

王梦洋, 张鹤鑫, 李梅, 等. 烘烤对带壳核桃内源性功能组分及抗氧化活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 81–92. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060234

WANG Mengyang, ZHANG Hexin, LI Mei, et al. Effect of Roasting on Endogenous Functional Components and Antioxidant Activity of Walnuts with Shells[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 81–92. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060234

· 研究与探讨 ·

烘烤对带壳核桃内源性功能组分及 抗氧化活性的影响

王梦洋¹, 张鹤鑫¹, 李梅¹, 徐怀德¹, 张婷^{2,*}, 赵文革³, 雷宏杰^{1,*}

(1.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100;

2.新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所, 新疆乌鲁木齐 830091;

3.阿克苏浙疆果业有限公司, 新疆阿克苏 843000)

摘要:核桃中富含多种功能性成分, 适当烘烤有助于改变功能性组分的构成与含量。然而, 目前关于烘烤对核桃内源性功能组分及抗氧化性的影响研究较少。本研究以带壳核桃为原料, 研究不同烘烤条件 (100~140 °C, 15~120 min) 对核桃内源性功能组分、脂肪酸含量、酸价、过氧化值以及抗氧化能力的影响, 以期为核桃烘烤加工提供理论参考。结果表明, 适度烘烤 (140 °C, 60 min) 可显著提高核桃植物甾醇 (1128.36~1209.61 mg/kg)、生育酚 (436.88~499.89 mg/kg)、多酚 (27.34~44.17 mg GAE/kg)、亚油酸 (63.26%~63.86%)、亚麻酸 (9.54%~10.03%) 等功能性成分的含量 ($P<0.05$), 同时抗氧化活性也有所提高。而角鲨烯 (5.72~5.46 mg/kg)、油酸含量 (18.01%~16.44%) 和 2,2'-联氮-二 (3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸) 二铵盐 (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS) 阳离子自由基清除能力有所降低。烘烤后的核桃酸价和过氧化值都在食品法典委员会 (Codex Alimentarius Commission, CAC) 的规定范围内。主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 和层次聚类分析 (Hierarchical Cluster Analysis, HCA) 表明, 适度烘烤 (140 °C, 60 min) 改善了核桃的内源性功能组成和抗氧化能力。研究结果为核桃的工业化烘烤工艺优化提供了理论基础。

关键词:核桃, 烘烤, 内源性功能组分, 脂肪酸, 自由基清除能力

中图分类号: TS255.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)11-0081-12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060234



本文网刊:

Effect of Roasting on Endogenous Functional Components and Antioxidant Activity of Walnuts with Shells

WANG Mengyang¹, ZHANG Hexin¹, LI Mei¹, XU Huaide¹, ZHANG Ting^{2,*}, ZHAO Wenge³, LEI Hongjie^{1,*}

(1.College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2.Institute of Farm Product Storage and Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Science, Urumqi 830091, China;

3.Aksu Zhejiang Fruit Industry Co., Ltd., Aksu 843000, China)

Abstract: Walnuts are rich in various functional components, and proper roasting can help change the composition and content of functional components. However, there are few studies on the effects of roasting on the endogenous functional components and antioxidant properties of walnuts. Therefore, this study used whole walnuts as raw materials to investigate the effects of different roasting conditions (100~140 °C, 15~120 min) on the intrinsic functional components, fatty acid content, acid value, peroxide value, and antioxidant capacity of walnuts, with the aim of providing theoretical references for walnut roasting processing. The results showed that roasting (140 °C, 60 min) significantly increased the content of

收稿日期: 2024-06-17

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFD1000103)。

作者简介: 王梦洋 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏与加工, E-mail: wmy2022051132@nwafu.edu.cn。

* 通信作者: 张婷 (1980-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: zhangtingkikie@163.com。

雷宏杰 (1984-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品发酵与酿造, E-mail: leihongjie@nwafu.edu.cn。

functional components such as plant sterols (1128.36~1209.61 mg/kg), tocopherols (436.88~499.89 mg/kg), polyphenols (27.34~44.17 mg GAE/kg), linoleic acid (63.26%~63.86%), and α -linolenic acid (9.54%~10.03%). Furthermore, the antioxidant activities based on DPPH, FRAP, ORAC methods were also improved. However, the content of squalene (5.72~5.46 mg/kg), oleic acid (18.01%~16.44%) and the scavenging capacity of ABTS⁺ free radicals were decreased. After roasting, the acid value and peroxide value of walnuts were within the specified range by the Codex Alimentarius Commission (CAC). Principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) showed that moderate roasting (140 °C, 60 min) improved the endogenous functional composition and antioxidant capacity of walnuts. The research results provide a theoretical basis for the industrial roasting process of walnuts.

Key words: walnuts; roast; endogenous functional components; fatty acid; free radical scavenging capacity

核桃是重要的木本油料树种和经济树种,具有较强的环境适应性,在世界范围内分布广泛,我国是世界上最大的核桃生产国,新疆是产量全国第二的核桃产区,其中‘温 185’核桃具有壳薄、出仁率高、品质优良等特点^[1]。核桃富含大量不饱和脂肪酸,其中以油酸、亚油酸和亚麻酸为代表的脂肪酸含量约占总脂肪酸的 90%^[2],有利于人体胆固醇水平的降低,血管壁上“污垢杂质”的清除,可增强神经细胞活力、记忆力,提高大脑的生理功能^[3]。此外,核桃中还含有具有抗氧化、抗炎、抗癌、抗衰老等生理活性功能的内源性物质,包括生育酚、多酚、植物甾醇以及角鲨烯等^[4],虽然这些物质含量较低,却与核桃品质紧密相关,直接影响核桃油的功能性和氧化稳定性等^[5]。

研究表明,核桃壳中有许多重要的生物活性化合物,包括木质素、纤维素、油酸、棕榈酸^[6-7]、甾醇以及酚类^[8],可通过热解产生富含苯酚、酮和酯等有机化合物的生物油^[6];适当的烘烤条件不仅会提高坚果中生物活性物的含量^[9],例如生育酚^[10]、植物甾醇^[11]、多酚、角鲨烯等,还能增强抗氧化活性和氧化稳定性^[12]。目前,国内外相关研究表明烘烤工艺应用于食品干燥处理中,可提升香味品质、提高干燥效率、节约能耗。KASHIF 等^[13]以几种核桃仁为原料,探究烘烤对其脂肪酸及生物活性的影响,结果表明在烘烤和未烘烤的核桃仁中鉴定出的主要脂肪酸均为亚油酸;与未烘烤核桃仁相比,烘烤显著提高了其亚麻酸及生育酚的含量($P<0.05$)。邵宇辰^[14]考察了变温烘烤对山核桃坚果风味及氧化品质的影响,结果表明焙烤温度为 140~155 °C,时间 66 min,变温时间比 1:2 获得的山核桃氧化和抗氧化综合品质最佳,为山核桃焙烤相关技术提供基础的数据支持。虽已有大量研究报道了烘烤对不同油脂稳定性的影响,但与核桃烘烤相关的研究还有限,且大量文献报道了烘烤对核桃的质地和风味的影响。然而关于以带壳核桃为原料烘烤对核桃内源性功能组分和抗氧化能力影响的研究报道很少。

核桃的抗氧化活性会随烘烤时间和温度的改变发生降低或升高。为保证带壳核桃具有高内源性功能组分的同时,还能提高其稳定性,本研究以带壳‘温 185’核桃为原料,分析不同烘烤温度和时间对核

桃内源性功能组分、脂肪酸、理化特性、抗氧化性的影响,分析脂肪酸成分和生育酚、植物甾醇、角鲨烯和多酚含量的变化,评价烘烤核桃的自由基清除能力。通过 PCA 评估核桃各成分与抗氧化能力之间的关系,建立核桃烘烤条件与内源性功能组分之间的相关性,旨在为工业化核桃烘烤条件的选择提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新疆‘温 185’核桃 新疆阿克苏地区浙疆果业有限公司提供; 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)、荧光素(FL)、2,2'-偶氮二异丁基脒二盐酸盐(AAPH) 上海麦克林生化科技有限公司; 脂肪酸甲酯混合标准品、生育酚混合标准品(α -, β -, γ -, δ -生育酚,纯度>95%)、2,3,5-氯化三苯基四氮唑、四唑红(TPTZ)、5 α -胆甾烷-3 β -醇、N,O-双(三甲基硅基)三氟乙酰胺(99% 双(三甲基硅烷基)三氟乙酰胺+1% 三甲基氯硅烷,99%BSTFA+1%TMCS)、水溶性维生素 E(Trolox)、没食子酸 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 福林-酚试剂 北京索莱宝科技有限公司; 正己烷、乙酸乙酯、异丙醇 均为色谱纯,天津市科密欧化学试剂有限公司; 石油醚(沸程 60~90 °C)、乙醚、甲醇、正己烷、氢氧化钾、95% 乙醇、无水乙醇、过二硫酸钾 均为国产分析纯,天津市致远化学试剂有限公司。

UV-1780 型紫外-可见分光光度计、GCMS-QP 2010 Ultra 气相色谱质谱联用仪、GC-2014 C 气相色谱仪、LC-20 AT 高效液相色谱仪 日本岛津公司; NHY 6-108801 万能粉碎机 北京中西远大科技有限公司; XS 205 电子分析天平 瑞士梅特勒-托利多公司; HH-S 4 A 恒温水浴锅 北京科伟永兴仪器有限公司; R-100 旋转蒸发器 瑞士 Büchi 公司; BHZ-D (Ⅲ) 循环水式多用真空泵 上海达丰玻璃仪器厂; spark 酶标仪 奥地利 Tecan Austria GmbH。

1.2 实验方法

1.2.1 烘烤样品制备 选择大小均一、外形完整、无发黑、霉变、损伤的新疆‘温 185’带壳干核桃为实验材料平铺在烤箱中进行烘烤,以未烘烤的干核桃作为空白对照。采用烘烤温度和烘烤时间双因素,烘烤温

度设定为 100、110、120、130、140 ℃, 烘烤时间为 15、30、60、90、120 min; 每次取 400 g 烘烤后的带壳核桃, 抽真空后-80 ℃ 保存备用。

烘烤样品去壳, 取核桃仁 30 g 研磨, 置于三角瓶中, 根据 1:3 的料液比添加正己烷, 室温条件进行 24 h 浸提, 然后用 160 r/min 的转速振荡 10 min, 重复 3 次提取后, 用 4500 r/min 的转速对混合提取液进行 20 min 离心处理, 上清液收集于旋转蒸发仪内, 直至正己烷彻底蒸发, 获得核桃提取液。于-20 ℃ 保存。以未烘烤的核桃作为对照。

