

## 山核桃果实成熟过程中矿质元素及脂肪酸组分变化

何国庆<sup>1</sup>, 俞春莲<sup>2</sup>, 饶盈<sup>3</sup>, 章富阳<sup>4</sup>, 沈晓飞<sup>1</sup>, 黄坚钦<sup>5</sup>, 刘力<sup>6</sup>, 夏国华<sup>5</sup>

(1. 浙江省长兴县林场, 浙江 长兴 313100; 2. 浙江省常山油茶研究所, 浙江 常山 324200; 3. 杭州市临安天目山林场, 浙江 杭州 311311; 4. 浙江省淳安县林业局, 浙江 淳安 311700; 5. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300; 6. 浙江农林大学 理学院, 浙江 杭州 311300)

**摘要:** 为探明山核桃 *Carya cathayensis* 果实发育成熟过程中主要矿质元素、种仁脂肪和脂肪酸的变化特征, 以 40 年生山核桃为试材, 对果皮和种仁中氮、磷、钾、钙、镁等主要矿质元素、种仁脂肪和脂肪酸进行了分析测定, 并探讨了各组间的相关性。结果表明: 山核桃果实成熟过程中, 果实干物质总质量没有显著增加, 但果皮干物质大量向种仁转移, 其中 8 月 5-20 日是种仁干物质快速积累期(从 0.62 g·粒<sup>-1</sup> 增长至 1.34 g·粒<sup>-1</sup>)。钾大量从种仁向果皮转移, 种仁钾质量分数从 8 月 5 日的 11.71 mg·kg<sup>-1</sup> 降至 9 月 6 日的 3.44 mg·kg<sup>-1</sup>, 而果皮钾质量分数从 5.70 mg·kg<sup>-1</sup> 升高至 9.18 mg·kg<sup>-1</sup>, 种仁与果皮中钾质量分数存在消长变化, 拐点为 8 月 17-20 日; 种仁氮、磷、镁质量分数均高于果皮; 果皮和种仁中矿质元素质量分数有一定的相关性。种仁脂肪质量分数先快速上升后缓慢上升, 8 月 5-10 日是脂肪快速积累期(从 243.20 mg·g<sup>-1</sup> 上升至 586.02 mg·g<sup>-1</sup>)。油酸、亚油酸、棕榈酸是种仁充实过程中脂肪酸的主要成分, 三者占脂肪酸总量的 92.33%~97.50%。脂肪与棕榈酸和亚麻酸极显著负相关( $P<0.01$ ), 与油酸显著正相关( $P<0.05$ ); 具有相近或相同碳链长度的脂肪酸存在较高的负相关关系, 其中油酸与亚油酸和亚麻酸极显著负相关( $P<0.01$ )。氮、钾是山核桃果实发育过程中最重要的矿质营养, 种仁氮、钾与脂肪酸组分的相关性最高。因此, 丰产优质栽培建议施好果实膨大肥。图 1 表 4 参 30

**关键词:** 植物学; 山核桃; 矿质元素; 脂肪酸组分; 动态变化

中图分类号: S664.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)06-1208-09

## Dynamic changes in composition of mineral elements and fatty acids for hickory nuts (*Carya cathayensis*) during maturity

HE Guoqing<sup>1</sup>, YU Chunlian<sup>2</sup>, RAO Ying<sup>3</sup>, ZHANG Fuyang<sup>4</sup>, SHEN Xiaofei<sup>1</sup>, HUANG Jianqin<sup>5</sup>,  
LIU Li<sup>6</sup>, XIA Guohua<sup>5</sup>

(1. Changxing Forest Farm, Changxing 313100, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Changshan Oil-tea Research Institute, Changshan 324200, Zhejiang, China; 3. Tianmushan Forest Farm of Lin'an District, Hangzhou 311311, Zhejiang, China; 4. Forestry Administration of Chun'an County, Chun'an 311700, Zhejiang, China; 5. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 6. School of Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** To clarify changes in composition of mineral elements, oil content, and fatty acid content of kernels during maturity of the hickory (*Carya cathayensis*) nut, the contents of N, P, K, Ca, and Mg in kernels and pericarps, as well as oil content and fatty acid composition of kernels during the late development and maturation periods of fruits with 40-year-old mature hickory trees were measured. A correlation analysis of these components was also conducted. Results showed that during the maturity period (from August 5th to September 6th), dry matter of total fruits did not increase ( $P>0.05$ ). The fast accumulation phase of the kernel was from

收稿日期: 2018-11-21; 修回日期: 2019-03-15

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2018C02004); 浙江省农业(果品)新品种选育重大科技专项(2016C02052-13)

作者简介: 何国庆, 工程师, 从事果树栽培研究。E-mail: 513847707@qq.com。通信作者: 夏国华, 高级实验师, 从事果树种质资源与品质研究。E-mail: zjfc\_ghxia@126.com

August 5th to August 20th with dry matter of the kernel increasing 116.1% from 0.62 g per nut to 1.34 g per nut), and an amount of organic matter was transferred from the pericarp to the kernel. K was transferred from kernel to pericarp with K in kernels decreasing from August 5th to September 6th from 11.71 mg·kg<sup>-1</sup> to 3.44 mg·kg<sup>-1</sup>; whereas, in pericarps it was increasing from 5.70 mg·kg<sup>-1</sup> to 9.18 mg·kg<sup>-1</sup> ( $P<0.05$ ). Contents of N, P, and Mg in the kernel was higher than the pericarp. Contents of the main mineral elements in the kernel and pericarp had some correlation. Total oil content increased quickly and then slowed during maturity with the fast accumulation phase from August 5th to August 20th where total oil content went from 243.20 mg·g<sup>-1</sup> to 586.02 mg·g<sup>-1</sup> ( $P<0.05$ ). Oleic, linoleic, and palmitic were the main fatty acids comprising approximately 92.33% to 97.50% of the total fatty acids in the kernel. The oil content was significantly and positively correlated with the contents of palmitic ( $r=-0.855$ ,  $P<0.01$ ) and linolenic ( $r=-0.931$ ,  $P<0.01$ ), and was significantly correlated with the content of oleic ( $r=0.783$ ,  $P<0.05$ ). Fatty acids which had near or the same number of carbons tended to have a highly positive correlation. The content of oleic was also significantly and positively correlated with the content of linoleic ( $r=-0.966$ ,  $P<0.01$ ) and linolenic ( $r=-0.854$ ,  $P<0.01$ ). In general, N and K were the key mineral elements for fruit development, N and K contents in the kernel had a high correlation to fatty acid compounds, and it was suggested that fertilizing in the early kernel filling period was key to achieving high yield and high quality cultivation. [Ch, 1 fig. 4 tab. 30 ref.]

