

南亚热带红椎和湿地松人工林土壤肥力的灰色关联度分析*

吴 琰¹ 莫云豹² 易小青¹ 肖石红¹
高常军¹ 魏 龙¹ 蔡 坚¹ 徐 放¹ 潘 文¹

(1. 广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520; 2. 广东省林业科技推广总站, 广东 广州 510173)

摘要 为确定红椎 (*Castanopsis hystrix*) 和湿地松 (*Pinus elliottii*) 人工林的土壤肥力状况, 选择土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、水解性氮、速效磷和速效钾作为土壤肥力评价指标, 运用灰色关联度分析方法定量分析红椎纯林、红椎—湿地松混交林和湿地松纯林的土壤肥力, 并进行综合排序。结果表明随着土层深度增加, 有机质、全氮、水解性氮、速效磷和速效钾含量大体呈减小趋势, 而 pH 值、全磷和全钾含量在不同土层中无显著性差异; 红椎纯林在综合评估模型中得分最高, 土壤肥力最好, 红椎—湿地松混交林次之, 湿地松纯林最差。

关键词 红椎; 湿地松; 土壤肥力; 灰色关联度

中图分类号: S714.8 文献标识码: A 文章编号: 2096-2053 (2017) 06-0008-07

Grey Correlative Degree Analysis of Soil Fertility of *Castanopsis hystrix* and *Pinus elliottii* Plantations in South Subtropics

WU Yan¹ MO Yunbao² YI Xiaoqing¹ XIAO Shihong¹
GAO Changjun¹ WEI Long¹ CAI Jian¹ XU Fang¹ PAN Wen¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. Guangdong Provincial Forestry Technology Extension Station, Guangzhou, Guangdong 510173, China)

Abstract To determine the soil fertility of pure *Castanopsis hystrix* forest, *C. hystrix* – *Pinus elliottii* mixed forest and pure *P. elliottii* forest in the south subtropical area, soil pH values, organic matter, total nitrogen, total phosphate, total potassium, hydrolysable nitrogen, available phosphate, and available potassium was chosen as evaluation indicators. Soil fertility was analyzed by grey correlative degree analysis, and ranked by correlation degrees comprehensively. The results indicated that the contents of organic matter, total nitrogen, hydrolysable nitrogen, available phosphate and available potassium had decline tendency with the increase of soil layer depth, while pH value, the content of total phosphate and total potassium have no difference in five different soil layers. The grey correlative degree analysis shows the best soil fertility was observed in pure *C. hystrix* forest, followed

* 基金项目: 广东省省级科技计划项目“珍贵树种培育创新团队建设”(2016B070701008); 广东省林业科技创新项目“风电建设对森林生态系统的影响评价”(2017KJCX038); 国家林业局平台运行补助项目“广东沿海防护林生态系统国家定位观测研究站运行补助”(2017-LYPT-DW-069)。

第一作者: 吴琰 (1986—), 男, 助理研究员, 主要从事森林生态学和森林经理学研究, E-mail: iy860814@sina.com。

通信作者: 魏龙 (1976—), 男, 高级工程师, 主要从事森林生态学研究, E-mail: weilong@sinogaf.cn。

肖石红 (1986—), 女, 助理研究员, 主要从事森林生态学和森林经理学研究, E-mail: shihong114@126.com。

by *C. hystrix*–*P. elliottii* mixed forest, and pure *P.elliottii* forest has poorest soil fertility status.

