北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

湖南山核桃果实表型与油脂组分多样性分析

宋璐瑶 陈韵竹 周宵 李力 李培旺 吉悦娜 陈景震 刘强

Diversity analysis of fruit phenotypes and oil composition in *Carya hunanensis*

Song Luyao, Chen Yunzhu, Zhou Xiao, Li Li, Li Peiwang, Ji Yuena, Chen Jingzhen, Liu Qiang

引用本文:
宋璐瑶, 陈韵竹, 周宵, 李力, 李培旺, 吉悦娜, 陈景震, 刘强. 湖南山核桃果实表型与油脂组分多样性分析[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(5):94–104. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250425
Song Luyao, Chen Yunzhu, Zhou Xiao, Li Li, Li Peiwang, Ji Yuena, Chen Jingzhen, Liu Qiang. Diversity analysis of fruit phenotypes and oil composition in *Carya hunanensis*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5):94–104. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250425

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250425

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

滇藏杜英天然种质资源果实性状变异和综合评价
Variation and comprehensive evaluation of fruit traits in natural germplasm resources of *Elaeocarpus braceanus*
北京林业大学学报, 2025, 47(5): 37–47. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240350

基于SSR分子标记的紫椴遗传多样性分析和指纹图谱构建
Genetic diversity analysis and fingerprint mapping construction of *Tilia amurensis* based on SSR molecular markers
北京林业大学学报, 2025, 47(3): 28–37. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240399

油料树种千年桐的SSR标记开发、遗传多样性与群体结构分析
SSR marker development, genetic diversity and population structure analysis in oil tree species *Vernicia montana*
北京林业大学学报, 2021, 43(11): 50–61. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210054

毛白杨耐寒种质资源遗传鉴定及评价
Genetic identification and evaluation of cold–resistant germplasm resources in *Populus tomentosa*
北京林业大学学报, 2023, 45(12): 59–67. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220363

林麝饲养种群mtDNA遗传多样性和遗传结构分析
Analysis of mtDNA genetic diversity and genetic structure of captive forest musk deer population
北京林业大学学报, 2022, 44(3): 98–105. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210050

薄壳山核桃无性系种实性状综合评价
Comprehensive evaluation of seed and fruit traits of thin shell of pecan clones
北京林业大学学报, 2023, 45(5): 57–66. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210323

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250425

湖南山核桃果实表型与油脂组分多样性分析

宋璐瑶[1,2] 陈韵竹[2,3] 周 宵[2,3] 李 力[2] 李培旺[2,3]
吉悦娜[2,3] 陈景震[2,3] 刘 强[1]
（1. 中南林业科技大学生命科学与技术学院，湖南 长沙 410004；2. 湖南省林业科学院木本油料资源利用全国重点实验室，湖南 长沙 410004；
3. 岳麓山实验室经济林品种创制中心，湖南 长沙 410004）

摘要:【目的】湖南山核桃是我国特有的一种优质油料种质资源，本研究旨在系统揭示湖南山核桃果实性状及种仁油脂性状的变异规律和多样性特征，筛选高油、优质的特色产区种质，以期为推动湖南山核桃的资源保护、良种选育与高值化产业利用提供科学依据。**【方法】**以湖南省 6 个主要产区（永顺、沅陵明溪口、沅陵怡溪、沅陵杜家坪、沅陵观音洞、洪江）的 148 份湖南山核桃样本为材料，利用形态测量、索氏抽提法和气相色谱技术，测定其果实性状（青果性状和种实性状）、种仁油脂性状（含油率及脂肪酸组成），明确其种仁油脂的脂肪酸组成特征及地理分布差异，揭示湖南山核桃果实与种仁性状的变异规律与多样性程度，并采用相关性分析、主成分分析与聚类分析进行综合评价，以识别关键差异性状，划分资源类型并筛选优异种质。**【结果】**(1)不同产区湖南山核桃在青果和内部种实的表观特征方面均已形成较稳定的形态分化，且各性状均存在不同程度变异，其中青果单果质量、种实单果质量和种仁质量的变异系数较高，表明其资源差异更多体现在与仁用价值相关的种实性状上，而非青果外观。(2)不同产区种仁含油率存在显著差异，怡溪材料显著高于其他产区，明溪口和观音洞处于较高水平，永顺最低，表明湖南山核桃资源在种仁油脂积累水平上已形成较清晰的区域分化格局。(3)湖南山核桃种仁油脂以不饱和脂肪酸为主，平均含量为 90.12%，其中油酸和亚油酸为其主要脂肪酸，不同产区间主要表现为高油酸型与相对高亚油酸型两类分化方向，油用品质存在差异。(4)相关性分析、主成分分析和聚类分析表明，湖南山核桃资源的关键差异并非单一性状的高低波动，而是青果与种实表型、出仁水平、种仁含油率和脂肪酸组成协同变化的结果。在此基础上，供试材料可进一步划分为高油酸小果型、中油酸中果型和高亚油酸长果型等不同资源类型。**【结论】**湖南山核桃不同地理来源材料在青果与种实表型、种仁含油率和脂肪酸组成上均具有明显分化，这种分化不仅表现为外部形态差异，也体现为与仁用价值和油用品质相关的种实性状及种仁品质差异。来自怡溪和观音洞产区的种质在含油率和脂肪酸组成方面表现较为突出，后续可作为优良油用种质发掘和良种选育的重点关注对象。

关键词：湖南山核桃；果实性状；油脂组分；遗传多样性；聚类分析；种质资源评价；良种选育
中图分类号：S664.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)05−0094−11
引文格式：宋璐瑶，陈韵竹，周宵，等. 湖南山核桃果实表型与油脂组分多样性分析 [J]. 北京林业大学学报，2026，48(5)：94−104. Song Luyao, Chen Yunzhu, Zhou Xiao, et al. Diversity analysis of fruit phenotypes and oil composition in *Carya hunanensis*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5): 94−104.

Diversity analysis of fruit phenotypes and oil composition in *Carya hunanensis*

Song Luyao[1,2] Chen Yunzhu[2,3] Zhou Xiao[2,3] Li Li[2] Li Peiwang[2,3]
Ji Yuena[2,3] Chen Jingzhen[2,3] Liu Qiang[1]
(1. College of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China;
2. State Key Laboratory of Woody Oil Resources Utilization, Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, Hunan, China;
3. Economic Forest Cultivar Development Center, Yuelushan Laboratory, Changsha 410004, Hunan, China)

收稿日期: 2025−10−30 **修回日期:** 2025−11−09
基金项目: 湖南省林业科技攻关与创新资金项目（XLK202411），湖南省科技计划（QZ2025A001），湖南省自然科学基金面上项目（2025JJ50138），长沙市自然科学基金项目（kq2502066）。

第一作者: 宋璐瑶。主要研究方向：植物资源利用。Email：songluyaocat@163.com 地址：410004 湖南省长沙市天心区中南林业科技大学生命科学与技术学院。
责任作者: 刘强，副教授。主要研究方向：植物资源培育与利用。Email：liu.qiangcs@163.com 地址：同上。陈景震，研究员。主要研究方向：特色经济林资源特性及功能成分挖掘。Email：chenjingzhen621@sina.com 地址：410004 湖南省长沙市天心区湖南林业科学院经济林所。

