

微波预处理对油莎豆贮藏稳定性及其油脂 脂质伴随物含量的影响

邓淑君^{1,2,3}, 郝琴^{1,2,3}, 万楚筠^{2,3}, 郭婷婷^{2,3}, 魏春磊^{2,3}

(1. 武汉轻工大学食品科学与工程学院, 武汉 430023; 2. 中国农业科学院油料作物研究所, 武汉 430062; 3. 油料油脂加工技术国家地方联合工程实验室, 武汉 430062)

摘要:旨在为提高油莎豆的贮藏稳定性, 采用微波对油莎豆进行预处理, 研究了冷藏(4℃)和常温(20~31℃)贮藏条件下油莎豆水分含量、脂肪酶活性及其油脂酸值和过氧化值的变化规律, 同时测定了油莎豆油的脂肪酸组成和脂质伴随物含量。结果表明: 在常温贮藏或冷藏过程中, 油莎豆的水分含量、脂肪酶活性及油莎豆油的酸值、过氧化值均呈一定增长趋势, 微波预处理显著降低了油莎豆的水分含量、脂肪酶活性和油莎豆油的酸值; 常温贮藏和冷藏120 d后, 704 W处理270 s制备的油莎豆油的酸值(KOH)小于4 mg/100 g, 显著低于未经微波预处理的油莎豆油, 满足国标(GB 2716—2018)的要求; 微波预处理对油莎豆油脂脂肪酸组成无显著影响, 但能提高油莎豆油中生育酚和总酚的含量, 其分别在400 W处理270 s、704 W处理210 s时达到最高, 为41.70 mg/100 g和10.21 mg/100 g; 经微波预处理后, 油莎豆油植物甾醇含量总体较空白组有所降低, 但保留率在73.05%以上。综上, 微波预处理对油莎豆的安全贮藏及其油脂中脂质伴随物的溶出有积极作用。

关键词:油莎豆; 微波预处理; 贮藏稳定性; 酸值; 脂肪酶活性; 脂质伴随物

中图分类号: TS222; TS224.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2024)02-0001-10

Effects of microwave pretreatment on storage stability of tiger nut and lipid concomitant content of its oil

DENG Shujun^{1,2,3}, HAO Qin^{1,2,3}, WAN Chuyun^{2,3},
GUO Tingting^{2,3}, WEI Chunlei^{2,3}

(1. College of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China; 2. Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430062, China; 3. Oil Crops and Lipids Process Technology National & Local Joint Engineering Laboratory, Wuhan 430062, China)

Abstract: In order to improve the storage stability of tiger nut, the tiger nut was pretreated by microwave and stored at low temperature (4℃) and room temperature (20–31℃), and the indicators' change including moisture content and lipase activity of tiger nut, and acid value and peroxide value of its oil were studied. Meanwhile, the fatty acid composition and lipid concomitant content of tiger nut oil were investigated. The results showed that during the storage at room temperature or low temperature, the moisture content, lipase activity of tiger nut and acid value, peroxide value of its oil showed an increasing trend, and

microwave pretreatment could significantly reduce the moisture content and lipase activity of tiger nut, and acid value of tiger nut oil. After storage for 120 d at low or room temperature, the acid value of oil from tiger nut treated with the microwave power of 704 W for 270 s was less than 4 mgKOH/100 g, which was significantly lower

收稿日期: 2022-10-10; 修回日期: 2023-10-07

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-2021-OCRI); 支持企业技术创新发展项目(2021BLB151)

作者简介: 邓淑君(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为粮油加工与利用(E-mail)791559475@qq.com。

通信作者: 万楚筠, 副研究员, 博士(E-mail)wanchuyun@caas.cn。

than the control group, still met the requirements of the national standard (GB 2716 – 2018). The microwave pretreatment couldn't affect the fatty acid composition of tiger nut oil, however, rendered the content of tocopherol and total phenol of tiger nut oil to a higher level, reaching their highest at 400 W for 270 s and 704 W for 210 s, respectively, which were 41.70 mg/100 g and 10.21 mg/100 g. After microwave pretreatment, the sterol content of the tiger nut oil was lower than the control group, but the sterol retention rate was above 73.05%. In a word, microwave pretreatment positively impacts the storage safety and the dissolution of lipid concomitant of tiger nut oil.

Key words: tiger nut; microwave pretreatment; storage stability; acid value; lipase activity; lipid concomitant

油莎豆 (*Cyperus esculentus* L.) 属莎草科, 又名虎坚果 (tiger nut), 是一年生草本沙生作物, 原产于非洲, 1952 年由中国科学院植物研究所首次引进, 目前我国吉林、辽宁、河南、河北、新疆和内蒙古等地均有规模种植。油莎豆 (块茎) 含油 20% ~ 25%, 其油脂中富含油酸等不饱和脂肪酸及生育酚、植物甾醇等脂质伴随物^[1], 是一种高品质食用油源。油莎豆每公顷可产干豆 7 500 ~ 9 000 kg, 产油量 1 800 kg 以上, 单位面积产油量约是大豆的 5 倍、油菜的 2 倍^[2]; 其根系发达, 易管易种, 不争良田, 是替代进口大豆极具竞争优势的油料资源。近年来油莎豆种植面积增长迅速, 总产量已达 10 万 t 以上^[3]。

随着油莎豆种植产业的快速发展, 其贮藏加工问题也愈加凸显^[4-6]。油莎豆 (块茎) 含糖量和含水量较高, 在贮藏过程中易受到内源酶、微生物以及环境气候影响而发生品质劣变, 极大地影响了其加工利用价值, 提高油莎豆的贮藏稳定性成为目前亟待解决的产业难题。微波是频率在 300 MHz ~ 300 GHz 的电磁波, 作用于物质内的极性分子可产生热效应和非热效应, 具有加热效率高、均匀性好、节能易控等优点, 常用于高效干燥和灭酶、灭菌等过程。Carvalho 等^[7] 对大麦胚芽进行微波干燥, 结果显示相比于传统的对流热风干燥, 微波干燥提高了干燥速率, 节省了 98% 干燥时间; 刘瑞等^[8] 研究发现, 微波处理能有效抑制马铃薯内源酶的活性, 适宜的微波条件对马铃薯的贮藏品质有较好的提升作用。这些都表明微波处理技术在提高油莎豆贮藏稳定性方面具有较大的应用潜力。

目前, 油莎豆的研究大多集中在遗传育种、油脂提取和淀粉特性等方面, 采用微波对油莎豆进行稳态化处理的研究还未见报道。本文采用微波对油莎豆进行预处理, 考察在不同贮藏温度下油莎豆水分含量、脂肪酶活性及其油脂酸值、过氧化值等的变化规律, 并探讨微波预处理对油莎豆油脂脂肪酸组成及

脂质伴随物的影响, 以期对油莎豆贮藏与高效加工利用提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

油莎豆, 购自新疆。

福林酚 (≥99%)、5 α -胆甾醇 (≥98%), Sigma-Aldrich 公司; 0.002 01 mol/mL 硫代硫酸钠标准溶液、0.100 mol/mL 氢氧化钾标准溶液、油酸标准品 (≥99.0%)、纯橄榄油 (游离脂肪酸含量 <0.1%), 阿拉丁上海有限公司; 37 种脂肪酸甲酯标准品 (≥99%), 没食子酸 (≥99%), 上海安普实验科技股份有限公司; α -生育酚 (≥98%)、 β -生育酚 (≥98%)、 γ -生育酚 (≥96%)、 δ -生育酚 (≥98%)、豆甾醇 (≥98%)、菜油甾醇 (≥98%)、 β -谷甾醇 (≥98%) 标准品, 上海源叶生物科技有限公司; 分析纯试剂均来自国药集团化学试剂有限公司; 色谱纯试剂均来自德国 Merck KGaA 公司。

