

网络出版时间:2021-07-07 11:06 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.01.007
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20210706.1727.016.html

尾巨桉人工林立地因子筛选及评价

张程^{1,2}, 欧阳林男¹, 陈少雄¹, 张维耀¹, 陈沫¹, 何沙娥¹, 刘学锋¹

(1 国家林业和草原局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022; 2 南京林业大学 林学院, 江苏 南京 210037)

【摘要】【目的】探讨尾巨桉栽培区立地因子筛选及立地类型划分, 为该地区尾巨桉人工林立地选择特别是大径材培育提供科学依据。【方法】以栽培区 7.5 年生尾巨桉为研究对象, 采用典型抽样法设置 40 块样地, 收集生长数据(树高、胸径、优势高)、气候因子(年日照时数)和地形因子(坡向、坡度、坡位和海拔)数据, 分析土壤理化性质, 通过主成分分析、数量化理论 I 研究立地因子与林木生长量之间的关系; 运用聚类分析, 对样地进行生产力等级和立地类型划分。【结果】以坡向、坡度、坡位、海拔、土壤养分等级、土壤质地、土壤密度和年日照时数 8 个立地因子与尾巨桉优势高建立数量化模型, 模型的复相关系数为 0.956, 达极显著水平($P<0.01$); 数量化模型中, 海拔、土壤质地、坡向和年日照时数均与尾巨桉优势高极显著相关($P<0.01$), 年日照时数、海拔和土壤质地对尾巨桉优势高的贡献率达 62.75%。根据数量化回归模型和调查样地的立地因子数据, 计算得到各样地尾巨桉优势高预测值, 进而划分出高、中、低 3 组优势高生产力等级, 尾巨桉优势高分别为 27.16 m、24.19~25.45 m 和 21.77~23.40 m; 再以年日照时数、海拔、土壤质地 3 个立地主导因子划分为 10 个立地类型。不同生产组间年日照时数和土壤粘粒含量差异显著($P<0.05$), 年日照时数表现为高产组最长, 低产组最短, 土壤粘粒含量表现为高产组高于中、低产组, 海拔表现为高产组显著低于中、低产组, 土壤有机质、全 P、有效 Mg 和有效 Cu 含量均表现为高产组显著高于中、低产组, 土壤有效 Mn 含量表现为高产组显著高于低产组。【结论】影响尾巨桉栽培区人工林生产力的主导立地因子为年日照时数、海拔和土壤质地, 尾巨桉在年日照时数较长、海拔较低以及土壤粘粒、有机质、全 P、有效 Cu、有效 Mg 和有效 Mn 含量较高的立地环境中生长更好。

【关键词】尾巨桉人工林; 立地因子筛选; 立地评价; 数量化理论 I

【中图分类号】S758.8 【文献标志码】A 【文章编号】1671-9387(2022)01-0052-11

Site factor selection and evaluation of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation

ZHANG Cheng^{1,2}, OUYANG Linnan¹, CHEN Shaoxiong¹, ZHANG Weiyao¹,
CHEN Mo¹, HE Sha'e¹, LIU Xuefeng¹

(1 China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang, Guangdong 524022, China;

2 College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: 【Objective】Site factors selection and classification of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation were investigated to provide basis for site selection and cultivation of large-diameter timber. 【Method】A total of 40 plots of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* at the age of 7.5 years were set up by typical sampling method. Growth (height, diameter at breast height and dominant height), climatic factor (annual sunshine hours) and topographic factors (slope direction, slope, slope position and altitude) were

【收稿日期】2021-02-08
【基金项目】“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0600502); 广东省林业科技创新项目(2019KJCX005); 湛江桉树培育国家长期科研基地运行补助项目(2020132509)
【作者简介】张程(1994—), 男, 安徽桐城人, 硕士, 主要从事人工林定向培育研究。E-mail: zc18183@163.com
【通信作者】陈少雄(1965—), 男, 江西樟树人, 研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事人工林定向培育技术研究。
E-mail: sxchen01@163.com

collected, and chemical and physical properties of soil were analyzed. Principal component analysis and quantitative theory I were used to analyze the relationship between site factors and tree growth. Cluster analysis was used to classify the productivity levels and site types. 【Result】 The quantitative model obtained with selected site factors of slope direction, slope, slope position, altitude, soil nutrient grades, soil texture, soil density and annual sunshine hours had complex correlation coefficient of 0.956, reaching extremely significant level ($P < 0.01$). In the quantitative model, altitude, soil texture, slope direction and annual sunshine hours had extremely significant correlation with dominant height of *Eucalyptus urophylla* $\times$ *E. grandis* ($P < 0.01$), and total contribution rate of annual sunshine hours, altitude and soil texture to dominant height was 62.75%. According to the quantitative regression model and site factors of survey sites, the predicted values of dominant height of *Eucalyptus urophylla* $\times$ *E. grandis* were obtained and site productivity levels were divided into 3 groups. The dominant heights were 27.16 m, 24.19–25.45 m and 21.77–23.40 m, respectively. The site types were divided into 10 types based on annual sunshine hours, altitude and soil texture. Annual sunshine hours and soil clay were significantly different among different yield groups ($P < 0.05$). The longest annual sunshine hours was in high yield group and the shortest was in low yield group. The soil clay in high yield group was higher than that in middle and low yield groups. Altitude in high yield group was significantly lower than that in middle and low yield groups. Soil organic matter, total P, available Mg and available Cu in high yield group were significantly higher than those in middle and low yield groups, and soil available Mn in high yield group was significantly higher than that in low yield group. 【Conclusion】 The main site factors affecting productivity of *Eucalyptus urophylla* $\times$ *E. grandis* plantation were annual sunshine hours, altitude and soil texture. *Eucalyptus urophylla* $\times$ *E. grandis* grew better in site environment with longer annual sunshine hours, lower altitude and higher contents of soil clay, organic matter, total P, available Cu, available Mg and available Mn.

Key words: *Eucalyptus urophylla* $\times$ *E. grandis* plantation; selection of site factor; site evaluation; quantitative theory I

立地条件是影响林木生长和林分生产力的重要因素,决定了树种选择和林地经营规划方向^[1-3]。对立地生境进行因子筛选和评价,分析立地条件与林木生长的关系,使树种与立地条件相匹配,构建生长模型预测林分生产量,可达到适地适树及提高营林效率的目的。在国内外有关人工林立地因子的报道中,多数基于地位指数,构建其与林地环境因子模型,进行立地生境因子筛选和立地评价。唐诚等^[4]利用地位指数与立地因子构建数量化模型,筛选出坡位、海拔、坡向为西南桦林(*Betula alnoides*)的主导立地因子;Curt等^[5]采用多元回归方法分析法国中部花旗松林(*Pseudotsuga menziesii*)立地指数与生态因子的联系;Pietrzykowski等^[6]基于立地指数与土壤理化性质及其生物学特性,筛选出影响樟子松(*Pinus sylvestris* L.)生长的主导因子,并对立地生产潜力进行预测。此外,通过分析林木其他生长指标与环境因子间的关系,构建模型进行立地评价也较常见,如杜健等^[7]建立优势木年均高生长量与立地因子模型,筛选出土壤密度、土壤质地和土壤养