**Key words:** botany; *Carya cathayensis*; mineral elements; fatty acids composition; dynamic change

山核桃 *Carya cathayensis* 是中国特有的高档干果和木本油料树种<sup>[1]</sup>, 种仁营养丰富, 富含氨基酸、脂肪酸、蛋白质、维生素、矿物质和生物活性物质<sup>[2-3]</sup>。坚果炒制过程中产生杂环类化合物、萜烯类化合物和醛化合物等芳香挥发性物质, 它们共同作用构成了独特的风味<sup>[4]</sup>。山核桃是木本植物中种仁含油率最高的树种之一, 其中脂肪酸组成以易于被人体吸收的油酸、亚油酸等不饱和脂肪酸为主, 不饱和脂肪酸占总脂肪酸的 88.38%~95.78%<sup>[3]</sup>。矿质营养是果树生长发育、产量形成和品质提高的基础, 合理施肥是果树优质高产的关键技术措施。山核桃种仁矿质元素、脂肪含量和脂肪酸组成是决定其营养品质的关键要素。山核桃产量和品质形成的机理复杂, 受众多因素控制。前人对山核桃种仁的营养进行了比较全面的评价<sup>[2-6]</sup>, 对影响山核桃产量和品质的气象因子<sup>[7]</sup>、土壤肥力特性和有效养分时空变化<sup>[8-9]</sup>、叶片养分状况<sup>[10-12]</sup>、叶片和果实矿质养分的动态变化<sup>[13]</sup>、生态化学计量学<sup>[14]</sup>以及山核桃成熟过程中油脂和脂肪酸变化<sup>[15-16]</sup>、高油和高油酸机制<sup>[17]</sup>的研究已有报道。HUANG 等<sup>[17]</sup>通过转录组学和脂质组学分析研究了山核桃胚胎发育过程中高油和高油酸形成的机制。以上研究主要集中在土壤和树叶叶片矿质营养, 很少涉及到果实成熟过程中矿质营养、脂肪和脂肪酸组成的动态变化。鉴于此, 本研究通过测定山核桃果实成熟过程中果皮和种仁中氮、磷、钾、钙、镁等主要矿质元素质量分数以及种仁脂肪和脂肪酸组成质量分数, 分析了主要矿质元素、种仁脂肪和脂肪酸组成的动态变化以及它们之间的相关关系, 以期为合理施肥和科学采收提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于浙江省杭州市临安区板桥镇罗塘村(30°11'14.68"N, 119°44'52.28"E), 该区海拔为 50~200 m, 年降水量为 1 400.0 mm, 年平均气温为 15.8 °C, 7 月平均气温为 28.1 °C, 1 月平均气温为 3.4 °C, 日照时数为 1 939.0 h, 无霜期为 234.0 d。山核桃树龄约 40 a。母岩为石灰岩, 土壤为岩性土, 土壤全氮为(3.88±0.42) g·kg<sup>-1</sup>, 全磷为(1.72±0.28) g·kg<sup>-1</sup>, 速效钾为(146.40±3.60) mg·kg<sup>-1</sup>, 交换性钙为(46.17±1.97) mg·kg<sup>-1</sup>, 交换性镁为(4.37±0.38) mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 材料

在林地中选取生长健康的山核桃标准树 6 株。取样时, 在树冠中部外围, 按东、南、西、北 4 个方位采样, 每次采集约 200 粒果实, 混合均匀, 封口袋封装后立即带回实验室, 将种仁、果皮(外果皮为青皮, 内果皮为硬壳)分开后分别烘干并用封口袋密封, 置干燥器中保存备用。根据山核桃果实膨大规律,

在果实停止膨大期开始取样, 取样时间依次为8月5日、8月10日、8月17日、8月20日、8月23日、8月27日、8月31日和9月6日。

### 1.3 方法

1.3.1 矿质元素测定方法 种仁和果皮样品经硫酸-高氯酸消煮后, 全氮采用凯式定氮法测定, 全磷采用钼锑钨比色法测定, 钾、钙、镁采用原子吸收分光光度计测定。

1.3.2 脂肪和脂肪酸测定 粗脂肪测定按照 GB/T 14488.1-2008《植物油料 含油量测定》索氏抽提法进行测定, 抽提剂为石油醚。脂肪酸测定采用岛津 GC-2014 气相色谱仪测定, AccuStandard 公司生产的 AOCSS007 脂肪酸作为标样。索氏抽提法提取的山核桃油按照 GB/T 17376-2008《动植物油脂 脂肪酸甲酯制备》中的酯交换法进行甲酯化, 酯化完全后取 2  $\mu\text{L}$  注入色谱柱进行分析。气相色谱条件: 毛细管色谱柱(30 m  $\times$  0.32 mm  $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ ); 火焰离子化检测器(FID); 进样器温度 235  $^{\circ}\text{C}$ ; 检测器温度 240  $^{\circ}\text{C}$ ; 程序升温: 起始温度 150  $^{\circ}\text{C}$ , 保持 2 min, 以 5  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升至 200  $^{\circ}\text{C}$ , 保持 10 min, 2.5  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  升至 240  $^{\circ}\text{C}$ , 保持 10 min; 载气为氮气( $\text{N}_2$ ); 分流比为 40:1; 用面积归一化法定量。