本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

Abstract:［**Objective**］*Carya hunanensis* is an endemic and high-quality woody oil germplasm resource in China. This study aimed to systematically reveal the variation patterns and diversity characteristics of fruit traits and kernel oil traits in *C. hunanensis*, identify characteristic germplasm resources with high oil content and superior quality from specific producing areas, and provide a scientific basis for the conservation of *C. hunanensis* resources, improved variety breeding, and high-value industrial utilization.［**Method**］A total of 148 *C. hunanensis* samples collected from six major producing areas in Hunan Province, namely Yongshun, Mingxikou of Yuanling, Yixi of Yuanling, Dujiaping of Yuanling, Guanyindong of Yuanling, and Hongjiang, were used as materials. Morphological measurement, Soxhlet extraction, and gas chromatography were employed to determine fruit traits (green fruit traits and nut traits) and kernel oil traits (oil content and fatty acid composition). The characteristics of kernel fatty acid composition and their geographic distribution differences were clarified, the variation patterns and diversity of fruit and kernel traits in *C. hunanensis* were revealed, and correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis were further conducted for comprehensive evaluation to identify key differential traits, classify resource types, and screen elite germplasm resources.［**Result**］(1) *C. hunanensis* from different producing areas had formed relatively stable morphological differentiation in the external features of green fruits and internal nuts, and all measured traits showed varying degrees of variation. Among them, the coefficients of variation for single green fruit mass, single nut mass, and kernel mass were relatively high, indicating that resource differences were not mainly concentrated in green fruit appearance, but were more strongly reflected in nut traits related to kernel utilization value. (2) Significant differences in kernel oil content were observed among producing areas. Materials from Yixi showed significantly higher kernel oil content than those from the other producing areas, Mingxikou and Guanyindong were at relatively high levels, and Yongshun showed the lowest value, indicating that *C. hunanensis* resources had formed a relatively clear regional differentiation pattern in kernel oil accumulation.(3) The kernel oil of *C. hunanensis* was dominated by unsaturated fatty acids, with a mean proportion of 90.12%. Oleic acid and linoleic acid were the major fatty acids, and materials from different producing areas mainly exhibited two differentiation patterns, namely a high-oleic-acid type and a relatively high-linoleic-acid type, indicating differences in oil quality. (4) Correlation analysis, principal component analysis, and cluster analysis showed that the key differences among *C. hunanensis* resources were not simple fluctuations in single traits, but the result of coordinated variation in green fruit and nut phenotypes, kernel percentage, kernel oil content, and fatty acid composition. On this basis, the tested materials could be further classified into different resource types, including a high-oleic-acid small-fruit type, a medium-oleic-acid medium-fruit type, and a high-linoleic-acid elongated-fruit type.［**Conclusion**］Materials of *C. hunanensis* from different geographic origins showed clear differentiation in green fruit and nut phenotypes, kernel oil content, and fatty acid composition. This differentiation was reflected not only in external morphological variation, but also in differences in nut traits and kernel quality related to kernel utilization value and oil-use quality. Germplasms from Yixi and Guanyindong showed relatively prominent performance in terms of oil content and fatty acid composition, and may be regarded as priority candidates for the exploration of elite oil-use germplasm and improved variety breeding.

Key words: *Carya hunanensis*; fruit traits; oil components; genetic diversity; cluster analysis; germplasm resource evaluation; improved variety breeding

湖南山核桃（*Carya hunanensis*）是中国特有的山核桃属（*Carya*）种质资源，主要分布于湖南、广西、贵州等省区的湿润山地阔叶林中，常见于海拔 200～1 200 m 的生境[1−2]。其中，湖南省湘西至湘西南一带不仅是该物种模式标本的采集地，也是现存种群分布较为集中的区域[2]。该区域山地地形复杂，海拔梯度明显，母岩风化物和土壤类型多样，局地生境差异显著[3]。因长期处于这种复杂生态条件下的自然更新与演化过程，湖南山核桃在果实形态、经济性状及品质性状方面形成了较为丰富的变异基础，也为相

关种质资源评价与优异类型挖掘提供了良好的物质前提。湖南山核桃种仁富含油脂、蛋白质、维生素及多种矿质元素，具有较高的营养价值和开发利用潜力[4]。脂肪酸通常分为饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸两类，其中不饱和脂肪酸在油脂稳定性、风味特征及营养价值形成等方面具有更为重要的作用[5]。湖南山核桃油脂组成以不饱和脂肪酸为主，对改善膳食脂肪结构和提升坚果产品营养品质具有积极意义。与世界范围内广泛栽培的美国山核桃（*C. illinoinensis*）相比，湖南山核桃长期生长于山地生态环境中，在本地适应过程中表现出较强的环境适应性和一定的抗逆潜力[6]。因此，湖南山核桃不仅是一种具有地方特色的木本粮油资源，更是山核桃属植物种质资源保护、遗传改良与开发利用的重要基础[7]。

在木本油料树种资源评价中，果实表型性状和种仁脂肪酸组成是评价资源产量潜力与品质特征的两类核心指标。其中，单果质量、果形指数、果壳厚度和出仁率等性状直接关系到果实的商品性和加工利用价值，而种仁含油率及脂肪酸组成则是衡量油脂品质和营养价值的重要依据。在种仁脂肪酸组成成分中，油酸和亚油酸是影响油脂稳定性、风味特征及营养品质的主要不饱和脂肪酸，高油酸已成为优质油料资源筛选与育种的重要方向。目前，国内外针对美国山核桃等栽培种及近缘种，已围绕果实表型变异[8]、含油率差异[9]、脂肪酸组成特征[10]以及优良种质筛选[11]等方面开展了较为系统的研究，在品质评价和品种改良方面积累了丰富的研究基础[12]。相比之下，湖南山核桃的相关研究仍相对薄弱，现有工作多集中于其资源分布调查[13]及局部栽培利用[14]，对不同地理来源材料在关键表型性状、含油率和脂肪酸组成方面的差异及其多样性水平，缺乏系统评价。尤其对不同产地间果实表型与油脂品质的分化特征、地理变异格局及资源类型划分，目前尚缺乏较为完整的认识[15]。这在一定程度上制约了湖南山核桃优异种质的精准鉴定、分类评价和育种利用[16]。因此，未来应进一步拓展种质收集范围，开展多性状联合评价，以促进这一地方特色木本粮油资源的保护与可持续开发[17]。

基于此，本研究以湖南省 6 个核心产区的 148 份湖南山核桃种质资源为材料，系统测定其果实表型性状、种仁含油率及脂肪酸组成，分析不同产区材料在果实形态和油脂品质上的差异特征及多样性水平，并结合多元统计方法对种质资源进行综合评价。研究旨在揭示湖南山核桃关键经济性状的变异规律，明确种仁脂肪酸组成的区域差异特征，为其优异种质发掘、资源保护、良种选育及高值化利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材 料

