

湖南山核桃种质资源果实经济性状分析与评价

倪金燕¹, 李柏海², 周俊琴¹, 谢娟¹, 杨秋华¹, 袁军¹

(¹中南林业科技大学林学院经济林培育与保护教育部重点实验室, 长沙 410004; ²湖南省植物园, 长沙 410116)

摘要: 测定分析 60 份湖南山核桃种质资源的果实经济性状, 筛选获得综合表现优良的湖南山核桃种质, 以期为湖南山核桃良种选育及综合利用提供参考。以湖南山核桃核心分布区筛选获得的湖南山核桃优树果实为研究对象, 通过变异分析、聚类分析、主成分分析等方法对湖南山核桃果实经济性状进行遗传变异、类型划分和综合评价。结果表明: 湖南山核桃果实经济性状变异丰富, 20 个果实经济性状变异系数均值范围 5.42%~35.06%, 其中亚油酸、亚麻酸、青皮厚度和干仁重的变异程度较大。聚类分析表明湖南山核桃被分为 3 类, I 类的果实成熟期为 9 月上旬至 9 月下旬, 果实呈扁圆形, 果较小, 种仁含油率较高, 多不饱和脂肪酸含量较高; II 类的果实成熟期为 8 月下旬至 9 月中旬, 果实呈圆形, 果较大但其种壳和青皮较厚, 单不饱和脂肪酸含量较高; III 类的果实成熟期为 8 月下旬至 9 月中旬, 果实呈阔卵圆形, 种壳较薄, 干籽出仁率高。主成分分析的前 6 个主成分的累计贡献率达 87.85%, 果实经济性状综合评价得分 (F) 介于 -0.72~1.19, 其中 8 号、10 号、6 号、7 号和 9 号优树位居前列, 综合性状优良。

关键词: 湖南山核桃; 种质资源; 果实性状; 综合评价; 主成分分析

Fruit Economical Indexes Analysis and Comprehensive Evaluation of *Carya hunanensis* Germplasms Resources

NI Jinyan¹, LI Bohai², ZHOU Junqin¹, XIE Juan¹, YANG Qiuhua¹, YUAN Jun¹

(¹Key Laboratory of Cultivation and Protection for Non-wood Forest Trees, Ministry of Education, College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004; ²Hunan Botanical Garden, Changsha 410116)

Abstract: Comparative study of 60 *Carya hunanensis* germplasm resources of fruit economic traits, screening to obtain a comprehensive performance of excellent *Carya hunanensis* germplasm, in order to provide a theoretical basis for the selection of good varieties of *Carya hunanensis* and the comprehensive use of the theoretical basis for your research. Taking the fruits of *Carya hunanensis* superior trees screened in the core distribution area of *Carya hunanensis* as the research object, the genetic variation, type classification and comprehensive evaluation of economic variation traits of *Carya hunanensis* fruits were carried out through the

收稿日期: 2024-07-05

网络出版日期:

URL:

第一作者研究方向为经济林栽培与利用, E-mail: 3221969330@qq.com

通信作者: 袁军, 研究方向为经济林栽培生理, E-mail: yuanjun@csuft.edu.cn

基金项目: 湖南省林草繁育项目“山核桃种质资源收集评价与良种选育”(202302)

Foundation project: Hunan Provincial Forest and Grass Breeding Project "Collection and Evaluation of Hickory Germplasm Resources and Breeding of Improved Varieties" (202302)

methods of variance analysis, cluster analysis, principal component analysis and so on. The results showed that the economic traits of *Carya hunanensis* fruit were rich in variation, and the mean values of the coefficients of variation of 20 fruit economic traits ranged from 5.42% to 35.06%, among which linoleic acid, linolenic acid, thickness of green skin and dry kernel weight had greater degrees of variation. Cluster analysis showed that Hunan hickory was divided into three classes, group I fruit maturity period for early to late September, the fruit was flat round, fruit smaller, seed kernel oil content is higher, higher polyunsaturated fatty acid content; group II fruit maturity period for the second half of August to mid-September, the fruit was round, the fruit is larger but the seed shell and the green skin is thicker, the content of mono-unsaturated fatty acid is higher; group III fruit maturity period for late August to mid-September, fruit was broad oval, seed shell is thinner, dry seed kernel yield rate is high. The ripening period of Class III fruits is from late August to mid-September, the fruits are broadly ovoid, the seed shells are thinner, and the kernel yield of dry seeds is high. The cumulative contribution of the first six principal components of the principal component analysis reached 87.85%, and the score of the comprehensive evaluation of fruit economic traits (F) ranged from -0.72 to 1.19, among which No. 8, No. 10, No. 6, No. 7, and No. 9 superior trees ranked at the top, with excellent comprehensive traits.

Key words : *Carya hunanensis*; germplasm resources; fruit traits; comprehensive evaluation; principal component analysis

湖南山核桃 (*Carya hunanensis*) 是原产我国的山核桃属 (*Carya* Nutt) 植物中的 5 个种之一^[1], 在我国湘、黔、桂三省有大量野生分布, 以湖南怀化市为核心产区, 在龙山、新宁、东安、三江、黎平、天柱、德江等地均有分布^[2-4]。湖南山核桃适应性强, 速生丰产, 木材坚硬, 木纹细腻^[5]; 种仁油脂含量高, 营养成分丰富, 种仁中的脂肪主要有硬脂酸、棕榈酸、油酸、亚油酸、亚麻酸这 5 种脂肪酸^[6], 其中油酸含量最高, 其次是亚油酸, 不饱和脂肪酸占 88.93%~91.25%, 亚麻酸含量占 1.08%~2.09%, 高于市场上常见的大豆油、花生油等食用油, 具有健脑、抗动脉硬化、降低胆固醇、抗肿瘤等功效, 是理想的降低冠心病、预防老年痴呆的保健食品^[7]。野生湖南山核桃种仁中蛋白质氨基酸有 17 种, 必需氨基酸种类较齐全, 营养价值高, 是优质生态干果及食用油原料^[8]。青皮等还可以作为生物有机肥的原料, 种壳可以制成活性炭、生物炭等产品^[9]。因此, 大力推广湖南山核桃的种植, 具有重要的生态意义和经济价值。