### 1.4 数据处理与分析

数据用平均值 $\pm$ 标准误表示, 百分率经过反正弦平方根转换后采用 PASW Statistics 18.0 进行 Duncan 多重比较和相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 果实成熟过程中种仁和果皮主要矿质元素质量分数的动态变化及相关性

山核桃果实成熟过程中果实干物质缓慢增加, 从8月5日的 5.00  $\text{g}\cdot\text{粒}^{-1}$  增加到至9月6日的 5.15  $\text{g}\cdot\text{粒}^{-1}$  ( $P>0.05$ )。种仁干物质在8月5-20日快速增加, 从 0.62  $\text{g}\cdot\text{粒}^{-1}$  增加到 1.34  $\text{g}\cdot\text{粒}^{-1}$ , 增长了 116.13%, 此后缓慢增加。果皮干物质在8月5-17日明显下降, 从 4.38  $\text{g}\cdot\text{粒}^{-1}$  降到 3.82  $\text{g}\cdot\text{粒}^{-1}$ , 之后缓慢下降 ( $P<0.05$ )。说明该阶段(8月5-17日)是果皮和种仁间储藏物质代谢转换和转移的旺盛期, 是种仁干物质积累的关键期(图1)。

种仁氮质量分数呈持续下降, 其中8月5-20日, 下降较快; 果皮氮质量分数约为种仁的 1/3。种仁磷质量分数呈不规则波动, 在8月10日达最高值, 为 3.41  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 果皮磷质量分数远低于种仁磷, 但相对稳定 ( $P>0.05$ )。种仁钾质量分数先上升, 在8月10日达最高值, 为 12.40  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 此后迅速下降, 至8月20日停止下降, 之后又略微上升; 果皮钾质量分数与种仁钾变化趋势相反, 钾在种仁和果皮间存在明显的消长变化。种仁钙质量分数呈先上升, 后下降, 再上升的趋势, 变化幅度较小, 为 1.91~2.06  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 果皮钙质量分数呈先下降后上升, 在8月17-20日维持在一个较低的水平, 此后又上升到 3.36  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  左右。种仁镁质量分数呈逐渐下降的趋势; 果皮镁质量分数低于种仁, 为 0.43~0.64  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

相关性分析(表1)表明: 果皮和种仁矿质元素质量分数有一定的相关性, 相关系数达显著水平以上的有6对。种仁氮和果皮氮质量分数呈极显著正相关关系, 相关系数为 0.879, 与果皮磷、钾、钙、镁

表1 果实成熟过程中种仁和果皮矿质元素质量分数的相关性分析

Table 1 Correlative analysis on N, P, K, Ca and Mg content of kernel and pericarp during the maturity of hickory nuts

项目	种仁氮	果皮氮	种仁磷	果皮磷	种仁钾	果皮钾	种仁钙	果皮钙	种仁镁	果皮镁
种仁氮	1									
果皮氮	0.879**	1								
种仁磷	0.472	0.210	1							
果皮磷	0.114	0.118	0.130	1						
种仁钾	0.909**	0.801*	0.656	0.290	1					
果皮钾	-0.633	-0.412	-0.140	0.203	-0.525	1				
种仁钙	0.024	-0.116	0.304	0.257	0.001	0.416	1			
果皮钙	-0.335	-0.057	0.024	-0.110	-0.093	0.443	-0.468	1		
种仁镁	0.880**	0.859**	0.550	0.198	0.842**	-0.344	0.257	-0.274	1	
果皮镁	0.319	0.551	0.141	0.125	0.448	0.263	0.096	0.484	0.360	1

