	2	

不同的立地类型存在差异,通过生产力和适宜性评价,可以实现立地的合理利用。根据各样地立地指数随立地因子变化的回归模型得出预测得分值,采用 K-均值聚类分析将 12 个立地类型划分为 4 个生产力等级组(表 3):高产组(2.8~3.2 m)、中产组(2.4~2.8 m)、低产组(1.8~2.4 m)、劣产组(1.4~1.8 m),模型预测值与实测值接近。由表 3 可知:雷琼地区 5 年生以上尾细桉林地的生产力等级表现为:壤土类型 > 砂土类型 > 黏土类型。同土壤质地中,浅海沉积物中密度的立地生产力普遍高于其它立地类型。可见,尾细桉在壤土、中密度的立地栽培时林木生长较好。

具体说,高产组属于浅海沉积物和玄武岩发育而成的壤土、中低密度的立地类型。该生产力等级的尾细桉生长旺盛,年均高生长量可达 2.99 m,年均胸径生长量可达 2.65 cm,年均材积增长量可达 30.94 m³·hm⁻²·a⁻¹。该组立地条件最好,生产潜力最大,最适合尾细桉的种植,进行常规抚育管理即可保证尾细桉的良好生长,也可延长主伐林龄,充

分发挥立地潜力,可作为尾细桉造林地的首要选择。

中产组属于花岗岩、砂页岩、浅海沉积物发育而成的壤土、高密度的立地类型。该生产力等级的尾细桉长势较好,年均高生长量为 2.60 m,年均胸径生长量为 2.27 cm,年均材积增长量为 23.09 m³·hm⁻²·a⁻¹。该组立地条件较好,生产潜力良好,比较适宜栽种尾细桉,进行适当的抚育管理,可有效促进林木的生长,达到速生丰产的经营目的。

低产组属于花岗岩、砂页岩发育而成壤土、中低密度的立地类型以及浅海沉积物、花岗岩、砂页岩发育而成的砂土、中高密度的土壤类型。该生产力等级的尾细桉年均高生长量、年均胸径生长量、年均材积增长量分别为 2.13 m、1.93 cm、21.78 m³·hm⁻²·a⁻¹。该组立地条件一般,生产潜力一般,但也适宜尾细桉种植,应加强抚育管理措施,增加种植密度,可培育中小径材的尾细桉。

劣产组属于砂土花岗岩、中低密度的立地类型以及黏土浅海沉积物、低密度的立地类型。该生产

力等级的尾细桉年均高生长量、年均胸径生长量、年均材积增长量分别为 1.56 m、1.41 cm、13.41 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。该组立地条件较差,林木长势较差,不宜栽种速生丰产的桉树,适宜乡土树种营造薪炭林或防护林等。

3.4 优势木年均生长量与土壤化学性质的关系

由回归分析立地因子得分可知:土壤对林木生长量的影响较大。通过对土壤化学性质与尾细桉林优势木树高和胸径的年均生长量进行相关性分析,

结果(表4)表明:pH值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾都与优势木年均生长量有不同程度的相关性,其中,pH值、全钾和速效钾含量与优势木年均生长量呈极显著负相关,有机质与优势木年均生长量呈显著负相关,全磷含量与优势木高年均生长量呈显著正相关。说明在一定范围内,土壤pH值越低,有机质和全钾含量越低,全磷含量越高,尾细桉的年均生长量越好。各生产力等级组土壤化学性质的比较见图2。

表4 优势木年均生长量与土壤化学性质相关性

Table 4 Correlation between high annual average growth of dominant trees and soil chemical property

项目 Item	优势木高年均生长量 Annual average growth of dominant trees high	优势木胸径年均生长量 Annual average growth of dominant trees DBH
pH值 pH value	-0.383**	-0.321**
有机质 Organic matter	-0.201*	-0.162*
全氮 Total nitrogen	-0.167	-0.127
全磷 Total phosphorus	0.013*	0.126
全钾 Total potassium	-0.494**	-0.470**
碱解氮 Available nitrogen	-0.129	-0.071
有效磷 Available phosphorus	-0.112	-0.067
速效钾 Available potassium	-0.488**	-0.444**

