

不同储藏方式的熟化小米粉的氧化劣变分析

李诗炜,张 晖*,钱海峰,王 立,齐希光

(江南大学食品学院,江苏无锡 214122)

摘要:以小米为实验材料,利用挤压膨化技术熟化,对熟化后的小米粉进行普通包装、真空包装和添加抗氧化剂L-抗坏血酸棕榈酸酯普通包装处理,研究不同储藏方式对小米粉的脂肪酸值、过氧化值、丙二醛值、脂肪含量和脂肪酸含量变化的影响。结果表明:在储藏期间,不同储藏方式的熟化小米粉的脂肪酸值、过氧化值和丙二醛值均呈上升趋势,且均可通过一级动力学方程模拟,熟化小米粉在储藏过程中脂肪含量降低,饱和脂肪酸相对含量增加,不饱和脂肪酸相对含量降低。过氧化值和丙二醛值可以作为判断熟化小米粉氧化劣变的指标,真空包装及添加抗氧化剂均可以延缓熟化小米粉的氧化。

关键词:挤压膨化技术,熟化小米粉,储藏方式,氧化

Oxidation analysis of cooked millet powder with different storage ways

LI Shi-wei, ZHANG Hui*, QIAN Hai-feng, WANG Li, QI Xi-guang

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The millet was selected as experimental material, the millet powder was produced by extrusion technology. In order to explore the effect of different storage ways on the fatty acid value, peroxide value (POV), malondialdehyde (MDA) value and fat content of the cooked millet powder, the cooked millet powder was treated by the normal packing, vacuum packing and adding antioxidant. The fatty acid value, peroxide value and malondialdehyde (MDA) value of the different storage ways all showed an increasing trend and could be simulated by the first-order kinetics equation. The fat content of the different storage all showed an decreasing trend. The relative content of saturated fatty acids (SFA) increased while the relative content of unsaturated fatty acids (UFA) decreased. Peroxide value and malondialdehyde value could be used as indicators to show the oxidation of cooked millet powder. Vacuum packaging and the addition of antioxidant could control the increase.

Key words: extrusion technology; cooked millet powder; storage ways; oxidation

中图分类号: TS205

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2017)11-0318-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2017.11.053

小米也称粟米,是我国传统谷物的一种,起源于黄河流域,广泛种植于我国北方地区,是常见杂粮的一种,年产量450万t左右^[1]。小米营养丰富,营养素配比合理,易于消化和吸收,是一种良好的食疗食品。近年来,小米产品越来越受到人们消费的青睐,不断被开发成符合现代消费的产品,如营养小米粉,速食小米粥,小米膨化食品等。食品挤压膨化加工技术是集混合、搅拌、破碎、加热、蒸煮、杀菌、膨化及成型等为一体的高新技术^[2],正广泛应用于食品工业。通过挤压膨化处理,食品中主要组分会发生复杂的理化反应,质构、组织和外观都发生了很大的变化。淀粉、蛋白质、脂肪、粗纤维等大分子物质被切断成小分子物质,如长链淀粉切断成水溶性淀粉、糊精、还原糖等^[3],部分蛋白质裂解为肽和氨基酸,因而味美可口、易于消化吸收。

熟化的小米粉由于失去了外壳的保护,在储藏销售的过程中容易发生酸败,包括水解酸败和氧化酸败,从而影响到小米粉的风味,产品的品质降低,甚至产生有毒物质丙二醛。油脂的氧化酸败过程是一个动态的平衡过程,其遵循的原则是游离基的反应机理,它主要包括链引发、链传播、链终止三个阶段,这种自发的氧化一旦开始,直到氧气消耗殆尽或自由基结合产生稳定的化合物为止^[4]。L-抗坏血酸棕榈酸酯是一种高效氧清除剂和增效剂,被世界卫生组织(WHO)食品添加剂委员会评定为具有营养性、无毒、高效、食用安全的食品添加剂^[5]。现阶段,对于熟化谷物粉的氧化劣变指标的研究还比较少,本文通过研究熟化小米粉的氧化劣变,一方面研究了熟化小米粉的脂肪酸值、过氧化值、丙二醛值、脂肪含量和脂肪酸含量在储藏过程中的变化,

