

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230188

黑木相思家系适地适树品种综合评价

赵玥桥¹, 黄晓霞¹, 张露月¹, 高文晶¹, 程 诺¹, 丁国昌², 赖日文^{1*}

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 福建农林大学 艺术园林学院, 福建 福州 350002)

摘要: [目的] 为选出适宜南方山地的黑木相思家系, 揭示黑木相思长势土壤养分的空间分异规律与地形变化的关系。[方法] 本文以杉木采伐迹地上营造的 15 年生 7 个黑木相思家系 (M1~M7) 为研究对象, 采用经典统计学、描述性统计、地统计学方法和 GIS 技术, 研究了 7 个黑木相思家系分别在不同坡位的土壤理化性质的变化规律和土壤养分的空间分布, 并通过因子分析法和模糊评价法对 7 个黑木相思家系进行综合评价选优。[结果] 7 个黑木相思家系的理化性质在不同坡位的含量大多表现为下坡位>中坡位>上坡位, 下坡位显著高于其他坡位; 家系间土壤结构和养分含量均表现出 M7、M6 和 M5 较好; 研究区各养分含量总体呈块状或条带状分布, 呈现从东北和西北方向往南方向递增的趋势。[结论] 综合评价在上下坡位黑木相思家系 M7 值最高, 其生长对土壤理化性质的改良效果最佳, 在中坡位黑木相思家系 M6 最佳。研究结果对南方山地适地适品种和可持续发展研究具有参考价值, 可用于黑木相思人工林经营管理实践中。

关键词: 黑木相思家系; 林木生长; 土壤理化性质; 空间异质性; 综合评价

中图分类号: S771.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)01-0159-12

杉木 (*Cunninghamia lanceolate* (Lamb.) Hook.)、桉树 (*Eucalyptus robusta* Smith) 是福建省重要的速生树种, 因其近年来高度集约经营和连栽代次的递增导致人工林出现生产力和生物多样性下降等严峻的生态问题^[1-2], 严重影响林木生长和人工林的持续经营^[3]。研究显示: 连栽后土壤养分周转能力下降, 养分丢失比率为 200%, 养分积累率不足 60%^[4]。随着连栽次数增加, 林地土壤可溶性有机质、全氮、速效钾等均呈递减的变化趋势, 土壤肥力质量逐代降低^[5-6]已成为人工林可持续经营的主要障碍^[7]。黑木相思 (*Acacia melanoxylon* R.Br.) 是亚热带地区重要乡土树种, 因其具有很强的固氮能力及较高的经济价值, 被作为改土树种引入当地以改善土壤质量。在长期观察中发现, 杉木转换为固氮树种黑木相思会显著提高土壤碳氮含量及化学计量, 有助于土壤养分的改善^[8]。黑木相思不仅可以在闽南地区低产低效、

严重退化的贫瘠山地上快速成林, 还能有效地改善低产林分, 有效提高林地的肥力和地力^[9], 而且相较于马占相思, 黑木相思的幼龄植株未发现叶白粉病及其他虫害。至今我国黑木相思已成功引种 20 多个家系^[10-11], 但黑木相思成熟期较长, 通过认定的优良品种较少, 基于“适地适树”理论, 植物与土壤间存在极强的相互作用, 品种的改变势必会对土壤养分产生重要影响, 在此土壤条件下适应性和改土效果优良的黑木相思家系还尚未明确。众多学者的研究表明黑木相思在水土保持、地力改良等方面具有非常大的优势, 对黑木相思的研究主要集中在引种栽培区划、遗传分析方面^[12-15]。国外则是侧重对相思入侵扩散制约因素的调查^[16]和木材的利用^[17-18]。综上对黑木相思的综合特性主要在整体林分或幼龄林阶段, 但缺乏针对多种家系(种源)生长表现的深入研究, 特别是对其生长的环境因子影响的研究极少, 开展适地适品种的研究是林分质

收稿日期: 2023-05-04 修回日期: 2023-11-11

基金项目: 福建农林大学林学高峰学科建设项目 (72202200205) 区市级; 福建农林大学科技发展基金“城市绿化乔木降温成效及树种配置” (KHF190017) 区市级

* 通讯作者: 赖日文, E-mail: fjlrw@126.com

量精准提升的根本途径。鉴于此,本文以种植在上坡、中坡和下坡 3 个立地的 15 年生 7 个黑木相思家系试验林为研究对象,对林木生长性状、土壤理化性质进行综合分析,为不同立地筛选出适宜种植的相思家系,研究结果对指导相思适地适树造林具有一定的意义。

1 研究区概况

研究区位于福建省福清市灵石国有林场朱山工区 (119°27' E、25°67' N), 平均海拔为 230 m, 地形主要以山地丘陵为主, 地形起伏较大。亚热带季风气候显著, 属南亚热带气候带闽东南沿海海洋性季风气候, 有冬季较短、冬暖夏凉的气候特点, 年均气温 19.7 °C, 年均日照 2 000 h 左右, 无霜期 340~360 d。雨季、干季分明, 降水集中于 3 月—9 月, 年均降水量 1 780 mm。土壤类型主要为红壤。林地主要植被类型是红壤类的灌丛、竹林等, 也有

少量人工营造的杉木林及人工经济林, 以及人工营造的黑木相思林和竹林及杉-黑木轮作林种等。

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

黑木相思家系试验林营造: 本试验林黑木相思家系来源于澳大利亚昆士兰州地区的黑木相思优良天然林中所选的优树, 黑木相思试验地前身为 26 年生杉木林, 于 2007 年 4 月砍伐后造林, 造林密度为 100 株·亩⁻¹, 每小区每家系种植 36 株, 造林坡度在 12°~18°间, 在不同家系小区间和试验地外围设置尾巨桉间隔行, 造林后对试验林地定期进行追肥锄草。采用随机区组设计原则, 分别在 3 个区域设黑木相思家系试验林, 每个重复区组按照上、中、下坡划分, 在不同坡位上设 7 个小区分别种植不同家系, 即 7 个家系在 3 个坡位上均有 3 次重复, 如图 1 所示。

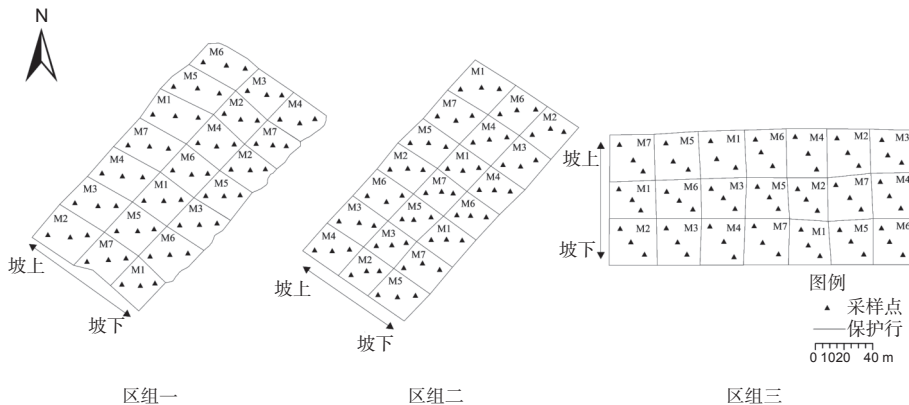


图 1 研究区家系及土壤采样点分布图

Fig. 1 Distribution of families and Soil sampling points in the study area

土壤样品采集: 对各家系小区设置 1 块面积为 20.0 m × 20.0 m 的标准地。研究区分布及采样点分布如图 1 所示。按对角线布点法在各标准地布设 3 个采样点, 采用剖面法分 2 个土层 (0~10 cm、10~20 cm) 采集土壤样品; 每个土层平行取 3 个约 1 kg 土壤并混合均匀, 采用四分法取 1 kg 土样装袋保存用冰袋储存带回。利用 100 cm³ 环刀在不同土层采集 3 个样品用于测定物理性质。对每个采样点用手持定位仪进行定位记录其坡向、海拔、经纬度等立地信息。同时对各小区布设 5.0 m × 5.0 m 样方, 记录胸径大于 5 cm 的黑木相思的家系名称、胸径 (DBH)、树高 (H)、枝下高等基本情况。