1.1.2 仪器与设备

CEM 密闭式微波消解仪, 美国 CEM 公司; UV-1000 紫外分光光度计、LC-6AD 半制备液相色谱仪, 日本岛津公司; ME104/02 电子天平, 梅特勒-托利多仪器有限公司; 真空旋蒸仪, 德国 IKA 公司; Thermo 电热恒温鼓风干燥箱、Sorvall Stratos 高速冷冻离心机, 美国 Thermo Fisher 公司; DMT-2500 多管涡旋仪, 湖北詹氏科工贸有限公司; 安捷伦 6890A、7890A 气相色谱仪, 美国 Agilent 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 原料的清理

将油莎豆经高压水枪清洗后, 置于冷风干燥装置中 (30 $^{\circ}$ C, 8 h) 去除其表面水分, 然后装入 PE 自封袋, 避光储存, 备用。

1.2.2 油莎豆的微波处理和贮藏试验

每次称取 500 g 油莎豆均布于 8 个直径 90 mm

的耐高温平皿后置于微波装置中,分别设定功率400、504、600 W和704 W,时间150、210 s和270 s进行微波预处理,结束后立即用温度枪测量油莎豆表层温度。待油莎豆冷却至室温后封装于PE袋中,分别在冷藏(4℃)和常温(20~31℃)下进行120 d的贮藏试验,每组试验至少准备2 kg油莎豆,每隔30 d取样,测定水分含量、脂肪酶活性。同时取200 g样品,粉碎后过0.425 mm(40目)筛,再用正己烷提取油脂(料液比1:9,提取温度45℃,提取时间1 h),将提取的油莎豆油存放于4℃下备用待测。空白组不进行微波处理,其余操作相同。

1.2.3 油莎豆安全指标测定

1.2.3.1 水分含量

按照GB 14489.1—2008测定油莎豆水分含量。

1.2.3.2 脂肪酶活性

参照Rose等^[9]的方法略作修改测定脂肪酶活性。取2.0 g脱脂油莎豆粉,加入1.5 mL纯橄榄油和0.35 mL蒸馏水作为底物,混匀,于40℃水浴反应8 h后,加入10 mL正己烷,摇匀,4 000 r/min离心5 min,取上清液,重复用正己烷提取2次,合并上清液,旋蒸去除正己烷,用4 mL异辛烷溶解剩余物,加入2 mL质量浓度为5 g/100 mL pH 6.1的乙酸铜溶液(用吡啶调节pH),涡旋混匀,5 000 r/min离心5 min取上清液,以异辛烷为参比,在715 nm处测定吸光度。空白组不进行水浴反应,其余操作一致。脂肪酶活性按公式(1)计算。

$$A = 1\,000 \times \frac{(4 + V)(A_t - A_1)}{\epsilon l s t} \quad (1)$$

式中:A为脂肪酶活性,U/g;1 000为转换系数;4为异辛烷的体积,mL;V为添加纯橄榄油的体积,mL; A_t 为样品在715 nm处的吸光度; A_1 为空白组在715 nm处的吸光度; ϵ 为油酸在715 nm处的摩尔吸光度,111.07 L/(mol·cm); l 为比色皿的厚度,cm; s 为脱脂油莎豆粉质量,g; t 为反应时间,h。

1.2.3.3 油脂酸值和过氧化值

酸值按照GB 5009.229—2016测定;过氧化值按照GB 5009.227—2016测定。

1.2.4 油莎豆脂肪酸组成及含量测定

采用气相色谱法测定脂肪酸组成。取2滴油样(以微波处理后未经贮藏试验的油莎豆为原料提取的。下同)置于10 mL离心管中,用0.5 mL 20 mg/mL甲醇钠溶液甲酯化后,加入2.5 mL正己烷,离心后取上清液,待测。气相色谱条件:FID检测器;DB-FFAP色谱柱(30 m×250 μm×0.25 μm);进样器和检测器温度均为300℃;氮气流速

1.5 mL/min,分流比80:1;柱升温程序为210℃保持9 min,以20℃/min速率升温至250℃保持10 min。通过与混合脂肪酸甲酯标准品保留时间比较进行定性,采用面积归一化法定量。

1.2.5 油莎豆油脂质伴随物含量测定

1.2.5.1 生育酚

采用液相色谱法测定生育酚含量。称取0.80 g油样用正己烷定容于10 mL棕色容量瓶,混匀,取1.5 mL溶液过0.22 μm滤膜,待测。液相色谱条件:流动相为正己烷-异丙醇(体积比99.5:0.5);进样量20 μL;流速1.0 mL/min;SIL00A色谱柱(250 mm×4.6 mm,5 μm);将紫外校准的 α -、 β -、 γ -生育酚和 δ -生育酚标准品上机分析,绘制标准曲线。对比标准品与样品保留时间、对称性和峰高确定生育酚种类,根据标准曲线采用外标法计算生育酚含量。

1.2.5.2 总酚

称取1.25 g油样,加入1.5 mL正己烷和1.5 mL 80%甲醇,涡旋5 min,5 000 r/min离心10 min,取下层清液,重复用1.5 mL 80%甲醇提取2次,合并下层清液。吸取下层清液0.5 mL于10 mL比色管中,依次加入5 mL蒸馏水和0.5 mL福林酚试剂,混匀反应3 min后加入1 mL澄清饱和碳酸钠溶液,用蒸馏水定容后于暗处反应1 h。空白为用甲醇代替油样,其余操作一致。用紫外分光光度计在765 nm处测定样品吸光度,结果以没食子酸当量表示。

1.2.5.3 植物甾醇

采用气相色谱法测定植物甾醇含量。称取0.20 g油样,加入0.5 mL 5 α -胆甾醇(0.5 mg/mL,内标)和10 mL KOH乙醇溶液(2 mol/L),60℃水浴振荡1 h后冷却,加入4 mL超纯水、10 mL正己烷,涡旋3 min,提取上清液,下层重复提取3次;合并上清液,用无水硫酸钠除水后,取15 mL上清液于试管中于85℃下烘干,加入100 μL衍生化试剂(MSHFBA-1-甲基咪唑,体积比95:5),于105℃烘箱中衍生15 min后冷却至室温,加入1 mL正己烷,待测。气相色谱条件:FID检测器;DB-5HT硅胶毛细管柱(30 m×0.32 mm×0.1 μm);氮气流速2.0 mL/min;进样量1 μL;分流比25:1;柱温310℃保持10 min;检测器和注射温度均为320℃。通过与标准品保留时间比较进行定性,并根据内标相对峰面积进行定量。