Key words *Castanopsis hystrix*; *Pinus elliottii*; soil fertility; grey correlation model

土壤作为林木生长的重要基质，不仅为林木生长提供必需的养分，而且影响林木生长发育，进而对木材的材质产生较大影响^[1]。同时，林木在其生长发育过程中也能通过根系分泌物和凋落物等改变土壤的理化性质，从而影响林木的生长发育^[2]。红椎（*Castanopsis hystrix*）具有生长快、材质优和适应性强等特性，是优良的珍贵阔叶用材树种，广西省、云南省、福建省和广东省等省份为红椎天然分布及主要栽培区^[3]。湿地松（*Pinus elliottii*）是一种优良的脂材两用树种，并且具有生长快的特点，现已成为我国南方丘陵区主要的造林树种之一，是理想的生态防护林和混交造林树种^[4]。

近年来，许多国内学者采用模糊数学法、层次分析法、主成分分析法、系统评价模型、灰色关联度等方法进行土壤肥力综合评价^[5-8]。李惠通等^[6]运用主成分分析方法和模糊数学评价方法分析了不同发育阶段杉木（*Cunninghamia lanceolata*）人工林土壤肥力，计算出土壤肥力综合指数。李静鹏等^[7]采用典范对应分析和因子分析对不同植被恢复类型的土壤肥力质量进行定量评价。邓小军等^[9]运用 Nemrow 法对桉树（*Eucalyptus robusta*）、马尾松（*Pinus massoniana*）和杉木林土壤肥力综合指数进行评价。虽然土壤肥力评价已引起关注，但有关红椎和湿地松土壤肥力综合评价工作较为缺乏。因此，本研究以红椎纯林、湿地松纯林以及红椎—湿地松混交林为研究对象，对 3 种林分的土壤肥力状况进行研究，并采用灰色关联度分析方法对其土壤肥力进行比较和评价，以期对红椎和湿地松人工林土壤保育、立地维护和可持续经营提供理论依据。

1 研究区概况

试验地设在广东省西江林业局所管辖的通门林场、云浮市国有水台林场和阳春市春湾镇爱国村。研究区属于亚热带海洋性季风气候，年平均气温 22℃，极端最高温度 38.2℃，极端最低温度 23℃，年降雨量 1 600~2 400 mm，雨量充沛，光照充足，年均相对湿度在 82% 左右。立地条件优

越，林地均为低山丘陵，海拔 50~450 m。林地土壤为以花岗岩、页岩发育而成的赤红壤，土层厚度 80~120 cm，腐殖质较薄，土壤呈酸性。

2 研究方法

2.1 样地选择与土样采集

在研究区内，分别选择有代表性且立地条件相似的红椎纯林、湿地松纯林和红椎—湿地松混交林（混交比例为 1:3）各设置 20 m×20 m 的标准样地 3 个。于 2017 年 4 月调查样地的立地条件，对样地内乔木层进行每木检尺，样地基本信息见表 1。样地内分层（0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~100 cm）采集土壤样品，土壤各层沿样地对角线取 3 个采样点，并把同一标准样地同一层次土壤等质量混合，供室内分析测定土壤肥力指标。

表 1 样地基本信息

Tab.1 Summary information of sampling plots

林分类型 Forest type	纬度 Latitude	经度 Longitude	海拔 Altitude/ m	坡度 Slope
红椎纯林 Pure <i>Castanopsis hystrix</i> forest	22° 58' N	111° 22' E	425	45°
红椎—湿地松 混交林 <i>C.hystrix</i> – <i>Pinus elliottii</i> mixed forest	22° 28' N	112° 00' E	60	26°
湿地松纯林 Pure <i>P. elliottii</i> forest	22° 36' N	112° 29' E	150	22°

2.2 测定指标与测定方法

土壤主要测定 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、水解性氮、速效磷、速效钾等 8 个指标，测定方法参照鲁如坤^[10]的分析方法进行。

2.3 分析方法

本研究基于灰色系统关联度理论^[11]，选择 5 个层次（0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~100 cm）的土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、水解性氮、速效磷和速效钾等 8 个指标作为土壤质量评价指标，并以此为基础构建土壤质量综合评价模型，根据关联度大小进行关联

排序。

(1) 参考数列

以各土壤指标的最优值构成参考数列,以不同层次土壤各指标的测定值构成比较数列。

参考数列为:

$$x_0(k) = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\}$$

比较数列为:

$$x_i(k) = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\}$$

其中, $k=1, 2, \dots, n$, n 为测定土壤指标数 ($n=8$); $i=1, 2, \dots, m$, m 为测定林分类型数 ($m=3$)。

