

薄壳山核桃果实性状和种仁脂肪酸含量多样性分析

张计育¹, 王 刚¹, 王 涛¹, 贾展慧¹, 张 凡^{1,2}, 李永荣², 刘永芝¹, 宣继萍^{1,①}

[1. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园)江苏省植物资源研究与利用重点实验室, 江苏 南京 210014;
2. 南京绿宙薄壳山核桃科技有限公司, 江苏 南京 210007]

摘要:以江苏省薄壳山核桃(*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch)重点林木良种基地内的42个品种和70份实生单株为供试样本,对10个果实性状和种仁脂肪酸含量进行测定和多样性分析。结果表明:10个果实性状的变异系数为2.86%~32.59%,其中单个坚果种仁质量变异系数最高,其次是单个坚果质量(28.83%)。在供试的112份薄壳山核桃样本种仁中检测到15种脂肪酸,其中,油酸含量(252.485 mg·g⁻¹)最高,其次是亚油酸(133.952 mg·g⁻¹);不饱和脂肪酸含量为396.105 mg·g⁻¹,占总脂肪酸含量的93.528%,且单不饱和脂肪酸含量(254.919 mg·g⁻¹)高于多不饱和脂肪酸含量(141.185 mg·g⁻¹)。15种脂肪酸含量的变异系数为3.145%~57.143%,其中,十四烷酸含量的变异系数最大,十七酸、花生酸、棕榈油酸和亚麻酸含量的变异系数也较大,都在30%以上。相关性分析结果表明:单个坚果质量、坚果横径、坚果纵径和坚果侧径两两之间存在极显著正相关关系;15种脂肪酸含量间大多存在显著或极显著正相关关系。聚类分析结果表明:根据10个果实性状可将供试的112份薄壳山核桃样本分为10组,其中I组出油率最高,Ⅶ组果壳最薄、出仁率最高,Ⅸ组坚果较大;根据种仁15种脂肪酸含量可将供试的112份薄壳山核桃样本分为4组,其中A组绝大多数脂肪酸含量最高。综合分析认为供试的112份薄壳山核桃样本果实性状和种仁脂肪酸含量具有较高的多样性,其中SD49和‘Pawnee’种仁脂肪酸含量最高,可作为选育高油品种的亲本材料。

关键词:薄壳山核桃;果实性状;脂肪酸含量;多样性;育种

中图分类号:Q944;Q946.81;S664.1 文献标志码:A 文章编号:1674-7895(2023)02-0029-09
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.02.04

Analyses on diversities of nut traits and contents of fatty acids in kernels of *Carya illinoensis* ZHANG Jiyu¹, WANG Gang¹, WANG Tao¹, JIA Zhanhui¹, ZHANG Fan^{1,2}, LI Yongrong², LIU Yongzhi¹, XUAN Jiping^{1,①} [1. Jiangsu Key Laboratory for the Research and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China; 2. Nanjing Green Universe Pecan Science & Technology Co. Ltd., Nanjing 210007, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, 32(2): 29-37

Abstract: Taking 42 cultivars and 70 seedling individuals in Jiangsu Province Key Forest Improved Breed Base of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch as test samples, determination and diversity analysis on 10 nut traits and contents of fatty acids in kernels were conducted. The results show that the coefficients of variation of 10 nut traits are 2.86%–32.59%, in which, the coefficient of variation of kernel mass per nut is the highest, followed by single nut mass (28.83%). Fifteen fatty acids are detected in kernels of 112 test *C. illinoensis* samples, in which, the octadecenoic acid content (252.485 mg·g⁻¹) is the highest, followed by the octadecadienoic acid content (133.952 mg·g⁻¹); the unsaturated fatty acid content is 396.105 mg·g⁻¹, accounting for 93.528% of the total fatty acid content,

收稿日期: 2022-11-22

基金项目: 江苏省农业科技自主创新项目[2021(cx)3046];南京市六合区科技计划项目(LHZC2021N01)

作者简介: 张计育(1982—),男,山西沁县人,博士,副研究员,主要从事薄壳山核桃分子生物学研究。

①通信作者 E-mail: xuanjiping@cnbg.net

引用格式: 张计育, 王 刚, 王 涛, 等. 薄壳山核桃果实性状和种仁脂肪酸含量多样性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(2): 29-37.

and the monounsaturated fatty acid content ($254.919 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) is higher than the polyunsaturated fatty acid content ($141.185 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$). The coefficients of variation of contents of the 15 fatty acids are 3.145%–57.143%, in which, the coefficient of variation of tetradecanoic acid content is the highest, and the coefficients of variation of heptadecanoic acid, eicosanoic acid, hexadecenoic acid, and octadecatrienoic acid contents are also relatively high, which are all greater than 30%. The correlation analysis result shows that there are extremely significant positive correlations between single nut mass, nut horizontal diameter, nut vertical diameter, and nut lateral diameter; there are significant or extremely significant positive correlations between most of the contents of 15 fatty acids. The cluster analysis result shows that 112 test *C. illinoensis* samples can be divided into 10 groups according to 10 nut traits, in which, group I has the highest oil yield, group VII has the thinnest shell and the highest kernel yield, and group IX has the relatively large nut; 112 test *C. illinoensis* samples can be divided into 4 groups according to the contents of 15 fatty acids in kernels, in which, group A has the highest contents of most fatty acids. The comprehensive analysis shows that there are relatively high diversities of nut traits and fatty acid contents in kernels of 112 test *C. illinoensis* samples, in which, the contents of fatty acids in kernels of SD49 and ‘Pawnee’ are relatively high, and they can be used as parent materials for breeding high-oil cultivars.

