浙 江 林 业 科 技，2021，41（5）：8 – 14
J Zhejiang For Sci Technol

doi:10.3969/j.issn.1001-3776.2021.05.002

基于主成分分析和模糊数学法的桉树人工林土壤肥力质量评价

覃祚玉[1,2,3]，曹继钊[1,2,3]，唐健[1,2,3]，邓小军[1,2,3]，潘波[1,2,3]，宋贤冲[1,2,3]

（1. 广西林业科学研究院，广西　南宁　530002；2. 国家林业局中南速生材繁育实验室，广西　南宁　530002；
3. 广西优良用材林资源培育重点实验室，广西　南宁　530002）

摘要：2017 年 11—12 月，对广西林业沃土工程 8 个试点单位的 1 ~ 2 年生桉树 *Eucalyptus* 人工林的 270 个土壤样品进行了土壤 pH 和 14 种养分指标测定，并结合主成分分析、聚类分析及模糊数学隶属度函数法，对广西桉树人工林土壤肥力质量进行综合评价。结果表明，广西桉树人工林土壤均为酸性土壤，土壤中的交换性钙含量较为丰富，土壤有机质、全氮、全钾、碱解氮、交换性镁、有效铜、有效锌、有效硼、有效锰含量适中，全磷、有效磷、速效钾、有效铁处于贫乏水平，其中土壤有机质、碱解氮、有效磷、有效硼、有效铁、速效钾为土壤肥力的主要影响因子。采用系统聚类法将土壤肥力综合指标值（*IFI*）划分为 I 级（优）、II 级（良）、III 级（中等）、IV 级（较差）、V 级（差）5 个等级，广西桉树人工林土壤肥力综合指数范围为 0.160 ~ 0.678，土壤肥力总体属于中等偏低水平，属于优良以上（优、良）水平仅有 15.5%。8 个试点单位的土壤肥力质量以较差（IV）等级为主，中等（III）、差（V）等级次之。根据评价结果，建议低肥力土壤林地需增施有机肥，适量补充氮磷钾肥，并有针对性添加铁肥和硼肥。

关键词：土壤肥力评价；模糊统计；主成分分析；聚类分析；桉树人工林；广西

中图分类号：S714.8　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-3776（2021）05-0008-07

Assessment of Soil Fertility in *Eucalyptus* Plantation in Guangxi by Principal Component Analysis and Fuzzy Mathematics

QIN Zuo-yu[1,2,3]，CAO Ji-zhao[1,2,3]，TANG Jian[1,2,3]，DENG Xiao-jun[1,2,3]，PAN Bo[1,2,3]，SONG Xian-chong[1,2,3]

（1. Guangxi Zhuang Autonomous Region Forestry Research Institute, Nanning 530002, China; 2. Key Laboratory of Central South Fast-growing Timber Cultivation of State Forestry Administration, Nanning 530002, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Tree Resource Cultivation, Nanning 530002, China）

Abstract: From November to December 2017, 270 soil samples were collected under *Eucalyptus* plantation from eight forest farms, Guangxi Zhuang Autonomous Region. Soil pH and 14 soil fertility indicators were determined and comprehensive evaluation of the soil fertility for *Eucalyptus* plantation was carried out by the methods of principal component analysis and fuzzy mathematics. The results showed that *Eucalyptus* plantation soil showed acid, rich in exchangeable Ca content. Contents of soil organic matter, total N, total K, alkali-hydrolyzable N, exchangeable Mg, available Cu, available B and available Zn were at medium level, while that of soil total P, available P, available K and available Fe contents were insufficient. Contents of soil organic matter, alkali-hydrolyzable N, available P, available K, available Fe and available B contents were the main factors affecting the soil fertility. According to integrated fertility index, the soil fertility of *Eucalyptus* plantation from eight forest farms was 0.160-0.678, dominated by grade IV, followed by grade III and V.

Key words: soil fertility evaluation; fuzzy mathematics; principal component analysis; cluster analysis; *Eucalyptus* plantations; Guangxi

收稿日期：2020-04-24；**修回日期**：2021-08-07

基金项目：广西创新驱动发展专项资金项目课题（桂科 AA17204087-11）；广西科技基地和人才专项（桂科 AD17129051）；广西林业科技推广示范项目（gl2017kt15）

作者简介：覃祚玉，硕士，工程师，从事植物营养与土壤肥料研究；E-mail:474050475@qq.com。通信作者：唐健，博士，教授高级工程师，从事植物营养与土壤肥料研究；E-mail:21712104@qq.com。