说明: \* 表示在 5% 水平上差异显著, \*\* 表示在 1% 水平上差异极显著

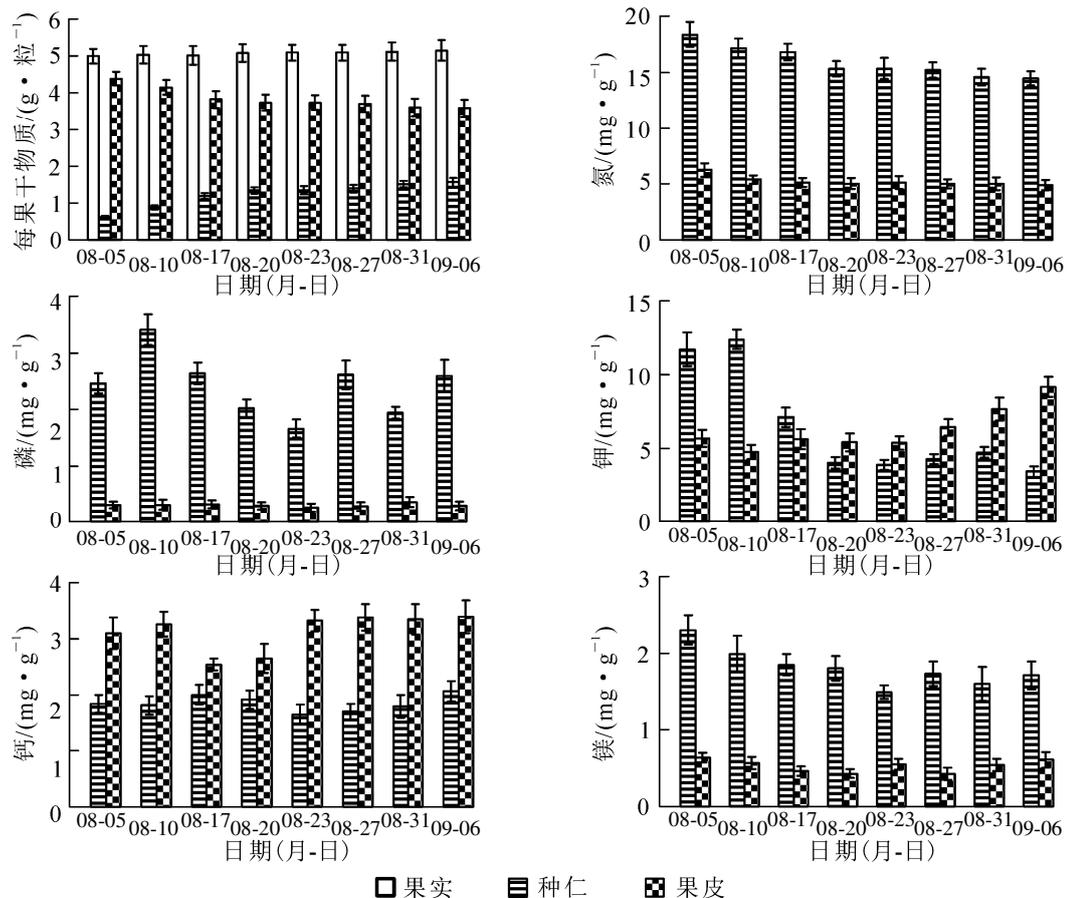


图 1 山核桃坚果成熟过程中各部质量和氮、磷、钾、钙、镁质量分数的动态变化

Figure 1 Dynamic change of mass and mineral element contents in kernel and pericarp during the maturity of hickory nuts

质量分数相关性均不显著。种仁氮与种仁钾、镁质量分数呈极显著正相关关系，相关系数分别为 0.909 和 0.880。果皮氮与种仁钾、镁质量分数呈显著正相关和极显著正相关关系，相关系数分别为 0.801 和 0.859。种仁钾与种仁镁质量分数极显著正相关，相关系数为 0.842。

## 2.2 果实成熟过程中种仁脂肪、脂肪酸的动态变化及相关性

从表 2 可见：种仁脂肪质量分数逐渐上升，8 月 5–10 日是脂肪快速积累期，从  $243.20 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  升高到  $586.02 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ，升高了 1.4 倍；之后缓慢上升，至 9 月 6 日达最高值，为  $665.24 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

种仁中饱和脂肪酸相对含量先下降后上升，不饱和脂肪酸相对含量先上升后下降，其中单不饱和脂肪酸先上升后下降，多不饱和脂肪酸先下降后上升。饱和脂肪酸中棕榈酸相对含量持续下降(从 8 月 5 日的 6.68% 降至 9 月 6 日的 4.43%)；硬脂酸相对含量先降低(从 8 月 5 日的 2.00% 降低至 8 月 20 日的 0.85%)后升高(9 月 6 日达到 2.09%)；花生酸相对含量变化不规则，在 8 月 20 日最低，为 0.12%，8 月 10 日和 9 月 6 日均较高，分别为 0.36% 和 0.35%。

单不饱和脂肪酸中油酸相对含量先快速升高(从 8 月 5 日的 59.79% 升高至 8 月 10 日的 74.62%)，再缓慢升高(8 月 20 日达 81.78%)，最后下降(9 月 6 日降至 70.78%)；反-11-二十碳烯酸变化不规则，8 月 10 日最低，为 0.17%，8 月 23 日最高，达 0.39%。多不饱和脂肪酸中亚油酸相对含量先快速下降(从 8 月 5 日的 25.86% 下降至 8 月 20 日的 10.75%)后升高(9 月 6 日达 20.24%)；亚麻酸相对含量与亚油酸相似，先降低(从 8 月 5 日的 5.26% 降至 8 月 27 日的 1.13%)后升高(9 月 6 日至 1.77%)，但最低值出现的时间滞后于亚油酸。在山核桃果实成熟过程中，油酸、亚油酸、棕榈酸是种仁脂肪酸的主要成分，三者占脂肪酸总量的 92.33%~97.50%；8 月 5–10 日果实脂肪和脂肪酸组分变化最大，主要表现在油酸相对含量的快速增加和亚油酸的快速降低。

表 3 表明：脂肪与棕榈酸和亚麻酸极显著负相关，相关系数分别为 -0.855 和 -0.931，与油酸显著正相关，相关系数为 0.783。脂肪酸中具有相近或相同碳链长度的脂肪酸相关性较高，棕榈酸与亚麻酸极

表2 山核桃果实成熟过程中脂肪和脂肪酸相对含量的动态变化

Table 2 Changes in oil contents and fatty acids composition during the maturity of hickory nut

日期 (月-日)	粗脂肪/ (mg·g <sup>-1</sup> )	饱和脂肪酸(SFA)相对含量/%				单不饱和脂肪酸(MUFA)相对含量/%		
		棕榈酸	硬脂酸	花生酸	小计	油酸	反-11-二十 碳烯酸	小计
08-05	243.20±12.72 c	6.68±0.25 a	2.00±0.14 ab	0.26±0.02 b	9.44±0.52 a	59.79±1.72 c	0.19±0.01 d	60.93±1.64 c
08-10	586.02±11.24 b	5.66±0.22 bc	2.27±0.21 a	0.36±0.03 a	8.06±0.41 b	74.62±2.03 b	0.17±0.01 d	74.52±2.17 b
08-17	584.82±21.78 b	5.94±0.17 b	2.11±0.19 ab	0.23±0.01 b	7.98±0.36 b	74.14±2.18 b	0.24±0.01 bc	74.65±2.66 b
08-20	612.37±13.52 b	4.97±0.24 cd	0.85±0.07 e	0.12±0.01 e	5.94±0.29 d	81.78±1.86 a	0.22±0.02 c	82.00±2.14 a
08-23	625.84±21.38 ab	5.28±0.29 bc	1.29±0.12 d	0.19±0.01 c	6.76±0.48 c	79.11±1.65 a	0.39±0.03 a	79.49±1.85 a
08-27	634.28±14.09 ab	5.21±0.24 c	1.59±0.11 c	0.16±0.01 d	6.96±0.35 c	74.68±2.21 b	0.26±0.02 b	74.93±2.42 b
08-31	647.37±18.17 a	5.08±0.32 cd	1.88±0.12 b	0.15±0.01 d	7.10±0.46 c	72.38±1.78 b	0.27±0.02 b	72.65±2.43 b
09-06	665.24±17.66 a	4.43±0.36 d	2.09±0.10 ab	0.35±0.03 a	6.87±0.51 c	70.78±1.98 b	0.34±0.03 a	71.12±2.42 b