收稿日期: 2016-12-08

作者简介: 李诗炜(1992-),女,硕士研究生,主要从事粮食深加工方面的研究, E-mail: 1468913569@qq.com。

* 通讯作者: 张晖(1966-),女,博士,教授,主要从事粮食深加工方面的研究, E-mail: zhanghui@jiangnan.edu.cn。

另一方面为研究熟化谷物粉的氧化劣变提供了一些参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

小米 江西赣州相思莲食品旗舰店;正己烷 国药集团化学试剂有限公司,色谱纯;无水乙醚、三氟化硼乙醚、磷酸二氢钾、盐酸、酚酞、三氯甲烷、乙醇、甲醇、硫代巴比妥酸、三氯乙酸、氯化亚铁、石油醚、氢氧化钠、硫氰酸钾、过氧化氢 国药集团化学试剂有限公司,均为分析纯;1,1,3,3-四乙氧基丙烷(E.Mesck 97%),Supelco 37种脂肪酸甲酯混标(10 mg/mL),十九烷酸标准品(纯度 $\geq 99\%$) 美国Sigma-Aldrich公司;L-抗坏血酸棕榈酸酯 食品级,河南郑州博研生物有限公司。

FMHE36-24 双螺杆挤压机 湖南富马科食品工程技术有限公司;GC-2010 气相色谱仪 日本岛津公司;高效液相色谱仪 美国 Waters 公司;分析天平 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;高速离心机 日本日立公司;T6-新世纪紫外可见分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司;AR-G2 旋转流变仪 美国 TA 仪器有限公司;SOX406 自动索氏抽提仪 济南海能仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 小米去除杂质后,磨粉,挤压膨化后放置于 50℃烘箱中,烘至水分含量为 10%左右。将烘后的小米磨成粉制成熟化的小米粉。参考相关文献[6-8]以及实验室前期研究结果,最终采用挤压条件为:固体喂料量为 4 kg/h,加水量为 16.7%,双螺杆挤压机机筒内 5 个区的温度分别为 60、90、120、120、90℃。

将小米粉进行包装,300 g/份。普通包装、真空包装、添加抗氧化剂普通包装均使用统一购买的商用透明真空袋。根据中国食品添加剂使用手册^[9],在挤压膨化后的熟化小米粉中,按照 0.2 g/kg 的最大添加比例添加 L-抗坏血酸棕榈酸酯,混合均匀后进行普通包装。将包装好的小米粉放置在恒温恒湿箱中进行加速储藏实验,温度为(50 $\pm$ 1)℃,湿度为 50% $\pm$ 1%,每 7 d 取样进行脂肪酸值、过氧化值和丙二醛值的测定。

1.2.2 糊化度测定 取 4 支 15 mL 的试管,称取 50 mg 样品,分别放入两只试管中,标为 m_1 、 m_2 ,另两只试管为空白(m_0);分别往试管中加入 5 mL 去离子水, m_1 试管进行沸水浴 20~30 min,使样品完全糊化。4 支试管中均加入 2 mL 的 2%~5% (质量分数)的 Taka 酶,37℃水浴振荡反应 2 h,反应完成后均加入 1 mL 的 1 mol/L 的 NaOH,3500 r/min 离心 10 min 后取上清液用还原糖测定仪测定葡萄糖含量。糊化度计算如公式(1)所示。

$$\text{糊化度}(\%) = \frac{C_2 - C_0}{C_1 - C_0} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中, C_2 、 C_1 、 C_0 分别为 m_2 、 m_1 和空白管的葡萄糖含量,mg/mL。

1.2.3 感官品质评价 邀请 20 名人员参与感官评价

(4 名专业老师和 16 名学生),在感官评价之前,由感官评价室的老师对参与感官评价的人员进行培训,参照 GB/T 5492-2008 进行评价,取 20 g 样品,装于广口瓶中,放置在 50℃的水浴锅中,盖上瓶塞,样品保温 5 min,开盖嗅辨气味。评价标准^[10]: - = 没有哈败味, $\pm$ = 略有哈败味, + = 明显的哈败味, ++ = 严重的哈败味。

