

DOI: 10.11929/j.swfu.201807003

引文格式: 王嘉琛, 赵隽宇, 黄康庭, 等. 桂北土壤肥力质量对尾叶桉人工林连栽连作的响应 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2019, 39(1): 106-113.

桂北土壤肥力质量对尾叶桉人工林连栽连作的响应

王嘉琛¹ 赵隽宇¹ 黄康庭² 翁怡琳¹ 祝玲月¹ 李鹏¹ 吴立潮¹

(1. 中南林业科技大学, 国家教育部经济林培育和保护重点实验室, 湖南长沙 410004;

2. 广西国有大桂山林场, 广西贺州 542800)

摘要: 以桂北尾叶桉三代连栽连作人工林为研究对象, 分析 20 项土壤理化性质差异, 筛选出尾叶桉林地土壤肥力质量评价最小数据集, 并对土壤肥力进行质量评价。结果表明: 第三代尾叶桉人工林大部分土壤理化指标比第一、第二代林土壤显著降低, 其中第三代林土壤持水量、毛管孔隙度、有机质、全磷、有效磷、速效钾、有效元素含量显著低于第一代林、第二代林。基于主成分分析及皮尔逊相关性分析筛选出毛管孔隙度、有机质、全磷、有效磷、速效钾、有效硼、有效钙和有效锌含量, 建成反映桉树人工林土壤肥力质量的最小数据集。评价发现, 三代连栽尾叶桉人工林土壤肥力为第二代 (0.785) > 第一代 (0.642) > 第三代林 (0.566), 土壤肥力质量先增加后降低, 尾叶桉连栽两代之后土壤理化性质显著退化。因此, 建议在第二代林采伐后要及时补充因连栽下降的元素, 以达到桉树速生丰产的目的。

关键词: 桂北; 尾叶桉; 人工林; 高强度连栽; 土壤肥力质量; 主成分分析法

中图分类号: S158

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2019)01-0106-08

Response of Soil Fertility Quality to Continuous Cropping of *Eucalyptus urophylla* Plantation in Northern Guangxi

Wang Jiachen¹, Zhao Junyu¹, Huang Kangting², Weng Yilin¹, Zhu Lingyue¹, Li Peng¹, Wu Lichao¹

(1. Key Laboratory of Ministry of education for economic forest cultivation and protection, Central South University of Forestry and Technology, Changsha Hunan 410004, China; 2. State-owned Daguishan Forest Farm, Hezhou Guangxi 542800, China)

Abstract: The soil of 3 generation of *Eucalyptus urophylla* plantation in northern Guangxi was studied. Based on the determination of 20 soil physical and chemical properties, the minimum data set of soil fertility quality evaluation of Eucalyptus forest land was selected by principal component analysis, and the quality evaluation of soil fertility was carried out. The results show that the physical and chemical properties of the 3rd generation *E. urophylla* plantations are significantly lower than that of other generation forest. Soil water holding capacity, capillary porosity, organic matter, total phosphorus, available phosphorus, available potassium and effective elements in the 1st and 2nd generation are significantly higher than those of 3rd generation *E. urophylla* plantations. The minimum data set of capillary porosity, organic matter, total phosphorus, available phosphorus, available potassium, available boron, available calcium and effective zinc are selected as the minimum data sets for evaluating the soil fertility quality of *E. urophylla* plantation. The results show that the 2nd generation (0.785) > 1st generation (0.642) > 3rd generation (0.566). The soil quality increases first and then decreases. After 2 genera-

收稿日期: 2018-07-03; 修回日期: 2018-10-25

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划项目 (2016YFD0600505) 资助。

第 1 作者: 王嘉琛 (1994—), 男, 硕士研究生。研究方向: 水土保持与荒漠化防治。Email: 693945002@qq.com。

通信作者: 吴立潮 (1963—), 男, 博士, 博士生导师。研究方向: 林木营养与地力维护。Email: wulichao@sina.com。

tions, the soil physical and chemical properties are significantly degraded. Therefore, after the 2nd generation forest harvesting, it is necessary to replenish the element content decreased by continuous planting in order to achieve the fast-growing and high-yield production of *E. urophylla*.

