

# Evaluation of Soil Fertility under Typical Subtropical Forest Vegetations in Lushan Mountain Region

Mingqing Fang, Fazhan Yu\*, Zhongqi Zhang, Yongbing Shan

School of Geography, Geomatics, and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou Jiangsu  
Email: 2849845130@qq.com, \*yufazhan@126.com

Received: Dec. 10<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 31<sup>st</sup>, 2019; published: Jan. 6<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Evaluation of forest soil fertility can provide important references for sustainable production of forestry. Selecting the soil under typical subtropical forest vegetation types as the study object, the principal component analysis method was used to evaluate soil fertility under different forest vegetation types in Lushan Mountain region based on the data from field survey and indoor tests analysis. The results showed that the soil under bamboo forest had the strongest acidity; the average contents of soil organic matter, total N, hydrolysable N, total P, available P and CEC in the soil under deciduous broad-leaved forest were the highest; the average contents of total K and rapidly available K in the soil under evergreen broad-leaved forest were the highest; and the soil fertility under different vegetation types followed the order from high to low: deciduous broad-leaved forest > mixed evergreen and deciduous broadleaved forest > evergreen broad-leaved forest > bamboo forest > shrub > mixed wood > Masson pine forest > *Pinus taiwanensis* forest. The evaluation results can provide scientific basis for forest management in subtropical regions and sustainable use of forest soil.

## Keywords

Forest Vegetation, Principal Component Analysis, Soil Fertility, Lushan Mountain Region

---

# 庐山亚热带典型森林植被类型下土壤肥力评价

方明晴, 于法展\*, 张忠启, 单勇兵

江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州  
Email: 2849845130@qq.com, \*yufazhan@126.com

收稿日期: 2019年12月10日; 录用日期: 2019年12月31日; 发布日期: 2020年1月6日

\*通讯作者。

## 摘要

森林土壤肥力评价可以为指导林业的可持续生产提供重要参考。以庐山亚热带典型的森林植被类型土壤为研究对象,在通过野外调查和室内测试分析获取数据的基础上,运用主成分分析法对其土壤肥力进行评价。结果表明,竹林下土壤酸性最强;落叶阔叶林下土壤有机质、全氮、水解氮、全磷、有效磷、阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)平均含量最高;常绿阔叶林下土壤全钾、速效钾平均含量最高;不同森林植被类型下土壤肥力水平从高到低排序为:落叶阔叶林 > 常绿-落叶阔叶混交林 > 常绿阔叶林 > 竹林 > 灌丛 > 针阔混交林 > 马尾松林 > 黄山松林。该评价结果可以为亚热带地区森林的经营管理以及永续利用森林土壤提供科学依据。

## 关键词

森林植被, 主成分分析, 土壤肥力, 庐山

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

土壤肥力可以反映土壤环境的质量状况,它是土壤本质特征及其形成过程的综合体现。森林土壤肥力直接关系到森林的生长状况,影响着林业生产的结构布局及其环境生态效益。提高森林土壤肥力水平和维持森林生态系统的长期稳定已成为林业可持续发展的关键[1]。因此,对不同森林土壤肥力水平的评价,可为森林土壤资源的合理利用以及林业的可持续经营提供参考。目前针对森林土壤肥力评价开展的相关研究还不多,定量评价土壤肥力的方法主要有指数和法、人工神经网络法、模糊聚类分析法、灰色关联法、投影寻踪模型法和主成分分析法等[2]-[7]。这些方法应用在评价对象时,有其自身的适应条件以及各自的运行机理,所以其结论也存在不一致性[8]。其中,主成分分析法是较为常见的、比较成熟的一种方法,它的广泛应用可为科学评价不同地区土壤肥力提供一定帮助。本研究以庐山亚热带典型性森林植被类型土壤为研究对象,选择能够反映土壤肥力的定量指标因子,利用 SPSS 软件支持下的主成分分析法,对不同森林植被类型下土壤肥力进行评价,目的是摸清不同森林植被类型下土壤的养分状况,以期为该区域森林的可持续经营管理以及永续利用森林土壤提供科学依据。