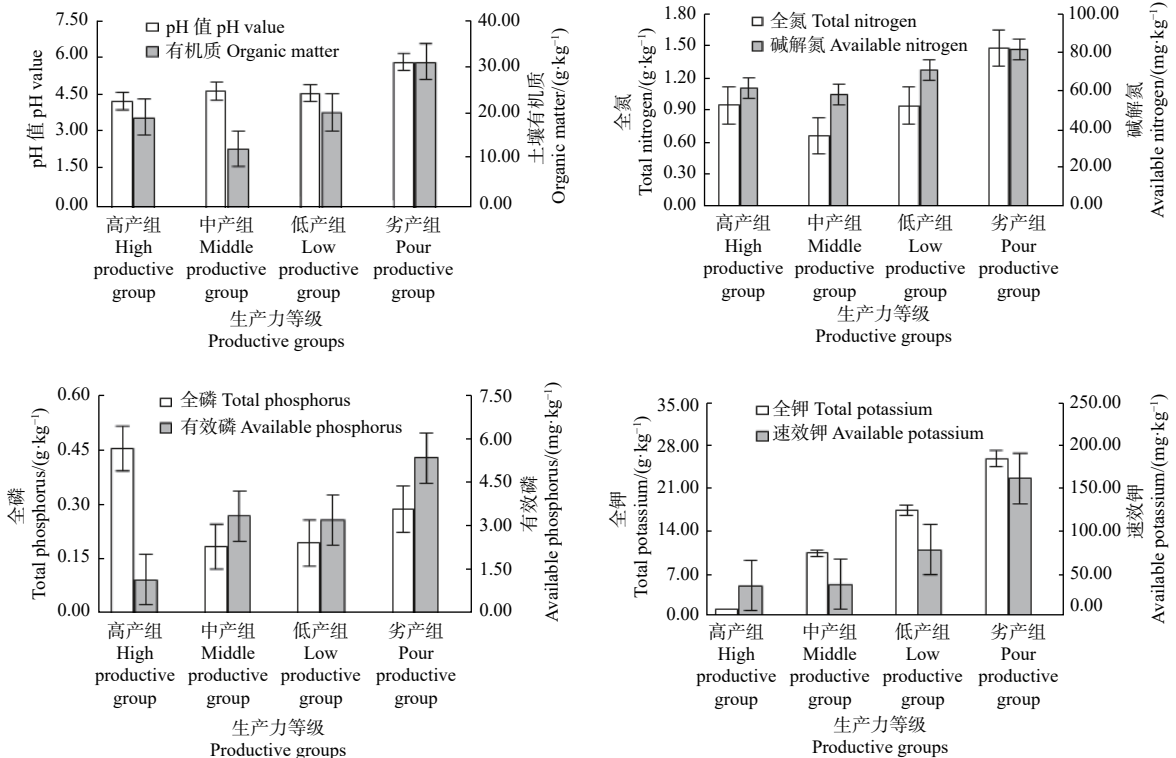


图2 各生产力组的土壤化学性质

Fig. 2 Soil chemical properties of different productivity groups

通过对土壤化学性质与尾细桉林地生产力等级的分析(图2)可知:各生产力等级组的土壤化学

性质之间存在较大差异,根据全国第二次土壤普查养分分级标准和各生产力等级组的养分含量范围,

将立地等级组划分为Ⅲ级(劣产组)、Ⅳ级(低产组)和Ⅴ级(高产组和中产组)3个级别,表明雷琼地区土壤养分含量普遍偏低。各生产力组的pH值为4~6,适合桉树酸性土壤生长的生物学特性。高产组的有机质含量高于中产组,与低产组相差不大,略低于劣产组。中产组全氮含量最低,比高产组、低产组和劣产组分别低了30.11%、29.89%和55.29%;各生产力等级组碱解氮含量略有差异,整体较低,基本位于养分含量的Ⅳ级水平。高产组的全磷明显高于其它生产力等级组,但有效磷含量相比最低,中产组、低产组、劣产组全磷含量分别比高产组低了58.82%、57.09%、36.32%。全钾和速效钾含量均是高产组<中产组<低产组<劣产组。高产组主要分布在立地条件较好的地区,虽然养分含量不高,但由于土壤密度较小,土壤疏松和渗透性好,保水保肥能力强,林木根系发达,有利于对土壤水分和养分的吸收与利用,林木年均生长量较好。低产组和劣产组主要分布在立地条件较差的地区,虽然土壤养分含量较高,但因土壤质地差异导致养分被吸收利用率低,年均生长量较差。