1.2.4 脂肪酸值的测定 参照 GBT 15684-2015 进行测定。

1.2.5 过氧化值的测定 参照 GB/T 5009.37-2003,采用比色法测定。

1.2.6 丙二醛值的测定 参照 GB 5009.181-2016,采用高效液相色谱法进行测定。

1.2.7 油脂的提取 用于过氧化值测定的油样:将小米粉与石油醚(沸程为 30~60℃)按照 1:3 (m/w) 的比例混合,室温下搅拌 12 h,4℃,8000 r/min 离心 20 min 过滤后取上清液,25℃旋转蒸发;用于脂肪酸组成测定的油样:采用索氏抽提法,参照 GB/T 5512-2008。

1.2.8 脂肪酸甲酯化处理 参考文献[11]的方法,准确称取油样 30 mg,置于试管中,加入 2 mL 浓度为 0.5 mol/L 的 NaOH-CH₃OH 溶液,于 65℃水浴中加热皂化至油珠完全溶解,加入 25% 的 BF₃-CH₃OH 溶液 2 mL,同样在 65℃水浴条件下酯化 20 min,静置冷却,加入 2.0 mL 正己烷,充分振摇后加入 2 mL 饱和 NaCl 溶液,离心后取上清液供气相色谱分析使用。

1.2.9 气相色谱分析条件 PEG-20M 毛细管柱(30 m $\times$ 0.32 mm,0.25 μ m);载气:高纯 N₂,吹扫流量:3 mL/min;进样量:1 μ L;分流比 100:1;进样口温度 250℃;升温程序:初始温度 80℃,保持 3 min,升温速率 15℃/min 升温至 215℃,保持 16 min,溶剂延迟时间 1.5 min。

1.2.10 脂肪酸测定 采用 sigma 37 种脂肪酸甲酯混标对样品中脂肪酸进行定性分析;以十九烷酸为内标对样品中脂肪酸进行定量分析^[12]。

1.2.11 数据分析 采用 SPSS 17.0 和 Origin 进行数据分析,所有数据均进行至少三次平行实验。

2 结果与讨论

2.1 熟化小米粉的糊化度

挤压膨化制得的熟化小米粉的糊化度为 94.17% $\pm$ 0.05%。

2.2 感官评价表

不同储藏时间,不同储藏方式的熟化小米粉的感官评价如表 1 所示。

普通包装的熟化小米粉在前 5 周的储藏过程中,没有感觉到有哈败味,到第 6 周时略有点哈败味,储藏到第 7 周,有明显的哈败味产生,到第 8 周时,产生了严重的哈败味。真空包装和添加抗氧化剂的小米粉在第 7 周时略有哈败味,在第 8 周时有明显的哈败味。

2.3 脂肪酸值、过氧化值、丙二醛值随储藏时间的变化趋势及相关性分析

2.3.1 脂肪酸值的变化 小米粉在储藏过程中,其

表1 感官评价表

Table 1 Sensory evaluation

时间(周)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
哈败味程度(普通包装)	-	-	-	-	-	-	±	+	++
哈败味程度(真空包装)	-	-	-	-	-	-	-	±	+
哈败味程度(添加抗氧化剂)	-	-	-	-	-	-	-	±	+

中的脂类物质变化主要是氧化和水解,氧化作用产生氢过氧化物和羰基化合物,水解作用产生游离脂肪酸和甘油,生成的游离脂肪酸进一步的氧化分解^[13]。脂肪酸值是指中和 100 g 样品中游离脂肪酸消耗的氢氧化钾的毫克数,反映了粮食脂质水解氧化的程度。不同包装方式以及添加抗氧化剂的小米粉的脂肪酸值含量变化趋势如图 1 所示。

由图 1 可以看出,随着储存时间的延长,不同包装方式以及添加抗氧化剂的小米粉的脂肪酸值不断增加。小米粉的初始脂肪酸值为 9.127 mg KOH/100 g,到第 7 周(感官评价有哈败味)时普通包装、真空包装和添加抗氧化剂的小米粉的脂肪酸值分别为:24.632、20.200、20.251 mg KOH/100 g,比初始值增幅分别为 169%、121% 和 122%。普通包装的小米粉脂肪酸值增幅高于真空包装和添加抗氧化剂的,这说明在相同的条件下真空包装和添加抗氧化剂均可以延缓脂肪酸的增加速度。