## 2. 研究区概况与数据获取

### 2.1. 研究区概况

庐山地处江西省九江市及庐山市境内,位于东经 115°52'~116°13',北纬 29°22'~29°46',总面积约为 800 km<sup>2</sup>。山体呈椭圆形,主峰-大汉阳峰海拔 1473.8 m,高出四周平原约 1440 m,属于典型的地垒式断块山。庐山走向北北东,其北段以大月山背斜山为轴,两侧对称地分列向斜谷和背斜山以及次一级的次成谷和次成山。庐山地处亚热带季风气候区域,具有鲜明的季风气候特征,水热资源丰富。庐山山体的垂直地带性规律明显(气候-植被-土壤): 1) 雨量丰沛,全年平均降雨量 1917 mm,属典型的山地气候特征; 2) 典型植被类型比较齐全,逆行演替和顺向演替具有一定的代表性,地带性植被类型主要有:亚

热带常绿阔叶林和常绿-落叶阔叶混交林, 此外还有亚热带竹林、亚热带针叶林(黄山松林和马尾松林)、落叶阔叶林、针阔混交林和灌丛; 3) 自然状况下的植被类型与土壤发育相匹配, 从山麓到山顶发育有: 红壤和黄壤(亚热带基带土壤)、山地黄壤、山地黄棕壤和山地棕壤。

### 2.2. 样点布设与数据获取

2017年8月在研究区内选取8块测试样地, 其样地分别代表不同海拔、植被类型和土壤类型等, 采样面积依据不同森林植被类型, 阔叶林取为50 m × 40 m, 针叶林为25 m × 20 m。选择的样区一般为森林植被类型区的核心部位, 为较成熟的林地, 林龄一般在50年以上。系统调查地上植被的覆盖状况(覆盖度), 庐山各测试样地的具体位置见图1以及各测试样地的基本概况见表1。