湖南山核桃资源利用的历史悠久^[3], 但规模化人工种植时间较晚, 20 世纪 90 年代中期在湖南、贵州才开始大规模地人工栽培与产业化开发^[5]。随着湖南山核桃人工栽培的面积不断扩大, 逐渐形成了果用林、果材兼用林、果用生态林和果材兼用混交林等经营模式^[5]。相对于山核桃和薄壳山核桃, 湖南山核桃的开发较晚, 对湖南山核桃种质资源等方面开展的系统性研究较少^[7]。Zhai 等^[10]从系统发育学的角度对湖南山核桃叶绿体基因组进行了测定和分析, 结果表明湖南山核桃和贵州山核桃、喙核桃有密切的关系。樊卫国等^[6]、彭湘莲等^[8]均对湖南山核桃的营养成分进行了调查分析, 但未对湖南山核桃进行综合评价和良种选育。然而, 由于现有湖南山核桃林分多处于半野生状态, 主要为实生繁殖, 而且管理粗放, 产量不高、品质不好, 严

重影响湖南山核桃产业发展^[7,11]。为此，本研究以湖南山核桃核心分布区筛选获得优树的果实为研究对象，通过变异分析、聚类分析、主成分分析等方法对湖南山核桃果实经济性状进行遗传变异、类型划分和综合评价。以期为湖南山核桃良种选育、遗传改良以及进一步挖掘湖南山核桃经济价值提供参考资料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料于 2023 年 8 月下旬至 9 月下旬采集于沅陵县、靖州县、洪江市，保证果实成熟期一致，采样植株为通过筛选获得 60 个优树。采样植株均为 1950 年左右点播形成的人工林，其中 15 份来自沅陵县，30 份来自靖州县，15 份来自洪江市，种质编号为 01~60，管理较为粗放。采样时对样株的树高、胸径、枝下高进行测量，在每株样树树冠外围中上部随机采集无明显病虫害、外观形态相近的样果 30 个，按样株装袋，做好标记，备用。供试材料名称和基本信息见表 1。

表 1 60 份湖南山核桃种质资源的基本信息

Table 1 Information of 60 *Carya hunanensis* germplasm resources

编号 code	采集地 Place of collection	树龄(年) Age of tree	树高 (m) Hight of tree	果实成熟时间 Fruit ripening time	胸径 (cm) diameter at breast height	枝下高 (m) High under the branches
1	沅陵县明溪口镇东水溪村	65	21.00	9月上旬-9月下旬	58.92	8.00
2	沅陵县明溪口镇东水溪村	70	19.00	9月上旬-9月下旬	64.33	3.50
3	沅陵县明溪口镇东水溪村	80	21.00	9月上旬-9月下旬	82.80	3.20
4	沅陵县明溪口镇东水溪村	85	22.00	9月上旬-9月下旬	95.54	3.40
5	沅陵县明溪口镇东水溪村	30	15.00	9月上旬-9月下旬	35.98	3.08
6	沅陵县明溪口镇东水溪村	50	13.00	9月上旬-9月下旬	25.48	3.80
7	沅陵县明溪口镇东水溪村	75	19.00	9月上旬-9月下旬	79.62	4.00
8	沅陵县明溪口镇东水溪村	75	16.00	9月上旬-9月下旬	62.74	2.20
9	沅陵县明溪口镇东水溪村	55	17.00	9月上旬-9月下旬	35.03	1.60
10	沅陵县明溪口镇东水溪村	68	20.50	9月上旬-9月下旬	63.69	4.00
11	沅陵县明溪口镇东水溪村	65	15.00	9月上旬-9月下旬	50.96	2.90
12	沅陵县明溪口镇大岩头村	75	23.50	9月上旬-9月下旬	82.80	4.50
13	沅陵县明溪口镇大岩头村	70	20.00	9月上旬-9月下旬	60.10	3.50
14	沅陵县明溪口镇大岩头村	78	21.00	9月上旬-9月下旬	67.50	3.60
15	沅陵县明溪口镇大岩头村	80	22.50	9月上旬-9月下旬	78.43	4.10
16	靖州县寨牙乡地卢村	58	23.00	8月下旬-9月中旬	44.21	3.03
17	靖州县寨牙乡地卢村	55	22.00	8月下旬-9月中旬	46.45	3.89
18	靖州县寨牙乡地卢村	60	21.10	8月下旬-9月中旬	50.11	2.54
19	靖州县寨牙乡地卢村	50	20.00	8月下旬-9月中旬	40.32	3.22
20	靖州县寨牙乡地卢村	55	20.10	8月下旬-9月中旬	38.43	2.87
21	靖州县寨牙乡地卢村	60	19.00	8月下旬-9月中旬	40.21	2.67
22	靖州县寨牙乡地卢村	50	22.00	8月下旬-9月中旬	40.23	3.65

