

热处理条件下米糠油中谷维素的损失规律研究

崔 玥, 赵 晨, 孙 聪, 梁少华

(河南工业大学 粮油食品学院, 郑州 450001)

摘要:旨在为米糠油的精准适度加工及其在食品工业中的应用提供科学指导,研究了常压和充氮加热(60~260℃)处理0~12 h条件下米糠油中谷维素及其4种主要组分[环木菠萝烯醇阿魏酸酯(CAFA)、24-亚甲基环木菠萝烯醇阿魏酸酯(24-MCAFA)、菜油甾醇阿魏酸酯(CampFA)及 β -谷甾醇阿魏酸酯(SitoFA)]的损失规律。结果表明:两种加热方式下谷维素及其4种主要组分的损失率随加热时间的延长均呈线性上升趋势($R^2 > 0.90$),损失速率随着加热温度升高而升高;在常压加热条件下,当温度达到220℃时谷维素开始快速损失,260℃下加热12 h时谷维素总量损失率最高(74.14%);谷维素4种主要组分在两种热处理过程中热稳定性相似,即不高于140℃时各组分之间热稳定性总体无显著差异,不低于180℃时各组分热稳定性大小顺序为CampFA > CAFA > 24-MCAFA > SitoFA;充氮加热下谷维素损失率变化趋势与常压加热下相似,但其损失率显著低于常压加热(除140℃和60℃),在220℃下加热12 h时两者相差最大(32.34百分点)。综上,米糠油应采用适度加工工艺及在食品工业应用中应合理控制加热条件以减少谷维素的损失,提高米糠油的营养品质。

关键词:谷维素;米糠油;加热处理;谷维素损失率;热稳定性

中图分类号:TS225;TS227

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2024)09-0059-07

Loss law of oryzanol in rice bran oil under heating treatment

CUI Yue, ZHAO Chen, SUN Cong, LIANG Shaohua

(College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming to provide scientific guidance for the precise and moderate processing of rice bran oil and its application in the food industry, the loss law of oryzanol and its four main components [cycloartenyl ferulate (CAFA), 24-methylene cycloartenyl ferulate (24-MCAFA), campesterol ferulate (CampFA), β -sitosterol ferulate (SitoFA)] in rice bran oil heated by atmospheric pressure heating and nitrogen-filled heating respectively under the conditions of heating temperature 60–260℃ and heating time 0–12 h was studied. The results showed that the loss rate of oryzanol and its four main components showed a linear increasing trend with the extension of heating time ($R^2 > 0.90$) under the two heating methods, and the loss rate was positively correlated with the heating temperature. Under the conditions of atmospheric pressure heating, oryzanol began to lose rapidly when the temperature reached 220℃, and the loss rate of oryzanol reached the highest (74.14%) when the temperature reached at 260℃ for 12 h. The thermal stability of the four main components of oryzanol was similar during the two heat treatment processes. There was overall no significant difference in the stability among the four components when the temperature was not higher than 140℃, whereas their stability was order as CampFA > CAFA > 24-

MCAFA > SitoFA when the temperature was not lower than 180℃. The variation trend of oryzanol loss rate under nitrogen-filled heating was similar to that under atmospheric pressure heating, whereas the loss rate under nitrogen-filled heating was significantly lower than that under atmospheric pressure heating (except for 140℃ and 60℃),

收稿日期:2023-03-21;修回日期:2024-04-29

基金项目:国家“十三五”重点研发基金资助项目(2018YFD0401100)

作者简介:崔 玥(1997),女,硕士研究生,研究方向为脂质化学(E-mail)1029058953@qq.com。

通信作者:梁少华,教授(E-mail)shaohualiang832@126.com。

and the difference was the highest (32.34 percentage) at 220 °C for 12 h. To sum up, rice bran oil should use moderate processing techniques and reasonable control heating conditions in food industry applications to reduce the loss of oryzanol, thereby enhancing the nutritional quality of rice bran oil.

Key words: oryzanol; rice bran oil; heating treatment; loss rate of oryzanol; thermal stability

米糠油是一种脂肪酸比例良好且富含多种活性物质的油脂^[1],这些活性物质主要包括生育酚^[2]、谷维素、角鲨烯^[3-4]、甾醇等^[5-6],其中谷维素含量一般在0.9%~2.9%之间^[7],并被作为米糠油区别于其他植物油的特征成分之一^[8]。谷维素是由阿魏酸和醇类物质(植物甾醇和三萜醇)组成的各类阿魏酸酯混合物,其4种主要组分分别为环木菠萝烯醇阿魏酸酯(CAFA)、24-亚甲基环木菠萝烯醇阿魏酸酯(24-MCAFA)、菜油甾醇阿魏酸酯(CampFA)及 β -谷甾醇阿魏酸酯(SitoFA)^[9]。不同阿魏酸酯单体的性质存在明显区别,这不仅赋予谷维素独特的生理活性,如降血脂、降低心脑血管疾病风险、抗炎^[10]、抗氧化等^[11-12],也赋予米糠油较好的氧化稳定性和营养特性。