土壤理化性质根据中华人民共和国林业行业标准: 《森林土壤分析法》。采用环刀法测定土壤密度、通气度等物理性质; pH 值水土溶液浸提, 酸度计测定; 土壤有机质 (SOC) 采用重铬酸钾加热法; 全氮 (TN) 用碳氮元素分析仪测定; 硝态氮 (NO₃⁻-N) 和铵态氮 (NH₄⁺-N) 用流动分析仪测定; 全磷 (TP)、有效磷 (AP) 采用钼锑抗比色法测定; 全钾 (TK)、速效钾 (AK) 用火焰光度计测定; 可溶性有机碳 (DOC) 和可溶性有机氮 (DON) 采用碳氮分析仪测定。

2.2 数据处理与分析

采用 Excel 2010 进行数据整理与初步计算, 应用 SPSS25.0 软件对土壤理化性质指标进行描

述性分析、单因素方差分析;对数据进行正态分布检验采用单样本 Kolmogorov-Smimov 检验;LSD 最小显著差异法检验差异显著性,显著性水平设定为 $p < 0.05$;相关关系采用 pearson 相关分析。采用 GS + 18.0、ArcGIS10.3 软件进行土壤养分地统计分析、趋势分析和 Kriging 空间插值。

3 结果分析

3.1 土壤养分空间异质性研究

对土壤养分的描述性统计分析测定结果可得研究区 pH 均值为 4.68,呈酸性土壤;TP、AP 均值分别为 $0.18 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $4.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,处于偏低水平;TK、AK 含量均达到中等水平。各土壤养分的变化幅度不同,土壤 SOC、TN、DON、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的变化幅度较大,相对数据离散程度较高,pH 值的变化幅度最小,数据较集中。变异系数(CV)是衡量变量变异程度的重要参数,研究区 pH 值变异系数最低 $\text{CV} \leq 10\%$ 属于弱变异性,其他指标 $10\% < \text{CV} < 100\%$ 属于中等变异性,其中 AP 变异系数最高,说明 AP 的空间变异程度较高且受人为活动或外界环境影响可能性大。pH 值、DON、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的偏态系数为负值,表明其正态曲线图左尾较长,极端异常值为左偏分布;其他养分指标的偏态系数均为正值,正态曲线图右尾较长。DON、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、AP 4 个指标的峰度均小于 0,其分布相较于标准正态分布更为扁平,其他养分指标的峰度均大于 0,峰高相较于标准正态分布更为陡峭。

趋势面分析可以精确展示养分数据在南北、东西方向的变化趋势,通过拟合趋势来判断全局趋

势。如果拟合趋势线呈“U”型时表明变量存在二阶趋势,倾斜的直线表明变量存在一阶趋势,平直线表明变量没有趋势存在。pH 值自西向东缓慢上升的趋势,总体呈直线,表明分布较均匀;在南北方向有细微凸形。SOC 含量呈自西向东平滑上升;南北方向平滑下降。DOC 含量在东西分布较均匀;在南北方向呈中间高的趋势。TN 含量在北部略高。DON 含量自北向南平滑下降。 NO_3^- -N 含量自西向东平滑上升,变化较慢;在南北方向呈凹形特征。 NH_4^+ -N 含量在东西方向较稳定;南高北低中部略微隆起,但总体呈直线。TP 含量在东西方向呈凸形;自北向南平滑下降。AP 含量表现为整体下凹特征。TK 含量分布东高西低;在南北方向中间略高于两边。AK 含量在东西方向平滑上升,在南部略高但总体呈直线。综上表明,SOC、TN、DON、 NH_4^+ -N 和 AK 均存在一阶趋势,pH 值、DOC、 NO_3^- -N、TP、AP 和 TK 存在明显的二阶趋势,在计算半变异函数及 Kriging 插值时需要

对指标数据使用相应多项式进行拟合来移除趋势。地统计分析可以定量描述区域范围内变量的结构性和随机性,反映区域内不同距离变量之间的空间变异规律和空间依赖性。以最大间距 $1/2 (90 \text{ m})$ 为样本变化范围,以最小间距 10 m 为步长,进行土壤养分的半变异拟合,并以决定系数和残差和交叉验证模型精度。如表 1 所示,11 个养分指标的 C_0 (块金值)在 $0.003 \sim 0.127$ 之间,均较小,说明在小尺度内由随机因子如施肥、抚育管理等实验误差或人为因素引起的误差较小^[19], $C_0 + C$ (基台值)在 $0.070 \sim 0.276$ 之间,表明由结构性因子如地形、气候等非人为因素引起的变异值也

表 1 土壤养分半变异函数模型及相关参数

Table 1 Soil nutrient semivariogram model and related parameters

指标	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	变程 A/m	块金系数/% $C_0/(C_0 + C)$	决定系数 R^2	残差和 RSS
pH值	Spherical	0.039	0.092	74.60	42.33	0.967	1.89E-04
SOC	Gaussian	0.016	0.056	23.40	28.37	0.784	1.14E-03
DOC	Exponential	0.014	0.040	53.90	35.17	0.713	1.49E-04
TN	Spherical	0.008	0.024	42.50	32.80	0.546	3.89E-04
DON	Gaussian	0.028	0.084	37.70	33.56	0.798	3.03E-02
NO_3^- -N	Gaussian	0.127	0.276	64.80	46.01	0.875	3.36E-03
NH_4^+ -N	Spherical	0.048	0.130	28.20	36.43	0.741	1.10E-02
TP	Spherical	0.004	0.009	37.10	48.10	0.680	3.95E-06
AP	Spherical	0.003	0.007	72.10	45.86	0.933	1.05E-04
TK	Spherical	0.017	0.034	67.00	48.68	0.871	3.43E-05
AK	Gaussian	0.054	0.109	95.60	49.54	0.738	1.01E-03

