

76 株薄壳山核桃实生单株的果实品质差异及综合评价

罗会婷¹, 贾晓东^{1,2,①}, 翟敏¹, 李永荣³, 宣继萍¹, 张计育¹, 王刚¹, 郭忠仁^{1,①}

[1. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园), 江苏 南京 210014;

2. 南京农业大学园艺学院, 江苏 南京 210095; 3. 南京绿宙薄壳山核桃科技有限公司, 江苏 南京 210007]

摘要: 对南京地区种植的 76 株薄壳山核桃 [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch] 实生单株的 8 项果实性状和种仁中 5 种脂肪酸含量的差异以及各指标的相关性进行分析, 并筛选出单项性状优良的单株; 在此基础上, 结合主成分分析结果, 对供试 76 株单株的果实品质进行综合评价。结果显示: 8 项果实性状(包括坚果质量、种仁鲜质量、坚果壳厚度、坚果纵径、坚果横径、果形指数、出仁率和含油率)以及种仁中 5 种脂肪酸(包括棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和亚麻酸)的含量均有较大变异, 变异系数为 6.63%~28.99%, 其中, 出仁率的变异系数最小, 亚麻酸含量的变异系数最大, 8 项果实性状的变异系数总体上小于 5 种脂肪酸含量的变异系数。部分果实性状间极显著或显著正相关, 少数果实性状间极显著或显著负相关, 而 5 种脂肪酸含量间均极显著正相关, 但脂肪酸含量与果实性状间总体上无显著相关性。主成分分析结果表明: 在 8 项果实性状中, 与坚果大小有关的性状较为重要; 而 5 种脂肪酸含量均同等重要。对果实性状和脂肪酸含量的主成分分析结果显示: 第 1 主成分的决定指标包括含油率以及棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和亚麻酸的含量, 第 2 主成分的决定指标包括坚果质量、种仁鲜质量、坚果壳厚度和坚果横径, 说明薄壳山核桃果实评价的首要指标为种仁中脂肪酸含量, 其次为果实大小。在利用坚果质量、种仁鲜质量、坚果壳厚度、出仁率、含油率、果形指数、油酸含量和不饱和脂肪酸含量 8 个单项指标优选单株的基础上, 结合主成分分析结果, 71 号单株的综合得分较高, 其种仁鲜质量、含油率以及油酸和不饱和脂肪酸的含量均较高, 可作为优良品种选育的首选候选单株。根据上述研究结果, 建议在薄壳山核桃不同育种目标的优良品种选育工作中, 将主成分分析法作为单项性状筛选法的有效补充方法。

关键词: 薄壳山核桃; 实生单株; 果实品质; 主成分分析; 脂肪酸含量; 综合评价

中图分类号: Q944.59; S664.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2017)01-0047-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2017.01.06

Nut quality difference and comprehensive evaluation of 76 seedling individuals of *Carya illinoensis* LUO Huiting¹, JIA Xiaodong^{1,2,①}, ZHAI Min¹, LI Yongrong³, XUAN Jiping¹, ZHANG Jiyu¹, WANG Gang¹, GUO Zhongren^{1,①} (1. Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Nanjing Green Universe Pecan Science & Technology Co., Ltd., Nanjing 210007, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2017, 26(1): 47-54

Abstract: Differences in eight nut traits and five fatty acid contents in kernel among 76 seedling individuals of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch planted in Nanjing and correlation among all indexes were analyzed, and individuals with superior single trait were screened. On this basis, combined with principal component analysis result, nut quality of 76 individuals tested was comprehensively evaluated. The results show that there are large variations in eight nut traits (including nut weight, fresh weight of kernel, nutshell thickness, nut length, nut width, nut shape index, kernel rate and oil content) and contents of five fatty acids (including palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid

收稿日期: 2016-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31200502); 江苏省林业三新工程项目(lysx[2016]44); 江苏省农业科技自主创新资金项目[CX(16)1015]; 江苏省科学技术厅现代农业项目(BE2016385)

作者简介: 罗会婷(1990—), 女, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事果树种质资源及果实品质方面的研究。

①通信作者 E-mail: ji Xiaodong@cnbg.net; zhongrenguo@aliyun.com

and linolenic acid) in kernel, with coefficient of variation (CV) of 6.63%–28.99%. In which, CV value of kernel rate is the smallest, and that of linolenic acid content is the largest. Generally, CV value of eight nut traits is smaller than that of five fatty acid contents. There are obviously significant or significant positive correlations among some nut traits, and obviously significant or significant negative correlations among a few nut traits. There are obviously significant positive correlations among five fatty acid contents, but correlations between fatty acid contents and nut traits are almost insignificant. The results of principal component analysis show that traits related to nut size are more important than others among eight nut traits, while five fatty acid contents are equally important. The result of principal component analysis on nut traits and fatty acid contents shows that the decision indexes in the first principal component include oil content and contents of palmitic acid, stearic acid, oleic acid, linoleic acid and linolenic acid, and those in the second principal component include nut weight, fresh weight of kernel, nutshell thickness and nut width, indicating that fatty acid content in kernel is the first index to evaluate nut quality of *C. illinoensis*, followed by nut size. Based on superior individuals with eight single indexes of nut weight, fresh weight of kernel, nutshell thickness, kernel rate, oil content, nut shape index, oleic acid content and unsaturated fatty acid content, and combined with principal component analysis result, comprehensive score of No. 71 individual is relatively high, its fresh weight of kernel, oil content and contents of oleic acid and unsaturated fatty acid are relatively high, and No. 71 individual could be used as the first candidate individual for cultivating excellent cultivar. Based on above results, it is suggested that principal component analysis method can be used as an effective supplement for single trait selection in cultivating superior cultivar of *C. illinoensis* for different breeding objectives.