Key words: northern Guangxi; *Eucalyptus urophylla*; plantation; long-term continuous planting; soil fertility quality; principal component analysis

桉树 (*Eucalyptus* spp.) 连栽在获得高经济收益的同时, 也面临着可能导致土壤性质变差的质疑。相关研究表明桉树高强度连栽会产生林地土壤板结、肥力下降、土壤微生物多样性降低、林地生产力下降等负面影响^[1-3]。桉树作为一种速生树种, 在广西大面积种植, 其人工林的面积已达 165.3 万 hm^2 , 占全国桉树种植总面积的 60.4%, 因此广西已成为我国桉树的主要栽培区^[4-6]。

国内外桉树土壤养分相关的研究大都以短期林龄或者 1 个轮伐期的桉树为研究对象^[7-12], 极少有以三代轮伐期的桉树为研究对象, 建立桉树林地土壤理化性质最小数据集的研究。本研究利用方差分析、主成分分析和相关性分析等方法对三代尾叶桉人工林的土壤理化指标进行分析, 研究三代连栽尾叶桉人工林土壤理化性质变化规律, 并筛选指标建立桂北桉树人工林土壤肥力质量评价最小数据集, 研究高强度连栽桉树人工林土壤肥力质量的变化特征, 分析影响桉树土壤肥力质量的主要因素。

1 研究区概况

试验地位于桉树林种植主产区之一的广西国有大桂山林场 (111°20'5" ~ 111°54'39"E, 23°58'33" ~ 24°14'25"N), 地处广西东北部, 海拔最高 1 204 m, 最低 80 m, 属于典型的低山丘陵地貌。该区域为湿润亚热带季风气候, 热量丰富, 雨量充沛; 年平均气温 19.3 °C, 极端最高气温 39.7 °C, 极端最低气温 -2.4 °C, 年积温 6 243 °C; 年平均降雨量 2 056 mm, 年蒸发量 1 275 mm, 平均相对湿度 82%, 有霜期 12d。试验地海拔 200 ~ 300 m, 土层厚度在 60 ~ 100 cm, 平均坡度 30° ~ 40°, 土壤肥力中等。试验地桉树品种为尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla*), 是常绿乔木, 树皮红棕色, 5a 即可成材采伐。土壤为寒武系砂岩发育而来的富铝湿润富铁土, 林下植被主要有五节芒 (*Miscanthus floridulus*)、黄茅草 (*Heteropogon contortus*)、山芝麻 (*Helicteres angusifolia*)、铁芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*) 等。

2 材料与方法

2.1 样地设置

在试验地选择海拔、土壤、地形等相近的 3 个不同时期的尾叶桉人工林, 组成年代序列, 命名为: 第一代 (F)、第二代 (S) 和第三代 (T) 桉树人工林, 分别代表林龄 5a、10a 和 15a。试验地造林前为常绿阔叶林, 炼山及全垦后种植桉树, 即第一代桉树人工林; 第一代林采伐后在其伐桩上萌芽生长形成第 2 代林; 第二代林伐桩萌芽生长形成第三代林。大桂山林场桉树每 5 年进行一次采伐, 萌芽更新生长时连续 3 个月施入无机肥。第一代林种植时将幼苗移至 20 cm 深的坑中, 株行距为 2 m×3 m。3 个不同时期尾叶桉人工林分别是 2012 年营造的第一代林、2007 年造林经过 1 次采伐后萌芽形成的第二代林和 2002 年营造经过 2 次采伐后萌芽形成的第三代林。

2.2 土样采集

采样时间为 2017 年 3 月底, 在 3 个不同时期尾叶桉人工林中设置面积为 20 m×20 m 的标准地, 每个时期的林分设置标准样地 6 块, 共 18 块。采样前对标准样地进行树高、胸径等调查。然后去除枯枝落叶后, 采集 0 ~ 20 cm 层土壤, 取 500 g 带回实验室, 经过风干、研磨、过筛、混合分样后供土壤化学性质分析, 同时每个样地用环刀取样 2 ~ 3 个供土壤物理性质的测定。

2.3 土壤理化指标测定

2.3.1 土壤物理指标测定

土壤容重、田间持水量、总孔隙度和毛管孔隙度、土壤通气度等指标, 均参照 LY/T 1230—1999 采用环刀法测定^[13]。

2.3.2 土壤化学指标测定

土壤 pH 值采用蒸馏水浸提土壤法, 用 pH 计进行测定 (土水比为 1: 2.5)^[14]; 有机质含量采用重铬酸钾加热法测定^[15]; 全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定^[16]; 全磷含量硝化后用全自动间断化学分析仪进行测定^[17]; 全钾含量用碱熔-火焰