分为西双版纳柚木(*Tectona grandis*)林的主导立地因子,并划分立地类型;Quichimbo等^[8]基于气候、土壤和地形因子与林木优势高,筛选出厄瓜多尔安第斯山脉南部展松林(*Pinus patula*)立地等级划分的主导因子;杨海宾等^[9]基于最大胸径生长率和数量化理论 I 对浙江杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林进行了立地评价。然而,至今为止,有关桉树(*Eucalyptus*)人工林的立地因子及立地评价研究很少^[10]。本研究以我国南部桉树主要栽培区广西、广东和福建 3 个省(区)为研究区域,以广泛种植的尾巨桉为研究对象,设置试验样地,调查尾巨桉生长数据,分析样地的气候、地形和土壤因子数据,采用主成分分析、数量化理论 I 和聚类分析等方法,建立立地因子与尾巨桉生长关系模型进行主导立地因子筛选,划分立地等级,并评价立地质量,为尾巨桉实地栽培的立地选择和经营提供科学依据。

1 研究区概况

研究区分布于沿海地区,包括广西、广东和福建

3 个省(区),具体包括广西国有东门林场、广西国有黄冕林场、福建龙海九龙岭国有林场和广东清远基地 4 个典型栽培区作为尾巨桉立地研究试验区。广西国有东门林场($22^{\circ}17' \sim 22^{\circ}30' \text{N}$, $107^{\circ}14' \sim 108^{\circ}00' \text{E}$),年均气温 21°C ,年均降水量 $1\,200\text{ mm}$ 左右,相对湿度 75% ,海拔 $100 \sim 200\text{ m}$,地势较为平缓,土壤类型以砖红壤为主,土壤 pH 值 $4.0 \sim 5.5$ 。广西国有黄冕林场($24^{\circ}37' \sim 24^{\circ}52' \text{N}$, $109^{\circ}43' \sim 109^{\circ}58' \text{E}$),年均气温 19°C ,年均降水量 $1\,900\text{ mm}$ 左右,相对湿度 74% ,海拔 $120 \sim 350\text{ m}$,急陡坡居多,土壤类型以红壤、山地黄红壤为主,土壤 pH 值 $4.3 \sim 5.5$ 。福建龙海九龙岭国有林场($24^{\circ}21' \sim 24^{\circ}27' \text{N}$, $117^{\circ}41' \sim 117^{\circ}45' \text{E}$),年均气温 21°C ,年均降水量 $1\,450\text{ mm}$,相对湿度 78% ,海拔 $150 \sim 350\text{ m}$,陡坡居多,土壤类型以赤红壤、山地红壤为主,土壤 pH 值为 $4.0 \sim 4.8$ 。广东清远基地($23^{\circ}31' \sim 25^{\circ}12' \text{N}$, $111^{\circ}55' \sim 113^{\circ}55' \text{E}$),年均气温 22°C ,年均降雨量 $2\,069\text{ mm}$,相对湿度 76% ,海拔 $200 \sim 300\text{ m}$,地势偏陡,土壤类型以红壤和黄壤为主,pH 值 $4.0 \sim 5.0$ 。东门林场、清远基地及九龙岭林场均为亚热带季风气候,黄冕林场为中亚热带季风气候。林下植被以山莓(*Rubus corchorifolius*)、毛桐(*Mallotus barbatus*)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、三桠苦(*Evodia lepta*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)和乌桕(*Triadica sebifera*)等居多。

2 研究方法

2.1 样地设置及取样方法

在广西、广东和福建共设立 4 个试验点,采用典型抽样法设置样地 40 块,每块样地面积 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,其中东门林场设置样地 13 个,黄冕林场设置样地 11 个,九龙岭林场、清远基地均设置 8 个样地。

对样地内尾巨桉的树高、胸径进行每木调查。记录所有样地的坡向、坡位、坡度及地貌等因子,结合 GPS 仪测定各样地的海拔、经纬度。依据软件 New_LocClim V1.10 收集气候因子年日照时数。根据 7.5 年生尾巨桉的林木调查数据,以最高树高为标准,在每块样地内确定 5 株优势木,其树高平均值作为样地林分优势高,沿样地对角线等距离挖 3 个土壤剖面,按 $0 \sim 20\text{ cm}$ 、 $20 \sim 40\text{ cm}$ 、 $40 \sim 60\text{ cm}$ 分层 3 点采集土样并混合,分析土壤化学性质,所有剖面各层用环刀取原状土,测定土壤孔隙度、田间持水量、土壤密度等物理性质。

2.2 土样测定方法

土壤密度测定采用环刀法^[11],土壤机械组成按照美国制标准过筛,并确定土壤质地^[12]。土壤有机质、pH 值及 N、P、K 全量分别采用重铬酸钾水浴法^[11]、pH 计^[13]、半微量凯氏法^[13]、碱溶-钼蓝比色法^[14]、火焰光度法^[11]测定。土壤速效 K、有效 P、碱解 N 分别采用乙酸铵浸提-火焰光度法^[11]、双酸法浸提-钼蓝比色法^[15]、碱解扩散吸收法^[11]测定。土壤有效 Ca 和有效 Mg 使用 NH_4OAc -EDTA 浸提^[16],有效 Zn 和有效 Cu 使用 HCl 浸提^[17],有效 Mn 用浓硫酸-高氯酸消解^[18],原子吸收分光光度法测定各有效成分含量。土壤有效 B、有效 S 测定分别采用姜黄素比色法^[16]和硫酸钡比浊法^[19]。试验数据取同一处理测定结果均值。

2.3 数据处理

采用主成分分析、聚类分析方法划分土壤养分等级,结合数量化理论 I 方法^[20]进行立地类型划分和评价。所有数据均利用 Excel 2013、Spss 23 和 Origin 2017 进行处理和分析。

3 结果与分析

3.1 调查样地的林分情况

通过对 40 块样地的尾巨桉林分情况进行调查,结果见表 1。由表 1 可以看出,黄冕林场、清远基地、东门林场和九龙岭林场 4 个试验点调查样地的坡向均涉及 2~3 个,以阳坡、半阳坡和半阴坡为主,坡度为 $4.36^{\circ} \sim 45.52^{\circ}$,坡位均涉及 2~3 个,以中、下坡为主,海拔为 $106.4 \sim 341.7\text{ m}$,土壤密度为 $1.06 \sim 1.55\text{ g/cm}^3$,土壤质地均涉及 1~3 种,以粘土、粘壤土为主,尾巨桉优势高为 $20.60 \sim 28.30\text{ m}$,其中东门林场的长势最好。

3.2 土壤理化性质与尾巨桉优势高的相关性

由表 2 可以看出,调查样地土壤全 P、有效 Cu、有效 Mg、有效 Mn 和有机质含量与尾巨桉优势高显著正相关($P < 0.05$),土壤全 K、速效 K 和有效 P 含量与尾巨桉优势高显著负相关($P < 0.05$)。土壤粘粒含量与尾巨桉优势高显著正相关($P < 0.05$)。粘粒含量与水稳性系数密切相关,且土壤中粘粒含量越高,吸附营养成分的能力越强,故尾巨桉在粘粒含量高的土壤中长势较好。