米糠原油普遍存在色泽深、杂质多、酸值高等问题,因此需要脱胶、脱酸、脱色、脱臭、脱蜡等多道复杂的精炼工艺,其中脱酸和脱臭工序会造成谷维素的大量损失^[13-16]。刘军海等^[17]研究发现物理精炼会使米糠油中的谷维素含量从1.63%~2.72%降低到1.10%~1.74%。目前,关于食品加工过程中米糠油中谷维素含量变化情况的相关研究主要集中在煎炸过程中的变化^[18],如:刘玉兰等^[19]将米糠油用于煎炸油条,考察煎炸过程中米糠油中谷维素含量的变化,结果表明,米糠油在190 °C下连续煎炸32 h后,谷维素含量相对稳定;Mishra等^[20]研究发现在高温煎炸过程中米糠油中谷维素损失率不超过12%,稳定性较好。但在米糠油作为食品工业原料应用于不同场景时,热处理对谷维素及其4种主要组分的影响尚缺乏系统性研究。

在米糠油精炼和不同食品工业原料加工过程中,不同的精炼工序、加热方式、加热温度和热处理时间均会导致谷维素不同程度的损失,因此本文分别对米糠油进行不同温度常压加热与充氮加热处理,探究谷维素及其4种主要组分的热损失规律,以期为米糠油的精准适度加工及其在食品工业中的应用提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

米糠原油,益海(佳木斯)粮油工业有限公司;

乙腈,色谱级,上海麦克林生化科技有限公司;异丙醇、甲醇,色谱级,美国VBS有限公司;磷酸,洛阳市化学试剂厂;活性白土,山东三星玉米产业科技有限公司;冰乙酸、硫代硫酸钠、氧化锌、氢氧化钾、三氯甲烷、碘化钾等均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

LC-20A 高效液相色谱仪,日本株式会社岛津制作所;DF101S 集热式恒温加热磁力搅拌器、SZCL-2 数显智能控温磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司;XW-80A 涡旋振荡器,海门市其林贝尔仪器制造有限公司;SartoriusBSA224S 分析天平,赛多利斯科学仪器有限公司;HZT-A2000 电子天平,郑州华志科学仪器有限公司;RCT-basic-S025 恒温磁力加热搅拌器,德国IKA公司;LD5-10 台式低速离心机,上海安亭科学仪器厂;SHZ-D(III)循环水式真空泵,河南佰泽仪器有限公司;摩尔超纯水机,重庆摩尔水处理设备有限公司;OS20-S 标准型顶置式电子搅拌器,大龙兴创实验仪器股份公司。

1.2 实验方法

1.2.1 米糠原油前处理

称取一定量米糠原油于1 000 mL 圆底烧瓶中,加热至50 °C,加入适量80%磷酸溶液,搅拌反应20 min,然后加热至65 °C,调高搅拌速度,用小滴管缓慢加入磷脂含量2~3倍的水,保持恒定温度搅拌20~30 min。然后适当降低搅拌速度,促使胶体絮凝,待胶杂与油呈现明显分离状态时停止搅拌,离心分离脱水后得到脱胶米糠油。控制脱胶米糠油温度在70~80 °C,加入油质量3%的活性白土,在8 kPa下搅拌脱色20 min后,将油温降至70 °C以下,分离得脱胶脱色米糠油。

1.2.2 米糠油样品的常压加热处理

称取300 g 脱胶脱色米糠油于500 mL 三颈烧瓶中,将三颈烧瓶置于电加热套中分别在加热温度260、220、180、140、100、60 °C,转速600 r/min下加热,期间每隔一定时间取样检测谷维素及其各组分含量。

1.2.3 米糠油样品的充氮加热处理

称取300 g 脱胶脱色米糠油于500 mL 三颈烧瓶中,将三颈烧瓶置于电加热套中,并通过真空泵使三颈烧瓶保持真空环境2 min后关闭真空泵阀门,

打开氮气阀门通入氮气 2 min,重复以上操作 2 次,然后持续通入氮气。在加热温度 260、220、180、140、100、60 °C,转速 600 r/min 下加热,期间每隔一定时间取样检测谷维素及其各组分含量。

1.2.4 米糠油理化指标的测定

酸值,参照 GB 5009.229—2016 进行测定;过氧化值,参照 GB 5009.227—2016 进行测定;茴香胺值,参照 GB/T 24304—2009 进行测定;磷脂含量,参照 GB/T 5537—2008 进行测定。