桉树 *Eucalyptus* 是南方国家储备林的重要树种，是广西主要用材树种，在缓解我国木材供需矛盾、维护国家木材安全、增加森林碳汇、应对气候变化方面具有突出贡献[1]。目前，广西桉树种植面积达 256 万 hm^2，其桉树木材供给量约占全国木材供给量的 1/3，面积和产量均居全国前列。然而，由于桉树速生丰产和人为不科学经营所带来的土壤退化和木材单位产量下降问题也日益突出。土壤是木材生产的基础，其质量的好坏直接影响到桉树产量及其可持续经营，其中土壤肥力是土壤的本质属性，因此，掌握其土壤养分贫瘠化状况是桉树人工林土壤“提质”的重要前提，对实现林地可持续利用具有重要意义。从 2017 年开始，广西通过测土配方、增施有机肥、免炼山整地等沃土技术措施率先在全区 18 个单位（涉及 8 个市的 11 个贫困县和 7 家区直林场）的商品用材林地和经济林开展“林业沃土工程”，建设规模为 1.293 万 hm^2，其中桉树沃土示范林建设 6 388 hm^2，涉及 8 个试点单位（上思县平广林场、东门林场、博白林场、玉林市福绵区大义林场、大桂山林场、六万林场、黄冕林场、雅长林场）。

目前，应用在桉树人工林地土壤肥力评价方法有很多，其中应用较为广泛的为灰色关联度法[2-3]、主成分分析[4-5]和内梅罗指数[6-7]等方法。土壤肥力评价的科学性基于其评价过程的科学性，主要包括土壤样品的采集、评价单元和评价尺度的选择、评价指标以及评价方法的选择，每一个过程均对评价结果的准确度造成影响[8]。近年来，随着数值化评价方法的提出及多元统计分析方法和模糊数学方法等[9-11]的广泛应用，土壤肥力综合评价也日趋定量化和标准化，其评价结果也更客观、更切合实际。本文以广西 2017 年林业沃土工程 8 家试点单位的桉树人工林地为研究区域，采用主成分分析、聚类分析法结合模糊数学方法全面地对广西桉树人工林地的土壤肥力质量进行综合评价，摸清广西桉树人工林土壤肥力现状，为桉树人工林地力退化防治和桉树人工林的科学经营提供依据。

1　材料与方法

1.1　土壤样品采集与分析

2017 年 11—12 月，采集广西上思县平广林场、东门林场、博白林场、玉林市福绵区大义林场、大桂山林场、六万林场、黄冕林场、雅长林场 1 ~ 2 年生桉树人工林的土壤。根据桉树种植情况，成片性好的林地每 5 ~ 20 hm^2 为一取样点，较为分散林地每 1 ~ 5 hm^2 为一取样点，共采集具有代表性的土样 270 个，覆盖面积有 6 388 hm^2，其中萌芽林有 5 773 hm^2，新造林有 616 hm^2，各采样区的基本情况见表 1。每个样点按 S 形采集 0 ~ 40 cm 层土壤，将采集的 10 ~ 15 个采样点的土壤用四分法混合成一个样品，去除石砾和植物根系后，风干，获得待测土壤样品，用于测定土壤 pH 和有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、全氮、全磷、全钾、交换性钙、交换性镁、有效铜、有效锌、有效硼、有效铁、有效锰含量等养分指标，各指标参照《中华人民共和国林业行业标准 LY/T—1999》进行测定，3 次重复，结果取均值。

表 1　采样区基本情况
Table 1　Information on sampling sites

采样地点	经纬度	海拔/m	坡度/（°）	坡位	采样点数量/个
上思县平广林场	107°39′14″ ~ 108°02′47″E，22°07′10″ ~ 22°16′52″N	198 ~ 643	15 ~ 40	上坡、中坡、下坡	54
东门林场	107°45′25″ ~ 107°47′34″E，22°19′26″ ~ 22°20′37″N	160 ~ 183	15 ~ 30	全坡	12
博白林场	101°01′24″ ~ 110°07′50″E，21°56′51″ ~ 22°18′01″N	91.5 ~ 332	10 ~ 25	上坡、中坡、下坡	21
玉林市福绵区大义林	110°05′42″ ~ 110°09′29″E，22°21′03″ ~ 22°24′15″N	116 ~ 210	15 ~ 35	上坡、中坡、下坡	15
大桂山林场	109°37′03″ ~ 111°53′09″E，23°57′56″ ~ 24°33′22″N	160 ~ 183	15 ~ 30	上坡、中坡、下坡	24
六万林场	109°54′50″ ~ 110°56′23″E，22°26′21″ ~ 23°28′03″N	150 ~ 450	20 ~ 30	上坡、中坡、下坡	18
黄冕林场	108°47′36″ ~ 109°92′40″E，24°39′31″ ~ 24°68′48″N	155 ~ 464	15 ~ 30	上坡、中坡、下坡	30
雅长林场	104°44′32″ ~ 107°01′16″E，23°11′48″ ~ 24°07′09″N	104 ~ 1 088	20 ~ 40	上坡、中坡、下坡	96