光度法测定^[18]；有效磷含量采用 Mehlich3 浸提剂浸提后用全自动间断化学分析仪测定^[19]；速效钾含量用醋酸铵浸提-火焰光度计法测定^[20]；有效元素钙、镁、铁、锰、铜、锌含量用 Mehlich3 液体浸提，原子吸收光度计测定^[21]；土壤有效硼含量通过沸水加活性炭浸提 5 min 后，用全自动间断化学分析仪测定^[22]；硝态氮含量依据 LY/T 1230—1999 采用酚二磺酸比色法测定；铵态氮含量采用全自动间断化学分析仪测定。

2.4 土壤肥力质量评价

2.4.1 土壤肥力质量评价指标筛选

为了使土壤肥力评价指标符合实用、稳定、易测等原则，对所测定的 20 个土壤指标进行主成分分析^[23]，提取特征值 ≥ 1 的主成分，依据分组原则进行分组并计算各指标的 Norm 值，将各主成分中因子载荷 ≤ 0.5 的土壤指标分为一组，选取每组中 Norm 值在最高值 10% 范围内的指标。为了进一步消除数据冗余，对这些指标再进行相关性分析，最终获得的评价指标基本符合实用、稳定、易测等原则。

2.4.2 评价指标隶属度

各指标隶属度一般用隶属度函数来表达，可分为三类：戒上型函数；梯形函数；戒下型函数^[24]。本研究用雷达图来表示计算出的各指标隶属度值，即隶属度越小表示其属性状态越差，相反则属性状态越好，各点所组成的多边形面积大小则

表示评价对象的整体状况。隶属度函数的各转折点根据桉树人工林土壤实际情况，结合 NY/T309—1996 全国耕地类型区、耕地地力等级划分及参考相关研究确定。

2.4.3 土壤综合肥力指数计算方法

采用土壤综合肥力指数 (IFI) 来评价土壤肥力质量，其值越大说明土壤肥力质量越好。权重系数为各指标的公因子方差与总公因子方差之比。

$$IFI = \sum_{i=1}^n W_i \times C_i \quad (1)$$

式中： W_i 表示各个指标隶属度值， C_i 表示指标相应的权重系数， n 表示指标个数。

2.5 分析方法

运用 SPSS 18.0 对土壤理化性质差异进行单因素方差分析和 LSD 检验；运用 Pearson 相关性分析、主成分分析筛选指标，建立最小数据集。

3 结果与分析

3.1 不同代桉树人工林土壤理化性质

三代桉树人工林土壤的物理性质比较见表 1。由表 1 可知，土壤容重、最大持水量、毛管孔隙度、土壤通气度均存在显著差异 ($P < 0.05$)。桉树 F、S 林土壤容重显著低于 T 林；土壤持水量为 S 最大；毛管孔隙度 T 显著大于 F，桉树 F 林土壤通气性最好，土壤通气度随着连栽代数的增加而降低。

表 1 土壤物理性质显著性比较

Table 1 Significant comparison of soil physical properties

代数	土壤容重/(g·cm ⁻³)	最大持水量/%	毛管孔隙度/%	土壤通气度/%
F	1.34 ^b	55.99 ^b	36.98 ^c	25.78 ^a
S	1.29 ^c	70.66 ^a	46.50 ^a	19.66 ^b
T	1.66 ^a	47.41 ^c	42.28 ^b	15.66 ^c

注：同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

三代桉树人工林土壤的化学性质比较见表 2。由表 2 可知，桉树三代连栽土壤化学性质中除有效铁与有效锰外均存在显著差异 ($P < 0.05$)。桉树人工林土壤有机质含量、全磷含量、有效磷含量、速效钾含量、有效镁含量均表现出相同的规律，具体表现为 $S > F > T$ 。各代之间全钾含量差异显著 ($P < 0.05$)，F 较 S 低 56.78%。T 林速效钾含量比 S 林含量低 22.68%。有效铜表现为 F、S 林显著大于 T 林 ($P < 0.05$)，F、S 之间无显著差异。S 林有效镁含量显著高于 T，比 T 高 57.41%。

S 林土壤有效锌含量是 T 林的 1.71 倍。S 桉树人工林土壤全氮、铵态氮、硝态氮量显著高于 T 与 F，桉树 F 林与 T 林含量之间无显著差异；有效硼含量表现为随代数的增加逐渐下降的趋势，F 和 S 含量显著高于 T。