较小。 NO_3^- -N 基台值最大, 总体范围变异程度相较于其他指标空间异质性最高^[20]; 11 个指标的块金系数为 28.37%~49.54%, 均在 25%~75% 之间, 表现出中等程度的空间自相关, 说明其空间变异受随机性因子和结构性因子共同影响。A (变程) 衡量变量的空间自相关范围大小, 样本位置间距小于变程存在空间自相关时, 间距越小空间自相关越强^[21]。11 个土壤养分指标的变程范围为 23.4~95.6 m, 其变程均大于采样点距离 10 m, 说明对该试验地进行无偏估计是可信的。AK、

pH 值、AP、TK、 NO_3^- -N、DOC、TN 的变程表明其空间自相关性范围较大且连续性较好, 其中, AK 的变程最大, pH 值次之, 但在小尺度上可能存在规律性不显著的现象; SOC、 NH_4^+ -N、TP、DON 的变程分别为 23.4、28.2、37.1、37.7 m, 表明其空间依赖性较强。

3.2 土壤养分空间分布特征

在半变异函数的基础上进行 Kriging 空间插值, 可以更加直观地反映出研究区土壤养分的空间变异特征 (图 2~4)。从 3 个区组土壤养分空间分

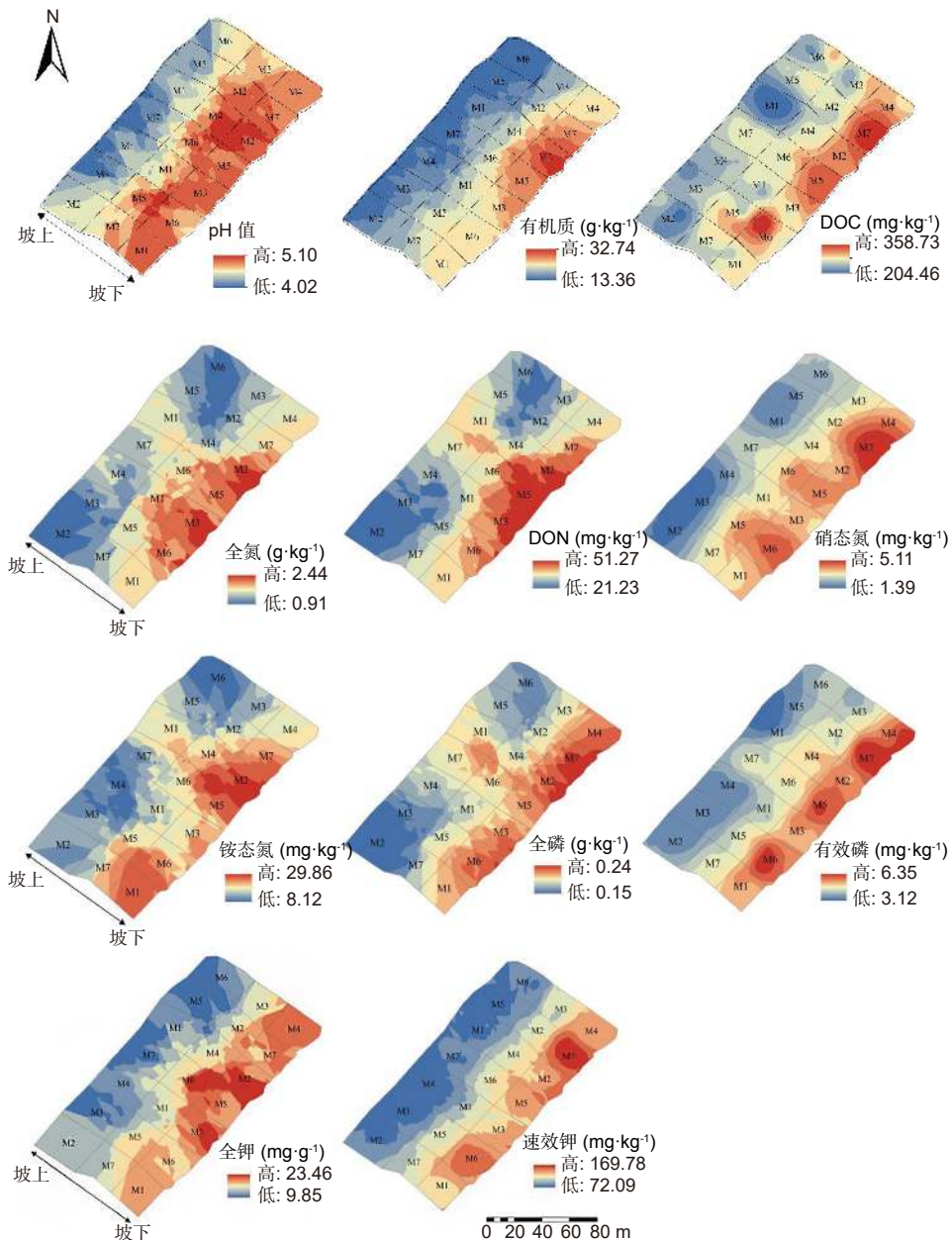


图 2 区组一土壤养分空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of soil nutrients in block one