1.2　土壤肥力模糊综合评价

1.2.1 评价指标的选择 本文选取土壤 pH 和土壤有机质、碱解 N、有效 P、速效 K、全 N、全 P、全 K 含量、交换性 Ca、交换性 Mg、有效 Cu、有效 Zn、有效 B、有效 Fe、有效 Mn 含量共 15 项指标作为土壤肥力质量的评价指标，利用主成分分析法和模糊数学方法，对广西桉树人工林林地土壤肥力进行综合评价。土壤肥力评价指标的影响程度用隶属度函数来表示。

1.2.2 评价指标的数值化 土壤肥力评价指标对林地土壤综合肥力的影响程度及其量纲不一，需对各项指标值进行数值化处理，建立各评价指标的隶属度函数，常用的隶属函数有两类：S 型和抛物线型，其隶属函数形式分别见公式（1）和公式（2）。根据前人的研究[12-14]结果，土壤有机质、全 N、全 P、全 K、碱解 N、速效 P、速效 K、交换性 Ca、交换性 Mg、有效 Cu、有效 Zn、有效 B、有效 Fe、有效 Mn 含量属于 S 型隶属度函数，而 pH 值属于抛物线型隶属度函数。

$$U_{(x)}=\begin{cases}1.0 & x\geq d\\ 0.9\times\frac{(x-a)}{(b-a)} & a\leq x<d\\ 0.1 & x\leq a\end{cases} \quad (1)$$

$$U_{(x)}=\begin{cases}0.1 & x\leq a, x\geq d\\ 0.9\times\frac{(x-a)}{(b-a)}+0.1 & a<x\leq \mathrm{b}\\ 1.0 & b<x\leq \mathrm{c}\\ 1-0.9\times\frac{(d-x)}{(d-c)} & c<x<\mathrm{d}\end{cases} \quad (2)$$

式中，$U_{(x)}$为评价指标隶属度值，x 为评价指标实测值；a 为隶属函数下限值；b、c 为隶属函数最优值；d 为隶属函数上限值。隶属函数转折点取值（表 2）参考前人研究成果[15-17]并结合研究区实际土壤性质状况进行确定。

表 2 隶属函数曲线中评价指标的转折点取值

Table 2 Turning point in membership function for evaluating indicators

评价因子	隶属函数模型	转折点 a	转折点 b	转折点 c	转折点 d
pH 值	抛物线型	4	4.8	5.5	6.5
有机质含量	S 型	10	30	–	–
全 N 含量		0.8	2	–	–
全 P 含量		0.2	1	–	–
全 K 含量		5	25	–	–
碱解 N 含量		60	120	–	–
有效 P 含量		1	20	–	–
速效 K 含量		50	150	–	–
交换性 Ca 含量		50	150	–	–
交换性 Mg 含量		20	80	–	–
有效 Cu 含量		0.2	1	–	–
有效 Zn 含量		0.5	1	–	–
有效 B 含量		0.2	1	–	–
有效 Fe 含量		4.5	100	–	–
有效 Mn 含量		1.0	10	–	–

1.2.3 权重的确定 由于土壤肥力各评价指标对土壤综合肥力的贡献率不同，在土壤综合评价中往往需要对各项评价指标赋予一定的权重系数。在前人的研究中，普遍采用因子分析法、专家打分法、聚类分析法、主成分分析法、灰色关联度法、层次分析等方法确定权重系数[18-21]。为避免人为主观因素影响，本研究采用主成分分析法来确定各指标的权重。

1.2.4 土壤肥力质量综合指标值的确定 本文采用加权求和法按照公式（3）计算出土壤肥力质量综合指标值（integrated fertility index，*IFI*）：

$$IFI=\sum_{i=1}^{n}W_i\mu_i \quad (3)$$

式中，W_i、μ_i 分别表示第 i 种养分指标的隶属度值和权重系数。

1.3 数据处理

采用 Excel 软件对试验数据进行统计分析；使用 SPSS 19.0 软件对检测数据进行描述性统计、因子分析，确定权重；采用系统聚类分析法划分综合肥力指标值等级。