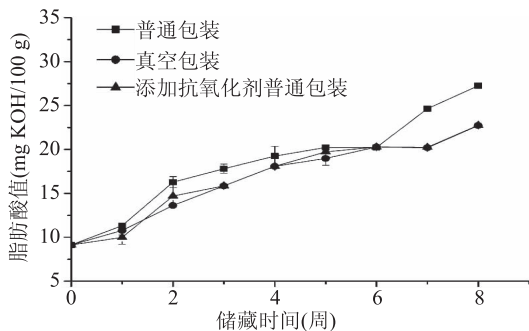


图1 小米粉的脂肪酸值随储藏时间的变化

Fig.1 Fatty acid value changes during storage

2.3.2 过氧化值的变化 过氧化值是表征脂质氧化程度的参数,是不饱和脂肪酸中的双键与空气中的氧结合生成产物的指标。氢过氧化物是自动氧化中最先生成的产物。不同包装方式以及添加抗氧化剂的小米粉的过氧化值变化趋势如图 2 所示。

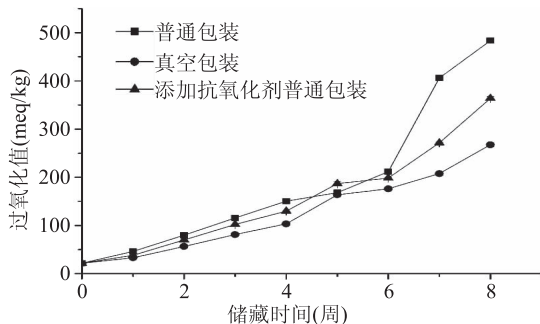


图2 小米粉的过氧化值随储藏时间的变化

Fig.2 Peroxide value changes during storage

由图 2 可以看出,随着储存时间的延长,不同包装方式以及添加抗氧化剂的小米粉的过氧化值不断增加。小米粉过氧化值的初始值为 22.258 meq/kg,储藏 7 周后,普通包装、真空包装和添加抗氧化剂的过氧化值增加到 405.921、207.506、271.387 meq/kg,真空包装和添加抗氧化剂能减缓小米粉过氧化值的增加。

2.3.3 丙二醛值(MDA)的变化 MDA 是脂肪自动氧化产生自由基引发而形成的,造成小米粉 MDA 含量增加的主要原因是饱和脂肪酸不断被氧化产生氢过氧化物,继而进一步产生 MDA 和挥发性醛类物质,MDA 作为最重要的二级氧化产物,其含量反映了脂质过氧化程度。不同包装方式以及添加抗氧化剂的小米粉的丙二醛值变化趋势如图 3 所示。

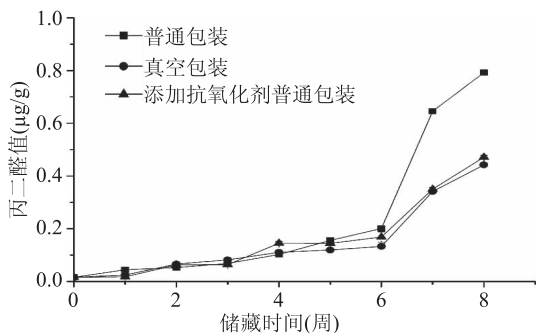


图3 小米粉的丙二醛值随储藏时间的变化

Fig.3 MDA value changes during storage

由图 3 可以看出,随着储存时间的延长,不同包装方式以及添加抗氧化剂的小米粉的丙二醛含量呈升高的趋势。储藏的前 6 周,丙二醛含量增加的较缓慢,第 6 周后,丙二醛含量明显增加。小米粉丙二醛的初始值为 0.0158 μg/g,储藏至第 7 周时,普通包装、真空包装和添加抗氧化剂的小米粉的丙二醛值分别为:0.6460、0.3416、0.3501 μg/g。真空包装和添加抗氧化剂能减缓小米粉丙二醛值的增加。

2.3.4 脂肪酸值、过氧化值和丙二醛值相关性分析 普通包装、真空包装和添加抗氧化剂的小米粉的脂肪酸值、过氧化值和丙二醛值相互间及与储藏时间间的相关性系数如表 2~表 4 所示。

由表 2~表 4 可以看出,普通包装、真空包装和添加抗氧化剂的熟化小米粉的脂肪酸值、过氧化值和丙二醛值均与储藏时间有显著的相关性,脂肪酸值和过氧化值与储藏时间的相关性系数稍高于丙二醛与储藏时间的相关性系数。脂肪酸值、过氧化值与丙二醛值相互之间也有显著的相关性,丙二醛值与过氧化值的相关性系数较高,因为初级氧化生成的氢过氧化物进一步氧化分解生成醛酮等小分子物质。

