

微波预处理对芝麻油中芝麻木酚素含量及油脂品质的影响

盛冰莹¹, 陈振伟², 张晨霞¹, 马宇翔¹, 汪学德¹, 郑永战^{1,3}

(1. 河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001; 2. 合肥燕庄食用油有限责任公司, 合肥 231282; 3. 河南省农业科学院, 郑州 450002)

摘要: 为了确定高芝麻酚芝麻油的最适微波预处理条件, 将芝麻水分含量调节为 5 个梯度, 在不同微波预处理时间下制得芝麻油样品, 对其芝麻木酚素含量、酸值、茴香胺值、氧化诱导时间、脂肪酸组成、生育酚含量、有害物质(多环芳烃和杂环胺)含量及感官品质进行了分析, 探究芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油中芝麻木酚素含量及油脂品质的影响。结果表明: 微波预处理时间 6 min、芝麻水分含量 7% 条件下制得的芝麻油芝麻酚含量较高, 芝麻油酸值符合国家标准限定要求, 氧化稳定性较强, 有害物质杂环胺和多环芳烃含量处于适当的可控水平, 同时兼顾了芝麻油的固有风味, 消费者的喜爱度较高。综上, 高芝麻酚芝麻油的最适微波预处理条件为微波预处理时间 6 min, 芝麻水分含量 7%。

关键词: 芝麻油; 芝麻木酚素; 微波预处理; 水分含量; 油脂品质

中图分类号: TS224.2; TS222+.1 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2023)09-0007-09

Effects of microwave pretreatment on the sesame lignan content and quality of sesame oil

SHENG Bingying¹, CHEN Zhenwei², ZHANG Chenxia¹, MA Yuxiang¹,
WANG Xuede¹, ZHENG Yongzhan^{1,3}

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Hefei Yanzhuang Edible Oils Co., Ltd., Hefei 231282, China; 3. Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: To determine the optimal conditions of microwave pretreatment for sesamol-riched sesame oils, the moisture content of sesame seeds was adjusted to five gradients and sesame oil samples were produced under different microwave pretreatment time, and the sesame lignan content, acid value, anisidine value, oxidation induction time, fatty acid composition, tocopherol content, harmful substances (heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons) content and sensory quality of the oil were analyzed to investigate the effects of sesame seed moisture content and microwave pretreatment time on the sesame lignan content and quality of sesame oil. The results showed that when the microwave time was 6 min and the moisture content of sesame seeds was 7%, the sesame oil produced had a high sesamol

content, its acid value met the limited requirements of the national standards, the oxidative stability was strong, and the content of harmful substances including heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons was at an appropriate and controllable level. In addition, taking into account the inherent flavor of sesame oil, it was highly accepted by consumers. In summary, the

收稿日期: 2022-06-24; 修回日期: 2023-05-29

基金项目: 河南省重大科技专项(201300110600); 河南工业大学博士基金项目(2020BS007); 国家特色油料产业技术体系项目(CARS-14-1-29)

作者简介: 盛冰莹(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为油脂制取理论与加工(E-mail) bingyingsheng@126.com。

通信作者: 郑永战, 研究员(E-mail) sesame168@163.com。

optimal microwave pretreatment conditions for high sesamol sesame oil are microwave time 6 min and moisture content of sesame seeds 7%.

Key words: sesame oil; sesame lignan; microwave pretreatment; moisture content; oil quality

芝麻是世界上最古老的油料作物之一,数百年来广泛用于油脂的制取^[1]。芝麻中含有多种抗氧化生物活性物质,主要是以芝麻素和芝麻林素为代表的芝麻木酚素类化合物。在芝麻油加工过程中,芝麻林素会发生降解生成芝麻酚^[2]。芝麻酚比芝麻林素具有更强的抗氧化活性,具有抗突变、抗肝毒性、抗炎、抗衰老和化学预防的特性^[3]。动物试验证实,芝麻酚可以通过抑制脂质氧化从而起到保护小鼠肝组织、抗高血压及糖尿病的作用^[4-5]。芝麻酚可以通过减少氧化应激从而调节各种炎症因子如 iNOS、NF- κ B、MAPK、IL-1 β 信号通路从而起到抗炎作用^[5-6]。芝麻酚作为一种天然的木酚素类化合物,能够赋予油脂丰富的营养价值与生理活性功能。因此,通过适宜的油脂制取工艺条件,定向调控芝麻林素向芝麻酚转化,对提升产品的品质与营养价值具有重要意义。

研究表明,在芝麻焙烤及芝麻油精炼脱色过程中芝麻林素会不同程度地转化为芝麻酚,如:Yoshida 等^[7]研究温度对芝麻林素转化的影响时发现,焙烤温度对芝麻酚含量有显著影响,在焙烤温度 250 $^{\circ}$ C、焙烤时间 25 min 条件下芝麻林素全部转化为芝麻酚;石龙凯^[8]研究发现,高温压榨和水代芝麻油中芝麻酚的含量显著高于低温压榨芝麻油,却显著低于精炼芝麻油,这是由于在脱色过程中芝麻林素受酸性白土的作用降解生成了芝麻酚^[9];黄颖等^[10]研究发现,随着芝麻微波预处理时间的延长,芝麻油中芝麻酚含量逐渐升高,当微波预处理时间从 5 min 延长至 9 min 时,芝麻油中芝麻酚含量由 0.52 mg/100 g 升至 1.73 mg/100 g。因此,芝麻热处理可以作为提高芝麻油中芝麻酚含量的有效途径。

微波作为近些年新兴的油料加热方式,具有加热效率高、受热均匀、节能省时、无外来污染物等优点^[11-12]。同时,微波预处理还可以改善油脂的风味,提高油料的出油率及油脂的氧化稳定性、抗氧化物质的含量^[13-14]。然而,过于激烈的微波预处理也会带来一些不利的影 响,如影响油脂质量指标、油脂风味变差、有害物质的生成以及发生不同程度的氧化与水解^[15]。因此,选择适当合理的微波条件,在促进芝麻酚的生成、提升产品品质的同时控制有

