

## 预处理燕麦麸皮贮藏期预测模型的建立

白雪, 刘瑞瑞, 张美莉\*

(内蒙古农业大学食品科学与工程学院 呼和浩特 010018)

**摘要** 燕麦麸皮易酸败变质,为了延长燕麦麸皮的贮藏时间,保证其新鲜度,需对燕麦麸皮进行预处理。本文探究不同预处理方式对燕麦麸皮脂肪酸组成及含量的影响,运用模糊数学综合评价燕麦麸皮的贮藏终点,采用一级动力学模型结合 Arrhenius 方程建立不同预处理燕麦麸皮脂肪酸值的预测模型,并对模型的预测精确度进行验证及评价。结果表明:预处理前、后燕麦麸皮中饱和脂肪酸含量在 18.01%~23.13%,不饱和脂肪酸含量在 75.26%~81.05%,其中湿热处理后燕麦麸皮中亚油酸(46.39%)含量显著增加( $P<0.05$ )。3 种预处理方法中,湿热处理燕麦麸皮具有较高的贮藏稳定性。以脂肪酸值为指标建立的贮藏期预测模型精确度均较高,模型能够快速、可靠地预测燕麦麸皮的贮藏期,为控制贮藏条件,延长贮藏期提供理论依据。

**关键词** 燕麦麸皮; 预处理; 脂肪酸; 贮藏期预测模型

文章编号 1009-7848(2022)08-0234-10 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2022.08.026

燕麦麸皮是燕麦加工的副产物,含有  $\beta$ -葡聚糖、不饱和脂肪酸、酚酸、燕麦碱等功能性组分,其总  $\beta$ -葡聚糖含量至少为 5.5%,膳食纤维含量至少为 16.0%,总膳食纤维中至少有三分之一是可溶性膳食纤维<sup>[1-2]</sup>。研究表明,燕麦  $\beta$ -葡聚糖可减缓糖类、脂肪和胆固醇的吸收<sup>[3]</sup>,具有预防 II 型糖尿病的功<sup>[4]</sup>,同时也可与胆汁酸结合,促使其随粪便排出体外,促进体内胆固醇的分解,降低血清胆固醇<sup>[5]</sup>。膳食补充燕麦麸皮可有效改善甘油三酯、总胆固醇和 HDL-胆固醇水平,提示其是控制精神疾病患者心血管风险的一种治疗选择<sup>[6]</sup>。Patel 等<sup>[7]</sup>研究发现给 C57BL/6J 雄性小鼠喂食高燕麦麸皮饮食(15%纤维)可降低早期和晚期辐射引起的炎症的强度。Kristek 等<sup>[8]</sup>研究得出燕麦麸皮可以调节人体肠道微生物群并具有益生元特性(增加结肠内一些促进健康的细菌属的生长)。因此,燕麦麸皮是具有降胆固醇、平稳血糖功效的功能食品。

由于燕麦麸皮含油量高,易酸败变质,无法满足工业需求,利用率很低<sup>[9]</sup>,因此提高燕麦麸皮的加工特性和贮藏稳定性是开发利用的前提。目前较有代表性的稳定化方法有加热钝化法,包括干

热法和湿热法,挤压膨化、酶法、微波和化学处理法和辐射处理等<sup>[10]</sup>。湿热法是利用热蒸汽使得谷物含水量增加,加热时间短且均匀,稳定化效果好<sup>[11]</sup>。Thanonkaew 等<sup>[12]</sup>的研究表明热风干燥对米糠的稳定化效果优于烘烤和蒸煮处理。然而,将以上热处理应用于燕麦麸皮的研究较少。

大多数关于食品保存期的研究都以温度为出发点,目前有两种基本模型,即与微生物繁殖生长相关的 Z 值模型和化学反应引起品质变化的 Arrhenius 模型<sup>[13]</sup>。燕麦麸皮在贮存过程中品质降低主要与其所含油脂的氧化酸败相关,其反应规律符合化学动力学规律,可根据 Arrhenius 方程进行分析<sup>[14]</sup>。目前国内外动力学模型研究大多侧重于水产品<sup>[15-17]</sup>、果蔬<sup>[18-19]</sup>和肉类<sup>[20-21]</sup>等,而建立谷物品质变化的动力学模型的研究较少。

本试验以湿热、微波及热风干燥处理新鲜燕麦麸皮,研究预处理对脂肪酸组成及含量的影响,并以脂肪酸值为指标值,采用以温度为基础的 Arrhenius 动力学模型建立预处理前、后燕麦麸皮贮藏期与温度的化学反应动力学模型,预测不同贮藏温度燕麦麸皮的保质期,为燕麦麸皮的科学贮藏提供理论依据。

收稿日期: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060515);内蒙古科技计划重点项目(2020GG0064)

作者简介: 白雪(1994—)女,博士生

通信作者: 张美莉 E-mail: zhangmeili22@sina.com

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

燕麦麸皮(OB)由内蒙古西贝汇通农业科技

发展有限公司提供;35种脂肪酸混合标准品,Sigma公司;乙醚、石油醚、硫代巴比妥酸,国药集团化学试剂有限公司;盐酸,莱阳市康德化工有限公司;正己烷、95%乙醇,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;三氟化硼甲醇,CNW;三氯乙酸,天津市科密欧化学试剂开发中心;氢氧化钠,天津奥普升化工有限公司,试剂均为分析纯级。

## 1.2 仪器与设备

TRACE™ 1300 气相色谱仪,Thermo公司;UV2300 II 双光束紫外-可见分光光度计,上海天美科学仪器有限公司;DL-5-A离心机,上海安亭科学仪器厂;L-20B 密封式摇摆粉碎机,广东旭朗机械设备有限公司。