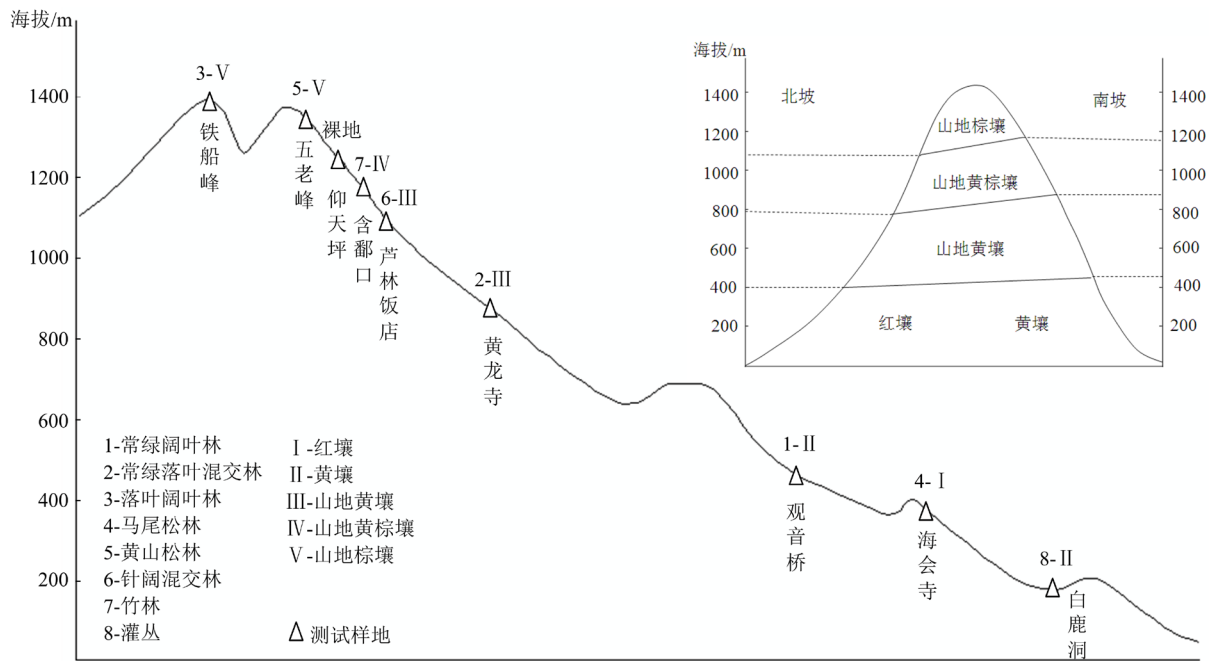


Figure 1. Specific location of each test plots in Lushan  
图 1. 庐山各测试样地的具体位置

Table 1. General situation of each test plots in Lushan  
表 1. 庐山各测试样地的基本概况

采样地点	森林植被类型	主要层优势植物	土壤类型	坡向	坡度/°	郁闭度	海拔/m
白鹿洞	灌丛	映山红、算盘子	黄壤	SW	10~15	—	200
海会寺	马尾松林	马尾松	红壤	NW	15~25	0.7	340
观音桥	常绿阔叶林	苦槠、青栲	黄壤	E	15~20	0.9	480
黄龙寺	常绿-落叶阔叶混交林	青冈栎、白辛树	山地黄壤	SW	30~40	0.8	870
芦林饭店	针阔混交林	黄山松、短柄枹	山地黄壤	SW	35~40	0.5	1040
含鄱口	竹林	玉山毛竹	山地黄棕壤	SW	35~40	—	1100
五老峰	黄山松林	黄山松	山地棕壤	NW	20~25	0.6	1250
铁船峰	落叶阔叶林	茅栗、化香	山地棕壤	NE	25~30	0.4	1300

每块样地设置 3 次重复, 按混合法采集土壤样本, 采集的土样带回实验室作分析测试。土壤肥力相关指标的测定: pH 值测定采用电位法(1:2.5 的水土比); 有机质测定采用水合热重铬酸钾氧化 - 容量法; 全氮测定采用蒸馏滴定法; 水解氮测定采用碱解 - 扩散吸收法; 全磷测定采用氢氧化钠熔融 - 分光光度法; 有效磷测定采用碳酸氢钠浸提 - 钼锑抗比色法; 全钾测定采用氢氧化钠熔融 - 火焰光度法; 速效钾测定采用中性乙酸铵提取 - 火焰光度计法; 阳离子交换量(CEC)通过测定土壤盐基组成和交换性酸计算求得。以上具体的测定方法参照《土壤农业化学分析》[9]。

### 3. 评价方法

主成分分析就是将原来指标重新组合成一组新的互相无关的几个综合指标来代替原来的指标, 同时根据需要从中取几个较小的综合指标尽可能多地反映原来的信息, 即把多指标转化为少数几个综合指标的方法[10]。其方法原理如下:

1) 原始数据标准化。变换公式为:  $Z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}$ 。其中,  $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$ ,  $s_j = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$ ,  $i=1,2,3,\dots,n$ ;  $j=1,2,3L,p$ ; 变换后均值为 0, 方差为 1。

2) 求相关矩阵  $R$ 。 $R$  是主成分分析的初始点, 其公式为:  $r_{ik} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(x_{ij} - \bar{x}_i)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{s_j s_k}$ , 且  $R_{ii} = 1$ ,  $r_{ik} = r_{kj}$ 。

3) 求矩阵  $R$  的特征根、特征向量和贡献率。 $R$  的特征方程为  $|\lambda I_r - R| = 0$ ,  $\lambda_g (g=1,2,\dots,P)$  为对该方程式求解得到的特征根; 求得向量  $L_g$  为特征根  $\lambda_g$  对应的特征向量; 由  $d_g = \lambda_g / \sum_{g=1}^p \lambda_g$  可得出其方差贡献率。

4) 确定主成分个数  $K$ , 将  $K$  个主成分得分值进行排序。将贡献率达到 100% 的主成分分别计算其线性加权之和的值,  $F_i - F_{ik}$ , 然后用每个主分量的贡献率作权数, 求  $F_{ig}$  的加权之和, 即:  $F_{ik} = \sum_{g=1}^p L_{ij} z_{ij}$ ,  $F_i = g = \sum_{g=1}^k d_g F_{ig}$ ,  $d_g = \lambda_g / \sum_{g=1}^p \lambda_g$ 。以  $F_i$  作为多指标综合评价值。

基于以上 1)、2)、3)、4) 的方法步骤, 运用 SPSS 统计分析软件中的主成分分析法, 提取公因子进行标准化处理, 计算出相关矩阵  $R$  的特征根、特征向量以及贡献率、累计贡献率等, 确定主成分个数, 最后求得多指标综合评价值, 对所获数据进行差异性检验和相关性分析。