(2) 土壤指标的无量纲化

将各土壤指标的测定值转化为评价价值,对原始测量数据进行无量纲化处理,用测定值除以参考值,所得的商为 0~1 之间的无量纲值,以达到量纲一致。

(3) 关联系数

用下列公式计算各参比因子的灰色关联度系数 $\varepsilon_i(k)$:

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \frac{\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}}{\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \frac{\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}} \dots (1)$$

式中, $\varepsilon_i(k)$ 为 x_0 与 x_i 在第 k 点的关联度系数; $|x_0(k) - x_i(k)|$ 为 x_0 数列与 x_i 数列在 k 点的绝对值; $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为因素 i 在点 k 的最小绝对值,也称二级最小差; $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为二级最大差; ρ 为分辨系数,其取值范围在 0~1 之间,本研究取 $\rho=0.5$ 。

根据 $\varepsilon_i(k)$ 求出不同林分类型土壤肥力的等权关联度 γ_i :

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \dots (2)$$

式中, n 为土壤肥力指标的总数, $n=8$ 。

(4) 指标权重

根据式 (2) 中计算得到的不同林分类型土壤肥力的等权关联度 γ_i , 运用判断矩阵法确定各评价指标的权重, 构建判断矩阵, 并做一致性检验, 最终确定各土壤肥力指标的权重 $W_i(k)$:

$$W_i(k) = \frac{\gamma_i}{\sum \gamma_i} \dots (3)$$

(5) 加权关联度

根据不同林分类型各土壤肥力指标的灰色关联度系数 $\varepsilon_i(k)$ 和权重 W_i , 计算不同林分类型土壤肥力的加权关联度 γ_i' :

$$\gamma_i' = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k) \cdot W_i \dots (4)$$

2.4 数据处理

本研究中数据采用 Microsoft excel 2007 进行统计和处理, 运用 SPSS 21.0 软件的单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和最小差异法 (LSD) 进行差异显著性比较, 差异显著性水平设定为 0.05。