害物质的生成,以保证油脂的食用安全是十分必要的。

本文研究了微波预处理时间和芝麻水分含量对芝麻油中芝麻木酚素、酸值、茴香胺值、氧化诱导时间、脂肪酸组成、生育酚、多环芳烃、杂环胺和感官品质的影响,通过全面的芝麻油品质评价体系,确定合适的微波条件,为高芝麻酚芝麻油的产品开发提供理论基础,为芝麻产业健康发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

驻芝 22 号芝麻(参照 GB/T 14489.1—2008 测定其初始水分含量为 5%),由河南省农业科学院芝麻研究中心提供。

芝麻木酚素标准品(芝麻林素、芝麻素、芝麻酚、细辛素,纯度 > 98%),2 种杂环胺单标(纯度 > 99%)9H-吡啶并[3,4-b]吡啶(Norharman)、1-甲基-9H-吡啶并[3,4-b]吡啶(Harman),上海源叶生物科技有限公司;16 种多环芳烃(PAH16)混标(质量浓度为 200 μ g/mL,纯度 > 98%),O2si 公司; γ -生育酚标准品(纯度 > 95%),美国 Sigma 公司;正己烷、异丙醇、甲醇、乙腈等均为色谱级试剂,美国 VBS 公司;试验用水由超纯制水器制得。

1.1.2 仪器与设备

LC-Si SPE 萃取柱,西格玛奥德里奇贸易有限公司;Cleanert PCX 萃取柱,天津博纳艾杰尔科技有限公司;Waters 2695 高效液相色谱仪、Waters 2475 荧光检测器,美国沃世特科技有限公司;Agilent 7890B 气相色谱仪,美国安捷伦科技有限公司;G90F25CSLV-C2(GO)微波炉,广东格兰仕微波生活电器制造有限公司;ZYJ9028 小型榨油机,江门市贝尔斯顿电器有限公司;UV-6000PC 紫外分光光度计,上海元析仪器有限公司;MTN-2800W 氮吹浓缩仪,天津奥特赛恩斯仪器公司;743 Rancimat 氧化酸败仪,瑞士万通公司;PFX-880/F 色差仪,英国罗维朋公司;Molcell1820d 摩尔细胞型超纯水器,重庆摩尔水处理设备公司。

1.2 试验方法

1.2.1 不同水分含量芝麻的制备

称取 200 g 芝麻于密封袋中,根据芝麻原料初

始水分含量计算大约需要添加的水量,将水倒入密封袋后放入 25 ℃ 烘箱内过夜至水分被完全吸收,参照 GB/T 14489.1—2008 测定此时芝麻的水分含量,再次加水调节,直至达到所需水分含量,最终共获得 5 个水分梯度(5%、7%、9%、11%、13%)的芝麻。

1.2.2 芝麻的微波预处理与芝麻油的制备

称取 200 g 芝麻于直径为 16 cm 的陶瓷碗中,在微波功率 720 W 条件下分别处理 5、6、7 min。将微波处理后的芝麻平铺在桌面上迅速冷却降温,再采用榨油机压榨制油,于 4 500 r/min 离心 10 min,取上清液过滤得到芝麻油,于 -4 ℃ 保存备用。

1.2.3 芝麻油中芝麻木酚素含量的测定

参照 Huang 等^[16]的方法,并作适当的修改。称取 0.5 g 芝麻油于 10 mL 容量瓶中,用正己烷-异丙醇溶液(体积比 98:2)溶解并定容至 10 mL,用 0.45 μm 有机滤膜过滤后待高效液相色谱测定。

色谱条件: Sunfire Prep Silica 色谱柱(4.6 mm × 250 mm, 5 μm),流动相为正己烷-异丙醇(体积比 98:2),柱温 30 ℃,流速 0.8 mL/min,进样量 10 μL,荧光检测器激发波长和检测波长分别为 295 nm 和 330 nm。

1.2.4 芝麻油的基本指标与氧化指标的测定

酸值测定参照 GB 5009.229—2016;茴香胺值测定参照 GB/T 24304—2009;色泽测定参照 GB/T 22460—2008;脂肪酸组成及含量测定参照 GB/T 17376—2008、GB/T 17377—2008 及刘玉兰等^[17]的方法;生育酚测定参照 GB/T 26635—2011 及刘玉兰等^[17]的方法。

氧化诱导时间的测定:利用氧化酸败仪在温度 110 ℃、空气流速 20 L/h、电导率 0~500 μS/cm 条件下对芝麻油的氧化诱导时间进行测定。

1.2.5 芝麻油中杂环胺含量的测定

参照邵斌等^[18]的方法采用高效液相色谱仪测定芝麻油中杂环胺含量。色谱条件: Waters

SunFire C18 色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm);柱温 30 ℃;进样量 10 μL;流动相 A 为 pH 3 的 10 mmol/L 甲酸铵甲酸溶液,流动相 B 为乙腈溶液(体积分数 99%),等度洗脱(85% A 和 15% B);流速 0.8 mL/min;荧光检测器激发波长和发射波长分别为 300 nm 和 440 nm。

1.2.6 芝麻油中多环芳烃含量的测定

参照 GB 5009.265—2016 采用高效液相色谱仪测定多环芳烃含量。色谱条件: PAH C18 反相键合固定相色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm);柱温 35 ℃;进样量 10 μL;流动相 A 为乙腈,流动相 B 为水;梯度洗脱程序为 0~8 min 60% A, 8~28 min 60% A~100% A, 29~35 min 100% A~60% A;流速 1.0 mL/min。

1.2.7 芝麻油的感官品质分析

挑选 10 名年龄在 21~26 岁之间经过培训的评价员(5 名男性和 5 名女性),对芝麻油的香气特征(生芝麻味、生青味、木质味、烤芝麻味、坚果味、焦香味、焦糊味、烟熏味、甜香气味、黏稠感、苦味)进行感官评价。要求评价员在 10 cm 长的标尺上对芝麻油的感官属性强度进行评分(0 表示不可感知,10 表示可强烈感知)。同时,对芝麻油的感官接受度即评价员对样品的整体喜爱程度进行评分(最低分为 0,最高分为 10)。样品按照随机顺序呈现,每品尝完一个样品后先咀嚼青苹果,再用水漱口,评分结束后进行统计分析。