日期(月-日)	多不饱和脂肪酸(PUFA)相对含量/%			不饱和脂肪酸(UFA) 相对含量合计/%	SFA/PUFA
	亚油酸	亚麻酸	小计		
08-05	25.86±0.69 a	5.26±0.47 a	29.63±0.72 a	90.56±1.08 b	0.32±0.02 c
08-10	13.49±0.52 b	2.82±0.22 d	17.42±0.87 c	91.94±1.14 a	0.46±0.03 a
08-17	15.28±0.65 c	2.51±0.20 b	17.37±0.84 c	92.02±1.63 a	0.46±0.03 a
08-20	10.75±0.55 e	1.22±0.12 d	11.96±0.76 d	93.96±1.59 a	0.50±0.02 a
08-23	12.14±0.61 e	1.20±0.15 d	13.34±0.83 d	92.84±1.86 a	0.51±0.03 a
08-27	16.58±0.48 c	1.13±0.10 d	17.70±0.69 c	92.64±1.74 a	0.39±0.03 b
08-31	18.43±0.73 b	1.62±0.13 c	20.06±0.94 b	92.70±2.03 a	0.35±0.01 b
09-06	20.24±0.82 b	1.77±0.17 c	22.01±1.02 b	93.13±2.16 a	0.31±0.02 c

说明：同列不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )；脂肪酸相对含量以总脂肪酸含量 100%计

表3 山核桃种仁成熟过程中脂肪和脂肪酸组分间的相关性

Table 3 Correlative analysis on oil contents and fatty acids composition during the maturity of hickory nuts

	脂肪	棕榈酸	硬脂酸	花生酸	油酸	反-11-二十碳烯酸	亚油酸	亚麻酸
脂肪	1							
棕榈酸	-0.855**	1						
硬脂酸	-0.216	0.324	1					
花生酸	-0.160	0.108	0.765*	1				
油酸	0.783*	-0.586	-0.627	-0.416	1			
反-11-二十碳烯酸	0.494	-0.572	-0.266	-0.124	0.299	1		
亚油酸	-0.662	0.395	0.543	0.319	-0.966**	-0.149	1	
亚麻酸	-0.931**	0.842**	0.530	0.444	-0.854**	-0.566	0.706	1

说明：\*表示在5%水平上差异显著，\*\*表示在1%水平上差异极显著

显著正相关，相关系数为0.842；硬脂酸与花生酸显著正相关，相关系数为0.765；油酸与亚油酸和亚麻酸极显著负相关，相关系数分别为-0.966和-0.854。

### 2.3 果实成熟过程中脂肪、脂肪酸与矿质元素的相关性

从表4可见：果皮氮与种仁脂肪、脂肪酸的相关性最高，其中与种仁饱和脂肪酸总量、棕榈酸和亚麻酸极显著正相关，相关系数分别为0.863, 0.877和0.940；与种仁脂肪和不饱和脂肪酸极显著负相关，相关系数分别为-0.976和-0.861。种仁氮与饱和脂肪酸总量、棕榈酸和亚麻酸极显著正相关，相关系数分别为0.873, 0.939和0.883；与种仁脂肪和不饱和脂肪酸总量极显著负相关，相关系数分别为-0.836和-0.747。种仁钾与种仁饱和脂肪酸总量和亚麻酸极显著正相关，相关系数分别为0.855和0.836，与棕榈酸显著正相关，相关系数为0.796，与不饱和脂肪酸总量和反-11-二十碳烯酸显著负相关，相关系数分别为-0.815和-0.748。果皮钾、种仁和果皮钙与种仁脂肪和脂肪酸相关性均未达到显著性水平。种仁镁与种仁和果皮中磷以及果皮镁相关性达到显著性水平的均仅有1对。

表 4 山核桃果实成熟过程中种仁脂肪和脂肪酸与种仁、果皮矿质元素间的相关性

Table 4 Correlative analysis on oil contents, fatty acids composition and mineral elements content of kernel and pericarp during the maturity of hickory nuts

脂肪酸	种仁氮	果皮氮	种仁磷	果皮磷	种仁钾	果皮钾	种仁钙	果皮钙	种仁镁	果皮镁
脂肪	-0.836**	-0.976**	-0.119	-0.110	-0.694	0.330	0.012	0.157	-0.859**	-0.485
棕榈酸	0.939**	0.877**	0.247	0.204	0.796*	-0.613	-0.145	-0.313	0.767*	0.239
硬脂酸	0.396	0.287	0.695	0.487	0.577	0.234	0.335	0.234	0.399	0.543
花生酸	0.356	0.252	0.727*	-0.013	0.534	0.151	0.407	0.266	0.395	0.676
饱和脂肪酸	0.873**	0.863**	0.467	0.332	0.853**	-0.250	0.055	-0.019	0.805*	0.566
油酸	-0.557	-0.758*	-0.265	-0.350	-0.552	-0.233	-0.181	-0.218	-0.695	-0.697
反-11-二十碳烯酸	-0.670	-0.527	-0.605	-0.448	-0.748*	0.464	-0.165	0.392	-0.792*	0.077
单不饱和脂肪酸	-0.551	-0.749*	-0.289	-0.361	-0.561	-0.242	-0.182	-0.237	-0.694	-0.703
亚油酸	0.339	0.603	0.133	0.335	0.328	0.446	0.221	0.292	0.544	0.649
亚麻酸	0.883**	0.940**	0.371	0.287	0.836**	-0.239	0.179	-0.127	0.908**	0.619
多不饱和脂肪酸	0.476	0.700	0.257	0.363	0.493	0.328	0.225	0.261	0.658	0.707*
不饱和脂肪酸	-0.847**	-0.861**	-0.406	-0.281	-0.815*	0.275	0.085	-0.057	-0.746*	-0.538