3.2 土壤肥力质量评价指标筛选

基于主成分分析、皮尔逊相关性分析和 Norm 值的大小顺序确定土壤肥力质量评价指标，土壤肥力指标的主成分分析结果见表 3。由表 3 可知，特征根 ≥ 1 的主成分有 4 个，累积贡献率大

于 93%，能够解释土壤大部分的信息。各指标的 Norm 值及分组结果如下：第 1 组为 pH、有机质含量、铵态氮含量、全氮含量、全钾含量、有效磷含量、有效钙含量、有效镁含量、有效铁含量、土壤容重、最大持水量，有效磷含量和有机质含量作为土壤肥力评价中的重要指标，其测定结果准确可靠被保留，根据相关性分析结果（表 4）剔除与之显著相关的指标，第 1 组最后保留有机

质含量、有效磷含量和有效钙含量。同样方法，第 2 组最后保留有效硼含量、全磷含量和毛管孔隙度。第 3 组为有效锌含量，第 4 组为速效钾含量。最终保留毛管孔隙度、有机质含量、全磷含量、有效磷含量、速效钾含量、有效硼含量、有效钙含量、有效锌含量 8 个指标作为多代桉树人工林土壤肥力质量评价的指标。

表 2 土壤化学性质显著性比较

Table 2 Significant comparison of soil chemical properties

代数	pH	有机质 铵态氮 (mg·kg ⁻¹)		硝态氮/ (mg·kg ⁻¹)	全氮 全磷 (g·kg ⁻¹)		全钾	有效硼/ (mg·kg ⁻¹)
F	4.13 ^a	21.68 ^b	16.14 ^b	1.76 ^b	1.73 ^b	0.33 ^b	9.76 ^c	0.15 ^a
S	4.04 ^a	34.45 ^a	25.62 ^a	2.28 ^a	2.66 ^a	0.48 ^a	22.58 ^a	0.14 ^a
T	4.12 ^a	18.42 ^c	16.19 ^b	1.97 ^b	1.99 ^b	0.20 ^c	14.64 ^b	0.12 ^b

代数	有效磷 速效钾 有效钙 有效镁 有效铁 有效锰 有效铜 有效锌 (mg·kg ⁻¹)							
F	2.92 ^b	60.67 ^b	58.58 ^a	11.94 ^b	313.46 ^a	3.33 ^a	1.05 ^b	2.23 ^a
S	5.20 ^a	73.50 ^a	61.62 ^a	15.19 ^a	334.33 ^a	3.39 ^a	0.98 ^b	2.81 ^a
T	1.12 ^c	56.83 ^c	39.08 ^b	9.65 ^c	315.54 ^a	2.80 ^a	1.56 ^a	1.64 ^b

注：同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 3 土壤肥力指标的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of soil fertility index

指标	主成分				分组	Norm
	1	2	3	4		
pH	-0.610	0.030	0.610	0.440	1	2.12
有机质	0.830	0.490	-0.100	-0.180	1	2.81
铵态氮	0.960	-0.030	0.140	0.110	1	2.94
硝态氮	-0.180	0.860	0.310	-0.190	2	2.21
全氮	0.880	0.190	-0.150	-0.050	1	2.73
全磷	0.580	0.620	0.210	0.320	2	2.37
全钾	0.940	0.240	-0.070	0.180	1	2.93
有效硼	0.030	-0.910	-0.080	0.270	2	2.23
有效磷	0.930	-0.280	-0.070	0.140	1	2.92
速效钾	0.420	0.590	0.140	0.620	4	2.07
有效钙	0.710	0.040	0.410	-0.480	1	2.32
有效镁	0.940	0.140	0.060	-0.290	1	2.91
有效铁	0.890	-0.160	0.220	0.230	1	2.77
有效锰	-0.460	0.830	0.080	0.190	2	2.46
有效铜	-0.480	0.750	0.350	-0.160	2	2.39
有效锌	-0.130	-0.390	0.880	-0.030	3	1.61
土壤容重	-0.860	0.200	-0.340	0.140	1	2.72
最大持水量	0.900	-0.410	0.040	0.110	1	2.92
毛管孔隙度	0.160	0.760	-0.430	0.230	2	2.02
土壤通气度	-0.180	-0.950	0.050	0.200	2	2.38
特征根	9.300	5.853	2.013	1.448		
方差贡献率/%	46.502	29.284	10.064	7.239		
累积贡献率/%	46.502	75.786	85.849	93.088		