1.2.8 数据统计与分析

采用 Excel 2019、SPSS 和 Origin 2021 进行数据统计分析和绘图,采用 Duncan 法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同微波条件对芝麻油理化指标的影响

2.1.1 对芝麻木酚素含量的影响

芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油中芝麻木酚素含量的影响如图 1 所示。

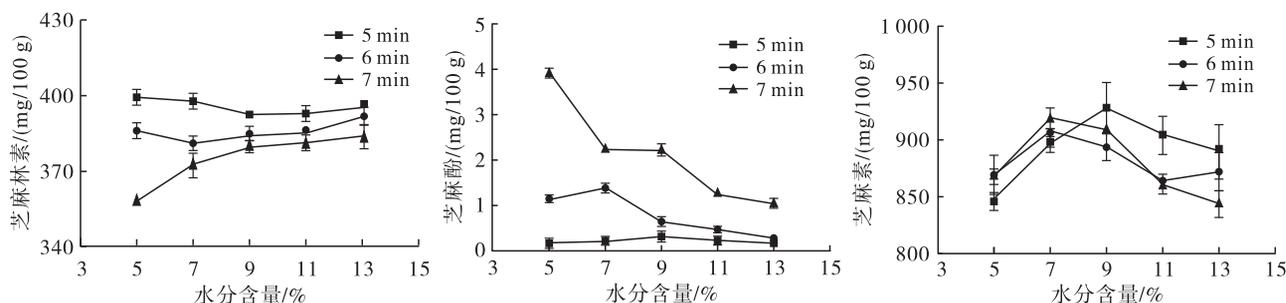


图 1 芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油中芝麻木酚素含量的影响

经检测,芝麻原料中芝麻林素和芝麻素含量分别为 405.3 mg/100 g 和 856.7 mg/100 g,而芝麻酚和细辛素未检出。微波预处理 5、6、7 min 时,芝麻表面温度分别为 180、195 °C 和 205 °C。由图 1 可知,芝麻林素的含量随微波预处理时间的延长呈下降趋势,而芝麻酚的含量随微波预处理时间的延长呈上升趋势。这是由于芝麻林素具有热不稳定性,在加热的条件下易转化为芝麻酚,并且加热程度越深,芝麻林素转化程度越深,生成的芝麻酚越多^[19]。微波预处理时间为 5 min 和 6 min 时,随着芝麻水分含量的增加,芝麻酚含量均呈先上升后下降的趋势,在水分含量为 9% 和 7% 时,芝麻酚的含量达到最大值,分别为 0.33、1.39 mg/100 g。这是由于水作为微波热效应的媒介物,介电系数较大,而微波对于物质的加热程度取决于物质对微波的吸收能力^[14],随着水分含量的增加,芝麻吸收的微波能量也逐渐增加,因此芝麻加热程度加深,芝麻

林素的转化率随之增加,芝麻酚的生成量增大;但随着芝麻水分含量的继续增大,过多的水分能够吸收热量并阻断热量传递,从而减弱了微波对于芝麻的加热程度,导致芝麻林素的转化率降低,从而使芝麻酚含量降低。上述结果说明将芝麻调节到适宜的水分含量会增加芝麻酚的生成量,这与马雪婷^[20]的研究结果相符。

通过对不同微波条件下芝麻素含量进行方差分析可知,本研究中芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻素含量的影响不显著($p > 0.05$),这与石龙凯^[8]的研究结果相符,这是由于芝麻素结构稳定,在加热条件下不易发生转化或分解。

2.1.2 对酸值、茴香胺值和氧化诱导时间的影响

芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油酸值、茴香胺值和氧化诱导时间的影响如图 2 所示。

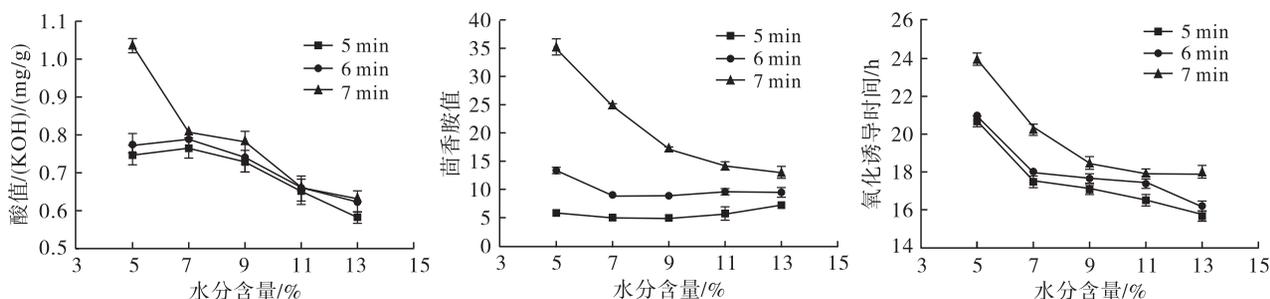


图 2 芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油酸值、茴香胺值和氧化诱导时间的影响

由图 2 可知,不同微波条件下制得的芝麻油酸值(KOH)在 0.58 ~ 1.04 mg/g 之间,符合一级芝麻油的国家标准(GB/T 8233—2018)限定要求(≤ 2.5 mg/g)。芝麻油的酸值随着微波预处理时间的延长而升高,这是由于在长时间的高温条件下,芝麻中的甘三酯水解生成游离脂肪酸所致。芝麻油的酸值随着芝麻水分含量的增加而降低,这可能是由于随着水分含量的增加,芝麻的加热程度降低,游离脂肪酸生成量减少所致。