试验材料共 148 份，于 2024 年 9 月至 10 月（湖南省山核桃果实成熟期）分别采自湖南省沅陵县、洪江市、永顺县，按照地理分布将实验材料划分为永顺、沅陵明溪口、沅陵怡溪、沅陵杜家坪、沅陵观音洞、洪江 6 个产区。各采样点均位于海拔约 240 ~ 850 m 的山地或河谷阔叶林带，代表了不同的海拔梯度与立地条件。供试植株树龄为 30 ~ 80 年，为确保区域代表性与样本独立性，采样时选择间隔距离 50 m 以上的植株，并记录其树高、胸径和冠幅，每株随机采集健康且大小适中的果实 20 ~ 50 个。采样地点与采样株数详细信息如表 1 所示。

1.2 研究方法

1.2.1 青果与种实表型性状测定

本研究将带青皮的完整果体记为青果，将去除青皮后保留果壳和种仁的部分记为种实，将去壳后获得的可食部分记为种仁。参考张计育等[18]的方法，从每份样品中随机抽取 20 个果实，在青果层面测定青果纵径、青果横径、青果皮厚度和青果单果质量；去除青皮后，在种实层面测定种实纵径、种实横径、壳厚、种实单果质量和种仁质量。种仁于 60 ℃ 条件下烘干至质量恒定后，记录干种实质量和干种仁质量。每份样品重复测定 3 次，取平均值用于后续

表 1 湖南山核桃采样信息

Tab. 1 Sampling information of *Carya hunanensis*

种质来源	采样地点	采样株数	平均海拔/m	经度	纬度
明溪口	湖南省沅陵县明溪口镇	74	274	110°35′E	29°03′N
怡溪	湖南省沅陵县怡溪村	18	449	110°34′E	29°16′N
观音洞	湖南省沅陵县观音洞村	14	480	110°03′E	27°57′N
杜家坪	湖南省沅陵县明溪口镇杜家坪乡	12	248	110°08′E	28°42′N
永顺	湖南省永顺县万坪镇	16	850	110°23′E	29°02′N
洪江	湖南省洪江市龙塘坪乡	14	248	110°32′E	27°23′N

分析。

在实测指标基础上，进一步计算千粒质量、果形指数、种形指数、鲜出仁率和干出仁率等经济性状。其中，果形指数为青果纵径与青果横径的比值，种形指数为种实纵径与种实横径的比值，鲜出仁率为单个种仁质量与单个种实质量的百分比，干出仁率为单个干种仁质量与单个干种实质量的百分比。为了进一步分析不同产区湖南山核桃青果与种实表型性状的差异特征，量化不同性状的离散程度和变异水平，计算各性状的变异系数（coefficient of variation，CV），具体为各性状标准差与平均值的百分比。

1.2.2　种仁油脂组分特征分析

为了明确不同产区湖南山核桃种仁的油脂积累水平及脂肪酸组成特征，在完成表型性状测定后，对种仁含油率和脂肪酸组分进行测定。参照周文君等[19]和陈芬等[20]的方法，采用索氏抽提法测定种仁含油率。采用气相色谱仪（GC-2030，岛津，日本）测定种仁脂肪酸组成，油样经甲酯化处理后进样分析，气相色谱条件参照王容等[21]，根据峰面积归一化法[22]计算各脂肪酸的相对含量。每个样品重复测定 3 次，取平均值。

1.2.3　不同产区青果、种实及油脂组分特征差异分析

为了初步比较不同产区湖南山核桃在青果表型、种实结构及种仁油脂品质上的差异特征，以产区为分组因素，对各表型指标、含油率及脂肪酸组成数据进行单因素方差分析。对差异显著的指标，进一步采用 Tukey 法进行多重比较，并以 $P < 0.05$ 作为差异显著性判断标准。

1.2.4　青果、种实与油脂指标相关性分析

为了进一步揭示湖南山核桃青果性状、种实性状与种仁油脂品质之间的内在联系，采用 Pearson 相关分析计算各指标之间的相关系数，并以 $P < 0.05$ 作为显著性判断标准。分析内容主要包括青果与种实性状之间的协同变化关系，以及青果和种实性状与含油率、主要脂肪酸组分之间的相关特征。基于分析结果绘制相关性图，以直观呈现各性状间的相关程度与方向，并为后续主成分分析中的指标筛选提供依据。

1.2.5　青果、种实及油脂指标主成分分析

为了从青果、种实和油脂品质多项指标中提取能够表征湖南山核桃资源差异的关键性状，在相关性分析基础上进一步开展主成分分析。将青果性状、种实性状、出仁率、含油率及脂肪酸组成等指标纳入同一分析体系，计算各主成分的特征值与方差贡献率，并绘制碎石图。根据特征值大小规律及碎石图中的拐点位置，确定主成分提取数量；再根据各指标在保留主成分上的载荷大小，并结合性状间的独立性，筛选出代表性指标。代表性指标的筛选原则为载荷较高、信息量较大，且能够覆盖果实形态、经济性状和油脂组成等主要维度。最后，绘制主成分双标图，以解释不同指标对总体变异的贡献，并为后续聚类分析建立一个简洁而有效的指标体系。

1.2.6　基于代表性指标的聚类分析

为了综合评价 148 份湖南山核桃种质资源的性状差异，并识别具有不同利用潜力的资源类型，以主成分分析筛选所得的代表性指标为基础，采用非加权组平均法对全部供试材料进行系统聚类分析。根据聚类图对样本进行类群划分，并结合各类群在果实大小、壳厚、出仁率、含油率及主要脂肪酸组成等方面的表现，归纳不同类群的主要特征。该分析用于从综合性状层面揭示湖南山核桃种质资源的分化格局，并为优异种质筛选和资源类型划分提供依据。

1.3　数据处理

实验数据用 Excel 2020 进行均值、最大值、最小值、标准差的计算，采用 SPSS 16.0 进行方差分析，采用 Origin 2024 进行图表绘制。

2　结果与分析

2.1　湖南山核桃青果和种实性状表观特征

6 个产区 148 份样本青果和种实表型性状差异非常丰富。图 1 显示：来自怡溪、明溪口的山核桃样本青果形状呈扁圆形，果型纵横比接近 1；来自杜家坪、永顺以及洪江的山核桃样本果实形状呈卵圆形，果型纵横比大于 1；就个体大小而言，永顺材料青果整体较大，而来自怡溪、观音洞的山核桃样本果实相对较小。将供试样本青皮剥开即得到种实部分，种实形态差异仍然存在，且不同产区的差异特征更加清晰：观音洞、怡溪和明溪口材料的种实偏圆，洪江和永顺材料种实偏长，杜家坪材料则表现出较明显的扁长特征（图 2）。这一结果表明，湖南山核桃不同产区材料在外部果形和内部种实构型上均已形成较稳定的形态分化。由此可知，产区间差异并不只停留在青果外观层面，而是进一步反映到种实形状与结构特征上，说明该资源在形态建成方面具有较丰富的变异基础，可为后续优异种质识别和类型划分提供直观依据。