## 1.3 方法

### 1.3.1 样品制备

1.3.1.1 湿热处理燕麦麸皮样品(S-OB) 将燕麦麸皮放入蒸笼蒸(料层厚度为1~2 cm)20 min,冷却至室温后过60目筛,于-20℃冰箱保存备用。

1.3.1.2 微波处理燕麦麸皮样品(M-OB) 将燕麦麸皮在微波功率为800 W的条件下加热2 min,冷却至室温后过60目筛,于-20℃冰箱保存备用。

1.3.1.3 热风干燥处理燕麦麸皮样品(HA-OB) 将燕麦麸皮在热风干燥箱内140℃下热处理15 min,冷却至室温后过60目筛,于-20℃冰箱保存备用。

1.3.1.4 加速贮藏试验样品 分别称取2000 g不同预处理的燕麦麸皮样品,分别放入30,40,50℃和60℃恒温、恒湿培养箱中进行加速氧化。每隔7 d取出样品放入自封袋中,-20℃冰箱保存备用。同时贮藏未加工的燕麦麸皮作对照,直到达到燕

麦麸皮脂肪酸值临界值时停止贮藏试验。

### 1.3.2 指标测定

#### 1.3.2.1 脂肪酸组成分析

1) 试样水解 称取适量燕麦麸皮(100~200 mg),加入约100 mg 焦性没食子酸,加入几粒沸石,再加入2 mL 95%乙醇,混匀。加入10 mL 盐酸溶液于烧瓶中并混匀。在70~80℃水浴中水解40 min。

2) 脂肪提取 分液漏斗加入10 mL 95%乙醇、30 mL 无水乙醚和酸水解液,摇匀后静置10 min,收集醚层提取液,重复3次,使用旋转蒸发器浓缩至干,残留物即为脂肪提取物。

3) 脂肪的皂化和脂肪酸甲酯化 参照GB 5009.168-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》中的方法进行皂化和甲酯化。

4) 气相色谱分析条件 色谱柱:CD-2560(100 m×0.25 mm×0.20 μm);升温程序:130℃保持5 min,以4℃/min的速率升温至240℃,保持30 min;进样口温度:250℃;载气流速:0.5 mL/min;分流进样,分流比10:1;检测器:FID;检测器温度:250℃。通过标准品与NIST-11数据库进行定性,采用峰面积归一化法进行定量。

1.3.2.2 脂肪酸值的测定 参照GB/T 15684-2015《谷物碾磨制品 脂肪酸值的测定》中的方法测定脂肪酸值。

### 1.3.3 燕麦麸皮脂肪酸值临界值的模糊综合评定

1.3.3.1 感官评定方法 将燕麦麸皮放在60℃恒温、恒湿培养箱中加速贮藏,分别将存放7,14,21,28,35,37 d和38 d的燕麦麸皮作为评测样品。每个样品测评时间间隔为10 min。评价标准参照周佳倩<sup>[22]</sup>的方法并作修改。

表 1 模糊感官评定标准

Table 1 Fuzzy sensory evaluation standard

评价指标	评价标准		
	优质燕麦麸皮( $V_1$ )	中质燕麦麸皮( $V_2$ )	差质燕麦麸皮( $V_3$ )
色泽( $U_1$ )	呈现本身的土黄色	深黄色、略灰暗	棕黄色、灰暗、无光泽
气味( $U_2$ )	新鲜浓厚的香甜味	香甜味减弱、有陈旧燕麦的气味	哈败味、闻之生厌
组织形态( $U_3$ )	蓬松、细腻	有细小结块、稍粗硬	表面成壳、板结成硬块

#### 1.3.3.2 模糊数学感官评价模型的建立

1) 建立因素集 将燕麦麸皮的色泽( $U_1$ )、气味( $U_2$ )、组织形态( $U_3$ )作为模糊评判的因素集  $U=[U_1, U_2, U_3]$ 。

2) 建立评价集 由感官评价员根据感官评价标准确定,一般采用优( $V_1$ )、中( $V_2$ )、差( $V_3$ )的定性化评价体系。采用百分制打分。90分为优,70分中,50分以下为差,  $V=[V_1, V_2, V_3]$ 。

3) 权重集的确立 根据各因素的重要程度进行权重分配。虽然每个人对各因素的要求有所不同,但大体上是一致的<sup>[23]</sup>。试验采用用户调查法,请10位感官评定人员对燕麦麸皮的3个主要因素进行权重打分。总分10分,分值越高,说明质量因素所占的权重越大。对各项因素得分情况进行统计分析,每个因素得分平均值除以所有指标总分10分,即为各因素权重因子。整理数据得出色泽、气味和组织形态在综合评判所占比重为0.3,0.4,0.3,因此模糊向量 $R=[0.3,0.4,0.3]$ 。

1.3.4 燕麦麸皮贮藏期预测模型的建立 动力学模型能根据贮藏时间和温度的变化规律来预测贮藏期。其中,一级动力学模型见公式(1):

$$\ln \frac{A}{A_0} = kt \quad (1)$$

式中, $t$ ——贮藏时间,d; $A$ ——贮藏 $t$ 时刻的品质指标数值; $A_0$ ——品质指标初始值; $k$ ——某一储存温度下食品品质变化速率常数。