表2 普通包装的小米粉氧化指标与储藏时间及各指标间相关性分析

Table 2 Correlation analysis between oxidation indexes of millet powder packaged in common and storage time

氧化指标	储藏时间(周)	脂肪酸值(mg KOH/100 g)	过氧化值(meq/kg)	丙二醛值(μg/g)
脂肪酸值	0.973 **	1.000		
过氧化值	0.933 **	0.926 **	1.000	
丙二醛值	0.845 **	0.839 **	0.979 **	1.000

注: ** 表示在 0.01 水平显著;表 3、表 4 同。

表3 真空包装的小米粉氧化指标与储藏时间及各指标间相关性分析

Table 3 Correlation analysis between oxidation indexes of millet powder packaged in vacuum and storage time

氧化指标	储藏时间(周)	脂肪酸值(mg KOH/100 g)	过氧化值(meq/Kg)	丙二醛值(μg/g)
脂肪酸值	0.978 **	1.000		
过氧化值	0.985 **	0.945 **	1.000	
丙二醛值	0.885 **	0.800 **	0.914 **	1.000

表4 添加抗氧化剂的小米粉氧化指标与储藏时间及各指标间相关性分析

Table 4 Correlation analysis between oxidation indexes of millet powder added antioxidant and storage time

氧化指标	储藏时间(周)	脂肪酸值(mg KOH/100 g)	过氧化值(meq/kg)	丙二醛值(μg/g)
脂肪酸值	0.965 **	1.000		
过氧化值	0.974 **	0.910 **	1.000	
丙二醛值	0.914 **	0.822 **	0.972 **	1.000

2.4 脂肪酸值、过氧化值和丙二醛值变化动力学研究

对储藏期间小米粉的脂肪酸值、过氧化值和丙二醛值变化拟合动力学反应级数模型,得到相应的回归方程及决定系数 R^2 如表 5 所示。

表5 脂肪酸值、过氧化值和丙二醛值

在不同储藏方式下随储藏时间变化的回归方程

Table 5 The regression equation of fatty acid value, peroxide value and MDA value at different storage ways

指标	储藏方式	回归方程	决定系数 R^2
脂肪酸值	普通包装	$y = 10.813e^{0.1212x}$	0.8962
	真空包装	$y = 10.350e^{0.1086x}$	0.9113
	添加抗氧化剂	$y = 10.316e^{0.1106x}$	0.8756
过氧化值	普通包装	$y = 31.180e^{0.3545x}$	0.9564
	真空包装	$y = 27.095e^{0.3093x}$	0.9614
	添加抗氧化剂	$y = 29.798e^{0.3312x}$	0.9567
丙二醛值	普通包装	$y = 0.0192e^{0.4526x}$	0.9595
	真空包装	$y = 0.0203e^{0.3827x}$	0.9388
	添加抗氧化剂	$y = 0.0177e^{0.4219x}$	0.9426

由表 5 可以看出,对小米粉的脂肪酸值、过氧化值和丙二醛值在不同储藏方式下随储藏时间变化的

曲线建立回归方程,得到的决定系数 R^2 均大于 0.8,所以小米粉储藏期间脂肪酸值、过氧化值和丙二醛值的变化情况均可以通过一级动力学模型拟合。

2.5 脂肪含量及脂肪酸组成的变化

2.5.1 脂肪含量的变化 在储藏期间,普通包装、真空包装和添加抗氧化剂的小米粉的脂肪含量的变化如表 6 所示。

由表 6 可以看出,普通包装、真空包装和添加抗氧化剂包装的小米粉的脂肪含量均呈现下降的趋势,且前 4 周下降的比后 4 周下降的多,可能原因是:在小米粉氧化的初期,脂肪水解与氧化反应迅速,从而使得小米粉中的脂肪含量迅速减少。

2.5.2 脂肪酸组成的变化 小米粉油脂的饱和脂肪酸主要包括棕榈酸和硬脂酸,不饱和脂肪酸主要包括油酸、亚油酸和亚麻酸。不同储藏方式的熟化小米粉在储藏过程中油脂主要脂肪酸组成的变化如表 7~表 9 所示。