Key words: *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch; nut trait; fatty acid content; diversity; breeding

薄壳山核桃 [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch] 为胡桃科 (Juglandaceae) 山核桃属 (*Carya* Nutt.) 落叶乔木, 起源于北美, 是世界上非常重要的坚果树种之一^[1-4], 其种植区域广泛, 包括亚热带、热带和温带区域。薄壳山核桃于 1900 年从美国引入中国, 大部分品种以嫁接苗形式引进, 少部分品种从引进种子实生苗中选育而来。

薄壳山核桃树体高大, 寿命长, 杂合度高, 童期长。该树种雌雄同株异花且花期不遇, 具有雌先型和雄先型 2 种类型, 表现为雌雄异熟, 最大限度提高了个体间的异花授粉几率和种子繁殖能力。已有研究表明: 雌雄异熟由 1 个显性位点控制^[5], 这种植物生物学模式增加了自然林分的杂合性^[4], 因此, 薄壳山核桃具有复杂的遗传背景和较高的遗传多样性。

目前, 中国的薄壳山核桃产业发展较快, 但是薄壳山核桃种质资源评价及育种工作起步较晚。罗会婷等^[6]对种植于南京的 76 株薄壳山核桃实生单株的 8 个果实性状和 5 种脂肪酸含量等进行了果实品质差异分析和综合评价; 吴文龙等^[7]对南京中山植物园及其周边地区种植的 249 株薄壳山核桃实生单株的遗传变异进行了分析; 李永荣等^[8-9]对南京引种的 21 个薄壳山核桃品种和种植的 66 个实生单株进行了果实性状变异选择研究。这些研究结果表明: 薄壳山核桃果实性状和脂肪酸含量均具有较大变异。薄壳山核桃种仁含油量高, 且富含不饱和脂肪酸, 是健康的木本油食用^[10-11], 因此, 薄壳山核桃种仁脂肪酸组分和含量也是其果实品质的重要评价标准之一。

近年来, 江苏省薄壳山核桃重点林木良种基地从南京、泗洪等地收集薄壳山核桃实生单株 70 株, 从美国引进及自主选育优良品种 42 个。本研究以这 112 份薄壳山核桃样本为材料, 对 10 个果实性状和种仁脂肪酸含量进行了测定和多样性分析, 以期为薄壳山核桃综合性状优良或个别性状独特种质资源的挖掘、创新和保育提供科学支撑, 同时为薄壳山核桃核心种质资源筛选和资源库构建提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试 112 份薄壳山核桃样本收集并保存于江苏省薄壳山核桃重点林木良种基地。70 份实生单株编号为 SD01 至 SD70; 42 个优良品种为 ‘El Mart’、‘Elliott’、‘Odom’、‘Oconee’、‘Barton’、‘Podsednik’、‘Pawnee’、‘Moneymaker’、‘Success’、‘Devore’、‘Desirable’、‘Forkert’、‘Gracross’、‘Starking’、‘Jackson’、‘Jinhua’、‘Caddo’、‘Cape Fear’、‘Kanza’、‘Colby’、‘Creek’、‘绿亩 1 号’ (‘Luzhou No. 1’)、‘Mahan’、‘Moreland’、‘Melrose’、‘Mohawk’、‘Nacono’、‘Cheyenne’、‘Choctaw’、‘Sauber’、‘Seven’、‘绍兴’ (‘Shaoxing’)、‘Schley’、‘Stuart’、‘Sioux’、‘Tejas’、‘Wichita’、‘Waco’、‘Western Schley’、‘Shawnee’、‘Shoshoni’、‘中山 25 号’ (‘Zhongshan No. 25’)。基地为北亚热带季风性湿润气候, 年均气温 16.00 °C,

极端最高气温 42.16 °C, 极端最低气温 -13.00 °C, 年均降水量 1 106 mm, 年均日照时数 1 686 h, 年均无霜期约 240 d。供试植株均为枝接法嫁接的植株(以株龄 3~5 a 的薄壳山核桃自砧根为砧木), 株距 6 m、行距 8 m, 每个样本 5~8 株, 树龄 12~14 a。青皮开裂后在树体中部外围从不同方向采集坚果, 每个样本 3 株, 每株采集 30 粒成熟、饱满的果实。果实自然风干 30 d 后, 对果实性状相关指标进行测定, 同时收集种仁, 保存于 -20 °C 冰箱中, 用于脂肪酸组分和含量分析。

1.2 方法

1.2.1 果实性状测定 参考罗会婷等^[6]的方法对单个坚果质量、坚果横径、坚果纵径、坚果侧径、果形指数、横侧比、单个坚果种仁质量、出仁率、果壳厚度、出油率进行测定分析。使用数显游标卡尺(精度 0.01 mm)测量坚果(果实去除青皮后的部分)的纵径、横径和侧径及果壳(中果皮)厚度; 使用电子天平(精度 0.001 g)称量单个坚果质量和单个坚果种仁(可食部分)质量。根据上述检测结果计算果形指数和出仁率, 计算公式分别为果形指数 = 坚果纵径/坚果横径, 出仁率 = (单个坚果种仁质量/单个坚果质量) × 100%。人工剥壳取种仁, 于 60 °C 烘干至恒质量, 即为干种仁; 取 30 粒干种仁, 切碎、混匀; 称取约 3 g 碎种仁, 采用索氏提取法^[12-13]提取油脂, 每个样株重复提取 3 次, 提取前后种仁的质量差即为油脂质量, 根据公式“出油率 = (油脂质量/单个坚果种仁质量) × 100%”计算出油率。提取的油脂于 -20 °C 保存, 用于后续脂肪酸组分和含量分析。