Key words: *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch; seedling individual; nut quality; principal component analysis; fatty acid content; comprehensive evaluation

薄壳山核桃 [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch] 原产北美洲, 属胡桃科 (Juglandaceae) 山核桃属 (*Carya* Nutt.) 植物^{[1]78–80}, 又名长山核桃和美国山核桃, 是世界著名的干果类经济树种, 具有坚果壳薄、含油率高、风味佳的特点, 可鲜食、榨油或制作面包和冰淇淋等。薄壳山核桃种仁富含油脂^[2], 主要由单不饱和脂肪酸组成, 具有显著的降血脂和预防心脏病等功效。20 世纪初, 中国开始引种薄壳山核桃, 迄今已有 110 多年的历史^[3]。目前, 薄壳山核桃已分布在中国的 20 多个省 (自治区、直辖市), 其中在江苏、安徽、浙江、江西和云南的分布较为集中, 这些区域是国内发展薄壳山核桃的重点地区^[4]。

在中国, 薄壳山核桃产业的发展十分缓慢, 一直未形成规模化的高产园, 造成这一现状的主要原因之一是种质资源匮乏。据报道, 美国培育及选育的薄壳山核桃品种有上千个, 其中经济价值较高的品种约 100 个^[5], 而中国的薄壳山核桃种质资源评价及育种工作才刚刚起步。李永荣等^[6–7] 根据坚果质量、坚果果径、坚果果形指数、果壳厚度、出仁率和含油率对 249 株薄壳山核桃实生单株和 21 个引进品种分别进行了单项性状和综合性状的优选工作; 并对 66 个实生优株相同指标的变异进行了比较和优良单株筛选^[8]。在薄壳山核桃种仁的油脂中, 油酸和亚油酸

是主要成分, 二者含量占总油脂含量的 92.5% ~ 96.1%^{[1]79}, 因此, 种仁脂肪酸性状也是薄壳山核桃果实品质的重要评价标准之一。

为评估薄壳山核桃不同实生单株的果实品质, 筛选单项性状或综合性状突出的优良单株, 作者以其坚果质量、种仁鲜质量、坚果壳厚度、坚果纵径、坚果横径、果形指数、出仁率和含油率 8 项果实性状以及种仁中棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和亚麻酸的含量为指标, 对 76 株薄壳山核桃实生单株进行比较和变异分析, 并分析了 13 个指标间的相关性, 在此基础上筛选出单项性状排名前 10 位的优株; 此外, 采用主成分分析法确定了薄壳山核桃果实性状和种仁中脂肪酸含量的决定因素, 并进一步确定不同性状的优良单株, 以期初步筛选出果实品质优良的实生单株, 为薄壳山核桃的品种选育及优良品种的推广种植奠定基础。

1 材料和方法

1.1 材料

供试材料为种植于江苏省南京市 (南京中山植物园、雨花台和明孝陵景区等地) 的薄壳山核桃实生单株, 主要为 20 世纪 50 年代至 60 年代从美国引种的实生子代。选择树体强健 (株高 20 m 以上, 胸径

50 cm 以上)、病虫害少的 76 株单株采种。采种部位为树体中部,采用升降机辅助及人工敲落的方法从树体的各个方向采种。对采种的树体和样本同时编号 01~76,以待翌年观测和采种。

主要仪器包括 Agilent 6890N 气相色谱仪(美国 Agilent 公司)和 YRE2000E 旋转蒸发仪(巩义市予华仪器有限责任公司)。供试棕榈酸甲酯标准品(LOT: N-16M-021-Z;纯度大于 99%)、十七烷酸甲酯标准品(LOT: N-17M-A8-X;纯度大于 99%)、硬脂酸甲酯标准品(LOT: N-18M-N26-Y;纯度大于 99%)、油酸甲酯标准品(LOT: U-46M-F17-Z;纯度大于 99%)、亚油酸甲酯标准品(LOT: U-59M-M29-Z;纯度大于 99%)、亚麻酸甲酯标准品(LOT: U-62M-N5-Z;纯度大于 99%)和 37 种脂肪酸混合标准品(LOT: AU4-Z)均购自美国 NU-CHEK 公司;供试正己烷、甲醇、三氯化硼甲醇和异辛烷均为色谱纯,购自南京寿德试验器材有限公司。

1.2 方法

1.2.1 果实性状的测量 使用数显游标卡尺(精度 0.01 mm)测量坚果(果实去除外果皮后的其余部分,即种核)的纵径和横径以及坚果壳(中果皮)厚度;使用电子天平(精度 0.001 g)称量坚果质量和种仁(可食部分)鲜质量,每个样株随机抽取 30 粒进行称量,结果取平均值。