由图 2 还可以看出,随着微波预处理时间的延长,芝麻油的茴香胺值呈上升的趋势,这是由于芝麻油中含有的不饱和脂肪酸在加热过程中易氧化生成氢过氧化物,随着加热时间的延长,氢过氧化物不稳定,分解产生二级生成物(包括挥发性的 α -不饱和醛类或 β -不饱和醛类)所致^[21]。

由图 2 还可以看出,随着微波预处理时间的延长,芝麻油的氧化诱导时间呈增大趋势,这是因为微波加热能够促进美拉德反应,产生具有抗氧化能力

的美拉德反应产物(MRPs),如类黑精、呋喃、噻吩等挥发性杂环化合物,从而增强了油脂的氧化稳定性^[14,22],再加上微波预处理时间的延长增加了芝麻酚等活性物质的生成,它们之间的协同作用共同增强了芝麻油的氧化稳定性。此外,芝麻油的氧化诱导时间随着芝麻水分含量的增加呈下降趋势,这可能是由于较高的水分含量下芝麻的加热程度降低,具有抗氧化能力的芝麻酚和美拉德反应产物生成量减少所致。

2.1.3 对脂肪酸组成的影响

芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油脂肪酸组成的影响如表 1 所示。

由表 1 可知,芝麻油中共检测出 6 种脂肪酸,脂肪酸组成以亚油酸(48.61% ~ 48.93%)和油酸(36.61% ~ 36.92%)为主,不饱和脂肪酸含量约为 86%。总体上看,微波预处理时间以及芝麻水分含量对芝麻油的脂肪酸组成没有显著影响($p > 0.05$)。

表1 芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油脂脂肪酸组成的影响

微波预处理时间/min	水分含量/%	脂肪酸含量/%					
		棕榈酸(C16:0)	棕榈油酸(C16:1)	硬脂酸(C18:0)	油酸(C18:1)	亚油酸(C18:2)	亚麻酸(C18:3)
5	5	9.21 ± 0.02	0.06 ± 0.01	4.69 ± 0.09	36.88 ± 0.21	48.68 ± 0.25	0.48 ± 0.02
	7	9.28 ± 0.04	0.06 ± 0.00	4.61 ± 0.02	36.72 ± 0.05	48.92 ± 0.02	0.41 ± 0.01
	9	9.30 ± 0.03	0.05 ± 0.01	4.59 ± 0.02	36.61 ± 0.12	48.91 ± 0.19	0.54 ± 0.02
	11	9.28 ± 0.08	0.08 ± 0.01	4.60 ± 0.03	36.92 ± 0.18	48.68 ± 0.22	0.45 ± 0.01
	13	9.25 ± 0.07	0.07 ± 0.00	4.62 ± 0.02	36.73 ± 0.04	48.93 ± 0.01	0.40 ± 0.12
6	5	9.36 ± 0.01	0.10 ± 0.04	4.64 ± 0.02	36.78 ± 0.02	48.68 ± 0.01	0.44 ± 0.00
	7	9.28 ± 0.08	0.07 ± 0.01	4.62 ± 0.00	36.73 ± 0.03	48.83 ± 0.09	0.48 ± 0.03
	9	9.24 ± 0.00	0.06 ± 0.00	4.64 ± 0.00	36.76 ± 0.02	48.88 ± 0.02	0.43 ± 0.00
	11	9.26 ± 0.08	0.05 ± 0.00	4.61 ± 0.00	36.81 ± 0.02	48.73 ± 0.09	0.54 ± 0.04
	13	9.34 ± 0.10	0.10 ± 0.04	4.60 ± 0.02	36.91 ± 0.06	48.61 ± 0.18	0.44 ± 0.00
7	5	9.35 ± 0.04	0.08 ± 0.02	4.59 ± 0.06	36.80 ± 0.04	48.70 ± 0.00	0.47 ± 0.04
	7	9.35 ± 0.12	0.05 ± 0.01	4.57 ± 0.06	36.76 ± 0.06	48.84 ± 0.24	0.43 ± 0.01
	9	9.28 ± 0.03	0.06 ± 0.00	4.62 ± 0.04	36.86 ± 0.01	48.76 ± 0.02	0.43 ± 0.08
	11	9.12 ± 0.12	0.07 ± 0.01	4.65 ± 0.03	36.84 ± 0.01	48.76 ± 0.05	0.56 ± 0.11
	13	9.28 ± 0.04	0.06 ± 0.00	4.63 ± 0.02	36.90 ± 0.15	48.67 ± 0.14	0.47 ± 0.03

2.1.4 对生育酚含量的影响

生育酚是一种天然抗氧化剂,它可以通过改变自由基链的自动氧化过程来抑制脂质氧化。芝麻油

中生育酚主要为 γ -生育酚。芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油中 γ -生育酚含量的影响如表2所示。

表2 芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油中 γ -生育酚含量的影响

微波预处理时间/min	不同水分含量下的 γ -生育酚含量/(mg/kg)				
	5%	7%	9%	11%	13%
5	303.28 ± 13.11	314.31 ± 16.16	320.06 ± 13.49	326.47 ± 14.09	334.93 ± 9.98
6	314.43 ± 6.49	327.78 ± 10.64	323.81 ± 4.90	336.89 ± 7.68	331.96 ± 18.75
7	321.56 ± 13.70	323.39 ± 3.07	307.89 ± 1.98	339.10 ± 11.40	331.69 ± 16.39

由表2可知,随着芝麻水分含量的增加,芝麻油中 γ -生育酚含量没有显著性变化($p > 0.05$),同时,随着微波预处理时间的延长,芝麻油中 γ -生育酚含量也没有显著性变化($p > 0.05$),这说明芝麻水分含量以及微波预处理时间对芝麻油中的营养成分 γ -生育酚没有显著影响。

2.1.5 对杂环胺含量的影响

芝麻在高温加热过程中会产生一些有害物质,杂环胺就是其中一类^[23]。杂环胺是蛋白质含量高的食品经高温处理后产生的一类具有致癌、致突变作用的化合物。芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油中杂环胺含量的影响如图3所示。