## 4. 结果分析与评价

### 4.1. 不同森林植被类型下土壤肥力指标分析

表征森林土壤肥力水平的主要指标包括土壤 pH 值、有机质、全氮、水解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾和 CEC。通过室内测试分析得到庐山不同森林植被类型下土壤肥力各指标值见表 2。

土壤 pH 值主要取决于土壤溶液中  $H^+$  浓度, 对土壤肥力及植物的生长影响很大, 能直接或间接影响林地土壤中养分的存在状态、转化和有效性[11]。由表 2 可知, 不同森林植被类型下土壤平均 pH 值变化范围为  $4.3 \pm 0.8 \sim 5.8 \pm 0.3$ , 通过比较可知, 竹林下土壤酸性最强, 这是由于竹林下土壤枯落物分解的有机酸过多, 明显降低了土壤 pH 值(酸性增强)。有机质作为评价土壤健康的重要指标, 可以增强土壤保肥以及供肥的能力, 提高土壤养分的有效性, 同时促进团粒结构的形成, 改善土壤的通透性、及蓄水性能, 提升土壤的缓冲能力[12]。从表 2 可以看出, 落叶阔叶林下土壤有机质含量最大( $114.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 这是由于

其林下积累的枯落物最多, 而森林枯落物正是其有机质的来源, 并且落叶阔叶林下土壤腐殖质层的厚度也最大; 除落叶阔叶林外, 其他 7 种森林植被类型土壤有机质含量的平均值相差不大。全氮是氮素养分的贮备指标, 它与土壤有机质密切相关, 而水解氮则是反映近期内土壤氮素供应水平的重要指标[13]。由表 2 可知, 落叶阔叶林下土壤全氮含量平均值最高, 主要是因为其林下的枯落物层厚度大, 而且其地表枯落物含有较多的氮和固氮微生物; 落叶阔叶林下水解氮含量平均值最高, 这与其林下土壤有机质含量最高有关。全磷是衡量土壤中各种形态磷素总和的一个指标, 而有效磷含量则标志着土壤供磷能力的大小[14]。据表 2 比较可知, 常绿阔叶林下土壤有效磷含量平均值最小, 这是由常绿阔叶树种在生长过程中需要吸收大量的磷, 其林下土壤供磷能力不足。全钾是植物生长所必需的营养养分之一, 速效钾是植物所能利用的钾素, 能反映出土壤中钾素的供应情况, 促进作物根系的伸展以及微生物的活动[15]。一般而言, 速效钾含量在 50~100 mg·kg<sup>-1</sup> 为偏低[10]。从表 2 中可知, 落叶阔叶林下土壤速效钾含量的平均值相对偏少, 这是因为落叶阔叶林下土壤对钾的吸收利用能力较强, 从而导致其速效钾含量偏低。CEC 是指土壤胶体所能吸附的各种阳离子的总量, CEC 含量可以作为评价土壤保肥能力的重要指标, 为改良土壤合理施肥的重要依据[16]。根据表 2 可知, 落叶阔叶林下 CEC 的平均值大于其它 7 种森林植被类型, 这是因为该林分下的枯落物分解速度较快, 从而导致进入土壤的养分数量较多, 且与土壤 pH 值也有一定的关系。