Arrhenius 方程【式(2)】描述的是反应速率常数与温度之间的关系<sup>[24]</sup>,为方便计算,对公式(2)取对数得到公式(3)。

$$K = K_0 \times e^{-\frac{E_a}{R \times T}} \quad (2)$$

$$\ln K = \ln K_0 - \frac{E_a}{R \times T} \quad (3)$$

式中, $K$ ——不同温度下反应速率常数; $K_0$ ——方程指前因子; $E_a$ ——活化能,kJ/mol; $R$ ——气体常数(8.314 J/(mol·K)); $T$ ——贮藏温度,K; $K_0$ 和 $E_a$ 为与反应系统中与物质本性有关的常数。

将一级动力学方程和 Arrhenius 方程结合起来,只要确定感官评定终点对应的贮藏品质指标值以及某一贮藏温度,即可对燕麦麸皮货架期进行理论预测,并得到贮藏期(SL)预测公式。

$$SL(d) = \frac{\ln A - \ln A_0}{k_0 \times e^{-\frac{E_a}{R \times T}}} \quad (4)$$

1.3.5 数据统计与分析 采用 Excel 2010 和 Origin 2018 软件对数据进行拟合并绘图;采用 SPSS 26.0 软件对数据进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同预处理方式对燕麦麸皮脂肪酸组成及含量的影响

由表2可知,预处理燕麦麸皮共检测出13种脂肪酸,包括7种饱和脂肪酸和6种不饱和脂肪

表2 预处理方式对燕麦麸皮的脂肪酸组成及含量的影响(g/100g)

Table 2 Effects of pretreatment methods on the fatty acid composition and content of oat bran (g/100 g)

序号	脂肪酸	OB	S-OB	M-OB	HA-OB
1	肉豆蔻酸 C14:0	0.25 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.31 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.18 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.20 ± 0.01 <sup>c</sup>
2	棕榈酸 C16:0	19.26 ± 0.35 <sup>b</sup>	21.31 ± 0.02 <sup>a</sup>	16.12 ± 0.03 <sup>d</sup>	16.98 ± 0.06 <sup>c</sup>
3	棕榈油酸 C16:1	0.19 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.23 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.15 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>a</sup>
4	十七烷酸 C17:0	0.06 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.11 ± 0.01 <sup>a</sup>	ND	0.06 ± 0.01 <sup>b</sup>
5	硬脂酸 C18:0	1.38 ± 0.03 <sup>a</sup>	1.15 ± 0.02 <sup>b</sup>	1.37 ± 0.03 <sup>a</sup>	1.39 ± 0.02 <sup>a</sup>
6	油酸 C18:1n9c	36.60 ± 0.06 <sup>c</sup>	24.21 ± 0.07 <sup>d</sup>	44.31 ± 0.15 <sup>a</sup>	40.87 ± 0.15 <sup>b</sup>
7	亚油酸 C18:2n6c	39.28 ± 0.13 <sup>b</sup>	46.39 ± 0.11 <sup>a</sup>	35.73 ± 0.04 <sup>d</sup>	36.93 ± 0.21 <sup>c</sup>
8	花生酸 C20:0	0.22 ± 0.02 <sup>b</sup>	ND	0.13 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.32 ± 0.01 <sup>a</sup>
9	亚麻酸 C18:3n3	0.89 ± 0.04 <sup>b</sup>	1.69 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.86 ± 0.02 <sup>b</sup>	1.71 ± 0.11 <sup>a</sup>
10	二十二烷酸 C22:0	0.15 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.24 ± 0.02 <sup>a</sup>	ND	0.08 ± 0.01 <sup>b</sup>
11	二十二碳二烯酸 C22:2n6	ND	2.74 ± 0.04 <sup>a</sup>	ND	ND
12	二十四碳酸 C24:0	0.31 ± 0.01 <sup>a</sup>	ND	0.21 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.33 ± 0.01 <sup>a</sup>
13	二十碳五烯酸 C20:5n3	0.34 ± 0.15 <sup>a</sup>	ND	ND	0.22 ± 0.01 <sup>b</sup>
14	饱和脂肪酸	21.66 ± 0.51 <sup>b</sup>	23.13 ± 0.08 <sup>a</sup>	18.01 ± 0.09 <sup>d</sup>	19.36 ± 0.13 <sup>c</sup>
15	不饱和脂肪酸	77.06 ± 0.61 <sup>b</sup>	75.26 ± 0.29 <sup>c</sup>	81.05 ± 0.23 <sup>a</sup>	79.95 ± 0.44 <sup>a</sup>
16	单不饱和脂肪酸	36.55 ± 0.29 <sup>c</sup>	24.44 ± 0.10 <sup>d</sup>	44.46 ± 0.17 <sup>a</sup>	41.04 ± 0.16 <sup>b</sup>
17	多不饱和脂肪酸	40.51 ± 0.32 <sup>b</sup>	50.82 ± 0.19 <sup>a</sup>	36.59 ± 0.06 <sup>d</sup>	38.91 ± 0.28 <sup>c</sup>
18	不饱和脂肪酸/饱和脂肪酸	3.58 ± 0.05 <sup>c</sup>	3.26 ± 0.01 <sup>d</sup>	4.50 ± 0.01 <sup>a</sup>	4.13 ± 0.01 <sup>b</sup>

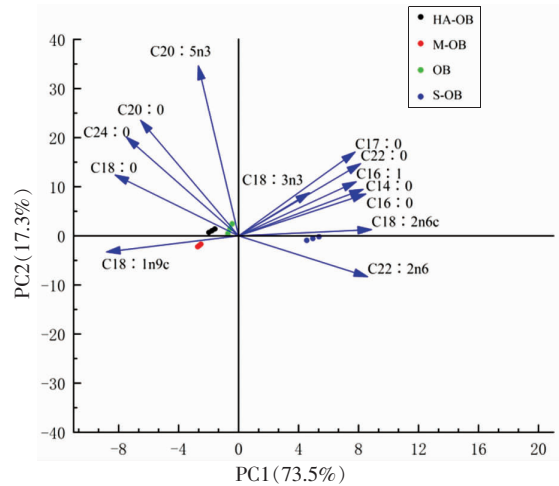
注:ND表示未检出。

酸。OB、S-OB、M-OB 和 HA-OB 中脂肪酸检出数量分别为 12、10、9 和 12 种。另外,部分脂肪酸只在不同预处理燕麦麸皮中检出,如二十二碳二烯酸仅在湿热处理燕麦麸皮中检出,说明不同预处理方法对燕麦麸皮的脂肪酸组成有不同的影响。