2.2　湖南山核桃青果和种实性状差异分析

结果（表 2）表明，各性状均存在不同程度变异，其中质量相关指标变异最为明显。青果单果质量、种实单果质量和种仁质量的变异系数分别为 30.05%、36.85% 和 25.24%，均处于较高水平，说明

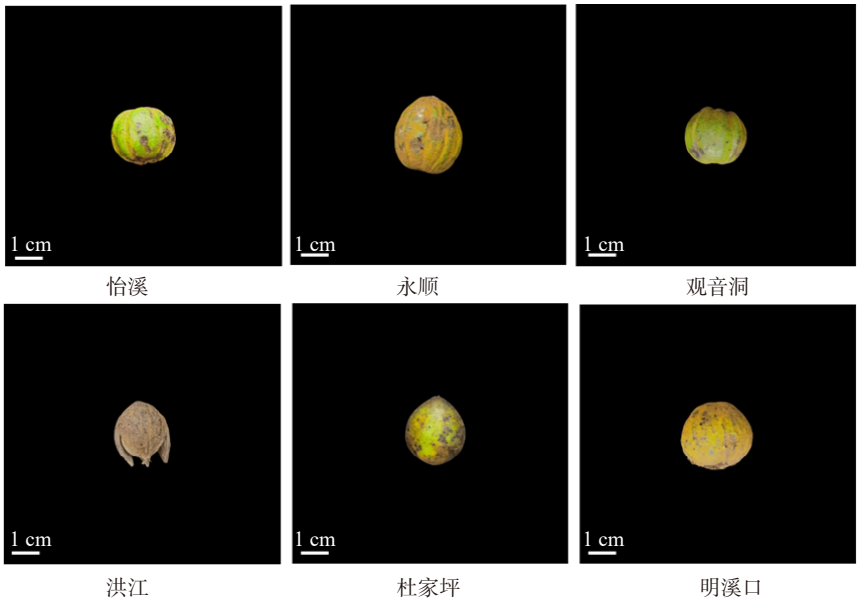


图 1 不同地区湖南山核桃青果形态

Fig. 1 Green fruit morphology of *C. hunanensis* from different regions of Hunan Province

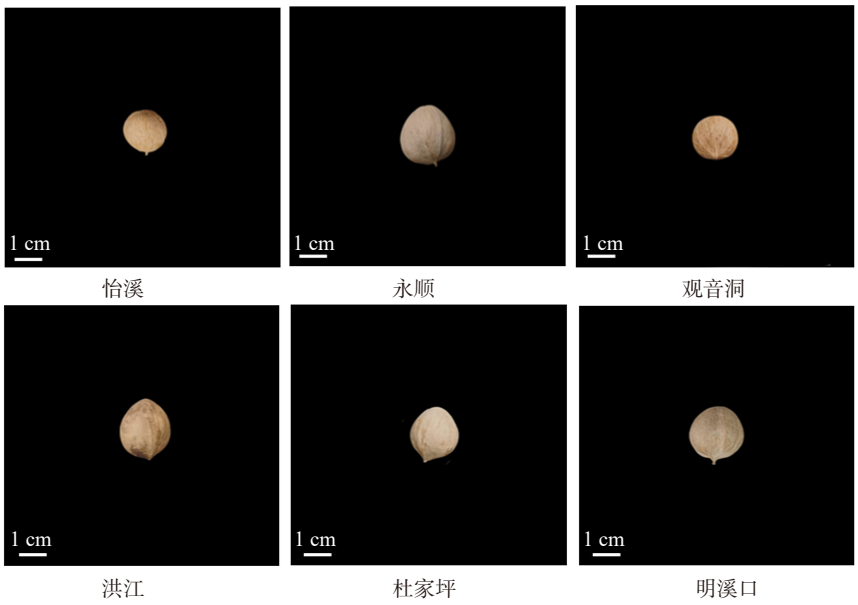


图 2 不同地区湖南山核桃种实形态

Fig. 2 Nut morphology of *C. hunanensis* from different regions of Hunan Province

表 2 湖南山核桃果实表型性状变异分析

Tab. 2 Variation analysis of fruit phenotypic traits in *C. hunanensis* from Hunan Province

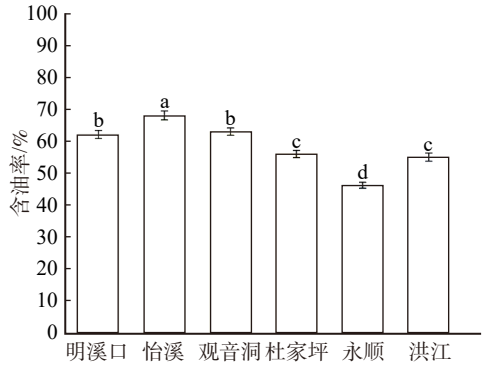
性状	最大值	最小值	均值	标准偏差	变异系数/%
青果单果质量/g	39.89	10.10	18.91	5.68	30.05
青果纵径/mm	49.73	25.23	31.82	5.43	17.08
青果横径/mm	44.26	25.68	32.06	2.92	9.14
青果皮厚度/mm	5.95	2.49	4.29	0.69	16.02
种实单果质量/g	13.78	2.39	7.30	2.69	36.85
种实纵径/mm	43.11	16.81	26.62	5.26	19.74
种实横径/mm	36.46	17.31	25.06	3.90	15.57
种仁质量/g	3.20	1.11	1.90	0.48	25.24
果壳厚度/mm	4.03	1.14	2.08	0.48	23.15

湖南山核桃在产量形成相关性状上具有较丰富的选择空间。与青果性状相比，种实层面的多个指标变异幅度更大，尤其是种实单果质量和果壳厚度，表明在外部形态相对接近的情况下，内部经济性状分化更为显著。

值得注意的是，青果横径的变异系数相对较低，而果壳厚度和种仁质量的变异系数则相对较高，这说明湖南山核桃材料间的差异并不主要集中于外部尺寸本身，而更多体现在与仁用价值直接相关的内部结构性状上。换言之，对于该资源的评价与筛选，不能只依据青果大小进行判断，也应同时关注壳厚、种仁质量和出仁率等与利用价值更直接相关的指标。这也说明湖南山核桃优异种质的发掘重点，应由单纯外观比较转向对种实结构和仁用性状的综合考察。

2.3　种仁含油率差异分析

为进一步从品质性状层面评价不同产区湖南山核桃的利用潜力，对种仁含油率进行了比较分析。图 3 显示：不同产区湖南山核桃种仁含油率存在显著差异。具体来说：怡溪产区含油率最高，显著高于其他产区；明溪口与观音洞次之；而永顺显著低于其他产区。这一结果说明，湖南山核桃不同产区材料的分化不仅体现在青果和种实表型上，也进一步体现在种仁油脂积累能力上。结合 2.2 的分析可知，当材料间差异由外部形态深入到种实结构和仁用性状后，种仁含油率又进一步拉开了不同产区间的品质层次，表明湖南山核桃资源在油用价值方面具有较明显的选择潜力。其中，怡溪、明溪口和观音洞材料在高含油率种质筛选中具有更高的关注价值，怡溪材料表现尤为突出，可作为后续高油、优质材料发掘的重点对象。



