

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230122

大别山山核桃林地土壤养分特征及肥力评价

姚熠涵^{1#}, 代英超^{2#}, 王卫国³, 朱先富⁴,
陈涛梅¹, 周鑫洋¹, 夏国华^{1*}

(1. 浙江农林大学林业与生物技术学院 浙江省森林芳香植物康养功能研究重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 浙江清凉峰国家级自然保护区管理局, 浙江 临安 311300; 3. 杭州市临安区青山湖国家森林公园管理局, 浙江 临安 311300; 4. 金寨县富东生态农业开发有限公司, 安徽 六安 237341)

摘要: [目的] 探明大别山山核桃主产区林地土壤肥力状况, 为大别山山核桃林地土壤管理和科学施肥提供依据。[方法] 在金寨县、霍山县、罗田县大别山山核桃主产区采集土壤样本 88 个, 以 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾为评价指标, 应用模糊综合评判法对土壤肥力进行评价, 分析其含量及变异情况。[结果] 大别山山核桃林区土壤 pH 平均值为 5.19; 土壤有机质、全磷、碱解氮、有效磷含量整体丰富, 均值分别为 $53.11 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.99 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $179.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $21.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮平均值为 $1.02 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 含量中等, 全钾和速效钾含量相对缺乏, 均值为 $8.24 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $71.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。大别山山核桃林地土壤肥力综合指标值 (IFI) 均值为 0.61, II 和 III 级土壤均占 50.00%。主成分分析表明, 有机质、碱解氮、全磷、有效磷、pH 和全钾是影响土壤综合肥力的最主要因素。[结论] 大别山山核桃林地土壤综合肥力总体较高, 有机质、碱解氮、磷素含量丰富, pH 值呈酸性, 钾素缺乏, 土壤管理上应改良土壤提高 pH 值, 增施钾肥、保持磷肥和减少氮肥使用。

关键词: 大别山山核桃; 土壤养分; 土壤肥力综合指标值; 主成分分析

中图分类号: S158.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2023)05-0180-09

土壤是植物生长代谢必不可少的物质基础, 其性质与结构受气候、母质类型、地形、生物、人类活动等因素的影响^[1]。土壤肥力是植物与生长环境相协调的产物, 由土壤各基本属性共同反应而成, 能供给植物生长所需的各种养分和水分^[2-3], 植物生长发育以及果实产量和品质直接受土壤肥力高低影响^[4], 因此对土壤肥力的空间异质性和分布规律进行合理分析和客观评价, 才能科学合理地施肥, 进一步提高果实的产量及品质。

大别山山核桃 (*Carya dabieshanensis* M. C Liu & Z. J. Li) 属胡桃科 (Juglandaceae) 山核桃属 (*Carya* Nutt.), 是我国特有干果和木本油料树

种^[5], 特产于皖豫鄂三省交界的大别山区 ($29\sim 31^\circ \text{N}$, $115\sim 116^\circ \text{E}$), 主要包括安徽金寨县、霍山县, 湖北罗田县和河南商城县等地。前人对大别山山核桃的分类学、坚果表型和油脂组分、遗传多样性进行系统研究^[6-9], 但对土壤养分的研究较少, 缺乏合理有效的施肥方案。研究表明土壤肥力指标能够反映土壤养分状况、植物吸收养分能力以及环境对植物的影响, 苗庆选^[10]等分析了不同生态区核桃林地土壤全氮、有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量等肥力特征的差异; 杨慧思^[11]等探讨了氮、磷、钾等影响山核桃林地土壤肥力的因子; 袁紫倩^[12]等对山核桃林地土壤有机质、碱解

收稿日期: 2023-03-24 修回日期: 2023-07-24

基金项目: 安徽省科技厅长三角科技创新联合攻关专项 (202004G01020005); 浙江省农业 (果品) 新品种选育重大科技专项 (2021C02066-12); 浙江省科技厅科技援助项目 (2020C26007) 资助

#共第一作者: 姚熠涵, 代英超。

* 通讯作者: 夏国华, 副教授, 主要研究方向: 林业, E-mail: zjfc_gxia@126.com

氮、有效磷、速效钾等进行主成分分析, 探明了影响山核桃品质的土壤主要养分元素。本试验以大别山山核桃主产区金寨县、霍山县、罗田县的 10 个乡镇共 88 个土壤样品为研究对象, 通过测量土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾 8 个土壤肥力指标, 解析土壤肥力状况, 利用模糊数学隶属函数来计算土壤肥力综合指数 (IFI), 综合客观评价土壤肥力, 以期为大别山山核桃林地土壤高效管理和科学施肥提供依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区域包括安徽金寨县、霍山县以及湖北省罗田县, 属于北亚热带湿润季风气候, 金寨县年平均气温 15.6 °C, 极端最高气温 41.7 °C, 极端最低气温 -13.9 °C, 无霜期平均 228 d, 年平均降雨量 1 400 mm; 霍山县年平均气温 15.0 °C, 极端最高

气温 43.0 °C, 极端最低气温 -17.0 °C, 无霜期平均 220 d, 年平均降雨量 1 366 mm; 罗田县年平均气温 16.4 °C, 极端最高气温 41.6 °C, 极端最低气温 -14.6 °C, 无霜期平均 240 d, 年平均降雨量 1 330 mm。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 样品采集 土壤样品采集位置见表 1, 分别为安徽省金寨县的吴家店镇、果子园乡、古碑镇、关庙乡、沙河乡、燕子河镇、长岭乡、天堂寨镇, 霍山县的太阳乡和湖北省罗田县的九资河镇。根据大别山山核桃投产林的分布情况确定采样林分, 每个林分根据面积确定采样数量, 在林分中按“S”形路径布点, 采样深度为 0~30 cm, 采用四分法去除作物残体和杂物后留取 1 kg 土样, 并记录采样位置、日期等信息。土壤样品带回实验室风干、磨碎、过筛后用塑料封口袋密封后置于 4 °C 冰箱避光保存备用。