3.3 土壤养分的等级划分

通过对标准化数据进行巴特利特检验和 KMO 抽样测定,对测定的 15 项土壤化学指标进行因子分析,得到因子特征值、成分矩阵、各主成分贡献率及

累积贡献率,前 4 个主成分的累积贡献率为 77.012%(表 3)。

表 1 调查样地的林分情况

Table 1 Stand situation of sample plots

试验点 Site	样地数 Number of sample plots	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope	坡位 Slope position	海拔/m Altitude	土壤密度/ (g·cm ⁻³) Soil density	土壤质地 Soil texture	尾巨桉优势高/m Dominant height of <i>Eucalyptus urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	样地编号 Sample plot number
黄冕林场 Huang- mian For- est Farm	11	半阳坡、半阴坡、阴坡 Half-sunny, half-shady and shady slope	26.96~45.52	上、中、下坡 Upper, mid- dle and low- er slope	128.2~262.1	1.06~1.37	粘土、粉粘土、粉粘壤土 Clay, silty clay and silty clay loam	20.60~25.02	1~11
清远基地 Qingyuan Base	8	阳坡、半阳坡、半阴坡 Sunny, half-sunny and half-shady slope	5.78~42.58	上、中、下坡 Upper, mid- dle and low- er slope	214.7~292.2	1.24~1.52	粘土、粘壤土 Clay and clay loam	22.22~24.60	12~19
东门林场 Dongmen Forest Farm	13	阳坡、半阳坡、无坡向 Sunny, half-sunny and flat slope	4.36~6.14	下坡、平地 Lower slope and flat ground	106.4~150.0	1.20~1.38	粘土 Clay	26.28~28.30	20~32
九龙岭林场 Jiulongling Forest Farm	8	半阳坡、半阴坡 Half-sunny and half-shady slope	12.47~30.70	中、下坡 Middle and lower slope	254.0~341.7	1.38~1.55	粘土、粘壤土 Clay and clay loam	22.70~26.00	33~40

表 2 土壤理化指标与林木优势高的相关性

Table 2 Correlation analysis of soil physical and chemical properties with heights of dominant trees

土层/cm Soil layer	pH	有机质 Organic matter	全 N Total N	全 P Total P	全 K Total K	碱解 N Available N	有效 P Available P	速效 K Available K	有效 Ca Available Ca
0~60	-0.181	0.350 *	-0.176	0.427 *	-0.571 *	-0.276	-0.356 *	-0.348 *	0.030
土层/cm Soil layer	有效 Mg Available Mg	有效 Cu Available Cu	有效 Zn Available Zn	有效 Mn Available Mn	有效 B Available B	有效 S Available S	土壤密度 Soil density	粘粒 Clay	
0~60	0.381 *	0.651 *	-0.292	0.459 *	0.188	-0.201	-0.139	0.736 *	

注: * 表示相关显著($P<0.05$)。
Note: * indicates significant correlation($P<0.05$).

表 3 土壤养分因子分析成分矩阵、特征值和贡献率

Table 3 Component matrix,eigenvalue and contribution rate of soil nutrient factors analysis

指标 Index	成分 Component			
	a1	a2	a3	a4
pH	-0.467	0.359	0.241	-0.510
有机质 Organic matter	0.834	-0.184	0.237	0.292
全 N Total N	0.641	0.550	0.160	0.037
全 P Total P	0.913	-0.264	-0.054	-0.038
全 K Total K	-0.324	0.698	0.161	0.374
碱解 N Available N	0.575	0.472	-0.152	0.397
有效 P Available P	0.436	0.527	-0.494	-0.075
速效 K Available K	-0.095	0.838	0.235	-0.077
有效 Ca Available Ca	0.772	0.149	-0.308	-0.006
有效 Mg Available Mg	0.924	-0.113	-0.044	-0.052
有效 Cu Available Cu	0.696	-0.268	0.343	-0.423
有效 Zn Available Zn	0.093	0.729	0.473	0.009
有效 Mn Available Mn	0.323	-0.159	0.743	-0.163
有效 B Available B	-0.084	-0.454	0.496	0.586
有效 S Available S	-0.791	-0.170	-0.047	0.133
特征值 Eigenvalues	5.472	3.124	1.730	1.226
各成分贡献率/% Contribution	36.482	20.824	11.530	8.176
累积贡献率/% Accumulation	36.482	57.306	68.836	77.012

各因子得分乘以对应特征值的算术平方根可得各主成分得分,各主成分贡献率在累积贡献率中的占比为各主成分的权重,乘以对应的主成分得分,求

和可得各样地的综合得分。对各样地的综合得分进行聚类分析,将土壤养分划分为高、中、低 3 个养分等级,结果见表 4。

表 4 土壤养分的等级分组

Table 4 Classification of sample plots based on soil nutrient grades

土壤养分等级 Soil nutrient grades	样地 Plot
高养分 High nutrient	1、2、6、7、9、10、11、22、23、28、31、33
中养分 Middle nutrient	3、5、8、20、21、24、25、26、27、29、30、32、34、35、36、38、39、40
低养分 Low nutrient	4、12、13、14、15、16、17、18、19、37

3.4 立地因子的类目划分

依据相关的林业调查技术标准,结合立地因子对林木生长发育的影响及其变化范围,以及上述土

壤养分分级结果,对 8 项因子进行不同类目划分,结果见表 5。

表 5 立地因子的类目划分

Table 5 Category division of site factors

指标 Index	类目 Category				
坡向 X_1 Aspect	阳坡 X_{11} Sunny slope	半阳坡 X_{12} Half-sunny slope	半阴坡 X_{13} Half-shady slope	阴坡 X_{14} Shady slope	无坡向 X_{15} Flat slope
坡度 $X_2/(^{\circ})$ Slope	平坡(0~5) X_{21} Conservative slope	缓坡(5~15) X_{22} Gentle slope	陡坡(15~35) X_{23} Slope	急陡坡(>35) X_{24} Steep slope	
坡位 X_3 Slope position	上坡 X_{31} Upper slope	中坡 X_{32} Middle slope	下坡 X_{33} Lower slope	平地 X_{34} Flat ground	
海拔 X_4/m Altitude	低海拔(<150) X_{41} Low altitude	中海拔(150~250) X_{42} Middle altitude	高海拔(>250) X_{43} High altitude		
土壤密度 $X_5/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ Soil density	<1.1 X_{51}	1.1~1.3 X_{52}	1.3~1.5 X_{53}	>1.5 X_{54}	
土壤质地 X_6 Soil texture	粉粘土 X_{61} Silty clay	粘土 X_{62} Clay	粉粘壤土 X_{63} Silty clay loam	粘壤土 X_{64} Clay loam	
土壤养分等级 X_7 Soil nutrient grades	高养分 X_{71} High nutrient	中养分 X_{72} Middle nutrient	低养分 X_{73} Low nutrient		
年日照时数 X_8/h Annual sunshine hours	短日照时数 (1 174.8) X_{81} Short annual sunshine hours	中短日照时数 (1 335.7) X_{82} Medium-short annual sunshine hours	中长日照时数 (1 799.3) X_{83} Medium-long annual sunshine hours	长日照时数 (1 937.8) X_{84} Long annual sunshine hours	