1.2.2 油脂的提取 人工剥壳取种仁,于 60 °C 烘干至恒质量,即为干种仁。将 30 粒干种仁切碎、混匀;称取约 3 g 碎种仁,采用索氏提取法^[9]提取油脂,每个样株重复提取 3 次;提取的油脂于-20 °C 保存、待测。提取前后种仁的质量差即为油脂质量。

1.2.3 气相色谱(GC)条件 CP-Sil 88 毛细管柱(100 m×0.25 mm,0.2 μm);氢气流速 37.0 mL·min⁻¹;进样口温度 250 °C;火焰电离检测器温度 280 °C;进样量 1 μL。柱温升温程序:起始温度 60 °C,维持 5 min;以 15 °C·min⁻¹的升温速率升至 165 °C,维持 1 min;再以 2 °C·min⁻¹的升温速率升至 225 °C,维持 17 min。

1.2.4 标准曲线的绘制 分别称取一定质量的各脂肪酸甲酯标准品,用正己烷分别配制成质量浓度 16.0 mg·mL⁻¹棕榈酸甲酯、质量浓度 1.0 mg·mL⁻¹硬脂酸甲酯、质量浓度 50.0 mg·mL⁻¹油酸甲酯、质量浓度 12.0 mg·mL⁻¹亚油酸甲酯和质量浓度 1.4 mg·mL⁻¹亚麻酸甲酯的标准品溶液,再用正己烷将上述 5 种脂肪酸标准品溶液分别逐级稀释 2、4、8 和

16 倍,以质量浓度 0.2 mg·mL⁻¹十七烷酸甲酯为内标,按照上述 GC 条件进样分析。以峰面积为纵坐标(y)、各脂肪酸标准品浓度为横坐标(x)拟合标准曲线的回归方程。棕榈酸浓度的回归方程为 $y = 11\ 839\ 131.05x - 2\ 247\ 825.58$ ($R^2 = 0.992\ 2$);硬脂酸浓度的回归方程为 $y = 10\ 722\ 191.14x - 234\ 890.86$ ($R^2 = 0.993\ 4$);油酸浓度的回归方程为 $y = 8\ 729\ 110.19x + 5\ 056\ 110.58$ ($R^2 = 0.999\ 8$);亚油酸浓度的回归方程为 $y = 9\ 801\ 044.67x - 145\ 370.31$ ($R^2 = 0.996\ 7$);亚麻酸浓度的回归方程为 $y = 12\ 682\ 810.05x - 276\ 219.85$ ($R^2 = 0.994\ 3$)。

用正己烷配制 37 种脂肪酸混合标准品溶液(原液),对比出峰保留时间对薄壳山核桃种仁中脂肪酸组成进行定性鉴定。

1.2.5 样品供试液制备和种仁中脂肪酸含量测定 称取各样株的种仁油脂约 50 mg,每个样品重复 3 次。参照 GB/T 17376—2008 的方法进行脂肪酸甲酯化,得到样品供试液。按照上述 GC 条件进样分析,记录各样品中不同脂肪酸的峰面积,并根据上述各脂肪酸的回归方程计算各样株的脂肪酸浓度。

种仁中脂肪酸含量按照公式“种仁(鲜质量)中脂肪酸含量=(1 000-1 000×含水量)×含油率×[(脂肪酸浓度×样品供试液体积)/被测油脂质量]”计算。其中,含水量按照公式“含水量=[(种仁鲜质量-种仁干质量)/种仁鲜质量]×100%”计算。

1.3 数据统计及分析

按照公式“果形指数=坚果纵径/坚果横径”、“出仁率=(种仁鲜质量/坚果质量)×100%”、“含油率=(油脂质量/种仁干质量)×100%”和“不饱和脂肪酸含量=油酸含量+亚油酸含量+亚麻酸含量”分别计算薄壳山核桃的果形指数、出仁率、含油率和不饱和脂肪酸含量,结果取平均值。根据公式“变异系数=(标准差/平均值)×100%”计算各指标的变异系数。

采用 EXCEL 2007 和 SPSS 16.0 统计分析软件对 13 个果实品质相关性状进行相关性分析和主成分分析。

2 结果和分析

2.1 果实性状和种仁中脂肪酸含量的变异分析

对 76 株薄壳山核桃单株的果实性状和种仁中主要脂肪酸含量进行变异分析,结果见表 1。结果显

示:8项果实性状和种仁中5种主要脂肪酸含量的变异系数为6.63%~28.99%,差异较大。其中,出仁率

表1 76株薄壳山核桃单株果实性状和种仁中脂肪酸含量的变异分析¹⁾

Table 1 Variation analysis on nut traits and fatty acid contents in kernel of 76 individuals of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch¹⁾