1.2.2 内源性功能组分的测定

1.2.2.1 植物甾醇和角鲨烯的测定 植物甾醇和角鲨烯的测定参照丁新杰^[15]的方法, 并稍作修改。

样品前处理: 在 50 mL 离心管中加入精准称取的核桃提取液 0.2~0.3 g (精确至 0.001 g) 和浓度为 0.1 mg/mL (w/v) 的内标(5 α -胆甾烷-3 β -醇) 0.5 mL, 并添加 2 mol/L 的 KOH-乙醇溶液 10 mL, 然后在 85 ℃ 水浴 1 h, 取出后进行冷却, 接着将 5 mL 蒸馏水和 5 mL 正己烷(色谱级)分别加入离心管, 进行涡旋, 提取离心(3500 r/min, 3 min)后的上清液, 下层用 5 mL 正己烷再进行两次提取, 将上层液合并在一起, 并加入 5 mL 蒸馏水, 经振荡和 3 min 的离心(3500 r/min)处理, 将提取的上清液置于 15 mL 离心管中, 使用氮气进行吹干, 然后添加 200 μ L 的 BSTFA+TMCS(99:1, v/v)硅烷化试剂, 在 75 ℃ 水浴 30 min 后, 将其取出进行冷却, 最终过 0.22 μ m 的有机系滤膜。

GC-MS 检测条件: 色谱柱为 SH-Rxi-5Sil MS (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m); 进样口温度为 320 ℃, 离子源温度为 250 ℃, 溶剂延迟时间为 10 min; 扫描范围(m/z)在 50~650 之间; 程序升温过程为: 在 40 ℃ 下保持 3 min, 然后以 4 ℃/min 的速度升至 120 ℃, 再以 6 ℃/min 的速度升至 240 ℃, 保持 12 min; 氮气作为载气, 流速为 0.7 mL/min; 分流比是 80:1; 进样量为 1.0 μ L。以 5 α -胆甾烷-3 β -醇为内标对提取液中的植物甾醇和角鲨烯进行定量分析, 结果用 mg/kg 表示。

1.2.2.2 生育酚的测定 参照于坤等^[16]的方法并稍作修改。

样品前处理: 在 2 mL 棕色容量瓶中加入精准称取的核桃提取液 1.00 mL, 然后用正己烷(色谱级)进行定容, 进行涡旋混合, 使其均匀, 接着过 0.22 μ m 有机系滤膜, 获得的滤液用于高效液相色谱分析。

仪器的检测条件如下: CNW Athena Silica 色谱柱(120 A, 4.6 $\times$ 250 mm, 5 μ m); 流动相为色谱级正己烷/异丙醇(98.5:1.5, v/v); 进样量为 10 μ L; 流速为 1 mL/min; 洗脱过程为等度洗脱; 柱温为 25 ℃; 紫外检测器波长为 295 nm。

采用外标法定量, 结果以 mg/kg 表示。

1.2.2.3 多酚含量的测定 多酚含量的测定参照

GAO 等^[17]的方法并稍作修改。将 6 mL 甲醇与 6 mL 正己烷各自过 Speax 柱进行活化; 精确取 1.5 g 的核桃提取液, 将其溶解在 6 mL 的正己烷中, 过柱, 对柱用 3 mL 正己烷进行两次清洗; 添加 4 mL 正己烷-乙酸乙酯(9:1, v:v)过柱; 最终, 利用甲醇进行洗脱, 然后在 10 mL 棕色容量瓶中收集核桃油极性萃取液, 定容, 取 5 mL 萃取液于另一个 10 mL 的棕色容量瓶内, 并将 0.5 mL 福林酚加入该容量瓶中, 反应 3 min 后, 再添加 1.0 mL 浓度为 10%(w/v)的碳酸钠溶液, 并用蒸馏水定容至 10 mL, 然后在黑暗环境下进行 2 h 反应。利用紫外分光光度计于 760 nm 波长下测定样品的吸光度, 以没食子酸当量来表示结果, 单位为 mg GAE/kg。

1.2.3 脂肪酸组成的测定 按照 GB 5009.168-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》的方法进行测定。

样品的甲酯化: 取 0.06 g 的核桃提取液于 10 mL 的离心管中, 加入 2 mL 的乙醚-石油醚混合液(v/v=1:2), 充分振荡使提取液溶解。然后加入 1 mL 的氢氧化钾-甲醇溶液(2%, w/v), 进行 30 s 涡旋操作, 并在 40 ℃ 水浴 1 h 后, 将其冷却至室温, 然后用蒸馏水将其定容至 10 mL, 之后静置 30 min, 接着吸取上清液(1~1.5 mL)于气相小瓶中, 待测。

色谱分析条件: Zebron® ZB-FAME 色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.20 μ m); 升温程序设定: 100 ℃ 初始温度保持 2 min, 然后以 10 ℃/min 的速度提升至 140 ℃, 接着再以 3 ℃/min 的速度提升至 190 ℃, 最后以 30 ℃/min 的速度提升至 250 ℃, 保持 8 min; 使用氢火焰离子化检测器(FID), 检测口的温度为 260 ℃; 进样口的温度为 250 ℃。柱流量为 1 mL/min, 80:1 的分流比, 进样量为 1 μ L。与脂肪酸甲酯标准进行对照后, 脂肪酸相对含量采用面积归一化的方法确定(以峰面积的百分比表示)。

1.2.4 氧化指标的测定

1.2.4.1 酸价 参照 GB 5009.229-2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》中的冷溶剂指示剂滴定法进行测定, 滴定用氢氧化钾的浓度为 0.1 mol/L, 酸价结果以 mg KOH/g 表示。

1.2.4.2 过氧化值 参照 GB 5009.227-2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》进行测定, 结果以 mmol/kg 表示。

1.2.5 抗氧化能力的测定 极性提取液的制备: 在离心管中准确称量 5.0 g 核桃提取液, 加入 10 mL 甲醇, 用 DG-2500R 多涡旋混合器在 2000 r/min 的黑暗中振荡 30 min。避光静置至完全分层, 收集上清液于 50 mL 棕色样品瓶中, 提取过程重复 3 次, 每次加入 10 mL 甲醇, 合并为极性提取液。

1.2.5.1 DPPH 法的测定 DPPH 法检测参考赵鑫丹^[18]的方法。

精准吸取稀释 25 倍的提取液 2 mL, 加入 2 mL 0.20 mmol/L 的 DPPH 溶液(甲醇配制), 避光静置 30 min, 在波长 517 nm 处测定其吸光度值。按公式(1)计算 DPPH 自由基清除率。结果用 Trolox 浓度对清除率作标准曲线, 并计算 Trolox 等值抗氧化活性, 单位以 $\mu\text{mol TE/kg}$ 表示。

$$\text{DPPH}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_0}{A_2}\right) \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中: A_0 为 50 μL 提取液与 50 μL 甲醇溶液混合液的吸光度; A_1 为 50 μL 提取液与 2 mL DPPH 溶液混合液的吸光度; A_2 为 50 μL 甲醇溶液与 2 mL DPPH 溶液混合液的吸光度。

1.2.5.2 ABTS 法的测定 ABTS 法检测参考赵鑫丹^[18]的方法并稍作修改。

试剂配制: 配制 7.0 mmol/L 的 ABTS 母液, 2.45 mmol/L 的过硫酸钾溶液, 并按 1:1(v/v)比例混合, 于室温暗处静置 12~16 h, 配成 ABTS 反应液。测定前将反应液在 734 nm 处用甲醇稀释 15 倍。

样品 ABTS⁺清除能力的测定: 将 50 μL 提取液或 50 μL 甲醇溶液与 3 mL ABTS 稀释液混合, 涡旋混合均匀, 室温暗处静置 20 min, 测 734 nm 波长下吸光度值, 按公式(2)计算 ABTS⁺自由基清除率。结果用 Trolox 浓度对清除率作标准曲线, 并计算 Trolox 等值抗氧化活性, 单位以 $\mu\text{mol TE/kg}$ 表示。

$$\text{ABTS}(\%) = \frac{A_2 - A_1}{A_2} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中: A_1 为 50 μL 提取液与 3 mL ABTS 稀释液混合液的吸光度; A_2 为 50 μL 甲醇溶液与 3 mL ABTS 稀释液混合液的吸光度。

1.2.5.3 FRAP 法的测定 FRAP 法检测参考 YU 等^[19]的方法并加以修改。

将 0.1 mol/L 的乙酸钠溶液、10 mmol/L 的 TPTZ 溶液(以 40 mmol/L HCl 溶液为溶剂)、20 mmol/L 的 FeCl_3 溶液以 10:1:1 的体积比混合, 得到 FRAP 工作液(现配现用, 使用前放置在 37 $^\circ\text{C}$ 水浴中保温)。

精准吸取 100 μL 提取液于 10.0 mL 离心管中, 添加 3.0 mL FRAP 工作液与 2.0 mL 蒸馏水, 混合均匀, 在暗处反应 30 min 后, 最后在 593 nm 处测定吸光度。

以 Trolox 浓度作标准曲线, 计算 Trolox 等值抗氧化活性, 单位用 $\mu\text{mol TE/kg}$ 表示。

1.2.5.4 ORAC 法的测定 ORAC 法检测参照 GAO 等^[20]的方法并稍作修改。

溶液配制: 8.16×10^{-5} mmol/L 荧光素钠盐溶液, 153 mmol/L AAPH 反应液, Trolox 水溶性生育酚标准液。

准确吸取 30 μL 提取液或甲醇或 Trolox 水溶性生育酚标准液于 96 孔黑色酶标板中, 然后添加

180 μL 荧光素钠盐溶液, 将黑色酶标板放入酶标仪, 快速振荡 2 min, 在 37 $^\circ\text{C}$ 下避光反应 10 min, 取出酶标板后再添加 30 μL AAPH 溶液, 然后放入酶标仪后启动。在 485 ± 20 nm 的激发波长和 520 ± 20 nm 的发射波长下, 进行连续荧光强度的测定。每隔 5 min 进行一次测定, 在每次测定前对孔板进行 5 s 振动, 当荧光强度衰减并呈基线后, 停止测定。以未添加自由基的荧光素钠盐荧光自然衰减和未添加样品提取液时自由基的作用为对照。整个测定过程中体系温度保持 37 $^\circ\text{C}$ 不变。

以 Trolox 浓度对净衰减面积作 ORAC 法的标准曲线。并计算 Trolox 等值抗氧化活性, 单位用 $\mu\text{mol TE/kg}$ 表示。

1.3 数据处理

所有数据均以三次重复的平均值 $\pm$ 标准差表示。应用 SPSS 27.0 软件进行方差分析(ANOVA)和 Duncan 检验, 统计学差异在 5% 水平显著($P < 0.05$); 主成分分析所有变量进行标准化处理, 去除单位化; 采用 Origin 2023b 软件制作图表、Excel 2019 处理数据。