1.2.6 数据处理

所有试验重复3次,结果以“平均值±标准偏差”表示;采用Prism 9绘图;采用Excel、SPSS 26.0.0.0

进行数据分析,在 $\alpha=0.05$ 水平上对试验数据进行显著性分析, $p<0.05$ 表明存在显著差异。

2 结果与分析

2.1 微波预处理对油莎豆贮藏安全性的影响

2.1.1 微波预处理过程中油莎豆水分含量及表层温度的变化

微波预处理过程中可以通过提高功率和延长时间快速降低油莎豆的水分含量。微波预处理过程中油莎豆表层温度和水分含量变化见图1。

未经微波预处理的油莎豆表层温度为 25.0°C ,

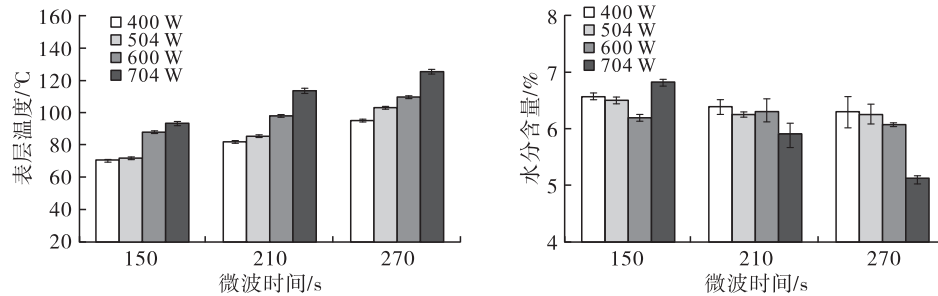


图1 微波预处理过程中油莎豆表层温度及水分含量变化

2.1.2 油莎豆在贮藏过程中水分含量的变化

经不同条件微波预处理后油莎豆在常温贮藏和

水分含量为 6.89% 。由图1可知,微波预处理对油莎豆表层温度和水分含量具有显著的影响($p<0.05$)。油莎豆在微波功率 400 、 504 、 600 W和 704 W时处理 270 s后,其表层温度分别升高到 95.5 、 103.4 、 110.0°C 和 125°C ,水分含量分别降到了 6.30% 、 6.26% 、 6.09% 和 5.10% 。由图1还可看出,随微波功率的增大和微波时间的延长,油莎豆表层温度升高,油莎豆水分含量总体下降。因此,在采用微波预处理降低油莎豆水分含量延长油莎豆贮藏期时,需优化微波处理工艺,减少高温对油莎豆中油脂品质的破坏。

冷藏时水分含量的变化见表1。

表1 不同微波预处理及贮藏条件下油莎豆水分含量的变化

微波功率/微波时间/		水分含量/%						
W	s	0 d	常温 30 d	常温 60 d	常温 120 d	冷藏 30 d	冷藏 60 d	冷藏 120 d
空白组		6.89 ± 0.05^a	7.74 ± 0.10^a	7.45 ± 0.09^a	7.57 ± 0.01^a	7.85 ± 0.19^a	7.75 ± 0.09^a	7.73 ± 0.17^a
400	150	6.57 ± 0.13^{bc}	7.19 ± 0.01^c	6.96 ± 0.05^{bcd}	7.07 ± 0.02^b	7.28 ± 0.06^b	7.30 ± 0.05^b	7.39 ± 0.17^b
	210	6.39 ± 0.27^{cde}	7.02 ± 0.01^{de}	6.68 ± 0.05^{de}	6.68 ± 0.06^d	6.69 ± 0.02^{def}	6.63 ± 0.04^{ef}	6.86 ± 0.15^d
	270	6.30 ± 0.01^{cdef}	6.68 ± 0.06^g	6.58 ± 0.02^e	6.66 ± 0.00^{de}	6.52 ± 0.17^{ef}	6.62 ± 0.04^{ef}	6.58 ± 0.17^e
504	150	6.51 ± 0.04^{cd}	7.46 ± 0.04^b	7.11 ± 0.20^b	7.01 ± 0.01^b	7.20 ± 0.12^{bc}	7.06 ± 0.13^c	7.32 ± 0.01^b
	210	6.25 ± 0.18^{def}	6.88 ± 0.09^f	6.60 ± 0.07^e	6.73 ± 0.01^d	6.76 ± 0.16^{de}	6.79 ± 0.09^{de}	7.25 ± 0.04^b
	270	6.26 ± 0.01^{def}	6.84 ± 0.03^f	6.72 ± 0.19^{cde}	6.71 ± 0.07^d	7.08 ± 0.05^{bc}	6.94 ± 0.09^{cd}	6.92 ± 0.15^{cd}
600	150	6.20 ± 0.22^{ef}	6.93 ± 0.06^{ef}	6.79 ± 0.04^{cde}	6.73 ± 0.03^d	7.18 ± 0.18^{bc}	7.06 ± 0.19^c	7.16 ± 0.14^{bc}
	210	6.32 ± 0.01^{cdef}	6.85 ± 0.01^f	6.61 ± 0.01^e	6.87 ± 0.08^c	6.63 ± 0.13^{ef}	6.56 ± 0.14^{ef}	6.80 ± 0.01^{de}
	270	6.09 ± 0.01^{fg}	6.66 ± 0.03^{gh}	6.51 ± 0.21^e	6.58 ± 0.08^e	6.73 ± 0.08^{def}	6.66 ± 0.15^e	6.71 ± 0.14^{de}
704	150	6.82 ± 0.21^{ab}	7.15 ± 0.08^{cd}	7.02 ± 0.13^{bc}	6.73 ± 0.06^d	6.96 ± 0.19^{cd}	7.04 ± 0.13^c	7.36 ± 0.16^b
	210	5.89 ± 0.06^g	6.54 ± 0.02^h	6.53 ± 0.07^e	6.47 ± 0.03^f	6.61 ± 0.13^{ef}	6.68 ± 0.04^e	6.27 ± 0.09^f
	270	5.10 ± 0.08^h	6.23 ± 0.05^i	6.42 ± 0.09^e	6.11 ± 0.08^g	6.45 ± 0.22^f	6.40 ± 0.05^f	6.25 ± 0.11^f

注:不同小写字母表示相同贮藏条件下不同微波预处理条件样品间存在显著差异($p<0.05$)。下同

从表1可以看出,微波预处理显著影响油莎豆水分含量($p<0.05$)。随着微波功率的增大和微波时间的延长,油莎豆水分含量总体逐渐下降。经微波 704 W处理 270 s后,油莎豆失水率达到 25.98% 。在常温贮藏或冷藏期间,油莎豆水分含量均出现不同程度上升趋势;与常温贮藏相比,油莎豆在冷藏条件下水分含量总体稍高。油莎豆在贮藏过程中水分含量增加的原因可能是由于PE自封袋并不能完全

隔绝环境中的水分,在贮藏过程中油莎豆吸收了环境中的水汽后达到平衡。Kizzie - Hayford等^[10]研究表明,在 $5\sim 7^{\circ}\text{C}$ 条件下贮藏 35 d后,油莎豆的水分含量从 48 g/100 g增加到 52.4 g/100 g,且具有较高的脂肪酶和 α -淀粉酶活性;Hou等^[11]研究了贮藏条件对大豆成分的影响,结果表明,大豆在相对湿度 57% 、温度 20°C 条件下贮藏 3 个月后,水分含量从 5.4% 增加到 9.4% ,并在 18 个月内其水分含

量趋于稳定;Genkawa等^[12]研究了糙米在不同湿度和不同温度(15℃和25℃)下的水分含量变化情况,结果表明,水分含量均较贮藏前稍有提高。以上研究均表明贮藏过程中物料水分含量会增加,与本研究结果一致。总的来说,各组油莎豆的水分含量在不同贮藏温度条件下均有所增加,但微波组比空白组的水分含量低,说明微波预处理能有效降低油莎豆的水分含量。

2.1.3 油莎豆在贮藏过程中脂肪酶活性的变化

脂肪酶作为催化油脂水解酸败的主要酶,仅在油水界面才有活性,即只能在水分存在的条件下才能水解脂肪^[13]。因此,为进一步探讨微波稳态化油莎豆效果,有必要研究微波预处理前后和不同贮藏条件下油莎豆脂肪酶活性变化。表2为经不同条件微波预处理后油莎豆在常温贮藏和冷藏时脂肪酶活性的变化。