1.2.5 米糠油中谷维素含量测定及损失率计算

参考文献[21]采用高效液相色谱法检测谷维素各组分的含量。称取一定量米糠油于 5 mL 容量瓶中,用异丙醇定容,经 0.22 μm 滤膜过滤,进高效液相色谱仪中测定谷维素各组分峰面积,代入标准曲线方程中计算谷维素各组分含量。高效液相色谱检测条件:Waters Symmetry C18 色谱柱(4.6 mm × 250 mm,5 μm);柱温 35 °C;流动相为甲醇-乙腈(体积比1:1),等度洗脱,流速 1 mL/min;紫外检测器波长 325 nm;进样量 10 μL;洗脱时间 50 min。

以加热处理前后米糠油中谷维素或其主要组分质量变化计算损失率。

1.2.6 数据处理

研究数据结果均以重复 2 次及以上平行实验的“平均值 ± 平均偏差”来表示,采用 SPSS 25.0 进行数据处理,所有数据采用 Origin 8.5 作图。

2 结果与讨论

2.1 脱胶脱色米糠油主要品质指标

脱胶脱色前后米糠油的谷维素含量、酸值、过氧化值、茴香胺值和磷脂含量测定结果如表 1 所示。

表 1 脱胶脱色前后米糠油主要品质指标

指标	米糠原油	脱胶脱色米糠油
谷维素含量/(g/100 g)		
CAFA	0.85 ± 0.03 ^a	0.79 ± 0.01 ^b
24-MCAFA	0.95 ± 0.07 ^a	0.88 ± 0.01 ^b
CampFA	0.16 ± 0.01 ^a	0.14 ± 0.00 ^b
SitoFA	0.21 ± 0.01 ^a	0.19 ± 0.00 ^b
合计	2.16 ± 0.07 ^a	2.00 ± 0.03 ^b
酸值(KOH)/(mg/g)	10.68 ± 0.35 ^a	11.16 ± 0.14 ^a
过氧化值/(mmol/kg)	2.14 ± 0.16 ^a	2.34 ± 0.03 ^a
茴香胺值	9.12 ± 0.16 ^a	8.99 ± 0.36 ^a
磷脂含量/(mg/g)	11.73 ± 0.07 ^a	1.74 ± 0.02 ^b

注:同一指标不同字母表示差异显著($p < 0.05$)

由表 1 可看出,与米糠原油相比,脱胶脱色米糠油中谷维素总量及其 4 种主要组分含量均下降,酸值、过氧化值略有升高,茴香胺值略有降低,但三者

变化均不大,磷脂含量显著下降。脱胶脱色米糠油的过氧化值没有显著变化的原因可能是脱胶脱色阶段的加热条件使米糠油发生氧化反应生成氢过氧化物,但同时活性白土的吸附作用也会使米糠油中氢过氧化物减少^[22]。

2.2 常压加热过程中米糠油中谷维素的损失规律

2.2.1 谷维素总量的损失规律

图 1 为常压加热过程中米糠油中谷维素总量的损失情况。

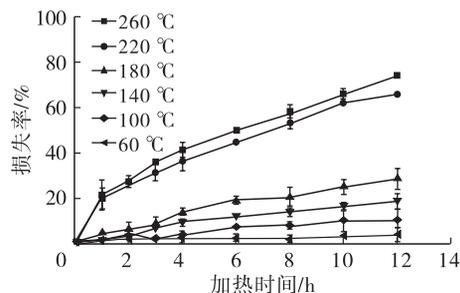


图 1 常压加热过程中米糠油中谷维素总量的损失情况

由图 1 可知,在不同加热温度条件下谷维素总量损失率均随着加热时间的延长呈上升的趋势,且加热温度越高,谷维素损失速率越快。米糠油在 260、220、180、140、100、60 °C 加热 12 h 时,谷维素总量损失率分别为 74.14%、65.56%、28.28%、18.45%、10.15%、3.53%。在米糠油常压加热处理过程中,热作用会导致谷维素裂解损失和自身氧化损失^[23];另外,米糠油在加热过程中发生脂质氧化反应产生自由基,谷维素通过为自由基提供氢原子,使氧化反应的链传递中断,也造成了谷维素的损失^[24-25]。

2.2.2 谷维素 4 种主要组分的损失规律

图 2 为常压加热过程中米糠油中谷维素 4 种主要组分的损失情况。

由图 2 可知,加热温度和加热时间均对谷维素 4 种主要组分的损失率有显著影响。在 60 ~ 260 °C 范围内常压加热 2 ~ 12 h,CAFA、24-MCAFA、CampFA、SitoFA 的损失率分别在 2.44% ~ 71.77%、2.28% ~ 75.37%、4.22% ~ 62.24%、2.09% ~ 90.43% 范围内变化。米糠油在 140 °C 以上加热 12 h 时,谷维素 4 种主要组分热稳定性大小为 CampFA > CAFA > 24-MCAFA > SitoFA,在 140 °C 及以下加热 12 h 时,谷维素的 4 种主要组分热稳定性无显著差异。油脂加热过程中谷维素是作为清除自由基的抗氧化剂被降解^[23],而抗氧化剂的活性主要取决于其碳碳双键的结构^[26],4 种阿魏酸酯在甾醇部分都有一个双键,但是双键位置的不同会导致 4 种阿魏酸酯抗氧化活性不同。