2 结果与分析

2.1 烘烤对核桃内源性功能组分的影响

2.1.1 烘烤过程核桃植物甾醇含量的变化 如表 1 所示, 烘烤温度和时间对核桃中植物甾醇含量均有显著影响。烘烤使核桃的植物甾醇含量显著增加, 但对植物甾醇组成没有影响。本研究对核桃中 4 种植物甾醇(菜油甾醇、 β -谷甾醇、豆甾醇、 $\Delta 5$ -燕麦甾醇)进行了定量分析。在已鉴定的植物甾醇中, β -谷甾醇为主要成分(982.17~1287.89 mg/kg), 占总植物甾醇的 70% 以上。与对照组相比, 烘烤后的核桃 β -谷甾醇含量均显著增加($P < 0.05$), 但随着烘烤温度的增加, β -谷甾醇含量先增后减, 但都高于对照组。而与对照样品相比, $\Delta 5$ -燕麦甾醇含量在烘烤后显著降低($P < 0.05$), 但在 110 $^\circ\text{C}$ 下烘烤 60 min 其含量与对照组无显著差异。相比于其他烘烤时间, 核桃烘烤时间为 60 min 时, 菜油甾醇含量整体较高, 尤其烘烤温度为 140 $^\circ\text{C}$ 其含量最高(62.91 mg/kg)。在 100 $^\circ\text{C}$ 烘烤 120 min(1428.66 mg/kg)、120 $^\circ\text{C}$ 烘烤 30 min(1402.53 mg/kg)或 60 min(1424.51 mg/kg)后总植物甾醇的含量达最高水平。结果表明, 在一定的烘烤温度和烘烤时间范围内, 通过调整烘烤温度或烘烤时间显著改变植物甾醇含量; 推断低温长时间烘烤或适温较短时间烘烤可提高总植物甾醇的含量。与未经处理的核桃相比, 烘烤后核桃植物甾醇含量增加, 这与烘烤亚麻籽^[11]以及烘烤核桃仁^[20]结果一致, 但与可可豆的结果相反^[21]。这种结果差异可能归因于样品烘烤过程中湿度的变化, 这种变化促进了植物甾醇的提取^[22]。

2.1.2 烘烤过程核桃角鲨烯含量的变化 角鲨烯是

表 1 不同烘烤条件下植物甾醇含量(mg/kg)的比较
Table 1 Comparison of phytosterols content (mg/kg) during various roasting conditions

烘烤温度(℃)	烘烤时间(min)	菜油甾醇	β -谷甾醇	豆甾醇	Δ 5-燕麦甾醇	总植物甾醇
100	CK	56.42±2.67 ^{Aa}	982.17±13.12 ^{Cd}	36.02±1.80 ^{Ab}	53.75±2.83 ^{Aa}	1128.36±20.33 ^{Cd}
	15	52.37±1.78 ^{Bb}	1010.21±25.87 ^{Cd}	31.63±1.04 ^{CDc}	46.10±1.41 ^{Bc}	1140.32±30.04 ^{Cd}
	30	54.68±1.05 ^{Bab}	1089.45±26.62 ^{Cc}	32.10±1.02 ^{Dc}	48.72±1.55 ^{Bbc}	1224.96±30.16 ^{Cc}
	60	57.36±0.81 ^{Da}	1184.86±35.79 ^{BCb}	32.71±1.15 ^{Dc}	53.21±0.93 ^{Aa}	1328.14±38.67 ^{BCb}
	90	55.23±0.80 ^{ABab}	1230.39±31.25 ^{Ab}	34.95±1.01 ^{Cb}	49.82±0.85 ^{Bb}	1370.39±33.90 ^{Ab}
	120	55.09±0.98 ^{ABab}	1287.89±13.77 ^{Aa}	38.16±0.72 ^{Aa}	47.51±0.41 ^{Dbc}	1428.66±15.81 ^{Aa}
110	CK	56.42±2.67 ^{ABab}	982.17±13.12 ^{Dd}	36.02±1.80 ^{Ccd}	53.75±2.83 ^{Aab}	1128.36±20.33 ^{Dd}
	15	51.70±1.43 ^{Bc}	1115.52±22.28 ^{Bc}	34.09±0.81 ^{Bd}	47.15±1.00 ^{Bc}	1248.46±25.45 ^{Bc}
	30	53.85±1.21 ^{Bbc}	1161.42±24.93 ^{Bb}	37.37±0.89 ^{Chc}	49.14±0.99 ^{Bbc}	1301.78±26.03 ^{Bb}
	60	58.78±0.76 ^{Ca}	1217.60±29.71 ^{ABa}	41.89±0.84 ^{Ba}	54.81±5.08 ^{Aa}	1373.08±32.27 ^{Bab}
	90	56.23±0.89 ^{ABab}	1200.74±34.12 ^{Ab}	38.70±1.26 ^{Bb}	50.49±0.74 ^{Babc}	1346.17±36.98 ^{Ab}
	120	54.21±1.11 ^{ABbc}	1196.97±21.1 ^{Bab}	37.37±0.88 ^{ABbc}	49.76±0.42 ^{CDbc}	1338.32±23.47 ^{Ba}
120	CK	56.42±2.67 ^{Db}	982.17±13.12 ^{Ed}	36.02±1.80 ^{Cc}	53.75±2.83 ^{Aa}	1128.36±20.33 ^{Ed}
	15	51.13±1.17 ^{Bd}	1248.05±19.27 ^{Aa}	37.34±0.69 ^{Ac}	48.63±0.50 ^{Bd}	1385.15±21.56 ^{Aa}
	30	55.45±0.69 ^{ABbc}	1253.25±32.48 ^{Aa}	44.17±0.93 ^{Ab}	49.65±0.38 ^{Bcd}	1402.53±34.43 ^{Aa}
	60	60.59±0.51 ^{BCa}	1260.56±26.48 ^{Aa}	52.47±0.87 ^{Aa}	50.89±0.60 ^{ABcd}	1424.51±28.41 ^{Aa}
	90	57.61±1.09 ^{Ab}	1176.48±35.74 ^{Ab}	43.15±1.23 ^{Ab}	51.47±0.62 ^{ABabc}	1328.71±38.58 ^{Ab}
	120	53.78±1.02 ^{Bc}	1117.48±30.24 ^{Cc}	36.91±1.03 ^{ABc}	52.42±0.54 ^{ABab}	1260.59±32.78 ^{Cc}
130	CK	56.42±2.67 ^{Ab}	982.17±13.12 ^{Cc}	36.02±1.80 ^{BCde}	53.75±2.83 ^{Aa}	1128.36±20.33 ^{Cd}
	15	52.14±0.85 ^{Bc}	1114.43±19.73 ^{Bab}	33.20±0.79 ^{BCe}	47.70±0.65 ^{Bc}	1247.48±21.86 ^{Bbc}
	30	56.40±0.49 ^{ABb}	1126.11±28.21 ^{BCab}	41.57±1.02 ^{Bc}	49.13±0.67 ^{Bbc}	1273.2±30.39 ^{BCab}
	60	61.59±0.33 ^{ABa}	1142.71±21.58 ^{Ca}	52.38±0.96 ^{Aa}	50.91±0.6 ^{Ab}	1307.59±23.46 ^{Ca}
	90	56.88±0.65 ^{Ab}	1100.18±36.46 ^{Bab}	44.73±3.04 ^{Ab}	50.52±0.62 ^{Bb}	1252.32±38.10 ^{Bbc}
	120	51.16±0.54 ^{Cc}	1079.2±27.40 ^{CDb}	36.27±0.93 ^{ABd}	50.58±0.48 ^{BCb}	1217.21±29.29 ^{CDc}
140	CK	56.42±2.67 ^{Ab}	982.17±13.12 ^{Ec}	36.02±1.80 ^{Bde}	53.75±2.83 ^{Aa}	1128.36±20.33 ^{Ec}
	15	53.41±0.52 ^{Bc}	1009.90±20.98 ^{Chc}	30.27±0.78 ^{De}	47.03±0.84 ^{Bc}	1140.61±23.07 ^{Chc}
	30	57.54±0.33 ^{Ab}	1024.89±21.30 ^{Dab}	39.68±1.37 ^{Bc}	48.79±0.87 ^{Bb}	1170.90±23.83 ^{Dab}
	60	62.91±0.23 ^{Aa}	1043.41±16.63 ^{Dab}	52.34±1.10 ^{Aa}	50.94±0.63 ^{Ab}	1209.61±18.57 ^{Da}
	90	56.38±0.33 ^{Ab}	1047.46±22.43 ^{Bab}	43.05±0.71 ^{Ab}	49.81±0.68 ^{Bb}	1196.71±24.12 ^{Ba}
	120	49.17±0.43 ^{Cd}	1053.75±24.18 ^{Da}	35.81±0.86 ^{Bd}	49.03±0.47 ^{CDbc}	1187.77±25.90 ^{Da}

注:CK表示未烘烤样品,小写字母表示同一温度不同烘烤时间具有显著性差异,大写字母表示同一时间不同烘烤温度具有显著性差异($P<0.05$);表2、表3同。

一种具有很强生物活性的天然抗氧化剂,常见于海洋生物和植物油中,可防止脂质氧化^[23]。烘烤核桃中角鲨烯含量如图 1 所示,结果表明,对照样品含量为 5.72 mg/kg;核桃在烘烤过程中角鲨烯含量整体降低,对照样品中含量最高;表明高温处理降低了核桃

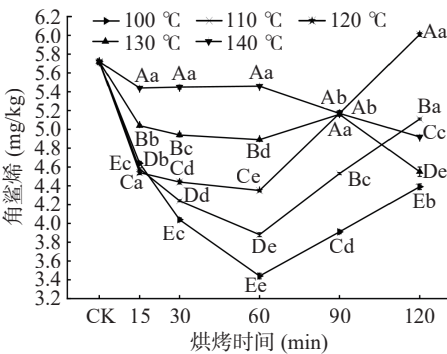


图 1 烘烤时间和温度对带壳核桃角鲨烯含量的影响
Fig.1 Effect of roasting time and temperature on squalene content of shelled walnut

注:CK表示未烘烤样品,小写字母表示同一温度不同烘烤时间具有显著性差异,大写字母表示同一时间不同烘烤温度具有显著性差异($P<0.05$)。

中角鲨烯含量,100℃烘烤60min角鲨烯含量最低(3.44 mg/kg),较对照样品降低了39.9%,而有研究报道关于苋菜在150℃、20min下烘烤处理的样品中,角鲨烯损失约12%^[24],相比于苋菜的研究结果,核桃烘烤后角鲨烯损失含量更多。而120℃烘烤120min角鲨烯含量最高(6.01 mg/kg),表明适当的热处理能增加角鲨烯的含量,这可能归因于油体细胞膜破坏导致脂肪和脂溶性化合物的释放^[25]。

2.1.3 烘烤过程核桃生育酚含量的变化 不同烘烤条件下生育酚含量如表 2 所示,核桃中含有四种生育酚: α -生育酚(29.31~58.53 mg/kg)、 β -生育酚(14.73~18.62 mg/kg)、 γ -生育酚(301.69~346.90 mg/kg)和 δ -生育酚(88.72~99.10 mg/kg)。在本研究中,烘烤会使核桃生育酚含量增加,烘烤的温度和时间对生育酚含量均有显著性影响。有研究结果也表明核桃中生育酚含量的变化与烘烤温度和处理时间有关^[26-27]。除130℃15min和140℃15min的样品之外,其余样品中的 α -生育酚含量均高于对照样品,尤其是140℃烘烤60、90min后的核桃,其 α -生育酚含量显著高于对照样品($P<0.05$)。此外,在140℃