表2 不同微波预处理及贮藏条件下油莎豆脂肪酶活性的变化

微波功率/微波时间/ W s		脂肪酶活性/(U/g)						
		0 d	常温 30 d	常温 60 d	常温 120 d	冷藏 30 d	冷藏 60 d	冷藏 120 d
空白组		1.68 ± 0.01 ^a	2.74 ± 0.13 ^b	2.77 ± 0.11 ^b	3.20 ± 0.20 ^a	1.66 ± 0.04 ^a	1.73 ± 0.02 ^a	1.99 ± 0.02 ^a
400	150	0.73 ± 0.00 ^f	2.36 ± 0.10 ^d	1.48 ± 0.00 ^f	2.72 ± 0.55 ^b	1.37 ± 0.09 ^{bc}	1.37 ± 0.02 ^{de}	1.72 ± 0.07 ^c
	210	1.25 ± 0.03 ^{cd}	1.50 ± 0.07 ^g	3.32 ± 0.18 ^a	2.61 ± 0.01 ^b	1.24 ± 0.07 ^{ef}	1.27 ± 0.03 ^e	1.77 ± 0.01 ^{bc}
	270	1.74 ± 0.22 ^a	1.83 ± 0.07 ^f	2.43 ± 0.05 ^{cd}	1.88 ± 0.32 ^c	0.85 ± 0.09 ^h	0.90 ± 0.03 ^f	1.92 ± 0.04 ^{ab}
504	150	1.44 ± 0.02 ^b	3.09 ± 0.01 ^a	1.65 ± 0.05 ^{ef}	2.50 ± 0.08 ^b	1.28 ± 0.01 ^{de}	1.63 ± 0.09 ^{ab}	1.47 ± 0.19 ^{de}
	210	1.40 ± 0.07 ^{bc}	2.56 ± 0.05 ^c	2.74 ± 0.05 ^b	2.69 ± 0.07 ^b	1.17 ± 0.01 ^{fg}	1.62 ± 0.06 ^{ab}	1.99 ± 0.20 ^a
	270	1.21 ± 0.03 ^d	1.72 ± 0.07 ^f	3.11 ± 0.41 ^a	2.54 ± 0.09 ^b	1.13 ± 0.03 ^g	1.51 ± 0.01 ^{bc}	1.65 ± 0.02 ^c
600	150	0.93 ± 0.04 ^e	2.09 ± 0.02 ^c	2.24 ± 0.05 ^d	1.90 ± 0.06 ^c	1.61 ± 0.06 ^a	1.53 ± 0.16 ^{bc}	1.59 ± 0.12 ^{cd}
	210	1.14 ± 0.03 ^d	1.83 ± 0.01 ^f	1.82 ± 0.16 ^e	3.30 ± 0.16 ^a	1.47 ± 0.00 ^b	1.32 ± 0.03 ^e	1.67 ± 0.11 ^c
	270	1.17 ± 0.03 ^d	1.00 ± 0.10 ⁱ	1.39 ± 0.06 ^f	1.78 ± 0.10 ^{cd}	1.36 ± 0.02 ^{cd}	0.86 ± 0.04 ^f	1.00 ± 0.05 ^f
704	150	0.95 ± 0.09 ^e	2.70 ± 0.12 ^{bc}	2.64 ± 0.06 ^{bc}	2.40 ± 0.03 ^b	0.50 ± 0.01 ⁱ	1.46 ± 0.02 ^{cd}	1.37 ± 0.02 ^c
	210	0.93 ± 0.11 ^e	1.21 ± 0.07 ^h	0.94 ± 0.06 ^g	1.68 ± 0.05 ^{cd}	0.93 ± 0.01 ^h	1.27 ± 0.11 ^e	1.43 ± 0.06 ^{de}
	270	0.74 ± 0.06 ^f	1.18 ± 0.10 ^h	1.42 ± 0.06 ^f	1.41 ± 0.14 ^d	0.40 ± 0.07 ^j	0.78 ± 0.04 ^f	0.85 ± 0.02 ^f

由表2可知,空白组油莎豆初始脂肪酶活性为1.68 U/g,常温贮藏120 d后脂肪酶活性增至3.20 U/g,而冷藏120 d后仅为1.99 U/g,由此可见低温可一定程度减缓贮藏过程中油莎豆脂肪酶活性的增长速率,这与朱广飞^[14]、Lavanya^[15]等的研究结论较为一致。微波预处理后油莎豆脂肪酶活性随着微波功率的增加和微波时间的延长总体呈下降趋势;经微波704 W处理270 s后,油莎豆脂肪酶活性降至0.74 U/g,常温贮藏和冷藏120 d后,脂肪酶活性分别为1.41 U/g和0.85 U/g,仅为空白组同期脂肪酶活性的44.1%和42.7%。经微波预处理后,在

微波热效应作用下油莎豆水分含量和水分活度迅速降低,抑制了脂肪酶的活性;同时脂肪酶蛋白质分子在微波电磁场作用下,产生变形和振动,即微波的非热效应,使蛋白质次级结构发生改变,酶活性进一步被钝化,从而有效钝化油莎豆脂肪酶活性。余诚玮等^[16]研究发现,微波处理米糠可有效抑制米糠脂肪酶活力,经微波800 W处理6 min,米糠脂肪酶活性达到最低,是空白组的30.10%,与本文研究结果相似。

2.1.4 油莎豆在贮藏过程中油脂酸值的变化

经不同条件微波预处理后油莎豆在常温贮藏和冷藏时油脂酸值的变化见表3。

表3 不同微波预处理及贮藏条件下油莎豆油酸值的变化

微波功率/微波时间/ W s		酸值(KOH)/(mg/g)						
		0 d	常温 30 d	常温 60 d	常温 120 d	冷藏 30 d	冷藏 60 d	冷藏 120 d
空白组		3.35 ± 0.17 ^a	6.05 ± 0.06 ^a	7.56 ± 0.06 ^a	8.53 ± 0.01 ^a	5.59 ± 0.23 ^a	5.67 ± 0.04 ^a	5.84 ± 0.41 ^a
400	150	2.01 ± 0.02 ^f	5.33 ± 0.05 ^b	6.20 ± 0.07 ^c	8.41 ± 0.32 ^a	4.90 ± 0.18 ^b	4.95 ± 0.06 ^b	5.52 ± 0.58 ^{abc}
	210	3.19 ± 0.02 ^{ab}	4.02 ± 0.00 ^{def}	5.07 ± 0.33 ^d	6.27 ± 0.45 ^{cd}	3.37 ± 0.11 ^{fg}	4.23 ± 0.10 ^{de}	4.28 ± 0.20 ^{ef}
	270	3.22 ± 0.08 ^{ab}	4.18 ± 0.05 ^{cd}	5.66 ± 0.35 ^d	6.23 ± 0.02 ^{cd}	3.32 ± 0.13 ^{fg}	3.36 ± 0.12 ^g	3.45 ± 0.17 ^h
504	150	2.85 ± 0.25 ^{cde}	4.30 ± 0.07 ^c	6.65 ± 0.02 ^b	7.67 ± 0.08 ^b	4.23 ± 0.01 ^d	4.88 ± 0.25 ^{bc}	5.54 ± 0.08 ^{ab}
	210	3.04 ± 0.08 ^{bc}	3.96 ± 0.06 ^{ef}	5.70 ± 0.06 ^d	6.02 ± 0.06 ^{de}	3.88 ± 0.03 ^e	4.34 ± 0.20 ^{de}	4.72 ± 0.16 ^{de}
	270	2.69 ± 0.01 ^e	3.88 ± 0.12 ^f	5.58 ± 0.37 ^d	5.80 ± 0.16 ^e	3.21 ± 0.19 ^g	3.68 ± 0.36 ^{fg}	4.14 ± 0.25 ^{fg}
600	150	2.11 ± 0.14 ^f	4.11 ± 0.03 ^{de}	6.37 ± 0.19 ^{bc}	6.42 ± 0.16 ^c	4.51 ± 0.04 ^c	4.53 ± 0.03 ^{cd}	5.01 ± 0.33 ^{bcd}
	210	3.06 ± 0.20 ^{bc}	4.30 ± 0.06 ^c	5.40 ± 0.06 ^d	6.34 ± 0.04 ^{cd}	4.03 ± 0.07 ^{de}	4.00 ± 0.04 ^{ef}	4.81 ± 0.20 ^{de}
	270	2.89 ± 0.01 ^{cde}	3.60 ± 0.12 ^g	4.58 ± 0.02 ^e	5.21 ± 0.24 ^f	3.53 ± 0.11 ^f	3.57 ± 0.12 ^g	4.62 ± 0.15 ^{def}