指标 Index	Max	Min	\bar{X}	SD	CV/%
NW	8.29	3.05	6.27	1.22	19.46
FWK	4.67	1.43	3.21	0.66	20.56
NT	1.23	0.62	0.88	0.13	14.77
NL	45.06	23.71	35.13	3.78	10.76
NWI	23.97	17.70	20.92	1.59	7.60
NSI	2.46	1.16	1.68	0.17	10.12
KR	60.16	43.34	51.01	3.21	6.63
OC	79.16	52.04	71.02	4.90	6.90
PA	53.80	21.40	39.60	7.52	19.00
SA	28.26	6.05	13.43	2.59	19.26
OA	486.00	177.50	402.13	73.07	18.17
LA	232.70	71.80	159.36	42.42	26.62
LIA	12.80	3.10	8.22	2.38	28.99

¹⁾ NW: 坚果质量 Nut weight (g); FWK: 种仁鲜质量 Fresh weight of kernel (g); NT: 坚果壳厚度 Nutshell thickness (mm); NL: 坚果纵径 Nut length (mm); NWI: 坚果横径 Nut width (mm); NSI: 果形指数 Nut shape index; KR: 出仁率 Kernel rate (%); OC: 含油率 Oil content (%); PA: 棕榈酸含量 Content of palmitic acid ($g \cdot kg^{-1}$); SA: 硬脂酸含量 Content of stearic acid ($g \cdot kg^{-1}$); OA: 油酸含量 Content of oleic acid ($g \cdot kg^{-1}$); LA: 亚油酸含量 Content of linoleic acid ($g \cdot kg^{-1}$); LIA: 亚麻酸含量 Content of linolenic acid ($g \cdot kg^{-1}$). Max: 最大值 The maximum value; Min: 最小值 The minimum value; \bar{X} : 平均值 Mean; SD: 标准差 Standard deviation; CV: 变异系数 Coefficient of variation.

表2 薄壳山核桃单株果实性状和种仁中脂肪酸含量间的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficient among nut traits and fatty acid contents in kernel of individuals of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch¹⁾

指标 Index	各指标间的相关系数 Correlation coefficient among different indexes												
	NW	FWK	NT	NL	NWI	NSI	KR	OC	PA	SA	OA	LA	LIA
NW	1.000												
FWK	0.944**	1.000											
NT	0.439**	0.187	1.000										
NL	0.150	0.120	0.059	1.000									
NWI	0.901**	0.861**	0.358**	0.187	1.000								
NSI	0.062	0.047	-0.047	0.024	-0.277*	1.000							
KR	0.035	0.353**	-0.676**	-0.054	0.072	-0.058	1.000						
OC	0.052	0.125	-0.087	-0.036	0.056	-0.076	0.231*	1.000					
PA	-0.099	-0.112	-0.092	-0.065	-0.050	-0.114	-0.043	0.260*	1.000				
SA	0.214	0.206	0.028	-0.057	0.226*	-0.073	0.051	0.505**	0.556**	1.000			
OA	0.116	0.184	-0.118	-0.198	0.075	-0.033	0.244*	0.488**	0.527**	0.720**	1.000		
LA	-0.077	-0.110	-0.101	0.004	-0.002	-0.013	-0.102	0.172	0.787**	0.535**	0.333**	1.000	
LIA	-0.234*	-0.228*	-0.182	-0.050	-0.120	-0.067	-0.032	0.155	0.517**	0.399**	0.384**	0.655**	1.000

¹⁾ NW: 坚果质量 Nut weight; FWK: 种仁鲜质量 Fresh weight of kernel; NT: 坚果壳厚度 Nutshell thickness; NL: 坚果纵径 Nut length; NWI: 坚果横径 Nut width; NSI: 果形指数 Nut shape index; KR: 出仁率 Kernel rate; OC: 含油率 Oil content; PA: 棕榈酸含量 Content of palmitic acid; SA: 硬脂酸含量 Content of stearic acid; OA: 油酸含量 Content of oleic acid; LA: 亚油酸含量 Content of linoleic acid; LIA: 亚麻酸含量 Content of linolenic acid. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

的变异系数最小,仅为6.63%;含油率和坚果横径的变异系数也较小,分别为6.90%和7.60%,说明出仁率、含油率和坚果横径的遗传变异相对较小。变异系数最大的是5种脂肪酸中含量最低的亚麻酸,为28.99%;其次是含量相对较高的亚油酸,为26.62%。8项果实性状按变异系数由大至小依次排序为种仁鲜质量、坚果质量、坚果壳厚度、坚果纵径、果形指数、坚果横径、含油率、出仁率。5种脂肪酸含量的变异系数均相对较大,按变异系数由大至小依次排序为亚麻酸含量、亚油酸含量、硬脂酸含量、棕榈酸含量、油酸含量。

2.2 果实性状和种仁中脂肪酸含量的相关性分析

对76株薄壳山核桃单株8项果实性状和种仁中5种脂肪酸含量进行了相关性分析,结果见表2。结果表明:坚果质量与种仁鲜质量、坚果壳厚度、坚果横径均呈极显著正相关($P < 0.01$);坚果横径还与种仁鲜质量和坚果壳厚度呈极显著正相关,与果形指数呈显著负相关($P < 0.05$);出仁率与种仁鲜质量呈极显著正相关,与坚果壳厚度呈极显著负相关,与含油率呈显著正相关。5种脂肪酸含量间均呈极显著正相关;棕榈酸含量与含油率呈显著正相关,相关系数为0.260;硬脂酸含量与坚果横径和含油率分别呈显著和极显著正相关,相关系数分别为0.226和0.505;油酸含量与出仁率和含油率分别呈显著和极显著正相关,相关系数分别为0.244和0.488;亚麻酸含量与