3.5 数量化回归模型的建立与检验

结合立地因子的类目划分结果和数量化理论方法 I,将各样地的立地因子数据进行(0,1)处理,运用回归方法构建量化后立地因子与尾巨桉优势高(H)数量化回归模型如下:

$$H = -0.700X_{11} - 1.354X_{13} + 0.557X_{14} + 0.332X_{22} - 0.382X_{24} - 0.275X_{31} - 0.593X_{32} + 0.100X_{34} - 1.962X_{41} - 2.709X_{42} - 0.020X_{51} - 0.256X_{53} - 1.311X_{54} - 1.041X_{61} - 2.346X_{63} - 0.414X_{64} - 0.324X_{71} + 0.728X_{73} - 1.903X_{81} - 4.515X_{82} - 3.647X_{84} + 29.473。$$

采用偏相关分析方法计算各指标与尾巨桉优势高的偏相关系数,并通过 t 检验方法对偏相关系数进行假设检验,拟合模型得出的回归系数和有关参数如表 6 所示。

回归分析的结果表明,除坡度和坡位外,其他因子与尾巨桉优势高的偏相关系数均达到显著($P<0.05$)或极显著水平($P<0.01$),其中年日照时数、土壤质地、海拔、坡向达到了极显著水平($P<0.01$)。从得分所占比例看,年日照时数(29.61%)、海拔(17.76%)、土壤质地(15.38%)在所选立地因子中位列前 3,且得分总占比为 62.75%,坡向和土壤密度次之。模型拟合的复相关系数 $R=0.956$,达极显著水平($P<0.01$)。对所选的 8 个因子(坡向 X_1 ,坡度 X_2 ,坡位 X_3 ,海拔 X_4 ,土壤密度 X_5 ,土壤质地 X_6 ,土壤养分等级 X_7 和年日照时数 X_8)与林木优势高拟合模型的适用性进行检验, $F_{(8,31)}=9.049>F_{0.01(8,31)}=3.17$,即 8 个立地因子与尾巨桉优势高密切相关,使用该方程对尾巨桉人工林进行立地质量评价是可靠的。

表 6 立地因子数量回归分析结果
Table 6 Quantitive regression of site factors

指标 Index	得分范围 Score range	得分所占比例/% Score proportion	偏相关系数 Coefficient of partial correlation	t 检验值 t-test
坡向 X ₁ Aspect	1. 911	12. 53	0. 640 * *	4. 562
坡度 X ₂ Slope	0. 714	4. 68	0. 264	1. 499
坡位 X ₃ Slope position	0. 693	4. 54	0. 273	1. 554
海拔 X ₄ Altitude	2. 709	17. 76	0. 772 * *	6. 652
土壤密度 X ₅ Soil density	1. 311	8. 60	0. 407 *	2. 441
土壤质地 X ₆ Soil texture	2. 346	15. 38	0. 647 * *	4. 648
土壤养分等级 X ₇ Soil nutrient grades	1. 052	6. 90	0. 405 *	2. 426
年日照时数 X ₈ Annual sunshine hours	4. 515	29. 61	0. 775 * *	6. 717

注: * 表示显著偏相关($t>1.697$); * * 表示极显著偏相关($t>2.457$)。
Note: * indicates significant partial correlation($t>1.697$); * * indicates extremely significant partial correlation($t>2.457$).

3.6 生产力等级及立地类型

结合上述数量化回归模型和各样地调查的立地因子数据,计算得到尾巨桉优势高预测值,采用聚类方法,将 40 块样地划分为高、中和低 3 组生产力等级,进而结合年日照时数、海拔和土壤质地 3 个主导因子对各生产组进行立地类型划分,依据各立地类型的尾巨桉优势高预测值进行组内排序,最终划分为 10 个立地类型(表 7)。

表 7 尾巨桉立地类型划分结果
Table 7 Site type classification of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*

生产力等级 Site productivity group		立地类型 Site type	优势高/m Dominant height		样地 Plot
			预测值 Predicted value	实测值 Measured value	
高产组 I High production group I	I	中长年日照时数、中/低海拔、粘土 Medium-long annual sunshine hours、 middle/low altitude、clay	27. 16	27. 16	20、21、22、23、24、 25、26、27、28、29、 30、31、32
中产组 II Middle production group II	II ₁	长年日照时数、高海拔、粘土 Long annual sunshine hours、high alti- tude、clay	24. 98	25. 45	35、40
	II ₂	长年日照时数、高海拔、粘壤土 Long annual sunshine hours、high alti- tude、clay loam	24. 70	24. 63	33、34、37、38
	II ₃	中短年日照时数、高海拔、粘土/粘壤土 Medium-short annual sunshine hours、 high altitude、clay/clay loam	24. 57	24. 19	13、14、15、16
	II ₄	短年日照时数、高/低海拔、粉粘土/粉 粘壤土 Short annual sunshine hours、high/low altitude、silty clay/silty clay loam	24. 46	24. 83	1、4、11
低产组 III Low production group III	III ₁	长年日照时数、高海拔、粘土/粘壤土 Long annual sunshine hours、high alti- tude、clay/clay loam	23. 73	23. 40	36、39
	III ₂	中短年日照时数、高/中海拔、粘土 Medium-short annual sunshine hours、 high/middle altitude、clay	22. 97	23. 35	12、17、18、19
	III ₃	短年日照时数、中海拔、粘土 Short annual sunshine hours、middle al- titude、clay	22. 79	22. 79	2、6
	III ₄	短年日照时数、中海拔、粉粘壤土 Short annual sunshine hours、middle al- titude、silty clay loam	22. 23	21. 99	3、5、8
	III ₅	短年日照时数、中海拔、粉粘土 Short annual sunshine hours、middle al- titude、silty clay	21. 89	21. 77	7、9、10

由表 7 可以看出,3 组生产力等级中尾巨桉优势高实测值为 21. 77~27. 16 m,不同生产力等级间差异较显著。土壤质地以粘土为主。年日照时数越长,林分生产力越高。

高产组立地环境最佳,具有最大生产潜力。该组林木优势高为 27. 16 m。光照时间最长,立地海拔较低,地势较为平坦。土壤粘粒含量最高,土壤全 P、有效 Mg、有效 Mn、有效 Cu 与有机质含量在 3 组生产力等级中最高,立木生长迅速,个体长势更加凸显。本组在适时间伐下可以保证林地生产潜力最大

化,培育尾巨桉大径材。

中产组立地环境优良,具有较高生产潜力。该组林木优势高为 24.19~25.45 m,海拔较高,粉粘壤土、粉粘土、粘壤土和粘土 4 种土壤质地均有涉及,以粘土和粘壤土为主,土壤养分中有效 Cu 和有效 Mn 含量较高。光照时长仅次于高产组,有利于尾巨桉的光合作用。本组生产潜力稍低于高产组,可结合抚育间伐、施肥管理等措施培育中大径材。

低产组立地环境较差,光照较为不足,生产潜力不高。该组林木优势高为 21.77~23.40 m,土壤养分偏低,有效 Cu 和有效 Mn 含量在 3 组生产力等级中最低,石砾较多,土壤瘠薄,林木长势参差不齐,可加强经营管理,考虑培育尾巨桉中小径材,部分林地需要适当改造,维持效益。

3 种生产力等级的主要立地因子比较结果见图 1。由图 1 可以看出,气候因子年日照时数不同生产组间差异显著($P<0.05$),以低产组作为参照,中产组是低产组的 1.19 倍,高产组是低产组的 1.35 倍。地形因子海拔表现为高产组与中、低产组差异显著($P<0.05$),中产组比高产组高 132.31 m,低产组比高产组高 96.28 m。