说明：\* 表示在 5%水平上差异显著，\*\* 表示在 1%水平上差异极显著

### 3 讨论

山核桃果实成熟过程中果实干物质总量增加缓慢，种仁干物质显著增加，且 8 月 5-17 日是果皮干物质大量向种仁中转移，种仁干物质快速积累期；种仁和果皮钾质量分数从 8 月 5 日至 9 月 6 日存在明显的消长变化。表明核桃类坚果果实成熟过程中果皮也是代谢活跃的器官<sup>[18]</sup>。种仁氮、磷、镁质量分数均高于果皮，种仁氮/果皮氮最为稳定，为 2.90~3.28，果皮钙质量分数均高于种仁。核桃种仁充实期种仁和青皮氮、磷质量分数均逐渐下降，种仁钾先快速下降，之后缓慢下降，青皮钾均呈先升高后下降，种仁钙、镁总体呈先快速下降，之后趋于稳定，青皮钙先升高后降低<sup>[19]</sup>。核桃 *Juglans regia* 和山核桃果实成熟过程中种仁和果皮矿质元素的变化存在较大差异。

油料作物籽粒成熟过程中有机物质的积累以脂肪为中心。山核桃果实成熟过程中的脂肪质量分数快速上升后缓慢上升，但仅有 1 个增长高峰，脂肪质量分数从 8 月 5 日的 243.20 mg·g<sup>-1</sup> 升高到 586.02 mg·g<sup>-1</sup>；脂肪酸的主要成分是油酸、亚油酸、棕榈酸，三者占脂肪酸总量的 92.33%~97.50%，与核桃、薄壳山核桃 *Carya illinoensis* 脂肪酸的主要成分一致<sup>[20-21]</sup>。山核桃种仁脂肪和脂肪酸组分相对含量在 8 月 5-10 日变化最大，主要表现在油酸的快速增加和亚油酸的快速降低，这与油茶 *Camellia oleifera* 和薄壳山核桃籽粒成熟过程中的变化一致<sup>[22-23]</sup>。不同物种、品种间籽粒发育过程中脂肪酸的变化规律不同。大豆 *Glycine max* 籽粒发育过程中随着棕榈酸、亚麻酸的下降，硬脂酸、油酸和亚油酸上升<sup>[24]</sup>；棕榈酸与亚油酸极显著负相关，与亚麻酸显著正相关，硬脂酸与亚油酸极显著负相关，与亚麻酸显著正相关，亚油酸与油酸、亚油酸极显著负相关<sup>[25]</sup>。而在花生 *Arachis hypogaea* 种子发育过程中，棕榈酸与亚麻酸极显著负相关，油酸与亚油酸极显著正相关<sup>[26]</sup>。此外，种子含油率和脂肪酸组分的变化受遗传因子与环境互作的影响<sup>[27-28]</sup>。

氮是植物必需矿质元素中的核心元素，具有重要的生理功能<sup>[29]</sup>，也是储藏物质转化代谢酶的重要组成部分。本研究发现：山核桃种仁和果皮中矿质元素间存在一定的相关性，氮与其他元素的相关性最高；矿质元素与脂肪和脂肪酸的相关性分析也表明：氮与脂肪和脂肪酸组分的相关性最高，种仁和果皮氮均与脂肪和多不饱和脂肪酸总量极显著负相关，而与棕榈酸、饱和脂肪酸总量和亚麻酸均极显著正相关。钾与种仁脂肪和脂肪酸组分的相关性仅次于氮，在脂肪积累高峰期，种仁钾质量分数升高，但随后迅速下降，核桃种仁充实期也有类似现象<sup>[16]</sup>。种仁钾与饱和脂肪酸总量极显著正相关，这也与核桃的研究相似<sup>[18]</sup>。山核桃种仁高油脂特性与喜钾的特性有一定关系，钾能显著提高叶片的净光合速率<sup>[12]</sup>，提高功能叶中磷酸蔗糖合成酶的活性，增加可溶性糖的供应，加速糖类物质向果实中的运转<sup>[30]</sup>。氮、钾是山核桃果实发育过程中最重要的矿质营养，种仁氮、钾与脂肪酸组分的相关性最高；丰产优质栽培建议施好果实膨大肥。