1.2.2 种仁脂肪酸组分和含量分析 采用 GC-MS 外标法测定薄壳山核桃种仁中脂肪酸组分及含量^[14]。分别取 0.2 g 提取的油脂样品, 经皂化、甲酯化处理后, 采用 Agilent 7890A 和 5975C 气质联用仪

(美国 Agilent 科技有限公司)进行 GC-MS 分析。色谱分析条件: DB-225MS 色谱柱(30 m × 0.25 mm, 0.25 μm; 美国 Agilent 科技有限公司)。载气为氦气, 隔垫吹扫流速为 3.0 mL · min⁻¹。升温程序: 初始温度 50 °C, 保持 1 min; 先以 5 °C · min⁻¹ 速率升温至 200 °C, 再以 2 °C · min⁻¹ 速率升温至 230 °C, 保持 10 min。前进样口温度 250 °C, 传输线温度 250 °C, 离子源温度 230 °C, 四级杆温度 150 °C, 电离电压 -70 eV。利用 NIST11 质谱文库鉴定脂肪酸组分, 用 Agilent MassHunter B.05.00 工作站处理相关数据。总脂肪酸含量为检测到的所有脂肪酸含量之和, 单不饱和脂肪酸含量为棕榈油酸、十七碳烯酸、油酸和二十烯酸含量之和, 多不饱和脂肪酸为亚油酸和亚麻酸含量之和, 不饱和脂肪酸含量为单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸含量之和。

1.3 数据处理和分析

利用 EXCEL 2020 软件进行均值、最大值、最小值、标准差、变异系数分析; 利用 SPSS 16.0 软件进行相关性分析; 利用 NTSYS 软件进行 UPGMA 聚类分析, 利用 MEGA7.0 软件绘制聚类图^[15]。

2 结果和分析

2.1 薄壳山核桃果实性状和脂肪酸含量差异分析

2.1.1 果实性状多样性分析 供试 112 份薄壳山核桃样本 10 个果实性状的分析结果(表 1)显示: 10 个果实性状中有 3 个的变异系数大于 20%, 其中单个坚果种仁质量的变异系数最高, 为 32.59%, 其次是单个坚果质量(28.83%), 果壳厚度的变异系数也较高(25.64%)。其余果实性状的变异系数较低(小于 20%), 其中坚果横侧比的变异系数最低, 仅 2.86%。

2.1.2 种仁脂肪酸组分及含量分析 以 36 个脂肪酸

表 1 112 份薄壳山核桃样本果实性状多样性分析¹⁾

Table 1 Analysis on diversity of nut traits of 112 *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch samples¹⁾

统计量 Statistic	m_N/g	D_H/mm	D_V/mm	D_L/mm	I	R	m_K/g	$y_K/\%$	d/mm	$y_O/\%$
均值 Mean	6.14	21.67	38.50	20.59	1.78	1.05	3.16	51.22	0.78	65.92
最大值 Maximum	10.62	26.37	54.38	25.86	2.43	1.13	6.28	62.85	1.77	73.82
最小值 Minimum	1.94	14.02	22.40	13.74	1.09	1.00	1.06	31.13	0.41	55.36
标准差 Standard deviation	1.77	2.43	6.23	2.38	0.26	0.03	1.03	5.70	0.20	3.54
CV/%	28.83	11.21	16.18	11.56	14.61	2.86	32.59	11.13	25.64	5.37

¹⁾ m_N : 单个坚果质量 Single nut mass; D_H : 坚果横径 Nut horizontal diameter; D_V : 坚果纵径 Nut vertical diameter; D_L : 坚果侧径 Nut lateral diameter; I: 果形指数 Nut shape index; R: 坚果横侧比 Ratio of nut horizontal diameter to lateral diameter; m_K : 单个坚果种仁质量 Kernel mass per nut; y_K : 出仁率 Kernel yield; d : 果壳厚度 Shell thickness; y_O : 出油率 Oil yield. CV: 变异系数 Coefficient of variation.

为标准品,在供试 112 份薄壳山核桃样本种仁中检测到 15 种脂肪酸组分,各组分含量见表 2。结果显示:15 种脂肪酸中油酸含量 ($252.485 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 最高,其次是亚油酸 ($133.952 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),棕榈酸和亚麻酸的含量也较高,分别为 26.393 和 $7.233 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。不饱和脂肪酸含量为 $396.105 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,占总脂肪酸含量的 93.528% ,单不饱和脂肪酸含量 ($254.919 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) 高于多不饱和脂肪酸含量 ($141.185 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。

从变异系数来看,大部分脂肪酸组分含量的变异系数大于 20% ,其中,十四烷酸含量的变异系数最大,为 57.143% ;十七酸、花生酸、棕榈油酸和亚麻酸含量的变异系数也较大,分别为 37.778% 、 37.607% 、 33.556% 和 31.660% ,月桂酸含量的变异系数最小,为 3.145% 。单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸含量的变异系数分别为 15.552% 、 25.015% 和 14.669% 。

表 2 112 份薄壳山核桃样本种仁中脂肪酸含量分析

Table 2 Analysis on contents of fatty acids in kernels of 112 *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch samples

统计量 ¹⁾ Statistic ¹⁾	脂肪酸含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) ²⁾					Content of fatty acids ²⁾				
	C10 : 0	C12 : 0	C14 : 0	C15 : 0	C16 : 0	C16 : 1	C17 : 0	C17 : 1	C18 : 0	C18 : 1
\bar{X}	0.014	0.159	0.077	0.096	26.393	0.450	0.135	0.361	0.014	252.485
λ_{\max}	0.037	0.188	0.260	0.167	50.579	0.852	0.344	0.758	0.032	401.801
λ_{\min}	0.006	0.151	0.000	0.055	0.408	0.188	0.000	0.184	0.006	165.063
SD	0.004	0.005	0.044	0.024	5.660	0.151	0.051	0.078	0.004	39.118
CV/%	28.571	3.145	57.143	25.000	21.445	33.556	37.778	21.607	28.571	15.493