23	靖州县寨牙乡岩脚村	65	23.00	8月下旬-9月中旬	58.76	4.01
24	靖州县寨牙乡岩脚村	55	22.00	8月下旬-9月中旬	34.65	3.90
25	靖州县寨牙乡岩脚村	65	24.00	8月下旬-9月中旬	65.65	4.30
26	靖州县寨牙乡岩脚村	50	19.50	8月下旬-9月中旬	40.01	2.90
27	靖州县寨牙乡岩脚村	60	22.00	8月下旬-9月中旬	50.32	3.20
28	靖州县寨牙乡岩脚村	55	21.00	8月下旬-9月中旬	53.21	3.60
29	靖州县寨牙乡岩脚村	60	20.00	8月下旬-9月中旬	55.21	4.00
30	靖州县寨牙乡岩脚村	65	19.00	8月下旬-9月中旬	56.21	3.90
31	靖州县渠阳镇坝阳村	60	20.00	8月下旬-9月中旬	53.18	1.97
32	靖州县藕团乡新街村	65	24.00	8月下旬-9月中旬	58.28	2.89
33	靖州县藕团乡新街村	85	25.00	8月下旬-9月中旬	90.13	3.87
34	靖州县藕团乡新街村	80	18.00	8月下旬-9月中旬	107.32	3.16
35	靖州县藕团乡新街村	65	19.00	8月下旬-9月中旬	65.29	2.58
36	靖州县藕团乡新街村	88	21.05	8月下旬-9月中旬	141.08	3.62
37	靖州县藕团乡新街村	80	19.00	8月下旬-9月中旬	87.26	3.27
38	靖州县藕团乡新街村	70	18.00	8月下旬-9月中旬	67.83	3.55
39	靖州县藕团乡新街村	80	23.00	8月下旬-9月中旬	93.95	2.97
40	靖州县藕团乡新街村	75	22.00	8月下旬-9月中旬	78.34	3.67
41	靖州县藕团乡新街村	85	20.50	8月下旬-9月中旬	92.36	2.99
42	靖州县藕团乡新街村	58	21.50	8月下旬-9月中旬	61.46	3.04
43	靖州县藕团乡新街村	60	22.00	8月下旬-9月中旬	60.51	4.14
44	靖州县藕团乡新街村	65	19.50	8月下旬-9月中旬	60.19	3.86
45	靖州县藕团乡新街村	60	20.50	8月下旬-9月中旬	59.24	3.78
46	洪江市黔城镇廖家湾	50	18.00	8月下旬-9月中旬	47.77	3.47
47	洪江市黔城镇廖家湾	80	21.00	8月下旬-9月中旬	80.89	2.89
48	洪江市黔城镇廖家湾	55	25.00	8月下旬-9月中旬	57.96	2.76
49	洪江市黔城镇廖家湾	55	20.00	8月下旬-9月中旬	55.10	4.08
50	洪江市黔城镇廖家湾	50	17.00	8月下旬-9月中旬	41.40	3.73
51	洪江市黔城镇王室寨	50	17.50	8月下旬-9月中旬	42.40	3.90
52	洪江市黔城镇王室寨	50	18.00	8月下旬-9月中旬	47.77	2.98
53	洪江市黔城镇王室寨	50	20.00	8月下旬-9月中旬	38.22	3.47
54	洪江市黔城镇王室寨	50	15.00	8月下旬-9月中旬	38.22	2.68
55	洪江市黔城镇王室寨	70	15.00	8月下旬-9月中旬	98.73	3.05
56	洪江市黔城镇王室寨	65	17.50	8月下旬-9月中旬	40.12	3.05
57	洪江市黔城镇蚕稼田	70	22.00	8月下旬-9月中旬	57.32	4.28
58	洪江市黔城镇蚕稼田	67	19.00	8月下旬-9月中旬	63.69	3.53
59	洪江市黔城镇蚕稼田	55	21.00	8月下旬-9月中旬	34.39	2.75
60	洪江市黔城镇蚕稼田	55	18.50	8月下旬-9月中旬	40.20	4.00

1.2 测定方法

1.2.1 果实表型性状测定 参照 DB34/T 4258-2022《山核桃种质资源收集与评价技术规程》^[12]，用游标卡尺（精度为 0.01 mm）测量果实纵径、果实横径、青皮厚、坚果纵径、坚果横径、种壳厚；用电子天平（精

度为 0.01 g) 测定青果重、坚果鲜重、坚果干重、干仁重。完成果实表型性状测定后, 将种仁在 60 °C 烘箱中烘干, 粉碎, 供后续分析测试用。

1.2.2 果实经济性状测定 经济性状的测定以上述果实性状测量中随机选取的 30 颗鲜果为测定对象, 每个处理重复 3 次, 测定结果取平均值, 所有数据精确到 0.01%。

鲜出籽率 (%) : 鲜出籽率=坚果鲜重/青果重×100%;

干出籽率 (%) : 干出籽率=坚果干重/青果重×100%;

干籽出仁率 (%) : 干籽出仁率=果仁重量/单果重×100%。

种仁含油率: 利用全自动索氏抽提系统参照杨兵兵等^[13]的方法测定种仁含油率, 提取剂使用石油醚(分析纯)。种仁含油率 (%) = (油包质量-烘干后油包重量) /种仁质量×100%。

脂肪酸组成成分的测定采用气相色谱法^[11], 即将提取出来的湖南山核桃油样快速甲酯化后, 采用日本岛津 GC-2014 型气相色谱仪测定脂肪酸组成, 气相色谱条件参照王容等^[7], 根据峰面积以归一化法计算各脂肪酸的相对含量^[11]。每个处理重复 3 次, 取平均值。

1.3 数据统计与分析

利用 Excel 2016 整理试验数据, 采用 SPSS 26.0 软件进行变异分析、系统聚类分析和主成分分析, 采用 origin 22.0 作图, 参照吴霜^[14]结合主成分分析对湖南山核桃种质材料进行综合评价。

根据公式 (1) 计算各主成分的权重系数 P,

$$P = \frac{c_i}{c_i \sum_{n=1}^n} \quad i=1,2,3,\dots,n, \quad (1)$$

式中, C_i 为第 i 个主成分的贡献率。

根据公式 (2) 计算各湖南山核桃种质的综合得分 F,

$$F = \sum_{i=1}^n P_i Z_i \quad i=1,2,3,\dots,n, \quad (2)$$

式中, P_i 为第 i 个主成分的权重系数, Z_i 为湖南种质的第 i 个主成分得分。

2. 结果与分析

2.1 湖南山核桃果实表型性状

对 60 份湖南山核桃果实表型性状进行测定 (表 2)。结果显示, 各优株的果实表型性状的变异程度显著不同, 变异系数在 5.42%~21.62%之间。青皮厚 (21.62%) 和干仁单仁重 (20.76%) 的变异程度较大, 具有很大的选择潜力和丰富的遗传力。青皮厚的变化幅度很大, 最大值 7.78 mm, 最小值 3.90 mm, 极差 3.88mm, 多态性丰富。一般变异系数大于 10%表示样本间差异较大。变异程度小的性状包括青果单果重 (8.20%)、

坚果纵径（7.15%）、青果横径（5.42%）、坚果横径（5.69%）、坚果纵径（8.69%）和种壳厚（8.69%），遗传变异较小，相对稳定。其他性状的相对变异程度居中。

表 2 湖南山核桃果实表型性状变异分析

Table 2 Analysis on variation degree of fruit phenotypic traits of *Carya hunanensis* germplasms resources