2 结果与分析

2.1 桉树人工林地土壤性状描述性统计

变异系数（*CV*）代表观察值的离散程度或变异程度，通常认为，*CV*≤10%时为弱变异性，10% < *CV* < 100%时为中等变异性，*CV*≥100%时为强变异性[22]。由表 3 可知，广西桉树人工林地土壤 pH 值在 4.04 ~ 6.72 之间，*CV* 为 10.39%，在 15 项指标中的变异程度最小，土壤呈现强酸性到中性特征，说明桉树适宜在酸性土壤中生长且适应性较广；土壤大量元素含量中的全 N、全 P、全 K、碱解 N、速效 K 含量的 *CV* 介于 37.56% ~ 79.05%之间，属于中度变异程度，而有效 P 含量的 *CV* 则高达 418.85%，为强变异性。桉树人工林土壤中微量元素含量变异程度不一，土壤交换性 Ca 和交换性 Mg 含量属于强变异性，其 *CV* 均超过 190%；微量元素含量中变异较大的为有效 Fe 含量，其 *CV* 为 181.10%，其次是有效 B 和有效 Mn 含量，其 *CV* 分别为 146.64%和 139.26%，三者均为较强变异性，而有效 Cu 和有效 Zn 含量的变异强度不大，属于中等变异性。

表 3　土壤属性的统计特征值

Table 3　Statistical characteristics of soil fertility factors

指标	均值	范围	标准差	*CV*/%	偏度	峰度
pH 值	4.68	4.04 ~ 6.72	0.49	10.39	1.48	2.76
有机质/（g·kg^{-1}）	19.57	3.92 ~ 48.06	10.92	55.79	1.00	0.43
全 N/（g·kg^{-1}）	1.05	0.35 ~ 2.12	0.40	37.56	0.38	– 0.44
全 P/（g·kg^{-1}）	0.32	0.05 ~ 1.39	0.17	54.40	2.99	15.63
全 K/（g·kg^{-1}）	14.89	1.32 ~ 37.71	7.13	47.84	0.45	0.95
碱解 N/（mg·kg^{-1}）	90.45	30.90 ~ 291.40	41.11	45.46	1.74	5.30
有效 P/（mg·kg^{-1}）	3.69	0.10 ~ 145.50	15.47	418.85	8.87	81.69
速效 K/（mg·kg^{-1}）	48.97	1.10 ~ 206.70	38.71	79.05	1.89	4.29
交换性 Ca/（mg·kg^{-1}）	193.87	8.70 ~ 507.80	574.31	296.24	6.88	53.26
交换性 Mg/（mg·kg^{-1}）	26.06	1.20 ~ 324.40	51.52	197.66	3.84	16.56
有效 Cu/（mg·kg^{-1}）	0.58	0.02 ~ 2.08	0.41	70.32	1.49	2.53
有效 Zn/（mg·kg^{-1}）	0.80	0.17 ~ 4.06	0.76	96.11	2.42	6.15
有效 B/（mg·kg^{-1}）	0.39	0.17 ~ 1.50	0.18	146.64	2.78	14.15
有效 Fe/（mg·kg^{-1}）	19.24	0.46 ~ 85.14	15.61	181.10	2.12	5.53
有效 Mn/（mg·kg^{-1}）	1.77	0.02 ~ 13.69	2.46	139.26	3.01	9.90

2.2　桉树人工林土壤肥力质量综合评价

2.2.1　*肥力评价指标权重的确定*　对 15 项指标进行因子分析，并确定各土壤评价指标的权重（表 4）。

表 4　土壤属性主成分因子载荷矩阵和因子权重

Table 4　Factor loadings matrix and weight of soil fertility factors by principal component analysis

指标	分组	主成分					权重
		PC-1	PC-2	PC-3	PC-4	PC-5	
有机质含量	1	0.858	– 0.101	0.240	0.107	0.164	0.095
全 N 含量	1	0.903	0.062	0.056	0.126	0.225	0.103
碱解 N 含量	1	0.737	– 0.085	0.298	0.328	0.016	0.080
有效 B 含量	1	0.877	– 0.133	0.325	0.238	– 0.080	0.083
有效 Fe 含量	1	0.700	– 0.040	0.513	– 0.025	– 0.237	0.079
pH 值	2	– 0.204	0.851	– 0.063	– 0.175	0.446	0.078
全 K 含量	2	0.171	0.466	– 0.273	– 0.203	0.049	0.037
有效 P 含量	2	– 0.185	0.793	0.079	– 0.001	0.315	0.077
速效 K 含量	2	0.160	0.569	0.021	0.366	0.155	0.073
交换性 Ca 含量	3	0.102	0.110	0.503	– 0.301	0.088	0.060
交换性 Mg 含量	3	0.080	0.027	0.642	0.115	0.048	0.059
有效 Zn 含量	3	0.104	0.058	0.574	0.050	0.086	0.061
全 P 含量	4	0.113	0.150	– 0.047	0.822	0.174	0.031
有效 Mn 含量	4	– 0.003	– 0.064	0.308	0.801	0.094	0.023
有效 Cu 含量	5	0.129	0.016	0.106	0.039	0.622	0.062
主成分特征值		3.989	2.731	1.751	1.602	1.213	
主成分贡献率/%		26.595	18.210	11.674	10.683	8.086	
主成分累计贡献率/%		26.595	44.805	56.479	67.162	75.248	