统计量 ¹⁾ Statistic ¹⁾	脂肪酸含量/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) ²⁾					Content of fatty acids ²⁾			
	C18 : 2	C18 : 3	C20 : 0	C20 : 1	C23 : 0	TFA	MNFA	PNFA	NFA
\bar{X}	133.952	7.233	0.351	1.623	0.171	423.514	254.919	141.185	396.105
λ_{\max}	244.335	17.742	0.999	3.477	0.416	713.911	406.776	262.077	668.853
λ_{\min}	58.635	2.130	0.000	0.675	0.102	251.251	166.234	60.765	235.884
SD	33.336	2.290	0.132	0.434	0.037	62.747	39.646	35.318	58.104
CV/%	24.887	31.660	37.607	26.741	21.637	14.816	15.552	25.015	14.669

¹⁾ \bar{X} : 均值 Mean; λ_{\max} : 最大值 Maximum; λ_{\min} : 最小值 Minimum; SD: 标准差 Standard deviation; CV: 变异系数 Coefficient of variation.

²⁾ C10 : 0: 癸酸 Decanoic acid; C12 : 0: 月桂酸 Dodecanoic acid; C14 : 0: 十四烷酸 Tetradecanoic acid; C15 : 0: 十五碳酸 Pentadecanoic acid; C16 : 0: 棕榈酸 Hexadecanoic acid; C16 : 1: 棕榈油酸 Hexadecenoic acid; C17 : 0: 十七酸 Heptadecanoic acid; C17 : 1: 十七碳烯酸 Heptadecenoic acid; C18 : 0: 硬脂酸 Octadecanoic acid; C18 : 1: 油酸 Octadecenoic acid; C18 : 2: 亚油酸 Octadecadienoic acid; C18 : 3: 亚麻酸 Octadecatrienoic acid; C20 : 0: 花生酸 Eicosanoic acid; C20 : 1: 二十烯酸 Eicosenoic acid; C23 : 0: 二十三烷酸 Tricosanoic acid; TFA: 总脂肪酸 Total fatty acids; MNFA: 单不饱和脂肪酸 Monounsaturated fatty acids; PNFA: 多不饱和脂肪酸 Polyunsaturated fatty acids; NFA: 不饱和脂肪酸 Unsaturated fatty acids.

2.2 相关性分析

2.2.1 果实性状相关性分析 供试 112 份薄壳山核桃样本 10 个果实性状的相关性分析结果(表 3)显示:单个坚果质量、坚果横径、坚果纵径和坚果侧径两两之间呈极显著正相关。果形指数与坚果纵径呈极显著正相关,与坚果横径和坚果侧径呈极显著负相关。坚果横侧比与坚果侧径呈显著负相关。单个坚果种仁质量与单个坚果质量、坚果横径、坚果纵径和坚果侧径呈极显著正相关。果壳厚度与坚果侧径呈显著正相关,与横侧比和出仁率分别呈显著和极显著负相关。出油率与单个坚果质量、单个坚果种仁质量和出仁率呈极显著正相关。

2.2.2 种仁脂肪酸含量相关性分析 供试 112 份薄壳山核桃样本种仁中 15 种脂肪酸含量的相关性分析

结果(表 4)显示:月桂酸、十四烷酸、十五碳酸和棕榈酸含量两两之间呈显著或极显著正相关。除了亚油酸与二十三烷酸含量呈不显著正相关外,油酸、亚油酸、亚麻酸、花生酸、二十烯酸和二十三烷酸含量两两之间均呈显著或极显著正相关。除十四烷酸、棕榈油酸和硬脂酸含量外,十七酸含量与其余 11 种脂肪酸含量呈显著或极显著正相关。除棕榈油酸和硬脂酸含量外,十七碳烯酸、油酸和二十烯酸含量与其余脂肪酸含量呈显著或极显著正相关。除癸酸、棕榈油酸、硬脂酸和二十三烷酸含量外,亚油酸含量与其余脂肪酸含量呈显著或极显著正相关。除癸酸、棕榈油酸和硬脂酸含量外,亚麻酸含量与其余脂肪酸含量呈显著或极显著正相关。棕榈油酸和硬脂酸含量与其余脂肪酸含量无显著相关性。以上结果表明:薄壳山

表 3 112 份薄壳山核桃样本果实性状的相关性分析¹⁾Table 3 Correlation analysis on nut traits of 112 *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch samples¹⁾

性状 Trait	各性状间的相关性系数 Correlation coefficient among different traits								
	m_N	D_H	D_V	D_L	I	R	m_K	y_K	d
D_H	0.792 **								
D_V	0.706 **	0.485 **							
D_L	0.807 **	0.962 **	0.460 **						
I	0.126	-0.273 **	0.701 **	-0.272 **					
R	-0.107	0.045	0.048	-0.214 *	-0.005				
m_K	0.937 **	0.700 **	0.679 **	0.703 **	0.160	-0.043			
y_K	0.083	-0.038	0.061	-0.072	0.070	0.175	0.414 **		
d	0.190	0.146	0.065	0.214 *	-0.031	-0.257 *	-0.103	-0.793 **	
y_0	0.386 **	0.135	0.181	0.187	0.084	-0.176	0.418 **	0.262 **	-0.032