续表 3

微波功率/微波时间/		酸值(KOH)/(mg/g)						
W	s	0 d	常温 30 d	常温 60 d	常温 120 d	冷藏 30 d	冷藏 60 d	冷藏 120 d
704	150	2.77 ± 0.00 ^{de}	4.10 ± 0.13 ^{de}	6.22 ± 0.09 ^c	5.24 ± 0.05 ^f	4.09 ± 0.03 ^{de}	4.74 ± 0.44 ^{bc}	4.98 ± 0.18 ^{cd}
	210	2.93 ± 0.00 ^{cd}	3.53 ± 0.06 ^e	5.71 ± 0.11 ^d	4.94 ± 0.03 ^f	3.41 ± 0.18 ^{fg}	3.56 ± 0.06 ^e	3.72 ± 0.02 ^{gh}
	270	2.13 ± 0.00 ^f	3.20 ± 0.15 ^h	4.03 ± 0.11 ^f	3.91 ± 0.03 ^e	2.27 ± 0.09 ^h	2.52 ± 0.13 ^e	3.38 ± 0.30 ^h

由表 3 可知,空白组油莎豆油初始酸值(KOH)为 3.35 mg/g,在常温贮藏 120 d 后增长至 8.53 mg/g,冷藏 120 d 后的酸值仅为同期常温贮藏酸值的 68.5%。这是由于在冷藏条件下脂肪酶活性增长速率低,使得酸值增长趋势也相对平缓。经微波预处理后,油莎豆油初始酸值(KOH)在 2.01 ~ 3.22 mg/g 之间,与空白组相比显著降低;微波 704 W 处理 270 s 的油莎豆在常温贮藏和冷藏 120 d 后,酸值(KOH)分别为 3.91 mg/g 和 3.38 mg/g,仍满足国标(GB 2716—2018)对植物原油酸值(KOH)的要求(≤4 mg/g)。因此,微波预处理能有效抑制油莎豆脂肪酶活性,从而降低贮藏期间油莎豆中油脂水解

酸败程度,提高油莎豆贮藏稳定性。张岩岩^[17]在研究微波稳定全麦粉试验中得出相似的结论,其研究发现经微波(800 W)处理的全麦粉在贮藏 84 d 后其脂肪酸值较空白组下降了 57.1%,表明微波作用能显著降低全麦粉脂肪酸值;余诚玮等^[16]采用微波处理米糠(功率 800 W 处理 4 min 和 6 min),发现微波处理可有效抑制米糠油酸值的生长,在贮藏 56 d 后米糠油酸值(KOH)低于 30 mg/g,约是未处理组的 38% 和 13%。

2.1.5 油莎豆在贮藏过程中油脂过氧化值的变化

表 4 为经不同条件微波预处理后油莎豆在常温贮藏和冷藏时油脂过氧化值的变化。

表 4 不同微波预处理及贮藏条件下油莎豆油过氧化值的变化

微波功率/微波时间/		过氧化值/(10 ⁻² g/100 g)						
W	s	0 d	常温 30 d	常温 60 d	常温 120 d	冷藏 30 d	冷藏 60 d	冷藏 120 d
空白组		0.48 ± 0.02 ^{bc}	0.55 ± 0.04 ^d	0.86 ± 0.01 ^a	1.24 ± 0.29 ^{de}	0.65 ± 0.05 ^{bc}	0.80 ± 0.10 ^a	1.23 ± 0.30 ^{abcde}
400	150	0.60 ± 0.10 ^{abc}	0.66 ± 0.02 ^{abc}	0.95 ± 0.08 ^a	1.41 ± 0.14 ^{abc}	0.61 ± 0.02 ^c	0.89 ± 0.00 ^a	1.24 ± 0.01 ^{abcde}
	210	0.46 ± 0.11 ^c	0.68 ± 0.05 ^{abc}	0.87 ± 0.07 ^a	1.37 ± 0.25 ^{bcd}	0.72 ± 0.04 ^{ab}	0.78 ± 0.09 ^a	1.39 ± 0.10 ^{abc}
	270	0.58 ± 0.15 ^{abc}	0.69 ± 0.01 ^{abc}	1.05 ± 0.03 ^a	1.67 ± 0.02 ^a	0.78 ± 0.00 ^a	0.97 ± 0.08 ^a	1.42 ± 0.17 ^{ab}
504	150	0.49 ± 0.01 ^{bc}	0.72 ± 0.05 ^{ab}	0.81 ± 0.24 ^a	1.57 ± 0.00 ^{ab}	0.71 ± 0.05 ^{ab}	0.80 ± 0.01 ^a	1.45 ± 0.06 ^a
	210	0.52 ± 0.02 ^{abc}	0.71 ± 0.08 ^{abc}	0.91 ± 0.10 ^a	1.59 ± 0.10 ^{ab}	0.61 ± 0.08 ^c	0.83 ± 0.02 ^a	1.31 ± 0.02 ^{abcd}
	270	0.60 ± 0.13 ^{abc}	0.61 ± 0.06 ^{bcd}	0.82 ± 0.03 ^a	1.25 ± 0.01 ^{cde}	0.72 ± 0.02 ^{ab}	0.90 ± 0.02 ^a	1.25 ± 0.07 ^{abcde}
600	150	0.54 ± 0.01 ^{abc}	0.72 ± 0.07 ^{ab}	0.92 ± 0.13 ^a	1.05 ± 0.00 ^c	0.68 ± 0.00 ^{bc}	0.76 ± 0.07 ^a	1.00 ± 0.12 ^{de}
	210	0.69 ± 0.07 ^{ab}	0.73 ± 0.04 ^a	0.88 ± 0.01 ^a	1.32 ± 0.00 ^{bcd}	0.71 ± 0.00 ^{ab}	0.85 ± 0.13 ^a	1.11 ± 0.04 ^{bcde}
	270	0.72 ± 0.03 ^a	0.61 ± 0.00 ^{bcd}	0.95 ± 0.15 ^a	1.51 ± 0.04 ^{ab}	0.66 ± 0.02 ^{bc}	0.86 ± 0.07 ^a	1.23 ± 0.22 ^{abcde}
704	150	0.53 ± 0.04 ^{abc}	0.61 ± 0.00 ^{cd}	0.92 ± 0.05 ^a	1.50 ± 0.13 ^{ab}	0.52 ± 0.07 ^d	0.81 ± 0.14 ^a	0.99 ± 0.00 ^c
	210	0.63 ± 0.04 ^{abc}	0.72 ± 0.02 ^{ab}	0.81 ± 0.00 ^a	1.45 ± 0.01 ^{abc}	0.62 ± 0.02 ^c	0.86 ± 0.06 ^a	1.38 ± 0.07 ^{abc}
	270	0.52 ± 0.08 ^{abc}	0.68 ± 0.00 ^{abc}	1.01 ± 0.12 ^a	1.51 ± 0.06 ^{ab}	0.68 ± 0.00 ^{bc}	0.93 ± 0.24 ^a	1.08 ± 0.07 ^{cde}

从表 4 可知,油莎豆油过氧化值在贮藏过程中呈现上升趋势且在常温条件下总体增长速率稍快。经微波预处理后油莎豆油过氧化值在 $0.46 \times 10^{-2} \sim 0.72 \times 10^{-2}$ g/100 g 之间,整体上比空白组的稍大,但远低于 GB 2716—2018 所要求的 0.25 g/100 g 限量值。在贮藏 120 d 后所有样品的过氧化值仍然满足国标规定。微波预处理对油莎豆油过氧化值存在两个方面的影响:一方面微波可钝化脂肪氧合酶等酶的活性,降低油莎豆的酶促氧化作用;另一方面由于微波预处理过程中油莎豆的温度迅速升高,促进预处理期间的非酶促氧化的反应速率。Lavanya 等^[15]研究表明,合适的微波功率和处理时间能钝化