由表 4 可知，特征值大于 1 的主成分（PC）共有 5 个，其累计贡献率达到 75.248%，说明这 5 个主成分基本上可以反映广西桉树人工林土壤肥力质量的主要影响因素。第 1 主成分由土壤有机质、全 N、碱解 N、有效 B、有效 Fe 含量构成，贡献率达到 26.595%；第二主成分由 pH 值和全 K、有效 P、速效 K 含量 4 项土壤因子构成，大致反映了土壤大量元素的速效养分特征。土壤全量养分、速效养分含量分别反映土壤养分的供应容量和供应强度，而土壤有机质含量则是土壤综合肥力的重要反映指标。因此，第 1、第 2 主成分实质上是土壤生境、土壤养分供应容量和供应强度的综合反映，可概括为土壤保肥、供肥因子和土壤活性因子。

2.2.2 土壤综合肥力指标值计算 根据肥力指标隶属函数公式计算出各指标的隶属度，通过雷达图可以更清晰、完整和直观判断各肥力指标的状态。图 1 为不同区域桉树人工林地各土壤肥力指标所对应的隶属度均值雷达图，隶属度均值越大表示该项指标的肥力水平越高。从整体上看，桉树人工林地土壤中 pH 值和有效 Zn、有效 Cu、交换性 Ca、全量 N、碱解 N 含量的隶属度值较大，而土壤中速效 K 和有效 P 含量的隶属度值均最低，是影响林地土壤肥力的主要限制因子。对土壤肥力综合指标值与影响土壤肥力的 15 个指标进行相关分析得出：土壤肥力综合指标值与土壤有机质、全 N、有效 P、速效 K、有效 Fe 及有效 B 含量呈极显著正相关，与有效 Mn、交换性 Mg 含量呈显著正相关，与 pH 值呈显著负相关。影响广西桉树人工林土壤肥力相关系数大小依次为：有机质含量（0.662）＞碱解 N 含量（0.614）＞有效 P 含量（0.556）＞有效 B 含量（0.517）＞有效 Fe 含量（0.496）＞速效 K 含量（0.458）＞交换性 Mg 含量（0.351）。因此，在桉树生产经营过程中应注重增施有机肥，及时补充 P、K 肥和 B、Fe 元素，并通过有效的沃土措施，提高林地养分供应容量和元素有效成分。

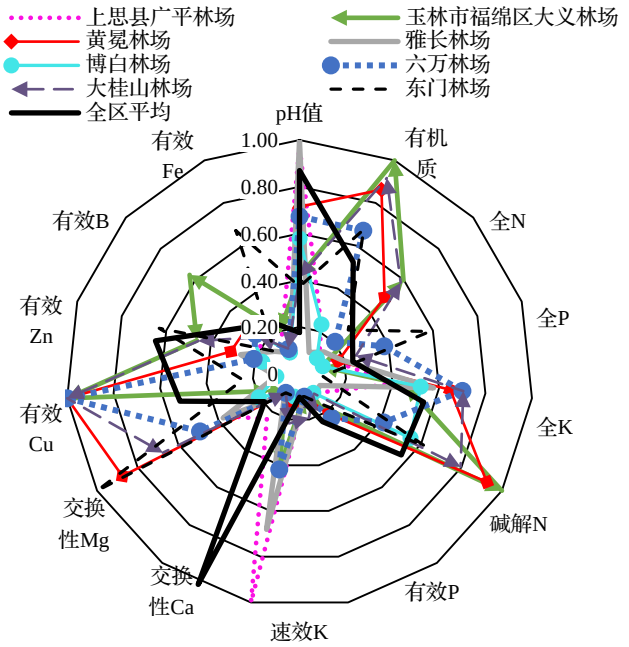


图 1 各土壤肥力指标平均隶属度雷达图

Figure 1 Radar map of average membership degree of soil fertility factors

IFI 的大小表示土壤养分综合肥力等级，可以全面反映某一林地的土壤养分状况。根据公式（3）计算得出各土壤样品的 *IFI*。对 270 个样点的土壤 *IFI* 进行描述性统计与单一样本 K-S 检验，结果见表 5。

表 5 广西桉树人工林土壤肥力综合评价标准及评价结果

Table 5 Comprehensive evaluation standard and result of soil fertility in *Eucalyptus* plantations