4 讨论

4.1 雷琼地区立地分类的主要影响因子

立地类型划分是立地质量评价的基础和科学造林的关键^[2]。由于立地质量受土壤、地形、气候等多种立地因子的影响^[22],在进行立地划分和评价时对立地因子进行了较多研究。罗美娟等^[23]研究表明,影响尾叶桉树高生长的主要因子为土壤有机质、土层厚度、腐殖质厚度,影响胸径生长的主要因子为坡位、密度、有效磷含量;凌子燕等^[24]研究表明,桉树生长受海拔、坡位、土壤种类、坡向和成土母岩的影响比较大,其中,坡向、土壤种类和成土母岩因子对桉树影响明显,与本研究认为雷琼地区影响尾细桉生长的主要立地因子是土壤质地、成土母岩和土壤密度的研究结果类似。

土壤质地具有较稳定的自然属性,对土壤理化性质和林木的生长有极其重要的影响。砂土利于尾细桉根系生长,但其保持水肥能力较差;黏土虽养分含量丰富,但对营养的吸收利用率较低;壤土保水肥效果好,利于根系生长和地上生物量的积累。所以,尾细桉林地生产力表现为壤土较好,砂土次之,黏土最差,该结果与贾立华等^[25]的研究结果

一致。成土母岩影响着土壤养分和土壤理化性质,从而对植物生长发育产生重要影响^[26-27]。有研究表明,成土母岩与烤烟^[28]、米老排(*Mytilaria laosensis* Lec.)^[29]、杜仲(*Eucommia ulmoides* Oliver)^[30]等植物的生长密切相关。本研究表明,成土母岩是影响尾细桉人工林生长的重要立地因子之一,在今后选择造林地时要注意发育形成土壤的成土母岩,以充分发挥林地土壤的生产力。土壤密度作为最重要的土壤物理性质之一,不仅可以准确地反映土壤物理性状,还可有效地指示土壤质量和土壤生产力^[31]。研究表明,雷琼地区土壤密度变化范围为1.02~1.66 g·cm⁻³,不同立地类型的土壤密度差异明显。一般中、低密度的土壤类型土壤疏松,结构性良好,有助于养分的吸收利用,更利于林木的生长,但保水保肥性能一般。然而,受土壤质地等立地因子影响,中、低密度土壤保水肥能力会有所改善。高密度土壤虽具有较好的保水肥性能,但因通透性差,不利于水肥的吸收利用,从而影响尾细桉生长。由于本研究受区域范围和立地因子的限制,今后应加大研究区域和立地因子的选择力度,可进一步深入探讨气候因子等因素对林木生长和立地生产力的影响,以增强尾细桉人工林立地分类系统的准确性和针对性。

4.2 土壤化学性质对尾细桉生长的影响

土壤肥力在一定程度上影响着林木的生长,了解影响因子作用对森林的经营与管理具重要指导意义^[32-33]。国内外学者围绕土壤肥力和林木生长的关系已开展较多研究^[34-35],但土壤化学性质对尾细桉林木生长的关联性研究有限。本文通过相关性分析表明,影响尾细桉人工林生长的土壤肥力因子为pH值、有机质、全磷、全钾和速效钾,这与纪浩等^[36]的研究结果相似。pH值作为土壤的重要化学性质,可直接影响植物的生长发育^[37]。雷琼地区尾细桉林地各生产力等级组土壤以酸性为主,pH值在4~6范围内表现为其值越低,林地生产力越高,说明尾细桉对酸性土壤的适应性较强。土壤有机质是土壤中各种养分的重要来源,对土壤肥力的提高具有重要作用。随着生产力等级的升高,有机质含量整体呈减少趋势,高产组和中产组含量相对较低,所以应尽量保留林地的凋落物,提高土壤有机质含量,以促进尾细桉的稳定高产。氮素直接影响植物的光合速率,对植物有明显的增产效果^[38]。本

