

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.

华南地区 5 种典型林分类型土壤肥力综合评价

冯嘉仪, 储双双, 王婧, 吴道铭, 莫其锋, 曾曙才
(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】利用多种评价方法综合评价不同林分类型的林下土壤肥力状况, 分析这些评价方法对土壤肥力综合评价的影响及其异同, 以期为华南地区森林土壤养分管理和森林可持续经营提供理论依据。【方法】以华南地区相思 *Acacia* spp. 林、杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林、桉树 *Eucalyptus urophylla* 林、马尾松 *Pinus massoniana* 林和阔叶混交林的 0~20 cm 土壤为研究对象, 测定了容重、pH、有机质、速效磷、速效钾、碱解氮和全氮含量, 通过隶属度函数和偏相关分析进行单项指标评价, 并结合相关关系法、主成分分析法、灰色关联分析法和内梅罗指数法对 5 种林分类型土壤肥力进行综合评价。【结果】5 种林分土壤容重变幅为 1.24~1.29 g·cm⁻³, pH 变幅为 4.11~4.24, 有机质含量为 21.43~28.18 g·kg⁻¹, 速效磷含量为 1.12~1.42 mg·kg⁻¹, 速效钾含量为 40.62~55.20 mg·kg⁻¹, 碱解氮含量为 106.12~132.28 mg·kg⁻¹, 全氮含量为 1.03~1.45 g·kg⁻¹; 依据全国第 2 次土壤普查分类标准, 有机质和全氮含量均属于中上水平, 速效磷含量属于很低水平, 速效钾含量为低至中下水平, 碱解氮含量为中上至高水平。阔叶混交林的有机质、速效钾、碱解氮和全氮含量均显著高于部分人工林。有机质在土壤肥力中起最重要的作用, 速效磷是影响土壤肥力的限制性因子。4 种评价方法的综合评价结果一致, 土壤肥力大小均表现为阔叶混交林>杉木林>马尾松林>相思林>桉树林。【结论】阔叶混交林可以更好地积蓄土壤肥力, 桉树林的土壤肥力较低, 华南地区森林土壤养分管理时应注重磷钾肥的施用和土壤酸度调节。

关键词: 森林土壤; 土壤肥力综合评价; 主成分分析法; 灰色关联分析法; 相关关系法; 内梅罗指数法
中图分类号: S714.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-411X(2018)03-0073-09

Comprehensive evaluation of soil fertility of five typical forest stands in South China

FENG Jiayi, CHU Shuangshuang, WANG Jing, WU Daoming, MO Qifeng, ZENG Shucai
(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】Evaluating the soil fertility of different forests by a variety of evaluation methods, analyzing the influences as well as differences and similarities of these evaluation methods on soil fertility comprehensive evaluation and providing a theoretical basis for forest soil nutrient management and sustainable development in South China. 【Method】Five kinds of forests, including *Acacia* spp. plantation, *Cunninghamia lanceolata* plantation, *Eucalyptus urophylla* plantation, *Pinus massoniana* plantation and broad-leaved mixed forest were chosen to measure and analyze bulk density, pH, organic matter, available phosphorus, available potassium, alkaline nitrogen and total nitrogen in soil at a depth of 0-20 cm. Single index evaluation was carried out by membership function and partial correlation analysis. Combined with correlation coefficient method, principal component analysis, grey correlation analysis and Nemerow index method, comprehensive evaluation

收稿日期: 2017-08-23 优先出版日期: 2018-04-16
优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20180416.1031.002.html>
作者简介: 冯嘉仪 (1991—), 女, 博士研究生, E-mail: leave4s@126.com; 通信作者: 曾曙才 (1971—), 男, 教授, 博士, E-mail: sczeng@scau.edu.cn
基金项目: 广东省林业科技创新专项 (2014KJCX022); 广东省科技计划项目 (2015B020207002)

of soil fertility was conducted for five forest stands. 【Result】 The soil bulk density of five stands were ranged from 1.24 to 1.29 g·cm⁻³, and the values of pH were ranged from 4.11 to 4.24. The contents of organic matter were ranged from 21.43 to 28.18 g·kg⁻¹, the contents of available phosphorus were ranged from 1.12 to 1.42 mg·kg⁻¹, the contents of available potassium were ranged from 40.62 to 55.20 mg·kg⁻¹, the contents of alkaline nitrogen were ranged from 106.12 to 132.28 mg·kg⁻¹ and the contents of total nitrogen were ranged from 1.03 to 1.45 g·kg⁻¹. According to the second national soil classification standards, the levels of organic matter and total nitrogen contents were above average values, while the level of available phosphorus content was low, the content of available potassium were ranged from low to below average level, and the content of alkaline nitrogen were ranged from above average to high level. The contents of organic matter, available potassium, available nitrogen and total nitrogen in broad-leaved mixed forest were significantly higher than those in some plantations. Organic matter played the most important role in soil fertility, while available phosphorus was a limiting factor affecting soil fertility. The results of comprehensive evaluation of four kinds of evaluation methods were consistent. The range of soil fertility from high to low was broad-leaved mixed forest > *C. lanceolate* plantation > *P. massoniana* plantation > *A. spp.* plantation > *E. urophylla* plantation. 【Conclusion】 The soil fertility accumulation of broad-leaved mixed forest is better than those of other plantations, while the soil of *E. urophylla* plantation have low fertility. The applications of phosphorus and potassium fertilizer and the adjustment of soil acidity should be emphasized in the management of forest soil nutrients in South China.