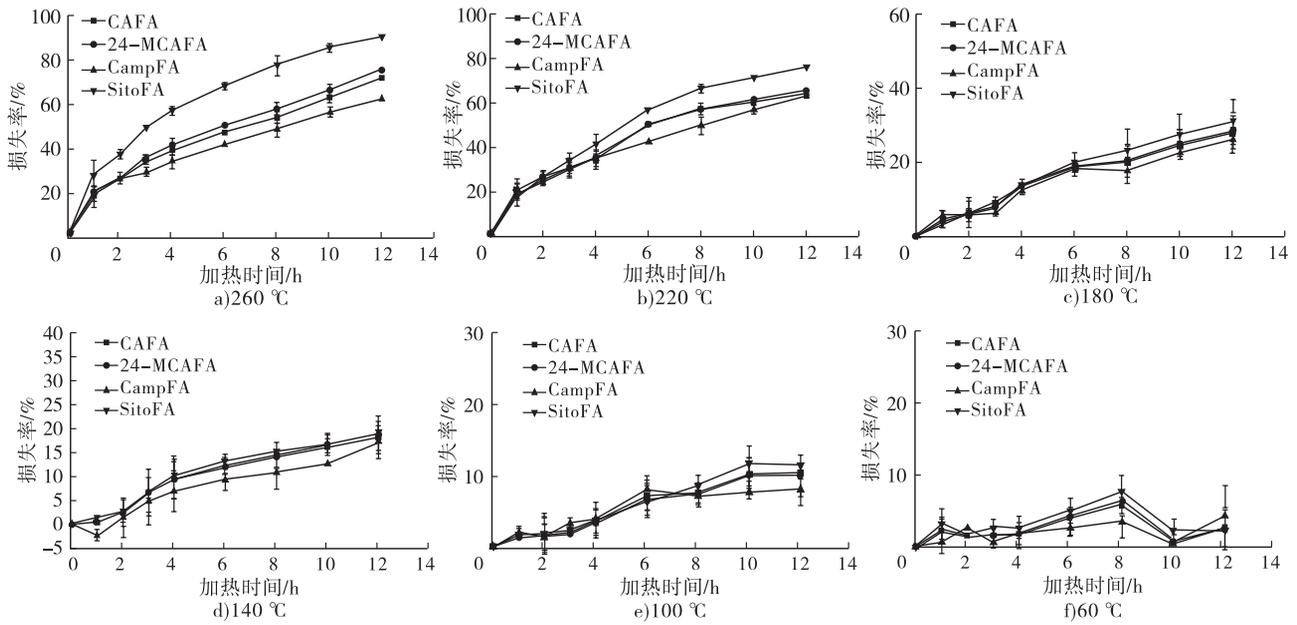


图2 常压加热过程中米糠油中谷维素4种主要组分的损失情况

2.3 充氮加热过程中米糠油中谷维素的损失规律

2.3.1 谷维素总量的损失规律

图3为充氮加热过程中米糠油中谷维素总量的损失情况。

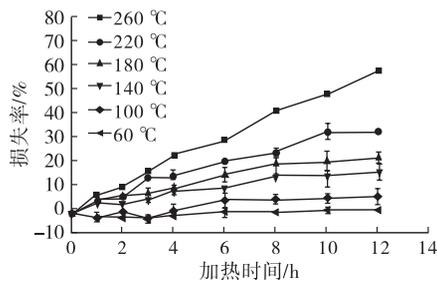


图3 充氮加热过程中米糠油中谷维素总量的损失情况

由图3可知,在米糠油充氮加热过程中,加热时

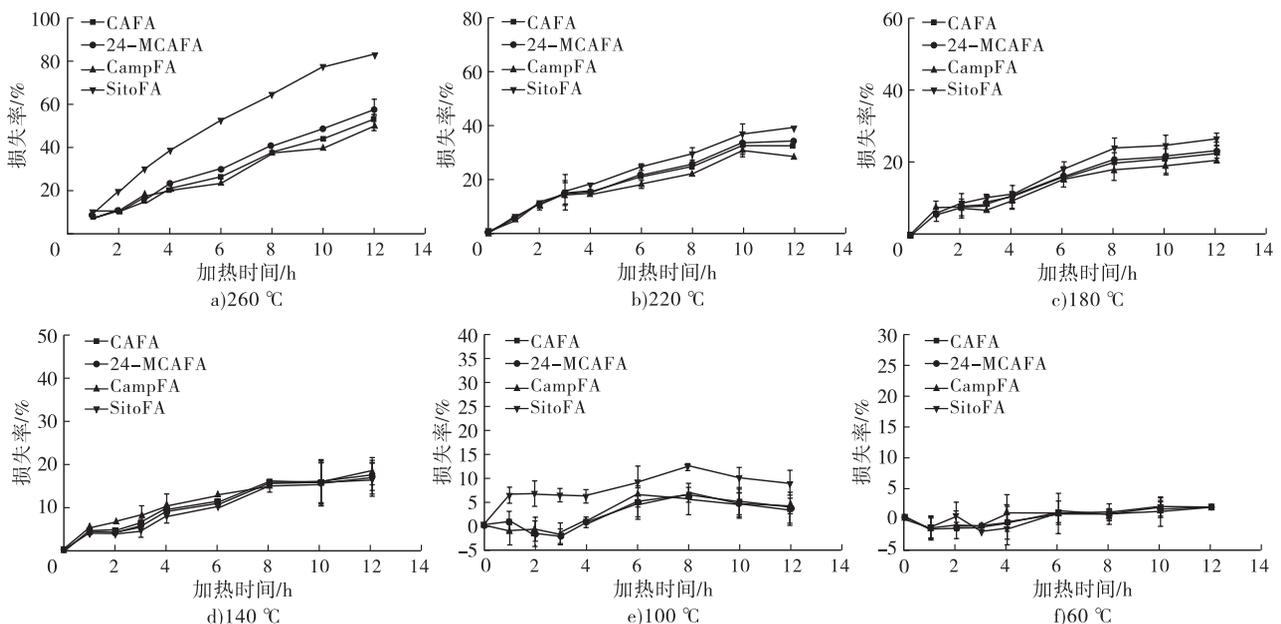


图4 充氮加热过程中米糠油中谷维素4种主要组分的损失情况

间和加热温度均对谷维素总量的损失率有显著影响。谷维素总量损失率随着加热时间的延长及加热温度升高而增加。米糠油在260、220、180、140、100、60 °C加热12 h时,谷维素总量损失率分别为57.52%、33.22%、22.83%、17.17%、7.08%、1.82%。在米糠油充氮加热过程中,谷维素的损失主要是由于热裂解作用^[27],其次是谷维素为自由基提供氢原子,使氧化反应的链传递中断,造成的损失^[24-25]。

2.3.2 谷维素4种主要组分的损失规律