坚果质量和种仁鲜质量均呈显著负相关, 相关系数分别是 -0.234 和 -0.228 。亚油酸含量与 8 项果实性状间的相关性均不显著。

上述研究结果显示: 薄壳山核桃果实性状与种仁中脂肪酸含量间的相关性较小, 说明对薄壳山核桃果实性状变异的评价不能代替对种仁中脂肪酸含量变异的评价。在对薄壳山核桃果实品质综合评价时, 种仁中脂肪酸含量应作为不可被替代的一部分纳入评价范围, 同时在薄壳山核桃性状改良时, 脂肪酸含量也应被纳入综合性状改良的范畴。

2.3 单项性状优良的优株分析

果大、壳薄、果形长、出仁率高、含油率高、种仁中油酸含量高或不饱和脂肪酸含量高是目前薄壳山核桃选种、育种时的主要目标。在 76 株薄壳山核桃单株中, 选出坚果质量、种仁鲜质量、坚果壳厚度、出仁率、含油率、果形指数以及种仁中油酸和不饱和脂肪酸含量 8 个指标排名前 10 位的薄壳山核桃单株, 结果见表 3。

分析结果显示: 47 号、19 号和 21 号单株的坚果质量均在 8.20 g 以上; 种仁鲜质量最大的是 29 号单株 (4.67 g); 17 号单株的坚果壳最薄, 坚果壳厚度为 0.62 mm ; 17 号单株的出仁率最高, 为 60.16% ; 71 号单株的含油率最高, 达 79.16% ; 76 号单株的果形指数明显高于其他单株, 接近 2.5, 果形狭长; 42 号单株的油酸含量达 $486.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 31 号单株的不饱和脂肪酸含量高达 $637.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。综合多项指标可看出: 47 号单株的坚果质量和种仁鲜质量较大, 油酸含量较高; 29 号单株的坚果质量和种仁鲜质量较大, 坚果壳较薄, 出仁率较高; 17 号单株的坚果壳最薄, 出仁率最高; 71 号单株的种仁鲜质量和含油率较高, 油酸和不饱和脂肪酸含量较高; 76 号单株的果形指数最大, 果形狭长; 42 号单株的含油率较高, 油酸和不饱和脂肪酸含量较高; 31 号单株的油酸和不饱和脂肪酸含量较高; 66 号单株的坚果质量较大, 含油率较高; 60 号单株的坚果质量较大, 油酸和不饱和脂肪酸含量较高。

表 3 76 株薄壳山核桃单株中部分单项性状排名前 10 位的优株 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 3 Top ten superior individuals of some single traits of 76 individuals of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

排序 Ranking	单株号 No. of individual	坚果质量/g Nut weight	单株号 No. of individual	种仁鲜质量/g Fresh weight of kernel	单株号 No. of individual	坚果壳厚度/mm Nutshell thickness	单株号 No. of individual	出仁率/% Kernel rate
1	47	8.29±0.20a	29	4.67±0.65a	17	0.62±0.01b	17	60.16±1.24a
2	19	8.23±0.27a	13	4.23±0.12a	10	0.64±0.03ab	29	58.44±2.10b
3	21	8.22±0.31a	47	4.21±0.11a	29	0.69±0.03a	58	57.14±1.89b
4	29	7.81±0.19ab	19	4.14±0.34a	23	0.69±0.08a	35	56.99±0.99bc
5	07	7.75±0.24b	21	4.01±0.20ab	35	0.70±0.12a	23	56.84±2.10c
6	66	7.69±0.14b	58	3.99±0.54b	43	0.70±0.08a	39	56.68±1.67c
7	13	7.69±0.33b	74	3.98±0.32b	39	0.71±0.07a	52	56.62±1.77c
8	56	7.67±0.27b	56	3.92±0.55b	27	0.72±0.13a	48	55.73±2.31cd
9	51	7.65±0.16b	71	3.91±0.44b	55	0.72±0.14a	74	55.70±2.11d
10	60	7.59±0.34b	67	3.90±0.17b	48	0.73±0.09a	53	55.61±2.56d

排序 Ranking	单株号 No. of individual	含油率/% Oil content	单株号 No. of individual	果形指数 Nut shape index	单株号 No. of individual	油酸含量/g·kg ⁻¹ Content of oleic acid	单株号 No. of individual	不饱和脂肪酸含量/g·kg ⁻¹ Content of unsaturated fatty acid
1	71	79.16±0.96a	76	2.46±0.21a	42	486.0±17.8a	31	637.0±14.3a
2	14	77.27±1.67ab	22	1.93±0.14ab	71	440.1±20.1b	60	637.0±11.7a
3	33	76.83±0.89b	69	1.89±0.32b	16	435.1±12.6b	42	634.5±18.9a
4	09	76.45±0.54b	51	1.87±0.16b	47	432.7±17.8b	06	629.0±21.6a
5	66	76.40±0.77b	16	1.87±0.35b	14	424.2±13.4b	71	624.6±25.5a
6	73	76.36±1.45b	74	1.87±0.26b	67	424.0±20.0b	67	596.6±12.1b
7	55	76.20±1.88b	44	1.86±0.18b	60	423.9±17.8b	63	587.1±10.9b
8	42	75.74±0.65b	23	1.86±0.33b	63	423.3±17.6b	16	586.6±15.4b
9	37	75.71±0.79b	49	1.86±0.54b	31	422.3±19.8b	54	577.8±21.3bc
10	53	75.34±1.46b	35	1.85±0.47b	52	409.6±20.1bc	14	568.5±19.9c

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P=0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P=0.05$).