脂肪氧合酶等酶的活性,而这种变化在贮藏期间是不可逆的。过氧化值在贮藏期间变化较小还可能由于抗氧化活性物质的作用^[18]。宋二立等^[19]对霉变油莎豆进行了相关指标检测,结果表明,浸出法提取的霉变油莎豆油其过氧化值在 0.02 g/100 g,其将该现象归因于油莎豆油中富含抗氧化活性组分。

2.1.6 微波预处理条件、贮藏条件及贮藏过程中油莎豆指标的相关性

微波预处理条件(微波功率、微波时间)、贮藏条件(贮藏时间、贮藏温度)及贮藏过程中油莎豆指标(水分含量、脂肪酶活性、油脂酸值、油脂过氧化值)的相关性分析结果见表 5。

表5 微波预处理条件、贮藏条件及贮藏过程油莎豆指标的相关性分析结果

项目	微波功率	微波时间	水分含量	贮藏时间	贮藏温度	酸值	脂肪酶活性	过氧化值
微波功率	1	0.296**	-0.450**	0	0	-0.298**	-0.354**	-0.034
微波时间		1	-0.619**	0	0	-0.373**	-0.265**	0.238**
水分含量			1	0.351**	0.081	0.590**	0.415**	0.060
贮藏时间				1	0	0.659**	0.414**	0.715**
贮藏温度					1	0.322**	0.462**	0.106
酸值						1	0.725**	0.426**
脂肪酶活性							1	0.306**
过氧化值								1

注：**代表极显著($p < 0.01$)

从表5可以看出:微波功率和微波时间与水分含量、脂肪酶活性、酸值呈极显著负相关;酸值与脂肪酶活性、贮藏时间($r = 0.659$, $p < 0.01$)、贮藏温度($r = 0.322$, $p < 0.01$)和水分含量($r = 0.590$, $p < 0.01$)均呈极显著正相关。由此可知,油莎豆在贮藏过程中其油脂酸值的增加主要是脂肪酶水解作用所致,且贮藏时间越长,贮藏温度越高,酸值增长幅度越大,并伴随着脂质的氧化作用。微波联合冷藏

稳态化油莎豆能有效降低其水分含量,抑制脂肪酶活性,提高油莎豆安全贮藏品质。

2.2 微波预处理对油莎豆油脂脂肪酸组成和脂质伴随物的影响

2.2.1 对油莎豆油脂脂肪酸组成的影响

表6为微波预处理对油莎豆油脂脂肪酸组成的影响。

表6 微波预处理对油莎豆油脂脂肪酸组成及相对含量的影响

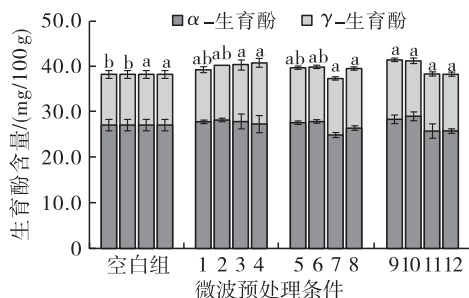
微波功率/W	微波时间/s	脂肪酸组成及相对含量/%							
		C16:0	C16:1	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	UFA	SFA
空白组		12.48 ± 0.07	0.33 ± 0.00	4.28 ± 0.02	73.03 ± 0.08	8.68 ± 0.01	0.20 ± 0.00	82.59 ± 0.09	17.41 ± 0.09
400	150	12.29 ± 0.04	0.31 ± 0.00	4.34 ± 0.00	73.20 ± 0.04	8.60 ± 0.00	0.19 ± 0.00	82.69 ± 0.04	17.31 ± 0.04
	210	12.20 ± 0.01	0.31 ± 0.00	4.32 ± 0.10	73.32 ± 0.07	8.58 ± 0.03	0.19 ± 0.00	82.79 ± 0.10	17.21 ± 0.10
	270	12.29 ± 0.01	0.31 ± 0.00	4.20 ± 0.04	73.24 ± 0.02	8.70 ± 0.00	0.19 ± 0.00	82.82 ± 0.03	17.18 ± 0.03
504	150	12.33 ± 0.00	0.31 ± 0.00	4.01 ± 0.04	73.26 ± 0.04	8.83 ± 0.00	0.19 ± 0.00	82.97 ± 0.04	17.03 ± 0.04
	210	12.28 ± 0.00	0.31 ± 0.00	4.33 ± 0.02	73.17 ± 0.02	8.65 ± 0.01	0.19 ± 0.00	82.70 ± 0.02	17.30 ± 0.02
	270	12.32 ± 0.00	0.31 ± 0.00	4.20 ± 0.03	73.16 ± 0.02	8.74 ± 0.01	0.20 ± 0.00	82.80 ± 0.03	17.20 ± 0.03
600	150	12.28 ± 0.05	0.31 ± 0.00	4.40 ± 0.02	73.01 ± 0.07	8.75 ± 0.00	0.19 ± 0.00	82.63 ± 0.07	17.37 ± 0.07
	210	12.35 ± 0.01	0.31 ± 0.00	4.35 ± 0.00	73.03 ± 0.00	8.70 ± 0.01	0.20 ± 0.00	82.62 ± 0.00	17.38 ± 0.00
	270	12.27 ± 0.04	0.31 ± 0.00	4.39 ± 0.02	73.09 ± 0.05	8.68 ± 0.00	0.18 ± 0.00	82.65 ± 0.05	17.35 ± 0.05
704	150	12.22 ± 0.01	0.31 ± 0.00	4.28 ± 0.01	73.31 ± 0.02	8.61 ± 0.01	0.19 ± 0.00	82.81 ± 0.01	17.19 ± 0.01
	210	12.32 ± 0.00	0.32 ± 0.00	4.31 ± 0.02	73.23 ± 0.02	8.59 ± 0.00	0.19 ± 0.00	82.70 ± 0.03	17.30 ± 0.02
	270	12.24 ± 0.05	0.31 ± 0.00	4.37 ± 0.01	73.31 ± 0.05	8.52 ± 0.00	0.19 ± 0.00	82.71 ± 0.06	17.29 ± 0.06

由表6可知:微波预处理前后油莎豆油脂脂肪酸组成及相对含量为棕榈酸(C16:0)12.20%~12.48%、棕榈油酸(C16:1)0.31%~0.33%、硬脂酸(C18:0)4.01%~4.40%、油酸(C18:1)73.01%~73.32%、亚油酸(C18:2)8.52%~8.83%、亚麻酸(C18:3)0.18%~0.20%,饱和脂肪酸(SFA)占17.03%~17.41%,不饱和脂肪酸(UFA)占82.59%~82.97%。微波预处理对油莎豆油的脂肪酸组成影响不大,这可能与油莎豆属于典型的油酸型油脂,其油酸含量在73%以上,因此

具有较强的氧化稳定性^[20]有关。本文结论与催化式红外处理麦胚^[21]及微波预处理对葵花籽油、红花籽油^[22]、小麦胚芽油^[23]和菜籽油^[24]的脂肪酸组成的影响结论一致。

2.2.2 对油莎豆油生育酚含量的影响

生育酚是一种天然的脂溶性抗氧化剂,根据其分子甲基位置不同,分为 α -、 β -、 γ -、 δ -生育酚,具有较强的抗氧化活性^[21]。微波预处理对油莎豆油生育酚含量的影响如图2所示。



注:1~4.微波功率分别为400、504、600、704 W,微波时间均为150 s;5~8.微波功率分别为400、504、600、704 W,微波时间均为210 s;9~12.微波功率分别为400、504、600、704 W,微波时间均为270 s。不同小写字母表示同一微波功率、不同微波时间条件下具有显著差异($p < 0.05$)。下同