表 4 主成分分析的第一组指标间皮尔逊相关分析

Table 4 Pearson correlation analysis among the 1st set of indicators of principal component analysis

指标	pH	有机质	铵态氮	全氮	全钾	有效磷	有效钙	有效镁	有效铁	土壤容重	最大持水量
pH	1										
有机质	-0.611	1									
铵态氮	-0.421	0.766*	1								
全氮	-0.663	0.854**	0.875**	1							
全钾	-0.522	0.870**	0.896**	0.845**	1						
有效磷	-0.566	0.618	0.871**	0.712	0.844**	1					
有效钙	-0.390	0.623	0.695	0.621	0.565	0.510	1				
有效镁	-0.633	0.896**	0.558	0.858*	0.863	0.770*	0.849**	1			
有效铁	-0.355	0.568	0.601	0.853**	0.830	0.914**	0.626	0.735*	1		
土壤容重	0.399	-0.632	-0.852**	0.683	-0.716*	-0.856**	-0.727*	-0.822**	-0.829**	1	
最大持水量	-0.501	0.510	0.874**	0.436	0.774*	0.970**	0.593	0.752*	0.923**	-0.852**	1

注:*表示显著相关, **表示极显著相关。

3.3 土壤肥力质量综合评价

3.3.1 隶属度分析

最小数据集指标隶属度值雷达图见图 1。由图 1 可知, 各指标组成的区域整体处于中心位置说明土壤的肥力中等, 不同代数桉树人工林土壤多边形面积大小排序为 S 林>F 林>T 林, 表明 S 桉树人工林土壤肥力状况最好, T 桉树人工林多边形面积最小说明 T 土壤肥力最差。计算出最

小数据集的隶属度值, 结果显示有效磷的平均隶属度值最小, 最接近中心原点, 其次是有效锌, 说明两者对桉树林土壤肥力的作用分值比较小。不同代数的桉树人工林土壤各指标的隶属度值稍有差异, S 林土壤有机质、有效磷、有效钙、全磷明显高于 F 林和 T 林。F、S 林有效硼含量明显高于 T。F、S、T 毛管空隙度、有效锌隶属度值差异不明显。

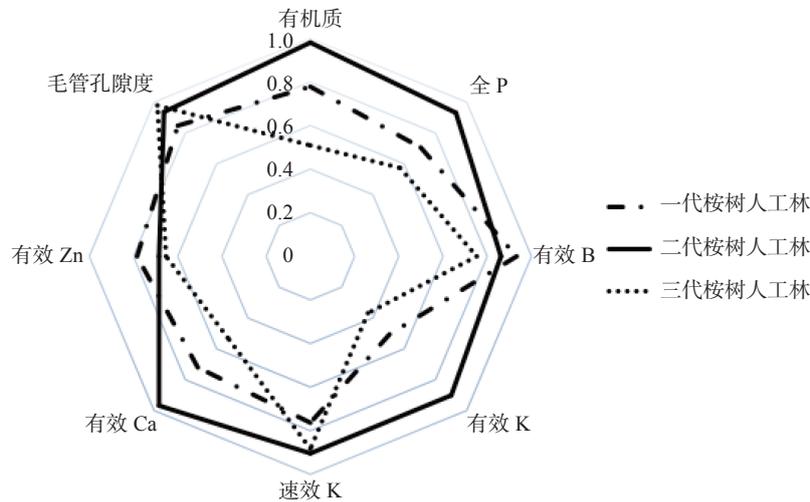


图 1 最小数据集指标隶属度值雷达图

Fig. 1 Radar chart of minimum data set indicator membership value

3.3.2 土壤综合肥力指数分析

土壤综合肥力指数计算结果见表 5。由表 5 可知, 桉树经过三代连栽土壤肥力质量呈现先增加后降低的趋势。样地土壤综合肥力指数平均为 0.672, 最小值为 0.511, 最大值为 0.794, 各代桉树人工林平均土壤综合肥力指数排序为: S>

F>T。把 IFI 与树高进行线性拟合 (图 2), 拟合得到的直线表达式见式 (2), 决定系数为 0.726, 表明土壤肥力指数与树高呈正相关关系, 同时也说明 IFI 能够真实地反映土壤状况且具有显著的生物学意义。

表 5 土壤综合肥力质量显著性比较
Table 5 Significant comparison of soil comprehensive fertility quality