2.4 果实性状和种仁中脂肪酸含量的主成分分析

2.4.1 果实性状的主成分分析 对76株薄壳山核桃单株坚果质量、种仁鲜质量、坚果壳厚度、坚果纵径、坚果横径、果形指数、出仁率和含油率8项果实性状进行主成分分析,结果见表4。

结果表明:前4个主成分累计贡献率达到85.994%,说明前4个主成分能够满足主成分分析

要求。由薄壳山核桃各果实性状的特征向量可以看出,决定第1主成分的果实性状为坚果质量、坚果壳厚度、坚果横径和种仁鲜质量,说明薄壳山核桃的坚果大小在品质评价中最重要;决定第2主成分的果实性状为出仁率和种仁鲜质量;决定第3主成分的果实性状为果形指数;决定第4主成分的果实性状为坚果纵径。

表4 薄壳山核桃单株果实性状的主成分分析结果¹⁾

Table 4 Result of principal component analysis on nut traits of individuals of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch¹⁾

主成分 Principal component	各指标的特征向量 Eigenvector of different indexes								特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	NW	FWK	NT	NL	NWI	NSI	KR	OC			
1	0.557	0.255	0.532	0.128	0.543	-0.052	0.041	0.056	3.019	37.743	37.743
2	-0.020	-0.594	0.209	-0.076	0.022	-0.046	0.705	0.313	1.788	22.352	60.095
3	0.127	-0.144	0.145	0.260	-0.156	0.868	0.065	-0.306	1.104	13.795	73.890
4	-0.118	-0.168	-0.098	0.880	0.075	-0.331	0.058	-0.234	0.968	12.104	85.994

¹⁾ NW: 坚果质量 Nut weight; FWK: 种仁鲜质量 Fresh weight of kernel; NT: 坚果壳厚度 Nutshell thickness; NL: 坚果纵径 Nut length; NWI: 坚果横径 Nut width; NSI: 果形指数 Nut shape index; KR: 出仁率 Kernel rate; OC: 含油率 Oil content.

2.4.2 种仁中脂肪酸含量的主成分分析 对76株薄壳山核桃单株种仁中棕榈酸含量、硬脂酸含量、油酸含量、亚油酸含量和亚麻酸含量进行主成分分析,结果见表5。

结果表明:前3个主成分累计贡献率达到91.314%,说明前3个主成分能够满足主成分分析

要求。由各脂肪酸含量的特征向量可以看出,决定第1主成分的指标为棕榈酸含量、硬脂酸含量、油酸含量、亚油酸含量和亚麻酸含量,说明在评价薄壳山核桃单株种仁中脂肪酸组成时,这5种脂肪酸含量都十分重要;决定第2主成分的指标为油酸含量;决定第3主成分的指标为亚麻酸含量。

表5 薄壳山核桃单株的种仁中脂肪酸含量的主成分分析结果

Table 5 Result of principal component analysis on fatty acid contents in kernel of individuals of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch

主成分 Principal component	各指标的特征向量 Eigenvector of different indexes					特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	棕榈酸含量 Content of palmitic acid	硬脂酸含量 Content of stearic acid	油酸含量 Content of oleic acid	亚油酸含量 Content of linoleic acid	亚麻酸含量 Content of linolenic acid			
1	0.484	0.451	0.411	0.472	0.412	3.176	63.517	63.517
2	-0.170	0.460	0.623	-0.444	-0.418	0.895	17.893	81.410
3	-0.515	-0.058	0.220	-0.286	0.776	0.495	9.904	91.314

2.4.3 果实性状和种仁中脂肪酸含量的主成分分析 对76株薄壳山核桃单株果实性状和种仁中脂肪酸含量进行主成分分析,结果见表6。结果表明:前6个主成分的累计贡献率达到88.348%。第1主成分的贡献率为26.486%,决定指标包括含油率以及种仁中棕榈酸含量、硬脂酸含量、油酸含量、亚油酸含量和亚麻酸含量;第2主成分的贡献率为24.430%,决定指标包括坚果质量、种仁鲜质量、坚果壳厚度和坚果横径;第3主成分的贡献率为13.926%,决定指标包括种仁鲜质量和出仁率;第4主成分的贡献率为

8.486%,决定指标为坚果纵径;第5主成分的贡献率为8.270%,决定指标为果形指数;第6主成分的贡献率为6.750%,决定指标包括坚果纵径和含油率。说明在薄壳山核桃的果实品质评价中,首要指标为种仁中脂肪酸含量,其次为果实大小。