Key words: forest soil; comprehensive evaluation of soil fertility; principal component analysis; grey correlation analysis; correlation coefficient method; Nemerow index method

土壤肥力是土壤的基本属性和本质特征,是土壤物理、化学和生物等特性的综合反映^[1-3]。森林土壤的肥力是林地生产力的基础,是供给森林植物生长所需的水分和养分的重要基质,为植物提供可持续生长以及抵御侵蚀的能力,直接影响林木的生长和分布状况^[4-5]。森林土壤肥力也是植物和土壤相互作用的结果,林木从土壤中吸收养分,同时以凋落物的形式归还大量有机质到土壤中,从而影响土壤肥力状况^[6]。不同林分的植被凋落物性质及其组成不同,其对林下土壤肥力的积蓄产生一定影响,且一直是森林生态学研究的一个重要方向^[6-8]。因此,了解和客观评价不同林分类型的林下土壤肥力状况是充分保护和利用好森林土壤资源的关键前提,对林地生产力和森林经营的研究有重要意义。

影响土壤肥力的因素众多,如何科学确定土壤肥力评价的指标及其评价体系是土壤肥力评价的核心环节^[9],对评价结果的客观性有直接影响。土壤物理性质、pH、有机质和氮磷钾含量及其有效态是影响土壤肥力质量的重要表征指标^[10]。目前常用的传统土壤肥力评价方法所赋的权重计算方法主要分为经验权重(包括专家打分法和层次分析法)和统计权重(包括相关关系法、主成分分析法、灰色关联分析法、内梅罗指数法)^[11-16]。由于经验权重主要考虑的是人为经验对指标重要性的判断^[12],

难以避免会带有一定的主观因素,而统计权重更侧重于数据本身体现的统计学意义和数理统计方法。相关关系法是通过指标之间的敏感度大小来确定指标权重^[13];主成分分析法从方差贡献率入手计算^[14];灰色关联分析法首要以指标中的最大值建立理想数列,研究的是两级最小差和两级最大差^[15];内梅罗指数法主要考虑的是指标最小值对土壤肥力的限制性^[16]。不同评价方法采用的数学方法和评价侧重点不同,其表征的评价结果反映的意义也有所不同,因此十分有必要研究不同评价方法对土壤肥力综合评价的影响及其异同性。而当前的研究主要是基于 1 或 2 种评价方法进行评价^[17-18],同时引入多种评价方法用于土壤肥力综合评价的研究较为少见。

相思 *Acacia spp.*、杉木 *Cunninghamia lanceolata*、桉树 *Eucalyptus urophylla*、马尾松 *Pinus massoniana* 是我国重要的人工造林树种^[19],在华南地区种植总面积广,是华南地区森林中的典型林分。而当前土壤肥力评价的研究对象多见于农田土壤^[20-22],对不同林分类型林下土壤肥力进行探究的研究较少。本研究以华南地区相思林、杉木林、桉树林和马尾松林等 4 种人工林和阔叶混交林的林下土壤为研究对象,分别采用主成分分析法、灰色关联分析法、相关关系法和内梅罗指数法进行土壤肥力综合评价,对比分析不同林分类型的林下土壤肥

力状况, 从而为华南地区森林土壤养分管理和可持续经营提供科学依据和理论指导, 对林地土壤肥力状况的科学评价和森林生产力的提高有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

罗定市位于广东省西南部 (111°03'08"~111°52'44"E, 22°25'11"~22°57'34"N), 全市总面积 2 327.5 km², 其中山地面积 873.4 km², 丘陵面积 954.1 km², 平原面积 500 km²。地处北回归线南侧, 属于南亚热带季风气候, 春秋两季气温暖和, 全年气温偏高, 雨量变化幅度较大, 干旱及倒春寒灾害较多。日照充足, 雨量充沛, 全年平均日照率达到 42%, 年平均气温 22.10 ℃, 年平均降水量 1 500 mm。西部、西北部和南部一部分为云开大山山地, 东面为云雾山山地, 中部、东北部和南部为盆地、丘陵地带, 成土母岩主要以中生代的红色砂岩为主, 地带性土壤为红壤和黄壤。

1.2 样品采集与分析

在资料查阅和实地踏查基础上, 于 2015 年 11—12 月选取了罗定市船步、分界、附城、金鸡、朗塘、连州、龙湾、罗平、泗纶和太平等 10 个镇进行样地调查和土壤采集, 每一个镇相当于 1 次试验重复。在每个镇选取兼具相思人工林、杉木人工林、马尾松人工林和阔叶混交林 (主要树种为桉树、相思、黄梁木 *Neolamarckia cadamba* 和毛竹 *Phyllostachys heterocycla*) 且 5 种林分紧邻的区域进行土壤调查采样, 要求 5 种林分所在地段海拔高度相近, 土壤母质和土地利用历史相同。在每种林分类型的中央设置 1 个 20 m×20 m 的样地, 开展样地调查, 样地基本特征见表 1。在样地对角线上设置 3 个采样点, 每个采样点采集 0~20 cm 深土层样品。均匀采集 1 kg 土壤分析样品, 采集环刀样品 3 个用于土壤容重测定。每种林分共计采集分析样品 30 个, 环刀样品 90 个。pH 采用 pH 计测定, 有机质含量采用