种植区		*IFI* 均值	肥力等级	*IFI*	标准差	*CV*/%	偏度	峰度
桂西南	上思县平广林场	0.278	Ⅴ	0.164 ~ 0.488	0.111	251.49	0.599	– 0.823
	东门林场	0.387	Ⅳ	0.303 ~ 0.458	0.465	83.15	– 0.543	0.635
桂东南	博白林场	0.254	Ⅴ	0.160 ~ 0.362	0.297	85.65	0.347	– 2.729
	玉林市福绵区大义林场	0.501	Ⅲ	0.356 ~ 0.573	0.491	102.10	– 1.323	0.949
	六万林场	0.358	Ⅳ	0.233 ~ 0.535	0.431	83.04	0.715	– 0.669
桂东	大桂山林场	0.460	Ⅲ	0.358 ~ 0.558	0.568	80.96	– 0.292	– 0.734
桂中	黄冕林场	0.388	Ⅳ	0.245 ~ 0.576	0.412	94.28	0.496	– 0.715
桂北	雅长林场	0.366	Ⅳ	0.178 ~ 0.687	0.115	318.95	0.663	– 0.568
全区平均		0.358	Ⅳ	0.160 ~ 0.687	0.133	269.78	0.328	– 0.732

由表 5 结果表明，广西桉树人工林土壤 *IFI* 变幅在 0.160 ~ 0.687，处于较差等级，平均值为 0.358，标准差为 0.133，*CV* 为 269.78%，*IFI* 属于强度变异性，并服从正态分布。国有林场（除雅长林场外）的 *IFI* 的 *CV* 在

80.96%～94.28%，属于中度变异性，这与林场林地比较集中，林地基础肥力差异小，经营措施一致有关，而市县林场和雅长林场林地土壤 *IFI* 的 *CV* 均大于 100%，这与县级林场和雅长林场桉树人工林为场外造林，林地分散且基础地力差异性较大有关。不同种植区的桉树人工林地土壤肥力不同，其肥力由大到小的次序为：玉林市福绵区大义林场＞大桂山林场＞黄冕林场＞东门林场＞雅长林场＞六万林场＞上思县平广林场＞博白林场。总的来说，广西桉树人工林地土壤肥力东部较西部好，南部较北部好。这种土壤肥力分布与广西实际地形地貌等自然条件相对应，广西东部和南部大多为低山及丘陵，土壤类型主要为红壤、砖红壤，而广西北部和西部林地海拔较高，土壤类型主要为石灰岩土、红壤、砖红壤。

2.2.3　土壤肥力水平等级的划分　为了避免人为干扰及等距划分等级带来的误差，本研究采用系统聚类分析法将计算出的土壤 *IFI* 划分为 5 个等级：Ⅰ级为优（*IFI*＞0.610），Ⅱ级为良（*IFI*＞0.510～0.610），Ⅲ级为中（*IFI*＞0.400～0.510），Ⅳ级为较差（*IFI*＞0.300～0.400），Ⅴ级为差（*IFI*≤0.300）。由图 2 可以看出，广西桉树人工林土壤肥力从Ⅴ级到Ⅰ级的样品呈阶梯状逐级递减，分别占总样品的 33.3%、27.8%、23.3%、12.2%和 3.3%，桉树人工林地土壤肥力等级处于中等以下的占总样品的 84.4%，Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ级三个等级所占面积较为均衡，约占总面积的 25%。桉树人工林在长期高强度、不科学的经营管理下，土壤退化严重，本研究调查的 8 个研究区中仅有雅长林场的少数土壤位点的土壤质量处于优等。上思县平广林场、东门林场、博白林场 3 个林场的桉树人工林土壤质量全部处于中等以下。总的来说，博白林场、上思县平广林场的桉树人工林地土壤肥力为Ⅴ级，东门林场、黄冕林场、雅长林场和六万林场桉树人工林地土壤肥力为Ⅳ级，而大桂山林场和玉林市福绵区大义林场的桉树人工林地土壤肥力则为Ⅲ级。