代数	样地编号	IFI	IFI均值
F	1	0.671	0.642±0.11 ^b
	2	0.616	
	3	0.631	
	4	0.752	
	5	0.651	
	6	0.532	
S	7	0.784	0.785±0.05 ^a
	8	0.788	
	9	0.768	
	10	0.783	
	11	0.790	
	12	0.794	
T	13	0.566	0.566±0.158 ^c
	14	0.571	
	15	0.408	
	16	0.724	
	17	0.617	
	18	0.511	

注：同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

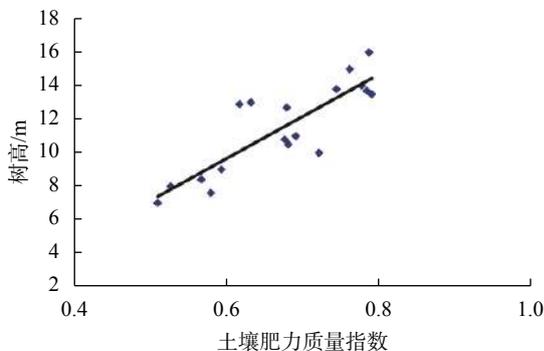


图 2 土壤质量与树高的关系

Fig. 2 Relationship between soil quality index and tree height

$$y = 25.324x - 5.5313 \quad (R^2 = 0.726) \quad (2)$$

式中： y 表示树高 (m)， x 表示 IFI 值， R^2 表示决定系数。

4 结论与讨论

本研究结果表明，桂北地区不同代尾叶桉人工林土壤理化性质总体表现出 S 林最优，F 林次之，T 林最差的特点。其中土壤容重、毛管孔隙度、土壤通气度等土壤物理指标随着尾叶桉的连

栽存在显著差异 ($P<0.05$)，受连栽影响土壤容重变大，土壤孔隙度变小，土壤通气性能变弱，表明桉树三代连栽使土壤变得较紧实、持水性能下降，结论与黄影霞等^[23-24]的研究结果一致。在 S 林至 T 林的连栽过程中，土壤化学性质除全磷含量外，氮、磷、钾、有机质、微量元素含量均显著下降。但有机质含量随着连栽代数的增加呈现先增加后降低的趋势，T 林有机质含量显著降低 ($P<0.05$)，此结果与杨尚东等^[25]的研究结果一致。这主要是由于炼山将地面上大的植物体进入土壤表层，增加了土壤表层有机质含量，使 F 林土壤有机质含量增加；还可能是由于炼山使表土层失去植被覆盖，容易引起水土流失从而导致有机质含量的下降。S 林表层土壤中的氮、磷、钾含量均不同程度高于 T 林与 F 林，说明林地土壤氮、磷、钾的变化规律与有机质一致，与农田土壤中变化规律相似^[26]。各代之间全钾含量存在显著性差异 ($P<0.05$)，其中 S 林比 F 林高 56.78%，表明在生长过程中钾元素流失严重。结合桉树连栽产量下降分析，认为桉树连栽中土壤有效磷含量降低可能制约桉树生长，结论与许宇星等^[27]的研究一致。不同代桉树人工林土壤中硼元素随种植年限逐渐降低，这与钟继红等^[28]的观测结果相符。

通过主成分分析及相关性分析，确定了毛管孔隙度、有机质含量、全磷含量、有效磷含量、速效钾含量、有效硼含量、有效钙含量、有效锌含量 8 个指标为桂北区桉树人工林土壤肥力质量评价的最小数据集。结果表明，这 8 个指标能够真实地反映土壤肥力质量状况而且具有显著的生物学意义，说明在对不同代森林土壤肥力质量进行差异分析时选用的指标不是越多越好，评价指标过多反而可能会使土壤肥力质量的某些特性被掩盖，并不利于土壤肥力质量评价^[29]。本研究筛选出的指标能够解释较多的土壤肥力质量信息，有机质是土壤肥力质量评价中不可或缺的指标，对土壤的养分保持、蓄水持水等起着至关重要的影响，直接影响桉树人工林的生态作用；桉树的生长与土壤中有效磷、速效钾的含量密切相关，一般作为土壤评价中的重要指标被选择。因此，在实际的土壤肥力质量评价中应结合现实情况进行灵活选择，利用有限的指标和数据达到最接近真实的结果。