表 1 大别山山核桃主产区林地土壤采样情况

Table 1 Soil sampling of forest land in main production area of *C. dabieshanensis*

编号 Number	乡镇 Towns	纬度(N) Latitude/(°)	经度(E) Longitude/(°)	海拔 Altitude/m	取样数/(份) Sample number
JGM	安徽省金寨县关庙乡	31°30'19.3"~31°28'23.6"	115°25'20.8"~115°22'53.3"	528~827	11
JWJD	安徽省金寨县吴家店镇	31°09'17.3"~31°13'59.2"	115°35'00.1"~115°38'42.8"	654~806	9
JSH	安徽省金寨县沙河乡	31°20'40.7"~31°22'11.0"	115°23'06.0"~115°28'51.7"	450~825	18
JTTZ	安徽省金寨县天堂寨镇	31°15'13.0"	115°50'53.6"	644~691	6
JGZY	安徽省金寨县果子园乡	31°19'49.6"	115°39'17.0"	658~754	4
JGB	安徽省金寨县古碑镇	31°19'54.0"~31°19'57.0"	115°46'35.0"~115°47'58.5"	583~920	11
JYZH	安徽省金寨县燕子河镇	31°16'14.9"~31°21'15.2"	115°49'43.5"~116°02'31.4"	559~720	13
JCL	安徽省金寨县长岭乡	31°08'59.6"	115°55'45.9"	722~752	4
HTY	安徽省霍山县太阳乡	31°07'38.0"	116°10'27.2"	664~870	5
LJZH	湖北省罗田县九资河镇	31°10'12.7"	115°36'10.7"	887~929	7

1.2.2 测定方法 土壤 pH 值采用电位法; 有机质含量采用外加热法; 全氮含量采用半微量凯氏法; 土壤碱解氮含量采用碱解扩散法; 全磷和有效磷含量采用钼锑抗比色法; 土壤全钾和速效钾含量采用火焰光度法^[13]。

1.3 评价方法

大别山山核桃林地土壤各肥力指标评价分级标准根据第二次全国土壤普查并依据有关资料制定 (表 2), 同时参考前人的研究成果^[14-16], 构建林

地土壤综合肥力评价指标体系。

1.3.1 评价指标权重的确定 不同肥力指标的权重 W_i 通过 pearson 相关分析法确定, 公式如下:

$$W_i = \frac{r_{ij}}{\sum r_{ij}}, \text{ 其中, } r_{ij} \text{——第 } i \text{ 个土壤肥力指}$$

标与其他指标间相关系数的均值。

1.3.2 评价指标隶属度的确定 结合实际土壤状况, 确定大别山山核桃林地土壤肥力各评价指标的隶属度函数拐点的取值 (表 3)。并计算出各项肥

表 2 土壤养分分级标准

Table 2 Classification standards of soil nutrient status

指标 Target	等级 Grade					
	强酸性/极丰富 Strong acidity/ Extremely rich	酸性/丰富 Acidity/ Rich	弱酸性/中等 Faintly acid/ Moderate	中性/缺乏 Neutral/ Poor	弱碱性/很缺乏 Weakly alkaline/ Very poor	碱性/极缺乏 Basicity/ Extremely poor
pH	<4.5	4.5~5.5	5.5~6.5	6.5~7.5	7.5~8.5	>8.5
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	>40	30~40	20~30	10~20	6~10	<6
全氮 Total N/(g·kg ⁻¹)	>2	1.5~2	1~1.5	0.75~1	0.5~0.75	<0.5
全磷 Total P/(g·kg ⁻¹)	>1	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	<0.2
全钾 Total K/(g·kg ⁻¹)	>25	20~25	15~20	10~15	5~10	<5
碱解氮 Available N/(mg·kg ⁻¹)	>150	120~150	90~120	60~90	30~60	<30
有效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	>40	20~40	10~20	5~10	3~5	<3
速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)	>200	150~200	100~150	50~100	30~50	<30

表 3 隶属函数曲线拐点取值

Table 3 Value of inflection point of membership function curve

转折点 Turning point	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)
X ₁	4.5	6	0.5	0.2	5	30	3	30
X ₂	5.5	40	2	1	25	150	40	200
X ₃	6.5							
X ₄	7.5							

力指标的隶属度值 N 。pH 值采用峰值型隶属度函数，有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾采用戒上型隶属度函数。

峰值型隶属度函数：

$$Ni = f(x) = \begin{cases} 0.1 (x \leq x_1 \text{ 或 } x \geq x_4) \\ 0.1 + \frac{0.9(x - x_1)}{x_2 - x_1} (x_1 < x_1 < x_2) \\ 1.0 (x_2 \leq x \leq x_3) \\ 1.0 - \frac{0.9(x - x_3)}{x_4 - x_3} (x_3 < x < x_4) \end{cases}$$

戒上型隶属度函数：

$$Ni = f(x) = \begin{cases} 0.1 (x \leq x_1) \\ 0.1 + \frac{0.9(x - x_1)}{x_2 - x_1} (x_1 < x < x_2) \\ 1.0 (x \geq x_2) \end{cases}$$