性状 Traits	最大值 Max.	最小值 Min.	极差 Range	均值 Mean	标准偏差 SD	变异系数 (%) CV
青果单果重 (g) SFM	27.82	19.41	8.42	23.07	1.89	8.20
果纵径 (mm) FLD	42.04	32.17	9.88	36.94	2.64	7.15
果横径 (mm) FTD	39.00	31.44	7.56	35.00	1.90	5.42
青皮厚 (mm) PT	7.78	3.90	3.88	5.00	1.08	21.62
坚果鲜重 (g) FSW	14.51	7.43	7.08	11.22	1.30	11.55
坚果果横径 (mm) STD	30.15	24.03	6.12	26.61	1.51	5.69
坚果果纵径 (mm) SLD	34.44	25.63	8.80	29.49	2.56	8.69
坚果干重 (g) DSW	10.79	4.63	6.16	8.27	1.20	14.46
干仁单仁重 (g) SDKW	3.99	1.14	2.85	2.73	0.57	20.76
种壳厚 (mm) ST	2.27	1.48	0.79	1.81	0.15	8.43

FSW : Single fruit weight ; FLD : Fruit longitudinal diameter ; FTD : Fruit transverse diameter ; PT: Pericarp thickness ; FSW: Fresh seed weight ; STD : Seed transverse diameter ; SLD : Seed longitudinal diameter ; DSW : dry Seed weight ; SKW:Single kernel weight ; ST : shell thickness ; The same as below

2. 2 湖南山核桃果实经济性状

2. 2. 1 湖南山核桃出籽率和出仁率 对 60 份湖南山核桃出籽率和出仁率进行测定（表 3）。结果显示，各优株的出籽率和出仁率的变异程度显著不同，变异系数在 6.93%~15.67%之间。鲜出籽率（12.58%）、干出籽率（15.67%）和干籽出仁率（13.05%）的变异程度较大，具有很大的选择潜力和丰富的遗传力。鲜出籽率的变化幅度很大，最大值 61.01%，最小值 34.63%，极差 26.37%，多态性丰富。变异程度小（CV<10%）的性状种仁含油率（6.93%），遗传变异较小，相对稳定。

表 3 湖南山核桃果实出籽率和出仁率变异分析

Table 3 Analysis on variation degree of seed yield and kernel yield of *Carya hunanensis* germplasms resources

性状 Traits	最大值 Max.	最小值 Min.	极差 Range	均值 Mean	标准偏差 SD	变异系数 (%) CV
鲜出籽率 (%) FSY	61.01	34.63	26.37	47.27	5.95	12.58
干出籽率 (%) DSY	47.46	23.46	24.00	34.81	5.45	15.67
干籽出仁率 (%) DSKY	42.47	17.55	24.92	32.94	4.30	13.05
种仁含油率 (%) SOC	60.89	44.82	16.07	51.38	3.56	6.93

FSY : Fresh seed yield ; DSY : Dry seed yield ; KRDS : Dry seed kernel yield ; SOC : Seed oil content ; The same as below

2. 2. 2 湖南山核桃种仁脂肪酸组成变异分析 对 60 份湖南山核桃种仁脂肪酸组成进行测定（表 4）。结果显示，各优株的种仁脂肪酸组成的变异程度显著不同，变异系数在 6.52%~35.06%之间，表明 6 个脂肪酸组成的离散程度存在较大差异。亚油酸（35.06%）和亚麻酸（26.38%）和硬脂酸（24.07%）的变异程度大，

具有很大的选择潜力和丰富的遗传力。如油酸的变化幅度很大,最大值 78.09%,最小值 53.72%,极差 24.37%,多态性丰富。变异程度小 (CV<10%) 的性状包括棕榈酸 (6.52%), 遗传变异较小, 相对稳定。其他性状的相对变异程度居中。

表 4 湖南山核桃种仁脂肪酸组成变异分析

Table4 Analysis on variation degree of Fatty acid composition of seed kernels of *Carya hunanensis* germplasms resources

性状 Traits	最大值 Max	最小值 Min	极差 Range	均值 Mean	标准偏差 SD	变异系数 (%) CV
棕榈酸 (%) Palmitic acid	6.24	4.56	1.69	5.11	0.33	6.52
硬脂酸 (%) Stearic acid	6.80	3.12	3.68	4.51	1.09	24.07
油酸 (%) Oleic acid	78.09	53.72	24.37	68.31	7.27	10.65
亚油酸 (%) Linoleic acid	34.92	10.93	24.00	20.6	7.22	35.05
亚麻酸 (%) Linolenic acid	2.34	0.80	1.54	1.30	0.34	26.38
花生酸 (%) Arachidic acid	0.21	0.12	0.08	0.17	0.02	10.13

2.3 基于果实性状的湖南山核桃聚类分析

对湖南山核桃 20 项性状数据采用 SPSS Statistics 26.0 软件开展标准化处理, 并对参试湖南山核桃种质资源进行系统聚类分析, 同时统计每个类群的性状平均值。由图 1、图 2 和表 5 可知, 第 I 类包含 15 份资源, 编号为 1~15, 主要分布在沅陵县明溪口镇, 该类群的主要特征表现为果实的成熟期为 9 月中旬至 9 月下旬, 呈扁圆形, 果较小, 种仁含油率较高, 多不饱和脂肪酸含量较高。第 II 类包含 15 份资源, 编号为 16~30, 主要分布在靖州县寨牙乡, 该类群的主要特征为果实的成熟为 8 月下旬至 9 月中旬, 呈圆形, 果较大但其种壳和青皮较厚, 油酸含量较高, 属于高油酸类型。第 III 类包含 30 份资源, 编号为 31~60, 主要分布在洪江市和靖州县渠阳镇、藕团乡, 该类群的主要特征为果实成熟期为 8 月下旬至 9 月中旬, 呈阔卵圆形, 果实纵径大, 种壳较薄, 干籽出仁率高, 油酸含量介于第 II 类和第 I 类。