通过表 7~表 9 可以看出,小米粉油脂中以油酸、亚油酸和亚麻酸为主的不饱和脂肪脂肪酸占脂肪酸总量的 85% 以上,其亚油酸含量很高,容易发生氧化。在储藏过程中,亚油酸、亚麻酸的相对含量降低,因为各不饱和脂肪酸的氧化速度不同,早期有文献报道,纯的油酸甲酯、亚油酸甲酯及亚麻酸甲酯的

表6 小米粉的脂肪含量在不同储藏方式下随储藏时间的变化

Table 6 Fatty content changes in different storage ways

储藏方式	第 0 周(%)	第 4 周(%)	第 8 周(%)
普通包装	1.0838 ± 0.0125 ^a	0.7121 ± 0.0054 ^b	0.6294 ± 0.0071 ^c
真空包装	1.0838 ± 0.0125 ^a	0.7984 ± 0.0157 ^b	0.7246 ± 0.0064 ^c
添加抗氧化剂普包装	1.0838 ± 0.0125 ^a	0.7780 ± 0.0026 ^b	0.6848 ± 0.0048 ^c

注:每个样品做三次平行实验,标示各指标的平均值和标准差,数字后标注的字母表示差异的显著性,同一行标注字母相同,表示差异不显著($p > 0.05$),标注字母不同,表示差异显著($p < 0.05$);表 7~表 9 同。

表7 普通包装的小米粉的脂肪酸组成随储藏时间的变化(相对含量,%)

Table 7 Fatty acid composition changes of millet powder packaged in common

脂肪酸种类	第0周	第1周	第4周	第7周
棕榈酸(C16:0)	6.434 ± 0.001 ^a	6.549 ± 0.013 ^b	6.645 ± 0.024 ^c	6.982 ± 0.011 ^d
硬脂酸(C18:0)	2.650 ± 0.010 ^a	2.695 ± 0.003 ^b	2.732 ± 0.011 ^c	2.812 ± 0.001 ^d
油酸(C18:1)	15.005 ± 0.011 ^a	15.108 ± 0.023 ^b	15.320 ± 0.016 ^c	16.088 ± 0.047 ^d
亚油酸(C18:2)	69.098 ± 0.069 ^c	68.941 ± 0.033 ^{bc}	68.781 ± 0.088 ^b	66.497 ± 0.011 ^a
亚麻酸(C18:3)	2.406 ± 0.034 ^c	2.387 ± 0.004 ^c	2.324 ± 0.006 ^b	2.088 ± 0.008 ^a
SFA	9.084 ± 0.010 ^a	9.244 ± 0.016 ^b	9.377 ± 0.013 ^c	9.794 ± 0.012 ^d
PUFA	71.504 ± 0.103 ^c	71.328 ± 0.036 ^c	71.104 ± 0.082 ^b	68.585 ± 0.019 ^a
UFA	86.509 ± 0.093 ^b	86.436 ± 0.059 ^b	86.424 ± 0.098 ^b	84.673 ± 0.066 ^a

表8 真空包装的小米粉的脂肪酸组成随储藏时间的变化(相对含量,%)

Table 8 Fatty acid composition changes of millet powder packaged in vacuum

脂肪酸种类	第0周	第1周	第4周	第7周
棕榈酸(C16:0)	6.434 ± 0.001 ^a	6.529 ± 0.004 ^b	6.613 ± 0.035 ^c	6.770 ± 0.018 ^d
硬脂酸(C18:0)	2.650 ± 0.010 ^a	2.727 ± 0.012 ^b	2.751 ± 0.026 ^b	2.767 ± 0.005 ^b
油酸(C18:1)	15.005 ± 0.011 ^a	15.006 ± 0.010 ^a	15.165 ± 0.014 ^b	15.478 ± 0.003 ^c
亚油酸(C18:2)	69.098 ± 0.069 ^b	69.100 ± 0.067 ^b	68.965 ± 0.063 ^b	67.742 ± 0.007 ^a
亚麻酸(C18:3)	2.406 ± 0.034 ^c	2.383 ± 0.003 ^{bc}	2.340 ± 0.004 ^b	2.221 ± 0.002 ^a
SFA	9.084 ± 0.010 ^a	9.256 ± 0.016 ^b	9.364 ± 0.062 ^c	9.536 ± 0.023 ^d
PUFA	71.504 ± 0.103 ^b	71.483 ± 0.070 ^b	71.305 ± 0.067 ^b	69.963 ± 0.005 ^a
UFA	86.509 ± 0.093 ^b	86.489 ± 0.080 ^b	86.470 ± 0.053 ^b	85.441 ± 0.008 ^a