利用确定的 8 个指标进行连栽桉树人工林土壤肥力质量评价，可知桉树 F 林、S 林和 T 林平

均土壤综合肥力指数排序为： $S>F>T$ 。目前，影响土壤肥力质量评价的主客观因素较多，不同的方法对评价结果也会产生一定影响，业界也没有统一的标准，采用权重和指标评分可以得到理想的土壤肥力质量评价结果，因此土壤质量指数法是评价桉树人工林土壤肥力质量的有效工具^[30]。按照全国第二次土壤普查养分分级标准统计其分级情况^[31]，研究区采集土壤的肥力质量大部分为良好肥力水平。桉树人工林 S 与 F 土壤显著好于 T ($P<0.05$)，随着代数的增加，F 林砍伐后，林地通过枯枝落叶等方式归还大量养分，从而使 S 林土壤养分有所提高。此结果与邓富春等^[7]采用灰色关联度分析土壤肥力质量得出的结果较为一致。S 林土壤肥力质量好于 F 林，只能说明连栽造成林地地力下降的现象需要一定的作用时间，当到 T 林的时候这种作用被凸显出来。T 林土壤肥力质量下降，导致其树高和胸径生长远不如 S 林和 F 林。因此，桉树人工林连栽连作是导致土壤肥力下降的主要原因。

桉树属速生树种，对养分供应需求较大，连栽连作会导致土壤肥力下降。本研究发现桂北地区尾叶桉人工林连栽连作使得土壤肥力质量总体呈下降趋势，特别是 T 连栽连作后土壤大部分养分元素含量降低，其中土壤有机质、全磷、有效硼、有效磷、速效钾、有效钙、有效镁、有效锌含量显著下降 ($P<0.05$)。土壤养分下降、失衡会导致桉树生长不良，研究区第二代桉树人工林土壤肥力质量最高，桉树长势最好，其次是 F 林，T 林土壤肥力质量最低，生长远不如 S 林和 F 林。其中研究区第三代桉树人工林土壤中磷和硼的含量平均值要低于 F 林 20.0% 和 61.6%，下降速度较快，与臧国长等^[32]在其他地区的研究结论一致。因此，对第二代及以后的桉树人工林需要采取一些补肥措施，对土壤缺失元素进行补充。一般应在无机肥施用基础上适当加入有机肥和菌肥，尤其应注重在连栽中对磷肥和硼肥等桉树土壤中较为缺乏的元素适当予以补充^[33]。在桉树多代林中，土壤综合肥力系数呈现第二代林增大、第三代林下降的趋势，所以在第二代经营后期适度增加肥料施用量最为重要。在实际的生产活动中，应考虑到桉树在连栽连作三代之后土壤养分不足以及利用低效等问题，第三代林采伐时应充分考虑如何保持土壤养分和维护生态系统养分循环的问题，对采伐剩余物要分散堆放在林地中或者粉碎后均匀撒入林地，从而达到桉树速生

丰产和可持续经营的目的。

致谢：感谢中南林业科技大学国家教育部经济林培育和保护重点实验室的全体工作人员提供数据测定方面的帮助，感谢大桂山林场的所有工作人员对取样调查给予的协助。

[参 考 文 献]

- [1] 姜仲翔, 杨士东. 桉树栽植的生态问题及其对策探讨 [J]. 南方农业, 2017, 11(3): 52-53.
- [2] 林卡, 李德成, 张甘霖. 土壤质量评价中文文献分析 [J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 736-744.
- [3] 潘会彪, 邓明辉, 黄庆一, 等. 基于空间分析的桉树人工林土壤肥力评价 [J]. 西部林业科学, 2018, 47(3): 72-77.
- [4] 黄国勤, 赵其国. 广西桉树种植的历史、现状、生态问题及应对策略 [J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5142-5152.
- [5] 谢耀坚. 真实的桉树 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [6] 覃祚玉, 蒋雪刚, 唐健, 等. 广西黄冕林场桉树萌芽林土壤肥力变化分析 [J]. 南方农业学报, 2014, 45(3): 429-433.
- [7] 邓富春, 覃其云, 颜权, 等. 桉树人工林土壤肥力变化及其综合评价 [J]. 广西林业科学, 2013, 42(2): 148-152.
- [8] 庞海恩. 广西钦廉林场巨尾桉和红椎人工林对林下植物物种多样性影响的比较研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [9] 赵从举, 吴喆滢, 康慕谊, 等. 海南西部桉树人工林土壤水分变化特征及其对林龄的响应 [J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1734-1742.
- [10] Abdelmigid H M, Morsi M M. Cytotoxic and molecular impacts of allelopathic effects of leaf residues of *Eucalyptus globulus* on soybean (*Glycine max*) [J]. Journal of Genetic Engineering and Biotechnology, 2017, 15(2): 297-302.
- [11] 王纪杰, 王炳南, 李宝福, 等. 不同林龄巨尾桉人工林土壤养分变化 [J]. 森林与环境学报, 2016, 36(1): 8-14.
- [12] Araújo A S F, Silva E F L, Nunes L A P L, et al. The effect of converting tropical native savanna to *Eucalyptus grandis* forest on soil microbial biomass [J]. Land Degradation & Development, 2010, 21(6): 540-545.
- [13] Gee G W, Bauder J W. Particle-size analysis. In: Klute,