由表 2 知,预处理燕麦麸皮中饱和脂肪酸含量在 18.01%~23.13%之间,以棕榈酸和硬脂酸为主。不饱和脂肪酸含量在 75.26%~81.05%之间,以油酸和亚油酸为主。M-OB 的不饱和脂肪酸含量最高,为 81.05%,其次是 HA-OB、OB 和 S-OB。从亚油酸含量看,S-OB 中含量最高,达到 46.39%,其次为 OB、HA-OB 和 M-OB。亚油酸为人体必需脂肪酸,能提高运动能力,并对更年期妇女的骨骼结构有益<sup>[25]</sup>。由于油酸和亚油酸二者含量之和接近 80%,因此燕麦被认为是不饱和脂肪酸的良好来源,Holland 等<sup>[26]</sup>和 Leonova 等<sup>[27]</sup>的研究也得出相似结果。

燕麦麸皮脂质水解伴随多种营养与感官品质变化,如哈败味、酸度上升、功能特性变化、脂肪酸氧化的易感性增加等。游离脂肪酸的进一步氧化酸败会产生自由基,并通过裂变,最终导致营养价值下降并产生异味。燕麦麸皮中的亚油酸和亚麻酸等不饱和脂质在脂肪酶、脂肪氧化酶等的联合作用下,降解成小分子的醛、醇等,造成营养品质下降和不饱和脂肪酸的损失。结果表明,湿热处理对燕麦麸皮中的脂肪酸含量影响较小,不影响燕麦麸皮的加工利用。微波及热风干燥处理后燕麦麸皮中的饱和脂肪酸含量下降,而不饱和脂肪酸含量则升高。

PCA 统计方法是将一组可能有相关性的变量通过正交变换的方法转为一组线性不相关变量<sup>[28]</sup>。主成分分析(PCA)可以更好地分析 13 种脂肪酸在不同预处理燕麦麸皮中的表征程度。由图 1 可知,第 1 主成分 PC1 贡献率达到 73.5%,第 2 主成分 PC2 贡献率达到 17.3%,PC1 和 PC2 贡献率之和达到 90.8%。第 1 主成分 F1 贡献率达 73.5%,特点表现在亚油酸、二十二碳二烯酸、肉豆蔻酸、棕榈酸、十七烷酸和二十二烷酸有较高的正载荷,是对第 1 成分影响最大的特征向量,说明第 1 主成分是由这 6 种脂肪酸组成的一个综合指标。第 2 主成分 F2 的贡献率为 17.3%,表现为二十碳五



注:OB. 未处理燕麦麸皮;S-OB. 湿热处理;M-OB. 微波处理;HA-OB. 热风干燥处理。

图 1 不同预处理燕麦麸皮的脂肪酸 PCA 图

Fig.1 PCA diagram of fatty acids of different pretreated oat bran

烯酸有较高的正载荷,油酸有较高的负载荷,说明这两种脂肪酸是决定这一主成分的主要因子。综合以上特点,可以认为不同预处理燕麦麸皮的主要差异为这 8 种脂肪酸。

## 2.2 燕麦麸皮脂肪酸值临界值的模糊综合评定结果

2.2.1 感官评定结果 10 名人员的评定结果如表 3 所示,将表 3 中的燕麦麸皮各因素等级评价人数分别除以评价总人数,得到模糊矩阵  $y$ 。上述 7 个样品对应的模糊矩阵分别为  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 、 $y_4$ 、 $y_5$ 、 $y_6$ 、 $y_7$ 。

2.2.2 模糊矩阵的确立 将上述 7 个样品的评语结果写成矩阵为:

$$y_1 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0.0 \\ 0.8 & 0.2 & 0.0 \\ 0.9 & 0.1 & 0.0 \end{bmatrix} \quad y_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0.0 \\ 0.6 & 0.4 & 0.0 \\ 0.7 & 0.3 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$y_3 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.4 & 0.1 \\ 0.4 & 0.6 & 0.0 \\ 0.6 & 0.4 & 0.0 \end{bmatrix} \quad y_4 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.3 \\ 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.6 & 0.3 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$y_5 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0.7 & 0.3 & 0.0 \\ 0.1 & 0.6 & 0.3 \end{bmatrix} \quad y_6 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.4 & 0.5 \\ 0.0 & 0.2 & 0.8 \\ 0.1 & 0.4 & 0.5 \end{bmatrix}$$

$$y_7 = \begin{bmatrix} 0.0 & 0.1 & 0.8 \\ 0.0 & 0.1 & 0.9 \\ 0.1 & 0.2 & 0.7 \end{bmatrix}$$