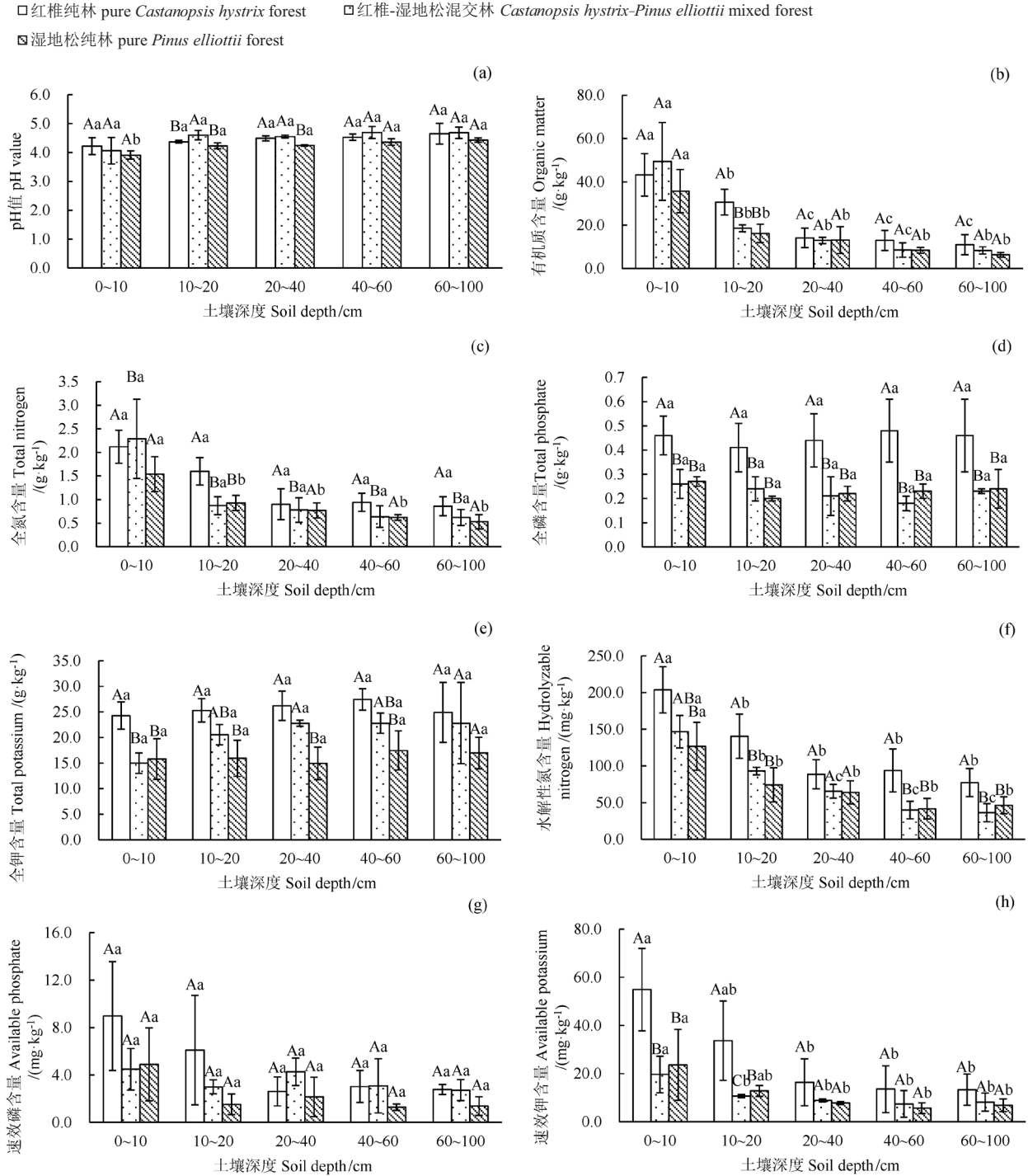
3 结果与分析

3.1 不同林分类型土壤肥力指标分析

不同林分类型土壤各肥力指标分析结果见图 1。红椎纯林、红椎—湿地松混交林和湿地是纯林土壤 pH 值分别为 4.37~4.65、4.06~4.69 和 3.91~4.43, 不同林分类型和不同层次之间土壤 pH 值差异不显著; 随着深度的增加, 3 种林分土壤有机质含量大体呈减小的趋势, 且 0~10 cm 土壤均显著高于其他层次 ($P<0.05$), 红椎纯林 10~20 cm 土壤有机质含量高于另外 2 种林分; 土壤全氮含量也随深度的增加而减小; 红椎纯林各层次土壤全磷含量显著高于另外 2 种林分类型 ($P<0.05$), 同一林分不同层次之间土壤全磷含量差异不显著; 不同林分土壤各层次全钾含量差异未达到显著水平, 红椎纯林各层次土壤全钾含量均高于红椎—湿地松混交林和湿地松纯林; 随着深度的增加, 3 种林分土壤水解性氮含量大体呈减小趋势, 红椎纯林各层次土壤水解性氮含量均高于另外 2 种林分; 不同林分不同层次土壤速效磷含量均不显著; 各林分土壤大致表现为速效钾含量随深度的增加而减小, 相对于另外 2 种林分, 红椎纯林土壤速效钾含量更高。

3.2 土壤肥力指标的无量纲化和关联系数

根据灰色系统理论要求, 将 3 种林分类型土壤的 8 个指标视为一个整体, 在土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、水解性氮、速效磷和速效钾等 8 个指标中, 根据林木对土壤养分的需求特点, 8 个指标均选择其数值最大为最优, 构成最优指标集, 各层最优指标集分别为 $x_1(k)=\{4.22, 49.52, 2.29, 0.46, 24.28, 203.79, 8.97,$



注：图柱中数据为平均值 ± 标准差，不同大写字母表示同一土壤层次不同森林类型之间的差异达到显著水平 ($P < 0.05$)，不同小写字母表示同一森林类型不同土壤层次之间的差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。Note: the data in the column chart is average ± standard deviation, different capital letters indicate the differences between the same soil layers of different forest types reached significant level ($P < 0.05$), different lowercase letters indicate the differences between the same forest type in different soil layers reached significant level ($P < 0.05$).