**Table 2.** Indexes of soil fertility under various forest vegetation in Lushan (Mean ± Standard deviation)

**表 2.** 庐山不同森林植被类型下土壤肥力各指标(平均值 ± 标准差)

植被类型	pH 值 /H <sub>2</sub> O	有机质 /g·kg <sup>-1</sup>	全氮 /g·kg <sup>-1</sup>	水解氮 /mg·kg <sup>-1</sup>	全磷 /g·kg <sup>-1</sup>	有效磷 /mg·kg <sup>-1</sup>	全钾 /g·kg <sup>-1</sup>	速效钾 /mg·kg <sup>-1</sup>	CEC /cmol·kg <sup>-1</sup>
常绿阔叶林	4.4 ± 0.2a	55.2 ± 18.7a	9.34 ± 1.29b	77.4 ± 13.7a	8.79 ± 0.97a	60.9 ± 21.7a	8.51 ± 0.71a	207.6 ± 65.8	45.22 ± 20.75a
常-落混交林	4.6 ± 0.7a	64.1 ± 13.8b	19.63 ± 2.48a	87.7 ± 24.9a	7.39 ± 2.38a	99.2 ± 31.8a	7.25 ± 0.97a	112.1 ± 36.4	62.62 ± 13.29a
落叶阔叶林	4.9 ± 0.5a	114.8 ± 32.5	20.75 ± 8.21a	92.2 ± 19.5b	10.04 ± 3.96	108.5 ± 23.5	7.11 ± 1.07b	108.9 ± 22.1	67.09 ± 31.92a
黄山松林	4.8 ± 0.9b	63.7 ± 22.6a	19.09 ± 7.20b	87.2 ± 14.5a	5.65 ± 0.89a	95.4 ± 36.6a	7.70 ± 0.98b	125.6 ± 50.7	59.86 ± 17.54b
马尾松林	4.7 ± 0.1a	56.7 ± 19.3a	10.42 ± 0.65a	78.1 ± 25.1a	5.63 ± 2.09b	72.3 ± 10.3a	8.21 ± 0.72a	197.7 ± 73.6	51.73 ± 28.56b
针阔混交林	5.8 ± 0.3a	61.2 ± 24.5a	16.93 ± 4.53a	85.9 ± 34.4a	6.43 ± 1.14a	92.3 ± 27.4a	7.74 ± 1.11c	143.8 ± 41.2	55.16 ± 16.92a
竹林	4.3 ± 0.8a	57.3 ± 17.4a	14.14 ± 3.49a	78.5 ± 20.2a	6.92 ± 0.87a	84.5 ± 15.2b	8.16 ± 2.54a	178.1 ± 38.3	52.40 ± 12.05
灌丛	4.5 ± 0.6a	58.0 ± 10.8a	12.48 ± 5.14a	85.1 ± 31.3a	7.15 ± 1.06a	88.8 ± 29.1a	8.12 ± 1.16a	175.4 ± 13.5	53.10 ± 9.82a

注: 同列数字后不同小写字母表示  $p < 0.05$  水平差异显著。

#### 4.2. 不同土壤肥力指标之间的相关性分析

为更好地说明土壤肥力各项指标间的相互关系, 借助 SPSS 软件对其各项指标进行相关性分析。土壤肥力各指标之间的相关性见表 3。

从表 3 可知, 土壤有机质与全氮、水解氮存在极显著正相关( $r = 0.89, 0.81, p < 0.01$ ), 这表明土壤中有机质含量与氮素有密切关系; 有机质与有效磷存在极显著正相关( $r = 0.72, p < 0.01$ ), 这说明有机质对土壤中磷素的活化作用在提高有效磷含量上起着至关重要的作用; 全氮与水解氮、有效磷呈极显著正相关

( $r = 0.83, 0.60, p < 0.01$ ), 以及水解氮与有效磷呈极显著正相关( $r = 0.62, p < 0.01$ ), 这表明土壤中碳氮磷素之间有着密切的相互关系; 全钾与速效钾呈极显著正相关( $r = 0.74, p < 0.01$ ), 这与土壤溶液中离子间的交换及相互作用有关系, 即速效钾与全钾关系十分密切; CEC 与有机质、全氮呈现极显著正相关关系( $r = 0.64, 0.61, p < 0.01$ ), 与水解氮呈显著正相关( $r = 0.52, p < 0.05$ ), 与全钾呈极显著负相关( $r = -0.69, p < 0.01$ ), 说明 CEC 影响土壤全量养分的转化, CEC 的高低主要取决于有机物质在土壤中转化过程的强弱。

**Table 3.** Correlation between various soil fertility indexes

**表 3.** 土壤肥力各指标之间的相关性

	pH 值	有机质	全氮	水解氮	全磷	有效磷	全钾	速效钾	CEC
pH 值	1.00								
有机质	-0.40	1.00							
全氮	-0.39	0.89**	1.00						
水解氮	-0.35	0.81**	0.83**	1.00					
全磷	-0.41	0.32	0.33	0.36	1.00				
有效磷	0.06	0.72**	0.60**	0.62**	0.08	1.00			
全钾	0.31	-0.40	-0.27	-0.38	-0.38	0.19	1.00		
速效钾	0.27	-0.11	0.11	-0.10	-0.33	0.31	0.74**	1.00	
CEC	-0.12	0.64**	0.61**	0.52*	0.26	0.14	-0.69**	-0.08	1.00