2.2.3 综合评价结果 模糊数学综合分析是一种基于模糊数学的综合评价方法,能较好地解决难



表3 感官评定结果

Table 3 Sensory evaluation results

样品编号	因素	优	良	差	样品编号	因素	优	良	差
1	色泽	7	3	0	5	色泽	2	4	4
	气味	8	2	0		气味	0	7	3
	组织形态	9	1	0		组织形态	1	6	3
2	色泽	5	5	0	6	色泽	1	4	5
	气味	6	4	0		气味	0	2	8
	组织形态	7	3	0		组织形态	1	4	5
3	色泽	5	4	1	7	色泽	1	1	8
	气味	4	6	0		气味	0	1	9
	组织形态	6	4	0		组织形态	1	2	7
4	色泽	3	4	3					
	气味	3	6	1					
	组织形态	6	3	1					

以量化的问题。将评分结果进行处理分析,得到模糊数学综合分析结果为 $Y$ , $Y$ 是模糊向量 $R$ 和模糊矩阵 $y$ 的合成, $Y=R \times y$ ,即:

$$Y_1=[0.3,0.4,0.3] \times \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 & 0.0 \\ 0.8 & 0.2 & 0.0 \\ 0.9 & 0.1 & 0.0 \end{bmatrix}$$

$$Y_1=[0.8,0.2,0.0]$$

同理,可得到其它样品的模糊评价结果。 $Y_2=[0.6,0.4,0.0]$ ; $Y_3=[0.49,0.48,0.03]$ ; $Y_4=[0.39,$

$0.45,0.16]$ ; $Y_5=[0.09,0.58,0.33]$ ; $Y_6=[0.06,0.32,0.62]$ ; $Y_7=[0.06,0.13,0.81]$ 。

根据评价集 $V=[V_1,V_2,V_3]$ 进行分析,90分为优,70分为中,50分为差,分别将 $Y$ 中各个量乘其相对应的分值,再加和得到感官评定值。按最大隶属原则综合评价结果,其对应的燕麦麸皮脂肪酸值如表4所示,确定燕麦麸皮的脂肪酸值临界值为114.43 mg/100 g(以KOH计)。

表4 燕麦麸皮感官评分值

Table 4 Oat bran sensory score values

样品编号	1	2	3	4	5	6	7
感官评定值	86.00	82.00	79.20	74.60	65.20	58.80	55.00
模糊综合评价	优	中	中	中	中	中	差
对应脂肪酸值	89.54	91.06	98.55	104.44	108.98	110.38	114.43

### 2.3 预处理方式和贮藏温度对燕麦麸皮稳定化效果的影响

由图2可知,随着贮藏时间的延长,不同贮藏温度及不同预处理方式的燕麦麸皮的脂肪酸值均呈上升趋势,且贮藏温度越高,脂肪酸值随时间升高的增幅越大,到达贮藏终点的时间越短,可见贮藏温度对燕麦麸皮品质的变化影响巨大,控制贮藏温度对保持燕麦麸皮的品质有重要意义。另一方面,与未进行预处理的燕麦麸皮相比,相同温度下湿热、微波及热风干燥燕麦麸皮均有抑制脂肪

酸败、延长贮藏期的作用,且湿热处理燕麦麸皮较其它燕麦麸皮脂肪酸值增幅小且贮藏期长,说明湿热处理燕麦麸皮稳定化效果更佳,与叶国栋等<sup>[29]</sup>和吴建永<sup>[30]</sup>的研究效果类似,说明湿热处理是一种较好的稳定化方法。

### 2.4 贮藏期预测模型的建立及评价结果

2.4.1 基于脂肪酸值的品质劣变动力学模型的建立 一级动力学模型能够准确反映食品在贮藏过程中的品质劣变<sup>[31]</sup>。将试验数据代入式(1)中,通过Excel软件进行数据拟合,结果见表5。