¹⁾ m_N : 单个坚果质量 Single nut mass; D_H : 坚果横径 Nut horizontal diameter; D_V : 坚果纵径 Nut vertical diameter; D_L : 坚果侧径 Nut lateral diameter; I: 果形指数 Nut shape index; R: 坚果横侧比 Ratio of nut horizontal diameter to lateral diameter; m_K : 单个坚果种仁质量 Kernel mass per nut; y_K : 出仁率 Kernel yield; d : 果壳厚度 Shell thickness; y_0 : 出油率 Oil yield. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

表 4 112 份薄壳山核桃样本种仁中脂肪酸含量的相关性分析¹⁾Table 4 Correlation analysis on contents of fatty acids in kernels of 112 *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch samples¹⁾

CFA	脂肪酸含量间的相关性系数 Correlation coefficient among fatty acid contents													
	C10 : 0	C12 : 0	C14 : 0	C15 : 0	C16 : 0	C16 : 1	C17 : 0	C17 : 1	C18 : 0	C18 : 1	C18 : 2	C18 : 3	C20 : 0	C20 : 1
C12 : 0	0.533 **													
C14 : 0	-0.114	0.510 **												
C15 : 0	-0.122	0.235 *	0.691 **											
C16 : 0	0.045	0.344 **	0.710 **	0.657 **										
C16 : 1	0.124	0.084	-0.007	-0.058	0.032									
C17 : 0	0.381 **	0.270 **	0.144	0.271 **	0.445 **	-0.005								
C17 : 1	0.412 **	0.653 **	0.516 **	0.456 **	0.604 **	0.114	0.453 **							
C18 : 0	0.102	0.010	-0.047	-0.005	0.010	-0.102	-0.025	-0.064						
C18 : 1	0.391 **	0.578 **	0.426 **	0.288 **	0.547 **	0.137	0.499 **	0.787 **	-0.082					
C18 : 2	-0.105	0.289 **	0.611 **	0.769 **	0.659 **	-0.012	0.225 *	0.508 **	-0.120	0.190 *				
C18 : 3	0.001	0.299 **	0.450 **	0.682 **	0.577 **	-0.049	0.420 **	0.473 **	-0.137	0.229 *	0.857 **			
C20 : 0	0.465 **	0.338 **	0.065	0.239 *	0.303 **	-0.068	0.707 **	0.345 **	0.014	0.452 **	0.215 *	0.482 **		
C20 : 1	0.312 **	0.563 **	0.507 **	0.413 **	0.567 **	0.085	0.525 **	0.746 **	-0.098	0.894 **	0.350 **	0.366 **	0.462 **	
C23 : 0	0.569 **	0.385 **	0.083	0.162	0.327 **	0.078	0.353 **	0.565 **	0.153	0.587 **	0.161	0.227 *	0.456 **	0.524 **

¹⁾ CFA: Fatty acid content. C10 : 0: 癸酸 Decanoic acid; C12 : 0: 月桂酸 Dodecanoic acid; C14 : 0: 十四烷酸 Tetradecanoic acid; C15 : 0: 十五烷酸 Pentadecanoic acid; C16 : 0: 棕榈酸 Hexadecanoic acid; C16 : 1: 棕榈油酸 Hexadecenoic acid; C17 : 0: 十七烷酸 Heptadecanoic acid; C17 : 1: 十七碳烯酸 Heptadecenoic acid; C18 : 0: 硬脂酸 Octadecanoic acid; C18 : 1: 油酸 Octadecenoic acid; C18 : 2: 亚油酸 Octadecadienoic acid; C18 : 3: 亚麻酸 Octadecatrienoic acid; C20 : 0: 花生酸 Eicosanoic acid; C20 : 1: 二十烯酸 Eicosenoic acid; C23 : 0: 二十三烷酸 Tricosanoic acid. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

核桃种仁 15 种脂肪酸含量间大多存在显著或极显著正相关。

2.3 聚类分析

2.3.1 基于果实性状的聚类分析 根据 112 份薄壳山核桃样本 10 个果实性状进行聚类分析,并根据分组结果计算各组果实性状平均值,结果见图 1 和表 5。

结果显示:供试 112 份薄壳山核桃样本可分为 10 组。I 组仅包含 1 份薄壳山核桃样本,即 SD04,其果形指数最小 (1.094),近似圆形,果壳极厚 (1.774

mm),出仁率 (31.131%) 极低,但是出油率 (69.264%) 最高。II 组包含 9 份薄壳山核桃样本,单个坚果质量 (3.177 g)、坚果横径 (17.287 mm)、坚果侧径 (16.380 mm) 和单个坚果种仁质量 (1.736 g) 均最小。III 组包含 7 份薄壳山核桃样本,坚果纵径 (49.560 mm)、果形指数 (2.084) 和单个坚果种仁质量 (5.092 g) 均最高,单个坚果质量 (8.793 g) 和出仁率 (57.869%) 也较高。IV 组包含 10 份薄壳山核桃样本,出油率 (59.827%) 最低。V 组包含 20 份薄壳山核桃样本,