重铬酸钾氧化-外加热法测定, 速效磷含量用 HCl 和 H₂SO₄ 浸提-钼锑抗比色法测定, 速效钾含量采用 NH₄ AC 浸提原子吸收分光光度法测定, 碱解氮和全氮含量用氢氧化钠碱解扩散法测定^[23]。

1.3 数据分析

用 SPSS 19.0 软件、ORIGIN 9.1 软件进行数据处理和作图。初步对土壤指标进行描述性统计分析和 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 正态分布检验, 并采用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和 Duncan's 多重比较 ($\alpha=0.05$) 对不同林分的土壤性质差异进行比较。

1.4 研究方法

1.4.1 评价指标的标准化 由于各项评价指标的单位和量纲不同, 因此需要对数据进行标准化处理, 以去除单位和量纲, 实现对各项评价指标的量纲归一化, 使评价指标间具有可比性。建立各评价指标的隶属度函数, 计算其隶属度值, 以表示各项肥力指标的状态值。根据植物生长效应, 将隶属度函数分为 2 种类型 (抛物线型和 S 型), 把曲线型函数转化为相应的折线型函数, 并将各项指标对应的曲线转折点取值代入公式计算^[21]。

1) 抛物线型隶属度函数: 土壤容重的数值过大和过小时都不利于植物生长, 因此采用抛物线型隶属度函数, 隶属度函数值 $F(x)$ 的计算公式为:

$$F(x) = \begin{cases} 0.1, & x < x_a \text{ 或 } x \geq x_d \\ 0.1 + 0.9(x - x_a)/(x_b - x_a), & x_a \leq x < x_b \\ 1.0 - 0.9(x - x_c)/(x_d - x_c), & x_c \leq x < x_d \\ 1.0, & x_b \leq x < x_c \end{cases} \quad (1)$$

式中, x 为测定的土壤指标观测值, x_a 、 x_b 、 x_c 、 x_d 为函数转折点取值, 根据全国第 2 次土壤普查数据和相关资料^[1, 11], 转折点取值如表 2 所示。

2) S 型隶属度函数: 符合 S 型隶属度函数的特征是指标在一定范围内增大时, 其对土壤肥力的贡献率增大, 低于或高于一定范围, 其贡献率维持在低水平和高水平, 土壤有机质、速效磷、速效钾、碱

表 1 样地基本情况¹⁾
Tab. 1 Basic status of sampling plots

林分类型	坡度/(°)	凋落物厚度/cm	郁闭度	树高/m	胸径/cm
相思林	25.7±1.0	5.1±0.7	0.5±0.0	13.5±0.9	14.0±1.0
杉木林	28.7±2.1	5.4±0.6	0.7±0.0	11.3±0.6	12.4±1.3
桉树林	22.2±1.1	5.0±0.4	0.5±0.0	13.8±1.1	12.8±0.9
马尾松林	25.5±1.1	5.1±0.4	0.5±0.0	13.2±0.5	13.4±0.9
阔叶混交林	25.6±1.7	5.7±0.6	0.7±0.0	14.3±1.0	15.9±1.8

1) 表中数据为平均值±标准误

表 2 隶属度函数的转折点取值
Tab. 2 Values of turning points in membership function

转折点	容重/(g·cm ⁻³)	pH	w(有机质)/(g·kg ⁻¹)	w/(mg·kg ⁻¹)			w(全氮)/(g·kg ⁻¹)
				速效磷	速效钾	碱解氮	
x_a	1.00	3.5	6	3	30	30	0.5
x_b	1.15	6.5	40	40	200	150	2.0
x_c	1.25						
x_d	1.35						

解氮、全氮符合这一特征,故采用 S 型隶属度函数。华南地区土壤普遍为酸性土, pH 范围在 7.0 以下,因此同样适用该函数。计算过程为:

$$F(x)=\begin{cases}0.1, & x < x_a \\ 0.1+0.9(x-x_a)/(x_b-x_a), & x_a \leq x < x_b \\ 1.0, & x \geq x_b\end{cases} \quad (2)$$

式中, x 为测定的土壤指标观测值, x_a 和 x_b 为函数转折点取值, 根据华南地区土壤性质特性、全国第 2 次土壤普查数据和相关资料^[1], 转折点取值如表 2 所示。

根据公式 (1) 和 (2) 以及表 2 可以计算出各项土壤肥力指标的隶属度值, 经过隶属度函数标准化后的所有指标观测值均转化为范围在 0.1~1.0 的无量纲数值, 数值越大且越接近 1.0, 表明此评价指标越接近理想值, 最高值 1.0 表示土壤肥力指标完全适宜植物生长, 最低值取值为 0.1 则是因为极少存在完全没有肥力的土壤, 计算时也可避免零值过多^[24]。

1.4.2 综合评价方法 采用下列 4 种方法对 5 种林分类型进行土壤肥力综合评价。

1) 主成分分析法: 先对数据进行 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO) 检验和 Bartlett 球形检验, 判断是否适宜进行主成分分析, 然后再采用主成分分析法计算出各项土壤指标的公因子方差, 进一步计算出各个公因子方差占公因子方差总和的比例, 将其作为评价指标的权重 a_i 。土壤肥力综合得分 S 的计算公式为^[14]:

$$S=\sum_{i=1}^n a_i \times F(i), \quad (3)$$

式中, a_i 为第 i 个土壤肥力指标的权重系数, n 为指标数量, $F(i)$ 为某一林分类型各项指标的隶属度值。

2) 灰色关联分析法: 灰色关联分析法是根据理想数列与被评价对象数列之间的关联系数来计算^[24]。把土壤各项指标作为土壤肥力评价因素构成数据列, 将所有被评价的林分对象的数据列构成数据矩阵。将 n 个单项指标观测值的最大值组成灰色关联分析的参考数据数列, 即理想数列 x_0 , 计算