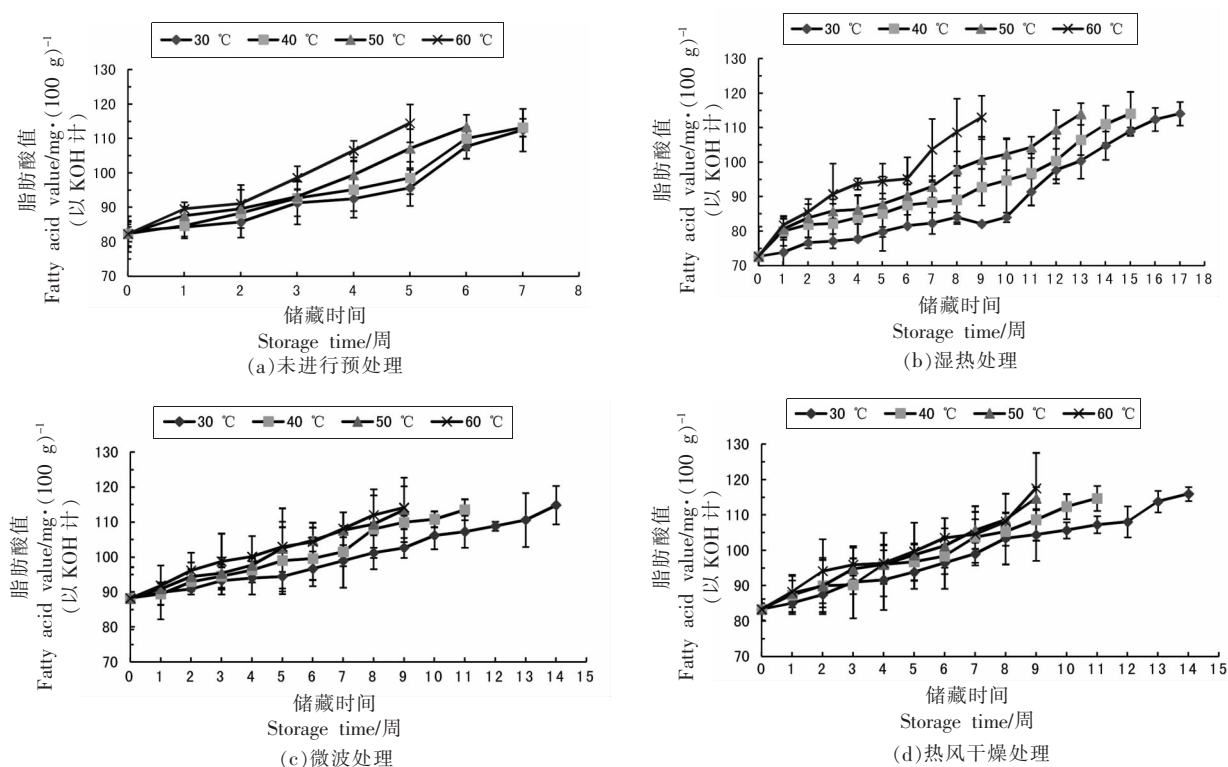


图 2 预处理方式及贮藏温度对燕麦麸皮贮藏期间脂肪酸值的影响

Fig.2 Effects of pretreatment methods and storage temperature on fatty acid values of oat bran during storage

表 5 不同预处理方式及贮藏温度燕麦麸皮脂肪酸值随贮藏时间变化的一级动力学模型参数

Table 5 Parameters of the first level kinetic model of fatty acid values of different pretreatment methods and storage temperature oat brans with storage time

样品	贮藏温度/K	回归方程	决定系数 $R^2$	$\Sigma R^2$
OB	303	$A=76.666e^{0.0441t}$	0.9274	3.8557
	313	$A=77.129e^{0.0464t}$	0.9678	
	323	$A=77.426e^{0.0524t}$	0.9789	
	333	$A=77.026e^{0.0642t}$	0.9816	
S-OB	303	$A=68.019e^{0.0271t}$	0.9318	3.8104
	313	$A=73.179e^{0.0256t}$	0.9572	
	323	$A=74.192e^{0.0298t}$	0.9719	
	333	$A=73.559e^{0.043t}$	0.9495	
M-OB	303	$A=85.947e^{0.0183t}$	0.9845	3.9000
	313	$A=86.792e^{0.0223t}$	0.9517	
	323	$A=86.048e^{0.0269t}$	0.9789	
	333	$A=87.256e^{0.0272t}$	0.9849	
HA-OB	303	$A=81.882e^{0.0232t}$	0.9887	3.9240
	313	$A=82.156e^{0.028t}$	0.9819	
	323	$A=81.82e^{0.0325t}$	0.9847	
	333	$A=82.638e^{0.0333t}$	0.9687	

由表 5 可知, 不同预处理燕麦麸皮的脂肪酸值的一级反应决定系数  $R^2$  均大于 0.90, 表明贮藏期间脂肪酸值的变化符合一级反应动力学模型。

2.4.2 不同贮藏温度下 Arrhenius 方程的建立  
用  $\ln k$  对  $1/T$  作图, 进行线性回归分析, 得到表 6。根据线性回归方程计算  $E_a$  和  $k_0$ 。燕麦麸皮回归方

表6 不同贮藏温度下燕麦麸皮脂肪酸值的 Arrhenius 回归方程

Table 6 Arrhenius regression equation for fatty acid values of oat bran at different storage temperatures

样品	回归方程	$R^2$	$E_a/\text{KJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$k_0$
OB	$y=-1249.1x+0.9611$	0.9157	10.39	2.62
S-OB	$y=-2690.3x+4.8927$	0.9376	22.37	$1.33\times 10^2$
M-OB	$y=-1399.8x+0.6512$	0.9184	11.64	1.92
HA-OB	$y=-1253.9x+0.4061$	0.9295	10.42	1.51

程的决定系数  $R^2$  均超过了 0.90,说明脂肪酸值可以作为储藏期预测模型的关键品质因子。

2.4.3 燕麦麸皮贮藏期预测模型的建立 根据表 6,将求得的不同预处理燕麦麸皮的  $E_a$  和  $k_0$  分别代入公式(4)中,得到以脂肪酸值为指标的贮藏期预测模型,分别如下所示。

$$SL_{OB(d)} = \frac{\ln A - \ln A_0}{2.62 \times e^{-\frac{10.39}{R \times T}}} \quad (5)$$

$$SL_{S-OB(d)} = \frac{\ln A - \ln A_0}{1.33 \times 10^2 \times e^{-\frac{22.37}{R \times T}}} \quad (6)$$

$$SL_{M-OB(d)} = \frac{\ln A - \ln A_0}{1.92 \times e^{-\frac{11.64}{R \times T}}} \quad (7)$$

$$SL_{HA-OB(d)} = \frac{\ln A - \ln A_0}{1.51 \times e^{-\frac{10.42}{R \times T}}} \quad (8)$$

2.4.4 贮藏期预测模型的验证与评价 表 7 是不同预处理燕麦麸皮贮藏期预测模型的验证结果。由表 7 可知,预测值与实测值的相对误差均低于 10%,说明该模型具有良好的预测精度<sup>[32]</sup>。本试验中以脂肪酸值为指标建立的不同预处理燕麦麸皮贮藏期预测模型具有较好的可靠性。

表7 燕麦麸皮实际贮藏期与预测值的比较

Table 7 Comparison of actual storage period of oat bran with predicted values

样品	温度/°C	预测值/d	实测值/d	相对误差/%
OB	20	61.20	56	9.28
S-OB	20	198.68	189	5.12
M-OB	20	112.90	105	7.53
HA-OB	20	83.27	92	9.48