其中， x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 分别为相应函数的拐点取值。

1.3.3 土壤综合肥力评价 土壤肥力综合指数：

$IFI = \sum_{i=1}^n NiWi$ ，其中， Wi ——第 i 个土壤肥力指标的权重， Ni ——第 i 个土壤肥力指标的隶属度。

结合大别山山核桃林地土壤的实际情况，本研

究采用等间距法将林区土壤养分状况分为 5 个土壤肥力等级：IFI>0.80，I 级，土壤肥力水平高；0.6<IFI<0.8，II 级，土壤肥力水平较高；0.4<IFI<0.6，III 级，土壤肥力水平中等；0.2<IFI<0.4，IV 级，土壤肥力水平较低；IFI<0.2，V 级，土壤肥力水平低。IFI 取值在 0 到 1 之间，值越接近 1，代表土壤肥力越好。

1.4 数据分析与处理

使用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 20.0 软件系统对样品数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤养分含量

2.1.1 土壤 pH 值 大别山山核桃林地土壤 pH 值介于 4.34~6.55，平均值为 5.19，属酸性土（表 2），变异系数为 7.32%（表 4）。不同乡镇间土壤 pH 差异不显著，除 JGZY（4.87）和 JGB（4.99）外，其余乡镇均大于 5.0。由图 1 可知，全区强酸性、酸性、弱酸性和中性土壤分别占 3.41%、71.60%、23.86% 和 1.14%，无弱碱性和碱性

表 4 大别山核桃林地土壤 pH、有机质和速效养分含量

Table 4 pH, organic matter and available nutrient contents of soil of *C. dabieshanensis* forest

乡镇 Town	土壤肥力指标 Soil fertility index							
	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)
JGM	5.18 ± 0.13 a	58.20 ± 6.97 ab	1.22 ± 0.16 ab	0.61 ± 0.09 b	9.04 ± 1.00 a	206.17 ± 20.43 abc	19.23 ± 5.65 ab	92.16 ± 5.82 a
JWJD	5.25 ± 0.11 a	58.73 ± 6.15 ab	0.76 ± 0.09 ab	1.09 ± 0.16 ab	8.34 ± 0.45 a	172.38 ± 12.33 bc	21.95 ± 3.21 ab	68.86 ± 6.59 abc
JSH	5.40 ± 0.10 a	67.47 ± 6.89 a	0.86 ± 0.08 ab	0.87 ± 0.13 ab	7.54 ± 0.42 a	226.70 ± 25.78 ab	20.11 ± 2.61 ab	82.69 ± 7.99 ab
JTTZ	5.35 ± 0.12 a	56.67 ± 5.69 ab	1.18 ± 0.19 ab	1.40 ± 0.05 a	8.32 ± 0.42 a	154.70 ± 21.34 bc	36.76 ± 7.31 a	68.56 ± 6.59 abc
JGZY	4.87 ± 0.24 a	44.36 ± 12.93 ab	1.24 ± 0.23 ab	1.26 ± 0.24 ab	6.91 ± 0.79 a	136.66 ± 54.60 bc	20.56 ± 6.99 ab	47.80 ± 12.18 c
JGB	4.99 ± 0.09 a	42.14 ± 5.60 ab	1.30 ± 0.11 a	0.93 ± 0.15 ab	9.37 ± 0.96 a	155.98 ± 11.23 bc	21.11 ± 5.01 ab	60.88 ± 6.22 abc
JYZH	5.14 ± 0.12 a	34.33 ± 3.49 b	0.89 ± 0.08 ab	1.35 ± 0.18 a	6.71 ± 0.68 a	116.37 ± 11.27 c	22.96 ± 3.82 ab	55.36 ± 6.01 bc
JCL	5.13 ± 0.02 a	64.56 ± 3.30 a	0.86 ± 0.09 ab	0.83 ± 0.17 ab	8.52 ± 1.43 a	274.96 ± 31.41 a	9.33 ± 3.41 b	85.24 ± 4.52 ab
HTY	5.22 ± 0.13 a	50.75 ± 10.37 ab	1.21 ± 0.29 ab	0.82 ± 0.28 ab	10.07 ± 1.85 a	180.60 ± 37.35 abc	17.79 ± 7.72 ab	84.71 ± 15.11 ab
LJZH	5.06 ± 0.11 a	50.22 ± 8.26 ab	0.98 ± 0.10 ab	0.96 ± 0.22 ab	8.93 ± 1.31 a	168.91 ± 34.59 bc	20.58 ± 7.36 ab	59.34 ± 5.52 bc
林区范围 Range of forest area	4.34~6.55	10.88~121.34	0.37~2.16	0.19~2.46	2.59~16.55	51.18~552.95	3.03~62.20	25.87~160.52
平均值 Mean	5.19	53.11	1.02	0.99	8.24	179.41	21.30	71.52
标准差 SD	0.38	23.30	0.42	0.54	2.66	82.20	14.91	26.70
变异系数 CV/%	7.32	43.87	40.78	54.37	32.34	45.82	70.00	37.34
级别 Grade	2级 (酸性)	1级 (极丰富)	3级 (中等)	2级 (丰富)	5级 (很缺乏)	1级 (极丰富)	2级 (丰富)	4级 (缺乏)

注: 不同小写字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$)