各林分类型的数据数列 x_k 与理想数列 x_0 的关联系数 $\xi(k, i)$, 关联系数的大小反映了单项指标与理想状态的接近程度, 灰色关联度 C_k 的大小综合反映了土壤肥力质量状况, 灰色关联度 C_k 的计算公式为^[25]:

$$C_k=\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi(k, i), \quad (4)$$

式中, $\xi(k, i)$ 为第 i 个指标时比较被评价对象数列 x_k 与理想数列 x_0 的相对值, 即 x_k 对 x_0 在第 i 个指标时的关联系数, n 为指标数量, C_k 为评价对象 k 的灰色关联度。

3) 相关关系法: 由于土壤肥力指标之间是相互影响和相互作用的, 任意两指标之间的关系必然受到其他指标的影响, 只有在排除或固定其他指标影响的条件下, 才能得出各项指标对土壤肥力的实际贡献率, 因此需要通过偏相关系数来确定各项土壤肥力指标的权重系数, 即相关关系法^[13]。计算各土壤肥力指标之间的相关系数并建立相关系数矩阵 R , 通过相关系数矩阵 R 求出其逆矩阵 R^{-1} , 由逆矩阵 R^{-1} 的相应数据计算出偏相关系数 r_{ij} 并建立偏相关系数矩阵 R_{ij} 。计算各项指标的偏相关系数平均值, 求出该平均值占有所有指标偏相关系数平均值之和的百分率, 即为该单项肥力指标在表征土壤肥力状况中的贡献率, 即权重系数 W_i ^[26]。基于权重系数和各项土壤指标的隶属度值得出土壤肥力综合指数 IFI(Integrated fertility index)^[27]:

$$IFI=\sum_{i=1}^n W_i F(i), \quad (5)$$

式中, W_i 为第 i 个土壤肥力指标的权重系数, n 为指标数量, $F(i)$ 为某一林分类型各项指标的隶属度值。

4) 内梅罗指数法: 采用修正的内梅罗指数公式计算土壤肥力综合系数, 公式如下^[16]:

$$P=\left(\frac{n-1}{n}\right) \sqrt{\frac{\bar{P}_i^2+P_{i(\min)}^2}{2}}, \quad (6)$$

式中, P 为内梅罗指数, $\bar{P}_i$ 为各项土壤肥力指标的平均值, $P_{i(\min)}$ 为各项土壤肥力指标的最小值, 采用 $P_{i(\min)}$ 代替原内梅罗原始公式中的 $P_{i(\max)}$, 突出了最小养分律或限制性因子对土壤肥力的影响, 增加修正项 $(n-1)/n$ 是为了反映可信度, 即参评土壤指标样本数量 n 越多则可信度越高。

2 结果与分析

2.1 不同林分类型土壤肥力指标分析

各项土壤指标的描述性统计结果如表 3 所示, 变异系数大小排序为速效磷>全氮>有机质>速效钾>碱解氮含量>容重>pH, 除了 pH 为弱变异外, 其他 6 项指标均属于中等变异。K-S 检验表明, 容重、pH 和有机质含量均符合正态分布, 速效磷、速效钾、碱解氮和全氮含量经对数转换后符合正态分布, 无需处理特异值。

不同林分类型土壤肥力指标结果如表 4 所示, 5 种林分类型土壤容重在 1.24~1.29 g·cm⁻³, 杉木林、马尾松林和阔叶混交林的土壤容重较为适宜 (1.00~1.25 g·cm⁻³), 相思林和桉树林土壤偏紧 (1.25~1.35 g·cm⁻³), 马尾松林和阔叶林的土壤容重处于适宜土壤和偏紧土壤的临界值 (1.25 g·cm⁻³), 土壤 pH

在 4.11~4.24, 属强酸性土壤 (<4.50), 速效磷在 1.12~1.42 mg·kg⁻¹, 整体含量均偏低。根据全国第 2 次土壤普查分类标准^[1], 5 种林分的土壤有机质含量均属于 3 级 (20~30 g·kg⁻¹), 即中上水平; 速效磷含量均为 6 级, 即很低水平 (<3 mg·kg⁻¹), 含量较低; 杉木林和阔叶混交林的速效钾含量为 4 级, 即中下水平 (50~100 mg·kg⁻¹), 相思林、桉树林和马尾松林为 5 级, 属于低水平 (30~50 mg·kg⁻¹); 相思林、杉木林、桉树林和马尾松林的碱解氮含量均属于 3 级, 即中上水平 (90~120 mg·kg⁻¹), 阔叶混交林的碱解氮含量则较高, 属于 2 级高水平 (120~150 mg·kg⁻¹), 全氮含量均为 3 级, 即中上水平 (1.0~1.5 g·kg⁻¹)。