研究氮素与尾细桉生长相关性不显著,各生产力等级组虽有差异,但整体含量较低,为防止林木矮小和生长缓慢,应注意氮肥的施用。华南地区土壤含磷量偏低,且容易被吸附固定,钾素也普遍缺乏;而磷、钾元素与尾细桉的生长关系密切,土壤缺磷和钾会导致林木生长不良,病虫害增多,生长量下降。高产组全磷含量最高,有效磷较低,钾素含量也都较低,经营中要注意及时补充磷肥和钾肥,保证高产组生产力的稳定性。其它生产力等级组因土壤密度较高和土壤质地差异,土壤通透性较差,影响水肥输送,导致养分累积,尤其有效磷和钾素含量相对较高,被吸收利用的效率有待提高,经营中需适当改善立地环境,掌握尾细桉的需求规律,合理施用磷、钾肥,提高立地生产力。

4.3 雷琼地区立地生产力的评价

通过优势木高变化确定林分的基准年龄,然后选用基准年龄以上的样地进行立地质量评价,能更好的应用于造林实践。结果表明:雷琼地区尾细桉林地高产组(最适宜)、中产组(较适宜)和低产组(适宜)等级总占比为91.89%,表明雷琼地区整体上比较适合尾细桉的种植和生长,种植区分布基本合理,仍有一定的增长空间,需加强经营管理的抚育措施,可充分发挥林地的生产潜力;但有8.11%的样地不适宜栽植尾细桉,可考虑栽种其它更适宜的乡土树种来提高林地的利用效率。虽然立地质量是决定林分生产力的主要因素,但其它营林因素,如造林密度、施肥抚育、林下植物对土壤养分循环的关系等影响也很重要^[13]。已有研究证明,林分密度对桉树人工林树高、胸径及材积的生长有很大影响^[39-40]。因此,今后在选择立地时还需关注营林因素对生长的影响,高产组由于立地条件良好,可适当降低林分的密度和做好施肥等抚育管理,以便充分发挥林地的生产力。中产组和低产组在造林时应加强整地措施,通过改善土壤结构和环境,提高林木对养分的利用率,适当增加种植密度,最大限度的提高人工林生态系统的稳定性和林地生产力。

5 结论

雷琼地区影响尾细桉人工林生长的立地主导因子是土壤质地、成土母岩和土壤密度,可划分为12个立地类型,将其分为高产组、中产组、低产

组和劣产组4个立地等级。当尾细桉栽种在浅海沉积物和玄武岩发育的壤土、中低土壤密度立地时,林木生长最好,立地生产力最高。虽然雷琼地区土壤养分含量整体较低,但土壤pH值、有机质、全磷、全钾和速效钾的含量对尾细桉的生长也会产生显著影响。因此,在营造尾细桉人工林时,应选择合适的土壤类型,了解土壤的理化性能,适当的施用磷肥和钾肥,以期发挥尾细桉人工林最大生产潜力。