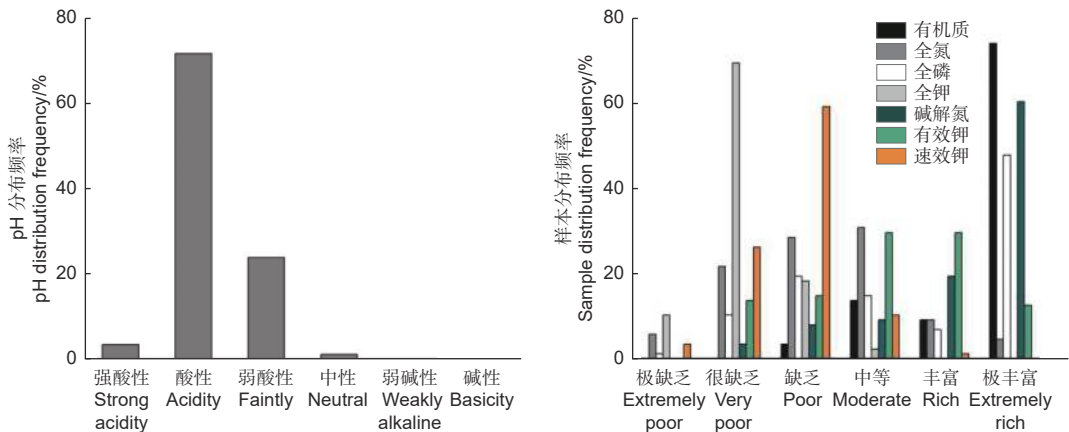


图 1 土壤肥力指标频率分布图

Fig. 1 Frequency distribution map of soil fertility indicators

土壤。

2.1.2 土壤有机质含量 土壤有机质含量介于 10.88~121.34 g·kg⁻¹, 平均值为 53.11 g·kg⁻¹, 有机质含量丰富, 变异系数为 43.87%, 属于中等变异。不同乡镇间土壤有机质含量存在显著差异

($P < 0.05$), 其中以 JSH 土壤有机质含量最高, 达到 67.47 g·kg⁻¹, 其次为 JCL (64.56 g·kg⁻¹)、JWJD (58.73 g·kg⁻¹) 和 JGM (58.20 g·kg⁻¹), JYZH 最低 (仅为 34.33 g·kg⁻¹)。全区有机质主要集中在极丰富水平占比为 73.86%, 丰富、中

等、缺乏的土壤分别占 9.09%、13.64% 和 3.41%，无有机质极缺乏、很缺乏土壤（图 1）。

2.1.3 土壤氮素含量 土壤全氮的含量介于 0.37~2.16 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，均值 1.02 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，变异系数 40.78%，属于中等变异。不同乡镇间土壤全氮含量差异不显著（ $P>0.05$ ），其中以 JGB 含量最高，为 1.30 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其次是 JGZY（1.24 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）和 JGM（1.22 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），JWJD 最低（仅为 0.76 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）。全区全氮极丰富和丰富水平较少，占比为 4.55% 和 9.09%，中等、缺乏、很缺乏、极缺乏的土壤分别占 30.68%、28.41%、21.59% 和 5.68%。土壤碱解氮含量变化范围 51.18~552.95 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均值为 179.41 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，碱解氮含量总体较高，变异系数为 45.82%，变异水平中等。不同乡镇间土壤碱解氮含量存在显著差异（ $P<0.05$ ），其中以 JCL 含量最高，为 274.96 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其次为 JSH（226.70 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）和 JGM（206.17 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），均大于 200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；JYZH 最低，仅为 JCL 的 42.32%。全区土壤碱解氮含量主要分布于极丰富和丰富水平，分别占 60.23% 和 19.32%，无极度缺乏的土壤。

2.1.4 土壤磷素含量 土壤全磷含量介于 0.19~2.46 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，均值为 0.99 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，变异系数 54.37%，属于中等变异。不同乡镇间土壤全磷含量存在显著差异（ $P<0.05$ ），其中以 JTTZ 含量最高，为 1.40 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其次是 JYZH（1.35 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）和 JGZY（1.26 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），JGM 最低，为 0.61 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。全区全磷主要分布于极丰富水平，占 47.73%，其余分别占 6.82%（丰富）、14.77%（中等）、19.32%（缺乏）、10.23%（很缺乏）和 1.14%（极缺乏）。土壤有效磷含量介于 3.03~62.20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，平均为 21.30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，变异系数为 70.00%，变异幅度较大。不同乡镇间土壤有效磷含量存在显著差异（ $P<0.05$ ），其中以 JTTZ 最高，达到 36.76 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，JWJD、JSH、JGZY、JGB、JYZH、LJZH 之间含量相近，JCL 含量最低，为 9.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，仅为 JTTZ 的 25.38%。林区土壤有效磷含量主要集中于丰富和中等水平，均占 29.55%，无极度缺乏的土壤。

2.1.5 土壤钾素含量 土壤全钾含量介于 2.59~16.55 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均为 8.24 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，变异系数为 32.34%，变异程度中等。不同乡镇间土壤全钾含量差异不显著（ $P>0.05$ ），其中以 HTY 最

大，达到 10.07 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其次是 JGB（9.37 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）和 JGM（9.04 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），JGZY 和 JYZH 最低，分别为 6.91 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 6.71 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。林区土壤全钾含量主要分布于很缺乏水平，占比为 69.32%，全区无丰富和极丰富水平。土壤速效钾含量变化范围 25.87~160.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间，平均为 71.52 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，变异系数为 37.34%，与土壤全钾变异程度一致。不同乡镇间土壤速效钾含量存在显著差异（ $P<0.05$ ），其中以 JGM 最高，达到 92.16 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；JGZY 最低，仅为 JGM 的 51.87%。林区土壤速效钾含量相对较匮乏，分别占 59.09%（缺乏），26.14%（很缺乏），3.41%（极缺乏），10.23%（中等），丰富仅占 1.13%。