容重、pH 和速效磷 3 项土壤指标在 5 种林分类型之间无显著差异 (表 4)。阔叶混交林的有机质含量显著大于桉树林, 有机质含量在相思林、杉木林和马尾松林之间无显著差异。速效钾含量表现为阔叶混交林和杉木林显著大于桉树林, 相思林和马尾松林与其他林分均无显著差异。碱解氮含量表现为阔叶混交林显著大于 4 种人工林, 全氮含量表现为阔叶混交林显著大于杉木林, 其他 3 种林分之间无显著差异。综合来看, 阔叶混交林的土壤肥力条件较 4 种人工林好。

表 3 土壤指标描述性统计
Tab. 3 Descriptive statistics of soil indicators

项目	容重/(g·cm ⁻³)	pH	w(有机质)/ (g·kg ⁻¹)	w/(mg·kg ⁻¹)			w(全氮)/ (g·kg ⁻¹)
				速效磷	速效钾	碱解氮	
最小值	0.99	3.76	17.92	0.74	20.67	100.20	0.45
最大值	1.56	5.02	31.38	2.44	64.90	140.88	2.83
平均值	1.26	4.17	24.52	1.31	48.30	117.47	1.27
标准差	0.22	0.39	11.08	0.70	17.36	33.85	0.66
变异系数/%	17.88	9.45	44.13	53.79	35.78	29.72	51.59
分布类型	正态	正态	正态	对数正态	对数正态	对数正态	对数正态

表 4 不同林分类型的土壤肥力指标¹⁾
Tab. 4 Soil fertility indicators of different forest stands

林分类型	容重/ (g·cm ⁻³)	pH	w(有机质)/ (g·kg ⁻¹)	w/(mg·kg ⁻¹)			w(全氮)/ (g·kg ⁻¹)
				速效磷	速效钾	碱解氮	
相思林	1.29±0.11a	4.12±0.12a	23.39±5.70ab	1.25±0.65a	46.98±14.32a	109.83±14.39b	1.22±0.25ab
杉木林	1.24±0.08a	4.14±0.29a	26.22±6.08ab	1.40±0.40a	53.06±11.24a	114.70±13.58b	1.03±0.31b
桉树林	1.27±0.18a	4.11±0.13a	21.43±3.79b	1.12±0.50a	40.62±5.35b	107.16±29.54b	1.35±0.23ab
马尾松林	1.25±0.14a	4.23±0.22a	25.82±9.49ab	1.34±0.27a	46.71±6.7ab	106.12±14.52b	1.28±0.62ab
阔叶混交林	1.25±0.13a	4.24±0.31a	28.18±2.41a	1.42±0.05a	55.20±5.39a	132.28±9.02a	1.45±0.08a
平均值	1.26±0.02	4.17±0.03	25.10±0.90	1.31±0.06	48.50±1.42	113.87±2.76	1.27±0.05

1) 表中数据为平均值±标准误, 同列数据后凡是有一个相同字母者表示不同林分类型间差异不显著(P>0.05, Duncan's 法)

2.2 土壤肥力单项指标评价

采用雷达图能直观反映单因素土壤肥力指标在土壤中的状态及土壤肥力的整体状况，不同林分类型各项土壤指标的隶属度函数值如图 1 所示。5 种林分类型各项土壤指标的隶属度值最小的均为速效磷含量，均保持在 0.1 左右；其次为速效钾，5 种林分的隶属度值在 0.2 左右，表明 5 种林分类型中土壤肥力的限制性因子是速效磷和速效钾含量。最高的容重隶属度出现在杉木林，最高的 pH、有机质、速效钾、碱解氮和全氮含量隶属度均出现在阔叶混交林。

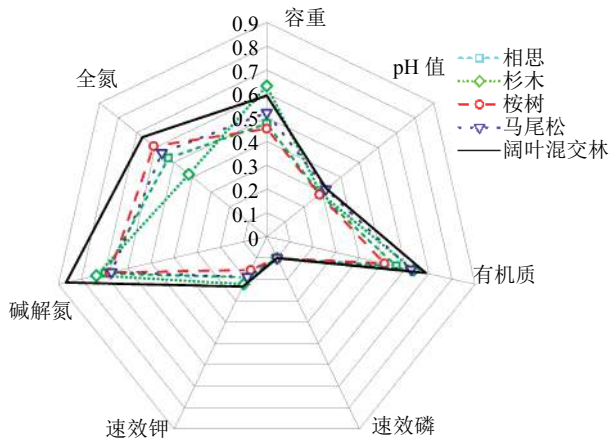


图 1 各项土壤指标隶属度函数值雷达图
Fig. 1 Radar plot of membership function values of soil indicators

图 1 中各项指标隶属度值围合而成的多边形面积大小，也直观反映了由评价指标所组成的评价对象的整体状态，多边形面积越大说明土壤肥力效果越理想。但该图反映出的土壤肥力效果情况仅是在假定各项指标对土壤肥力影响均等的前提下，然而实际上不同指标对土壤肥力的影响不尽相同，因此需要结合各项土壤指标对土壤肥力的贡献率作进一步验证。

对不同林分类型的土壤指标隶属度值进行相关分析，并通过相关系数矩阵求得偏相关系数及其平均值，可求得各项土壤指标对土壤肥力的贡献率，结果如图 2 所示，贡献率从大到小分别为有机质 (0.232)>碱解氮 (0.199)>速效钾 (0.180)>容重 (0.110)>pH (0.105)>速效磷 (0.092)>全氮 (0.082)，有机质对土壤肥力起到了最重要的作用。