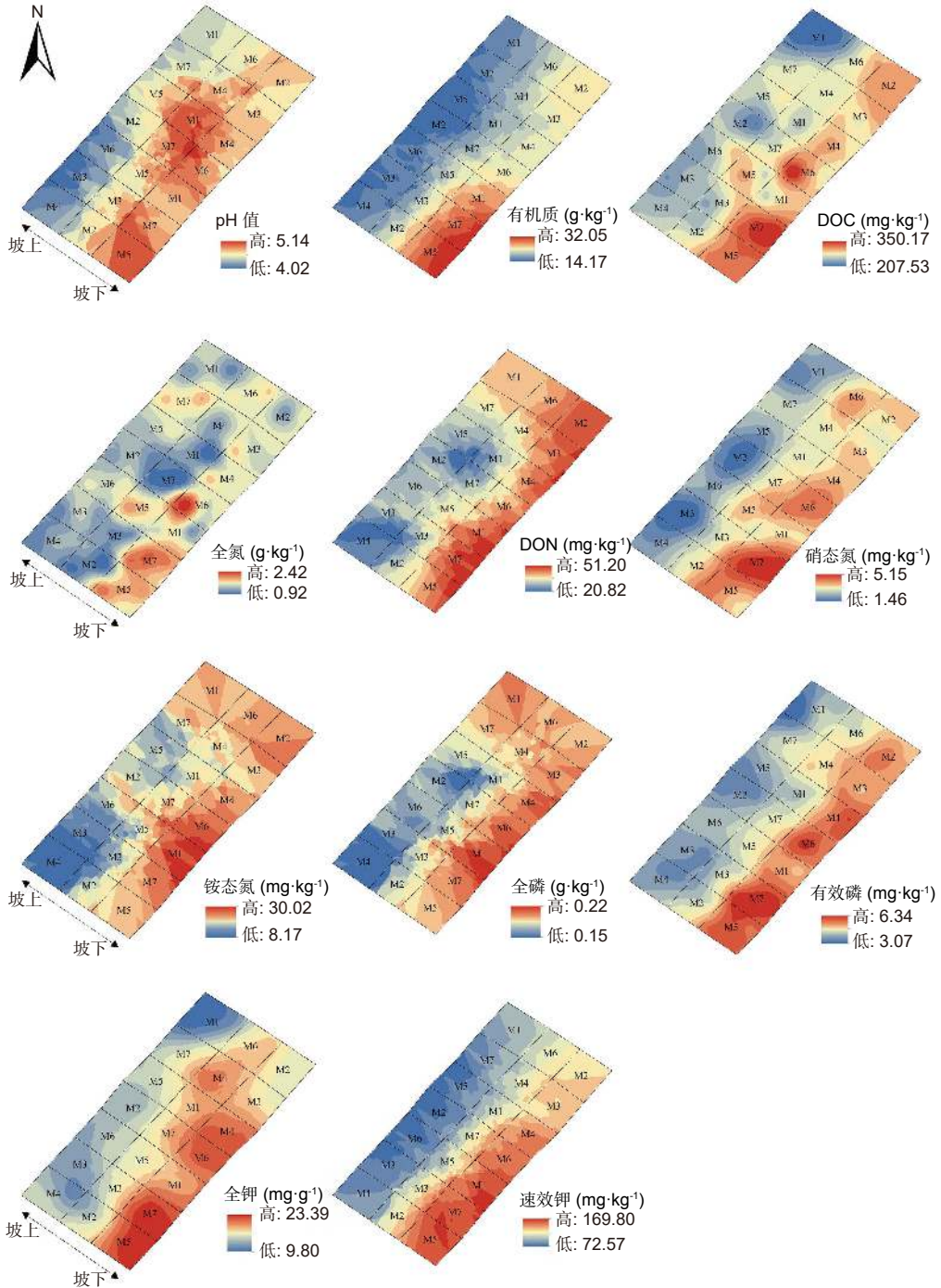


图 3 区组二土壤养分空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of soil nutrients in block two

布图可知土壤各养分指标均呈现坡上向坡下递增的总体趋势, 高值区主要出现在下坡中部。DON、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 整体呈不规则斑块状分布, 低值区主要集中在正北方向 M2、M3 区, 高值区主要集中在正南中部; TN 含量呈不规则斑块或零碎的环状分布, 区组一 TN 含量高值区主要集中在中部偏北 M5、M3、M2 区域, 其余区组主要分布在南部

M7、M6 区, 而低值区主要集中在东北或西北角; 区组二、三的 TK、AK 含量呈条带状分布, 其中在正南方向 M7、M6 和 M5 区域表现出明显高值, 正北 M1、M2、M3 区域表现出大面积低值范围; SOC 含量整体呈近似条带状分布, 在正南方向 M7、M5 区域出明显高值, 向北方向逐级递减并在各家系区域表现出大面积低值范围; 区组一和

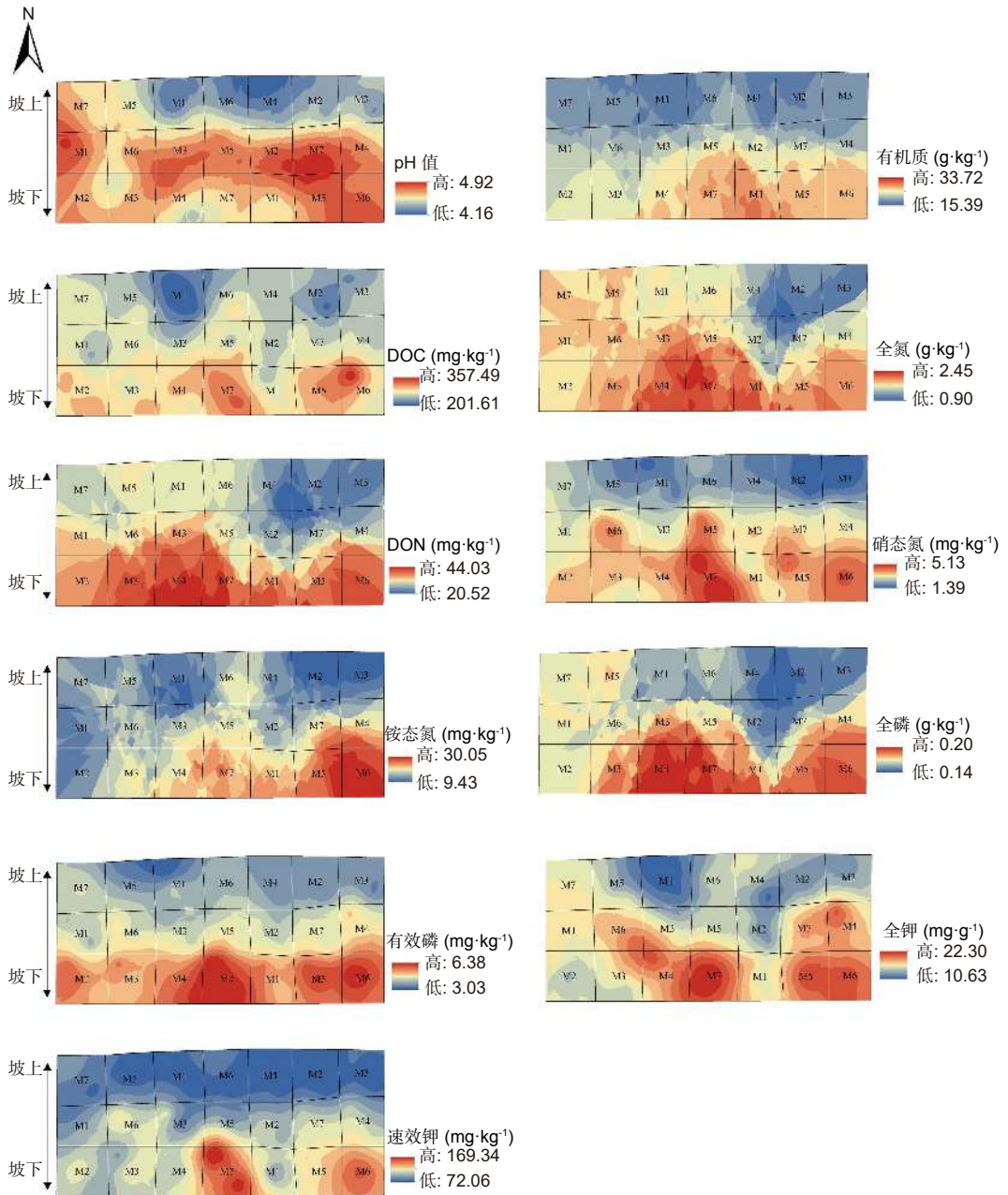


图 4 区组三土壤养分空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of soil nutrients in block three

二的土壤 pH 值呈不规则块状分布，区组三的呈条带状分布，中部偏南区域的 pH 值整体较高，总体在 4.02~5.14 酸性范围内波动变化幅度不大，可能与不同微生物下有机酸的释放、土壤含水量、地形等差异有关；DOC、NO₃⁻-N、AP 均呈条带与斑块镶嵌分布，在中部偏南 M7、M6、M5 区域出现环状高值区，并向正北方向两侧逐渐递减，在正北方向 M1、M2 和 M1 区域形成低值区。将插值图和上述养分的差异显著性分析相结合，可以清晰的表达不同家系间化学性质差异及分布情况。总体

来说研究区各养分含量总体呈块状或条带状分布，表现出从东北和西北方向往南方向递增的趋势，除 pH 值其余土壤养分含量在中部偏南 M7、M6、M5 区域有明显的表聚现象，在中部偏北方向的东北方向 M2、M3、M4 和中部 M7 区域表现出明显低值。