图 1 不同林分类型土壤肥力指标

Fig. 1 Measured values of soil fertility indexes

54.88}, $x_2(k) = \{4.60, 30.66, 1.60, 0.41, 25.30, 0.44, 26.19, 88.67, 4.27, 16.40\}$, $x_4(k) = \{4.69, 140.38, 6.10, 33.66\}$, $x_3(k) = \{4.55, 14.14, 0.90, 12.98, 0.94, 0.48, 27.44, 93.90, 3.08, 13.52\}$,

$x_5(k)=\{4.68, 10.99, 0.86, 0.46, 24.90, 77.23, 2.77, 13.34\}$ 。对不同林分不同层次土壤各测定指标作无量纲化处理, 结果见表 2, 并根据公式计算土壤肥力的灰色关联度系数(表 3)。

表 2 土壤肥力指标的无量纲化
Tab. 2 Dimensionlessness of soil fertility indexes

林分类型 Forest type	土壤深度 Soil depth / cm	pH 值 pH value	有机质 Organic matter	全氮 Total phosphate	全磷 Total phosphate	全钾 Total potassium	水解性氮 Hydrolyz- able nitro- gen	速效磷 Available phosphate	速效钾 Available potassium
红椎纯 林 Pure <i>C. hystrix</i> forest	0~10	1.000	0.874	0.925	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	10~20	0.951	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	20~40	0.987	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.612	1.000
	40~60	0.966	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.981	1.000
	60~100	0.994	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
红椎—湿地 松混交林 <i>C. hystrix</i> – <i>P. elliotii</i> mixed forest	0~10	0.962	1.000	1.000	0.561	0.617	0.720	0.500	0.358
	10~20	1.000	0.606	0.548	0.584	0.811	0.663	0.490	0.316
	20~40	1.000	0.917	0.861	0.476	0.870	0.737	1.000	0.539
	40~60	1.000	0.657	0.683	0.373	0.830	0.424	1.000	0.548
	60~100	1.000	0.760	0.728	0.502	0.916	0.468	0.978	0.609
湿地松纯林 Pure <i>P. el- liottii</i> forest	0~10	0.927	0.722	0.671	0.589	0.650	0.622	0.545	0.430
	10~20	0.919	0.529	0.582	0.497	0.629	0.528	0.250	0.380
	20~40	0.933	0.930	0.849	0.490	0.570	0.721	0.504	0.473
	40~60	0.930	0.647	0.660	0.474	0.636	0.443	0.415	0.415
	60~100	0.946	0.575	0.614	0.516	0.681	0.600	0.494	0.514

表 3 土壤肥力指标的关联度系数
Tab. 3 Correlative coefficient of soil fertility indexes

林分类型 Forest type	土壤深度 Soil depth / cm	pH 值 pH value	有机质 Organic matter	全氮 Total phosphate	全磷 Total phosphate	全钾 Total potassium	水解性氮 Hydrolyzable nitrogen	速效磷 Available phosphate	速效钾 Available potassium
红椎纯 林 Pure <i>C. hystrix</i> forest	0~10	1.000	0.718	0.812	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	10~20	0.867	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	20~40	0.963	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.469	1.000
	40~60	0.917	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.951	1.000
	60~100	0.985	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
红椎—湿 地松混 交林 <i>C. hystrix</i> – <i>P. elliotii</i> mixed forest	0~10	0.894	1.000	1.000	0.423	0.456	0.534	0.391	0.333
	10~20	1.000	0.449	0.415	0.436	0.630	0.488	0.386	0.320
	20~40	1.000	0.805	0.711	0.395	0.724	0.565	1.000	0.426
	40~60	1.000	0.522	0.542	0.374	0.688	0.395	1.000	0.453
	60~100	1.000	0.610	0.580	0.430	0.817	0.414	0.945	0.490
湿地松纯 林 Pure <i>P. elliotii</i> forest	0~10	0.814	0.536	0.494	0.439	0.478	0.460	0.414	0.360
	10~20	0.798	0.405	0.434	0.390	0.464	0.405	0.300	0.341
	20~40	0.835	0.830	0.694	0.401	0.443	0.551	0.408	0.394
	40~60	0.843	0.515	0.525	0.416	0.507	0.402	0.391	0.391
	60~100	0.874	0.469	0.493	0.436	0.541	0.484	0.426	0.436