2.3 土壤肥力综合评价

2.3.1 主成分分析法 对 7 个土壤肥力指标的 KMO 检验结果为 0.607(>0.6)，Bartlett 球形检验的显著性系数为 0.00(<0.05)，说明数据适合进行主成分分析。通过主成分分析得到各主成分的特征值、

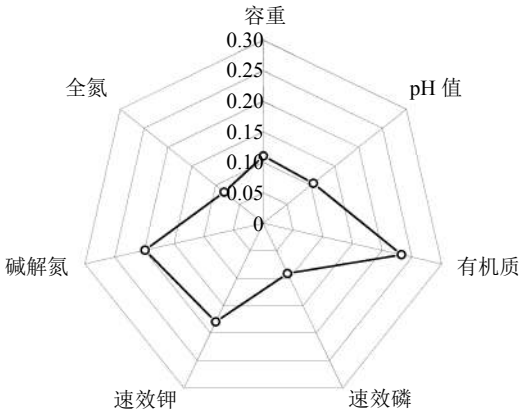


图 2 各项土壤指标贡献率雷达图
Fig. 2 Radar plot of contribution rates of soil indicators

方差贡献率和载荷矩阵等如表 5 所示。共抽取出 3 个主成分，各主成分的特征值分别为 1.727、1.344 和 1.089，前 3 个主成分累计方差贡献率达 24.671%、43.869% 和 59.421%。第 1 主成分主要包含的指标有容重、有机质、速效钾和碱解氮，第 2 主成分包含 pH 和速效磷，第 3 主成分包含全氮。基于公因子方差求出的权重系数表现为有机质 (0.180)>速效钾 (0.151)>碱解氮 (0.149)>全氮 (0.142)>pH (0.141)>速效磷 (0.132)>容重 (0.105)，有机质对土壤肥力的贡献率最大，其次为速效钾和碱解氮。

根据各林分类型的隶属度 (图 1) 以及各指标的权重值 (表 5)，加权计算得到的土壤肥力综合评价值如表 6 所示，综合得分在 0.380~0.439，从大到小依次为阔叶混交林>杉木林>马尾松林>相思林>桉树林，阔叶混交林最大，桉树林最小。

2.3.2 灰色关联分析法 对土壤各肥力指标的灰色关联分析结果如表 7 所示，除了容重的关联系数表现为杉木林最高以外，pH、有机质、速效磷、速效钾、碱解氮和全氮的关联系数均为阔叶混交林最高。基于各项土壤指标的隶属度函数值 (图 1) 和关联系数 (表 7)，可得出不同林分类型的土壤肥力灰色关联度 (表 6)。土壤肥力的灰色关联度在 0.611~0.965，从大到小依次为阔叶混交林>杉木林>马尾松林>相思林>桉树林，阔叶混交林最大，桉树林最小。

2.3.3 相关关系法 基于各项土壤指标的隶属度函数值 (图 1) 和其对土壤肥力的贡献率 (图 2) 进行加权计算，对不同林分类型各项土壤指标进行综合评价，结果如表 6 所示。综合指数在 0.420~0.519，从大到小依次为阔叶混交林>杉木林>马尾松林>相思林>桉树林，阔叶混交林土壤肥力状况最好，桉树

表 5 土壤肥力指标的主成分分析

Tab. 5 Principal component analysis of soil fertility indicators

土壤指标	主成分特征向量			公因子方差	权重(a_i)
	PC-1	PC-2	PC-3		
容重	0.502	-0.175	-0.441	0.419	0.105
pH	-0.175	0.707	0.137	0.567	0.141
有机质	0.801	-0.102	-0.009	0.720	0.180
速效磷	0.072	0.734	-0.056	0.531	0.132
速效钾	0.523	0.502	-0.258	0.605	0.151
碱解氮	0.712	0.094	0.235	0.598	0.149
全氮	0.134	-0.046	0.866	0.568	0.142
特征值	1.727	1.344	1.089		
方差贡献率/%	24.671	19.198	15.552		
累计方差贡献率/%	24.671	43.869	59.421		

表 6 不同林分类型的土壤肥力综合评价

Tab. 6 Comprehensive evaluation of soil fertility of different forest stands

林分类型	主成分分析法		灰色关联分析法		相关关系法		内梅罗指数法	
	综合得分(S)	排序	灰色关联度(C_k)	排序	综合指数(IFI)	排序	内梅罗指数(P)	排序
相思林	0.402	4	0.622	4	0.446	4	0.294	4
杉木林	0.428	2	0.749	2	0.489	2	0.314	2
桉树林	0.380	5	0.611	5	0.420	5	0.290	5
马尾松林	0.414	3	0.691	3	0.457	3	0.309	3
阔叶混交林	0.439	1	0.965	1	0.519	1	0.357	1

表 7 单项土壤肥力指标的关联系数 $\xi(k, i)$

Tab. 7 Correlation coefficients of individual soil fertility indicators

林分类型	容重	pH	有机质	速效磷	速效钾	碱解氮	全氮
相思林	0.442	0.778	0.496	0.997	0.742	0.426	0.470
杉木林	1.000	0.803	0.706	0.999	0.917	0.487	0.333
桉树林	0.410	0.765	0.412	0.999	0.618	0.399	0.673
马尾松林	0.528	0.977	0.666	0.996	0.736	0.389	0.544
阔叶混交林	0.753	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