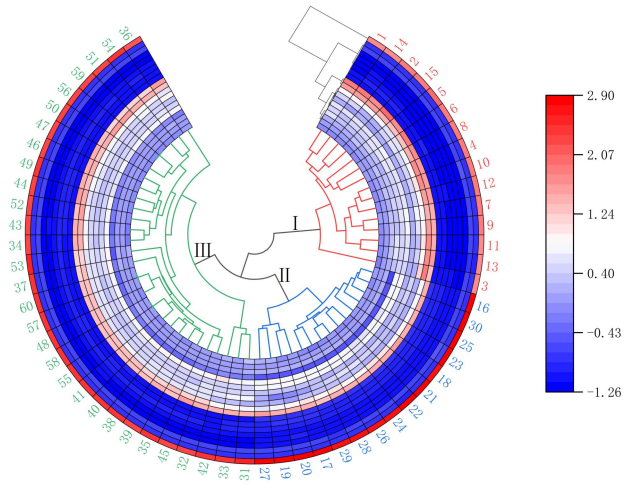


图 1 60 份湖南山核桃种质聚类分析图

Fig. 1 Cluster analysis of 60 *Carya hunanensis* germplasm resources



图 2 湖南山核桃 3 大类群种质资源坚果

Fig. 2 Legends of the three species groups of *Carya hunanensis* germplasm resources

表 5 聚类分析的三大类群 20 个性状的平均值

Table 5 The average of 20 traits of three species groups in cluster analysis

性状 Traits	类群 Group		
	I	II	III
单果重 (g) SFM	23.07b	25.26a	23.47b
果纵径 (mm) FLD	33.65c	36.50b	38.80a
果横径 (mm) FTD	35.90b	37.15a	33.47c
青皮厚 (mm) PT	4.42b	6.75a	4.41b
坚果鲜重 (g) FSW	12.40a	9.81c	11.34b
坚果横径 (mm) STD	28.94a	25.85b	25.84b
坚果纵径 (mm) SLD	26.68c	27.77b	31.75a
坚果干重 (g) DSW	9.42a	6.74c	8.46b
干仁单仁重 (g) SDKW	2.97a	2.02b	2.97a

种壳厚 (mm) ST	1.85a	1.90a	1.75b
鲜出籽率 (%) FSY	52.91a	39.44c	48.36b
干出籽率 (%) DSY	39.88a	27.13c	36.12b
干籽出仁率 (%) DSKY	32.32b	29.04c	35.21a
种仁含油率 (%) SOC	54.87a	51.03b	49.80b
棕榈酸 (%) Palmitic acid	5.56a	5.17b	4.85c
硬脂酸 (%) Stearic acid	3.27c	3.72b	5.53a
油酸 (%) Oleic acid	57.86c	77.60a	68.90b
亚油酸 (%) Linoleic acid	31.39a	12.00c	19.51b
亚麻酸 (%) Linolenic acid	1.77a	1.33b	1.05c
花生酸 (%) Arachidic acid	0.15b	0.18a	0.18a

表中同行数字旁不同小写字母表示 $p < 0.05$ 水平差异显著

The significance level of the mean difference was 0.05, and different letters of the same peer of data indicated significant differences

2.4 湖南山核桃果实性状综合评价

由于湖南山核桃果实性状指标具有不同的量纲与数量级, 为避免对综合评价结果产生影响, 在进行主成分分析前, 对其进行标准化处理。湖南山核桃 20 个果实性状主成分分析结果如表 6 所示, 按照累计贡献率大于 85% 的原则构成了 6 个主成分^[11], 累计方差贡献率为 87.85%, 可以较完整地代表各性状指标。第 1 主成分的特征值为 6.24, 相应的贡献率为 31.18%, 具有较高正荷载的性状是青果横径、坚果横径、棕榈酸、亚麻酸, 具有较高负荷载的是青果纵径、坚果纵径、硬脂酸、花生酸, 说明第 1 主成分反映了湖南山核桃的果实形状和脂肪酸组成。第 2 主成分特征值为 5.46, 贡献率为 27.31%, 具有较高正荷载的性状是坚果鲜重、干出籽率、亚油酸, 具有较高负荷载的是青皮厚、油酸, 说明第 2 个主成分反映了湖南山核桃的坚果重和不饱和脂肪酸组成情况。第 3 主成分特征值为 2.02, 贡献率为 10.09%, 干仁单仁重、干籽出仁率的特征向量最大, 说明第 3 主成分主要反映了干籽出仁率。第 4 主成分特征值为 1.45, 贡献率为 7.24%, 青果重的特征向量最大, 说明第 4 主成分主要反映了青果重。第 5 主成分特征值为 1.25, 贡献率为 6.27%, 鲜出籽率的特征向量最大, 说明第 5 主成分主要反映了鲜出籽率。第 6 主成分特征值为 1.15, 贡献率为 5.75%, 种壳厚的特征向量最大, 说明第 6 主成分主要反映了种壳厚。说明果实形状、单果重、不饱和脂肪酸含量、种壳厚可作为优良单株选择和良种选育的参考指标 (表 6)。

表 6 湖南山核桃种质资源性状的主成分分析

Table 6 Principal component analysis of major agronomic traits in *Carya hunanensis* germplasms resources

性状 Traits	主成分 Principal components					
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
单果重 (g) SFM	-0.07	0.08	0.10	0.94	-0.06	-0.12
果纵径 (mm) FLD	-0.76	-0.24	0.30	0.34	0.00	-0.03
果横径 (mm) FTD	0.71	-0.55	0.12	0.04	-0.09	0.26
青皮厚 (mm) PT	0.24	-0.89	-0.08	-0.03	-0.14	0.25
坚果鲜重 (g) FSW	0.14	0.71	0.29	0.38	0.17	0.19
坚果横径 (mm) STD	0.77	0.43	0.26	0.13	0.11	0.11