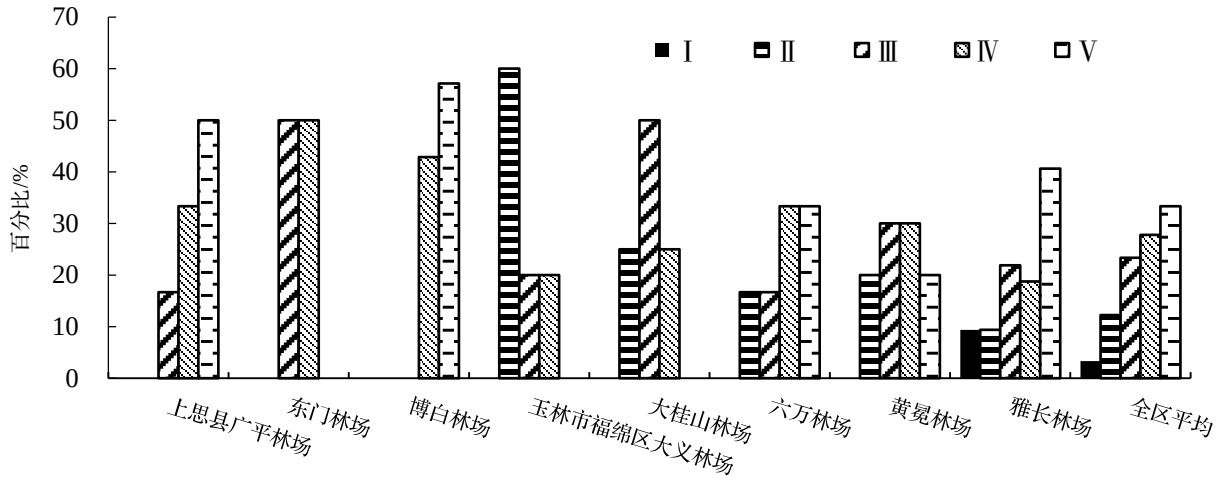


图 2　广西不同种植区桉树人工林土壤质量指数分级分布情况

Figure 2　Distribution of soil fertility grades in different region of *Eucalyptus* plantations in Guangxi

3　结论与讨论

土壤性质描述性统计和单因素肥力评价结果表明，广西桉树人工林土壤均为酸性土壤，土壤中的交换性 Ca 含量较为丰富，土壤有机质、全 N 氮、全 K 钾、碱解 N 氮、交换性镁 Mg、有效铜 Cu、有效 Zn 锌、有效硼 B、有效 Mn 锰含量适中，而全 P 磷、有效 P 磷、速效 K 钾、有效 Fe 铁处于贫乏水平。因此，广西桉树人工林土壤养分缺乏，尤其是 P 元素。这与郑洲翔等和研究结果一致[23]，可能与广西桉树种植区多处于红壤区有关，红壤中可变电荷矿物（Al^{3+}、Fe^{3+}）大量存在，对土壤中 P 元素具有强烈的固持作用[24]，同时土壤的低 pH 值加剧了 P 的固定过程[25]，导致可供植物吸收利用的游离态磷（HPO_4^{2-}、$H_2PO_4^-$）不足。与马涪等 [26]对广西桉树林地的研究结果（桉树土壤微量元素 B、Cu、Zn 较为缺乏，尤其是 B 含量处于极贫状况）相比，本文中桉树人工林土壤 B、Cu、Zn 含量有所提高，处于中等水平，这可能与近几年广西普遍性施肥配方有关，其肥料中注重添加

了 B、Cu、Zn、Fe 等微量元素。

通过主成分分析，广西桉树人工林土壤肥力限制因子为：土壤有机质 > 碱解 N > 有效 P > 有效 B > 有效 Fe > 速效 K。这与冯嘉仪等[6]对华南地区典型桉树林分土壤肥力综合评价结果一致，有机质在桉树人工林土壤肥力中起着最重要的作用，有效 P、速效 K 是影响土壤肥力的限制性因子。建议低肥力土壤林地应增施有机肥，依据适地适树原则，适量补充 N、P、K 肥，针对性添加施用 Fe 肥和 B 肥。目前，我国 80%以上桉树人工林采取短周期连栽方式，轮伐期比世界其他国家普遍要短，一般为 5 ~ 7 a[27]，从而加剧了桉树人工林土壤肥力的下降。合理种植如低代次、低密度、混交林等形式的桉树人工林，可减少土壤破坏，提高土壤有机质含量，提高土壤质量[28]。

广西桉树不同产区土壤肥力差异较大。大多数研究土壤的肥力处于中等偏下水平。模糊综合评价结果表明，不同区域桉树人工林土壤肥力质量由好到差依次为：玉林市福绵区大义林场 > 大桂山林场 > 黄冕林场 > 东门林场 > 雅长林场 > 六万林场 > 上思县平广林场 > 博白林场。广西桉树人工林土壤综合肥力指数为 0.160 ~ 0.687，处于优良水平的土壤仅有 15.5%，土壤肥力质量整体属于较差等级。邓富春等[2]对广西不同林龄的桉树林地肥力调查评价结果表明，桉树人工林土壤肥力整体水平处于较差等级，中龄林至成熟林则处于差等级，而 1 ~ 2 年生的桉树人工林仍处于中等水平。但本文对广西 1 ~ 2 年生桉树人工林土壤综合肥力评价结果表明，目前桉树林地土壤肥力已处于较差等级，土壤退化趋势初显。因此，在桉树生产经营过程中需重视林地地力建设，避免林地土壤进一步的退化，同时要采取一定的沃土保育措施尽快恢复并提高其基本地力和重建生产力，桉树产区土壤肥力提升应侧重于利用当地产生的资源（如有机资源、磷矿）改善土壤有机质、有效磷等参数，以降低成本提高土壤肥力及林地生产力。