林最差。

2.3.4 内梅罗指数法 基于内梅罗指数法的土壤肥力综合评价结果与主成分分析法、灰色关联分析法和相关关系法一致(表 6), 但内梅罗指数评价价值偏低, 不同林分类型之间差异较小。内梅罗指数综合评价值在 0.290~0.357, 从大到小依次为阔叶混交林>杉木林>马尾松林>相思林>桉树林, 说明天然林的土壤肥力明显优于人工林, 人工林之中杉木林的土壤肥力状况优于相思林、桉树林和马尾松林。

3 讨论与结论

本研究结果表明, 不同林分类型的林下土壤肥力状况具有明显差异。4 种人工林中, 杉木林、马尾松林、相思林和桉树林的土壤肥力依次减小。其中杉木林的土壤容重较阔叶混交林理想, 土壤肥力大小仅次于阔叶混交林, 土壤肥力条件表现较好。马尾松林土壤肥力仅次于阔叶混交林和杉木林, 较相思林和桉树林理想。桉树林土壤肥力表现最差, 不利于土壤养分积累, 其原因主要是桉树生长快, 养分需求较大, 林下植物稀少, 凋落物量和地表有机

质蓄积量较小^[28]。但也有研究表明桉树土壤肥力较好,可能是与施肥和抚育管理措施有关^[29]。阔叶混交林土壤肥力明显优于 4 种人工林,更有利于土壤肥力积蓄,这与前人研究结果一致^[30],是较为适宜的林地利用方式。自然演替的天然林森林群落受到的人为干扰较少,土壤养分积蓄效果较人工林好,另一方面,阔叶混交林更接近该地区的顶级群落,群落结构更加复杂、树种组成更加丰富,凋落物储量大、分解速度快,具有更好的养分归还条件和养分积蓄能力^[31]。因此,在植被恢复和营造人工林的过程中,应加强对现有阔叶林的保育和管理,引入适宜的树种,并根据土壤肥力状况进行科学的土壤养分管理。

综合评价模型的合理构建是土壤肥力综合评价的关键内容,直接决定了评价结果的合理性、客观性和科学性。本研究同时将容重和 pH 纳入土壤肥力综合评价模型中,从而能更全面反映土壤肥力状况。土壤容重体现了土壤紧实度,直接影响土壤透气性、入渗性能和持水能力^[7],pH 是土壤化学性质的综合体现,对土壤养分的存在形态有直接影响^[32]。本研究结果表明,5 种林分类型的土壤均为强酸性,因此应注意调节土壤 pH,适当添加生石灰等处理以中和土壤酸性。通过相关关系法和主成分分析法计算出的单项指标权重均说明有机质在土壤肥力中贡献率最大,是土壤肥力的重要指标,其含量的大小与土壤养分环境密切相关^[33],对土壤肥力状况具有重要影响,因此可作为指示土壤肥力的第 1 要素。氮磷钾是植物生长的必要营养元素,其有效态是植物所能吸收和利用的部分,能客观反映营养元素在土壤中的供给情况^[34]。5 种林分的土壤均富集碱解氮和全氮,能很好地满足植物对氮元素的需求,提供较为充分的氮养分。但速效磷是限制性的肥力因子,这与前人结果一致^[30],速效钾含量也存在偏低的现象。因此应提高土壤中的磷、钾养分含量,在土壤养分管理时应注重施加磷钾有机肥,从而提高森林土壤肥力。

隶属度函数是土壤综合评价中数据标准化处理的常用方法之一。本研究使用了隶属度函数对原始数据进行标准化处理,根据土壤指标本身的特性来决定所采用的函数种类,同时将土壤指标在土壤肥力中的适宜范围引入作为函数转折点,更有针对性,能客观地反映各项土壤指标在土壤肥力综合评价中的状态。雷达图常用于多项指标的全面分析,能直观反映各项土壤肥力指标的状态和贡献率,评价对象的面积大小也直接体现了土壤肥力好坏^[17,21],

在综合评价的过程中具有突出的优点,可作为土壤评价结果的重要表达形式之一。

本研究使用 4 种评价方法进行土壤肥力综合评价的结论一致,说明数据本身对 4 种方法体现出一致性。但不同评价方法侧重的内容有所不同,因此在综合评价分值上仍表现出一定的差异,分值大小表现为灰色关联分析法>相关关系法>主成分分析法>内梅罗指数法。灰色关联分析法首要以指标中的最大值建立理想数列,研究的是两级最小差和两级最大差,同时考虑了土壤肥力的理想状态以及限制因素,使不同林分之间的评价价值差异较大;内梅罗指数法主要考虑的是限制性土壤因子对土壤肥力的影响,而所有林分类型的土壤速效磷含量均较低且隶属度数值相近,直接限制了土壤肥力状况,因此内梅罗指数法的综合评价分值最小且林分差异不大;相关关系法通过指标之间的敏感度大小来确定指标权重,主成分分析法从指标选取的科学性入手,对于指标较多时能更有效地提取出对土壤肥力有重要影响的因素。相关关系法和主成分分析法的综合评价分值最为接近,但二者计算出的指标权重有一定差异,例如全氮在相关关系法中得出的权重系数在所有指标中最低,仅为 0.081,但主成分分析法得出的权重为 0.142,在 7 个指标中位列第 4。由于本文采用的 4 种评价方法均来自于统计权重,受数据本身及不同数据之间的相互关系的直接影响,而数据观测值的误差以及样本数量、选取指标的数量难免也会对评价结果产生影响,因此应根据评价体系中的指标类型、指标数量和数据分布的实际情况来选择合适的評價方法进行土壤肥力科学评价。

参考文献:

[1] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.