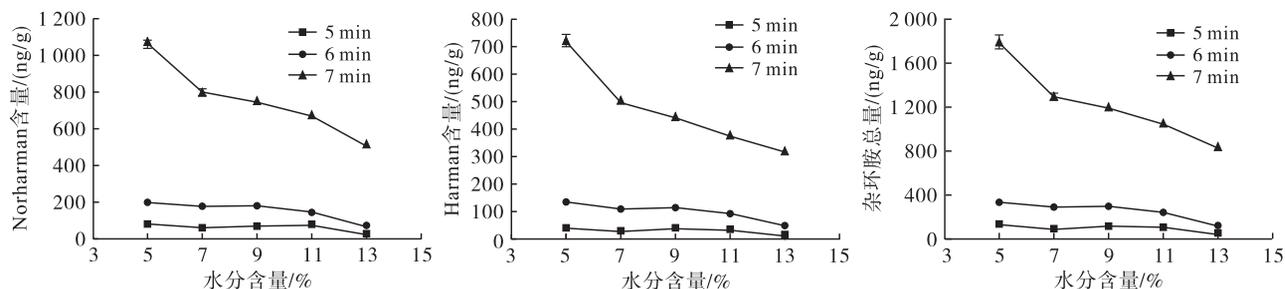


图3 芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油中杂环胺含量的影响

由图3可知,在微波预处理后的芝麻油中均检测到了Norharman和Harman两种杂环胺。当水分含量为5%、微波预处理5 min和6 min时,芝麻油中杂环胺总量分别为119.35 ng/g和334.40 ng/g,然而微波预处理时间延长至7 min时,其总量约为5 min时的15倍和6 min时的5.3倍。微波预处理时间与杂环胺的生成量之间呈指数关系,造成这一结果的原因是杂环胺含量易受温度的影响,而微波预处理时间的延长伴随着加热程度和温度的升高,造成杂环胺生成量增大^[24]。因此,控制微波预处理时间不超过6 min,能有效控制杂环胺的生成。本研究中杂环胺的生成量整体上随着水分含量的增加呈减

少的趋势,这说明适当调节水分含量在一定程度上可以抑制杂环胺的生成。尽管据Borgen等^[25]报道,含有水的反应体系中会形成更多的Norharman和Harman,本研究中杂环胺含量的降低可能是由于水分能吸收热量并阻断热量传递,缓和了微波升温效果。

2.1.6 对多环芳烃含量的影响

多环芳烃是由含有两个或两个以上苯环或环戊二烯稠合而成的化合物,是具有致癌、致畸、致突变性的一种有害物质^[26],在芝麻高温加热过程中会产生。芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油中多环芳烃含量的影响如表3所示。

表3 芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油中多环芳烃含量的影响

微波预处理 时间/min	多环芳烃	不同水分含量下的多环芳烃含量/(ng/g)				
		5%	7%	9%	11%	13%
5	萘	3.30 ± 0.20 ^a	3.17 ± 0.15 ^{ab}	2.93 ± 0.17 ^{ab}	2.90 ± 0.14 ^{ab}	2.64 ± 0.15 ^b
	芴	7.17 ± 0.23 ^a	6.92 ± 0.58 ^a	6.76 ± 0.12 ^a	4.80 ± 0.10 ^b	3.84 ± 0.03 ^b
	菲	35.93 ± 1.24 ^a	32.59 ± 1.24 ^a	33.06 ± 0.34 ^a	31.03 ± 2.38 ^a	22.92 ± 0.96 ^b
	蒽	5.96 ± 0.11 ^a	5.44 ± 0.24 ^b	4.81 ± 0.01 ^c	4.48 ± 0.07 ^c	3.93 ± 0.11 ^d
	芘	1.90 ± 0.11 ^a	1.86 ± 0.02 ^a	1.53 ± 0.02 ^b	1.58 ± 0.01 ^b	1.52 ± 0.12 ^b
	苯并[a]蒽	ND	ND	ND	ND	ND
	蒾	ND	ND	ND	ND	ND
	苯并[b]荧蒽	ND	ND	ND	ND	ND
	苯并[a]芘	ND	ND	ND	ND	ND
	合计	54.27 ± 1.89 ^a	49.98 ± 2.23 ^{ab}	49.09 ± 0.66 ^{ab}	44.79 ± 2.69 ^b	34.86 ± 1.36 ^c
6	萘	3.81 ± 0.23 ^a	3.03 ± 0.21 ^b	2.21 ± 0.22 ^c	1.63 ± 0.07 ^c	0.91 ± 0.01 ^d
	芴	7.47 ± 0.64 ^a	7.72 ± 0.36 ^a	6.60 ± 0.08 ^{ab}	5.40 ± 0.43 ^{bc}	4.94 ± 0.13 ^c
	菲	44.27 ± 2.81 ^a	40.44 ± 2.70 ^{ab}	35.09 ± 2.02 ^{bc}	29.99 ± 2.41 ^c	20.05 ± 1.27 ^d
	蒽	6.16 ± 0.01 ^a	5.67 ± 0.06 ^b	4.30 ± 0.01 ^c	4.28 ± 0.16 ^c	3.35 ± 0.03 ^d
	芘	3.16 ± 0.03 ^a	2.10 ± 0.04 ^b	1.98 ± 0.01 ^b	2.01 ± 0.07 ^b	1.11 ± 0.07 ^c
	苯并[a]蒽	ND	ND	ND	ND	ND
	蒾	ND	ND	ND	ND	ND
	苯并[b]荧蒽	ND	ND	ND	ND	ND
	苯并[a]芘	ND	ND	ND	ND	ND
	合计	64.86 ± 3.72 ^a	58.97 ± 3.37 ^{ab}	50.17 ± 2.34 ^{bc}	43.30 ± 3.14 ^c	30.35 ± 1.51 ^d
7	萘	4.35 ± 0.36 ^a	3.07 ± 0.24 ^b	2.93 ± 0.02 ^b	2.86 ± 0.16 ^b	2.64 ± 0.21 ^b
	芴	8.65 ± 0.55 ^a	7.38 ± 0.27 ^{ab}	7.42 ± 0.45 ^{ab}	6.78 ± 0.15 ^b	5.04 ± 0.05 ^c
	菲	63.53 ± 2.64 ^a	60.90 ± 2.82 ^a	46.97 ± 1.02 ^b	45.07 ± 1.98 ^b	27.18 ± 2.13 ^c
	蒽	7.16 ± 0.04 ^a	5.89 ± 0.25 ^b	3.72 ± 0.09 ^c	3.75 ± 0.23 ^c	3.44 ± 0.01 ^c
	芘	3.30 ± 0.02 ^a	2.30 ± 0.06 ^b	1.56 ± 0.07 ^c	1.57 ± 0.06 ^c	1.21 ± 0.03 ^d
	苯并[a]蒽	0.06 ± 0.01 ^a	0.05 ± 0.01 ^a	ND	ND	ND
	蒾	0.34 ± 0.02 ^a	0.02 ± 0.01 ^b	ND	ND	ND
	苯并[b]荧蒽	ND	ND	ND	ND	ND
	苯并[a]芘	ND	ND	ND	ND	ND
	合计	87.40 ± 3.64 ^a	79.61 ± 3.67 ^a	62.61 ± 1.64 ^b	60.03 ± 2.57 ^b	39.50 ± 2.43 ^c