2.2 各项肥力指标的隶属度和权重

隶属度越接近于理想值 1，表示土壤肥力越高。由雷达图（图 2）可知，有机质的平均隶属度值最高，达 0.91；碱解氮次之，为 0.88，全钾的平均隶属度值最低，仅为 0.25，其次为速效钾，为 0.31。根据土壤各养分指标权重（表 5）可知，有机质权重值最大，为 0.29；其次为速效钾和有效磷，分别为 0.22 和 0.20，其中权重低于 0.10 的有 pH、全磷和全钾，说明土壤肥力的提高更依赖于有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量的增加。

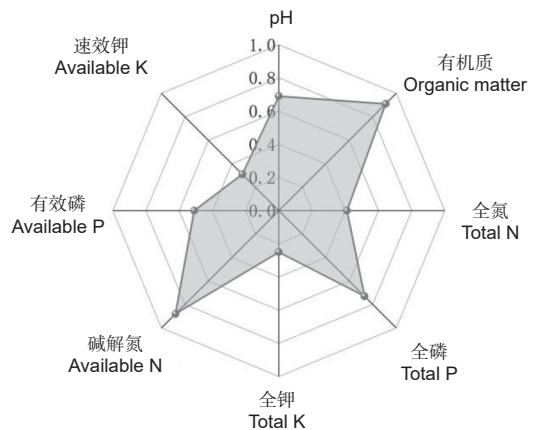


图 2 土壤肥力指标平均隶属度雷达图

Fig. 2 Radar map of average affiliation of soil fertility indicators

2.3 土壤肥力指标相关性分析

相关性分析表明（表 5），有机质与全氮呈显著正相关（ $P<0.05$ ），与碱解氮、速效钾呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），全磷与碱解氮呈极显著负相关（ $P<0.01$ ），与有效磷呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），碱解氮与有效磷呈极显著负相关

表 5 土壤肥力指标之间的相关系数及指标权重
Table 5 Correlation coefficient and weight of soil fertility indicators

	pH	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	碱解氮 Available N	有效磷 Available P	速效钾 Available K	相关系数均值 Mean value of correlation coefficient	权重 weight
pH	1	-0.07	-0.13	0.02	0.10	-0.17	0.14	0.13	0.008 1	0.016 9
有机质 Organic matter		1	0.27*	-0.07	-0.06	0.65**	-0.06	0.36**	0.138 0	0.287 2
全氮 Total N			1	0.04	0.08	0.13	0.10	-0.02	0.061 3	0.127 5
全磷 Total P				1	-0.17	-0.34**	0.63**	-0.19	0.006 4	0.013 4
全钾 Total K					1	-0.02	0.12	-0.03	0.000 4	0.000 9
碱解氮 Available N						1	-0.25**	0.48**	0.063 9	0.132 9
有效磷 Available P							1	0.02	0.096 0	0.199 8
速效钾 Available K								1	0.106 4	0.221 5

注: **表示相关性达极显著水平 ($P<0.01$); *表示相关性达显著水平 ($P<0.05$)
Notes: ** indicates a highly significant level of correlation ($P<0.01$); * indicates a significant level of correlation ($P<0.05$)

($P<0.01$), 与速效钾呈极显著正相关 ($P<0.01$), 其他指标间相关性均不显著, 其中土壤的 pH 具有很好的独立性。

2.4 土壤肥力质量综合评价等级

选取土壤 pH 值、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾 8 个指标对大别山山核桃林地土壤进行肥力综合评价 (表 6), 10 个乡镇的土壤综合肥力指数 (IFI) 变幅范围是 0.52~0.72, 平均值为 0.61, 各乡镇 IFI 由大到小依次为: JTTZ (0.719, II 级) > JGM (0.675, II 级) > JWJD (0.653, II 级) > JSH (0.648, II 级) > JGB (0.612, II 级) > JCL (0.569, III 级) > JGZY (0.566, III 级) > HTY (0.555, III 级) > JYZH (0.553, III 级) > LJZH (0.523, III 级)。大别山山核桃天然分布区内 50.00% 的土壤肥力较高, 其余处于中等水平, 大别山山核桃土壤肥力综合评价等级为 II 级, 土壤综合肥力较丰富。

2.5 土壤肥力主成分分析

通过主成分分析对土壤各肥力指标与 IFI 之间的载荷情况进行分析 (表 7), 根据特征值大于 1 共提取到 4 个主成分, 方差贡献率分别为 28.20%、23.27%、13.43% 和 12.49%, 累计方差贡献率为 77.39%, 基本能反应土壤肥力的基本信息。IFI 与有机质、碱解氮在第一主成分 (PC1) 上占主要决定因素, 载荷值均大于 0.70; 第二主成分 (PC2) 中主要决定因子为全磷和有效磷, 分别为 0.82 和 0.90; 第三主成分 (PC3) pH 的载荷值为 0.79, 表明土壤酸碱度对肥力的影响; 全

表 6 不同地方的土壤肥力等级

Table 6 Comprehensive index and evaluation grade of soil fertility

	土壤综合指数 IFI	肥力等级 Fertility grade	排序 Sort
JGM	0.675	II	2
JWJD	0.653	II	3
JSH	0.648	II	4
JTTZ	0.719	II	1
JGZY	0.566	III	7
JGB	0.612	II	5
JYZH	0.553	III	9
JCL	0.569	III	6
HTY	0.555	III	8
LJZH	0.523	III	10
均值 Mean	0.607	II	