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.
- [2] 邓送求,闫家锋,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.
- [3] Louw J, Scholes M. Forest site classification and evaluation: a South African perspective[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 171(1-2): 153-168.
- [4] 杨海滨,张茂震,丁丽霞,等.基于最大胸径生长率的浙江省杉木人工林立地质量评价[J].浙江农林大学学报,2020,37(1):105-113.
- [5] 杜健,梁坤南,周再知,等.云西南双版纳柚木人工林立地类型划分及评价[J].林业科学,2016,52(9):1-10.
- [6] 唐城,王春胜,庞圣江,等.广西大青山西南桦人工林立地类型划分及评价[J].西北林学院学报,2018,33(4):52-57.
- [7] 李斌成,杜超群,袁慧,等.湖北省杉木人工林立地类型划分及评价[J].湖北林业科技,2020,49(2):1-5.
- [8] 杨民胜,彭彦.中国桉树纸浆材现状与发展趋势[J].纸和造纸,2006(25):17-20.
- [9] 彭仕尧,徐建民,李光友,等.尾细桉无性系在雷州半岛的生长与遗传分析[J].中南林业大学学报,2013,33(4):23-27.
- [10] Rodriguez R, Real P, Espinosa M, et al. A process-based model to evaluate site quality for *Eucalyptus nitens* in the Bio-Bio Region of Chile[J]. Forestry, 2009, 82(2): 149-162.
- [11] James K. G, Howard L. Site classification for maiden's gum, *Eucalyptus globulus* subsp. *Maidenii*, in Rwanda[J]. Forest Ecology and Management, 1984, 8(2): 107-116.
- [12] Rafael R T, Alvaro A. V S, David F, et al. Environmental uniformity, site quality and tree competition interact to determine stand productivity of clonal *Eucalyptus*[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 410: 76-83.
- [13] 赵时胜,陈映辉.耐寒桉树立地类型划分及评价[J].湖南林业科技,2014,41(5):32-39.
- [14] 蔡会德,吴树刚,杨彦臣,等.桉树立地评价及其决策支持技术的实现[J].北京林业大学学报,2009,31(2):36-46.
- [15] 朱炜.福建省桉树立地质量评价研究[J].林业科技开发,2006,20(1):22-24.

- [16] Lu H F, Xu J M, Li G Y, *et al.* Site classification of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* plantations in China[J]. *Forest*, 2020, 11(8): 871-885.
- [17] 国家林业局. 森林土壤分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [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.
- [20] 惠淑荣, 李丽锋, 刘 强, 等. 辽东地区日本落叶松立地分类和立地质量研究[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(3): 139-142.
- [21] 郑聪慧, 贾黎明, 段 劼, 等. 华北地区栓皮栎天然次生林地位指数表的编制[J]. 林业科学, 2013, 49(2): 79-85.
- [22] Lewis N B, Ferguson I S, Sutton W R J, *et al.* Management of radiata pine[M]. Butterworth: Inkata Press Pty Ltd, 1993.
- [23] 罗美娟, 李宝福, 魏影景, 等. 闽南山地桉树生长与立地因子间的典型相关分析[J]. 福建林业科技, 2000, 27(1): 14-17.
- [24] 凌子燕, 岑巨延, 韦金丽, 等. 森林生产力与立地条件的相关性分析—以宁明县的马尾松和桉树森林生产力为例[J]. 广西林业科学, 2012, 41(2): 124-127.
- [25] 贾立华, 赵长星, 王月福, 等. 不同质地土壤对花生根系生长、分布和产量的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(7): 684-690.
- [26] Kram P, Hruska J, Wenner B S, *et al.* The biogeochemistry of basic cations in two forest catchments with contrasting lithology in the Czech Republic[J]. *Biogeochemistry*, 1997, 37(2): 173-202.
- [27] 方升佐, 崔同林, 虞木奎. 成土母岩和条龄对青檀皮质量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 122-127.
- [28] 郑东方, 翟 欣, 许自成, 等. 不同成土母岩类型与烤烟化学成分的相关聚类分析评价[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1065-1070.
- [29] 郭文福. 米老排人工林生长与立地的关系[J]. 林业科学研究, 2009, 22(6): 835-839.
- [30] 王懿君, 王新洋. 江淮地区成土母岩与杜仲生长关系的研究[J]. 现代农业科技, 2006(7): 16.
- [31] 柴 华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3903-3910.
- [32] Rocha G N, Goncalves J L M, Moura I M. Changes in soil fertility and growth of an *Eucalyptus grandis* plantation fertilized with biosolid[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2004, 28(4): 623-639.
- [33] 林文树, 穆 丹, 王丽平, 等. 针阔混交林不同演替阶段表层土壤理化性质与优势林木生长的相关性[J]. 林业科学, 2016, 52(5): 17-25.
- [34] 李惠通, 张 芸, 魏志超, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤肥力分析[J]. 林业科学研究, 2017, 30(2): 322-328.
- [35] 王琳琳, 陈立新, 刘振花, 等. 红松阔叶混交林不同演替阶段土壤肥力与林木生长的关系[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(4): 59-65.
- [36] 纪 浩, 董希斌. 大兴安岭低质林改造后土壤肥力综合评价[J]. 林业科学, 2012, 11(48): 117-123.
- [37] 谢 君. 桉树人工林地土壤理化性质及其群落的变化[D]. 重庆: 西南大学, 2010: 17.
- [38] 周 维. 氮磷钾配比施肥对格木幼苗生长及光合特性影响的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016: 2.
- [39] 刘雅静, 张书源, 李 静, 等. 坡位和密度对桉树林生产力和林下植被多样性的影响[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(4): 48-55.
- [40] 陈少雄, 李志辉, 李天会, 等. 不同初植密度的桉树人工林经济效益分析[J]. 林业科学研究, 2008, 21(1): 1-6.