表 2 不同烘烤条件下生育酚含量(mg/kg)的比较

Table 2 Comparison of tocopherol content (mg/kg) during various roasting conditions

烘烤温度(℃)	烘烤时间(min)	α -生育酚	β -生育酚	γ -生育酚	δ -生育酚	总生育酚
100	CK	30.82±1.44 ^{Ce}	15.65±0.65 ^{ABc}	301.69±2.94 ^{Ed}	88.72±0.26 ^{Ed}	436.88±5.12 ^{Dd}
	15	34.68±0.79 ^{Abc}	14.84±0.52 ^{Cd}	339.83±1.18 ^{Aa}	95.91±0.17 ^{Abc}	485.26±2.44 ^{Aa}
	30	33.67±0.70 ^{Ccd}	15.46±0.39 ^{Dcd}	331.51±0.67 ^{Cb}	96.31±0.29 ^{Aab}	476.94±1.80 ^{Bb}
	60	32.76±0.30 ^{Dd}	16.31±0.15 ^{Cab}	321.18±0.24 ^{Dc}	96.64±0.20 ^{Ba}	466.90±0.87 ^{Cc}
	90	35.88±0.25 ^{Db}	16.43±0.22 ^{ABa}	318.39±1.95 ^{Dc}	96.23±0.58 ^{BCabc}	466.94±2.68 ^{Bc}
	120	39.85±1.17 ^{Ba}	16.55±0.13 ^{Aa}	318.04±1.70 ^{Dc}	95.66±0.32 ^{BCc}	470.10±3.21 ^{Cc}
110	CK	30.82±1.44 ^{Dd}	15.65±0.65 ^{CDa}	301.69±2.94 ^{Dd}	88.72±0.26 ^{Bd}	436.88±5.12 ^{Cc}
	15	33.13±0.26 ^{Bbc}	15.15±0.70 ^{BCa}	333.78±0.71 ^{Ba}	94.56±0.57 ^{BCc}	476.63±2.11 ^{Ba}
	30	32.74±0.25 ^{Cbc}	15.25±0.38 ^{Da}	329.96±0.89 ^{Cb}	95.84±0.33 ^{Ab}	473.78±1.34 ^{Bab}
	60	32.09±0.56 ^{DEc}	15.67±0.35 ^{Da}	325.01±0.30 ^{Cc}	97.12±0.20 ^{Aa}	469.89±0.49 ^{Cb}
	90	33.78±0.14 ^{Eab}	15.73±0.37 ^{Ca}	324.75±0.51 ^{Cc}	96.10±0.71 ^{Cb}	470.36±0.31 ^{Bb}
	120	34.56±0.06 ^{Ca}	15.91±0.34 ^{ABa}	324.74±1.10 ^{Cc}	94.82±0.87 ^{Cc}	470.04±1.01 ^{Cb}
120	CK	30.82±1.44 ^{Ef}	15.65±0.65 ^{Dbc}	301.69±2.94 ^{Ed}	88.72±0.26 ^{Cd}	436.88±5.12 ^{De}
	15	32.33±0.87 ^{Be}	15.89±0.06 ^{ABb}	328.67±1.39 ^{Dc}	93.50±0.27 ^{Dc}	470.39±2.38 ^{Cd}
	30	38.25±0.18 ^{Bc}	16.17±0.10 ^{BCab}	340.40±0.43 ^{Ab}	95.63±0.39 ^{Ab}	490.46±1.00 ^{Ac}
	60	46.17±0.16 ^{Ca}	16.67±0.15 ^{Ca}	344.71±1.12 ^{Aa}	98.22±0.69 ^{Aa}	505.77±2.07 ^{Aa}
	90	42.24±1.03 ^{Cb}	16.10±0.12 ^{BCb}	345.57±1.08 ^{Aa}	95.68±0.41 ^{Cb}	499.58±2.54 ^{Ab}
	120	36.29±0.23 ^{Cd}	15.23±0.22 ^{BCc}	346.90±1.16 ^{Aa}	93.37±0.69 ^{Dc}	491.80±2.30 ^{Ac}
130	CK	30.82±1.44 ^{Fd}	15.65±0.65 ^{Ccd}	301.69±2.94 ^{Ec}	88.72±0.26 ^{Dd}	436.88±5.12 ^{Ce}
	15	30.18±0.23 ^{CDd}	16.02±0.18 ^{ABbc}	330.73±0.91 ^{CDb}	94.26±0.32 ^{Cc}	471.19±1.31 ^{Cd}
	30	39.28±0.43 ^{Bc}	16.67±0.21 ^{Bb}	333.12±0.56 ^{Ba}	96.08±0.74 ^{Ab}	487.82±0.50 ^{Ac}
	60	50.40±1.52 ^{Bb}	17.66±0.24 ^{Ba}	334.14±1.08 ^{Ba}	98.00±0.89 ^{Aa}	500.20±1.33 ^{Bb}
	90	48.30±1.39 ^{Bb}	16.51±0.27 ^{ABb}	333.82±1.13 ^{Ba}	97.08±0.41 ^{Bab}	495.71±1.72 ^{Aa}
	120	41.21±1.21 ^{Bc}	14.97±0.63 ^{BCd}	335.78±0.55 ^{Ba}	96.19±0.57 ^{Bb}	488.15±1.56 ^{ABc}
140	CK	30.82±1.44 ^{De}	15.65±0.65 ^{ABcd}	301.69±2.94 ^{Ed}	88.72±0.26 ^{Ed}	436.88±5.12 ^{Dd}
	15	29.31±0.34 ^{De}	16.54±0.44 ^{Abc}	333.14±0.76 ^{BCa}	95.07±0.30 ^{Bc}	474.05±1.76 ^{BCc}
	30	41.44±0.90 ^{Ad}	17.54±0.33 ^{Ab}	330.05±0.99 ^{Cb}	96.56±1.10 ^{Ab}	485.59±3.04 ^{Ab}
	60	58.53±0.90 ^{Aa}	18.62±0.13 ^{Aa}	324.86±0.94 ^{Cc}	97.87±1.01 ^{Aa}	499.89±2.40 ^{Ba}
	90	56.31±0.82 ^{Ab}	16.78±0.21 ^{Ab}	324.98±1.09 ^{Cc}	98.48±0.37 ^{Aa}	496.55±2.00 ^{Aa}
	120	46.15±1.13 ^{Ac}	14.73±1.01 ^{Cd}	325.37±0.15 ^{Cc}	99.10±0.56 ^{Aa}	485.35±2.70 ^{Bb}

烘烤 60 min 的核桃中, β -生育酚含量显著高于其他核桃样品($P<0.05$), 较于对照样品增加了 18.98%。生育酚中含量最高的是 γ -生育酚, 其含量占总生育酚的 60% 以上, 其次是 δ -生育酚; 核桃中 γ -生育酚和 δ -生育酚含量超过 85%。在 120 ℃ 烘烤下样品中 γ -生育酚的含量(除 15 min)相对于对照样品增加了 12.83%~14.99%; 烘烤后的样品 γ -生育酚和 δ -生育酚含量均高于对照样品。此前有研究报道了生育酚在脂质系统中的抗氧化活性顺序为: $\gamma>\delta>\alpha>\beta$ ^[28]。因此, 高比例的 γ -生育酚和 δ -生育酚有助于核桃的抗氧化性能。

对照样品的总生育酚含量(436.88 mg/kg)最低; 在 100、110 ℃ 下, 其含量随着时间的增加而总体呈现下降趋势, 而 120、130、140 ℃ 下烘烤其含量随时间延长总体升高, 并在 60 min 时达到最大值。总生育酚含量在 120 ℃、60 min 烘烤条件下达到最大值(505.77 mg/kg), 主要是因为烘烤过程中所施加的热量破坏了核桃中生育酚与蛋白质或磷脂连接的键, 进一步导致细胞损伤, 释放出生育酚, 增加了其含量^[29-30]; 但持续的高温使生育酚热降解引起含量下降^[31]。在本研究中的烘烤条件中, 烘烤样品的生育酚

含量均超过了对照样品。

2.1.4 烘烤过程核桃多酚含量的变化 不同烘烤条件下核桃中多酚的含量变化如图 2 所示。对照组的多酚含量为 27.34 mg/kg, 随着烘烤温度的升高, 多酚含量显著提高($P<0.05$); 在 120 ℃ 烘烤 60 min 达到

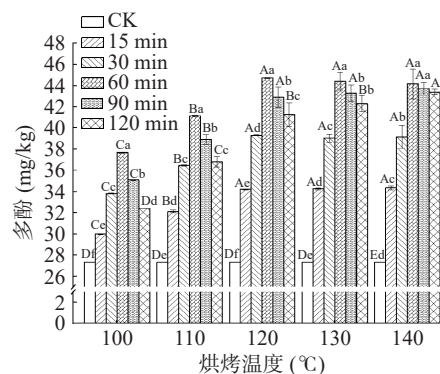


图 2 烘烤时间和温度对带壳核桃多酚含量的影响

Fig.2 Effect of roasting time and temperature on polyphenols content of shelled walnut

注: CK 表示未烘烤样品, 小写字母表示同一温度不同烘烤时间具有显著性差异, 大写字母表示同一时间不同烘烤温度具有显著性差异($P<0.05$)。

最大值 44.73 mg/kg, 相较于对照样品增加了 63.6%, 但随着烘烤温度提高和时间的延长多酚含量下降。烘烤可以使多酚从与各种细胞成分的结合中释放出来, 从而引起多酚含量的增加^[32-33]。另一方面, 核桃在烘烤过程中发生美拉德反应, 增加了脂溶性酚类化合物的含量^[20], 从而使核桃中的多酚含量大大提高。进一步烘烤导致多酚含量的降低可能是由于多酚在高温下的热降解所致^[34]。

2.2 烘烤对核桃不饱和脂肪酸含量的影响

测定 5 种脂肪酸甲酯的混标结果如图 3 所示, 从左到右依次是棕榈酸甲酯、硬脂酸甲酯、油酸甲酯、亚油酸甲酯、亚麻酸甲酯。

烘烤对核桃脂肪酸组成的影响见表 3。主要脂肪酸为亚油酸(C18:2)占 62.47%~65.61%, 其次是油酸(C18:1)(15.43%~18.24%)、亚麻酸(C18:3)(9.54%~10.03%)和棕榈酸(C16:0)(6.15%~6.51%)。烘烤后的核桃中含有 9.01%~9.58% 饱和脂肪酸(saturated fatty acid, SFA)、90.33%~90.88% 不饱和脂肪酸(unsaturated fatty acid, UFA)和 72.49%~75.36% 多不饱和脂肪酸(polyunsaturated fatty acid, PUFA); 核

桃中 UFA 占脂肪酸较高的比例, 这与之之前报道的核桃中脂肪酸的结果相似^[35-36]。统计分析表明, 烘烤温度和时间对核桃的 PUFA 含量有显著性影响, 烘烤后核桃 PUFA 含量增加。核桃中 UFA 已被广泛证明对健康有益, 其含量的增加可提高核桃的营养价值^[37-38]。核桃脂氧合酶催化含有顺, 顺-1,4-戊二烯结构的 PUFA 的氧化, 产生共轭不饱和脂肪酸氢过氧