## 4 参考文献

- [1] 张若蕙, 路安民. 中国山核桃属研究[J]. 植物分类学报, 1979, **17**(2): 40 - 44.  
ZHANG Ruohui, LU Anming. A study of the genus *Carya* Nutt. in China [J]. *Acta Phytotaxon Sin*, 1979, **17**(2): 40 - 44.
- [2] 王冀平, 李亚南, 马建伟. 山核桃仁中主要营养成分的研究[J]. 食品科学, 1998, **19**(4): 44 - 46.  
WANG Jiping, LI Yanan, MA Jianwei. Study on the main nutrients of kernel of *Carya cathayensis* Sarg [J]. *Food Sci*, 1998, **19**(4): 44 - 46.
- [3] 仲山民, 常银子, 仲恽, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 流体技术萃取山核桃油的工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2013, **28**(8): 37 - 40.  
ZHONG Shanmin, CHANG Yinzi, ZHONG Yi, et al. Optimization of extraction of oil from Chinese walnut by supercritical CO<sub>2</sub> fluid extraction technology [J]. *J Chin Cereals Oils Association*, 2013, **28**(8): 37 - 40.
- [4] 周拥军, 郜海燕, 房祥军, 等. SPME-GC-MS 分离鉴定山核桃的挥发性风味物质[J]. 中国粮油学报, 2012, **27**(6): 115 - 119.  
ZHOU Yongjun, GAO Haiyan, FANG Xiangjun, et al. Separation and identification of volatile compounds of processed *Carya cathayensis* by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *J Chin Cereals Oils Association*, 2012, **27**(6): 115 - 119.
- [5] 刘力, 龚宁, 夏国华, 等. 山核桃种仁蛋白质及氨基酸成分含量的变异分析[J]. 林业科学研究, 2006, **19**(3): 376 - 378.  
LIU Li, GONG Ning, XIA Guohua, et al. Analysis on the protein and amino acids contents in hickory (*Carya cathayensis* Sarg.) kernel and their variations [J]. *For Res*, 2006, **19**(3): 376 - 378.
- [6] 陆浩, 杨会芳, 毕艳兰, 等. 山核桃油的理化性质及脂肪酸组成分析[J]. 中国油脂, 2010, **35**(5): 73 - 76.  
LU Hao, YANG Huifang, BI Yanlan, et al. Physicochemical properties and fatty acid composition of pecan oil [J]. *China Oils Fats*, 2010, **35**(5): 73 - 76.
- [7] 焦洁洁, 李绍进, 黄坚钦, 等. 影响山核桃产量气象因子的调查与分析[J]. 果树学报, 2012, **29**(5): 877 - 882.  
JIAO Jiejie, LI Shaojin, HUANG Jianqin, et al. Meteorological impact on the yield of *Carya cathayensis* [J]. *J Fruit Sci*, 2012, **29**(5): 877 - 882.
- [8] 张春苗, 张有珍, 姚芳, 等. 临安山核桃主产区土壤 pH 值和有效养分的时空变化[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(6): 845 - 849.  
ZHANG Chunmiao, ZHANG Youzhen, YAO Fang, et al. Temporal and spatial variation of soil pH and nutrient availability for *Carya cathayensis* orchards in Lin'an [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(6): 845 - 849.
- [9] 董建华, 赵伟明, 周建金, 等. 临安区山核桃林不同地质背景下的土壤肥力特性研究[J]. 浙江林业科技, 2017, **37**(2): 10 - 16.  
DONG Jianhua, ZHAO Weiming, ZHOU Jianjin, et al. Soil fertility of *Carya cathayensis* plantations on different geological strata [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2017, **37**(2): 10 - 16.
- [10] 陈世权, 黄坚钦, 黄兴召, 等. 不同母岩发育山核桃林地土壤性质及叶片营养元素分析[J]. 浙江林学院学报, 2010, **27**(4): 572 - 578.  
CHEN Shiquan, HUANG Jianqin, HUANG Xingzhao, et al. Nutrient elements in soil and *Carya cathayensis* leaves from four parent rock materials [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2010, **27**(4): 572 - 578.
- [11] 刘根华, 黄坚钦, 潘春霞, 等. 基于反射光谱的山核桃幼苗氮素营养状况分析[J]. 林业科学, 2011, **47**(1): 165 - 170.  
LIU Genhua, HUANG Jianqin, PAN Chunxia, et al. Analysis of nitrogen levels in leaves of hickory seedling by reflectance spectra [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(1): 165 - 170.
- [12] JIN Songheng, HUANG Jianqin, LI Xueqin, et al. Effects of potassium supply on limitations of photosynthesis by mesophyll diffusion conductance in *Carya cathayensis* [J]. *Tree Physiol*, 2011, **31**(10): 1142 - 1151.
- [13] 夏国华, 黄坚钦, 解红恩, 等. 山核桃不同器官矿质元素含量的动态变化[J]. 果树学报, 2014, **31**(5): 854 - 862.

- XIA Guohua, HUANG Jianqin, XIE Hong'en, *et al.* Dynamic changes of mineral elements in different organs of hickory(*Carya cathayensis*) [J]. *J Fruit Sci*, 2014, **31**(5): 854 – 862.
- [14] 闫道良, 黄有军, 金水虎, 等. 山核桃功能器官细根、叶和林地土壤 C, N, P 化学计量时间变异特征[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(5): 255 – 259.
- YAN Daoliang, HUANG Youjun, JIN Shuihu, *et al.* Temporal variation of C, N, P stoichiometric in functional organs rootlets, leaves of *Carya cathayensis* and forest soil [J]. *J Soil Water Conserv*, 2013, **27**(5): 255 – 259.
- [15] 田荆祥, 吴美春, 仲山民. 山核桃成熟过程中油脂变化的研究[J]. 浙江林学院学报, 1986, **3**(2): 53 – 57.
- TIAN Jingxiang, WU Meichun, ZHONG Shanmin. A study on the fat conversion of *Carya cathayensis* in the course of maturity [J]. *J Zhejiang For Coll*, 1986, **3**(2): 53 – 57.
- [16] 徐亚楠, 周伟, 叶晓明, 等. 山核桃种子生长发育过程油脂含量及脂肪酸的动态变化[J]. 浙江林业科技, 2017, **37**(2): 10 – 16.
- XU Yanan, ZHOU Wei, YE Xiaoming, *et al.* Dynamic changes of oil content and fatty acids in seeds of *Carya cathayensis* at different growth stage [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2017, **37**(2): 10 – 16.
- [17] HUANG Jianqin, ZHANG Tong, ZHANG Qixiang, *et al.* The mechanism of high contents of oil and oleic acid revealed by transcriptomic and lipidomic analysis during embryogenesis in *Carya cathayensis* Sarg. [J]. *BMC Genomics*, 2016, **17**: 113.
- [18] 张志华, 高仪, 王文江, 等. 核桃果实成熟期间主要营养成分的变化[J]. 园艺学报, 2001, **28**(6): 509 – 511.
- ZHANG Zhihua, GAO Yi, WANG Wenjiang, *et al.* Changes of main nutrients during the fruit ripening of walnut [J]. *Acta Horti Sin*, 2001, **28**(6): 509 – 511.
- [19] 胡志伟, 李保国, 齐国辉, 等. “绿岭”核桃种仁充实期叶片与果实矿质元素含量变化规律[J]. 林业科学, 2011, **47**(8): 82 – 87.
- HU Zhiwei, LI Baoguo, QI Guohui, *et al.* Changes of main mineral elements content in leaves and fruits during the kernel-filling period of ‘Lüling’ walnut [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(8): 82 – 87.
- [20] 陈虹, 潘存德, 王蓓, 等. 核桃种子发育主要营养物质积累之间的关系及脂肪酸动态变化[J]. 河北农业大学学报, 2016, **39**(1): 57 – 62, 74.
- CHEN Hong, PAN Cunde, WANG Bei, *et al.* The relationship among nutrients' accumulation and dynamic changes of fatty acids in seed development of walnut [J]. *J Agric Univ Hebei*, 2016, **39**(1): 57 – 62, 74.
- [21] 贾晓东, 罗会婷, 翟敏, 等. 薄壳山核桃营养物质变化及相关性研究[J]. 果树学报, 2016, **33**(9): 1120 – 1130.
- JIA Xiaodong, LUO Huiting, ZHAI Min, *et al.* Dynamic changes and correlation analysis of nutrient contents in ‘Pawnee’ pecan (*Carya illinoensis*) [J]. *J Fruit Sci*, 2016, **33**(9): 1120 – 1130.
- [22] 凌宏有, 郑德勇. 油茶籽成熟过程中功能成分的变化规律[J]. 福建林学院学报, 2012, **32**(1): 89 – 92.
- LING Hongyou, ZHENG Deyong. Changes of the functional components in *Camellia oleifera* seed during mature process [J]. *J Fujian Coll For*, 2012, **32**(1): 89 – 92.
- [23] 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]. *J Am Oil Chem Soc*, 2013, **90**(12): 1869 – 1876.
- [24] 徐杰, 胡国华, 张大勇, 等. 大豆籽粒发育过程中脂肪酸组分的累积动态[J]. 作物学报, 2006, **32**(11): 1759 – 1763.
- XU Jie, HU Guohua, ZHANG Dayong, *et al.* Dynamic accumulation of fatty acids in grain maturing process of soybean [J]. *Acta Agron Sin*, 2006, **32**(11): 1759 – 1763.
- [25] 马淑英, 梁歧, 尹田夫, 等. 大豆籽粒发育过程中脂肪酸的组分分析[J]. 大豆科学, 1999, **18**(2): 124 – 129.
- MA Shuying, LIANG Qi, YIN Tianfu, *et al.* Analysis of the fatty acids composition during the development of soybean seed [J]. *Soybean Sci*, 1999, **18**(2): 124 – 129.
- [26] 李晓丹, 曹应龙, 胡亚平, 等. 花生种子发育过程中脂肪酸累积模式研究[J]. 中国油料作物学报, 2009, **31**(2): 157 – 162.
- LI Xiaodan, CAO Yinglong, HU Yaping, *et al.* Fatty acid accumulation pattern in developing seeds of peanut [J].