由图 1 还可以看出,土壤物理因子粘粒含量不同生产组间差异显著($P<0.05$),表现为高产组比低产组高 87.7%,比中产组高 112.5%。土壤化学因子中,土壤有机质含量表现为高产组与中、低产组差异显著($P<0.05$),高产组是中产组的 1.53 倍,是低产组的 1.28 倍。土壤全 P、有效 Mg 和有效 Cu 含量均表现为高产组与中、低产组差异显著($P<0.05$),高产组土壤全 P 含量是中产组的 2.65 倍,是低产组的 1.77 倍;高产组土壤有效 Mg 含量比中产组高 119.5%,比低产组高 81.9%;高产组土壤有效 Cu 含量比中产组高 97.8%,中产组比低产组高 13.9%。土壤有效 Mn 含量表现为高产组与低产组差异显著($P<0.05$),高产组比中产组高 36.3%,低产组比中产组低 34.6%。高产组主要位于坡度较缓且海拔较低的区域,水分充足,气候较为适宜,土壤养分流动较慢,尾巨桉长势较好;低产组位于海拔较高且粘粒含量较少的区域,土壤保水保肥能力较弱,气温较低,不利于尾巨桉生长。

4 讨 论

4.1 沿海地区尾巨桉人工林主导立地因子

立地质量对林分生长及木材质量具有决定性作用,故立地分类及评价在科学营林方法中至关重要。

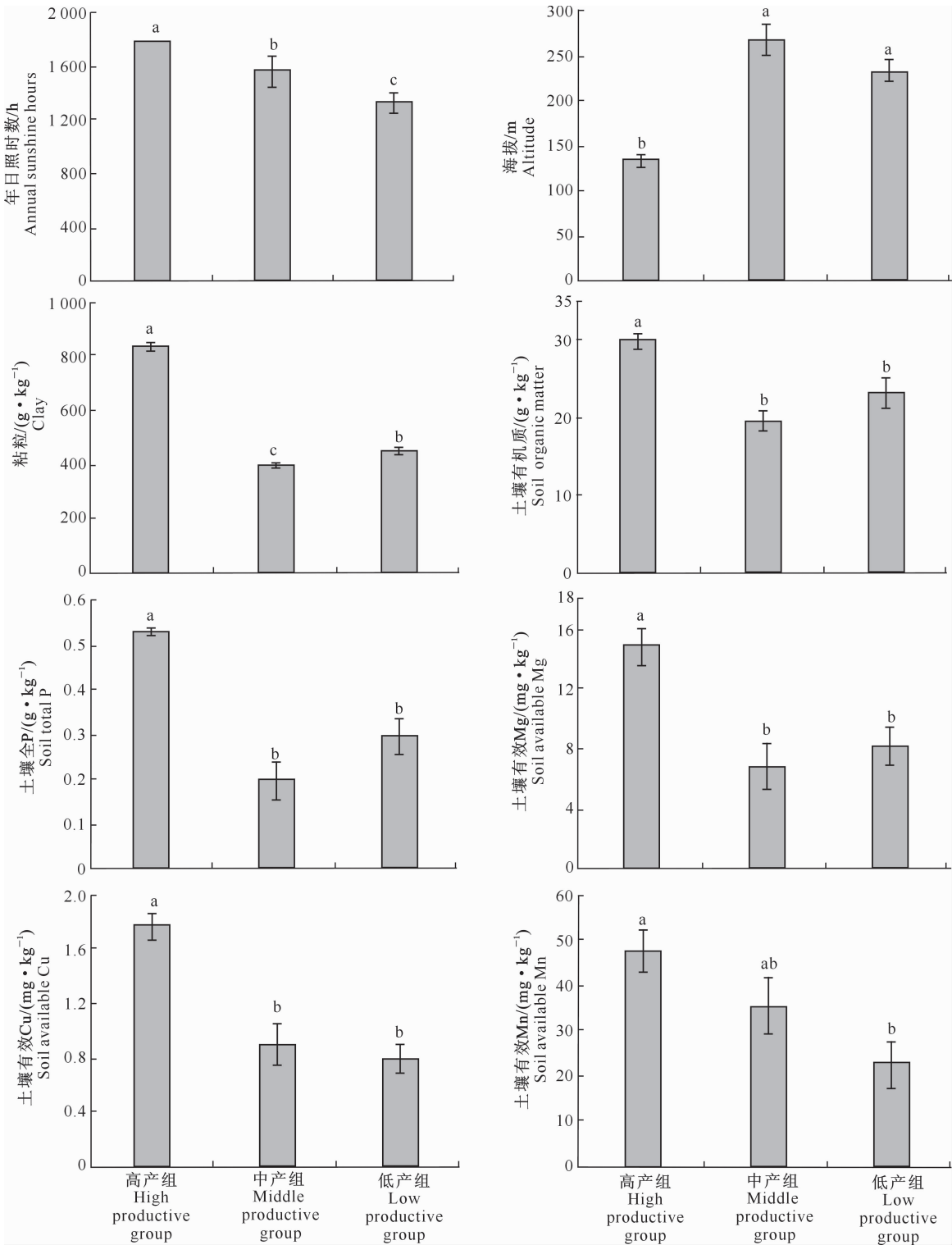
以桉树为对象的立地研究报道较少,赖挺^[21]、Scolforo 等^[10]、蔡会德等^[22]、赵时胜等^[23]、邓翔^[24]考虑了地形、土壤等立地因子和林木生长指标,但多数未结合气候因子。然而,在桉树生长过程中,不同地区的气温、降水量、日照时数等气候因子差异较大,对尾巨桉的树高和胸径生长产生显著影响^[25]。因此,与已有报道相比,本研究除地形、土壤因子外还综合考虑了气候因子,在立地因子类型选择上更加全面,研究结果也更精确。

在桉树立地研究报道中,赵时胜等^[23]选择以海拔、坡位和土壤因子建立三级分类系统,Lu 等^[26]选择海拔、土层厚度和坡向作为立地分类的主导因子。本研究中,沿海地区尾巨桉林立地类型划分的主导因子为年日照时数、海拔和土壤质地,与赵时胜等^[23]和 Lu 等^[26]的研究结果不完全一致,原因可能在于本研究试验区涉及广西、广东和福建 3 个省(区),范围更广,气候变化较大,且不同地区的地形地貌也有所区别,对土壤的形成产生了一定影响,但海拔均是影响桉树林立地分类的主导因子,说明海拔对尾巨桉的分布和生长非常重要。海拔可对土壤有效养分、光照、水分和温度等产生影响,进而间接影响植物的生长和分布^[27]。根据数量化回归分析结果,海拔与尾巨桉林分优势高极显著相关($P<0.01$),且高产组显著低于中、低产组,说明低海拔有利于尾巨桉生长,这与 Lu 等^[26]和赵筱青等^[28]的研究结果较为一致。