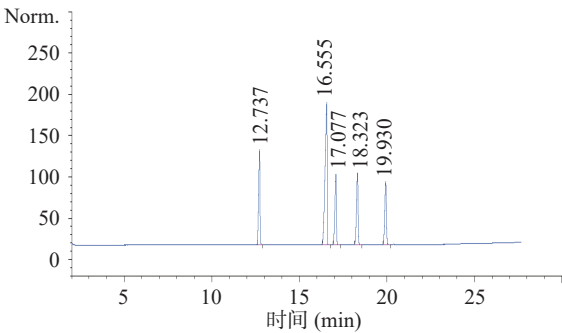


图 3 5 种脂肪酸甲酯混标气相色谱图

Fig.3 Gas chromatogram of 5 mixed fatty acids methyl esters

注: 纵坐标表示数据经过归一化处理, 消除样品量或进样量差异的影响, 将各个峰的面积或高度转换为占总量的百分比。

表 3 不同烘烤条件下脂肪酸相对含量(%)的比较

Table 3 Comparison of the relative content (%) of fatty acids during various roasting conditions									
烘烤温度(℃)	烘烤时间(min)	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	SFA	UFA	PUFA
100	CK	6.37±0.17 ^{Aa}	2.81±0.01 ^{Ca}	18.01±0.48 ^{Aab}	63.26±0.55 ^{ABbc}	9.54±0.19 ^{Cb}	9.18±0.18 ^{Aa}	90.82±0.19 ^{Aa}	72.81±0.38 ^{Bc}
	15	6.22±0.01 ^{Aa}	2.84±0.04 ^{Ca}	17.34±0.33 ^{Ab}	63.72±0.53 ^{ABb}	9.78±0.07 ^{ABa}	9.07±0.15 ^{Aa}	90.84±0.23 ^{Aa}	73.5±0.56 ^{ABbc}
	30	6.17±0.06 ^{Aa}	2.84±0.05 ^{Ba}	17.89±0.53 ^{Aab}	63.08±0.69 ^{Bbc}	9.91±0.12 ^{Aa}	9.01±0.10 ^{Aa}	90.88±0.28 ^{Aa}	72.99±0.77 ^{ABbc}
	60	6.15±0.13 ^{Aa}	3.09±0.23 ^{Aab}	18.24±0.34 ^{Aa}	62.47±0.52 ^{Cc}	10.01±0.19 ^{Aa}	9.25±0.36 ^{Aa}	90.73±0.37 ^{Aa}	72.49±0.70 ^{Cc}
	90	6.25±0.24 ^{Aa}	3.14±0.13 ^{Aab}	16.17±0.60 ^{Cc}	64.27±0.54 ^{ABab}	9.96±0.08 ^{Aa}	9.38±0.37 ^{Aa}	90.41±0.66 ^{Aa}	74.24±0.62 ^{ABab}
	120	6.27±0.26 ^{Aa}	3.22±0.36 ^{Ab}	15.59±0.38 ^{Bc}	65.01±0.95 ^{Aa}	9.91±0.08 ^{Aa}	9.48±0.62 ^{Aa}	90.51±0.61 ^{Aa}	74.92±0.98 ^{Aa}
110	CK	6.37±0.17 ^{Aa}	2.81±0.01 ^{Ba}	18.01±0.48 ^{Aa}	63.26±0.55 ^{ABb}	9.54±0.19 ^{Bc}	9.18±0.18 ^{Aa}	90.82±0.19 ^{Aa}	72.81±0.38 ^{Bb}
	15	6.36±0.24 ^{Aa}	2.82±0.03 ^{Ca}	16.98±0.85 ^{Aab}	63.95±0.51 ^{ABb}	9.74±0.07 ^{ABbc}	9.19±0.24 ^{Aa}	90.66±0.38 ^{Aa}	73.68±0.58 ^{ABb}
	30	6.32±0.35 ^{Aa}	2.84±0.04 ^{Bab}	17.60±1.09 ^{Aa}	63.39±0.46 ^{ABb}	9.84±0.07 ^{Aab}	9.16±0.67 ^{Aa}	90.83±0.68 ^{Aa}	73.24±0.54 ^{ABb}
	60	6.28±0.44 ^{Aa}	2.88±0.04 ^{Bab}	17.74±0.80 ^{ABa}	63.08±0.56 ^{BCb}	9.98±0.12 ^{Aa}	9.15±0.47 ^{Aa}	90.80±0.55 ^{Aa}	73.06±0.56 ^{BCb}
	90	6.30±0.28 ^{Aa}	2.89±0.01 ^{BCb}	16.03±0.37 ^{Cbc}	64.84±0.58 ^{Aa}	9.88±0.10 ^{Aab}	9.20±0.29 ^{Aa}	90.75±0.37 ^{Aa}	74.72±0.57 ^{Aa}
	120	6.31±0.16 ^{Aa}	2.90±0.01 ^{Bb}	15.43±0.32 ^{Bc}	65.61±0.17 ^{Aa}	9.74±0.08 ^{ABbc}	9.21±0.18 ^{Aa}	90.79±0.18 ^{Aa}	75.36±0.24 ^{Aa}
120	CK	6.37±0.17 ^{Aa}	2.81±0.01 ^{Bd}	18.01±0.48 ^{Aab}	63.26±0.55 ^{BCbc}	9.54±0.19 ^{Bd}	9.18±0.18 ^{Aa}	90.82±0.19 ^{Aa}	72.81±0.38 ^{Cc}
	15	6.29±0.59 ^{Aa}	3.03±0.06 ^{Aa}	16.77±1.05 ^{Ab}	64.17±0.48 ^{Aa}	9.72±0.04 ^{Bc}	9.33±0.64 ^{Aa}	90.67±0.64 ^{Aa}	73.90±0.47 ^{Aa}
	30	6.33±0.50 ^{Aa}	2.96±0.01 ^{Ab}	16.89±0.75 ^{Aab}	63.81±0.13 ^{ABab}	9.84±0.03 ^{Abc}	9.29±0.51 ^{Aa}	90.55±0.65 ^{Aa}	73.66±0.12 ^{ABab}
	60	6.38±0.57 ^{Aa}	2.89±0.01 ^{Bc}	17.00±0.68 ^{BCab}	63.66±0.08 ^{ABab}	10.01±0.03 ^{Aa}	9.28±0.58 ^{Aa}	90.67±0.63 ^{Aa}	73.67±0.08 ^{ABab}
	90	6.39±0.16 ^{Aa}	2.90±0.01 ^{BCc}	17.53±0.20 ^{ABab}	63.27±0.27 ^{Cbc}	9.89±0.07 ^{Aab}	9.29±0.17 ^{Aa}	90.70±0.19 ^{Aa}	73.17±0.27 ^{Cbc}
	120	6.47±0.29 ^{Aa}	2.91±0.02 ^{Bbc}	18.08±0.44 ^{Aa}	62.82±0.57 ^{Bc}	9.70±0.03 ^{BCc}	9.38±0.31 ^{Aa}	90.61±0.32 ^{Aa}	72.53±0.58 ^{Bc}
130	CK	6.37±0.17 ^{Aa}	2.81±0.01 ^{Cc}	18.01±0.48 ^{Aa}	63.26±0.55 ^{Cb}	9.54±0.19 ^{Bc}	9.18±0.18 ^{Ab}	90.82±0.19 ^{Aa}	72.81±0.38 ^{Cc}
	15	6.46±0.29 ^{Aa}	2.96±0.02 ^{Bb}	17.12±0.54 ^{Abc}	63.64±0.29 ^{ABab}	9.81±0.07 ^{ABab}	9.42±0.31 ^{Aab}	90.57±0.32 ^{Aa}	73.45±0.26 ^{ABab}
	30	6.45±0.18 ^{Aa}	2.94±0.03 ^{Ab}	16.75±0.25 ^{Acd}	64.01±0.32 ^{Aab}	9.83±0.04 ^{Aab}	9.39±0.19 ^{Aab}	90.60±0.20 ^{Aa}	73.85±0.32 ^{Aa}
	60	6.44±0.24 ^{Aa}	3.14±0.01 ^{Aa}	16.34±0.22 ^{Cd}	64.19±0.45 ^{Aa}	9.87±0.05 ^{Aa}	9.58±0.24 ^{Aa}	90.41±0.24 ^{Aa}	74.07±0.44 ^{Aa}
	90	6.43±0.05 ^{Aa}	2.79±0.04 ^{Ccd}	17.25±0.22 ^{Bbc}	63.76±0.20 ^{BCab}	9.77±0.06 ^{Aab}	9.21±0.12 ^{Aab}	90.78±0.12 ^{Aa}	73.53±0.24 ^{BCab}
	120	6.42±0.02 ^{Aa}	2.72±0.02 ^{Bd}	17.58±0.28 ^{Aab}	63.43±0.39 ^{Bb}	9.69±0.06 ^{BCbc}	9.13±0.04 ^{Ab}	90.70±0.19 ^{Aa}	73.12±0.38 ^{Bbc}
140	CK	6.37±0.17 ^{Aa}	2.81±0.01 ^{Bd}	18.01±0.48 ^{Aa}	63.26±0.55 ^{Bab}	9.54±0.19 ^{Cc}	9.18±0.18 ^{Aa}	90.82±0.19 ^{Aa}	72.81±0.38 ^{Bbc}
	15	6.51±0.55 ^{Aa}	2.92±0.02 ^{Bc}	17.46±0.14 ^{Aab}	63.13±0.72 ^{Bab}	9.92±0.08 ^{Aa}	9.44±0.55 ^{Aa}	90.51±0.58 ^{Aa}	73.04±0.70 ^{ABbc}
	30	6.48±0.27 ^{Aa}	2.96±0.02 ^{Aab}	16.98±0.50 ^{Abc}	63.54±0.32 ^{ABab}	9.97±0.11 ^{Aa}	9.44±0.29 ^{Aa}	90.50±0.30 ^{Aa}	73.52±0.30 ^{ABab}
	60	6.45±0.15 ^{Aa}	2.99±0.01 ^{ABa}	16.44±0.39 ^{Cc}	63.86±0.23 ^{ABa}	10.03±0.12 ^{Aa}	9.43±0.14 ^{Aa}	90.33±0.38 ^{Aa}	73.88±0.22 ^{ABac}
	90	6.42±0.30 ^{Aa}	2.95±0.01 ^{Bab}	17.45±0.16 ^{ABab}	63.34±0.45 ^{Cab}	9.83±0.02 ^{Aab}	9.37±0.31 ^{Aa}	90.62±0.31 ^{Aa}	73.16±0.47 ^{Cabc}
	120	6.41±0.18 ^{Aa}	2.93±0.02 ^{Bbc}	17.89±0.54 ^{Aa}	62.87±0.15 ^{Bb}	9.65±0.07 ^{BCbc}	9.35±0.19 ^{Aa}	90.41±0.42 ^{Aa}	72.52±0.21 ^{Bc}