钾在第四主成分 (PC4) 中具有较大载荷, 为 0.85。

3 讨论

土壤 pH 值通过影响土壤养分的有效性、微生物的活动及矿物质的转化来制约植物生长发育^[17-19]。一般认为, 微酸性至中性的土壤适宜山核桃生长, 过高或过低都会对果实的品质产生不利影响^[19]。本研究中, 大别山山核桃林地土壤 pH 平均值为 5.19, 比 2006 年大别山山核桃平田、西园和仙桃三个居群^[20]的土壤 pH 平均值降低了 11.73%, 并且相比大别山相近海拔的其他林地^[21-22], 大别山

表7 土壤各肥力指标的主成分分析

Table 7 Results of principal component analysis of soil fertility indicators

主成分 Principal component	PC1	PC2	PC3	PC4
pH	-0.04	0.25	0.79	-0.05
有机质 Organic matter	0.83	-0.10	-0.09	-0.10
全氮 Total N	0.42	0.24	-0.46	0.51
全磷 Total P	-0.11	0.82	-0.18	-0.29
全钾 Total K	-0.02	0.03	0.36	0.85
碱解氮 Available N	0.77	-0.44	-0.03	-0.05
有效磷 Available P	0.10	0.90	0.09	0.02
速效钾 Available K	0.65	-0.13	0.45	-0.23
土壤综合指数 IFI	0.79	0.53	0.02	0.05
特征值 Characteristic value	2.55	2.10	1.21	1.12
贡献率/% Contribution rate	28.20	23.27	13.43	12.49

山核桃林地土壤酸性更强, 10个乡镇中71.60%的土壤为酸性土, 其中3.41%的土壤为强酸性。因此不合理的施肥习惯可能是土壤酸化的主导因素, 尤其大量施用氮肥, 过量的氮肥经过硝化作用产生酸, 造成土壤酸化^[23]。土壤酸化会限制营养元素的吸收, 增加大别山山核桃根腐病和干腐病的致病风险, 进而影响果实产量和质量。

有机质是土壤肥沃和健康的重要指标^[24]。本研究中大别山山核桃10个乡镇土壤平均有机质含量达1级(较丰富), 土壤有机质含量达丰富以上占82.95%, 变异系数为43.87%, 大别山山核桃林区总体海拔较高(平均为722 m), 人为干扰较少, 因此与凋落物分解较慢有关外, 同时与林地土壤空间异质性强有关^[25], 大别山山核桃通常生长在土层相对深厚山谷和缓坡, 这些小地形更易积累较多的地表凋落物层, 从而导致较高的有机质含量。土壤有机质含量与全氮、碱解氮、速效钾呈显著正相关, 这与柳书俊^[26]的研究一致, 说明在矿化过程中有机质丰富的土壤能释放大量的营养元素为植物生长提供养分。

全氮、全磷、全钾是指土壤中各种形态的氮、磷、钾总量。大别山山核桃地10个乡镇土壤全氮平均水平达3级, 属中等水平, 与重庆核桃主产区相近^[27]。碱解氮反映土壤氮的短期供应能力, 受气候、土壤有机质及各种矿质养分元素影响^[28]。本研究中, 大别山山核桃林地10个乡镇土壤平均碱解氮含量达1级(较丰富), 碱解氮含量达丰富以上

占79.55%, 其平均含量比临安区山核桃^[29]高出26.20%。在经营中, 应注意控制氮肥使用量, 避免过量使用引起资源浪费和环境问题, 特别是土壤酸化问题^[30]; 在氮含量相对缺乏区域应注意科学增施氮肥。

本研究中, 大别山山核桃林地10个乡镇土壤全磷平均含量达2级(丰富), 其平均含量比贵州核桃^[31]高出28.57%。有效磷不仅能反映土壤磷素状态的动态变化, 还能反映土壤对植物的供磷水平^[32]。大别山山核桃林地平均土壤有效磷含量为21.30 mg·kg⁻¹, 达2级(丰富), 高于临安区7个山核桃产区^[33]。大别山山核桃林地土壤有效磷水平的空间差异性较大, 变异系数为70.00%, 在统计学中, 10%<CV<100%属于中等变异^[34-35], 这与谢林峰^[29]对山核桃林地的研究一致。大别山山核桃生产经营中应因地制宜, 一般认为土壤中速效磷含量>25 mg·kg⁻¹, 施磷肥无效^[36], 而JTTZ林地有效磷含量达到36.76 mg·kg⁻¹, 过量的磷会引发一系列的环境风险, 应控制磷肥的使用, 以免造成环境污染和不必要的浪费^[37]; JGZY含量仅为9.22 mg·kg⁻¹, 应合理增施磷肥。相关性分析表明, 土壤碱解氮和全磷、有效磷含量呈极显著负相关, 这与马闪闪等^[38]的研究一致。在高氮条件下, 土壤磷有效性降低, 氮磷养分比例失调可能会成为影响作物产量和品质的限制因子。

大别山山核桃林地10个乡镇土壤全钾平均含量为5级(很缺乏), 整体处于偏低水平, 土壤缺少钾素会对植物叶片形态、果实产量和品质等造成严重影响^[39]。土壤中的速效钾能提高植物抗逆能力^[40]。本研究中, 土壤平均速效钾含量为71.52 mg·kg⁻¹, 处于4级(缺乏), 丰富及以上仅占1.13%, 这不仅与土壤母岩类型和传统施肥管理重氮肥轻钾肥有关, 也与在营养转化过程中, 果皮和种仁对钾的需求量大有关^[41], 土壤中的钾不断被吸收又得不到相应补充。此外, 土壤的酸化也会加剧土壤钾素的流失^[11]。相关分析表明, 速效钾与有机质、碱解氮呈极显著正相关($P<0.01$), 大别山山核桃林地土壤有机质和碱解氮含量丰富, 而速效钾缺乏, 应增施钾肥, 土壤中K⁺的增加也可以替换H⁺将土壤活性酸转化成潜性酸, 从而提高pH值, 改善大别山山核桃林地土壤条件。