除海拔外,年日照时数和土壤质地也是影响尾巨桉生长的重要立地因子。年日照时数越长,光合作用积累的产物越多^[29],对于树高生长来说,年日照时数的影响较降水量更为显著^[30]。本研究中,年日照时数与尾巨桉优势高极显著正相关($P<0.01$),在数量化回归模型中得分占比达 29.61%,在 8 项立地因子中最大,是最重要的立地因子。年日照时数表现为高产组比中、低产组长,体现出桉树喜阳的生理特性^[22]。同为速生树种的华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)也具有喜光特性,树高生长受年日照时数影响较大^[31]。本研究结果表明,在土壤质地方面,尾巨桉优势高与土壤质地极显著正相关($P<0.01$),其中,粘粒含量表现为高产组显著高于中、低产组,且与尾巨桉优势高显著正相关($P<0.05$),说明粘粒含量较高的土壤质地更适合尾巨桉生长。李爱英^[32]对广东省桉树林的土壤环境调查发现,粘土含量高的土壤中有有机质、全 N 及速效 P 含量最高,说明土壤有机质含量与粘粒含量

密切相关,且粘粒对土壤营养元素的吸附作用较大^[33-34],而自然条件下粘土中的凋落物分解率较

高^[35],也可推测较高含量粘粒的土壤有助于促进物质与养分转化,从而影响林分生产力。



图柱上标不同小写字母代表不同生产组间差异显著 ($P<0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences among productivity level groups($P<0.05$)

图 1 尾巨桉各生产力等级的主要立地因子比较

Fig. 1 Comparison of main site factors of productivity groups of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*

同时,李爱英^[36]研究发现,桉树在粘壤土中的长势较粘土中更好,与本研究结果有所不同,原因可

能有两方面,其一是相对于通气性和透水性较好的粘壤土来说,杂交树种尾巨桉更适宜于养分含量较高的粘土环境;其二是本研究试验区气候因子年日照时数对尾巨桉生长的影响远大于土壤质地,可能对粘土的高养分效果有所强化。

4.2 沿海地区尾巨桉林分生长的土壤化学性质

土壤中 P 元素主要通过动植物残体归还和成土母质风化两种途径获得,成土母质的类型、风化程度及淋失程度是决定其含量高低的三大因素^[37],也是限制桉树生长的主要营养物质之一。本研究中,尾巨桉林分优势高与土壤有效 P 含量显著负相关($P < 0.05$),这可能与土壤酸性过强影响尾巨桉对 P 的吸收有关,而土壤 pH 值与尾巨桉优势高负相关,土壤全 P 含量与尾巨桉优势高显著正相关也验证了这一点,这与杜健等^[7]在柚木人工林立地分类研究中得到的 pH 值过低影响柚木对 P 元素吸收的结果相一致。本研究中,高产组土壤全 P 含量显著高于中、低产组,该结果同西双版纳尾巨桉林中全 P 含量与生产力等级的关系表现一致^[26]。牛芳华等^[38]研究发现,与其他营养元素相比,P 肥对尾巨桉幼苗根系垂直分布影响最大,对其根系总生物量影响显著,说明 P 元素与尾巨桉生长密切相关,在立地选择时要重点考虑。

有机质与土壤中微生物代谢活跃度及土壤酶活性紧密相关^[39],是植物所需 N、P 等大量元素和微量元素的重要来源,其含量是土壤肥力的代表性指标。罗美娟等^[40]研究发现,土壤有机质是影响尾叶桉和巨尾桉树高生长的重要因子,因此,应尽量保留桉树林分中的凋落物及枝条、树皮等采伐剩余物^[41]。本研究中,土壤有机质含量与尾巨桉优势高显著正相关($P < 0.05$),且高产组的土壤有机质含量显著高于中、低产组,这可能与尾巨桉林分中土壤有机质同粘粒相互作用,促进碳积累有关^[33]。

Mg、Mn 均是参与光合作用的关键元素^[42-43]。有研究表明,桉树缺 Mg 时的症状主要发现于老叶中,一般表现为叶片褪绿或变黄等,而桉树林 0~20 cm 表层土壤中有效 Mg 含量低于 2 mmol/L 时,桉树对 Mg 的施用响应较大^[44]。在一定程度上,Mn 对桉树林分土壤中过氧化氢酶、脲酶和蛋白酶的活性有促进作用^[45]。Cu 是影响桉树生长的微量元素,Cu 缺乏会导致木质部纤维减少和导管木质化程度降低,并出现叶缘变形、侧枝死亡等症状^[46]。本研究中,有效 Mg、有效 Mn、有效 Cu 的含量均与尾巨桉优势高显著正相关($P < 0.05$),说明较高含量

的有效 Mg 和有效 Mn 有利于尾巨桉光合作用以及土壤酶活性的提高,而施加 Cu 可有效促进 3 年生尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)的材积生长^[47],也说明有效 Cu 对桉树生长至关重要。

5 结 论

(1)使用筛选出的坡向、坡度、坡位、海拔、土壤养分等级、土壤质地、土壤密度、年日照时数 8 个立地因子与尾巨桉优势高建立数量化回归模型,模型拟合复相关系数 $R = 0.956$,达极显著水平($P < 0.01$),适用性检验 $F_{(8,31)} = 9.049 > F_{0.01(8,31)} = 3.17$,模型精度高,可有效预测立地生产潜力。预测模型中,年日照时数、海拔和土壤质地为影响尾巨桉优势高生长的 3 个主导因子。

(2)根据数量化回归模型及立地因子得到的各样地尾巨桉优势高预测值,将 40 块样地划分为高、中、低 3 组优势高生产力等级,进而以上述 3 个主导立地因子将沿海地区尾巨桉人工林划分为 10 个立地类型,高、中、低生产力等级的尾巨桉优势高实测值分别为 27.16 m、24.19~25.45 m 和 21.77~23.40 m。

(3)高产组年日照时数显著高于中、低产组,高产组海拔显著低于中、低产组。此外,土壤全 P、有效 Cu、有效 Mn、有效 Mg、有机质和粘粒含量与林分优势高显著正相关($P < 0.05$)。选择日照时数较长,海拔较低,粘粒含量占比较大,土壤全 P、有效 Cu、有效 Mn、有效 Mg 和有机质含量较高的立地,采用适当的营林措施,可培育出尾巨桉大径材。

[参考文献]

- [1] 邓美皎,王孝安,韩兵兵,等. 秦岭北坡太白红杉不同时间尺度上的径向生长特征及其与环境因子的关系 [J]. 中国农学通报,2016,32(28):1-6.
Deng M J, Wang X A, Han B B, et al. Characteristics of radial growth of *Larix chinensis* in different time scales and its relationship with environment factors in the north slope of Qinling Mountains [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32 (28): 1-6.
- [2] 吴 恒,党坤良,田相林,等. 秦岭林区天然次生林与人工林立地质量评价 [J]. 林业科学,2015,51(4):78-88.
Wu H, Dang K L, Tian X L, et al. Evaluating site quality for secondary forests and plantation in Qinling Mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(4): 78-88.
- [3] 叶功富,涂育合,廖祖辉,等. 福建山地杉木大径材定向培育技术 [J]. 林业科技开发,2006(3):72-75.
Ye G F, Tu Y H, Liao Z H, et al. Preliminary studies on the directional breed of large timber of *Cunninghamia lanceolata* of