图4为充氮加热过程中米糠油中谷维素4种主要组分的损失情况。

由图4可知,在米糠油充氮加热过程中,加热时间和加热温度均对谷维素4种主要组分的损失率有显著影响,相同加热时间条件下谷维素4种主要组分损失率均随着加热温度的升高而增加。在设定温度内加热6~12 h时,CAFA、24-MCAFA、CampFA、SitoFA的损失率分别在1.83%~53.42%、1.95%~57.54%、1.82%~49.84%、1.67%~82.76%范围内变化。米糠油在180℃及以上充氮加热12 h时,谷维素4种主要组分热稳定性大小为CampFA>CAFA>24-MCAFA>SitoFA,米糠油在180℃以下充氮加热12 h时,谷维素4种

主要组分的损失速率无显著差异。加热温度越高,谷维素4种主要组分的损失速率相差越大。造成这种现象的原因与其中阿魏酸酯单体结构的不同有关^[28]。

2.4 两种加热方式下谷维素及其主要组分损失率与加热时间的线性拟合

为了明确谷维素损失率与加热时间的关联关系,以加热时间(x)为横坐标,谷维素总量及其4种主要组分损失率(y)为纵坐标绘制曲线,并进行线性拟合,结果如表2所示。

表2 两种加热方式下谷维素及其主要组分损失率与加热时间的线性拟合方程及相关系数(R^2)