图2 微波预处理对油莎豆油生育酚含量的影响

由图2可知,油莎豆油中生育酚主要由 α -生育酚和 γ -生育酚组成,其中 α -生育酚占比最大,为67.75%~70.40%,这与Guo等^[25]的研究结果相似。微波预处理对油莎豆油中生育酚含量有一定影响;微波功率为400 W和504 W时,总生育酚含量随着微波时间延长而增加,而微波功率为600 W和704 W时,总生育酚含量随着微波时间延长总体呈现先上升后下降趋势。总生育酚含量在38.45 mg/100 g(600 W处理210 s)~41.70 mg/100 g(400 W处理270 s)之间, α -生育酚含量在26.05 mg/100 g(600 W处理210 s)~29.36 mg/100 g(504 W处理270 s)之间, γ -生育酚含量在11.21 mg/100 g(空白组)~13.53 mg/100 g(704 W处理150 s)之间。值得注意的是,在微波功率600 W和704 W时,其 α -生育酚含量随微波时间延长总体略有减少。

王智^[26]对牡丹籽进行微波预处理,发现 α -生育酚含量显著降低了5.80 mg/kg,但生育酚总量无显著变化($p > 0.05$);Poltronieri等^[27]研究微波烘烤榛子品质变化,结果显示,微波烘烤后榛子的 α -生育酚含量下降了20%~30%;Patricia等^[28]对比微波烫热和常规烫热西兰花的品质,结果表明,微波烫热后西兰花的维生素E、铁和磷等含量几乎接近新鲜西兰花的。综上,微波预处理可能对油莎豆油生育酚的影响存在两面性:微波能够破坏细胞结构,促进更多的生育酚溶出;生育酚尤其是 α -生育酚对微波作用较为敏感,较高的微波功率和较长的微波时间会造成生育酚的损失。

2.2.3 对油莎豆油总酚含量的影响

微波预处理对油莎豆油总酚含量的影响见图3。

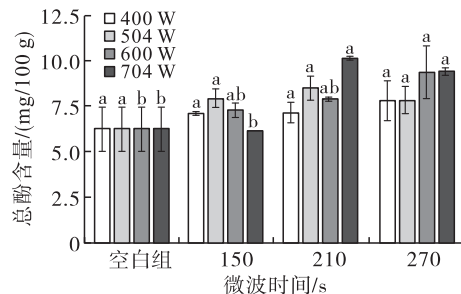


图3 微波预处理对油莎豆油总酚含量的影响

由图3可知,油莎豆油总酚含量在6.36 mg/100 g(空白组)~10.21 mg/100 g(704 W处理210 s)之间。在微波功率400 W和504 W时,延长微波时间,总酚含量稍有提高但是差异不显著($p > 0.05$);而在微波功率600 W和704 W时,总酚含量随着微波时间延长总体增加,分别在270 s和210 s时达到最高,此时油莎豆油总酚含量相比微波预处理前分别提高了48.59%和60.53%。微波预处理促进油莎豆油总酚含量增加,其原理可能是通过其热效应和压力作用破坏了油莎豆细胞壁结构,诱导多聚体的解聚效应,促进更多的游离酚酸释放和向油相迁移。罗凡等^[29]研究3种加热工艺对油茶籽油总酚含量的影响,结果发现,油茶籽在经微波功率245、420 W加热后,其油脂总酚含量无显著变化,但是微波功率增加至700 W时,油茶籽油总酚含量随着加热时间延长而增加,20 min后总酚含量比初始值提高了11.0倍。

2.2.4 对油莎豆油植物甾醇含量的影响

植物甾醇与胆甾醇的化学结构非常相似,主要存在于植物种子中,具有抗氧化、消炎、抗肿瘤和预防冠状动脉粥样硬化等生理功能。微波预处理对油莎豆油植物甾醇含量的影响见图4。

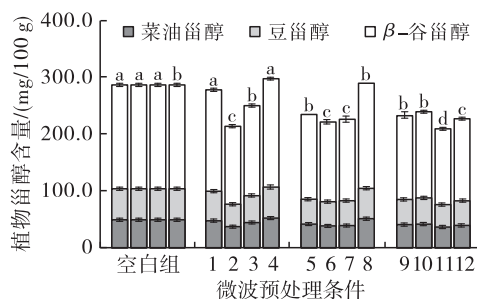


图4 微波预处理对油莎豆油植物甾醇含量的影响

由图4可知,油莎豆油中植物甾醇主要有菜油甾醇、豆甾醇和 β -谷甾醇,含量分别在37.37~53.10 mg/100 g、39.39~54.92 mg/100 g和139.41~191.23 mg/100 g之间。油莎豆油中植物甾醇在微波预处理过程中发生了不同程度的氧化,植物甾醇含量整体较空白组低。在微波时间270 s时,微波

功率为400、504、600、704 W的油莎豆油中植物甾醇含量分别下降至原来的81.03%、83.57%、73.05%和79.37%。出现该现象的原因可能是微波热效应造成植物甾醇双键裂解。Menéndez - Carreño 等^[30]研究发现,豆甾醇在180℃的热处理过程中逐渐减少。Xu 等^[31]研究表明, β -谷甾醇在180℃烘烤2 h后含量降低到原来的25%。Leal - Castñeda 等^[32]则探讨了微波加热处理对植物甾醇含量的影响,结果显示:PSF(phytosterol film,PSF)体系中的甾醇在微波功率为1 000 W下处理30 min后大幅度降解,其含量仅为初始值的24%,具体表现为植物甾醇含量在1.5 min时显著下降,稳定一段时间后,持续快速减少;对于PS + TAG(a mixture of phytosterol and triolein)体系,在微波处理30 min后植物甾醇含量减少了68%,其中 β -谷甾醇、豆甾醇、菜油甾醇均表现为一致的降解趋势,并且不同的加热处理方式、植物甾醇初始含量、样品面积与容器体积等均会对植物甾醇的降解造成不同的影响。但由图4可知,当微波条件为704 W处理150 s、704 W处理210 s时,总植物甾醇含量比空白组分别增加了11.24 mg/100 g和2.36 mg/100 g,说明一定的微波处理能够促进植物甾醇向油中迁移。孔凡等^[33]研究发现,微波预处理的南瓜籽油中植物甾醇含量随微波功率增加先增加后减少,在微波条件为550 W处理9 min时达到最大,认为可能是由于微波辐射和热效应作用破坏了细胞结构,促进了更多植物甾醇的释放。

3 结论

利用微波对油莎豆进行稳态化处理,能有效控制油莎豆在贮藏过程中水分、脂肪酶活性和油莎豆油酸值和过氧化值的生长;同时,低温贮藏也可抑制油莎豆油的水解和氧化。适宜的微波强度能够促进更多的生育酚、总酚以及植物甾醇溶出;虽然植物甾醇在微波过程中较易受热降解,但保留率均不低于73.05%。本研究结果表明,微波预处理对油莎豆的安全贮藏和其油脂中脂质伴随物的溶出有积极作用,显示出微波技术在油莎豆产后减损和高效加工中具有较大的应用潜力,为优质油莎豆油产品的开发提供了数据支撑和一定的理论参考。

参考文献:

[1] ROSELLÓ - SOTO E, POOJARY M M, BARBA F J, et al. Tiger nut and its by - products valorization: From extraction of oil and valuable compounds to development of new healthy products[J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2018, 45: 306 - 312.

[2] 王志成,李双寿,梁雄,等. 中国油莎豆产业发展现状

与前景展望[J]. *科技和产业*, 2022, 22(1): 62 - 67.

[3] 杨向东,李子勇. 我国油莎豆产业发展现状、潜力及对策[J]. *中国油料作物学报*, 2022, 44(4): 712 - 717.

[4] 李志军,王绛,刘和,等. 油莎豆产业发展现状及建议[J]. *现代农业科技*, 2022(8): 225 - 231.

