

不同贮藏温度下猪油品质变化及 氧化动力学模型构建

Construction of quality change and oxidation kinetics model of lard during storage

刘姗姗¹ 沈 玥¹ 黄现青¹ 孟少华²

LIU Shan-shan¹ SHEN Yue¹ HUANG Xian-qing¹ MENG Shao-hua²

宋莲军¹ 赵建生² 乔明武¹

SONG Lian-jun¹ ZHAO Jian-sheng² QIAO Ming-wu¹

(1. 河南农业大学食品科学技术学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南双汇投资发展股份有限公司, 河南 漯河 462000)

(1. College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China; 2. Henan Shuanghui Investment & Development Co., Ltd., Luohe, Henan 462000, China)

摘要:目的: 了解贮藏温度对猪油氧化的影响规律。方法: 将猪油分别于 50, 60, 70 °C 下贮藏, 测定贮藏过程中猪油的过氧化值、硫代巴比妥酸值和酸价等, 并建立各个指标与贮藏温度和贮藏时间之间的氧化动力学模型。结果: 随着贮藏时间的延长, 猪油的氧化程度加深, 贮藏温度越高, 氧化速率越快; 贮藏过程中猪油的过氧化值、硫代巴比妥酸值和酸价变化均符合一级动力学模型, 通过阿伦尼乌斯方程求得其活化能分别为 15.718 2, 21.255 0, 2.299 6 kJ/mol, 模型验证实际测量值与预测值相关系数较高。结论: 不同贮藏温度下, 猪油的氧化程度随贮藏时间的延长而不同程度加深, 建立的氧化动力学模型可以快速评估和预测猪油的氧化程度, 且猪油应尽量低温贮藏。

关键词: 猪油; 氧化; 过氧化值; 硫代巴比妥酸值; 酸价; 动力学模型

Abstract; Objective: In order to understand the influence of different storage temperatures on lard oxidation, a temperature-based lard oxidation kinetic model was constructed to realize the rapid prediction of temperature-based lard quality. **Methods:** Stored the lard at 50, 60, 70 °C. During lard storage, the peroxide value (POV) of lard fat, Thiobarbituric acid value (TBARs) and acid value (acid value, AV) and other indicators were regu-

larly measured, and the oxidation kinetic model between each indicator and storage temperature and storage time was established.

Results: Under the same temperature, the oxidation degree of lard deepened with the increase of time, and the oxidation rate increases with the increase of temperature; the changes of lard peroxide value, thiobarbituric acid value and acid value in the reaction were more consistent with one another. First-order kinetic model, the activation energies obtained by Arrhenius equation were 15.718 2, 21.255 0, and 2.299 6 kJ/mol, respectively. The model verifies that the correlation coefficient between the actual measured value and the predicted value was relatively high. **Conclusion:** During the storage of lard at different temperatures, its oxidation deepens to varying degrees with time. A model that can quickly evaluate and predict the degree of oxidation of lard in different temperature ranges has been established, and the lard should be stored as low as possible during the process of lard storage.

Keywords: lard; oxidation; peroxide value; thiobarbituric acid value; acid value; dynamics model

猪油脂作为猪肉制品的主要脂质, 其氧化过程中产生的氧化产物不仅直接影响产品的外观、质地和营养物质等^[1], 还能进一步与蛋白质发生反应, 导致蛋白质变性, 甚至产生有害组分^[2-4]。因此, 从加工工艺、产品感官品质、营养和生命健康角度而言, 对猪油氧化进行深入系统研究为构建有效控制技术提供理论指导显得尤为必要。

影响猪油氧化的因素较多, 如光照、氧气、微生物和

基金项目: 国家自然科学基金(编号: U1504331)

作者简介: 刘姗姗, 女, 河南农业大学在读硕士研究生。

通信作者: 黄现青(1977—), 男, 河南农业大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: hxq8210@126.com