3.3 黑木相思家系综合评价选优

3.3.1 基于因子分析法黑木相思家系综合评价
对 7 个黑木相思家系在不同坡位上的各项生长和土壤理化指标进行 KMO 和巴特利特检验，KMO 值

为 0.891, 且显著性小于 0.05, 可用因子分析法进行统计分析。综合不同黑木相思家系的土壤理化性质及生长性状共 23 个指标进行主成分分析。公因子方差均大于 0.7, 介于 0.706~0.964 之间, 说明提取的公因子方差可以很好的表达所有指标的信

息值。以特征值大于 1 作为主成分提取了 5 个公共因子, 由表 2 可见, 5 个公因子的累积贡献率达 83.814%, 表明选定的 5 个公因子可以解释黑木相思家系生长性状和土壤理化性质的大量信息。

表 2 变量特征值和方差贡献率

Table 2 Variable eigenvalues and variance contribution rates

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%
PC ₁	14.688	50.863	50.863	14.688	50.863	50.863	7.845	34.109	34.109
PC ₂	6.225	15.672	66.535	6.225	15.672	66.535	5.283	22.971	57.080
PC ₃	5.052	10.573	77.108	5.052	10.573	77.108	2.961	12.875	69.955
PC ₄	1.718	4.121	81.229	1.718	4.121	81.229	1.729	7.517	77.472
PC ₅	1.595	2.585	83.814	1.595	2.585	83.814	1.459	6.342	83.814

根据公因子与各变量关系可得, 第一公因子方差贡献率达 34.109%, 第二公因子达 22.971%, 第三公因子 12.875%, 第四公因子 7.517%, 第五公因子仅在 pH 上具有较大载荷, 方差贡献率为 6.342%。根据成分得分矩阵, 构建得到 5 个公因子的计算模型:

其因子综合得分记为 F , 计算公式为:

$$F = (0.34109F_1 + 0.22971F_2 + 0.12875F_3 + 0.07517F_4 + 0.06342F_5) / 0.83814$$

$$F_1 = 0.252X_1 + 0.228X_2 + 0.26X_3 + \dots + 0.166X_{21} + 0.072X_{22} + 0.099X_{23};$$

式中 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 分别表示第 1~5 个主成分的特征向量权重值, X_1 、 X_2 、 X_3 、.....、 X_{23} 分别代表胸径、树高、单木材积、土壤密度、质量含水量、通气度、毛管孔隙、非毛管孔隙、总孔隙、最大持水量、田间持水量、毛管持水量、pH、SOC、DOC、TN、DON、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TP、AP、TK、AK 的结果。

$$F_2 = -0.146X_1 - 0.134X_2 - 0.091X_3 + \dots + 0.1X_{21} + 0.186X_{22} + 0.116X_{23};$$

7 个黑木相思家系 (M1~M7) 在 3 个坡位上公因子及综合得分如图 5 所示, 在上坡位 7 个黑木相思家系排名为 M7>M6>M5>M3>M1>M4>M2, M7 综合得分最高为 -0.143, 主要受一、四、五公因子影响导致得分为负值; 上坡位 7 个家系综合得分均为负值, 5 个公因子得分中均存在负值, 指标

$$F_3 = -0.038X_1 + 0.029X_2 - 0.121X_3 + \dots - 0.198X_{21} - 0.095X_{22} - X_{23};$$

$$F_4 = -0.037X_1 - 0.062X_2 - 0.025X_3 + \dots - 0.024X_{21} - 0.338X_{22} - 0.183X_{23};$$

$$F_5 = -0.093X_1 - 0.142X_2 - 0.11X_3 + \dots - 0.106X_{21} + 0.207X_{22} + 0.123X_{23};$$

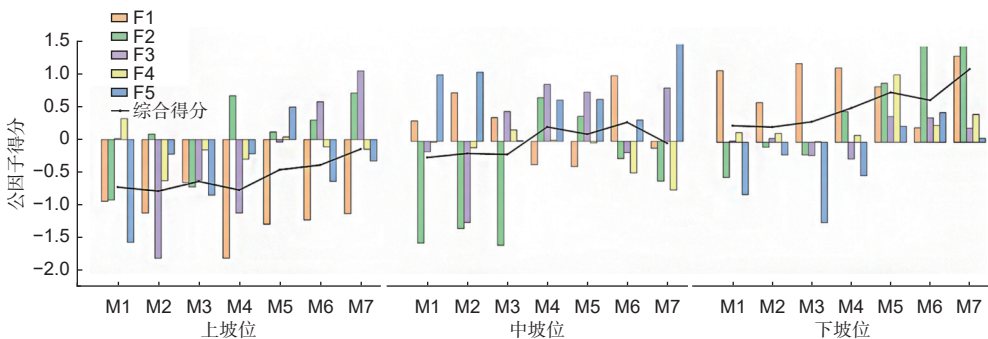


图 5 各公因子及综合得分

Fig. 5 Common factors and comprehensive scores

不均衡。在中坡位 7 个黑木相思家系排名为 M6>M4>M5>M7>M2>M3>M1, M6 综合得分最高为 0.294, 主要受二、三、四公因子的影响; M4 的综合得分为 0.223, 排名第 2, 虽排名较高但受第一公因子得分较差而影响其综合得分。在下坡位 M7 综合得分最高为 1.148, 其中 M7、M6 和 M53 个家系的 5 个公因子得分均为正值, 表明该 3 个家系较其他家系的各项生长或土壤指标较为均衡。综上所述, 可以发现 M7 在上、下坡位的生长及对土壤理化性质的改良效果整体优于其他家系, M6 在中坡位整体优于其他家系。

3.3.2 基于模糊评价法黑木相思家系综合评价

本研究以生长性状和土壤理化性质共 23 个指标作为模糊评价法的最小数据集的候选参数集。单木材积、非毛管孔隙和 AP 的变异系数介于 40%~100% 间, 说明该 3 个指标是研究区综合评价的中度敏感指标。对 23 个候选参数进行主成分分析, 结果如表 3 所示, 依据分组原则通过每组参数间的相关性分析及 Norm 值的对比, 进入综合评价最小数据集包括单木材积、总孔隙度、田间持水量、非毛管孔隙、SOC、AP、TN。通过归一化处理得到各变量的权重, 7 个指标均呈正相关关系。采用升型分布函数计算各指标的隶属度值, 结果显示不

表 3 各指标的主成分分析、Norm 值和权重值

Table 3 Principal component analysis, Norm value and weight value of each indicator