2.4.4 76株单株的主成分分析得分排名 通过主成分分析,对供试的76株薄壳山核桃单株得分进行排名,结果显示:按照果实性状的主成分分析结果排序,排名前10位的单株编号分别为29、74、13、21、71、67、24、58、56和47,其中,29号单株的坚果质量大,种

表 6 薄壳山核桃单株果实性状和种仁中脂肪酸含量的主成分分析结果¹⁾Table 6 Result of principal component analysis on nut traits and fatty acid contents in kernel of individuals of *Carya illinoensis* (Wangenh. K. Koch)¹⁾

主成分 Principal component	各指标的特征向量 Eigenvector of different indexes						特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	NW	FWK	NT	NL	NWI	NSI			
1	0.017	-0.112	0.009	-0.072	0.018	-0.064	0.085	0.291	
2	0.546	0.236	0.531	0.107	0.524	-0.047	0.068	0.089	
3	0.059	0.563	-0.169	0.106	0.060	-0.025	-0.683	-0.203	
4	0.008	-0.306	0.064	0.673	0.169	-0.136	0.184	-0.306	
5	0.137	-0.053	0.122	0.164	-0.182	0.939	-0.038	-0.051	
6	-0.131	0.121	-0.158	0.644	-0.132	-0.046	-0.106	0.618	

主成分 Principal component	各指标的特征向量 Eigenvector of different indexes					特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	PA	SA	OA	LA	LIA			
1	0.444	0.443	0.421	0.419	0.373	3.443	26.486	26.486
2	-0.065	0.153	0.096	-0.070	-0.150	3.176	24.430	50.916
3	0.172	0.045	-0.144	0.239	0.137	1.810	13.926	64.842
4	0.122	-0.160	-0.293	0.295	0.248	1.103	8.486	73.328
5	-0.003	0.042	0.048	0.113	0.011	1.075	8.270	81.598
6	-0.114	0.153	0.057	-0.202	-0.186	0.977	6.750	88.348

¹⁾NW: 坚果质量 Nut weight; FWK: 种仁鲜质量 Fresh weight of kernel; NT: 坚果壳厚度 Nutshell thickness; NL: 坚果纵径 Nut length; NWI: 坚果横径 Nut width; NSI: 果形指数 Nut shape index; KR: 出仁率 Kernel rate; OC: 含油率 Oil content; PA: 棕榈酸含量 Content of palmitic acid; SA: 硬脂酸含量 Content of stearic acid; OA: 油酸含量 Content of oleic acid; LA: 亚油酸含量 Content of linoleic acid; LIA: 亚麻酸含量 Content of linolenic acid.

仁鲜质量大,坚果壳薄,出仁率高。按照种仁中脂肪酸含量的主成分分析结果排序,排名前 10 位的单株编号分别为 31、42、06、60、71、54、27、67、28 和 62,其中,31 号单株种仁中不饱和脂肪酸含量最高。按照果实性状和种仁中脂肪酸含量的主成分分析结果进行综合排序,排名前 10 位的单株编号分别为 60、71、31、07、62、65、21、66、28 和 67,其中,60 号单株种仁中不饱和脂肪酸含量高,坚果质量也较大。

上述结果不仅验证了依据主成分分析结果进行排名的可靠性,同时说明结合果实性状和种仁中脂肪酸含量对薄壳山核桃单株进行综合排序更准确。综合排名前 10 位的薄壳山核桃单株的果实综合品质优良,可作为优良品种选育的候选优株;其中,71 号单株的种仁鲜质量、含油率以及油酸和不饱和脂肪酸的含量均较高,因此,71 号单株可作为薄壳山核桃优良品种选育的首选优株。

3 讨论和结论

薄壳山核桃虽然属于雌雄同株植物,但其大多数品种的雌花和雄花的成熟期不同,因此,薄壳山核桃多为异花授粉,属高度杂合,后代易发生性状分离。本研究中,76 株薄壳山核桃实生单株果实性状变异

系数为 6.63%~20.56%;吴文龙等^[10]的调查结果表明:249 株薄壳山核桃实生后代的果实性状变异系数为 7.12%~26.67%,均说明薄壳山核桃单株果实性状的变异较大。

薄壳山核桃种仁中富含不饱和脂肪酸。相关研究表明:不饱和脂肪酸对促进人体健康有重要作用^[11],如亚麻酸是人体自身不能合成而必须从外界摄取的一种脂肪酸,它作用于婴幼儿视网膜、大脑和神经系统的发育^[12]。供试薄壳山核桃种仁中 5 种主要脂肪酸含量的变异系数均较大,为 18.17%~28.99%,说明供试 76 株薄壳山核桃单株的脂肪酸含量差异大。薄壳山核桃的脂肪酸含量变异较大有利于特定脂肪酸种质材料的比较和筛选,例如从薄壳山核桃实生单株中筛选油酸或亚麻酸含量高的实生单株。Jia 等^[13]应用分子标记手段对薄壳山核桃种质资源多样性进行了研究,结果表明薄壳山核桃不同品种和单株间基因变异显著,这些基因的变异可以通过表型性状及脂肪酸含量的差异得以体现,推测这是导致薄壳山核桃单株间种仁中脂肪酸含量变异较大的遗传机制。