温度/℃	谷维素	常压加热		充氮加热	
		拟合方程	R^2	拟合方程	R^2
260	总量	$y = 4.664x + 19.747$	0.986 8	$y = 4.542x + 3.578$	0.994 4
	CAFA	$y = 4.511x + 18.437$	0.988 8	$y = 4.197x + 2.790$	0.995 3
	24-MCAFA	$y = 4.787x + 19.246$	0.988 0	$y = 4.580x + 3.063$	0.996 3
	CampFA	$y = 3.821x + 17.754$	0.993 1	$y = 3.614x + 5.331$	0.976 7
	SitoFA	$y = 5.609x + 29.427$	0.949 7	$y = 6.686x + 8.627$	0.977 9
220	总量	$y = 4.248x + 17.749$	0.987 7	$y = 2.662x + 4.025$	0.960 6
	CAFA	$y = 4.175x + 18.282$	0.953 7	$y = 2.444x + 5.460$	0.968 8
	24-MCAFA	$y = 4.464x + 16.286$	0.956 4	$y = 2.573x + 5.191$	0.972 8
	CampFA	$y = 3.821x + 17.754$	0.993 1	$y = 2.101x + 5.614$	0.929 1
	SitoFA	$y = 5.474x + 16.522$	0.953 9	$y = 3.043x + 4.701$	0.982 7
180	总量	$y = 2.225x + 2.734$	0.970 1	$y = 1.682x + 4.466$	0.960 9
	CAFA	$y = 2.186x + 2.845$	0.967 8	$y = 1.642x + 4.422$	0.960 2
	24-MCAFA	$y = 2.250x + 2.694$	0.970 1	$y = 1.709x + 4.352$	0.963 2
	CampFA	$y = 1.965x + 3.002$	0.947 4	$y = 1.400x + 4.867$	0.927 2
	SitoFA	$y = 2.542x + 2.166$	0.979 5	$y = 2.005x + 4.487$	0.957 0
140	总量	$y = 1.585x + 0.729$	0.939 8	$y = 1.296x + 2.894$	0.948 0
	CAFA	$y = 1.631x + 0.724$	0.941 6	$y = 1.304x + 3.063$	0.949 0
	24-MCAFA	$y = 1.559x + 0.833$	0.937 5	$y = 1.230x + 2.601$	0.941 5
	CampFA	$y = 1.533x - 1.252$	0.935 8	$y = 1.152x + 4.664$	0.970 0
	SitoFA	$y = 1.576x + 1.588$	0.926 2	$y = 1.357x + 1.792$	0.931 8

注:加热温度为100℃和60℃时,线性拟合效果差,因此表中未列出

由表2可知,在常压和充氮两种加热方式下,谷维素总量及其4种主要组分损失率与加热时间的线性拟合结果相似。当加热温度达140℃及以上时,常压和充氮加热方式下米糠油中谷维素总量及其4种主要组分的损失率与加热时间线性方程相关系数(R^2)分别为0.926 2~0.993 1和0.927 2~0.996 3,均大于0.90,表明谷维素在加热过程中对温度和时间变化具有敏感性,也说明了米糠油脱臭工序中谷维素的损失可以通过降低脱臭温度与缩短脱臭时间进行改善,从而提高米糠油的营养价值。

2.5 两种加热方式下谷维素及其主要组分损失率的比较分析

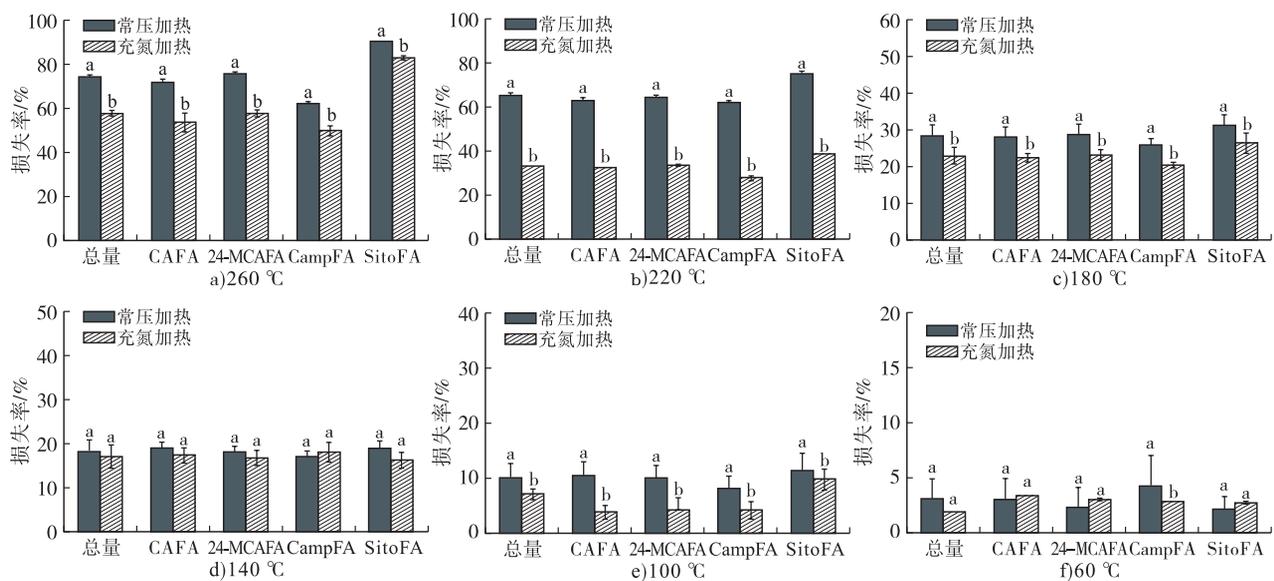
图5为常压和充氮方式下加热12 h时米糠油中谷维素及其4种主要组分损失率的比较情况。

由图5可知,常压加热下米糠油中谷维素总量及其4种主要组分的损失率显著高于充氮加热(除140℃和60℃),其中在260℃下常压加热和充氮加热12 h时谷维素总量损失率分别为74.14%、57.52%,两者相差16.62个百分点。造成这种现象的原因主要是在常压加热过程中,谷维素不仅会受到