注: SFA、UFA、PUFA 分别代表饱和脂肪酸、不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸。

化物,而烘烤过程中,可能是由于脂氧合酶的失活使亚油酸相对含量增加^[39-40]。110 ℃ 烘烤 120 min 的样品亚油酸含量最高,而油酸含量最低。烘烤温度为 120 ℃ 时,油酸含量随着烘烤时间的延长而增加,与亚油酸结果相反。C18:1 和 C18:2 脂肪酸之和占总脂肪酸含量的 80% 以上。烘烤核桃未改变脂肪酸的组成,只使烘烤前后的含量略有差异。结果分析表明,焙烧条件对核桃油脂脂肪酸含量有影响,对脂肪酸组成没有明显差异,本结果与 GAO 等^[20] 烘烤核桃仁的脂肪酸组成结果相似,都没有显著差异。此外, ALEKSANDER 等^[41] 比较了不同烘烤温度和烘烤时间下的菜籽,他们发现脂肪酸含量也没有显著变化。也有报道称紫苏^[42] 在同一烘烤温度下随着烘烤时间的增加,检测到 SFA 含量整体略有增加,这与本研究结果一致。

2.3 烘烤对核桃氧化指标的影响

烘烤温度和时间对核桃酸价和过氧化值的影响如图 4 所示。酸价作为游离脂肪酸含量的标志,是评价油脂质量的重要指标,主要反映油脂酸败程度^[43]。酸价越小,说明油脂质量越好。在烘烤过程中,核桃中脂肪酸发生氧化和降解。酸价研究结果表明,在烘烤过程中,核桃的酸价整体增加,范围为 0.31~0.51 mg KOH/g (图 4a)。根据 CAC 规定,初榨油的酸价不应超过 4 mg KOH/g,而本文所得酸价数值均低于该规定范围。酸价上升与烘烤温度和时间的增加有关;热处理加快了核桃中甘油三酯水解成游离脂肪酸的进程,进一步加速了油脂的酸败进程^[44-45]。

烘烤时间和温度对核桃中过氧化值的影响如图 4b~f 所示。过氧化值反映了油脂中一次氧化产物的含量,这些产物是不饱和酯类氧化过程中形成

的^[43]。根据 CAC 规定,初榨油的过氧化值不应超过 7.5 mmol/kg,而本研究未烘烤核桃样品的过氧化值为 1.17 mmol/kg,烘烤后的样品过氧化值为 1.14~5.43 mmol/kg,所有数据均低于限定值。在 100、110 和 120 ℃ 时,过氧化值随着烘烤时间的延长呈现先降后增的趋势,但都低于对照组,表明较低烘烤温度下核桃仅生成少量过氧化物和氢过氧化物,脂质氧化程度较低^[46]。在 130、140 ℃ 时,过氧化值随时间增加递增并在 140 ℃、120 min 达最大值(5.43 mmol/kg),表明高温烘烤产生了大量氢过氧化物,导致过氧化值增加。在之前的一项研究中,‘香玲’核桃仁经过烘烤后的过氧化值也有类似变化^[20]。

2.4 烘烤对核桃抗氧化活性的影响

采用四种方法(DPPH、FRAP、ABTS、ORAC)测定核桃自由基清除能力,结果如图 5 所示。DPPH 结果的变化范围为 363.97~463.75 $\mu\text{mol TE/kg}$;在 FRAP 测定中,结果范围为 46.82~61.29 $\mu\text{mol TE/kg}$;对于 ABTS,结果在 35.92~74.14 $\mu\text{mol TE/kg}$ 之间;而 ORAC 的值在 947.53~2556.42 $\mu\text{mol TE/kg}$ 之间。

统计分析表明,烘烤使核桃抗氧化活性水平有统计学差异($P<0.05$)。对照样品的 DPPH、FRAP 和 ORAC 检测值较低,而 ABTS 检测值最高。与对照组相比,在 100~140 ℃ 烘烤 30~120 min 后 DPPH、FRAP 和 ORAC 检测结果明显增加;相反,在相同烘烤时间下,ABTS⁺自由基清除能力随温度升高而显著降低,但较高烘烤温度(120~140 ℃)其变化不明显;GAO 等^[20] 报道了核桃仁在不同烘烤温度和时间下的抗氧化能力,其研究结果与本研究 ABTS⁺自由基清除能力结果一致。在相同烘烤温度下,FRAP 自由基清除能力随着烘烤时间的延长而呈现上升趋势,但

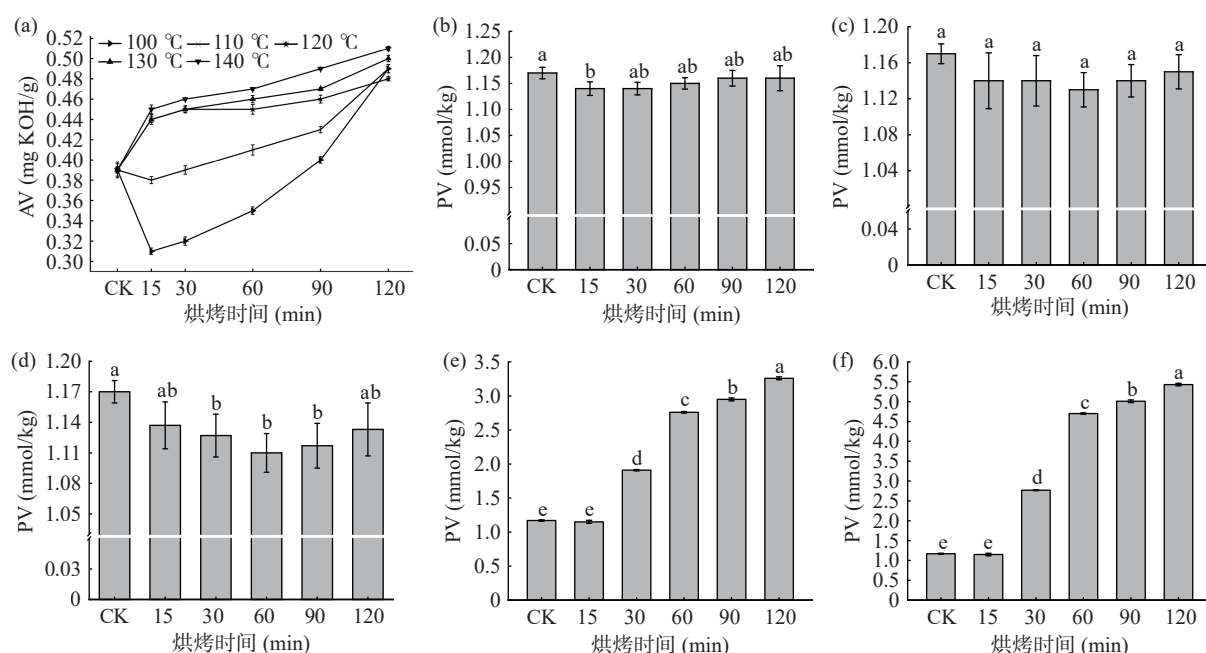


图 4 烘烤时间和温度对核桃酸价(AV)和过氧化值(PV)的影响

Fig. 4 Effect of roasting time and temperature on the acid value (AV) and the peroxide value (PV) of walnut

注: a: 酸价, b~f 分别代表 100、110、120、130、140 ℃ 过氧化值; 小写字母表示同一温度不同烘烤时间显著性差异($P<0.05$)。

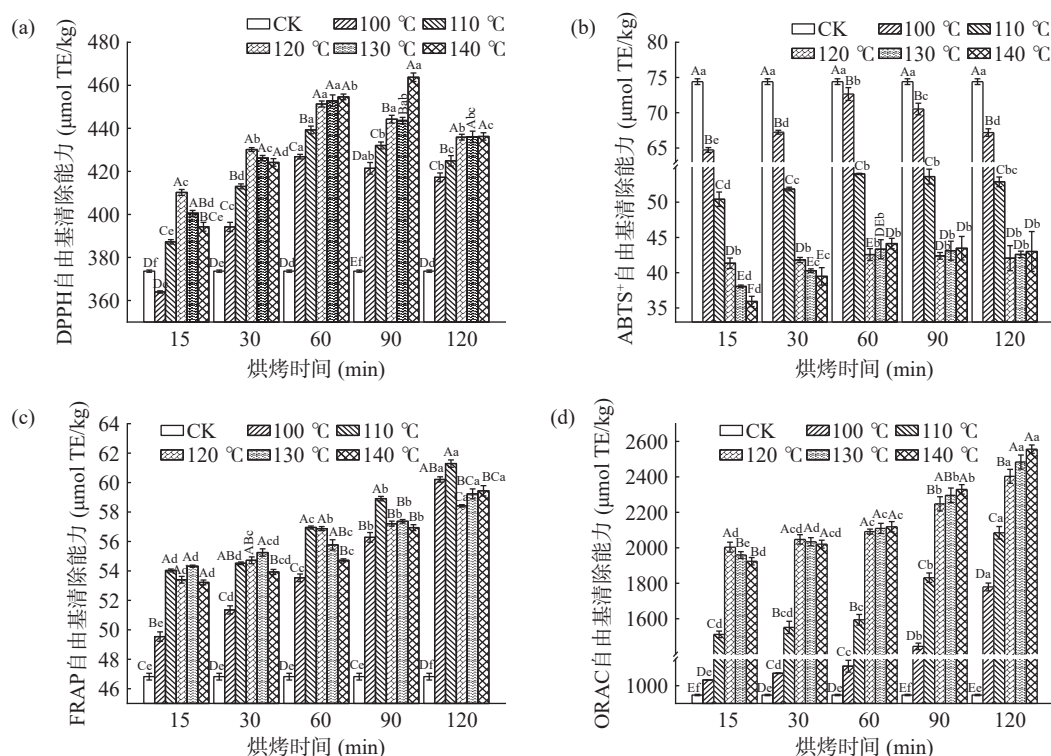


图 5 烘烤时间和温度对核桃自由基清除能力的影响

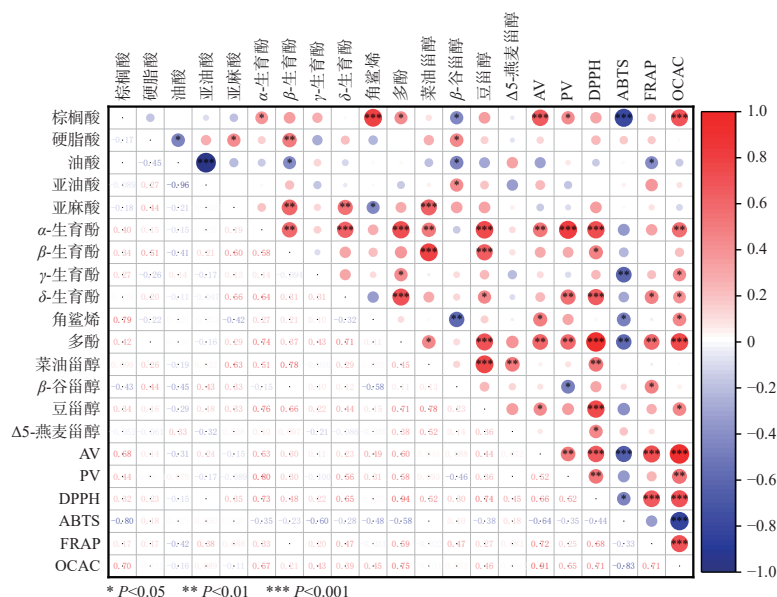
Fig.5 Effect of roasting time and temperature on free radical-scavenging capacity of walnut