[5] CHUKWU O, AJISEGIRI E S A. Moisture - sorption isotherms of Bambara nut and tiger nut [J/OL]. *Int J Postharvest Technol Innov*, 2011, 2(2): 211 [2022 - 10 - 10]. <https://doi.org/10.1504/ijpti.2011.041042>.

[6] 朱文学,杨帆,刘玉兰. 油莎豆热风干燥特性及数学模型的研究[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(3): 91 - 97.

[7] CARVALHO G R, MONTEIRO R L, LAURINDO J B, et al. Microwave and microwave - vacuum drying as alternatives to convective drying in barley malt processing [J/OL]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2021, 73: 102770 [2022 - 10 - 10]. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102770>.

[8] 刘瑞,陶乐仁,万康. 微波处理对‘新大坪’马铃薯贮藏品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(5): 168 - 173.

[9] ROSE D J, PIKE O A. A simple method to measure lipase activity in wheat and wheat bran as an estimation of storage quality[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2006, 83(5): 415 - 419.

[10] KIZZIE - HAYFORD N, DABIE K, KYEI - ASANTE B, et al. Storage temperature of tiger nuts (*Cyperus esculentus* L.) affects enzyme activity, proximate composition and properties of lactic acid fermented tiger nut milk derived thereof [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2021, 137: 110417 [2022 - 10 - 10]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110417>.

[11] HOU H J, CHANG K C. Storage conditions affect soybean color, chemical composition and tofu qualities[J]. *J Food Process Pres*, 2004, 28(6): 473 - 488.

[12] GENKAWA T, UCHINO T, INOUE A, et al. Development of a low - moisture - content storage system for brown rice: Storability at decreased moisture contents [J]. *Biosyst Eng*, 2008, 99(4): 515 - 522.

[13] 杨荣武. 生物化学原理[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2018.

[14] 朱广飞,刘海,李卫,等. 油茶籽储藏品质变化规律及条件优化[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(2): 301 - 311.

[15] LAVANYA M N, SAIKIRAN K C S, VENKATACHALAPATHY N. Stabilization of rice bran milling fractions using microwave heating and its effect on storage [J]. *J Food Sci Technol*, 2019, 56(2): 889 - 895.

[16] 余诚玮,胡蓉,付泽建,等. 微波处理对米糠油品质的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(1): 141 - 146.

[17] 张岩岩. 微波辐照对全麦粉储藏稳定性与品质的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020.

- doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129786.
- [18] 王思思. 我国不同产地红花椒挥发性物质及香气特征分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [19] 马芸, 杨成, 嘉寇特, 等. 奇亚籽油储藏稳定性研究及货架期预测[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(12): 150-155.
- [20] WATANABE T, TERADA Y. Food compounds activating thermosensitive TRP channels in Asian herbal and medicinal foods [J]. J Nutr Sci Vitaminol, 2015, 61 (Suppl): S86-S88.
- [21] 方正, 高海燕, 赵镭, 等. 花椒油树脂加速贮藏期间麻味物质组成及麻感变化[J]. 中国调味品, 2019, 44(8): 1-6, 12.
- [22] 胡梓妍, 刘伟, 何双, 等. 基于HS-SPME-GC-MS法分析3种金橘的香气挥发性成分[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 176-184.
- [23] 李锦, 刘玉兰, 徐晨辉, 等. 花椒风味油的制取及品质研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(2): 24-31.
- [24] 高夏洁, 高海燕, 赵镭, 等. SPME-GC-MS结合OAV分析不同产区花椒炸花椒油的关键香气物质[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 208-214.
- [25] 张群琳, 李贵节, 程玉娇, 等. 冷磨橙皮油生产工艺中离心废水与精油的挥发性物质差异分析[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(23): 214-221.
- [26] 孙宝国, 陈海涛. 食用调香术[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2017.
- [27] 陈磊. 泡姜关键挥发性风味物质的鉴定及形成机理研究[D]. 成都: 西华大学, 2021.
- [28] 郝旭东, 张盛贵, 王倩文, 等. 四个不同地区大红袍花椒主体风味物质分析研究及香气评价[J]. 食品与发酵科技, 2021, 57(4): 63-74.
- [29] 高露, 赵镭, 史波林, 等. GC-MS结合气味活度值分析红花椒油的关键香气物质特征[J/OL]. 食品与发酵工业, 2023: 1-9[2022-10-10]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034195>
- [30] GU H W, YIN X L, MA Y X, et al. Differentiating grades of Xihu Longjing teas according to the contents of ten major components based on HPLC-DAD in combination with chemometrics[J/OL]. LWT-Food Sci Technol, 2020, 130: 109688[2022-10-10]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109688>.
-
- (上接第9页)
- [18] ZACHEO G, CAPPELLO M S, GALLO A, et al. Changes associated with post-harvest ageing in almond seeds[J]. LWT-Food Sci Technol, 2000, 33(6): 415-423.
- [19] 宋二立, 刘玉兰, 朱文学, 等. 原料品质和制油方法对油莎豆油综合品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(3): 99-103, 126.
- [20] 毛锐, 王欣, 成实, 等. 基于油脂过氧化值的脂质氧化诱导期分析及货架期预测[J]. 中国油脂, 2018, 43(8): 94-99.
- [21] 李波. 小麦胚芽脂质快速酸败机制及稳定化研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2017.
- [22] 郑畅, 杨湄, 周琦, 等. 微波预处理对葵花籽油和红花椒油品质的影响[J]. 中国油脂, 2016, 41(7): 39-42.
- [23] ÖZCAN M M, AL-JUHAIMI F, GHAFOOR K, et al. Effect of heating process on oil yield and fatty acid composition of wheat germ [J]. Qual Assur Saf Crops Foods, 2015, 7(4): 517-520.
- [24] 严俊安, 朱李佳, 于微, 等. 微波加热对食用油品质及脂肪酸成分的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(3): 110-115.
- [25] GUO T, WAN C, HUANG F, et al. Evaluation of quality properties and antioxidant activities of tiger nut (*Cyperus esculentus* L.) oil produced by mechanical expression or/with critical fluid extraction[J/OL]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 141: 110915[2022-10-10]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.110915>.
- [26] 王智. 制油过程对牡丹籽油的脂质伴随物及其品质的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- [27] POLTRONIERI P, SANTINO A, CIARMIELLO L F, et al. Application of microwave and RF in food processing, microorganisms and pest control [C]//2015 IEEE 15th Mediterranean Microwave Symposium (MMS). New York: IEEE, 2016: 1-4.
- [28] PATRICIA C M, BIBIANA D Y, JOSÉ P M. Evaluation of microwave technology in blanching of broccoli (*Brassica oleracea* L. var *botrytis*) as a substitute for conventional blanching[J]. Procedia Food Sci, 2011, 1: 426-432.
- [29] 罗凡, 陈志吉, 蓝丽丽, 等. 加热对油茶籽油及饼粕总酚及其抗氧化能力的影响[J]. 林业科学, 2020, 56(2): 61-68.
- [30] MENÉNDEZ-CARREÑO M, ANSORENA D, ASTIASARÁN I, et al. Determination of non-polar and mid-polar monomeric oxidation products of stigmaterol during thermo-oxidation[J]. Food Chem, 2010, 122(1): 277-284.
- [31] XU G, GUAN L, SUN J, et al. Oxidation of cholesterol and beta-sitosterol and prevention by natural antioxidants [J]. J Agric Food Chem, 2009, 57(19): 9284-9292.
- [32] LEAL-CASTAÑEDA E J, INCHINGOLO R, CARDENIA V, et al. Effect of microwave heating on phytosterol oxidation [J]. J Agric Food Chem, 2015, 63(22): 5539-5547.
- [33] 孔凡, 杨晨, 雷芬芬, 等. 微波预处理对压榨南瓜籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2021, 46(11): 1-6.