Site Classification and Quality Evaluation of *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis* Plantation in Hainan Island and Leizhou Peninsula Region

ZHANG Pei-jian^{1,2}, LU Wan-hong², XU Jian-min¹, LIN Zhi-feng³, CHEN Ma-xing⁴, LI Kong-sheng⁴

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China; 2. China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, Guangdong, China; 3. Hainan Jinhua Forestry Co., Ltd., Danzhou 578101, Hainan, China; 4. Leizhou Forestry Bureau Co., Ltd., China Forest Group, Zhanjiang 524043, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] To study the site type and quality evaluation of *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis* plantation in Hainan Island and Leizhou peninsula coastal area, so as to provide reference for site selection and production potential promotion of *E. urophylla* × *E. tereticornis* plantation in Hainan Island and Leizhou peninsula region. [Method] 112 plots were set up in 1- to 18-years-old *E. urophylla* × *E. tereticornis* plantations in Leizhou and Hainan. The growth indexes of *E. urophylla* × *E. tereticornis* were investigated, the site factors were recorded, and soil samples were collected to determine the soil physical and chemical properties. The quantitative theory I was used to establish the relationship model between site factors and the dominant high annual mean growth of *E. urophylla* × *E. tereticornis*, the site classification and quality evaluation of *E. urophylla* × *E. tereticornis* plantation were carried out by k-means cluster analysis and correlation analysis. [Result] The multiple correlation coefficient between site factors (altitude, slope, soil depth, parent rock, pH value, soil texture, and soil density) and the height growth of the dominant tree was 0.712, which was highly significant ($P < 0.01$). Soil texture, parent rock and soil density were the main site factors affecting height growth of dominant trees of *E. urophylla* × *E. tereticornis*. According to these factors, *E. urophylla* × *E. tereticornis* plantation in Hainan island and Leizhou peninsula region could be divided into 12 site types. According to the suitability and productivity, the site quality was evaluated and divided into four grades: high yield group, middle yield group, low yield group and poor yield group. The total proportion of the most suitable, more suitable and suitable grades was 91.89%, which indicated that the distribution of *E. urophylla* × *E. tereticornis* plantation area in Hainan island and Leizhou peninsula region was basically reasonable. The soil factors such as pH, organic matter, total phosphorus, total potassium and available potassium had significant effects on the growth of *E. urophylla* × *E. tereticornis* plantation. [Conclusion] Most of the site conditions in Hainan island and Leizhou peninsula region are suitable for the growth of *E. urophylla* × *E. tereticornis*. When planting *E. urophylla* × *E. tereticornis* plantation, it is suggested to choose the high yield group sites with acid loam soil and medium and low density. In afforestation and tending management, it is necessary to supplement phosphorus and potassium fertilizer in time to give full play to the production potential of forest land, timely replant the unsuitable site to improve the scientificity and rationality of afforestation.

Keywords: Hainan island and Leizhou peninsula region; *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis* plantation; site type; site quality evaluation

(责任编辑: 徐玉秀)