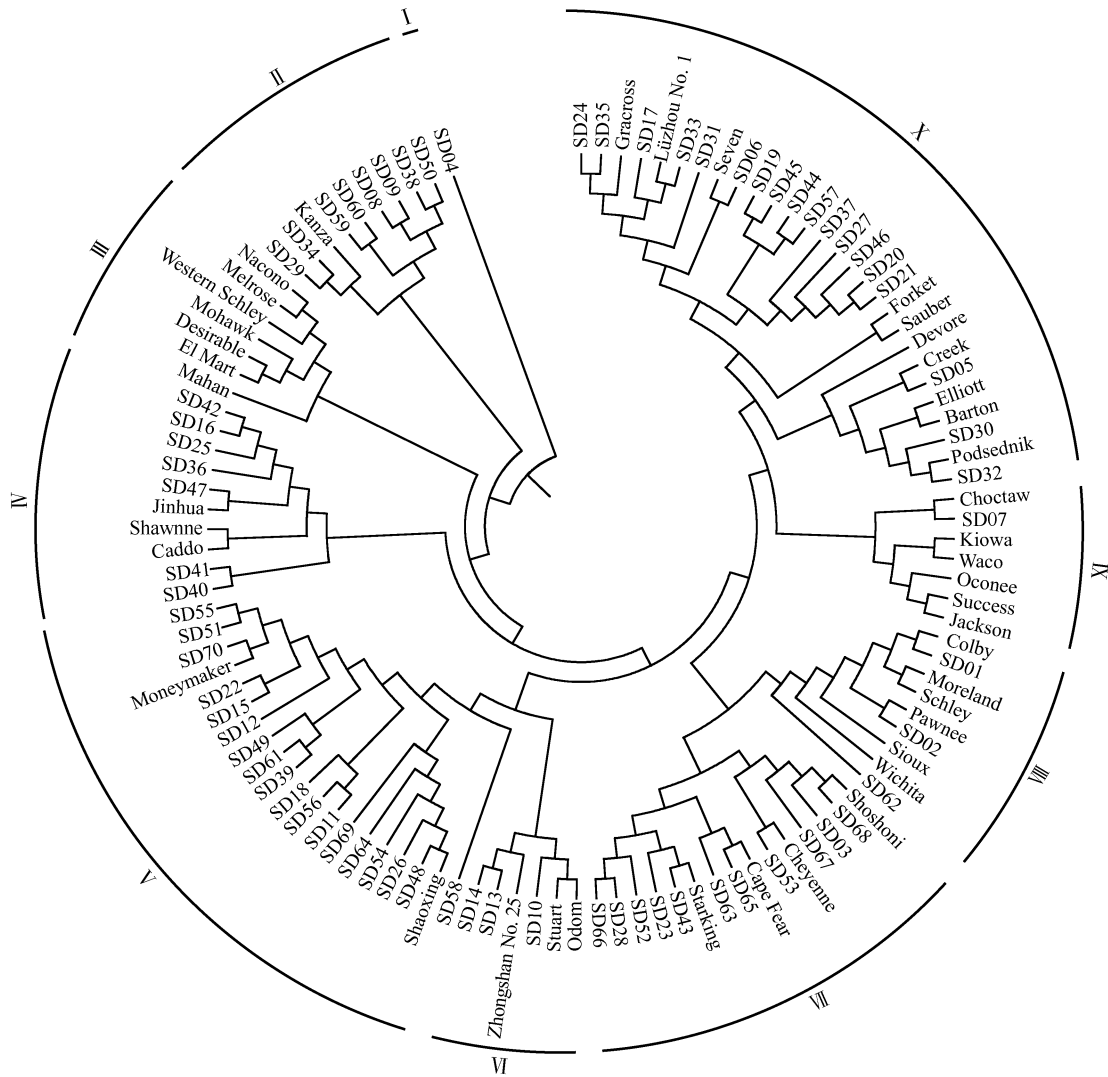


图 1 基于 10 个果实性状的 112 份薄壳山核桃样本的 UPGMA 聚类图
 Fig. 1 UPGMA cluster dendrogram of 112 *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch samples based on 10 nut traits

表 5 10 组薄壳山核桃果实性状均值¹⁾
 Table 5 Means of fruit phenotypic traits of 10 groups of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch¹⁾

组别 Group	m_N/g	D_H/mm	D_V/mm	D_L/mm	I	R	m_K/g	$y_K/\%$	d/mm	$y_O/\%$
I	6.302	23.418	25.617	22.710	1.094	1.031	1.964	31.131	1.774	69.264
II	3.177	17.287	27.081	16.380	1.585	1.055	1.736	54.229	0.669	65.407
III	8.793	23.877	49.560	22.771	2.084	1.050	5.092	57.869	0.655	66.319
IV	5.671	21.537	42.009	20.402	1.967	1.056	2.530	44.620	0.872	59.827
V	7.308	23.819	35.845	23.253	1.506	1.025	3.111	42.508	1.092	66.688
VI	4.711	20.749	32.847	19.766	1.599	1.050	2.326	49.216	0.768	64.019
VII	6.571	20.939	42.772	19.928	2.051	1.053	3.915	59.549	0.600	68.245
VIII	5.995	21.748	37.178	20.665	1.712	1.061	3.356	55.969	0.640	66.102
IX	9.200	25.530	44.114	24.769	1.730	1.031	4.658	50.754	0.844	68.349
X	6.501	21.995	40.069	20.632	1.834	1.066	3.224	49.432	0.880	67.906

¹⁾ m_N : 单个坚果质量 Single nut mass; D_H : 坚果横径 Nut horizontal diameter; D_V : 坚果纵径 Nut vertical diameter; D_L : 坚果侧径 Nut lateral diameter; I: 果形指数 Nut shape index; R: 坚果横侧比 Ratio of nut horizontal diameter to lateral diameter; m_K : 单个坚果种仁质量 Kernel mass per nut; y_K : 出仁率 Kernel yield; d : 果壳厚度 Shell thickness; y_O : 出油率 Oil yield.