指标	分组	因子载荷					Norm值	权重值
		F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅		
胸径	1	0.934	0.049	0.203	0.160	0.148	2.656	0.072
树高	1	0.883	0.112	0.258	0.157	0.101	2.537	0.069
单木材积	1	0.936	0.141	0.150	0.175	0.105	2.667	0.080
土壤密度	2	-0.357	-0.298	-0.391	-0.622	-0.043	1.610	0.016
质量含水量	1	0.778	0.436	0.281	0.213	0.134	2.468	0.072
通气度	1	0.504	0.241	0.588	0.187	0.346	1.886	0.013
毛管孔隙	2	0.354	0.368	0.242	0.740	0.198	1.696	-0.026
非毛管孔隙	4	0.730	0.304	0.277	0.267	0.588	2.350	0.053
总孔隙	2	0.602	0.381	0.292	0.582	0.165	2.118	0.013
最大持水量	1	0.570	0.317	0.656	0.078	0.117	2.094	0.035
田间持水量	3	0.071	0.423	0.615	0.113	0.212	1.481	0.001
毛管持水量	1	0.519	0.336	0.619	0.172	0.137	1.981	0.023
pH	5	0.319	-0.568	0.175	0.134	0.831	1.906	-0.005
SOC	5	0.576	0.472	0.173	0.171	0.153	1.988	0.069
DOC	5	0.471	0.528	0.250	0.277	0.196	1.894	0.041
TN	5	0.166	0.738	0.210	0.360	-0.189	1.871	0.022
DON	5	0.297	0.681	0.374	0.242	-0.236	1.934	0.035
NO ₃ ⁻ -N	1	0.703	0.409	0.312	0.148	0.296	2.284	0.064
NH ₄ ⁺ -N	5	0.134	0.833	0.244	0.070	0.203	2.013	0.046
TP	5	0.268	0.837	0.095	0.126	-0.080	2.080	0.067
AP	5	0.759	0.522	0.150	0.21	0.017	2.470	0.084
TK	5	0.562	0.505	0.223	-0.040	0.291	2.025	0.079
AK	1	0.683	0.480	0.248	0.092	0.247	2.272	0.077
特征值		7.845	5.283	2.961	1.729	1.459		
方差百分比/%		34.109	22.971	12.875	7.517	6.342		
累计/%		34.109	57.08	69.955	77.472	83.814		

同黑木相思家系在不同坡位对维护和改善其土壤质量的能力存在差异, 不同家系在不同坡位的田间持水能力和土壤有机质的隶属度值较大, 研究区整体保水性以及土壤有机质含量较高。

7 个黑木相思家系的综合评价值如图 6 所示, 7 个黑木相思家系在上坡位的综合评价值表现为 $M7 > M5 > M6 > M4 > M1 > M3 > M2$, 综合评价值在 0.131~0.159; 在中坡位表现为 $M6 > M5 > M4 > M7 > M2 > M1 > M3$, 综合评价值在 0.142~0.164; 在下坡位表现为 $M7 > M5 > M6 > M3 > M1 > M4 > M2$, 综合评价值在 0.150~0.223, 其中以 M7 的优势度最大, 其值达 0.223; 表明在上、下坡位黑木相思家系 M7 的生长以及对土壤理化性质的改良效果最佳, 而在中坡位黑木相思家系 M6 最佳。

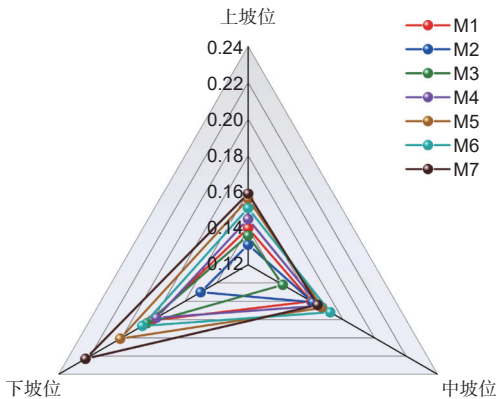


图 6 不同坡位黑木相思家系的综合评价值
Fig. 6 Comprehensive evaluation value of *Acacia melanoxylon* family in different slopes

目前, 综合评价法在优良家系中的选择在国内外尚无公认的评价指标体系, 本文采用两种方法评价可以在一定程度上避免结果存在偏向性。基于因子分析法和模糊评价法对 7 个黑木相思家系在不同坡位的综合评价可以发现, 在上、下坡位黑木相思家系 M7 的综合评价值最高, 中坡位家系 M6 最高, 表明两个家系种在对应坡位上的生长对土壤理化性质的改良效果最佳。但其他家系分别在两种方法的评分排名不同, 可能与评价指标体系的构建有关。从整体来看, 两种方法均较为真实地反应了黑木相思家系之间及其在不同坡位上的优良程度。

4 讨论

根据全国第二次土壤普查养分分级标准^[22], 研究区 TN 含量达到较高水平, 除 TP 和 AP 含量处于偏低水平外其他养分指标含量都处于中等或较高

水平, 符合我国南方普遍性缺乏磷的现状, 这是由于研究区黑木相思处于中龄生长期, 黑木相思作为固氮树种, 可以有效改良土壤, 促进土壤中氮素的转化, 同时作为常绿阔叶树种凋落物量大, 现存量较高, 其叶片相较杉木等针叶树种分解速度快, 碳归还作用强, 使得养分含量总体处于较高状态, 这与赵文东等^[8]在闽南山地杉木转换为黑木相思和桉树后土壤有机碳和全氮含量显著提高的结果一致; pH 的变异系数为 5.75%, 属于弱变异, 这与赖壮杰等^[23]、Long Linli 等^[24]研究得到土壤 pH 值变异性较低的结论一致, 说明土壤 pH 值是一个相对稳定的因素, 研究区 pH 值在各坡位各家系林地虽表现出不同程度的差异, 但均在酸性范围内, 这也验证了南方土壤普遍呈酸性这一结论^[25]; 其他土壤养分的变异系数都属于中等强度变异, 这与熊凯等^[26]研究结果相一致, 说明这些指标受随机因素和人为因素的共同影响。趋势面分析可以揭示各性状的地理趋势。土壤物化性状的地理变异受两方向的双重控制, 以南北变异为主, 呈连续的渐变地理变异模式。SOC、TN、DON、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 AK 是相对稳定的含量。土壤各养分指标分布趋势在东西、南北方向存在显著差异, 这可能与研究区地形、不同土壤养分抗人为活动干扰程度以及不同黑木相思家系对养分的利用有关, 从而影响其空间分布格局, 这与孙国军等^[27]和杨士凯等^[28]的研究结果相一致。这种显著的地理变异模式也是黑木相思在长期进化过程中为适应复杂多变的环境而产生与之相适应的遗传变异结果。本研究小空间尺度上, pH 值和 SOC、TN 等 10 个土壤养分指标的 RSS 值接近于 0, R^2 介于 0.546~0.967 之间, 表明各指标模型可以很好地拟合其分布规律, 同时各养分指标的块金系数为 28.37%~49.54%, 表明其主要受随机性因子和结构性因子的共同影响, 与姚雄等^[29]的研究结果相一致, 即气候条件较为一致的情况下, 微地形、坡位、凋落物量、人为活动是各养分指标空间变异的主要原因。11 个土壤养分指标的变程均大于采样距离 (10 m), 其空间自相关范围差异也较大, 其中 AK 的生态过程在 95.60 m 尺度上起作用, SOC、TN、TP、DON、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变程在 23.40~42.50 m, pH 值、AP、TK、DOC、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变程在 53.90~74.60 m, 表明本研究在该小尺度下设置的采样间距是合理的, 可以很好地反