[2] GARAY I, PELLENS R, KINDEL A, et al. Evaluation of soil conditions in fast-growing plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil: A contribution to the study of sustainable land use[J]. Appl Soil Ecol, 2004, 27(2): 177-187.

[3] RODRIGUES DE LIMA A C, HOOGMOED W, BRUS-SAARD L. Soil quality assessment in rice production systems: Establishing a minimum data set[J]. J Environ Qual, 2008, 37(2): 623-630.

[4] FISHER R F, BINKLEY D. Ecology and management of forest soils[J]. Eur J Soil Sci, 2001, 52(1): 169-170.

[5] BAUTISTA-CRUZ A, DEL CASTILLO R F, ETCHEVERS-BARRA J D, et al. Selection and interpretation of soil quality indicators for forest recovery

after clearing of a tropical montane cloud forest in Mexico[J]. *Forest Ecol Manag*, 2012, 277: 74-80. doi: 10.1016/j.foreco.2012.04.013.

[6] 刘永贤, 熊柳梅, 韦彩会, 等. 广西典型土壤上不同林分的土壤肥力分析与综合评价[J]. *生态学报*, 2014, 34(18): 5229-5233.

[7] 杨晓娟, 王海燕, 刘玲, 等. 东北过伐林区不同林分类型土壤肥力质量评价研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1553-1560.

[8] 李萍, 王兵, 戴伟, 等. 亚热带几种林分类型的土壤肥力评价研究[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(3): 52-58.

[9] GARRIGUES E, CORSON M S, ANGERS D A, et al. Soil quality in life cycle assessment: Towards development of an indicator[J]. *Ecol Indic*, 2012, 18: 434-442. doi: 10.1016/j.ecolind.2011.12.014.

[10] 安康, 谢小平, 张海珍, 等. 西湖风景区土壤肥力的空间格局及其影响因子[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(4): 1091-1096.

[11] 周伟, 王文杰, 张波, 等. 长春城市森林绿地土壤肥力评价[J]. *生态学报*, 2017, 37(4): 1211-1220.

[12] MASTO 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(1/2/3): 419-435.

[13] 骆伯胜, 钟继洪, 陈俊坚. 土壤肥力数值化综合评价研究[J]. *土壤*, 2004, 36(1): 104-106.

[14] 张凯旋, 商侃侃, 达良俊. 上海环城林带不同植物群落土壤质量综合评价[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2015, 39(3): 71-77.

[15] 金晶炜, 许岳飞, 熊俊芬, 等. 应用灰色关联度法评价砷污染土壤修复效果[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(6): 213-216.

[16] 邓南荣, 吴志峰, 刘平, 等. 城市园林绿化用地土壤肥力诊断与综合评价: 以广州市长虹苗圃为例[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(4): 287-289.

[17] 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.

[18] 周王子, 董斌, 刘俊杰, 等. 基于权重分析的土壤综合肥力评价方法[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(6): 81-86.

[19] 王大鹏, 王文斌, 郑亮, 等. 中国主要人工林土壤有机碳的比较[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(4): 698-704.

[20] 李梅, 张学雷. 基于 GIS 的农田土壤肥力评价及其与土体构型的关系[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 129-136.

[21] 叶回春, 张世文, 黄元仿, 等. 北京延庆盆地农田表层土壤肥力评价及其空间变异[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(15): 3151-3160.

[22] 许仙菊, 马洪波, 陈杰, 等. 基于养分丰缺诊断和主成分分析相结合的桑园土壤肥力评价[J]. *土壤*, 2013, 45(3): 470-476.

[23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[24] 张同娟, 杨劲松, 刘广明, 等. 长江河口地区土壤肥力质量综合评价研究: 以启东市为例[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 513-517.

[25] 唐柄哲, 何丙辉, 闫建梅. 川中丘陵区土地利用方式对土壤理化性质影响的灰色关联分析[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1445-1452.

[26] 赵串串, 安若兰, 赵巧玉, 等. 物元模型在玉树地区林地土壤养分评价中的应用[J]. *土壤*, 2014, 46(6): 984-988.

[27] 范海荣, 常连生, 王洪海, 等. 城市草坪土壤肥力综合评价[J]. *草业科学*, 2010, 27(10): 17-22.

[28] 温远光, 刘世荣, 陈放. 连栽对桉树人工林下物种多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(9): 1667-1671.

[29] 刘飞鹏, 储双双, 裴向阳, 等. 华南 3 种人工林土壤有机质和养分含量及其综合评价[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2014, 38(2): 81-85.

[30] 冼干标, 薛立, 梁丽丽, 等. 佛山云勇林场 3 种人工幼林的生长和土壤养分特征[J]. *华南农业大学学报*, 2007, 28(4): 119-121.

[31] 李静鹏, 徐明锋, 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.

[32] 郝瑞军. 上海城市绿地土壤肥力特征分析与评价[J]. *上海农业学报*, 2014, 30(1): 79-84.

[33] 许松葵, 薛立. 6 种阔叶树幼林的林地土壤特性[J]. *华南农业大学学报*, 2010, 31(4): 76-81.

[34] 戎宇, 刘成刚, 薛建辉. 喀斯特山地不同人工林土壤特性差异与综合评价[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2011, 35(2): 108-112.

【责任编辑 李晓卉】