注: a-d 分别代表 DPPH、ABTS、FRAP 和 ORAC 自由基清除能力, 相同柱形上不同小写字母表示同一烘烤温度下不同时间的显著性差异 ($P < 0.05$), 大写字母表示同一烘烤时间下不同温度的显著性差异 ($P < 0.05$)。

在同一烘烤时间下随着烘烤温度上升整体呈现先增后减的趋势; 温度和时间增加, 提高了核桃 ORAC 自由基清除能力。自由基清除能力(除 ABTS⁺自由基清除能力)结果表明, 烘烤有效提高核桃的抗氧化能力。这可能是因为高温焙烧破坏了细胞基质中的化学键, 有助于天然抗氧化化合物的热降解、释放^[32-33]。

核桃中生育酚和多酚等天然抗氧化剂含量的增

加影响了核桃总抗氧化能力。如图 6 相关分析表明, 多酚与自由基清除率(ABTS 除外)显著相关(r 为 0.59~0.94, $P < 0.01$)。 α -生育酚与 DPPH 自由基清除率极显著相关(r 为 0.73, $P < 0.001$)。氧化过程中, 生育酚作为一种良好的自由基清除剂, 为自由基提供一个氢原子, 形成稳定的奎宁或两个二聚体, 从而终止了自动氧化过程中的链式反应, 保证油的稳定性^[47]。



* $P < 0.05$ ** $P < 0.01$ *** $P < 0.001$

图 6 各成分之间的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis among components

2.5 PCA 分析

由于各指标之间的度量单位不同,测得的对应数据取值范围差异大,因此首先需要将数据进行标准化,运用 SPSS 软件对不同烘烤条件下带壳核桃的内源性组分、不饱和脂肪酸、理化指标以及自由基清除能力进行主成分分析。如表 4 和表 5 所示,将各指标转化为 4 个独立的主成分,累计贡献率为 76.394%。而载荷值反映了主成分和各个变量之间的相关系数。主成分 1 贡献率为 34.776%,主要表现为 α -生育酚、多酚、DPPH 和 ORAC 自由基清除能力的正载荷。主成分 2 贡献率为 18.479%,主要贡献成分为硬脂酸、亚麻酸和角鲨烯;与角鲨烯呈负相关。主成分 3 贡献率为 12.894%,主要反映了油酸和亚油酸的变异信息;与亚油酸呈负相关。主成分 4 贡献率为 10.245%,主要反映了 β -生育酚、 γ -生育酚和角鲨烯的变异信息;与 γ -生育酚呈负相关。

表 4 主成分的特征值以及贡献率
Table 4 Eigenvalues of the principal components and the contribution

主成分	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
PC1	7.303	34.776	34.776
PC2	3.881	18.479	53.255
PC3	2.708	12.894	66.149
PC4	2.151	10.245	76.394

表 5 主成分载荷
Table 5 Principal component loading matrix

指标	X_n	主成分			
		1	2	3	4
棕榈酸	X_1	0.081	-0.16	-0.031	0.145
硬脂酸	X_2	0.024	0.163	-0.061	0.107
油酸	X_3	-0.036	-0.133	0.258	-0.161
亚油酸	X_4	0.015	0.107	-0.283	0.143
亚麻酸	X_5	0.039	0.177	0.110	-0.026
α -生育酚	X_6	0.114	0.002	0.081	0.081
β -生育酚	X_7	0.082	0.100	0.068	0.273
γ -生育酚	X_8	0.044	-0.064	-0.018	-0.235
δ -生育酚	X_9	0.087	0.071	0.064	-0.176
角鲨烯	X_{10}	0.042	-0.174	-0.034	0.253
多酚	X_{11}	0.124	-0.004	0.085	-0.148
菜油甾醇	X_{12}	0.067	0.132	0.182	0.164
β -谷甾醇	X_{13}	0.013	0.18	-0.142	-0.191
豆甾醇	X_{14}	0.109	0.068	0.072	0.078
Δ^5 -燕麦甾醇	X_{15}	0.025	0.039	0.202	-0.039
AV	X_{16}	0.107	-0.067	-0.149	0.025
PV	X_{17}	0.087	-0.082	0.076	0.059
DPPH自由基清除能力	X_{18}	0.124	0.05	0.047	-0.102
ABTS ⁺ 自由基清除能力	X_{19}	-0.091	0.126	0.073	0.049
FRAP自由基清除能力	X_{20}	0.084	0.033	-0.182	-0.193
ORAC自由基清除能力	X_{21}	0.115	-0.095	-0.116	-0.084

主成分的累积方差贡献率基本上包含了核桃质量的大部分信息,可用于综合质量评价和分类。采用 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 和 Y_4 4 个主成分及其方差贡献率构

建核桃质量指数综合评分模型。因变量 Z 是 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 和 Y_4 的线性组合,表示为: $Z=34.776Y_1+18.479Y_2+12.894Y_3+10.245Y_4$ 。根据主成分载荷和特征值计算所得的综合得分如表 6 所示,分数越高,核桃质量越好。研究结果表明不同条件下制得的核桃脂肪酸成分、内源性功能组分和抗氧化能力存在显著差异,反映出其质量评价模型得分存在差异。从排名来看,在 140 °C 下烘烤 60 min 后所制得的样品综合得分 Z 为 53.09,在各组中分值最高,表明该样品的整体质量最佳。

表 6 不同烘烤条件下带壳核桃的内源性组分、不饱和脂肪酸、理化性质和自由基清除能力的 PCA 得分
Table 6 PCA score of endogenous fractions, unsaturated fatty acids, physicochemical properties and free radical-scavenging capacity of shelled walnuts during various roasting conditions

烘烤温度 (°C)	烘烤时间 (min)	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Z	排名
CK		-0.74	-0.55	0.76	1.44	-11.47	17
	15	-0.68	-0.19	0.14	0.01	-25.18	25
	30	-0.56	0.21	0.71	-0.44	-10.96	16
100	60	-0.37	0.82	1.21	-0.63	11.49	6
	90	-0.22	0.92	-0.29	0.13	6.97	9
	120	-0.04	0.92	-1.2	0.44	4.58	10
	15	-0.4	-0.28	-0.44	-0.16	-26.5	26
	30	-0.26	-0.02	0.13	-0.57	-13.6	19
110	60	-0.03	0.5	0.8	-0.82	10.15	7
	90	-0.01	0.43	-0.59	-0.14	-1.46	14
	120	0.03	0.21	-1.38	0.19	-10.84	15
	15	-0.21	0.03	-0.77	-0.17	-18.22	22
	30	0.09	0.18	-0.24	-0.43	-1.07	13
120	60	0.43	0.47	0.35	-0.48	23.11	3
	90	0.26	-0.12	0.23	-0.53	4.35	12
	120	0.12	-0.81	-0.01	-0.65	-17.58	21
	15	-0.17	-0.4	-0.51	0.13	-18.49	23
	30	0.15	-0.09	-0.2	0.32	4.41	11
130	60	0.55	0.45	0.2	0.79	37.99	2
	90	0.36	-0.32	0.15	0.03	8.72	8
	120	0.16	-0.73	-0.21	-0.94	-20.28	24
	15	-0.15	-0.61	-0.14	0.43	-13.59	18
	30	0.23	-0.2	0.23	0.89	16.52	5
140	60	0.67	0.27	0.75	1.48	53.09	1
	90	0.51	-0.28	0.43	0.35	21.82	4
	120	0.27	-0.81	-0.11	-0.67	-13.95	20

注: Y_1 、 Y_2 、 Y_3 和 Y_4 分别代表PC1、PC2、PC3和PC4。

2.6 层次聚类分析

根据所分析的变量(脂肪酸、内源性成分、理化指标和抗氧化能力),采用 HCA 评价核桃样本之间的相似性。基于平方欧氏距离来评估样本的相似性,并采用组间联接的聚类方法对样本进行分组。结果如图 7 所示。当选取距离阈值为 25 时,聚类分析的树结构被分成两个主要部分,烘烤后的核桃和未烤过的可被清楚地区分开来。结果表明,烘烤对核桃的内源性功能组分和抗氧化能力等有显著影响。此外,以同样的烘烤时间所获得的核桃更为相似。由此可见,烘烤温度对核桃的成分和抗氧化能力影响更大。

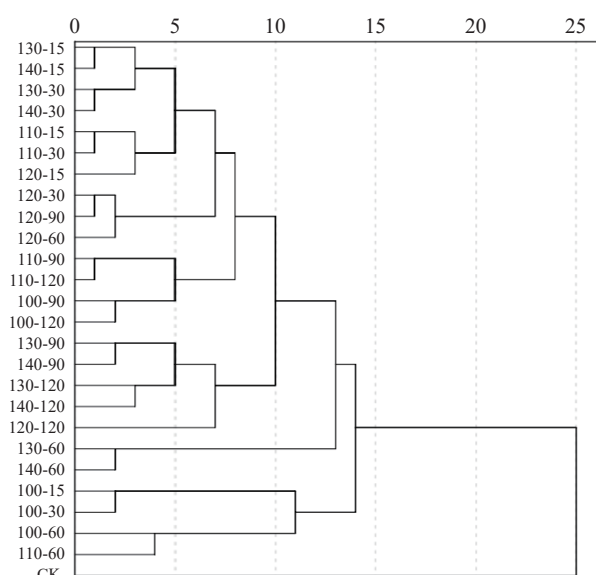


图 7 层次聚类分析

Fig.7 HCA analysis

3 结论

本文采用 5 种不同温度(100、110、120、130 和 140 ℃)对带壳核桃烘烤 15~120 min,发现烘烤导致核桃化学成分和脂肪酸组成产生差异,显著提高了核桃多酚、生育酚和植物甾醇含量($P<0.05$),而角鲨烯含量略下降。烘烤还提高了核桃自由基清除能力(除 ABTS⁺自由基清除能力)。这可能是由于生物活性化合物的增加和美拉德反应产物的形成。统计分析表明,烘烤温度和时间对带壳核桃中化学成分的变化有着决定性作用,考虑到适度烘烤可以增强带壳核桃中某些抗氧化成分的活性,可以得出烘烤是一种合适的核桃预处理方法。研究结果为带壳核桃在 140 ℃ 下烘烤 60 min,显著提高了核桃的整体质量,该结论为工业化生产烘烤带壳核桃提供理论参考。但烘烤也会影响核桃的口感及风味,接下来的研究方向将着重解决烘烤对带壳核桃香味的影响。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 任少东. 加热预处理对核桃油品质的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2017. [REN S D. Effect of heating pretreatment on walnut oil quality[D]. Aral: Tarim University, 2017.]
- [2] 李敏, 刘媛, 孙翠, 等. 核桃营养价值研究进展[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(6): 166-170. [LI M, LIU Y, SUN C, et al. Progress of research on the nutritional value of walnuts[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(6): 166-170.]
- [3] 焦盟, 钟海雁, 王丽霞, 等. 木本坚果油资源、制备及其保健功能[J]. 食品与机械, 2010, 26(1): 168-171, 175. [JIAO Z, ZHONG H Y, WANG L X, et al. Woody nut oil resources, preparation and its health functions[J]. Food & Machinery, 2010, 26(1): 168-171, 175.]