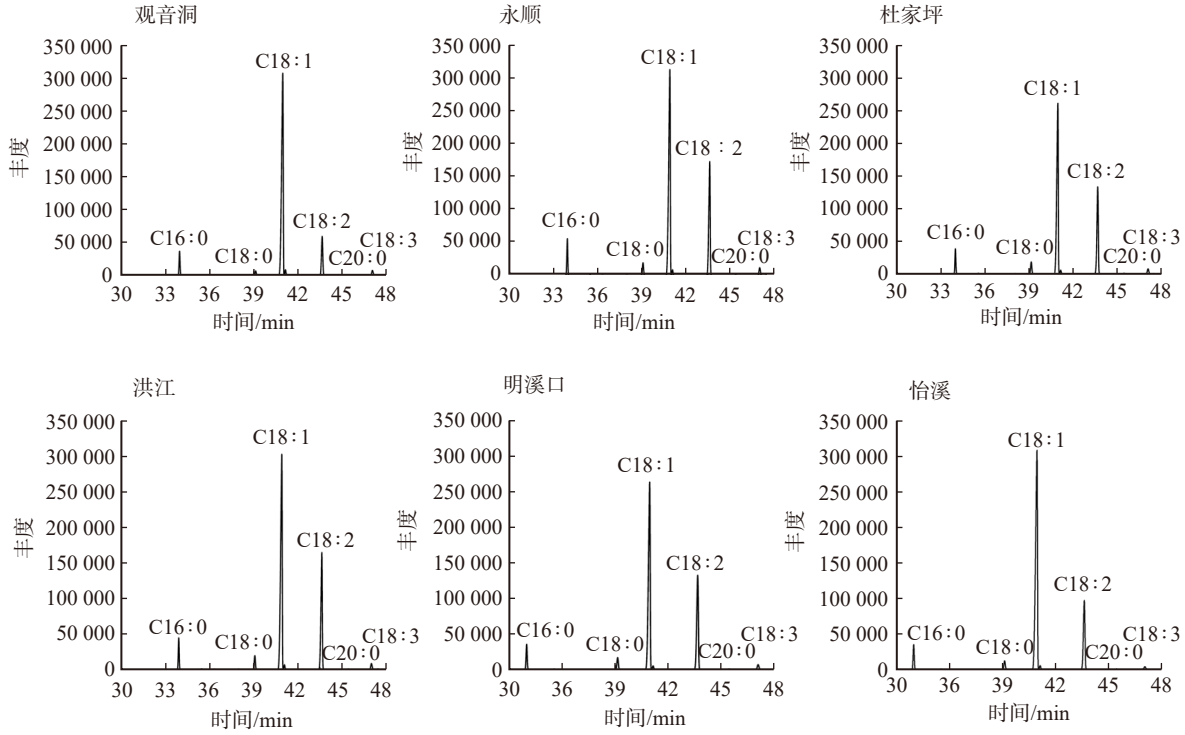
不同小写字母表示不同产区在 0.05 水平上存在显著差异。

图 3　湖南山核桃各地区含油率

Fig. 3　Oil content of *C. hunanensis* from different regions

2.4　种仁脂肪酸特征分析

在明确不同产区湖南山核桃种仁含油率存在显著分化后，进一步对其脂肪酸组成进行分析（图 4，表 3）。结果表明，湖南山核桃种仁油脂主要由棕榈酸（C16∶0）、硬脂酸（C18∶0）、油酸（C18∶1）、亚油酸（C18∶2）、亚麻酸（C18∶3）和花生酸（C20∶0）6 种脂肪酸组成。不饱和脂肪酸占绝对优势，说明湖南山核



C16∶0. 棕榈酸；C18∶0. 硬脂酸；C18∶1. 油酸；C18∶2. 亚油酸；C18∶3. 亚麻酸；C20∶0. 花生酸。下同。

图 4　湖南山核桃各地区种仁脂肪酸气相色谱

Fig. 4　Gas chromatograms of kernel fatty acids of *C. hunanensis* from different regions of Hunan Province

表 3 湖南山核桃各地区脂肪酸含量

Tab. 3 Fatty acid contents of *C. hunanensis* kernels from different regions of Hunan Province

地区	脂肪酸含量/%					
	C16∶0	C18∶0	C18∶1	C18∶2	C18∶3	C20∶0
永顺	6.22 ± 0.08^{a}	4.04 ± 0.10^{b}	64.44 ± 0.23^{c}	23.34 ± 0.17^{c}	1.21 ± 0.31^{f}	0.15 ± 0.02^{c}
明溪口	5.39 ± 0.03^{d}	3.32 ± 0.06^{c}	61.81 ± 0.06^{f}	26.95 ± 0.07^{a}	1.44 ± 0.02^{d}	0.17 ± 0.02^{b}
怡溪	5.55 ± 0.06^{c}	1.60 ± 0.03^{f}	75.74 ± 0.05^{a}	13.86 ± 0.03^{e}	1.72 ± 0.03^{c}	0.13 ± 0.02^{e}
杜家坪	5.43 ± 0.11^{d}	2.50 ± 0.14^{d}	62.33 ± 0.06^{e}	26.95 ± 0.12^{a}	1.91 ± 0.03^{a}	0.16 ± 0.02^{c}
洪江	5.03 ± 0.08^{e}	4.15 ± 0.10^{a}	62.45 ± 0.23^{d}	26.17 ± 0.17^{b}	1.40 ± 0.03^{e}	0.19 ± 0.02^{a}
观音洞	5.62 ± 0.10^{b}	1.93 ± 0.03^{e}	72.43 ± 0.06^{b}	17.13 ± 0.06^{d}	1.89 ± 0.03^{b}	0.15 ± 0.04^{d}