3.3 综合评价模型的构建

在各土壤肥力指标重要性相同的情况下，需计算出各指标的等权关联度，才能直接用于评价不同林分类型土壤肥力的高低，而不同土壤层次各指标实际的重要性不同，因此，本研究采用判断矩阵法确定各土壤肥力指标的权重，并根据权重公式计算各指标对应的具体赋值，赋予 5 个土壤层次各土壤肥力指标不同的权重（表 4）。

加权关联度值可以比较客观、真实地反映出

被评价土壤指标与最优指标集之间的差异，关联度值越大，表明该模式与最优指标值相似程度越高，反之则越低。不同林分类型土壤肥力的灰色关联度值和排序如表 5 所示。由表 5 可知，本研究中 3 种林分类型灰色关联度值大小排列顺序为：红椎纯林（0.965）> 红椎—湿地松混交林（0.658）> 湿地松纯林（0.528），表明红椎纯林土壤肥力最高，红椎—湿地松混交林次之，湿地松纯林土壤肥力最差。

表 4 土壤肥力指标的权重
Tab. 4 Weight of soil fertility indexes

土壤深度 Soil depth / cm	pH 值 pH value	有机质 Organic matter	全氮 Total phosphate	全磷 Total phosphate	全钾 Total potassium	水解性氮 Hydrolyzable nitrogen	速效磷 Available phosphate	速效钾 Avail- able potassium
0~10	0.032	0.027	0.027	0.022	0.023	0.024	0.021	0.020
10~20	0.032	0.022	0.022	0.022	0.025	0.023	0.020	0.020
20~40	0.033	0.031	0.029	0.021	0.026	0.025	0.022	0.022
40~60	0.033	0.024	0.025	0.021	0.026	0.021	0.028	0.022
60~100	0.034	0.025	0.025	0.022	0.028	0.023	0.028	0.023

表 5 不同林分类型土壤加权关联度
Tab. 5 Correlation degree of soil fertility in different forest types

林分类型 Forest type	综合评价值 Comprehensive evaluation value	排名 Rank
红椎纯林 Pure <i>C. hystrix</i> forest	0.965	1
红椎—湿地松混交林 <i>C. hystrix</i> - <i>P. elliotii</i> mixed forest	0.658	2
湿地松纯林 Pure <i>P. elliotii</i> forest	0.528	3

4 结论与讨论

土壤肥力是土壤生态系统物理、化学性质和生物组分之间的综合体现，可以反映土壤为植物生长提供和协调养分的能力^[12]。土壤肥力质量在不同的林分类型中表现出不同的差异。酸碱度是土壤重要的化学性质，酸碱度的高低直接影响着植物生长、土壤养分循环和微生物活动等^[13]，研究区土壤 pH 值在 3.91~4.69，不同林分类型和不同深度土壤 pH 值不同，但其差异性并不显著。土壤有机质、全氮、水解性氮、速效磷和速效钾含量随深度的增加而减小，说明土壤养分具有明显的表聚效应，这与吴永铃等^[14]、周德明等^[15]、杨晓娟等^[16]的研究结论一致。一般情况下，土层越深，土壤微环境越差，对植物根系生长、土壤动物和微生物活动不利，使得其碳、氮、磷等养分