- [4] SONG H Y, CONG Z F, WANG C L, et al. Research progress on walnut oil: Bioactive compounds, health benefits, extraction methods, and medicinal uses[J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(12): 14504.
- [5] 郑雨凌. 铁核桃油组成特性及其脂质伴随物抗氧化相互作用机制研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2023. [ZHENG Y L. Studies on the compositional properties of iron walnut oil and the mechanism of antioxidant interactions of its lipid concomitants[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2023.]
- [6] SUMMAIA F, NAMRAH A, MUHAMMAD G, et al. Recent development in the application of walnut processing by-products (walnut shell and walnut husk)[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2023, 13(16): 14389-14411.
- [7] YUAN X H, ZHU X F, ZHANG L Q, et al. Fundamental insights into walnut shell bio-oil electrochemical conversion: Reaction mechanism and product properties[J]. BioEnergy Research, 2020, 14(1): 322-332.
- [8] SIMSEK M, SÜFER Ö. Infusion of walnut (*Juglans regia* L.) shell tea: Multi response optimization and antioxidant potential[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2020, 20: 100278.
- [9] SRUTHI N U, PREMJI Y, PANDISELVAM R, et al. An overview of conventional and emerging techniques of roasting: Effect on food bioactive signatures[J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129088.
- [10] ZEYNEP A Ö, KIVILCIM Y, PELIN G E, et al. Comparison of the effects of oven- and microwave-roasting on the physico-chemical properties and bioactive compounds of tomato seeds and oils[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2023, 125(10): 1438-7697.
- [11] WASZKOWIAK K, SIGER A, RUDZIŃSKA M, et al. Effect of roasting on flaxseed oil quality and stability[J]. The Journal of the American Oil Chemists' Society, 2020, 97(6): 637-649.
- [12] JANNAT B, OVEISI M R, SADEGHI N, et al. Effect of roasting process on total phenolic compounds and γ -tocopherol contents of Iranian sesame seeds (*Sesamum indicum*)[J]. Iranian Journal of Pharmaceutical Research: IJPR, 2013, 12(4): 751-758.
- [13] KASHIF G, FAHAD A J, ÜMIT G, et al. Influence of roasting on oil content, bioactive components of different walnut kernel[J]. Journal of Oleo Science, 2020, 69(5): 423-428.
- [14] 邵宇辰. 变温焙烤对山核桃品质、营养及风味的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2021. [SHAO Y C. Effect of variable temperature roasting on the quality, nutrition and flavor of pecan[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.]
- [15] 丁新杰. 精炼对大豆油和菜籽油中有益微量组分的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2015. [DING X J. Influence of refining on beneficial trace elements in soybean oil and rapeseed oil[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2015.]
- [16] 于坤, 禹晓, 程晨, 等. 制油工艺对亚麻籽油品质及脂质伴随物含量的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 233-243. [YU K, YU X, CHENG C, et al. Effects of processing techniques on the quality properties and lipid concomitants of flaxseed oil[J]. Food Science, 2020, 41(16): 233-243.]
- [17] GAO P, LIU R J, JIN Q Z, et al. Comparative study of chemical compositions and antioxidant capacities of oils obtained from two species of walnut: *Juglans regia* and *Juglans sigillata*[J]. Food Chemistry, 2018, 279: 279-287.
- [18] 赵鑫丹. 核桃内种皮抗氧化成分的提取分离及其活性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022. [ZHAO X D. Study on ex-

- traction, isolation and activity of antioxidant components from walnut kernel pellicle[D]. Xianyang: Northwest A&F University, 2022.]
- [19] YU L, WU W, PAN Y Y, et al. Quality evaluation of different varieties of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. peels based on phenolic profiles, bioactivity, and HPLC fingerprint[J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(4): 1090–1097.
- [20] GAO P, CAO Y, LIU R, et al. Phytochemical content, minor-constituent compositions, and antioxidant capacity of screw-pressed walnut oil obtained from roasted kernels[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2018, 121(1): 1800292.
- [21] ORACZ J, NEBESNY E, ZYZELEWICZ D J. Effect of roasting conditions on the fat, tocopherol, and phytosterol content and antioxidant capacity of the lipid fraction from cocoa beans of different *Theobroma cacao* L. cultivars[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2014, 116(8): 1002–1014.
- [22] ALEKSANDER S, MARTA J. The effects of roasting and seed moisture on the phenolic compound levels in cold-pressed and hot-pressed rapeseed oil[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2016, 118(12): 1952–1958.
- [23] REDDY L H, COUVREUR P. Squalene: A natural triterpene for use in disease management and therapy[J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2009, 61(15): 1412–1426.
- [24] TIKEKAR R V, LUDESCHER R D, KARWE M V. Processing stability of squalene in amaranth and antioxidant potential of amaranth extract[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(22): 10675–10678.
- [25] ÖZBEK A Z, ÇELİK K, ERGÖNÜL P, et al. A promising food waste for food fortification: Characterization of dried tomato pomace and its cold pressed oil[J]. *Journal of Food Chemistry and Nanotechnology*, 2020, 6(1): 9–17.
- [26] VUJASINOVIC V, DJILAS S, DIMIC E, et al. The effect of roasting on the chemical composition and oxidative stability of pumpkin oil[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2012, 114(5): 568–574.
- [27] SZYDŁOWSKA C A, KARLOVITS G, SOSNA S Á, et al. Effect of hydrothermal treatment of rapeseed on antioxidant capacity of the pressed rapeseed oil[J]. *The Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2009, 86(8): 817–825.
- [28] SCHMIDT S, POKORNY J. Potential application of oil seeds as sources of antioxidants for food lipids—a review[J]. *Czech Journal of Food Sciences*, 2011, 23(3): 93–102.
- [29] YOSHIDA H, TOMIYAMA Y, HIRAKAWA Y, et al. Microwave roasting effects on the oxidative stability of oils and molecular species of triacylglycerols in the kernels of pumpkin (*Cucurbita* spp.) seeds[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2006, 19(4): 330–339.
- [30] LEE Y. Chemical composition and oxidative stability of safflower oil prepared from safflower seed roasted with different temperatures[J]. *Food Chemistry*, 2004, 84(1): 1–6.
- [31] BALLUS C A, MEINHART A D, CAMPOS F A D S, et al. Total phenolics of virgin olive oils highly correlate with the hydrogen atom transfer mechanism of antioxidant capacity[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2015, 92: 843–851.
- [32] 凌彩金, 庞式. 茶花制茶工艺技术研究报告[J]. *广东茶业*, 2003(1): 12–15, 32. [LING C J, PANG S. Research report on camellia tea production technology[J]. *Guangdong Tea Industry*, 2003(1): 12–15, 32.]
- [33] 喻云春, 罗显扬, 周国兰, 等. 茶树花泡制保健酒研究初报[J]. *农技服务*, 2009, 26(11): 132, 151. [YU C Y, LUO X Y, ZHOU G L, et al. A preliminary report on the study of health wines made from *Camellia sinensis* flowers[J]. *Agricultural Technology Service*, 2009, 26(11): 132, 151.]
- [34] PELVAN E, ALASALVAR C, UZMAN S. Effects of roasting on the antioxidant status and phenolic profiles of commercial Turkish hazelnut varieties (*Corylus avellana* L.)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(5): 1218–1223.
- [35] CREWS C, HOUGH P, GODWARD J, et al. Study of the main constituents of some authentic walnut oils[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(12): 4853–4860.
- [36] SANTOS J, ALVAREZ-ORTÍ M, SENA-MORENO E, et al. Effect of roasting conditions on the composition and antioxidant properties of defatted walnut flour[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 98(5): 1813–1820.
- [37] AYO J, CARBALLO J, SERRANO J, et al. Effect of total replacement of pork backfat with walnut on the nutritional profile of frankfurters[J]. *Meat Science*, 2007, 77(2): 173–181.
- [38] RAJARAM S. Health benefits of plant-derived α -linolenic acid[J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2014, 100(1): 443S–448S.
- [39] BURANASOMPOB A, TANG J, POWERS J R, et al. Lipooxygenase activity in walnuts and almonds[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2007, 40(5): 893–899.
- [40] CASEY R, HUGHES R K. Recombinant lipoxygenases and oxylipin metabolism in relation to food quality[J]. *Food Biotechnology*, 2004, 18(2): 135–170.
- [41] ALEKSANDER S, ALEKSANDRA K, MAGDALENA R. Antioxidant activity and phytochemical content of cold-pressed rapeseed oil obtained from roasted seeds[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2015, 117(8): 1225–1237.
- [42] ZHAO T T, HONG S I, LEE J. Impact of roasting on the chemical composition and oxidative stability of perilla oil[J]. *Journal of Food Science*, 2012, 77(12): C1273–C1278.
- [43] HUANG J, CHEN C, SONG Z, et al. Effect of microwave pretreatment of perilla seeds on minor bioactive components content and oxidative stability of oil[J]. *Food Chemistry*, 2022, 388: 133010.
- [44] 孙洋, 任健, 宋春丽, 等. 制油工艺对玉米胚芽油品质特性及风味成分的作用机制[J]. *食品科学*, 2024, 45(18): 183–189. [SUN Y, REN J, SONG C L, et al. Effects of different processes on quality characteristics and flavor of corn germ oil[J]. *Food Science*, 2024, 45(18): 183–189.]
- [45] INCHINGOLO R, CARDENIA V, RODRIGUEZ-ESTRADA M T. The effects of microwave heating on edible oils and lipid-containing food[J]. *Lipid Technology*, 2013, 25(3): 59–61.
- [46] SHI L K, MAO J H, LI Z. Chemical characterization and free radical scavenging capacity of oils obtained from *Torreya grandis* Fort. ex. Lindl. and *Torreya grandis* Fort. var. Merrillii: A comparative study using chemometrics[J]. *Industrial Crops & Products*, 2018, 115: 250–260.
- [47] 杨盈, 严宝珍, 聂舟, 等. α -生育酚与自由基 DPPH· 的反应机理研究[J]. *波谱学杂志*, 2008, 3: 331–336. [YANG Y, YAN B Z, NIE Z, et al. Reaction mechanism study of α -tocopherol with free radical DPPH·[J]. *Chinese Journal of Magnetic Resonance*, 2008, 3: 331–336.]