热裂解作用,还会与氧气接触从而受到热氧化作用,但在充氮加热过程中油脂氧化产生自由基的速率减缓,降低了谷维素的损失。

由图 5 还可知,加热温度对两种加热方式下谷维素损失率的差异也有显著影响,其中在 220 °C 下加热 12 h 时,两种加热方式下谷维素总量及其 4 种主要组分损失率的差异最大,其中谷维素总量差异可达 32.34 百分点,显著高于在 180 °C 下加热 12 h 时两种加热方式下的谷维素总量差异(5.45 百分点)。这可能是由于谷维素自身热氧化程度随着温度上升而不断增加^[29],且随着温度的升高和时间的延长,米糠油中谷维素的裂解和气流夹带损失呈增

大趋势^[30]。但 260 °C 时两种加热方式下米糠油中谷维素及其 4 种主要组分损失率的差异明显小于 220 °C 时的。这可能是因为两种加热方式的区分主要是加热时的气体环境不同,在 260 °C 时谷维素的损失方式以热裂解为主,这主要与酯键、双键和甲氧基的分解过程有关,而气体环境对此过程影响较小。140 °C 及 60 °C 时两种加热方式下谷维素总量及其 4 种主要组分损失率总体无明显差异,主要因为加热温度降低,脂质氧化反应速率减缓。而 100 °C 时两种加热方式下谷维素总量及其 4 种主要组分损失率有显著差异,有待进一步分析研究。



注:不同字母表示组内差异显著($p < 0.05$)

图 5 两种加热方式下米糠油中谷维素及其主要组分损失率的比较分析

3 结论

本文通过在常压和充氮两种条件下对米糠油进行不同温度的加热处理,研究了不同加热处理条件下米糠油中谷维素及其 4 种主要组分的损失规律。结果发现,两种加热方式下谷维素损失率随加热时间的延长均呈线性上升趋势,且在 220 °C 开始快速损失。谷维素的 4 种主要组分在加热温度不低于 180 °C 时热稳定性大小顺序为 CampFA > CAFA > 24-MCAFA > SitoFA, 260 °C 常压加热 12 h 时 SitoFA 损失率最高(90.43%),而 CampFA 损失率最高仅为 62.24%。相同加热条件下常压加热的谷维素总量及其 4 种主要组分损失率显著高于充氮加热(除 140、60 °C),220 °C 下加热 12 h 时两种加热方式下谷维素总量损失率相差最大(32.34 百分点)。

本研究明晰了两种加热方式下米糠油中谷维素及其 4 种主要组分的损失规律,但对谷维素的热裂解产物和热氧化产物还有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 左青, 钱胜峰, 彭伟城, 等. 米糠稳定化技术和米糠功能性应用[J]. 粮食与食品工业, 2019, 26(1): 5-9.
- [2] 侯景芳. 米糠油的功用及品质变化研究[J]. 农产品加工: 学刊, 2014(8): 39-40.
- [3] 张光杰, 杨利玲, 袁超, 等. 角鲨烯开发及应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(12): 7-10.
- [4] RAVIKUMAR S, YAMAUCHI I, NARAYAN B, et al. Squalene modulates fatty acid metabolism: Enhanced EPA/DHA in obese/diabetic mice ($KK-A^y$) model[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2016, 118(12): 1935-1941.
- [5] ZHANG H W, BAI X L. Optimization of extraction conditions for phytic acid from rice bran using response surface methodology and its antioxidant effects[J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(2): 371-376.
- [6] 彭建, 陈刘浦, 贝亦江, 等. 植物甾醇的生理功能及在动物生产中的应用[J]. 饲料研究, 2021, 44(5): 152-154.
- [7] 朱云. 弱酸取代法在谷维素提取中的应用[J]. 粮食与