注:相对误差(%) =  $\frac{\text{预测值} - \text{实测值}}{\text{实测值}} \times 100$ 。

### 3 结论

本试验探究了不同预处理方式对燕麦麸皮的脂肪酸组成和含量的影响,并建立了以脂肪酸值为考察指标的贮藏期预测模型。湿热处理对燕麦麸皮中脂肪酸含量的影响较小,不影响燕麦麸皮的加工利用。微波及热风干燥处理后燕麦麸皮中饱和脂肪酸含量下降,而不饱和脂肪酸含量则升高。主成分分析结果表明不同预处理燕麦麸皮的主要差异为亚油酸、二十二碳二烯酸、肉豆蔻酸、棕榈酸、十七烷酸和二十二烷酸、二十碳五烯酸和油酸这 8 种脂肪酸。

运用模糊数学综合分析确定燕麦麸皮的脂肪酸值临界值为 114.43 mg/100 g(以 KOH 计)。3 种预处理中,湿热处理燕麦麸皮有较高的储藏稳定性。采用一级动力学模型结合 Arrhenius 方程建立

基于不同预处理后燕麦麸皮脂肪酸值的预测模型,决定系数  $R^2$  均在 0.90 以上,模型拟合精度较高。预测模型所得预测值与实测值相对误差小于 10%,表明方程可准确预测燕麦麸皮的品质变化情况。

在此基础上得出在 20 °C 储藏条件下,湿热、微波及热风干燥较未加工燕麦麸皮预测储藏期分别延长了 133,49 d 和 36 d。对 3 种贮藏方式进行综合比较,结合各自方式在生产应用的特点,湿热处理更适合燕麦麸皮的工业化贮存。

### 参 考 文 献

- [1] FENG B, MA L J, YAO J J, et al. Protective effect of oat bran extracts on human dermal fibroblast

- injury induced by hydrogen peroxide[J]. Journal of Zhejiang University Science B, 2013, 14(2): 97–105.
- [2] RALLA T, SALMINEN H, EDELMANN M, et al. Oat bran extract (*Avena sativa* L.) from food by-product streams as new natural emulsifier[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 81: 253–262.
- [3] JOYCE S A, KAMIL A, FLEIGE L, et al. The cholesterol-lowering effect of oats and oat beta glucan: Modes of action and potential role of bile acids and the microbiome[J]. Front Nutrition, 2019, 6: 171.
- [4] JUVONEN K R, SALMENKALLIO M M, LYLÄ M, et al. Semisolid meal enriched in oat bran decreases plasma glucose and insulin levels, but does not change gastrointestinal peptide responses or short-term appetite in healthy subjects [J]. Nutrition, Metabolism, and Cardiovascular Diseases, 2011, 21(9): 748–756.
- [5] PETER J. Cereal  $\beta$ -glucans in diet and health[J]. Journal of Cereal Science, 2007, 46(3): 230–238.
- [6] OLIVEIRA E C D, BARBOSA G C, CORRENTE J E, et al. Oat bran in cardiovascular risk control in mental disorder [J]. Revista Brasileira de Enfermagem, 2020, 73(Suppl 1): e20190277.
- [7] PATEL P, MALIPATLOLLA D K, DEVARAKONDA S, et al. Dietary oat bran reduces systemic inflammation in mice subjected to pelvic irradiation[J]. Nutrients, 2020, 12(8): 2172.
- [8] KRISTEK A, WIESE M, HEUER P, et al. Oat bran, but not its isolated bioactive  $\beta$ -glucans or polyphenols, have a bifidogenic effect in an *in vitro* fermentation model of the gut microbiota[J]. The British Journal of Nutrition, 2019, 121(5): 549–559.
- [9] VITAGLIONE P, NAPOLITANO A, FOGLIANO V. Cereal dietary fibre: A natural functional ingredient to deliver phenolic compounds into the gut[J]. Trends in Food Science & Technology, 2008, 19(9): 451–463.
- [10] 崔富贵, 李安平, 谢碧霞, 等. 不同处理方法对米糠品质稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(5): 141–144, 158.
- CUI F G, LI A P, XIE B X, et al. Effect of different treatment methods on the quality stability of rice bran[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(5): 141–144, 158.
- [11] DING C, KHIR R, PAN Z, et al. Improvement in shelf life of rough and brown rice using infrared radiation heating[J]. Food & Bioprocess Technology, 2015, 8(5): 1149–1159.
- [12] THANONKAEW A, WONGYAI S, MCCLEMENTS D J, et al. Effect of stabilization of rice bran by domestic heating on mechanical extraction yield, quality, and antioxidant properties of cold-pressed rice bran oil (*Oryza sativa* L.)[J]. LWT – Food Science and Technology, 2012, 48(2): 231–236.
- [13] MARTINS R C, LOPES V V, VICENTE A A, et al. Computational shelf-life dating: Complex systems approaches to food quality and safety[J]. Food and Bioprocess Technology, 2008, 1(3): 207–222.
- [14] KILCAST D, SUBRAMANIAM P. The stability and shelf-life of food[M]. Abington: Woodhead Publishing Limited, 2000: 6–13.
- [15] 毛鹏权, 俞群娣, 郑霖波, 等. 中华管鞭虾调理食品动力学预测产品货架期[J]. 浙江海洋大学学报: 自然科学版, 2019, 38(5): 422–428.
- MAO P Q, YU Q D, ZHENG L B, et al. Chinese pipe whip shrimp seasoning food kinetics to predict product shelf life[J]. Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science Edition, 2019, 38(5): 422–428.
- [16] 雷志方, 谢晶. 金枪鱼基于理化指标的货架期预测模型的建立[J]. 食品与发酵工业, 2014, 51(12): 3740–3748.
- LEI Z F, XIE J. Development of a shelf-life prediction model for tuna based on physicochemical indicators[J]. Food and Fermentation Industry, 2014, 51(12): 3740–3748.
- [17] BUNKAR D S, JHA A, MAHAJAN A, et al. Kinetics of changes in shelf life parameters during storage of pearl millet based kheer mix and development of a shelf life prediction model[J]. Journal of Food Science & Technology, 2014, 51(12): 3740–3748.
- [18] OLIVERIA F, SOUSA-GALLAGHER M J, MAHAJAN P V, et al. Development of shelf-life kinetic model for modified atmosphere packaging of fresh sliced mushrooms[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(2): 466–473.
- [19] 范新光, 张长峰, 肖璐, 等. 减压处理鲜切西兰花的货架期预测模型构建[J]. 现代食品科技, 2013, 29(9): 2120–2124.