含量也越少^[17]。

本研究灰色关联度分析结果显示，红椎纯林、红椎—湿地松混交林和湿地松纯林土壤肥力综合评价值分别为 0.965、0.658 和 0.528，红椎纯林土壤肥力最好，红椎—湿地松混交林次之，这与国内其他地区的相关研究相符^[16]。相关研究表明，土壤肥力除与土壤理化性质相关外，还与林地凋落物蓄积量和分解状况有关^[18-19]，常绿阔叶林和针阔混交林凋落物蓄积量较大，且凋落物更易分解，能提高林地养分含量，有效改善土壤性质，从而维持和提高土壤肥力^[20]。土壤肥力受土壤理化性质、酶活性和微生物数量等诸多因素共同影响，在今后的研究中，应加大对土壤肥力影响因素的机理研究，为提高红椎和湿地松人工林的总体经营水平提供理论依据。

参考文献

- [1] BLOOR J M G, BARDGETT R D. Stability of above-ground and below-ground processes to extreme drought in model grassland ecosystems: Interactions with plant species diversity and soil nitrogen availability[J]. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, 2012, 14(3): 193-204.
- [2] WOOD T E, LAWRENCE D, CLARK D A. Determinants of Leaf Litter Nutrient Cycling in a Tropical Rain Forest: Soil Fertility Versus Topography[J]. *Ecosystems*, 2006, 9(5): 700-710.
- [3] 唐继新, 白灵海, 郭文福, 等. 红椎人工林生长规律的初步研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(4): 51-54.
- [4] 胡继文, 代莹, 李振, 等. 加勒比松、湿地松苗期生长及叶绿素荧光特性[J]. *林业与环境科学*, 2017, 33(4): 1-8.
- [5] 赵振亚, 姬宝霖, 宋小园, 等. 基于层次分析和模糊数学法的公乌素土壤质量评价[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(6): 1010-1016.
- [6] 李惠通, 张芸, 魏志超, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤肥力分析[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(2): 322-328.
- [7] 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.
- [8] 魏志远, 孙娟, 李松刚, 等. 海南中西部荔枝园土壤肥力的灰色关联度评价[J]. *热带作物学报*, 2013, 34(10): 1883-1887.
- [9] 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.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] 郑敏娜, 李荫藩, 梁秀芝, 等. 晋北地区引种苜蓿品种的灰色关联度分析与综合评价[J]. *草地学报*, 2014, 22(3): 631-637.
- [12] 沈德才, 陈跃洲, 周永东, 等. 东莞林地土壤肥力空间异质性分析[J]. *林业与环境科学*, 2014, 30(5): 1-6.
- [13] Viani R A G, Rodrigues R R, Dawson T E, et al. Soil pH accounts for differences in species distribution and leaf nutrient concentrations of Brazilian woodland savannah and seasonally dry forest species[J]. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, 2014, 16(2): 64-74.
- [14] 吴永铃, 王兵, 赵超, 等. 杉木人工林不同发育阶段土壤肥力综合评价研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(1): 69-75.
- [15] 周德明, 马玉莹, 梅杰. 不同林龄杉木林地土壤特性分析[J]. *土壤通报*, 2012(2): 353-356.
- [16] 杨晓娟, 王海燕, 刘玲, 等. 吉林省东部低山丘陵区4种林分类型林地的土壤肥力分析[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(4): 142-148.
- [17] 谭长强, 彭玉华, 申文辉, 等. 广西都安地区5种森林类型土壤机械组成及其肥力比较[J]. *生态科学*, 2017, 36(2): 119-125.
- [18] WANG Q K, WANG S L. Soil microbial properties and nutrients in pure and mixed Chinese fir plantations[J]. *Journal of Forestry Research*, 2008, 19(2): 131-135.
- [19] PAN K W, XU Z H, BLUMFIELD T, et al. In situ mineral ^{15}N dynamics and fate of added $^{15}\text{NH}_4^+$ in hoop pine plantation and adjacent native forest in subtropical Australia[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2008, 8(6): 398-405.
- [20] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2479-2486.