模糊综合评价法利用隶属度和权重对相互制约的多因素进行定量评价, 使评价更加准确可靠, 在

土壤肥力评价中应用广泛^[42-43]。大别山山核桃林地土壤综合肥力处于较高水平,其中JTTZ、JGM和JWJD土壤综合肥力较高;JYZH和LJZH土壤综合肥力相对欠缺。综合分析各评价指标的权重可以量化表征其对土壤质量的贡献情况,大别山山核桃土壤中有有机质、碱解氮含量对土壤肥力的影响最大。施肥管理中应在保证有机质、碱解氮含量充足的情况下,增施钾肥,合理增施磷肥,有利于维持土壤肥力。

4 结论

大别山山核桃林区土壤存在一定程度的酸化现象,总体上土壤有机质、氮素、磷素含量丰富,钾素含量缺乏,因此在生产经营中应合理使用生石灰、土壤改良剂等提高pH值,注意及时补充钾肥、控制氮肥、稳定磷肥。不同乡镇间土壤肥力差异显著,采取因地制宜的施肥策略,果子园乡、古碑镇、燕子河镇应针对性的增施有机肥和氮肥;天堂寨镇应控制磷肥的施用量;长岭乡应大量补充磷肥。

参考文献:

[1] 陈世权,黄坚钦,黄兴召,等.不同母岩发育山核桃林地土壤性质及叶片营养元素分析[J].浙江农林大学学报,2010,27(4):572-578.

[2] 董秀群,王百田,武中鹏,等.晋西黄土区三种林地土壤养分随林分生长的变化[J].林业科学研究,2018,31(2):69-76.

[3] 沈一凡,钱进芳,郑小平,等.山核桃中心产区林地土壤肥力的时空变化特征[J].林业科学,2016,52(7):1-12.

[4] 舒英格,姚斌,何腾兵,等.喀斯特山区不同母质林地土壤环境质量评价[J].林业科学研究,2007,20(3):442-446.

[5] 郭传友,黄坚钦,王正加,等.大别山山核桃天然种群种实性状表型多样性[J].经济林研究,2007,25(3):15-18.

[6] 王正加,黄有军,郭传友,等.大别山山核桃种群遗传多样性研究[J].植物生态学报,2006,30(3):534-538.

[7] 张深梅,奚建伟,洪俊彦,等.大别山山核桃果实与叶片性状的表型多样性研究[J].林业科学研究,2020,33(1):152-161.

[8] 夏国华,朱先富,俞春莲,等.不同地理种源大别山山核桃坚果表型性状和脂肪酸组分分析[J].果树学报,2014,31(3):370-377.

[9] 杜洋文,邓先珍,周席华,等.不同大别山山核桃优树含油率与脂肪酸组分含量分析[J].西南林业大学学报,2019,39(3):124-131.

[10] 苗庆选,郭满,马海林,等.不同生态区核桃林地肥水管理及土壤肥力差异研究[J].中国土壤与肥料,2021(1):296-302.

[11] 杨惠思,赵科理,叶正钱,等.山核桃品质对产地土壤养分的空间响应[J].植物营养与肥料学报,2019,25(10):1752-1762.

[12] 袁紫倩,叶正钱,李皓,等.影响山核桃林地土壤生产性能的主要肥力因子及其临界区间[J].植物营养与肥料学报,2020,

26(1):163-171.

[13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2011.

[14] 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.

[15] 高君亮,罗凤敏,高永,等.阴山北麓不同土地利用类型土壤养分特征分析与评价[J].草业学报,2016,25(4):230-238.

[16] 余兴华,杨艳梅,李玉祥,等.云南八角林地土壤养分诊断与综合评价[J].西部林业科学,2022,51(5):21-27.

[17] BASTO S, THOMPSON K, REES M. The effect of soil pH on persistence of seeds of grassland species in soil[J]. Plant Ecology, 2015, 216(8): 1163-1175.

[18] 袁星明,朱宁华,郭耆,等.南亚热带不同人工林对土壤理化性质的影响及土壤质量评价[J].林业科学研究,2022,35(3):112-122.

[19] 胡颖槟,金锦,童志鹏,等.山核桃人工林土壤肥力研究进展[J].浙江农林大学学报,2021,38(5):1066-1075.

[20] 郭传友,黄坚钦,王正加,等.大别山山核桃果实品质与土壤性质的相关性分析[J].经济林研究,2006,24(4):19-22.

[21] 王伟波,葛萍,达良俊,等.大别山低海拔区不同植被类型土壤生物学特性[J].广东农业科学,2014,41(14):51-56.

[22] 李振雄.大别山霍山-金寨地区土壤重金属分布特征及环境质量评价[D].北京:中国地质大学,2019.

[23] 张媚,林马水,曹秀秀,等.不同经营模式山核桃林地土壤pH值、养分与细菌多样性的差异[J].生物多样性,2018,26(6):611-619.

[24] WU J S, LIN H P, MENG C F, et al. Effects of intercropping grasses on soil organic carbon and microbial community functional diversity under Chinese hickory (*Carya cathayensis* Sarg.) stands[J]. Soil Research, 2014, 52(6): 575-583.

[25] 陈浩,巩合德,鲁志云,等.哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤养分的时间及空间变化规律[J].西部林业科学,2022,51(2):74-79.