- 食品工业, 2019, 26(4): 41-43.
- [8] 刘壮, 李钟, 刘萱, 等. 国内外米糠油的品质研究[J]. 中国油脂, 2023, 48(10): 143-149.
- [9] CHO Y H, LIM S Y, REHMAN A, et al. Characterization and quantification of γ -oryzanol in Korean rice landraces [J]. J Cereal Sci, 2019, 88: 150-156.
- [10] AKIHISA T, YASUKAWA K, YAMAURA M, et al. Triterpene alcohol and sterol ferulates from rice bran and their anti-inflammatory effects[J]. J Agric Food Chem, 2000, 48(6): 2313-2319.
- [11] CHOTIMARKORN C, USHIO H. The effect of *trans*-ferulic acid and *gamma*-oryzanol on ethanol-induced liver injury in C57BL mouse[J]. Phytomedicine, 2008, 15(11): 951-958.
- [12] 余诚玮, 邓施璐, 温志刚, 等. 米糠及其脂肪酶的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(2): 297-305.
- [13] 武家琪. 精炼工艺对高酸值米糠油谷维素含量及色泽的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2020.
- [14] 刘雄, 阚健全, 陈宗道. 高酸值植物油脱酸工艺探讨[J]. 中国油脂, 2002, 27(3): 24-26.
- [15] 王亚东. 米糠油物理脱酸工艺条件对谷维素含量的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013.
- [16] 陈园顺. 米糠混合油精炼及营养米糠油生产工艺研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
- [17] 刘军海. 毛米糠油精炼对谷维素含量的影响[J]. 四川粮油科技, 2002(4): 13-16.
- [18] 王莹辉. 米糠油的煎炸应用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
- [19] 刘玉兰, 王莹辉, 李时军. 煎炸米糠油营养成分及煎炸油条品质分析[J]. 中国油脂, 2014, 39(3): 28-32.
- [20] MISHRA R, SHARMA H K. Effect of frying conditions on the physico-chemical properties of rice bran oil and its blended oil[J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(6): 1076-1084.
- [21] 朱琳, 薛雅琳, 张东, 等. 高效液相色谱法测定米糠油中谷维素[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(5): 38-43.
- [22] 曹小峰. 精炼过程及储存条件对高酸价米糠油品质的影响[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2014.
- [23] 陶建明. 基于谷维素热稳定性的稻米油油炸品质变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [24] NYSTRÖM L, ACHRENIUS T, LAMPI A M, et al. A comparison of the antioxidant properties of steryl ferulates with tocopherol at high temperatures [J]. Food Chem, 2007, 101(3): 947-954.
- [25] AKIYAMA Y, HORI K, TAKAHASHI T, et al. Free radical scavenging activities of *gamma*-oryzanol constituents [J]. Food Sci Technol Res, 2005, 11(3): 295-297.
- [26] RACZYK M, KMIECIK D, PRZYBYLSKI R, et al. Effect of fatty acid unsaturation on phytosteryl ester degradation [J]. J Am Oil Chem Soc, 2017, 94(5): 701-711.
- [27] KHUWJITJARU P, YUENYONG T, PONGSAWATMANIT R, et al. Effects of ferric chloride on thermal degradation of γ -oryzanol and oxidation of rice bran oil[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2011, 113(5): 652-657.
- [28] 王晓萍. 化学法合成 β -谷甾醇脂肪酸酯的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.
- [29] 赵征美. 谷维素和生育酚对米糠油热氧化性能的影响研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2021.
- [30] 梁少华, 林敏刚, 赵西周, 等. 米糠油物理精炼过程中脱臭对其谷维素含量的影响[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(2): 77-80.
-
- (上接第58页)
- [28] 陈杭君, 李兴飞, 郜海燕, 等. 山核桃仁多酚组分分析及抗氧化研究[J]. 核农学报, 2013, 27(1): 61-67.
- [29] WU X, BEECHER G R, HOLDEN J M, et al. Lipophilic and hydrophilic antioxidant capacities of common foods in the United States [J]. J Agric Food Chem, 2004, 52(12): 4026-4037.
- [30] KORTENSKA V D, YANISHLIEVA N V, KASAIKINA O T, et al. Phenol antioxidant efficiency in various lipid substrates containing hydroxy compounds[J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2002, 104(8): 513-519.
- [31] 周婷, 李志健. 不同介质热处理对油脂酸值和羰基值的影响[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(2): 40-43.
- [32] 陈锋亮, 魏益民, 钟耕. 大豆油高温煎炸变质过程的研究[J]. 中国油脂, 2006, 31(8): 19-22.
- [33] 张若梅. 油脂抗氧化稳定性测试[J]. 粮油食品科技, 2001, 9(4): 13-14.
- [34] GRILO F S, WANG S C. Walnut (*Juglans regia* L.) volatile compounds indicate kernel and oil oxidation [J/OL]. Foods, 2021, 10(2): 329 [2024-01-09]. <https://doi.org/10.3390/foods10020329>.
- [35] 庞晓慧, 李俊健, 吴俏瑾, 等. 美藤果油、亚麻籽油和紫苏籽油氧化稳定性对比研究[J]. 中国油脂, 2021, 46(1): 32-37.
- [36] 徐飞, 石爱民, 刘红芝, 等. 核桃油中脂肪酸和内源抗氧化物质含量及其氧化稳定性相关性分析[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(3): 53-58.
- [37] 朱雪梅, 吴俊锋, 胡蒋宁, 等. α -生育酚在花生油、芝麻油和菜籽油中的抗氧化效能[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(10): 85-90.
- [38] 佟云伟, 陈凤香, 杨波涛. 不同食用植物油氧化稳定性的研究[J]. 中国油脂, 2009, 34(2): 31-34.
- [39] 王亚杰, 韩佳佳, 谭志发, 等. 制备工艺对油莎豆油理化性质、营养成分和氧化稳定性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 64-71.