坚果纵径 (mm) SLD	-0.84	0.06	0.32	0.20	0.03	-0.17
坚果干重 (g) DSW	0.12	0.79	0.29	0.33	0.14	0.10
干仁单仁重 (g) SDKW	-0.09	0.55	0.78	0.17	0.11	-0.05
种壳厚 (mm) ST	0.25	-0.11	-0.14	-0.11	0.00	0.91
鲜出籽率 (%) FSY	0.19	0.19	0.09	-0.07	0.92	-0.03
干出籽率 (%) DSY	-0.01	0.86	0.30	-0.20	-0.24	0.02
干籽出仁率 (%) DSKY	-0.31	0.28	0.82	0.07	0.08	-0.15
种仁含油率(%) SOC	0.57	0.09	0.15	0.19	0.36	0.19
棕榈酸 (%) Palmitic acid	0.91	0.08	-0.02	0.03	0.17	0.08
硬脂酸 (%) Stearic acid	-0.92	0.13	0.21	0.06	-0.09	-0.05
油酸 (%) Oleic acid	-0.42	-0.86	-0.07	0.02	-0.17	0.12
亚油酸 (%) Linoleic acid	0.47	0.83	0.05	-0.04	0.17	-0.12
亚麻酸 (%) Linolenic acid	0.84	0.29	-0.26	0.01	0.05	0.03
花生酸 (%) Arachidic acid	-0.67	-0.55	-0.15	-0.06	-0.10	-0.07
特征值 Eigenvalues	6.24	5.46	2.02	1.45	1.25	1.15
贡献率 (%) Contributions rate	31.18	27.31	10.09	7.24	6.27	5.75
累计贡献率 (%) Accumulative contributions rate	31.18	58.49	68.59	75.82	82.09	87.85

根据标准化后的表型数据、每个主成分的特征值和载荷矩阵以及每个主成分的方差贡献率权重^[14], 获得综合得分方程: $F=0.36 \times F_1+0.31 \times F_2+0.11 \times F_3+0.08 \times F_4+0.071 \times F_5+0.07 \times F_6$, 60 份湖南山核桃种质的综合得分及排名见表 7。综合得分值的变化范围为-0.72~1.19, 平均 F 值为 0.50, 综合得分排名前 5 的范围在 0.88~1.19, 种质依次是 8 号、10 号、6 号、7 号和 9 号, 表明这 5 份资源的果实性状综合表现较好, 可以作为优良品种选育的候选资源。综合得分排名后 5 位范围在-0.72~-0.53, 种质分别为 22 号、21 号、17 号、19 号和 20 号。并根据单项性状表现的优劣, 筛选出青果最重的 31 号、青皮最薄的 46 号、种仁含油率最高的 6 号、油酸含量最高的 16 号和亚麻酸最高的 11 号。

表 7 60 份湖南山核桃种质资源果实综合得分

Table7 Fruit comprehensive scores of 60 *Carya humanensis* germplasms resources

编号 Code	综合得分 Score	排名 Rank	编号 Code	综合得分 Score	排名 Rank	编号 Code	综合得分 Score	排名 Rank
1	0.72	9	21	-0.54	57	41	-0.32	49
2	0.55	14	22	-0.53	56	42	-0.33	50
3	0.70	11	23	-0.19	28	43	-0.29	46
4	0.81	6	24	-0.31	47	44	-0.09	19
5	0.51	15	25	-0.22	31	45	-0.05	18
6	1.05	3	26	-0.22	32	46	-0.28	44
7	0.94	4	27	-0.35	52	47	-0.26	40
8	1.19	1	28	-0.13	21	48	-0.52	55
9	0.88	5	29	-0.48	54	49	-0.25	39
10	0.79	7	30	-0.45	53	50	-0.23	35

11	0.58	13	31	-0.23	33	51	-0.20	29
12	0.67	12	32	-0.28	43	52	-0.21	30
13	0.71	10	33	-0.29	45	53	-0.14	23
14	0.79	8	34	-0.26	41	54	-0.25	37
15	1.17	2	35	-0.10	20	55	-0.23	34
16	-0.35	51	36	0.32	16	56	-0.27	42
17	-0.55	58	37	-0.05	17	57	-0.24	36
18	-0.25	38	38	-0.19	27	58	-0.16	24
19	-0.60	59	39	-0.14	22	59	-0.19	26
20	-0.72	60	40	-0.32	48	60	-0.16	25

3 讨论

3.1 湖南山核桃资源多样性

果实性状是植物生存和繁衍适应性的集中表现，变异系数能反映各种质资源性状在进化保守性或遗传可塑性方面的不同，可为其品种或变异类型选育提供依据，当变异系数大于 10% 时，说明种质间差异较大^[15]。罗会婷等^[16]研究表明，薄壳山核桃果实变异系数为 6.63%~28.99%，其中亚麻酸、亚油酸、种仁重的变异系数较大，种仁含油率的变异系数较小；黄锡云等^[17]研究表明，薄壳山核桃果实变异系数为 2.32%~25.00%，其中亚油酸、种仁重、壳厚的变异系数较大，种仁含油率、出仁率、果横径的变异系数较小。本研究中，20 个性状的变异系数为 5.42%~35.06%，其中亚油酸、亚麻酸、干仁单仁重、青皮厚变异程度较高，种仁含油率、坚果横径、坚果纵径、种壳厚、青果重、青果横径、青果纵径、棕榈酸变异较小，这与罗会婷、黄锡云等具有一定差异，其原因可能是湖南山核桃多为异花授粉，属高度杂合，后代易变异，也可能是由于品种及生长环境的不同所导致。本研究中脂肪酸的平均变异系数大于其他性状，这对选育富含特定脂肪酸的湖南山核桃品种具有重要利用价值，与罗会婷等^[16]、张计育等^[18]研究结果基本一致。本研究 60 份湖南山核桃种质资源来源广泛，果实性状变异丰富，对其充分利用可为定向选育优良单株提供参考依据。

3.2 湖南山核桃的主要类群

聚类分析是依据种质材料的性状特征，将性状相近的种质材料进行聚合，性状相差较大的种质材料则会划分到不同的类别^[19]，如今已广泛应用于薄壳山核桃、浙江山核桃等经济林树种。季琳琳^[20]、万雯等^[2]根据果实表型性状、脂肪酸含量等指标对山核桃进行聚类，结果表明聚类结果在一定程度上在不同类群存在较大的遗传差异。李建挥等^[21]在怀化市沅陵县、靖州县调查时发现沅陵山核桃与团核桃是新发现的湖南山核桃地理类群，与本类群中的第 I、II 类基本一致。本研究对 60 株山核桃优根据 20 个果实性状、成熟时间和分布地进行聚类分析，结果表明共分为 3 类，说明湖南山核桃不同类群差异明显，可以初步区分供试材料的类型。其中靖州县渠阳镇、藕团乡和洪江市的湖南山核桃优株聚为一类，而同为靖州县的分布在寨牙乡的湖南山核桃优株被聚为不同类，沅陵县的湖南山核桃则另外聚为一类，其原因可能是由于地理分布