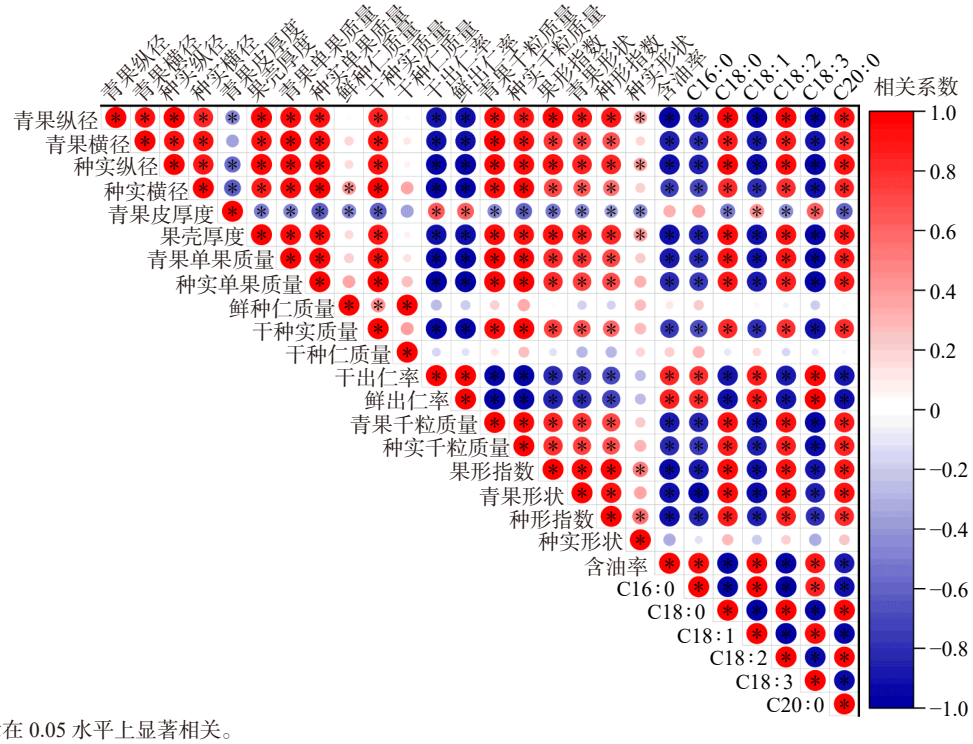
注：不同小写字母表示不同产区间差异显著（$P < 0.05$）。

桃油脂总体属于高不饱和脂肪酸型。其中，油酸和亚油酸是最主要的两种不饱和脂肪酸组分，不同产区间，怡溪油酸含量最高，观音洞次之；明溪口和杜家坪亚油酸含量较高，怡溪最低，表现出与油酸相反的变化趋势。这表明不同产区的湖南山核桃在脂肪酸组成上并非同步变化，而主要表现为高油酸型与相对高亚油酸型两类分化方向，该结果为后续高油酸型、高亚油酸型及综合品质型材料的定向筛选提供了依据。

2.5 相关性分析

在明确不同产区材料在含油率和脂肪酸组成上存在分化后，进一步对各性状之间的协同变化关系进行了分析。结果（图 5）表明，湖南山核桃不同性状之间并非独立变化，而是存在较明显的协同分化关系。其中，青果与种实大小相关指标之间普遍呈显著正相关，说明不同材料在外部果形、种实发育和种仁充实程度上具有较强一致性。而在种实结构与仁用效率方面，果壳厚度与种实质量、种仁质量呈显著正相关，而与出仁率呈显著负相关，表明壳体投入增强虽有利于种实和种仁发育，但往往不利于出仁水平的提高。

在湖南山核桃油脂品质方面，种仁含油率与青果大小和果壳厚度呈显著负相关，而与出仁率呈显著正相关，说明高含油材料普遍具有果小、壳薄、出仁率高的特点。脂肪酸组分中，油酸与亚油酸呈显著负相关，推测二者是油脂品质分化中最主要的一对反向关联指标。总体来看，湖南山核桃资源差异并非单一性状简单的高低波动，而是青果与种实结



*表示在 0.05 水平上显著相关。

图 5 湖南山核桃表型与油脂指标相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between phenotypic traits and oil indices of *C. hunanensis*

构、种仁油脂性状协同变化的结果。

2.6　主成分分析

为进一步识别对湖南山核桃果实性状变异贡献较大的关键指标，对 23 个指标（包括表型及油脂指标）进行主成分分析。碎石图（图 6A）显示，特征值在第 2 个主成分后出现显著拐点并趋于平缓，表明前 2 个主成分已包含最核心的结构化变异，这从统计学方面保障了提取前两个主成分进行后续分析的科学性。前两个主成分 PC1 和 PC2 的方差贡献率分别为 49.9% 和 19.0%，累计解释率达 68.9%。

双标图（图 6B）显示，PC1 上载荷较大的主要为果径、单果质量、种实质量等与果实大小和产量形成相关的指标，而出仁率与其分布方向相反，说明 PC1 主要反映果实表型与仁用效率的综合差异。PC2 上含油率、油酸、亚麻酸和棕榈酸等指标的分布方向差异较为明显，表明 PC2 主要反映种仁油脂积累与脂肪酸组成特征。由此可见，湖南山核桃种质资源的综合变异主要可归纳为果实表型–经济性状维度和油脂组成维度。

综合载荷强度（loading ⩾ 0.6）与性状独立性原则，本研究最终选取青果横纵经、青果皮厚度、出仁率、含油率、油酸和亚麻酸这 6 个性状作为后续聚类分析的代表性指标。这些指标分别覆盖果实形态、经济性状与油脂组成 3 类核心维度，能够系统表征湖南山核桃种质资源的表型与化学特征差异。

2.7　聚类分析

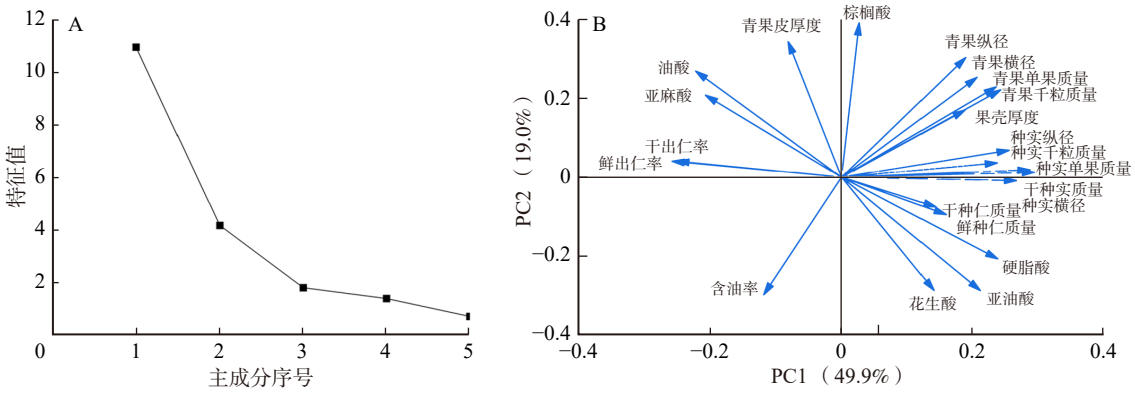
基于上述筛选获得的 6 个代表性性状，采用 UPGMA 方法对 148 份湖南山核桃样本进行聚类分析。结果（图 7）表明，供试材料可大致分为 A（中油酸中果型）、B（高油酸小果型）、C（高亚油酸长果型）3 类。A 类以明溪口部分材料为主，果实中等、出仁率较高、含油率中等，油酸含量偏高；B 类主要包括怡溪、观音洞及部分明溪口样本，果实较小，但出仁率和含油率均较高，油酸含量也处于较高水平；C 类以洪江、杜家坪和永顺样本为主，果实偏长、果皮相对较薄，亚油酸含量较高，含油率中等偏低。不同产区材料在各类群中交错分布，并未严格按照地理来源聚集，推测地理位置并非唯一决定因素，种质间遗传差异与生态环境共同塑造了湖南山核桃表型与油脂性状的分化格局。