- FAN X G, ZHANG C F, XIAO L, et al. Construction of a shelf-life prediction model for pressure-reduced treated fresh-cut broccoli[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(9): 2120-2124.
- [20] 张建友, 赵瑜亮, 张梦雨, 等. 不同贮藏温度酱鸭品质变化及其货架期预测[J]. *食品科学*, 2019, 40(5): 250-257.
- ZHANG J Y, ZHAO Y L, ZHANG M Y, et al. Quality changes of soybean duck at different storage temperatures and its shelf life prediction[J]. *Food Science*, 2019, 40(5): 250-257.
- [21] 雷会宁, 魏益民, 魏帅, 等. 冷却猪肉货架期预测模型建立及验证[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(10): 187-194.
- LEI H N, WEI Y M, WEI S, et al. Establishment and validation of shelf-life prediction model for cooling pork[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(10): 187-194.
- [22] 周佳倩. 基于水分活度调节的米糠储藏稳定性及优化加工特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- ZHOU J Q. Research on storage stability and optimal processing characteristics of rice bran based on water activity regulation[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [23] 汪倩, 姜万舟, 王瑞花, 等. 基于模糊数学综合评价法确定燕麦麸猪肉丸中的淀粉种类[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(3): 55-60.
- WANG Q, JIANG W Z, WANG R H, et al. Determination of starch species in oat bran pork balls based on fuzzy mathematical comprehensive evaluation method[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2016, 42(3): 55-60.
- [24] LAIDLER K J. The development of the Arrhenius equation[J]. *Journal of Chemical Education*, 1984, 61(6): 494-498.
- [25] RECHE J, ALMANSA M S, HERNANDEZ F, et al. Fatty acid profile of peel and pulp of Spanish jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruit[J]. *Food Chem*, 2019, 295: 247-253.
- [26] HOLLAND J B, FREY K J, HAMMOND E G. Correlated responses of fatty acid composition, grain quality, and agronomic traits to nine cycles of recurrent selection for increased oil content in oat[J]. *Euphytica*, 2001, 122(1): 69-79.
- [27] LEONOVA S, SHELENGA T, HAMBERG M, et al. Analysis of oil composition in cultivars and wild species of oat (*Avena* sp.)[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(17): 7983-7991.
- [28] GU X, SUN Y, TU K, et al. Predicting the growth situation of *Pseudomonas aeruginosa* on agar plates and meat stuffs using gas sensors[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38721.
- [29] 叶国栋, 汪丽萍, 沈汪洋, 等. 麸皮稳定化处理方式对全麦粉品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(6): 15-21.
- YE G D, WANG L P, SHEN W Y, et al. Effect of bran stabilization treatment on the quality of whole wheat flour[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2021, 42(6): 15-21.
- [30] 吴建永. 过热蒸汽法制备轻碾营养米及其理化性质研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
- WU J Y. Preparation of lightly milled nutritious rice by superheated steam method and its physicochemical properties[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.
- [31] 赵丽贞. 米糠稳定化效果的研究及储存期预测模型的建立[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- ZHAO L Z. Study on the stabilization effect of rice bran and the development of storage period prediction model[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [32] 余力, 贺稚非, 李洪军, 等. 不同贮藏方式对高压鸡汤品质的影响及货架期预测模型的建立[J]. *食品科学*, 2016, 37(20): 274-281.
- YU L, HE Z F, LI H J, et al. Effect of different storage methods on the quality of high-pressure chicken soup and the development of a shelf-life prediction model[J]. *Food Science*, 2016, 37(20): 274-281.

## Establishment of Prediction Model for Storage Period of Pretreated Oat Bran

Bai Xue, Liu Ruirui, Zhang Meili\*

(College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

**Abstract** Oat bran is easy to rancidity, in order to prolong the storage time of oat bran and ensure its freshness, it is necessary to pretreat oat bran. In this paper, the effect of different pretreatment methods on the fatty acid composition and content of oat bran was studied. The storage end point of oat bran was determined by fuzzy comprehensive evaluation. The prediction model of fatty acid value of oat bran with different pretreatment methods was established by first-order kinetic model combined with Arrhenius equation, and the prediction accuracy of the model was verified and evaluated. The results showed that the content of saturated fatty acids and unsaturated fatty acids in oat bran were 18.01% – 23.13% and 75.26%–81.05%, respectively, before and after pretreatment, and the content of linoleic acid (46.39%) in oat bran was significantly increased after steaming treatment ( $P < 0.05$ ). Among the three pretreatment methods, the storage stability of oat bran treated by steaming method was higher. The relative error between the measured value and the predicted value was less than 10%. The established model can quickly and reliably predict the storage period of oat bran, which can provide a theoretical basis for controlling storage conditions and extending storage period.

**Keywords** oat bran; pretreatment; fatty acid; storage period prediction model