对供试的 76 株薄壳山核桃单项性状优株的筛选结果表明:47 号单株的坚果质量最大;29 号单株的种仁鲜质量最大;17 号单株的坚果壳最薄,出仁率最

高;71号单株的含油率最高;76号单株的果形指数最大;42号单株的油酸含量最高;31号单株的不饱和脂肪酸含量最高。张汇慧等^[14]对南京地区生长的5个薄壳山核桃品种‘波尼’(‘Pawnee’)、‘马汉’(‘Mahan’)、‘莫汉克’(‘Mohawk’)、‘金华’(‘Jinhua’)和‘绿亩1号’(‘Lvzhou 1’)的含油率进行了测定,结果表明,品种‘绿亩1号’的含油率最高,为71.03%。本研究中,71号单株的含油率更高,达到79.16%,可作为含油率高的优株。由此也说明,单项性状优株的筛选可进一步丰富优良品种选育的种质资源。

本研究中,以果实性状和种仁中脂肪酸含量为指标,利用主成分分析法对薄壳山核桃单株分别进行比较和综合分析,以期达到科学合理综合评价薄壳山核桃果实品质的目的。综合分析结果表明:脂肪酸含量和坚果大小是薄壳山核桃果实品质综合评价的2类重要影响因素,且脂肪酸含量的贡献率大于坚果大小。而相关性分析结果表明:5种脂肪酸含量间均有极显著的正相关关系,而果实性状与脂肪酸含量间的相关性却较低,因此,脂肪酸含量应纳入薄壳山核桃果实品质的综合评价指标中。

对比主成分分析的得分排名与单项性状优株筛选的结果,主成分分析法可以考虑多指标的综合影响,在运用多指标综合评价薄壳山核桃果实品质时具有优势。例如:在果实性状和种仁中脂肪酸含量的主成分分析得分中均排名第5位的71号单株,在综合分析时排名第2位;而在果实性状的主成分分析得分中排名第1位的29号单株,其种仁中脂肪酸含量的主成分分析得分较低,因此综合得分低,故未出现在综合排名前10位的优株之列。71号单株的种仁鲜质量、含油率以及种仁中油酸和不饱和脂肪酸的含量均较高,可将71号单株作为育种材料的首选。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或综合性状优良的育种资源。

另外,本研究涉及的采样株数和采样地较少,研究结果具有一定的局限性,后续将在扩大样株数量和采样地点的基础上,根据本研究结果,选择重要的指标,对薄壳山核桃优良单株进行广泛筛选。

参考文献:

- [1] 柳 夔, 孙醉君. 中国重要经济树种[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1986.
- [2] VENKATACHALAM M, KSHIRSAGAR H H, SEERAM N, et al. Biochemical composition and immunological comparison of select pecan [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch] cultivars [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55: 9899-9907.
- [3] 张日清, 李 江, 吕芳德, 等. 我国引种美国山核桃历程及资源现状研究[J]. 经济林研究, 2003, 21(4): 107-109.
- [4] 李永荣, 吴文龙, 刘永芝. 薄壳山核桃种质资源的开发利用[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(27): 13306-13308, 13316.
- [5] WORLEY R E. Compendium of Pecan Production and Research [M]. Lillington: Edwards Brothers Inc., 2002: 41-45.
- [6] 李永荣, 吴文龙, 方 亮, 等. 实生起源的仁用薄壳山核桃优株初步筛选[J]. 林业科技开发, 2010, 24(2): 84-87.
- [7] 李永荣, 刘永芝, 翟 敏, 等. 薄壳山核桃品种果质性状变异及选择改良研究[J]. 江苏林业科技, 2011, 38(3): 6-11.
- [8] 李永荣, 李晓储, 吴文龙, 等. 66个薄壳山核桃实生单株果实性状变异选择研究[J]. 林业科学研究, 2013, 26(4): 438-446.
- [9] BOUALI I, TRABELSI H, ABDALLAH I B, et al. Changes in fatty acid, tocopherol and xanthophyll contents during the development of Tunisian-grown nuts [J]. Journal of the American oil Chemists' Society, 2013, 90: 1869-1876.
- [10] 吴文龙, 李永荣, 方 亮, 等. 薄壳山核桃果实性状的遗传变异与相关性研究[J]. 经济林研究, 2010, 28(3): 25-30.
- [11] MIRALIKBARI H, SHAHIDI F. Antioxidant activity of minor components of tree nut oils [J]. Food Chemistry, 2008, 111: 421-427.
- [12] 杨 静, 常 蕊. α -亚麻酸的研究进展[J]. 农业工程, 2011, 1(1): 72-76.
- [13] JIA X D, WANG T, ZHAI M, et al. Genetic diversity and identification of Chinese-grown pecan using ISSR and SSR markers [J]. Molecules, 2011, 16: 10078-10092.
- [14] 张汇慧, 吴彩娥, 李永荣, 等. 不同品种薄壳山核桃营养成分比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(3): 55-58.

(责任编辑: 张明霞)