参考文献：

[1] 曹继钊，李孝忠. 桉树人工林沃土保育与可持续经营思考[J]. 广西林业科学，2017，46（2）：233 – 236.
[2] 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 – 152，236.
[3] 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.
[4] 叶绍明，温远光，张慧东. 连栽桉树人工林土壤理化性质的主分量分析[J]. 水土保持通报，2010，30（5）：101 – 105.
[5] 吴玉红，田霄鸿，同延安，等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. 生态学杂志，2010，29（1）：173 – 180.
[6] 冯嘉仪，储双双，王婧，等. 华南地区 5 种典型林分类型土壤肥力综合评价[J]. 华南农业大学学报，2018，39（3）：73 – 81.
[7] 唐健，赵隽宇，石媛媛，等. 1990—2015 年广西人工用材林土壤肥力演变特征[J]. 广西林业科学，2020，49（03）：354 – 360.
[8] 邓小军，陈晓龙，唐健，等. 基于 Nemerow 法的森林土壤肥力综合指数评价[J]. 草业学报，2016，25（7）：34 – 41.
[9] 赵隽宇，覃祚玉，石媛媛，等. 25 年长期经营下广西松树人工林土壤养分特征与质量评价[J]. 南方林业科学，2020，48（02）：18 – 22，27.
[10] LI Z W，HUANG J Q，LI Y Y，et al. Assessment on soil fertility of Dongting Lake wetland area (China) based on GIS and fuzzy evaluation[J]. J Centr S Univ Technol，2011，18（5）：1465 – 1472.
[11] RAHMANIPOUR F，MARZAIOLI R，BAHRAMI H A，et al. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran[J]. Ecol Indic，2014，40（5）：19 – 26.
[12] 李楠，郭风民，孙桂琴，等. 郑州市城市园林绿地土壤肥力调查与评价[J]. 河南科学，2017，10（35）：1615 – 1621.
[13] 刘义，何忠俊，陈中坚，等. 三七种植区土壤肥力特征研究与评价[J]. 云南农业大学学报（自然科学），2014，29（2）：262 – 268.
[14] 严珺，孙海，蒋燊，等. 桓仁地区林下参土壤肥力评价[J]. 特产研究，2018（2）：1 – 7，18.
[15] 曹继钊，李富福. 广西桉树营养与施肥技术[M]. 广西：广西科学技术出版社，2011：22 – 23.
[16] 马涪，谷宜园，奚国强. 广西桉树林地土壤养分状况与施肥研究[J]. 中国土壤与肥料，2005（2）：23 – 24.
[17] 罗建谋. 广西桉树林地土壤养分状况与施肥研究[J]. 吉林农业，2011（8）：94 – 95.
[18] HAMZA N，CEVDET E. Estimation of soil quality of under long term sugar beet-wheat cropping system by factor analysis[J]. Communic Soil Sci Plant Anal，2020，51（4）：440 – 455.
[19] 金慧芳，史东梅，陈正发，等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报，2018，34（7）：155 – 164.
[20] 邓绍欢，曾令涛，关强，等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价[J]. 土壤学报，2016，53（5）：1326 – 1333.
[21] 唐菲菲，邓艳林，郑茂，等. 基于灰色关联分析的湘西北石漠化区土壤质量评价[J]. 中南林业科技大学学报，2016，36（9）：36 – 43.
[22] 戴士祥，任文杰，滕应，等. 安徽省主要水稻土基本理化性质及肥力综合评价[J]. 土壤，2018，50（1）：66 – 72.
[23] 郑洲翔，张艳艳，廖文莉，等. 我国桉树人工林对土壤状况影响研究进展[J]. 桉树科技，2020，37（3）：59 – 64.
[24] MARIA D，TORRENT J. Phosphorus desorption kinetics in relation to phosphorus forms and sorption properties of portuguese acid soils[J]. Soil Sci，2007，172（8）：631 – 638.
[25] KELLER M，OBERSON A，ANNAHEIM K E，et al. Phosphorus forms and enzymatic hydrolyzability of organic phosphorus in soils after 30 years of organic and conventional farming[J]. J Plant Nutr Soil Sci，2012，175（3）：385 – 393.
[26] 马涪，谷宜园，奚国强，等. 广西桉树林地土壤养分状况与施肥研究[J]. 土壤肥料，2005，（2）：53 – 54.
[27] 温远光. 桉树生态、社会问题与科学发展[M]. 北京：中国林业出版社，2008.
[28] 唐常源，王书瑛，曹英杰，等. 桉树林和天然次生林土壤溶解性有机质的荧光特性研究[J]. 安全与环境学报，2020，20（2）：763 – 772.