注: \*表示显著性相关,  $p < 0.05$ , \*\*表示极显著相关,  $p < 0.01$ 。

有机质是土壤中氮、磷的重要来源, 因此, 有机质与氮、磷元素的相关性明显; 有机质与钾元素之间呈负相关关系。有机质与速效养分之间呈极显著正相关, 有机质的分解产物可以增加土壤溶液的酸度, 提高土壤中水解氮、有效磷等速效养分的有效性。综上可知, 有机质与氮、磷、钾等养分不仅是土壤肥力的重要物质基础, 也是评价土壤肥力的关键性指标。各指标之间的相关性说明其存在着消长协调性, 可以用来评价土壤肥力。

### 4.3. 不同森林植被类型下土壤肥力评价

根据主成分的累积贡献率达到 85% 为宜原则来提取其主成分, 获取主成分的主要信息, 从而降低观测的空间维数[6]。因子载荷矩阵中其绝对值越大, 表明该主成分上的载荷越大, 即对该主成分的影响越大[8]。通过选择方差最大化方法进行因子旋转, 运用 SPSS 软件对土壤 pH 值、有机质、全氮、水解氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾、CEC 等 9 项肥力指标进行主成分分析, 土壤肥力各指标与 6 个主成分的因子贡献率见表 4。

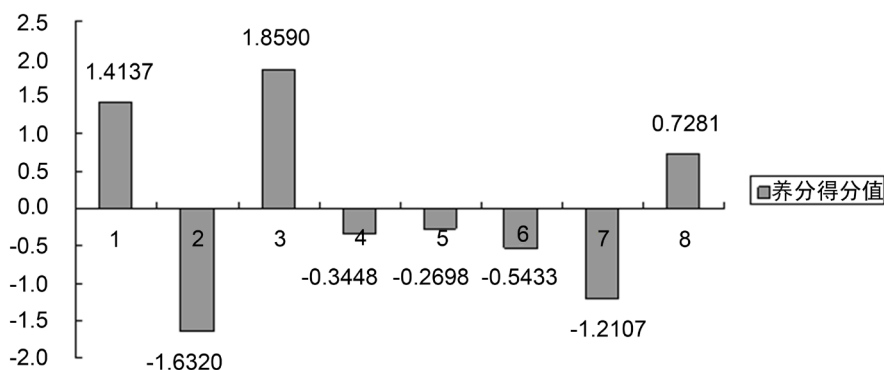
由表 4 可知, 土壤肥力各指标因子载荷量差异较明显, 其中对第一主成分的贡献率较大的因子为有机质(0.2414)和水解氮(0.2308), 对第二主成分贡献率较大的因子是有效磷(0.1969)和全钾(0.1880), 对第三主成分贡献率较大的因子是速效钾(0.2158)和全磷(0.2054), pH 值对第四主成分贡献率最大(-0.2824), 全氮对第五主成分贡献率最大(0.2516), CEC 对第六主成分的贡献率最大(-0.1950)。

根据表 4 中 6 个主成份的贡献率组建 6 个主成分方程, 以特征根为权, 把 6 个主成分加权综合(计算其线性加权之和的值), 得到不同森林植被类型下土壤肥力得分值(养分得分值)见图 2。从图 2 得分结果来看, 不同森林植被类型下土壤肥力评价得分从高到低排序为: 落叶阔叶林 > 常绿-落叶阔叶混交林 > 常绿阔叶林 > 竹林 > 灌丛 > 针阔混交林 > 马尾松林 > 黄山松林。落叶阔叶林下土壤肥力水平最优,

黄山松林下土壤肥力最差，这是由于落叶阔叶林下土壤有机质、全氮、水解氮以及 CEC 含量最多，林下土壤养分保持最高。

**Table 4.** Soil fertility indexes and the contribution rates of 6 principal components  
**表 4.** 土壤肥力指标与 6 个主成分的因子贡献率

指标项目	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分	第五主成分	第六主成分
pH 值	-0.1495	-0.1389	-0.1973	-0.2824	-0.2012	-0.1492
有机质	0.2414	0.1752	0.1882	0.2246	0.2378	0.1882
全氮	0.2279	0.1769	0.1785	0.1945	0.2516	0.1715
水解氮	0.2308	0.1853	0.1996	0.2137	0.2422	0.1936
全磷	0.2164	0.1648	0.2054	0.1761	0.1954	0.1386
有效磷	0.2081	0.1969	0.1829	0.1779	0.1761	0.1549
全钾	0.1992	0.1880	0.1931	0.2056	0.1968	0.1775
速效钾	0.2147	0.1805	0.2158	0.2642	0.2281	0.1834
CEC	0.1753	-0.1651	0.1659	0.2490	-0.2193	-0.1950