3　讨　　论

湖南山核桃作为我国特有的地方种质资源，其果实结构与油脂品质不仅关系到资源评价和优异种质筛选，也直接影响后续良种选育与开发利用。现有研究对湖南山核桃不同产区材料在果实结构、种仁含油率及脂肪酸组成上的系统比较仍相对不足，因此，在多产区、多性状框架下对湖南山核桃进行综合评价，并进一步揭示其分化特征及筛选意义，具有较强的科学价值和应用意义。

本研究表明，湖南山核桃不同产区材料在青果与种实性状上均存在较丰富的变异，且种实层面多个指标的变异幅度高于青果层面。这说明湖南山核桃的分化重点更多体现在与仁用价值直接相关的内部结构性状上，而非仅停留在青果外观层面。与薄壳山核桃、普通核桃及其他木本油料树种的相关研究[21]相比，湖南山核桃同样表现出较高的果实结构多样性，但其差异重点由青果外观进一步延伸到果壳厚度、种仁质量和出仁率等指标，说明其优异种质筛选不能仅依据青果大小或果形判断，而应更加重视种实结构和仁用效率的综合表现。这一特征在一定程度上也反映出湖南山核桃长期处于复杂山地环境条件下所形成的资源分化基础[22]。

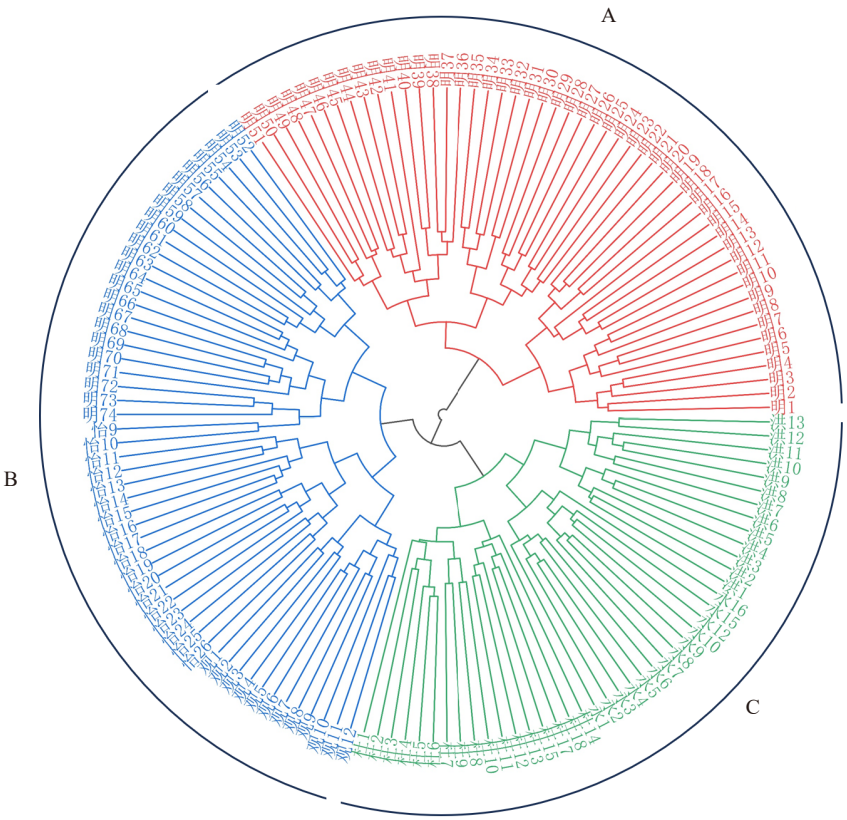
在油脂品质方面，不同产区湖南山核桃种仁含



A. 主成分分析碎石图。B. 基于前两个主成分（PC1 和 PC2）的双标图。箭头表示原始变量向量，其方向和长度分别表示与主成分的相关性和贡献大小。

图 6　湖南山核桃表型与油脂指标主成分分析

Fig. 6　PCA of phenotypic and oil traits in *C. hunanensis*



明. 明溪口；怡. 怡溪；观. 观音洞；洪. 洪江；永. 永顺；杜. 杜家坪

图 7　148 份湖南山核桃种质资源聚类分析

Fig. 7　Cluster analysis of 148 *C. hunanensis* germplasm resources

油率和脂肪酸组成均表现出较明显分化。怡溪材料种仁含油率显著高于其他产区，明溪口和观音洞也处于较高水平，而永顺最低，说明湖南山核桃资源在油脂积累能力上已形成较清晰的区域差异。脂肪酸组成分析进一步显示，湖南山核桃种仁油脂以不饱和脂肪酸为主，油酸和亚油酸是最主要的两个组分，不同产区材料主要表现为高油酸型与相对高亚油酸型两类分化方向。类似的“油酸–亚油酸”消长关系在核桃属及其他木本油料树种中已有较多报道[23]，这通常与油脂稳定性、耐贮性和营养品质密切相关。对湖南山核桃而言，这种分化说明不同产区材料油用品质的差异并非单纯体现为“高含油”或“低含油”，而是种仁含油率与脂肪酸组成的共同调控。其中，怡溪和观音洞材料在较高含油率和较优脂肪酸组成方面表现较好，在优良油用种质发掘中值得重点关注。

相关性分析、主成分分析和聚类分析进一步说明，湖南山核桃资源的关键差异并非单一性状简单的高低波动，而是青果与种实表型、种仁油脂性状协同变化的结果。相关性分析表明，果壳厚度、出仁率和含油率之间存在明显的权衡关系，说明种实结构发育与仁用效率、油脂积累之间并非同步优化。主成分分析和聚类分析进一步表明，湖南山核桃资源的综合差异主要体现在果实表型–经济性状和油脂组成两个方面，并可进一步划分为高油酸小果型、中油酸中果型和高亚油酸长果型等不同资源类型。这说明，大果材料并不一定具有较高含油率，果壳较厚、种实发育较强的材料在仁用效率和油脂积累方面也往往不占优势；相反，兼具较高出仁率、较高含油率和较优脂肪酸组成的材料，更可能成为后续优良油用种质筛选的重点。由此可见，对湖南山核桃资源的评价应由单一性状比较转向综合性状协同分析，这也更符合经济林种质资源评价的研究思路。

总体而言，本研究从青果表型、种实性状和种仁油脂品质 3 个层面系统揭示了湖南山核桃种质资源的多样性特征，弥补了该地方种质系统评价相对有限的不足，并为后续优异种质发掘和良种选育提供了依据。当然，本研究也存在一定局限：供试材料虽覆盖 6 个主要产区，但仍属于单年度、单成熟期的采样结果，尚不能完全排除年份间气候波动对性状表现的影响；同时，本研究主要基于表型和化学组成层面的统计分析，对性状关联及资源分化机制的解释仍较有限。未来可在扩大种质收集范围、开展多年多点试验的基础上，结合基因组学、代谢组学等技术，进一步验证关键性状的遗传稳定性，并围绕高油酸、高含油和高出仁等目标性状开展定向改良研究，以