注:ND表示未检出;同行数据不同字母上标表示差异显著($p < 0.05$)。下同

由表3可知,多环芳烃的总量随着微波预处理时间的延长而增加。尽管微波预处理时间对于多环芳烃总量的变化影响显著($p < 0.05$),但目前对于多环芳烃尚未有组织或国家对其含量做出明确的限定要求。欧洲食品安全局以苯并[a]蒽、蒽、苯并[b]荧蒽、苯并[a]芘4种多环芳烃的总和(PAH4)作为评判油脂中多环芳烃污染水平的重要指标。PAH4在微波预处理5 min和6 min的芝麻油中未

检测到,但当微波预处理时间延长至7 min时,芝麻水分含量为5%和7%时,PAH4含量分别为0.40 ng/g和0.07 ng/g,虽未超过欧盟的限量标准(10 ng/g),但还是对芝麻油的品质造成了不利的影响。

2.1.7 对感官品质的影响

2.1.7.1 对色泽的影响

芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油色泽的影响如表4所示。

表4 芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油色泽的影响

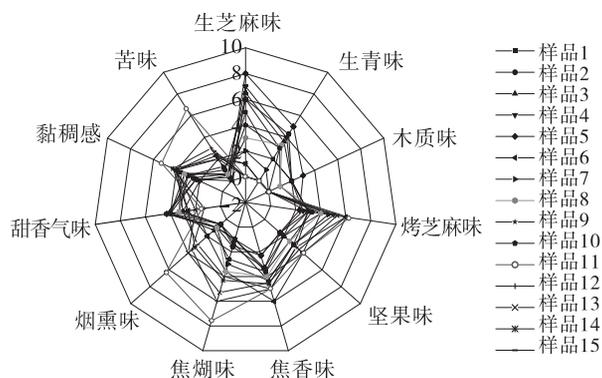
微波预处理时间/min	色泽	不同水分含量下的色泽				
		5%	7%	9%	11%	13%
5	红值	3.43 ± 0.09 ^a	3.53 ± 0.12 ^a	4.00 ± 0.08 ^b	3.57 ± 0.05 ^a	3.47 ± 0.09 ^a
	黄值	16.00 ± 0.00 ^a	17.25 ± 0.75 ^{ab}	18.40 ± 0.50 ^b	16.27 ± 0.05 ^a	16.87 ± 0.05 ^a
6	红值	5.00 ± 0.16 ^b	5.17 ± 0.12 ^b	4.97 ± 0.09 ^b	3.77 ± 0.05 ^a	3.67 ± 0.05 ^a
	黄值	28.33 ± 0.47 ^b	28.90 ± 1.93 ^b	20.47 ± 0.59 ^a	20.90 ± 0.10 ^a	20.90 ± 0.47 ^a
7	红值	9.97 ± 0.46 ^c	6.17 ± 0.24 ^b	5.57 ± 0.05 ^b	4.13 ± 0.05 ^a	4.03 ± 0.40 ^a
	黄值	71.20 ± 1.70 ^a	70.67 ± 0.47 ^a	70.83 ± 0.45 ^a	70.70 ± 0.14 ^a	72.60 ± 0.22 ^a

由表4可知,随着微波预处理时间的延长,芝麻油的红值和黄值也随之增大,这是由于随着加热时间的延长,芝麻中美拉德反应的程度加深,从而生成褐色含氮色素,即类黑精,导致芝麻油的色泽加深^[27]。当微波预处理6 min时,在低水分含量(5%~7%)条件下芝麻油的红值和黄值均变化不大,这可能是由于在美拉德反应初期,还原糖的羰基和游离氨基酸或蛋白质的氨基发生缩合反应,生成

中间产物,并未对芝麻油的色泽造成很大影响^[28];但随着水分含量的继续增大,芝麻油的红值和黄值呈现下降的趋势,这可能是由于水分含量的增加降低了微波的加热程度。

2.1.7.2 对感官属性评分和感官接受度的影响

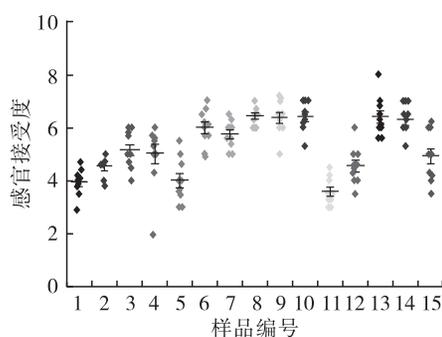
芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油感官属性和感官接受度的影响如图4所示。



注:样品编号1~5分别为水分含量5%、7%、9%、11%、13%的芝麻微波预处理5 min时的油样;6~10分别为水分含量5%、7%、9%、11%、13%的芝麻微波预处理6 min时的油样;11~15分别为水分含量5%、7%、9%、11%、13%的芝麻微波预处理7 min时的油样