的不同，长期的自然选择形成了不同的变异和类群，或是因为种植习惯、用途偏好不同，导致基因交流受阻。本研究明确了湖南山核桃种质资源的不同类型，根据育种目标可以选择更优的亲本配制组合，使育种中亲本选配更加合理。

3.3 湖南山核桃的综合评价

种质资源综合评价是作物育种研究工作中的重要环节，在实际选育工作中，可结合选育目的和研究需求，应用单项性状及主成分分析法进行筛选，从而获得单项性状优良和综合性状优良的育种资源^[16,19]，如今被广泛应用于包括浙江山核桃^[14,22]、薄壳山核桃^[16-18]等经济林树种的综合评价中^[14]。本研究中，湖南山核桃的20个果实性状通过主成分分析，将20个性状指标降维为6项综合指标，其累积方差贡献率为87.85%，反映了湖南山核桃果实性状大部分信息，表明果实形状、单果重、不饱和脂肪酸含量、种壳厚可作为优良单株选择和良种选育的参考指标。这与宋思琼等^[23]、周文君等^[24]的研究结果基本一致。本研究还基于主成分分析建立了湖南山核桃果实性状综合评价模型，通过计算综合得分筛选出表现优异的种质，并根据单项性状表现情况筛选出单项性状优异的种质^[13,25]。在后续良种选育过程中，可根据湖南山核桃种质资源不同性状特点进行综合利用。例如，31号青果最大可作为选育湖南山核桃高产品种的原材料，16号的油酸含量最高可作为选育高油酸品种的原材料，11号亚麻酸含量最高可用于选育高亚麻酸品种。但本研究未对各优株的果实蛋白等营养成分、产量等指标进行测定，后续进一步观测补充，以期为湖南山核桃种质资源评价、良种选育和综合利用提供更可靠的依据。

4 结论

湖南山核桃果实性状中青皮厚、干仁重、硬脂酸、亚油酸、亚麻酸高度变异，具有较高的改良潜力；单果重、青果横径、坚果纵径、种壳厚、种仁含油率、棕榈酸变异系数小于10%，遗传变异小，相对稳定；聚类分析将湖南山核桃分成3大类，I类果实呈扁圆形，果较小，种仁含油率较高，多不饱和脂肪酸含量较高；第II类果实呈圆形，果较大但其种壳和青皮较厚，单不饱和脂肪酸含量较高；第III类果实呈阔卵圆形，种壳较薄，干籽出仁率高。通过综合评价筛选出综合性状优异的种质依次为8号、10号、6号、7号和9号；并通过单项性状表现情况筛选出青果最重的31号、青皮最薄的46号、种仁含油率最高的6号、油酸含量最高的16号和亚麻酸最高的11号。本研究为湖南山核桃种质资源良种选育、综合利用提供参考资料。

参考文献

- [1] 艾呈祥,李翠学,陈相艳,刘庆忠. 我国山核桃属植物资源.落叶果树,2006,38(4):23-24
Ai C X, Li C X, Chen X Y, Liu Q Z. Pecan plant resources in China. Deciduous Fruits,2006,38(04):23-24
- [2] 万雯. 广西山核桃种质资源调查与利用研究. 南宁: 广西大学,2023
Wan W. Investigation and utilization of pecan germplasm resources in Guangxi. Nanning: Guangxi University,2023
- [3] 万雯,何新华,邓立宝. 山核桃属植物育种研究进展.南方园艺,2023,34(1):62-66

- Wan W, He X H, Deng L B. Research progress on pecan plant breeding. *Southern Horticulture*,2023,34(1):62-66
- [4] 王静,吕芳德. 我国山核桃属植物研究进展. *经济林研究*,2012,30(1):138-142
- Wang J, Lv F D. Advances in research on *Carya Nutt* in China. *Non-wood Forest Research*,2012,30(1):138-142
- [5] 樊卫国,龙令炉,龙登楷. 中国的湖南山核桃. 北京:科学出版社,2018
- Fan W G, Long L L, Long D K. *Carya hunanensis* in China. Beijing : Science Press,2018
- [6] 樊卫国,安华明,龙令炉,马文月,杨武其. 野生湖南山核桃的营养成分研究. *中国野生植物资源*,2007,26(5):64-65
- Fan W G, An H M, Long L L, Ma W Y, Yang W Q. Study on Nutrient Component in Kernel of *Carya hunanensis* Cheng. *Chinese Wild Plant Resources*,2007,26(5):64-65
- [7] 王容. 湘西北地区不同品种核桃的品质特性研究. 长沙: 中南林业科技大学, 2019
- Wang R. Study on quality characteristics of different varieties of walnut in northwest Hunan Province. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2019
- [8] 彭湘莲,付红军,聂小松. 野生湖南山核桃的成分分析及营养评价. *食品工业*,2012(5):136-138
- Peng X L, Fu H J, Nie X S. Analysis and Evaluation of Nutrient Composition of *Carya hunanensis*. *The Food Industry*, 2012(5): 136-138
- [9] 龙令炉,杨武其. 黔东南野生山核桃实生苗木繁育生长效果初探. *贵州农业科学*,2009,37(2):132-133
- Long L L, Yang W Q. Preliminary study on growth of wild *Carya hunanensis* seedlings in Qiandongnan Region of Guizhou. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009 (2): 132-133
- [10] Zhai M, Guo Z R, Jia X D. Characterization of the complete chloroplast genome of *Carya hunanensis* WC Cheng & RH Chang. *Mitochondrial DNA Part B-Resources*, 2021, 6(1): 220-221
- [11] 梁珊珊. 湘西北核桃资源及良种选择研究.长沙: 中南林业科技大学,2016
- Liang S S. The research on *walnut* resources and selective breeding in the northwest of Hunan Province. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2016
- [12] 陈素传,季琳琳,吴志辉,蔡卫兵,赵道伦,常君,陶汝鹏,朱先富,韩文妍,王陆军. DB34/T 4258-2022 山核桃种质资源收集与评价技术规程. 合肥,安徽省林业科学研究院,2022
- Chen S C, Ji L L, Wu Z H, Cai W B, Zhao D L, Chang J, Tao R P, Zhu X F, Han W Y, Wang L J. DB34/T 4258-2022 Technical specification for collection and evaluation of pecan germplasm resources:. Hefei, Anhui Academy of Forestry, 2022
- [13] 杨兵兵,姚小华,张成才,邵慰忠,杨雨晨,刘林秀. 薄壳山核桃无性系种实性状综合评价. *北京林业大学学报*, 2023,45(5):57-66
- Yang B B, Yao X H, Zhang C C, Shao W Z, Yang Y C, Liu L X. Comprehensive evaluation of seed and fruit traits of thin shell of pecan clones. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023,45(5):57-66
- [14] 吴霜. 山核桃果实品质及评价.重庆: 西南大学,2023
- Wu S. Product Quality and Its Evaluation of *Carya cathayensis*. Chongqing: Southwest University,2023