- Chin J Oil Crop Sci*, 2009, **31**(2): 157 – 162.
- [27] UZUN B, ARSLAN C, FURAT S. Variation in fatty acid compositions, oil content and oil yield in a germplasm collection of sesame (*Sesamum indicum* L.) [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2008, **85**(12): 1135 – 1142.
- [28] KODAD O, ESTOPANÁN G, JUAN T, *et al.* Oil content, fatty acid composition and tocopherol concentration in the Spanish almond genebank collection [J]. *Sci Hortic*, 2014, **177**: 99 – 107.
- [29] 彭福田, 姜远茂, 顾曼如, 等. 氮素对苹果果实内源激素变化动态与发育进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, **9**(2): 208 – 213.
- PENG Futian, JIANG Yuanmao, GU Manru, *et al.* Effect of nitrogen on apple fruit hormone changing trends and development [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2003, **9**(2): 208 – 213.
- [30] 胡春梅, 王秀峰, 季俊杰. 钾对瓜尔豆光合及胚乳中糖类含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, **12**(6): 858 – 863.
- HU Chunmei, WANG Xiufeng, JI Junjie. Effects of potassium on photosynthesis and endospermous carbohydrates contents of Guar [*Cyamopsis Tetragonoloba* (L.) Taub.] [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2006, **12**(6): 858 – 863.

## 欢迎订阅 2020 年《中国农业科学》《农业科学学报》

《中国农业科学》是由农业农村部主管、中国农业科学院与中国农学会共同主办的综合性学术期刊，是中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国精品科技期刊、CSCD Q1 区期刊、中国权威学术期刊 A+ 期刊、中国国际影响力优秀学术期刊，是了解中国农业相关领域科研进展的首选期刊。《中国农业科学》以研究论文、综述、简报等形式报道农牧业基础科学和应用基础科学最新成果。设有作物遗传育种·种质资源·分子遗传学；耕作栽培·生理生化·农业信息技术；植物保护；土壤肥料·节水灌溉·农业生态环境；园艺；食品科学与工程；畜牧·兽医·资源昆虫等栏目。读者对象为国内外农业科研院(所)、大专院校的科研、教学与管理人员。《中国农业科学》大 16 开，每月 1 和 16 日出版，国内外公开发行，定价 49.50 元，全年定价 1 188.00 元。国内统一连续出版物号：CN 11-1328/S，国际标准连续出版物号：ISSN 0578-1752，邮发代号：2-138，国外代号：BM43。

《农业科学学报》(Journal of Integrative Agriculture, JIA)由农业农村部主管、中国农业科学院与中国农学会共同主办，是综合性英文学术期刊，月刊。JIA 前身为 2002 年创刊的《中国农业科学》英文版(Agricultural Sciences in China, ASC)，2012 年更名为 JIA。JIA 2006 年起与 Elsevier 合作，全文数据在 ScienceDirect 平台面向世界发行；2009 年被 SCI 收录，最新影响因子为 1.337，位于 JCR 农业综合类 Q2 区前列位次。JIA 是中国科技核心期刊；连续 6 年获得“中国最具国际影响力学术期刊”称号；2016 年入选中国科协“中国科技期刊国际影响力提升计划”及“中国科技期刊登峰行动计划”项目，是我国农业领域领衔学术期刊，并具有较高国际影响力。JIA 大 16 开，每月 20 日出版，国内外公开发行。每期 180 页，国内订价 80.00 元，全年 960.00 元。国内统一连续出版物号：CN 10-1039/S，国际标准连续出版物号：ISSN 2095-3119，邮发代号：2-851，国外代号：1591M。

全国各地邮局均可订阅，也可直接向编辑部订购。邮编：100081；地址：北京中关村南大街 12 号《中国农业科学》编辑部。电话：010-82109808；传真：010-82106247。网址：www.ChinaAgriSci.com；E-mail：zgnykx@caas.cn。联系人：林鉴非。