- Fujian Mountains [J]. China Forestry Science and Technology, 2006(3):72-75.
- [4] 唐诚,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.
Tang C, Wang C S, Pang S J, et al. Site classification and evaluation of *Betula alnoides* plantations at Guangxi Daqing Mountain [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4):52-57.
- [5] Curt T, Bouchaud M, Agrech G, et al. Predicting site index of Douglas-fir plantations from ecological variables in the Massif central area of France [J]. Forest Ecology and Management, 2001, 149(1):61-74.
- [6] Pietrzykowski M, Socha J, Doorn N S, et al. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) site index in relation to physico-chemical and biological properties in reclaimed mine soils [J]. New Forests, 2015, 46:247-266.
- [7] 杜健,梁坤南,周再知,等. 云南西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.
Du J, Liang K N, Zhou Z Z, et al. Site classification and evaluation of Teak plantation in Xishuangbanna, Yunnan Province, China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(9):1-10.
- [8] Quichimbo P, Jiménez L, Veintimilla D, et al. Forest site classification in the Southern Andean Region of Ecuador: a case study of pine plantations to collect a base of soil attributes [J]. Forests, 2017, 8(12):1-22.
- [9] 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.
Yang H B, Zhang M Z, Ding L X, et al. Site quality evaluation of *Cunninghamia lanceolata* plantations in Zhejiang Province based on maximum DBH growth rate [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020, 37(1):105-113.
- [10] Scolforo J R S, Maestri R, Filho A C F, et al. Dominant height model for site classification of *Eucalyptus grandis* incorporating climatic variables [J]. International Journal of Forestry Research, 2013, 2013:1-7.
- [11] 张万儒. 森林土壤定位研究方法 [M]. 北京:中国林业出版社, 1984.
Zhang W R. Positioning methods of forest soil [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1984.
- [12] 包维斌,白一茹,杨帆,等. 宁夏中宁枸杞林地粉壤土阳离子交换量空间分布预测方法对比 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(4):1377-1386.
Bao W B, Bai Y R, Yang F, et al. Predicting spatial distribution of cation exchange capacity in silt loam soil under *Lycium barbarum* of Zhongning, Ningxia [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(4):1377-1386.
- [13] 薛立,赖日石,陈红跃,等. 深圳宝安区生态风景林典型造林地土壤养分、微生物和酶活性的研究 [J]. 林业科学研究, 2002, 15(2):242-246.
Xue L, Lai R S, Chen H Y, et al. Soil nutrients, microorganisms and enzyme activities of model afforestation land of ecological scenic forests in Baoan, Shenzhen [J]. Forest Research, 2002, 15(2):242-246.
- [14] 余汉基,蔡金桓,薛立,等. 模拟外源性氮磷对马占相思凋落叶分解及土壤生化特性的影响 [J]. 林业科学研究, 2018, 31(2):107-113.
She H J, Cai J H, Xue L, et al. Effects of nitrogen and phosphorus additions on leaf litter decomposition and soil biochemical characteristics in an *Acacia mangium* plantation [J]. Forest Research, 2018, 31(2):107-113.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [16] 许自成,刘国顺,刘金海,等. 铜山烟区生态因素和烟叶质量特点 [J]. 生态学报, 2005, 25(7):1748-1753.
Xu Z C, Liu G S, Liu J H, et al. Analysis of ecological factors and quality of flue-cured tobacco leaves in Tongshan tobacco-growing areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(7):1748-1753.
- [17] 何佩云,丁贵杰,谌红辉,等. 1、2代不同林龄马尾松人工林土壤微量元素及酶活性 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(1):32-36.
He P Y, Ding G J, Chen H H, et al. Soil microelements and enzyme activities of first and second generation masson pine plantations [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(1):32-36.
- [18] 冯茂松,杨万勤,钟宇,等. 四川巨桉人工林微量元素养分诊断 [J]. 林业科学, 2010, 46(9):20-27.
Feng M S, Yang W Q, Zhong Y, et al. Nutrient diagnosis on microelements in *Eucalyptus grandis* plantations in Sichuan [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(9):20-27.
- [19] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊,等. 缙云山土地利用方式对土壤有机碳及全氮的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(11):137-145.
Li J L, Jiang C S, Hao Q J, et al. Effects of land use types on soil organic carbon and total nitrogen in Jinyun Mountain [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(11):137-145.
- [20] 周光亚,董文泉,夏立显,等. 关于数量化理论 I、II 的数学模型 [J]. 吉林大学学报(理学版), 1979(2):11-18.
Zhou G Y, Dong W Q, Xia L X, et al. On the mathematical models of quantification theories I & II [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 1979(2):11-18.
- [21] 赖挺. 四川巨桉人工林立地分类研究 [D]. 成都:四川农业大学, 2005.
Lai T. Studied on site classification of *Eucalyptus grandis* plantation in Sichuan [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2005.
- [22] 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(S2):36-46.
Cai H D, Wu S G, Yang Y C, et al. Site evaluation of eucalypt plantation and the implementation of its decision-making support system [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009,

31(S2):36-46.

[23] 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):32-36,39.
Zhao S S,Chen Y H. Site type classification and evaluation of cold-resistant *Eucalyptus* [J]. Hunan Forestry Science & Technology,2014,41(5):32-36,39.

[24] 邓 翔. 湘南桉树人工林立地分析及生长规律研究 [D]. 长沙:中南林业科技大学,2019.
Deng X. Site analysis and growth regularity of *Eucalyptus* plantation in Southern Hunan [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2019.

[25] 周建辉,王小霞,刘国粹,等. 尾巨桉幼林生长特征及其与气象要素的关系 [J]. 桉树科技,2017,34(4):33-36.
Zhou J H,Wang X X,Liu G C,et al. Growth characteristics of young *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations and relationships with meteorological factors [J]. Eucalypt Science & Technology,2017,34(4):33-36.

[26] Lu H F,Xu J M,Li G Y,et al. Site classification of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* plantations in China [J]. Forests,2020,11(8):871-885.

[27] Wang A,Xue W,Tognetti R,et al. Elevation alters carbon and nutrient concentrations and stoichiometry in *Quercus aquifolioides* in southwestern China [J]. Science of the Total Environment,2018,622/623:1463-1475.

[28] 赵筱青,王兴友. 滇西南亚热带山地尾叶桉人工林与生境因子关系分析 [J]. 安徽农业科学,2014,42(7):2018-2021.
Zhao X Q,Wang X Y. Analysis of the relation between the habitat factors and *Eucalyptus uraphylla* in the subtropical mountainous regions in Southwest Yunnan Province [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2014,42(7):2018-2021.

[29] 高洪娜,高瑞馨. 气象因子对树木生长量影响研究综述 [J]. 森林工程,2014,30(2):6-9.
Gao H N,Gao R X. Review on the impacts of meteorological factors on the gymnosperms growth survey [J]. Forest Engineering,2014,30(2):6-9.

[30] 马 旺,谷建才,陈 平,等. 辽河源地区油松生长与气象因子的相关分析 [J]. 林业资源管理,2010(5):65-69.
Ma W,Gu J C,Chen P,et al. Research on the relationship between tree growth and climatic factors of *Pinus tabulaeformis* in the source areas of the Liaohe River [J]. Forest Resources Management,2010(5):65-69.

[31] 刘春延,谷建才,李吉跃,等. 塞罕坝华北落叶松生长与气候因子的相关分析 [J]. 北京林业大学学报,2009,31(4):102-105.
Liu C Y,Gu J C,Li J Y,et al. Correlated analysis between the growth of *Larix principis-rupprechtii* and climatic factors in Saihanba Nature Reserve,northern Hebei Province [J]. Journal of Beijing Forestry University,2009,31(4):102-105.