提高湖南山核桃优良种质筛选和育种的准确性。

4 结　　论

本研究针对湖南山核桃不同地理来源材料在果实表型及种仁油脂品质特征方面缺乏系统评价的问题，以湖南省 6 个核心产区的 148 份湖南山核桃种质资源为材料，采用表型测定、种仁含油率测定、脂肪酸组成分析及多元统计方法开展系统分析与综合评价。研究得到以下结论。

（1）湖南山核桃不同产区材料在青果与种实表型上存在明显分化，且差异重点更多体现在与仁用价值相关的种实性状上。

（2）不同产区湖南山核桃种仁含油率存在明显分化。怡溪材料种仁含油率显著高于其他产区，明溪口和观音洞处于较高水平，永顺最低，表明湖南山核桃资源在种仁油脂积累水平上已形成较清晰的区域分化格局。

（3）湖南山核桃种仁脂肪酸组成以不饱和脂肪酸为主，产区间主要表现为高油酸型与相对高亚油酸型两类分化方向。相关性分析、主成分分析和聚类分析进一步表明，湖南山核桃资源差异并非单一性状波动，而是果实表型、出仁率、种仁含油率和脂肪酸组成协同变化的结果，并可进一步划分为高油酸小果型、中油酸中果型和高亚油酸长果型等不同资源类型，其中怡溪和观音洞产区材料在优质油用品种筛选中更具潜力。

参　考　文　献

[1] Yang Y B, Yang C Y, Yao W H, et al. *Carya luodianensis* (Juglandaceae), a new species from Guizhou Province, southern China, revealed by morphological and plastid evidence [J]. Ecology and Evolution, 2026, 16(3): e73047.

[2] Zhou H, Hu Y, Ebrahimi A, et al. Whole genome based insights into the phylogeny and evolution of the Juglandaceae [J]. BMC Ecology and Evolution, 2021, 21(1): 191.

[3] 李强, 闫晨兵, 田明慧, 等. 湘西植烟土壤 pH 时空变异及其主要驱动因素 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1743−1751.
Li Q, Yan C B, Tian M H, et al. Spatio temporal variability of soil pH and main impact factors in tobacco-planting soils in Xiangxi area [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(10): 1743−1751.

[4] 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.
Zhang H H, Wu C E, Li Y R, et al. Comparison of nutritive compositions in different cultivars of pecans [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014, 38(3): 55−58.

[5] 俞春莲, 王正加, 夏国华, 等. 10 个不同品种的薄壳山核桃脂肪含量及脂肪酸组成分析 [J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(5): 714−718.
Yu C L, Wang Z J, Xia G H, et al. Fat content and fatty acid composition of ten *Carya illinoensis* cultivars [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2013, 30(5): 714−718.

[6] Huang S X, Xu Y X, Li X Q, et al. Two *Carya* species, *Carya hunanensis* and *Carya illinoinensis*, used as rootstocks point to improvements in the heat resistance of *Carya cathayensis* [J]. Plants, 2024, 13(14): 1967.

[7] Huang Y, Xiao L, Zhang Z, et al. The genomes of pecan and Chinese hickory provide insights into *Carya* evolution and nut nutrition [J]. GigaScience, 2019, 8(5): giz036.

[8] 杨兵兵, 姚小华, 张成才, 等. 薄壳山核桃无性系种实性状综合评价 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(5): 57−66.
Yang B B, Yao X H, Zhang C C, et al. Comprehensive evaluation of seed and fruit traits of thin shell of pecan clones [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(5): 57−66.

[9] Wu S, Yao X H, Wang K L, et al. Quality analysis and comprehensive evaluation of fruits from different cultivars of pecan (*Carya illinoinensis* (Wangenh.) K. Koch) [J]. Forests, 2022, 13(5): 746.

[10] Zhang J Y, Wang T, Zhang F, et al. Genetic diversity in nut traits and fatty acid composition of pecan (*Carya illinoinensis*) germplasm resources [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 288: 110357.

[11] Zhu J, Zhao J, Lu L, et al. Comprehensive evaluation of five pecan (*Carya illinoinensis*) cultivars at seedling stage based on principal component analysis [J]. Plants, 2025, 14(17): 2705.

[12] Wang X, Stein L, Black M, et al. Phenotypic diversity and population structure of pecan (*Carya illinoinensis*) collections reveals geographic patterns [J]. Scientific Reports, 2024, 14: 18592.

[13] 李建挥, 李柏海, 柏文富, 等. 湖南省核桃资源调查及表型特征分析 [J]. 湖南林业科技, 2019, 46(6): 59−67, 73.
Li J H, Li B H, Bai W F, et al. Investigation of walnut and hickory genetic resources in Hunan Province [J]. Hunan Forest Science & Technology, 2019, 46(6): 59−67, 73.

[14] 李建挥, 李柏海, 吴思政, 等. 湘西地区核桃坚果表型特征及多样性研究 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2023, 47(1): 171−179.
Li J H, Li B H, Wu S Z, et al. Research on the nut phenotypic traits and diversities of walnut in western Hunan [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(1): 171−179.

[15] 樊卫国, 龙令炉, 龙登楷. 中国的湖南山核桃 [M]. 北京: 科学出版社, 2018.
Fan W G, Long L L, Long D K. *Carya hunanensis* in China[M]. Beijing: Science Press, 2018.

[16] 潘浪波, 段伟, 黄有军. 基于 MaxEnt 模型预测薄壳山核桃在中

国的种植区 [J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1): 76−83.
Pan L B, Duan W, Huang Y J. Prediction on the potential planting area of *Carya illinoinensis* in China based on MaxEnt model [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(1): 76−83.

[17] 姚小华, 常君, 王开良, 等. 中国薄壳山核桃 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Yao X H, Chang J, Wang K L, et al. Pecan in China [M]. Beijing: Science Press, 2014.

[18] 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.
Zhang J Y, Wang G, Wang T, et al. Analyses on diversities of nut traits and contents of fatty acids in kernels of *Carya illinoinensis* [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2023, 32(2): 29−37.

[19] 周文君. 湖南省 4 个薄壳山核桃品种果实生长发育规律及综合评价 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
Zhou W J. Fruit growth and development regularity and comprehensive evaluation of four *Carya illinoensis* varieties in Hunan Province[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022.

[20] 陈芬, 姚小华, 滕建华, 等. 薄壳山核桃无性系果实经济性状与品质比较 [J]. 中国粮油学报, 2016, 31(8): 68−74.
Chen F, Yao X H, Teng J H, et al. A comparative study on the nut economy and quality characters of *Carya illinoensis* clones [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(8): 68−74.

[21] 王容. 湘西北地区不同品种核桃的品质特性研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
Wang R. Study on the quality characteristics of walnut from different species in northwestern Hunan[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018.

[22] Yusufali Z, Liu X, Wang X, et al. Texture properties, crude fat, fatty acid profiles, total soluble solids, and total polyphenols for 21 pecan varieties and the effects of the harvest year [J]. ACS Food Science & Technology, 2023, 3(10): 1663−1679.

[23] 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.

（责任编辑 赵田芸
责任编委 马履一）