- [15] 左继林,孙颖,吴妹杰,周文才,龚春,黄文印,徐林初. 美国薄壳山核桃实生种源果实品质主成分分析与综合评价.江苏农业科学,2019,47(18):235-240
Zuo J L, Sun Y, Wu M J, Zhou W C, Gong C, Huang W Y, Xu L C. Principal component analysis and comprehensive evaluation of fruit quality of American thin-shelled pecan fruit. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019,47(18):235-240
- [16] 罗会婷,贾晓东,翟敏,李永荣,宣继萍,张计育,王刚,郭忠仁. 76 株薄壳山核桃实生单株的果实品质差异及综合评价.植物资源与环境学报,2017,26(1):47-54
Luo H T, Jia X D, Zhai M, Li Y R, Xuan J P, Zhang J Y, Wang G, Guo Z R. Nut quality difference and comprehensive evaluation of 76 seedling individuals of *Carya illinoensis*. Journal of Plant Resources and Environment, 2017,26(1):47-54
- [17] 黄锡云,贺鹏,张涛,宋海云,郑树芳,覃振师,王文林. 广西地区美国山核桃果实品质观察及综合评价.南方农业,2020,14(22):1-7
Huang X Y, He P, Zhang T, Song H Y, Zheng S F, Qin Z S, Wang W L. Observation and comprehensive evaluation of fruit quality of pecans in Guangxi. South China Agriculture,2020,14(22):1-7
- [18] 张计育,王刚,王涛,贾展慧,张凡,李永荣,刘永芝,宣继萍. 薄壳山核桃果实性状和种仁脂肪酸含量多样性分析.植物资源与环境学报, 2023,32(2):29-37
Zhang J Y, Wang G, Wang T, Jia Z H, Zhang F, Li Y R, Liu Y Z, Xuan J P. Diversity analysis of fruit traits and kernel fatty acid content of pecan. Journal of Plant Resources and Environment,2023,32(2):29-37
- [19] 谭秋锦,韦媛荣,潘贞珍,环秀菊,潘浩男,许鹏,韦哲君,郑树芳,王文林. 澳洲坚果种质果实数量性状分析与综合评价.植物遗传资源学报,2023,24(6):1615-1625
Tan Q J, Wei Y R, Pan Z Z, Huan X J, Pan H N, Xu P, Wei Z J, Zheng S F, Wang W L. Analysis and comprehensive evaluation of the fruit quantitative traits for *Macadamia* Germplasm. Journal of Plant Genetic Resources, 2023,24(6):1615-1625
- [20] 季琳琳,陈素传,吴志辉,常君,陶汝鹏,周米生,蔡新玲. 山核桃果实主要经济性状和养分含量的差异分析.南京林业大学学报:自然科学版, 2022,46(1):131-137
Ji L L, Chen S C, Wu Z H, Chang J, Tao N P, Zhou M S, Cai X L. Variation and cluster analysis on the main economic characters and nutrients of fruit from *Carya cathayensis* and *C. dabieshanensis* fine trees. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Sciences Edition, 2022,46(1):131-137
- [21] 李建挥,李柏海,柏文富,禹霖,吴思政,聂东伶,王耀辉,蒋细春,全新,向祖恒,盛孝乾. 湖南省核桃资源调查及表型特征分析.湖南林业科技,2019,46(6):59-67+73
Li J H, Li B H, Bai W F, Yu L, Wu S Z, Nie D L, Wang Y H, Jiang X C, Quan X, Xiang Z H, Sheng X Q. Investigation of walnut and hickory genetic resources in Hunan Province. Hunan Forestry Science & Technology, 2019, 46(6):59-7
- [22] 吴霜,姚小华,常君,杨水平,王开良,黄梅,任华东. 21 个浙江山核桃无性系果实矿质营养特征分析.果树学报,2022,39(5):800-810
Wu S, Yao X H, Chang J, Yang S P, Wang K L, Huang M, Ren H D. Characteristics of fruit mineral nutrition of 21 *Carya cathayensis* clones in Zhejiang province. Journal of Fruit Science,2022,39(5):800-810
- [23] 宋思琼,钟佳琦,覃虹,卢开晶,贾宇尧,蒋瑶. 湖南地区 10 个品种薄壳山核桃的坚果品质评价.中国油脂,2023,48(9):113-119

Song S Q, Zhong J Q, Qin H, Lu K J, Jia Y Y, Jiang Y. Evaluation of nut quality of 10 *Carya illinoensis* varieties in Hunan province. China Oils and Fats, 2023, 48(9): 113-119

[24] 周文君, 李俊, 刘祥, 曾淑珍, 邹峰, 袁军. 湖南省 30 个薄壳山核桃新品种经济性状比较分析. 江西农业大学学报, 2021, 43(4): 807-816

Zhou W J, Li J, Liu X, Zeng S Z, Zou F, Yuan J. A comparative analysis of the economic characters of 30 pecan varieties in Hunan Province. Acta Agricultural Universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(4): 807-816

[25] 常君, 任华东, 姚小华, 杨水平, 张潇丹, 张成才, 王开良. 41 个薄壳山核桃品种果实营养成分与脂肪酸组成的比较分析. 西南大学学报: 自然科学版, 2021, 43(2): 20-30

Chang J, Ren H D, Yao X H, Yang S P, Zhang X D, Zhang C C, Wang K L. Comparative analysis of nutrient composition and fatty acid composition of 41 pecan varieties. Journal of Southwest University: Natural Science, 2021, 43(2): 20-30