图4 芝麻水分含量和微波预处理时间对芝麻油的感官属性和感官接受度的影响

由图4可知,随着微波预处理时间的延长,芝麻油的生芝麻味、生青味、木质味强度逐渐减弱,而烤芝麻味、坚果味、焦香味和焦糊味强度逐渐增强,这是由于随着微波预处理时间的延长,美拉德反应程度加深,芝麻油中特征风味物质的总含量呈现增加



的趋势,其中吡嗪类、吡咯类、呋喃类、酚类物质含量增多^[29]。当微波预处理7 min时,芝麻油呈现较重的焦糊味、烟熏味、苦味等令人不愉悦的味道,而微波预处理5 min时,芝麻油的生青味、生芝麻味较重,芝麻油的特征风味焦香味、烤芝麻味强度较低,

因此仅从芝麻油感官属性这一考察指标来说,适宜的微波预处理时间为6 min。同时,由芝麻油感官接受度评价结果可以发现,当微波预处理6 min时制得的芝麻油接受度普遍较高,这可能是由于微波预处理5 min时制得的芝麻油加热程度不够,缺少芝麻油特有的香气,而微波预处理7 min时加热程度过高,产生较大的焦糊味所致。

2.2 讨论

本文通过控制不同的微波预处理时间以及芝麻的水分含量来评估微波条件对芝麻油木酚素含量及油脂品质的影响。虽然微波预处理时间以及芝麻水分含量对芝麻油的酸值有显著影响($p < 0.05$),但都未超过国家标准的限定值。然而,微波预处理时间的延长能够增强芝麻油的氧化稳定性,而水分含量的增加会降低芝麻油的氧化稳定性。同时,微波预处理时间对芝麻油脂肪酸组成以及营养指标 γ -生育酚没有显著影响($p > 0.05$)。值得注意的是,微波预处理时间的延长能够增加芝麻酚的生成量,同时适量的水分也能够促进芝麻林素的转化,将微波预处理时间5 min和水分含量9%、微波预处理时间6 min和水分含量7%以及微波预处理时间7 min和水分含量5%作为生成高芝麻酚芝麻油的最佳微波条件。然而,过于激烈的加热会导致有害物质的生成量增加,考虑到微波处理的加热行为对杂环胺和多环芳烃的影响,为了能够尽可能降低芝麻油的食用安全风险,芝麻适宜的微波预处理时间应不超过6 min。同时,兼顾芝麻林素向芝麻酚转化程度、芝麻油氧化稳定性、色泽、风味等诸多方面,选取6 min为适宜的微波预处理时间。另外,综合考虑水分含量对芝麻酚生成以及油脂水解、氧化的影响,得出高芝麻酚芝麻油的最适微波预处理条件为芝麻水分含量7%、微波预处理时间6 min。在此条件下,芝麻林素向芝麻酚转化效率高、油脂品质好、有害物质生成量较少,同时具备较为强烈的芝麻油特殊风味。

3 结论

综合考虑微波预处理时间和芝麻水分含量对芝麻林素转化,芝麻油酸值、茴香胺值、营养成分、有害物质及色泽、感官风味等的影响,确定高芝麻酚芝麻油最适的微波条件为芝麻水分含量7%、微波预处理时间6 min。在最适条件下,芝麻酚含量达1.39 mg/100 g,芝麻油酸值满足国家标准要求,杂环胺和多环芳烃生成量较少,固有风味强烈,消费者喜爱度较高。

参考文献:

[1] LEE S W, JEUNG M K, PARK M H, et al. Effects of

roasting conditions of sesame seeds on the oxidative stability of pressed oil during thermal oxidation[J]. Food Chem, 2010, 118(3): 681-685.

- [2] SUJA K P, JAYALEKSHMY A, ARUMUGHAN C. Free radical scavenging behavior of antioxidant compounds of sesame (*Sesamum indicum* L.) in DPPH· system[J]. J Agric Food Chem, 2004, 52(4): 912-915.
- [3] MAJDALAWIEH A F, MANSOUR Z R. Sesamol, a major lignan in sesame seeds (*Sesamum indicum*): anti-cancer properties and mechanisms of action[J]. Eur J Pharmacol, 2019, 855: 75-89.
- [4] HSU D Z, CHEN K T, LI Y H, et al. Sesamol delays mortality and attenuates hepatic injury after cecal ligation and puncture in rats: role of oxidative stress[J]. Shock, 2006, 25(5): 528-532.
- [5] CHOPRA K, TIWARI V, ARORA V, et al. Sesamol suppresses neuro-inflammatory cascade in experimental model of diabetic neuropathy[J]. J Pain, 2010, 11(10): 950-957.
- [6] HSU D Z, CHEN Y W, CHU P Y, et al. Protective effect of 3,4-methylenedioxyphenol (sesamol) on stress-related mucosal disease in rats[J/OL]. Biomed Res Int, 2013, 2013: 481827[2022-06-24]. <https://doi.org/10.1155/2013/481827>.
- [7] YOSHIDA H, TAGAKI S. Effect of seed roasting temperature and time on quality characteristics of sesame (*Sesamum indicum* L.) oil[J]. J Sci Food Agric, 1997, 75: 19-26.
- [8] 石龙凯. 三种芝麻木脂素在典型油脂加工过程中的变化规律及其降脂机制探究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2019.
- [9] WAN Y, LI H, FU G, et al. The relationship of antioxidant components and antioxidant activity of sesame seed oil[J]. J Sci Food Agric, 2015, 95(13): 2571-2578.
- [10] 黄颖, 郭萍梅, 郑畅, 等. 微波预处理对芝麻油营养品质及抗氧化能力的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(2): 1-4.
- [11] SALAZAR-GONZÁLEZ C, SAN MARTÍN-GONZÁLEZ M F, LÓPEZ-MALO A, et al. Recent studies related to microwave processing of fluid foods[J]. Food Bioprocess Tech, 2012, 5(1): 31-46.
- [12] LEONELLI C, MASON T J. Microwave and ultrasonic processing: now a realistic option for industry[J]. Chem Eng Process, 2010, 49(9): 885-900.
- [13] RAIGAR R K, UPADHYAY R, MISHRA H N. Optimization of microwave roasting of peanuts and evaluation of its physicochemical and sensory attributes[J]. J Food Sci Tech Mys, 2017, 54(7): 2145-2155.