表6 4组薄壳山核桃种仁中脂肪酸含量均值¹⁾Table 6 Means of contents of fatty acids in kernels of 4 groups of *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch germplasm resources¹⁾

组别 Group	脂肪酸含量/(mg·g ⁻¹) Content of fatty acids									
	C10:0	C12:0	C14:0	C15:0	C16:0	C16:1	C17:0	C17:1	C18:0	C18:1
A	0.027	0.177	0.215	0.159	46.679	0.599	0.318	0.647	0.017	390.816
B	0.015	0.152	0.000	0.062	14.672	0.188	0.043	0.184	0.011	165.064
C	0.012	0.161	0.142	0.146	35.779	0.711	0.152	0.432	0.012	270.912
D	0.013	0.159	0.074	0.093	25.896	0.446	0.134	0.360	0.014	254.979

组别 Group	脂肪酸含量/(mg·g ⁻¹) Content of fatty acids									
	C18:2	C18:3	C20:0	C20:1	C23:0	TFA	MNFA	PNFA	NFA	
A	208.795	14.242	0.881	3.412	0.327	667.309	395.473	223.037	618.510	
B	66.003	3.647	0.291	0.798	0.120	251.251	166.234	69.650	235.884	
C	206.253	11.515	0.403	1.903	0.156	528.689	273.958	217.768	491.726	
D	129.491	6.900	0.342	1.634	0.172	420.706	257.419	136.391	393.810	

¹⁾ C10:0: 癸酸 Decanoic acid; C12:0: 月桂酸 Dodecanoic acid; C14:0: 十四烷酸 Tetradecanoic acid; C15:0: 十五碳酸 Pentadecanoic acid; C16:0: 棕榈酸 Hexadecanoic acid; C16:1: 棕榈油酸 Hexadecenoic acid; C17:0: 十七酸 Heptadecanoic acid; C17:1: 十七碳烯酸 Heptadecenoic acid; C18:0: 硬脂酸 Octadecanoic acid; C18:1: 油酸 Octadecenoic acid; C18:2: 亚油酸 Octadecadienoic acid; C18:3: 亚麻酸 Octadecatrienoic acid; C20:0: 花生酸 Eicosanoic acid; C20:1: 二十烯酸 Eicosenoic acid; C23:0: 二十三烷酸 Tricosanoic acid; TFA: 总脂肪酸 Total fatty acids; MNFA: 单不饱和脂肪酸 Monounsaturated fatty acids; PNFA: 多不饱和脂肪酸 Polyunsaturated fatty acids; NFA: 不饱和脂肪酸 Unsaturated fatty acids.

3 讨 论

薄壳山核桃属于雌雄同株异花植物,但多数情况下雌雄异熟^[16],因此,薄壳山核桃多为异花授粉,后代易发生性状分离。本研究中112份薄壳山核桃样本10个果实性状的变异系数为2.86%~32.59%,表明这些薄壳山核桃样本的果实性状存在变异,而且本研究得到的单个坚果质量、坚果横径、坚果纵径、果形指数、单个坚果种仁质量、出仁率和果壳厚度的变异系数均大于罗会婷等^[6]和吴文龙等^[7]的研究结果,其原因可能是本研究选择了42个优良品种,导致果实性状变异增加,说明群体类型和数量对于植物表型性状的研究具有较大影响。

研究表明:单不饱和脂肪酸可降低低密度脂蛋白胆固醇,预防冠心病,控制血压,抑制炎症^[17-18]。多不饱和脂肪酸具有抗血栓和抗动脉粥样硬化的特性^[19],能够预防动脉高血压、胰岛素耐受性、糖尿病、肾病等^[20-21]。薄壳山核桃不同样本种仁中的脂肪酸含量存在差异^[22-23]。本研究首次对薄壳山核桃种仁中的36种脂肪酸进行了测定,在供试样本种仁中检测到15种脂肪酸,其中油酸含量最高,其次是亚油酸,不饱和脂肪酸含量占总脂肪酸含量的93.528%,且单不饱和脂肪酸含量高于多不饱和脂肪酸含量;15种脂肪酸含量的变异系数为3.145%~57.143%,表明

脂肪酸含量在不同样本中的变异较大。薄壳山核桃坚果种仁脂肪酸含量高对于选育富含特定脂肪酸的品种具有重要利用价值。本研究基于脂肪酸含量的聚类结果显示:A组SD49和‘Pawnee’的绝大多数脂肪酸含量及总脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸含量均最高,为富含脂肪酸的种质资源,可作为选育高油品种的亲本。

薄壳山核桃在江苏、安徽等地种植面积持续增加,选育性状优良的种质资源是目前的重点工作之一。本研究结果表明薄壳山核桃果实性状和脂肪酸含量多样性较高。在中国120余年的栽培过程中,由不同种质资源之间杂交产生的后代具有1个或多个有价值的特性,如本研究中I组的SD04坚果近似圆形,虽果壳极厚,但出油率最高;VII组的15份样本的出仁率最高;IX组的7份样本坚果较大;A组的SD49和‘Pawnee’富含脂肪酸。这些性状优良的薄壳山核桃样本可用于薄壳山核桃的育种和开发。

薄壳山核桃实生苗从播种至挂果一般需要13~15 a,育种周期长达28~30 a。随着现代分子生物学技术的发展,SNP标记为果树遗传多样性研究、品种鉴定、连锁图谱构建等提供了重要的技术支持^[24-30]。本项目团队将在此研究基础上,基于全基因组测序和SNP标记,开展薄壳山核桃高油等重要性状的高通量基因型和表型鉴定评价研究,挖掘控制高油等重要性状的关键基因,开发可供育种利用的分子标记,发掘

具有自主知识产权和重大应用价值的核心基因, 筛选和创制优质高油薄壳山核桃新种质资源。

参考文献:

- [1] GRAUKE L J, WOOD B W, HARRIS M K. Crop vulnerability: *Carya*[J]. HortScience, 2016, 51(6): 653-663.
- [2] POLETTO T, MUNIZ M F B, POLETTO I, et al. Methods for overcome dormancy of pecan *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch seeds[J]. Revista Árvore, 2015, 39(6): 1111-1118.
- [3] 莫正海, 张计育, 翟敏, 等. 薄壳山核桃在南京的开花物候期观察和比较[J]. 植物资源与环境学报, 2013, 22(1): 57-62.
- [4] BENTLEY N, GRAUKE L J, KLEIN P. Genotyping by sequencing (GBS) and SNP marker analysis of diverse accessions of pecan (*Carya illinoensis*) [J]. Tree Genetics and Genomes, 2019, 15: 8.
- [5] THOMPSON T E, ROMBERG L D. Inheritance of heterodichogamy in pecan[J]. The Journal of Heredity, 1985, 76: 456-458.
- [6] 罗会婷, 贾晓东, 翟敏, 等. 76 株薄壳山核桃实生单株的果实品质差异及综合评价[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(1): 47-54.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] ROS E, MATAIX J. Fatty acid composition of nuts-implications for cardiovascular health[J]. British Journal of Nutrition, 2006, 96(S2): S29-S35.
- [11] VILLARREAL-LOZOYA J E, LOMBARDINI L, CISNEROS-ZEVALLOS L. Phytochemical constituents and antioxidant capacity of different pecan [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch] cultivars[J]. Food Chemistry, 2007, 102(4): 1241-1249.
- [12] TORO-VAZQUEZ J F, CHARÓ-ALONSO M A, PÉREZ-BRICEÑO F. Fatty acid composition and its relationship with physicochemical properties of pecan (*Carya illinoensis*) oil[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1999, 76(8): 957-965.
- [13] JABAR J M, LAJIDE L, ADETUYI A O, et al. Yield, quality, kinetics and thermodynamics studies on extraction of *Thevetia peruviana* oil from its oil bearing seeds[J]. Journal of Cereals and Oilseeds, 2015, 6(5): 24-30.
- [14] EL RIACHY M, HAMADE A, AYOUB R, et al. Oil content, fatty acid and phenolic profiles of some olive varieties growing in Lebanon[J]. Frontiers in Nutrition, 2019, 6: 94.
- [15] 林存学, 杨晓华, 刘海荣. 东北寒地 96 份李种质资源表型性状遗传多样性分析[J]. 园艺学报, 2020, 47(10): 1917-1929.
- [16] 张计育, 张凡. 中国薄壳山核桃种质资源研究[M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2022: 11.
- [17] ALONSO A, RUIZ-GUTIERREZ V, MARTÍNEZ-GONZÁLEZ M A. Monounsaturated fatty acids, olive oil and blood pressure: epidemiological, clinical and experimental evidence [J]. Public Health Nutrition, 2006, 9(2): 251-257.
- [18] RAJARAM S, BURKE K, CONNELL B, et al. A monounsaturated fatty acid-rich pecan-enriched diet favorably alters the serum lipid profile of healthy men and women[J]. Journal of Nutrition, 2001, 131(9): 2275-2279.
- [19] SIMOPOULOS A P. Omega-3 fatty acids in health and disease and in growth and development [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1991, 54(3): 438-463.
- [20] MANCO M, CALVANI M, MINGRONE G. Effects of dietary fatty acids on insulin sensitivity and secretion [J]. Diabetes, Obesity and Metabolism, 2004, 6: 402-413.
- [21] GARMAN J H, MULRONEY S, MANIGRASSO M, et al. Omega-3 fatty acid rich diet prevents diabetic renal disease [J]. American Journal of Physiology: Renal Physiology, 2009, 296(2): F306-F316.
- [22] BOUALI I, TRABELSI H, ABDALLAH I B. et al. Changes in fatty acid, tocopherol and xanthophyll contents during the development of tunisian-grown pecan nuts [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2013, 90: 1869-1876.
- [23] WAKELING L T, MASON R L, D'ARCY B R, et al. Composition of pecan cultivars Wichita and Western Schley [*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch] grown in Australia [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49: 1277-1281.
- [24] 黄小凤, 韦阳连, 袁叶, 等. 基于 SNP 分子标记的 221 份荔枝品种(品系)的遗传多样性分析及核心种质库构建 [J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(4): 74-78.
- [25] 沈琳, 周利, 张亚利. 作孚连蕊茶的形态特征观测和 SNP 位点分析 [J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(6): 90-92.
- [26] FERNANDES L D S, CORREA F M, KEITH T I, et al. QTL mapping and identification of SNP-haplotypes affecting yield components of *Theobroma cacao* L. [J]. Horticulture Research, 2020, 7: 26.
- [27] JOYNSON R, MOLERO G, COOMBES B, et al. Uncovering candidate genes involved in photosynthetic capacity using unexplored genetic variation in Spring Wheat [J]. Plant Biotechnology Journal, 2021, 19(8): 1537-1552.
- [28] NGUYEN N N, KIM M, JUNG J K, et al. Genome-wide SNP discovery and core marker sets for assessment of genetic variations in cultivated pumpkin (*Cucurbita* spp.) [J]. Horticulture Research, 2020, 7: 121.
- [29] PENG L L, SUN S, YANG B, et al. Genome-wide association study reveals that the cupin domain protein OsCDP3.10 regulates seed vigour in rice [J]. Plant Biotechnology Journal, 2022, 20(3): 485-498.
- [30] ZHANG M Y, XUE C, HU H, et al. Genome-wide association studies provide insights into the genetic determination of fruit traits of pear [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1144.

(责任编辑: 吴芯夷)