映其空间异质性,同时各土壤养分生态过程基本在相同尺度上起作用。

坡位和黑木相思家系是土壤养分空间变异的重要影响因素,就坡位方面,研究区土壤养分高值区出现在坡中下位置,整体上表现出自坡下至坡上呈逐渐减小的趋势,产生这一原因可能是因为黑木相思凋落物量大且根系分解速率快是土壤养分的重要来源^[30],但由于研究区常年降雨量大导致大量养分冲刷至坡下汇集^[31],这也使得坡中下部草本灌木生长旺盛,郁闭度高,有利于林木生长及土壤有机质积累^[32],进而形成中下坡位高值区的出现。整体来看,研究区土壤养分破碎斑块区域较少,块状或条带状面积较多且明显,表明黑木相思人工林地土壤养分的离散程度较低、连续性较好,具有明显的空间异质性。从各黑木相思家系的空间插值图中可以发现, SOC、DOC、NO₃⁻-N、AP、AK 空间分布与黑木相思家系区域的水体分布、地形及凋落物分解特性差异等有关^[33],中部偏南方向 M7、M6、M5 家系生长较好,可能区域海拔较低,坡度较缓,土壤含水量较高,有利于养分的积累^[34],产生凋落物量大,使得养分易富集。TP 含量在南部 7 个黑木相思家系区域均较高,海拔低且少受径流影响,使得全磷得到充分归还;区组二在东侧样地家系的全磷含量较其他家系高,这可能与灌木草本丰富度有关^[35]。pH 值呈北部低南部高的分布格局,与研究区地形趋势相吻合,与土壤水分海拔差异有关,但土壤酸性均在一定范围内。TN、DON、NH₄⁺-N、TP 在各家系的空间插值图较破碎,空间异质性明显,可能与其移动性、植物吸收利用等有关^[36]。SOC 与 pH 值的分布规律相似,其高值区主要分布在东南方向 M7、M5、M2 区域,并向其他家系区域呈条带状递减趋势,可能与水平迁移能力有关。

综合评价值的计算可以反映诸多因子共同作用的结果,也能够较好地反映出在坡位影响下各黑木相思家系的优势程度。树高、胸径和材积是林木生长最为重要的性状指标,其所体现出的稳定性和差异,主要是家系遗传性、环境以及相互间效应的综合结果,是家系生长性状分析以及综合评价的基础^[37]。土壤养分是林木生长发育的基础,对不同黑木相思家系所在林地进行土壤多因子综合比较可以有效反映其土壤肥力的演化方向和程度,是评价家

系林分土壤肥力的重要内容^[38-39]。通过因子分析法和模糊评价法综合评价 7 个黑木相思家系 (M1~M7) 的研究结果表明,在上、下坡位黑木相思家系 M7 的生长以及对土壤理化性质的改良效果最佳,而在中坡位黑木相思家系 M6 最佳,这与王缪琦^[40]对生长初期的 7 个黑木相思家系进行综合优良筛选结果一致。与陈启恩的研究结果不符:评选家系优良得出 M4>M2>M7>M3>M5>M1,这是因为只根据连年生长量均值进行评价没有考虑到土壤理化性质改良效果因素。不同品种的林木生长与维护 and 改善其土壤质量的能力存在差异,林木遗传效应不同,其表现出的根系生长发育状况,凋落物数量、成分及分解速率等都存在一定差异;受遗传效应的作用,优良的种源或家系种在树高、胸径、冠幅和单株材积上具有优势^[41]。与其他黑木相思家系相比, M7 根系发展好,凋落物量较大,林下植被多样性较丰富,产生较高的土壤有机质和其他养分水平^[42-43],不仅对土壤理化性质有明显的改善,对大径材培育也具有重要意义,而在中坡位 M6 最佳。本研究了解了福建山地黑木相思家系在不同坡位的生长状况和土壤养分变化规律,评价筛选出适合于福建立地的优良家系,为黑木相思家系林分的科学引种、造林地选择及合理扩大其种植规模提供理论依据。

5 结论

本研究采用统计学方法与 GIS 技术相结合,探讨了 7 个黑木相思家系在空间和坡位上的土壤理化性质变化,并对其进行综合优选。结果表明,坡位和黑木相思家系是土壤养分空间变异的重要影响因素,养分高值区出现在中下坡位置,整体上表现出明显的空间异质性。另外,综合评价值可以反映多个因素的综合效应,也能够体现不同坡位对各黑木相思家系的优势度。黑木相思家系 M7 对土壤理化性质的改良效果最好,在中坡位 M6 最佳。本研究结果研究成果将为我国南方山区可持续利用及合理的经营策略提供科学依据。

参考文献:

- [1] ULLAH S, XU Y, LIAO C, et al. Continuous planting Eucalyptus plantations in subtropical China: Soil phenolic acid accumulation and adsorption physiognomies[J]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2023, 6: 1135029.