注：1-常绿阔叶林，2-常绿落叶阔叶混交林，3-落叶阔叶林，4-马尾松林，5-黄山松林，6-针阔混交林，7-竹林，8-灌丛。

**Figure 2.** Scores of soil fertility under different vegetations in Luhan  
**图 2.** 庐山不同森林植被类型下土壤肥力得分值

### 5. 结论与讨论

1) 对土壤肥力指标进行描述性统计分析可知，不同森林植被类型下土壤平均 pH 值为 4.3~5.8，竹林下土壤酸性最强；落叶阔叶林下土壤有机质、全氮、水解氮、全磷、有效磷、CEC 平均含量最高；常绿阔叶林下土壤全钾、速效钾平均含量最高。

2) 对土壤肥力各指标之间的相关性分析可知，有机质与全氮、水解氮、有效磷及 CEC 呈极显著正相关；全氮与水解氮、有效磷及 CEC 呈极显著正相关；全钾与速效钾呈极显著正相关；CEC 与水解氮呈显著正相关，与全钾呈极显著负相关。有机质与氮、磷、钾等指标之间的相关性说明其存在着消长协调性，对评价土壤肥力应具有一定的指导意义。

3) 对不同森林植被类型下土壤肥力进行评价可知，根据主成分的加权综合法计算，不同森林植被类型下土壤肥力水平从高到低排序为：落叶阔叶林 > 常绿 - 落叶阔叶混交林 > 常绿阔叶林 > 竹林 > 灌丛 > 针阔混交林 > 马尾松林 > 黄山松林。即落叶阔叶林下土壤肥力最优，黄山松林下土壤肥力最差。

4) 采用主成分分析法对土壤肥力进行数量化评价,取得了一定的效果,但是,土壤肥力评价选取的9项代表性的指标不够全面,对评价结果产生一定的影响。因此,该方法的适用性需要进一步改进和完善。

## 基金项目

江苏师范大学博士学位教师科研支持项目(19XFRS013)。

## 参考文献

- [1] 耿玉清. 北京八达岭地区森林土壤理化特征及健康指数的研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2006.
- [2] 刘东海, 梁国庆, 周卫, 等. 基于神经网络的土壤肥力综合评价[J]. 中国土壤与肥料, 2011(5): 12-19.
- [3] 宋苏苏, 黄林, 陈勇. 基于粗糙集的土壤肥力组合评价研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(12): 10-13.
- [4] 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.
- [5] 于寒青, 徐明岗, 吕家珑, 等. 长期施肥下红壤地区土壤熟化肥力评价[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1772-1778.
- [6] 谭小梅, 耿养会, 蒋宣斌, 等. 基于因子分析法的汝溪河流域不同植被类型土壤肥力评价[J]. 江西农业学报, 2014, 26(5): 14-18.
- [7] Yemefack, M., Jetten, V.G. and Rossiter, D.G. (2006) Developing a Minimum Data Set for Characterizing Soil Dynamics in Shifting Cultivation Systems. *Soil and Tillage Research*, **86**, 84-98.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.017>
- [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] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [10] 王纪杰. 桉树人工林土壤质量变化特征[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [11] 游秀花, 蒋尔可. 不同森林类型土壤化学性质的比较研究[J]. 江西农业大学学报, 2005, 27(3): 357-360.
- [12] 秦静, 孔祥斌, 姜广辉, 等. 北京典型边缘区 25 年来土壤有机质的时空变异特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 124-129.
- [13] 涂玉. 油松-辽东栎混交林地表凋落物和氮添加对土壤生物学性质的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [14] 李慧杰, 徐福利, 林云, 等. 施用氮磷钾对黄土丘陵区山地红枣林土壤酶与土壤肥力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 53-59.
- [15] 沈文森. 北京低山地区人工林土壤质量的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [16] 陈雪, 马履一, 贾忠奎, 等. 影响油松人工林土壤质量的关键指标[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(8): 46-51.