表9 添加抗氧化剂的小米粉的脂肪酸组成随储藏时间的变化(相对含量,%)

Table 9 Fatty acid composition changes of millet powder added antioxidant

脂肪酸种类	第0周	第1周	第4周	第7周
棕榈酸(C16:0)	6.434 ± 0.001 ^a	6.535 ± 0.006 ^b	6.601 ± 0.009 ^c	6.722 ± 0.018 ^d
硬脂酸(C18:0)	2.650 ± 0.010 ^a	2.705 ± 0.006 ^b	2.730 ± 0.002 ^c	2.750 ± 0.007 ^d
油酸(C18:1)	15.005 ± 0.011 ^a	15.055 ± 0.053 ^{ab}	15.127 ± 0.005 ^b	15.469 ± 0.027 ^c
亚油酸(C18:2)	69.098 ± 0.069 ^b	69.376 ± 0.079 ^c	69.120 ± 0.037 ^b	68.364 ± 0.037 ^a
亚麻酸(C18:3)	2.406 ± 0.034 ^c	2.393 ± 0.004 ^{bc}	2.355 ± 0.001 ^b	2.260 ± 0.003 ^a
SFA	9.084 ± 0.010 ^a	9.240 ± 0.012 ^b	9.330 ± 0.011 ^c	9.472 ± 0.011 ^d
PUFA	71.504 ± 0.103 ^b	71.769 ± 0.075 ^c	71.475 ± 0.037 ^b	70.624 ± 0.040 ^a
UFA	86.509 ± 0.093 ^b	86.824 ± 0.022 ^c	86.601 ± 0.042 ^b	86.093 ± 0.067 ^a

氧化速率比值约为 1:12:25^[14]。Fatemi 和 Hammond 进一步研究发现油酸、亚油酸及亚麻酸甲酯的相对氧化速率为 1:10.3:21.6^[15]。在储藏过程中,亚油酸和亚麻酸被优先氧化,导致其含量降低,油酸相对含量升高,其原因可能是小米油脂的亚油酸氧化速度较油酸快,亚油酸氧化生成的油酸使得油酸的含量增大,棕榈酸、硬脂酸的相对含量增加;饱和脂肪酸(SFA)的相对含量增加;不饱和脂肪酸(PUFA)和多不饱和脂肪酸(UFA)的含量均降低。比较表7~表9可以看出,真空包装和添加抗氧化剂的熟化小米粉的饱和脂肪酸增加的量和不饱和脂肪酸下降的量均小于普通包装的熟化小米粉,说明真空包装和添加抗氧化剂均可以延缓小米粉的氧化速度,这是由于真空包装可以通过减少氧气的含量从而减缓氧化的速度,L-抗坏血酸棕榈酸酯作为抗氧化剂,它一方面可以驱散容器上方或溶液上方的氧气,特别是在密闭系统中有更好的效果,另一方面它可以阻止自由基的形成,降低油脂的自动氧化,从而起到抗氧化的作用^[16]。

3 结论

普通包装、真空包装和添加抗氧化剂包装的熟化的小米粉在储藏期间脂肪酸值、过氧化值和丙二醛值均呈不断增加的趋势,真空包装和添加抗氧化剂的增幅要小于普通包装的,三个指标均可以通过一级动力学模型拟合。三个指标与储藏时间以及相互之间都呈显著的相关性,过氧化值和丙二醛值的相关性系数较高,脂肪酸值主要代表了游离脂肪酸的含量,可以选取过氧化值和丙二醛值作为熟化小米粉氧化劣变的指标。在储藏期间,熟化小米粉的脂肪含量降低,饱和脂肪酸(主要是棕榈酸和硬脂酸)相对含量增加,真空包装和添加抗氧化剂增加的量要小于普通包装的,不饱和脂肪酸(主要是油酸、亚油酸和亚麻酸)相对含量降低,真空包装和添加抗氧化剂降低的量要小于普通包装,这与脂肪酸值、过氧化值和丙二醛值的变化趋势是相符合的,这主要是由于不饱和脂肪酸的氧化造成的。结果表明,真空包装和添加抗氧化剂均能减缓小米粉氧化的