- A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods* [M]. Madison: American Society of Agronomy, 1986: 383–411.
- [14] Rayment G, Higginson F R. *Australian Laboratory Handbook of Soil and Water Chemical Methods* [M]. Melbourne: Inkata Press, 1992.
- [15] Nelson D, Sommers L E. Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. *Methods of Soil Analysis, 1982. Part 2 Chemical and Microbiological Properties* [M]. Madison: Soil Science Society of America, 2002: 539–579.
- [16] Tsiknia M, Tzanakakis V A, Oikonomidis D, et al. Effects of olive mill wastewater on soil carbon and nitrogen cycling [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2014, 98(6): 2739–2749.
- [17] Ojekanmi A A, Chang S X. Soil quality assessment for peat-mineral mix cover soil used in oil sands reclamation [J]. *J Environ Qual*, 2014, 43(5): 1566–1575.
- [18] Yanu P, Jakmunee J. Flow injection with in-line reduction column and conductometric detection for determination of total inorganic nitrogen in soil [J]. *Talanta*, 2015, 144: 263–267.
- [19] Bond C R, Maguire R O, Havlin J L. Change in soluble phosphorus in soils following fertilization is dependent on initial Mehlich-3 phosphorus [J]. *J Environ Qual*, 2006, 35(5): 1818–1824.
- [20] Daniels M B, Delaune P, Moore P A Jr, et al. Soil phosphorus variability in pastures: implications for sampling and environmental management strategies [J]. *J Environ Qual*, 2001, 30(6): 2157–2165.
- [21] 张润楚. 多元统计分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [22] Mastro R E, Chhonkar P K, Singh D, et al. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India [J]. *Environ Monit Assess*, 2008, 136(1/3): 419–435.
- [23] 黄影霞, 张凤梅, 黄承标. 马尾松改植桉树后对土壤物理性质的影响 [J]. *现代农业科技*, 2013(17): 236–237, 240.
- [24] Temesgen D, Gonzálo J, Turrión M B. Effects of short-rotation Eucalyptus plantations on soil quality attributes in highly acidic soils of the central highlands of Ethiopia [J]. *Soil Use and Management*, 2016, 32(2): 210–219.
- [25] 杨尚东, 吴俊, 谭宏伟, 等. 红壤区桉树人工林炼山后土壤肥力变化及其生态评价 [J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7788–7797.
- [26] 梁涛. 基于土壤基础地力的施肥推荐研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [27] 许宇星, 王志超, 竹万宽, 等. 不同品种桉树林生活叶凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征 [J]. *西北农林科技大学学报*, 2018, 3(3): 94–100.
- [28] 钟继洪, 骆伯胜. 短轮伐林地土壤肥力的数值化综合评价 [J]. *土壤与作物*, 2003, 19(1): 75–77.
- [29] 韩捷. 土壤质量指标和评价方法 [J]. *北京农业*, 2016(4): 162–163.
- [30] 朱婧, 袁海, 程科, 等. 土壤质量评价方法的概述 [J]. *科技创新与应用*, 2018(11): 124–125.
- [31] 李孔生, 周保彪, 陈马兴, 等. 雷州半岛桉树林地土壤肥力综合评价 [J]. *桉树科技*, 2014, 31(4): 27–31.
- [32] 臧国长, 马祥庆, 吴鹏飞, 等. 闽南不同桉树种植区土壤肥力比较 [J]. *西南林业大学学报*, 2013, 33(2): 6–9, 14.
- [33] 杨晓慧, 廖焕琴, 刘德浩, 等. 不同有机肥对尾叶桉生长的影响 [J]. *林业与环境科学*, 2018, 34(1): 21–25.

(责任编辑 陆 驰)