- [2] CHEN J, DENG Z, JIANG Z, *et al.* Variations of rhizosphere and bulk soil microbial community in successive planting of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*)[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 954777.
- [3] MUKESH J, KIRAN B, S. S B. Changes in physico-chemical properties and metabolic activity of soil in poplar plantations replacing natural broad-leaved forests in Kumaun Himalaya[J]. *Journal of Arid Environments*, 1997, 35(1): 161-169.
- [4] 田大伦, 沈 燕, 康文星, 等. 连栽第1和第2代杉木人工林养分循环的比较[J]. *生态学报*, 2011, 31 (17): 5025-5032.
- [5] XU Y X, LI C, ZHU Y L, *et al.* The shifts in soil microbial community and association network induced by successive planting of Eucalyptus plantations[J]. *Forest Ecology and Management*, 2022, 505: 119877.
- [6] SELVALAKSHMI S, VASU D, HUANG Z J, *et al.* Influence of long-term successive rotations and stand age of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations on soil properties[J]. *Geoderma*, 2017, 306: 127-134.
- [7] 朱丹苗, 陈俊辉, 姜培坤. 杉木人工林土壤有机碳和微生物特征及其影响因素的研究进展[J]. *浙江农林大学学报*, 2021, 38 (5): 973-984.
- [8] 赵文东, 李 凯, 朱传晟, 等. 闽南山地树种转换对土壤碳氮磷及化学计量的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2022, 44 (2): 299-310.
- [9] 李江才. 闽南山地4种优质相思树种的引种[J]. *林业科技开发*, 2003, 17 (5): 33-35.
- [10] 周丽丽, 李树斌, 潘 辉, 等. 5种相思树和尾巨桉人工林土壤养分和酶活性特征[J]. *热带亚热带植物学报*, 2021, 29 (5): 483-493.
- [11] YANG L, LIU N, REN H, *et al.* Facilitation by two exotic Acacia: *Acacia auriculiformis* and *Acacia mangium* as nurse plants in South China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(8): 1786-1793.
- [12] 陈朝黎, 曾炳山, 裘珍飞, 等. 不同硼条件黑木相思生长特性及异速生长分析[J]. *森林与环境学报*, 2023, 43 (2): 201-209.
- [13] 张伟皓, 叶利奇, 陈启华, 等. 基于优化MaxEnt模型的黑木相思引种栽培区划[J]. *西北林学院学报*, 2023, 38 (1): 88-94 + 107.
- [14] 李安琪, 严春晓, 连勇机, 等. 黑木相思半同胞子代家系苗期性状的遗传分析[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2023, 43 (2): 9-16.
- [15] 赵文东, 李 凯, 沈 健, 等. 坡位和坡度对黑木相思人工林土壤养分空间分布的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2022, 50 (9): 78-84 + 104.
- [16] LAURA H, JESÚS M F, ISABEL C, *et al.* Assessing spatio-temporal rates, patterns and determinants of biological invasions in forest ecosystems. The case of *Acacia* species in NW Spain[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 329: 206-213.
- [17] C C, H R, A F, *et al.* Towards sustainable valorisation of *Acacia melanoxylon* biomass: Characterization of mature and juvenile plant tissues[J]. *Environmental Research*, 2020, 191: 110090.
- [18] DORA V I, KAREN M, SILVIA E M. *Acacia melanoxylon* in Argentina: heartwood content and its relationship with site, growth and age of the trees[J]. *Forest Systems*, 2017, 26(1): e7.
- [19] 程 谅, 焦 雄, 邸涵悦, 等. 不同整地措施坡面土壤水分时空分布特征[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (6): 1423-1435.
- [20] 李海东, 林 杰, 张金池, 等. 小流域尺度下土壤有机碳和全氮空间变异特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2008 (4): 38-42.
- [21] BURGESS T M, WEBSTER R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging[J]. *Journal of Soil Science*, 1980, 31: 315-331.
- [22] 田 雨, 庄 莹, 曹 义, 等. 雾灵山低山区土地利用类型对土壤理化性质的影响[J]. *水土保持研究*, 2012, 19 (6): 41-44.
- [23] 赖壮杰, 刘 健, 余坤勇, 等. 南方典型毛竹经营区土壤养分空间变异特征——以福建省南平市顺昌县毛竹林经营区为例[J]. *东北林业大学学报*, 2018, 46 (3): 63-68.
- [24] LONG L L, LIU Y, CHEN X Y, *et al.* Analysis of spatial variability and influencing factors of soil nutrients in western china: a case study of the daliuta mining area[J]. *Sustainability*, 2022, 14(5): 2793.
- [25] 苏松锦. 格氏栲天然林土壤空间异质性及其生长适宜性评价[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [26] 熊 凯, 赵玉娟, 陈 健, 等. 川西米亚罗亚高山暗针叶林土壤pH和养分空间异质性分析[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44 (2): 55-64.
- [27] 孙国军, 李卫红, 朱成刚, 等. 新疆伊犁河谷表层土壤容重的空间变异性分析[J]. *资源科学*, 2016, 38 (7): 1222-1228.
- [28] 杨士凯, 周运超, 黄 磊, 等. 杉木成熟林土壤容重空间变异特征[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40 (1): 30-38.
- [29] 姚 雄, 余坤勇, 曾 琪, 等. 福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性[J]. *环境科学*, 2016, 37 (12): 4789-4799.
- [30] NIE X D, GUO W, HUANG B, *et al.* Effects of soil properties, topography and landform on the understory biomass of a pine forest in a subtropical hilly region[J]. *Catena*, 2019, 176: 104-111.
- [31] XIE M X, ZHANG P C, HE Y P, *et al.* Combined effects of rainfall pattern and fertilization on subsurface nitrogen transport and loss from sloped soil: a laboratory experiment[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2023, 16(1): 31.
- [32] 常 超, 谢宗强, 熊高明, 等. 三峡库区不同植被类型土壤养分特征[J]. *生态学报*, 2009, 29 (11): 5978-5985.
- [33] WANG M W, JI L, SHEN F Y, *et al.* Differential responses of soil extracellular enzyme activity and stoichiometric ratios under different slope aspects and slope positions in *Larix olgensis* plantations[J]. *Forests*, 2022, 13(6): 845.

- [34] YANG W J, WANG Y H, WANG S L, *et al.* Spatial distribution of Qinghai spruce forests and the thresholds of influencing factors in a small catchment, Qilian Mountains, northwest China[J]. *Scientific reports*, 2017, 7(1): 5561.
- [35] 雷斯越, 赵文慧, 杨亚辉, 等. 不同坡位植被生长状况与土壤养分空间分布特征[J]. *水土保持研究*, 2019, 26 (1): 86-91 + 105.
- [36] ASHUTOSH M, S D S, G H K. Improvement in physical and chemical properties of sodic soil by 3, 6 and 9 years old plantation of *Eucalyptus tereticornis*[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 184(1-3): 115-124.
- [37] 魏嘉彤, 陈思琪, 芦贤博, 等. 基于生长与木材性状的红松优良种源评价选择[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44 (3): 12-23.
- [38] 陈玉芹, 胡永亮, 张丽萍, 等. 基于主成分和聚类分析的德宏橡胶林土壤肥力评价[J]. *热带作物学报*, 2019, 40 (8): 1461-1467.
- [39] OBENG A S, SADICK A, HANYABUI E, *et al.* Evaluation of soil fertility status in oil palm plantations in the Western Region of Ghana[J]. *AIMS Agriculture and Food*, 2020, 5(4): 938-949.
- [40] 王镠琦. 不同种源及家系黑木相思木材材性变异及综合选择研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [41] 朱家晟, 秦富仓, 李 龙, 等. 黄土丘陵区人工林典型林分土壤肥力综合评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2022 (2): 9-16.
- [42] BJÖRN B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133(1-2): 13-22.
- [43] 骆宗诗, 向成华, 慕长龙. 绵阳官司河流域主要森林类型凋落物含量及动态变化[J]. *生态学报*, 2007, 27 (5): 1772-1781.

Comprehensive Evaluation of Suitable Land and Tree Varieties of *Acacia melanoxylon* Family

ZHAO Yue-qiao¹, HUANG Xiao-xia¹, ZHANG Lu-yue¹, GAO Wen-jing¹,
CHENG Nuo¹, DING Guo-chang², LAI Ri-wen¹

(1. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian China; 2. College of Arts & Landscape Architecture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian China)

Abstract: [Objective] To select suitable *Acacia melanoxylon* lines in southern mountains and to reveal the relationship between the spatial variation pattern of soil nutrients and topographic changes in *Acacia melanoxylon* growth. [Method] In this paper, based on seven 15-year-old *Acacia melanoxylon* lines (M1~M7) created on cedar logging sites, classical statistics, descriptive statistics, geostatistical methods and GIS technology were used to study the variation patterns of soil physical and chemical properties and spatial distribution of soil nutrients of seven *Acacia melanoxylon* lines at different slope positions. The seven *Acacia melanoxylon* lines were evaluated and selected by factor analysis and fuzzy evaluation method. [Result] The physical and chemical properties of the seven *Acacia melanoxylon* lineages in the lower slope were the largest, followed by middle slope and upper slope, and those in the lower slope was significantly higher than those in the other slopes; the soil structure and nutrient contents in the M7 stands in were the best, followed by M6 and M5; the nutrient contents in the study area were generally distributed in blocks or strips, showing an increasing trend from northeast and northwest to south. [Conclusion] The comprehensive evaluation value is the highest in the upper and lower slope of *Acacia melanoxylon* family M7, and its growth has the best effect on the improvement of soil physical and chemical properties, and in the middle slope of *Acacia melanoxylon* family M6. The results of the study are of reference value for the study of land-appropriate species and sustainable development in southern mountainous areas, and can be used in the management practice of *Acacia melanoxylon* plantations.

Keywords: *Acacia melanoxylon* family; forest growth; soil physicochemical properties; spatial heterogeneity; comprehensive evaluation