(下转第29页)

- [15] 王楠楠. 美拉德反应对芝麻油氧化稳定性的影响[D]. 郑州:河南工业大学, 2019.
- [16] 段蕾, 韩墨, 智娜, 等. 改良索氏提取法提取油莎豆油及红外光谱研究[J]. 吉林农业, 2019(16): 61.
- [17] 谢灏婷, 李子瑾, 胡吟, 等. 加速陈化中籼稻脂质代谢相关酶与品质的变化[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(2): 49-54, 92.
- [18] 华钦, 黄海军, 曹峰, 等. 控温和真空储藏对米糠稳定性的研究[J]. 粮食与食品工业, 2020, 27(5): 29-32, 35.
- [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] 宋永令, 王若兰, 穆垚. 小麦储藏过程中脂质代谢研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2014, 35(6): 19-24.
- [21] 邢朝宏. 油茶籽干燥、储藏及压榨制油工艺研究[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2012.
- [22] 刘宏超, 李俊, 王步军. 不同水分含量巴西大豆储存期间的品质变化[J]. 中国油脂, 2021, 46(1): 38-41.
- [23] 连四超, 刘玉兰, 陈璐, 等. 油莎豆油亚临界丁烷萃取条件优化及产品质量研究[J]. 中国油脂, 2022, 47(4): 9-14.
- [24] YEBOAH S O, MITEI Y C, NGILA J C, et al. Compositional and structural studies of the oils from two edible seeds: tiger nut, *Cyperus esculentum*, and asiato, *Pachira insignis*, from Ghana[J]. Food Res Int, 2012, 47(2): 259-266.
- [25] 刘玉兰, 王丹, 刘瑞花, 等. 萌动芝麻及萌动芝麻油的品质研究[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(3): 51-54.
- [26] PLAYER M E, KIM H J, LEE H O, et al. Stability of α -, γ -, or δ -tocopherol during soybean oil oxidation[J]. J Food Sci, 2006, 71(8): C456-C460.
- [27] 潘开林, 杨峻豪. 生育酚与生育三烯酚在油脂中稳定性研究[J]. 中国食品添加剂, 2018(1): 159-164.
- [28] SINELLI N, COSIO M S, GIGLIOTTI C, et al. Preliminary study on application of mid infrared spectroscopy for the evaluation of the virgin olive oil "freshness" [J]. Anal Chim Acta, 2007, 598(1): 128-134.
- [29] ONISZCZUK T, MATWIJCZUK A, MATWIJCZUK A, et al. Impact of storage temperature and time on Moldavian dragonhead oil - spectroscopic and chemometric analysis [J]. Open Chem, 2019, 17(1): 609-620.

(上接第14页)

- [14] 鞠阳. 微波处理对油料结构及油脂品质和风味的影响[D]. 郑州:河南工业大学, 2015.
- [15] 唐瑞丽. 大豆油储藏稳定性与预测研究[D]. 南京:南京财经大学, 2016.
- [16] HUANG L, LI J, BI Y, et al. Simultaneous determination of α -tocopherol, β -tocopherol, γ -tocopherol, δ -tocopherol, sesamin, sesamol, and asarinin in sesame oil by normal-phase high performance liquid chromatography[J/OL]. J Food Compos Anal, 2021, 104: 104132 [2022-06-24]. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104132>.
- [17] 刘玉兰, 邓金良, 张露, 等. 地下储油与地上储油对大豆油综合品质的影响[J]. 中国油脂, 2021, 46(11): 139-144, 152.
- [18] 邵斌, 彭增起, 杨洪生, 等. 固相萃取-高效液相色谱法同时测定传统禽肉制品中的9种杂环胺类化合物[J]. 色谱, 2011, 29(8): 755-761.
- [19] 王楠楠, 汪学德, 刘宏伟, 等. 焙炒对压榨芝麻油品质及抗氧化活性的影响研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(9): 7-11.
- [20] 马雪停. 芝麻油香气活性的分子组成与影响因素及储藏稳定性研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2021.
- [21] MEI Y, HUANG F, LIU C, et al. Influence of microwave treatment of rapeseed on minor components content and oxidative stability of oil [J]. Food Bioprocess Tech, 2013, 6(11): 3206-3216.
- [22] 王楠楠. 美拉德反应对芝麻油氧化稳定性的影响[D]. 郑州:河南工业大学, 2019.
- [23] ZHANG C X, XI J, ZHAO T P, et al. β -Carbolines norharman and harman in vegetable oils in China [J]. Food Addit Contam B, 2020, 13(3): 193-199.
- [24] 詹春怡, 李圣鑫, 步梓瑞, 等. 肉制品加工中杂环胺形成与抑制研究进展[J]. 农产品加工, 2019(4): 68-74.
- [25] BORGÉN E, SOLYAKOV A, SKOG K. Effects of precursor composition and water on the formation of heterocyclic amines in meat model systems [J]. Food Chem, 2001, 74: 11-19.
- [26] 田荣荣, 李子璇, 杨丹, 等. 食用油中多环芳烃类化合物的分析研究[J]. 粮食与食品工业, 2020, 27(5): 8-13.
- [27] 从珊, 张国治, 黄纪念, 等. 微波焙炒对水代芝麻油品质的影响[J]. 中国油脂, 2013, 38(8): 7-10.
- [28] YEN G C. Influence of seed roasting process on the changes in composition and quality of sesame (*Sesame indicum*) oil [J]. J Sci Food Agric, 1990, 50(4): 563-570.
- [29] 从珊, 黄纪念, 张丽霞, 等. 微波焙烤温度对芝麻油特征风味物质的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 265-268.