速度。

参考文献

- [1] 王海滨, 夏建新. 小米的营养成分及产品研究开发进展[J]. 粮食科技与经济, 2010, 35(4): 36-38.
- [2] 高福成. 现代食品工程高新技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2000.
- [3] Ding Qing-bo, Ainsworth P, Tucker G, et al. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 66(3): 283-289.
- [4] 余少华. 新疆薄皮核桃风味产品的研制及其货架期的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2009.
- [5] 何松, 林富强, 陈永恒. L-抗坏血酸棕榈酸酯在煎炸油中应用研究[J]. 现代食品科技, 2010, 26(9): 972-974.
- [6] 范晓波, 刘通通, 张晖, 等. 大麦预处理方法对大麦饮料品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016(5): 167-171.
- [7] 申丽丽, 周惠明, 朱科学, 等. 麦胚糙米混合粉的挤压制备工艺研究[J]. 食品工业科技, 2014(13): 213-218.
- [8] 方勇, 王红盼, 杨文建, 等. 金针菇复配发芽糙米挤压膨化工艺及产品品质特性[J]. 中国农业科学, 2016(4): 727-738.
- [9] 凌关庭, 唐述潮, 陶民强. 食品添加剂手册[M]. 北京: 化学

工业出版社, 2003.

- [10] Wang R, Chen Y, Ren J, et al. Aroma stability of millet powder during storage and effects of cooking methods and antioxidant treatment[J]. Cereal Chemistry, 2014, 91(3): 262-269.
- [11] 王超群, 张晖, 钱海峰, 等. 气相色谱结合主成分分析和聚类分析用于裸燕麦脂肪酸标准指纹图谱的建立[J]. 食品工业科技, 2016(10): 82-87, 93.
- [12] Shin EC, Craft BD, Pegg RB, et al. Chemometric approach to fatty acid profiles in Runner-type peanut cultivars by principal component analysis(PCA)[J]. Food Chemistry, 2010, 119(3): 1262-1270.
- [13] 周惠明. 谷物科学原理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.
- [14] Holman RT, Elmer OC. The rates of oxidation of unsaturated fatty acids and esters[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1947, 24(4): 127-129.
- [15] Fatemi SH, Hammond EG. Analysis of oleate, linoleate and linolenate hydroperoxides in oxidized ester mixtures[J]. Lipids, 1980, 15(5): 379-385.
- [16] 章立群, 曹栋. L-抗坏血酸棕榈酸酯的研究进展[J]. 郑州粮食学院学报, 1998(1): 91-97, 101.

(上接第317页)

- [15] 李天略, 史载锋, 梅平波. 紫外照射对莲雾贮藏保鲜效果的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(21): 10136-10138.
- [16] 葛枝, 丁甜, 刘东红. 基于自动滴定仪测定水果可滴定酸含量样品前处理的简化[J]. 中国食物与营养, 2013, 19(6): 32-34.
- [17] 吴春艳. 水果中维生素C含量的测定及比较[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(3): 90-91.
- [18] 邓丽莉, 潘晓倩, 生吉萍. 考马斯亮蓝法测定苹果组织微量可溶性蛋白含量的条件优化[J]. 食品科学, 2012, 33(24): 185-18.
- [19] 李春丽, 柴叶茂, 王志忠, 等. 草莓果实发育过程中糖、pH及ABA水平变化趋势[J]. 果树学报, 2011(1): 72-76, 189.

- [20] Montgomery MW, Sgarbieri Vc. Isoenzymes of banana polyphenol oxidase[J]. Phytochemistry, 1975, 14(4): 1245-1249.
- [21] 李军军. 缓释型乙醇保鲜剂制备及对杨梅、蓝莓贮藏品质的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2014.
- [22] Dao T, Dantigny P. Control of food spoilage fungi by ethanol[J]. Food Control, 2011, 22(3/4): 360-368.
- [23] Fukasawa A, Suzuki Y, Terai H, et al. Effects of postharvest ethanol vapor treatment on activities and gene expression of chlorophyllcatabolic enzymes in broccoli florets[J]. Postharvest Biology and Technology, 2010, 55(2): 97-102.