[26] 柳书俊,姚新转,赵德刚,等.湄潭茶园土壤养分特征及肥力质量评价[J].草业学报,2020,29(11):33-45.

[27] 黄小辉,王玉书,魏立本,等.重庆核桃主要产区土壤养分状况及肥力评价[J].东北林业大学学报,2023,51(1):88-93+105.

[28] 赵瑞芬,程滨,滑小赞,等.基于主成分分析的山西省核桃主产区土壤肥力评价[J].山西大学学报(自然科学版),2020,40(6):61-68.

[29] 谢林峰,凌晓晓,黄姝妍,等.临安区山核桃林地土壤水解酶活性空间分布特征及土壤肥力评价[J].浙江农林大学学报,2022,39(3):625-634.

[30] MAO Q G, LU X K, ZHOU K J, et al. Effects of long-term nitrogen and phosphorus additions on soil acidification in an N-rich tropical forest[J]. Geoderma, 2017, 285: 57-63.

[31] 宋斌,刘茂桥,张文娥,等.贵州核桃主产区核桃园土壤养分丰缺状况[J].中国土壤与肥料,2020(6):65-74.

[32] 刘文杰,陈生云,胡凤祖,等.疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素[J].生态学报,2012,32(17):5429-5437.

[33] 丁立忠,金锦,汪智勇,等.临安不同产区镇山核桃林地土壤肥力水平的变化研究[J].浙江林业科技,2020,40(3):45-50.

- [34] HERBERT S J. Spatial variability of nutrient properties in black soil of northeast China[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 19-29.
- [35] 张红桔, 马闪闪, 赵科理, 等. 山核桃林地土壤肥力状况及其空间分布特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(4): 664-673.
- [36] 丁立忠, 潘伟华, 马闪闪, 等. 测土配方施肥对临安山核桃生长和产量的影响[J]. *经济林研究*, 2018, 36(4): 33-39.
- [37] AHMAD W, SHAH Z, JAMAL M, *et al.* Recovery of organic fertility in degraded soil through fertilization and crop rotation[J]. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2014, 13(2): 92-99.
- [38] 马闪闪, 赵科理, 丁立忠, 等. 临安市不同山核桃产区土壤肥力状况的差异性研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2016, 33(6): 953-960.
- [39] 黄小辉, 吴焦焦, 冯大兰, 等. 缺钾胁迫对核桃幼苗生长及生理特性的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(8): 23-30.
- [40] 卞倩倩, 王雁楠, 陈金金, 等. 施钾对我国甘薯产量和土壤钾素平衡影响的Meta分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(8): 1509-1519.
- [41] 何国庆, 余春莲, 饶盈, 等. 山核桃果实成熟过程中矿质元素及脂肪酸组分变化[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(6): 1208-1216.
- [42] 汪贵斌, 曹福亮, 程鹏, 等. 不同银杏复合经营模式土壤肥力综合评价[J]. *林业科学*, 2010, 46(8): 1-7.
- [43] 王杰, 张春燕, 卢加文, 等. 广安区柑橘土壤养分状况及综合肥力评价[J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1360-1367.

Soil Nutrient Characteristics and Fertility Evaluation of *Carya dabieshanensis* Forest Land

YAO Yi-han¹, DAI Ying-chao², WANG Wei-guo³, ZHU Xian-fu⁴,
CHEN Tao-mei¹, ZHOU Xin-yang¹, XIA Guo-hua¹

(1. Key Laboratory of Forest Aromatic Plants, College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Lin'an 311300, China; 2. Qingliangfeng National Nature Reserve Administration, Lin'an 311300, China; 3. Qingshanhu National Forest Park Administration, Lin'an 311300, China; 4. Jinzhai Fudong Ecology Agricultural Development Co., Ltd., Lu'an 237341, China)

Abstract: [Objective] To explore the soil fertility of forest land in the main production area of *Carya dabieshanensis*, and provide basis for soil management and scientific fertilization of forest land of *C. dabieshanensis*. [Method] 88 soil samples were collected from the main producing areas of *C. dabieshanensis* in Jinzhai County, Huoshan County and Luotian County. According to the indicators of pH, organic matter, Total N, Total P, Total K, Available N, Available P and Available K, the soil fertility was evaluated by fuzzy comprehensive evaluation method, and its content and variation were analyzed. [Results] The average soil pH value of *Carya dabieshanensis* was 5.19; The contents of soil organic matter, Total P, Available N and Available P were generally rich, with an average of 53.11 g·kg⁻¹, 0.99 g·kg⁻¹, 179.41 mg·kg⁻¹ and 21.30 mg·kg⁻¹, respectively. The average value of Total N was 1.02 g·kg⁻¹, at a medium content level. The contents of soil Total K and Available K were relatively deficient, with an average of 8.24 g·kg⁻¹ and 71.52 mg·kg⁻¹. The average value of comprehensive index of soil fertility (IFI) of *C. dabieshanensis* was 0.61. Both Grade II and III soils accounted for 50.00%. Principal component analysis showed that organic matter, Available N, Total P, Available P, pH and Total K were the most important factors affecting soil comprehensive fertility. [Conclusion] The comprehensive soil fertility of forest land in *C. dabieshanensis* is generally high. The contents of organic matter, Available N and phosphorus are rich, the pH value is acidic, and potassium is deficient. Soil management should improve the soil to increase the pH value, increase potassium fertilizer, maintain phosphorus fertilizer and reduce the use of nitrogen fertilizer.

Keywords: *Carya dabieshanensis*; Soil nutrient; Soil integrated fertility index; Principal component analysis