[32] 李爱英. 广东省桉树林的土壤肥力研究 [J]. 广东林业科技,2008,24(3):51-56.
Li A Y. Study on soil fertility of eucalypt plantations in Guangdong Province [J]. Guangdong Forestry Science and Technology,2008,24(3):51-56.

[33] Sausen T L,Schaefer F D P,Tomazi M,et al. Clay content drives carbon stocks in soils under a plantation of *Eucalyptus saligna* Labill. in southern Brazil [J]. Acta Botanica Brasili-ca,2014,28(2):266-273.

[34] 马 媛,丁树文,邓羽松,等. 五华县崩岗洪积扇土壤分形特征及空间变异性研究 [J]. 水土保持学报,2016,30(5):279-285.
Ma Y,Ding S W,Deng Y S,et al. Study of soil fractal dimension characteristic and spatial variability in collapsing alluvial fan of Wuhua County [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(5):279-285.

[35] Silver W L,Neff J,Mcgroddy M,et al. Effects of soil texture on belowground carbon and nutrient storage in a lowland Amazonian forest ecosystem [J]. Ecosystems,2000,3:193-209.

[36] 李爱英. 广东省不同土壤条件对桉树林生长的影响分析 [J]. 中南林业调查规划,2008,27(4):21-24.
Li A Y. Effects analysis of different soil conditions on eucalypt growth in Guangdong Province [J]. Central South Forest Inventory and Planning,2008,27(4):21-24.

[37] 简尊吉,裴顺祥,郭泉水,等. 三峡水库峡谷地貌区消落带土壤氮磷钾、有机质含量和 pH 值的时空动态 [J]. 应用生态学报,2017,28(9):2778-2786.
Jian Z J,Pei S X,Guo Q S,et al. Temporal and spatial dynamics of soil nitrogen,phosphorus,potassium,organic matter and pH in the water level fluctuation zone of canyon landform area of the Three Gorges Reservoir,China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(9):2778-2786.

[38] 牛芳华,李志辉,王昌熙,等. 尾巨桉幼苗根系分布及生物量特征研究 [J]. 中国农学通报,2012,28(1):6-11.
Niu F H,Li Z H,Wang C X,et al. The study of root distribution and biomass characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*’ saplings [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2012,28(1):6-11.

[39] 王伟东,王渭玲,徐福利,等. 秦岭西部中幼龄华北落叶松林地土壤养分与酶活性特征研究 [J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(4):1032-1039.
Wang W D,Wang W L,Xu F L,et al. Characteristics of soil nutrients and enzyme activities in young and middle aged *Larix principis-rupprechtii* plantation in western Qinling Mountains [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2015,21(4):1032-1039.

[40] 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.
Luo M J,Li B F,Wei Y J,et al. Typical correlation analysis between the growth and the site factor of eucalypt in the mountain area of South Fujian [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology,2000,27(1):14-17.

characteristics of *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis daii* and *B. rigida* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(4): 83-87.

[16] 国家林业局. LY/T 1210~1275 中华人民共和国林业行业标准:森林土壤分析方法 [S]. 北京:中国标准出版社, 1999.

State Forestry Administration of China. LY/T 1210—1275 Forest industry standard of the People’s Republic of China: forest soil analysis method [S]. Beijing: China Standards Press, 1999.

[17] 胡晓倩,李忠武,陈 佳,等. 南方红壤丘陵区退耕还林还草工程土壤保持效应评估 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 95-100.

Hu X Q, Li Z W, Chen J, et al. Soil conservation benefits of the grain for green program in the hilly red soil region of southern China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 95-100.

[18] 刘俊廷,张建军,孙若修,等. 晋西黄土区退耕年限对土壤孔隙度等物理性质的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(1): 94-103.

Liu J T, Zhang J J, Sun R X, et al. Effects of the conversion time of cropland into forestry on soil physical properties in loess area of western Shanxi Province of northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(1): 94-103.

[19] 李建明,王志刚,王爱娟,等. 退耕还林恢复年限对岩溶槽谷区石漠化土壤物理性质的影响 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 99-108.

Li J M, Wang Z G, Wang A J, et al. Effects of land restoration years on physical properties of rocky desertified soil in trough valley of the southeast China karst region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(1): 99-108.

[20] 王春梅,刘艳红,邵 彬,等. 量化退耕还林后土壤碳变化 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(3): 112-119.

Wang C M, Liu Y H, Shao B, et al. Quantifying the soil carbon changes following the afforestation of former arable land [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(3): 112-119.

[21] 李静鹏,徐明峰,苏志尧,等. 不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价 [J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2297-2307.

Li J P, Xu M F, Su Z Y, et al. Soil fertility quality assessment under different vegetation restoration patterns [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(9): 2297-2307.

[22] 张 捷,郁闭度控制对林下植被发育及马尾松人工林凋落叶分解的影响 [D]. 成都:四川农业大学, 2018.

Zhang J. Effects of various canopy densities on the understory vegetation development and decomposition of *Pinus massoniana* foliar litter in the *Pinus massoniana* plantations [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2018.

[23] 刘蔚漪. 闽北不同类型毛竹林水文生态功能研究 [D]. 北京:中国林业科学研究院, 2011.

Liu W Y. Hydrological and ecological functions of different types *Phyllostachys edulis* forests in northern Fujian [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.

(上接第 62 页)

[41] 廖观荣,林书蓉,李淑仪,等. 雷州半岛桉树人工林地力退化的成因与防治措施 [J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 268-273.

Liao G R, Lin S R, Li S Y, et al. Causes and control measures of soil degradation of *Eucalyptus* plantation in Leizhou Peninsula [J]. Soil and Environmental Sciences, 2002, 11(3): 268-273.

[42] Huber S C, Maury W. Effects of magnesium on intact chloroplasts [J]. Plant Physiology, 1980, 65(2): 350-354.

[43] 张玉秀,李林峰,柴团耀,等. 锰对植物毒害及植物耐锰机理研究进展 [J]. 植物学报, 2010, 45(4): 506-520.

Zhang Y X, Li L F, Chai T Y, et al. Mechanisms of manganese toxicity and manganese tolerance in plants [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2010, 45(4): 506-520.

[44] Rocha J H T, Toit B D, Goncalves J L D M, et al. Ca and Mg nutrition and its application in *Eucalyptus* and *Pinus* plantations [J]. Forest Ecology and Management, 2019, 442: 63-78.

[45] 李跃林,彭少麟,李志辉,等. 桉树人工林地土壤酶活性与微量元素含量的关系 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(3): 345-348.

Li Y L, Peng S L, Li Z H, et al. Relationship between soil enzyme activities and trace element contents in *Eucalyptus* plantation soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(3): 345-348.

[46] Dell B. Copper nutrition of *Eucalyptus maculata* Hook. seedlings: requirements for growth, distribution of copper and the diagnosis of copper deficiency [J]. Plant and Soil, 1994, 167(2): 181-187.

[47] 李淑仪,徐胜光,廖新荣,等. 桉树微量元素营养功能研究 [J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(2): 94-97.

Li S Y, Xu S G, Liao X R, et al. Functions of micro-elements in *Eucalyptus* [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003, 25(2): 94-97.