收稿日期: 2021-06-21

金属离子等^[5-6],其中最主要的因素是温度^[7]。监测脂质氧化的常见指标有过氧化值、酸价、硫代巴比妥酸值等,而应用动力学理论和阿伦尼乌斯(Arrhenius)方程建立的模型可以模拟油脂氧化指标随时间—温度变化的规律^[8],从而建立基于温度的氧化模型,探究贮藏温度对油脂氧化指标的影响。袁博等^[9]建立了 DHA 藻油过氧化值、共轭二烯值和丙二醛值与贮藏温度和贮藏时间的氧化动力学模型。龙婷等^[10]利用动力学和人工神经网络模型进行拟合,建立了贮藏过程中油茶籽油品质指标变化及预测模型。Tan 等^[11]通过测定不同温度下 10 种花生油的热氧化曲线,利用 Arrhenius 公式分析了其贮藏稳定性。已有的有关猪油的研究主要集中于以猪油为载体或参照对象,比较其抗氧化剂和抗氧化性能^[12],但关于猪油贮藏过程中的氧化动力学模型的研究尚未见报道。

文章拟测定不同贮藏温度下猪油的氧化指标(过氧化值、硫代巴比妥酸值和酸价)随贮藏时间的变化趋势,建立基于贮藏温度的猪油氧化动力学模型,掌握其氧化过程中的动力学参数,旨在对猪油氧化指标的未来状态进行定量预测,从而为猪肉制品的贮藏提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

新鲜猪肥膘、板油:市售;

无水乙醇、冰乙酸:分析纯,天津市富宇精细化工有限公司;

氢氧化钠、2-硫代巴比妥酸(TBA):分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

可溶性淀粉、乙二胺四乙酸(EDTA)、无水碳酸钠、可溶性淀粉、硫代硫酸钠:分析纯,天津市永大化学试剂有限公司;

碘化钾:分析纯,天津市津北精细化工有限公司;

三氯乙酸:分析纯,西陇科学股份有限公司。

1.1.2 主要仪器与设备

电子天平:FA224 型,上海舜宇恒平科学仪器有限公司;

紫外可见分光光度计:UV200 型,尤尼柯(上海)仪器有限公司;

高速冷冻离心机:Neofuge1600R 型,上海力康有限公司;

电热恒温水浴锅:DFD-700 型,北京市长风仪器仪表公司;

电热鼓风干燥箱:101-1ABS 型,北京市永光明医疗仪器厂;

人工气候培养箱:ZRQ-250 型,上海喆图科学仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 猪油制备流程

精选→清洗→切碎→火炼熬制(最高温度 140 ℃)→油渣过滤

1.2.2 过氧化值(POV)测定 按 GB/T 5009.227—2016 执行。

1.2.3 硫代巴比妥酸值(TBARS)测定 按 GB/T 8937—2006 执行。

1.2.4 酸价(AV)测定 按 GB/T 5009.229—2016 执行。

1.2.5 Schaal 烘箱加速试验 采用烘箱加速加热试验,将样品置于 100 mL 带刻度棕色玻璃瓶中,在有限空气和避光条件下于设定贮藏温度(50,60,70 ℃)下连续氧化 36 d。每 12 h 更换一次样品位置,每 4 d 取样测定其过氧化值、硫代巴比妥酸值和酸价,重复 3 次取平均值。

1.3 猪油的氧化预测模型及动力学模型建立

1.3.1 零级和一级模型 依据化学动力学原理^[13],贮藏期间猪油氧化的动力学模型可以表示为:

$$dB/dt = kB_n. \quad (1)$$

将 $n=0$ 代入式(1),得零级动力学方程:

$$B = B_0 + kt. \quad (2)$$

将 $n=1$ 代入式(1),得一级动力学方程:

$$B = B_0 e^{kt}, \quad (3)$$

式中:

B ——贮藏过程的氧化指标数值;

k ——速率常数, d^{-1} ;

n ——反应的动力学顺序;

B_0 ——氧化指标的初始值。

建立样品氧化指标与贮藏时间的回归方程,得到方程的决定系数 R^2 ,选择 R^2 越高的方程来确定动力学反应级数。

1.3.2 Arrhenius 方程 利用 50,60,70 ℃(323,333,343 K)下测得的猪油过氧化值、硫代巴比妥酸值和酸价作图,确定化学反应级数,计算反应速率 k 。Arrhenius 方程可以用来反映不同氧化速率与贮藏温度之间的函数关系^[14],并遵循阿伦尼乌斯方程:

$$k = A e^{-E_a/RT}, \quad (4)$$

式中:

A ——指前因子;

R ——通用气体常数,8.314 J/(mol·K);

T ——绝对温度,K;

E_a ——活化能,kJ/mol。

对式(4)取对数得

$$\ln k = \ln A - (E_a/RT). \quad (5)$$

将 $\ln k$ 与 $1/T$ 作图,由方程的斜率求得活化能 E_a ,截距求得指前因子 A 。

1.3.3 氧化指标变化动力学模型构建 将式(4)代入

式(2),得氧化指标的零级动力学模型:

$$B = B_0 + At e^{(-E_a/RT)} \quad (6)$$

将式(4)代入式(3),得氧化指标的一级动力学模型:

$$B = B_0 e^{A \exp(-E_a/RT)} \quad (7)$$

1.4 数据统计分析

采用 IBM SPSS Statistics 19 软件和 Excel 2016 软件进行数据处理, OriginPro 8.6 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 过氧化值变化动力学模型的构建

2.1.1 贮藏温度对猪油过氧化值变化的影响 由图 1 可知,同一贮藏温度下,过氧化值随贮藏时间的延长逐渐增大,且差异显著($P < 0.05$),0~15 d 增长缓慢,15 d 后增长速度逐渐变大;同一贮藏时间下,猪油的过氧化值随贮藏温度的升高逐渐变大,且差异显著($P < 0.05$),其中,70 °C 下猪油的过氧化值增长较快,贮藏第 36 天,50,60,70 °C 下过氧化值从 (2.10 ± 0.08) mmol/kg 分别增加至 (12.01 ± 0.84) , (22.07 ± 0.67) , (36.89 ± 1.60) mmol/kg,分别增加了 471.90%,950.95%,1 656.67%。说明温度越高,过氧化值变化越明显,可能是因为油脂受热引发自动氧化,产生游离基,不饱和脂肪酸双键断裂,促进游离基产生,从而加快氧化反应的进行^[15]。这与汉麻籽油^[16]、葵花籽油^[17]氧化过程中过氧化值的规律相似,与 López-Duarte 等^[18]的结论相似。贮藏温度对油脂的变化趋势类似,均符合 Arrhenius 方程。但不饱和脂肪酸含量高的油脂(如亚麻籽油)的氧化速度明显快于饱和脂肪酸(如猪油)的。

2.1.2 过氧化值的变化速率及反应级数 过氧化值与零级和一级动力学方程拟合结果分别见图 2、图 3 和表 1。由表 1 可知,不同贮藏温度下过氧化值一级模型的 R^2 均

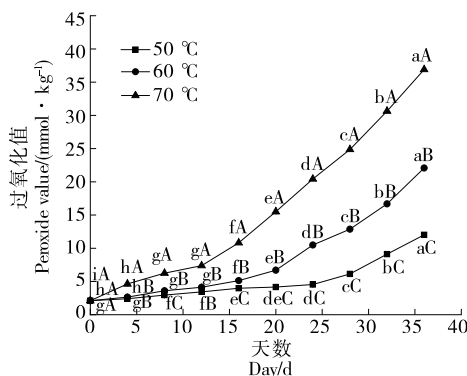


图 1 不同贮藏温度下过氧化值随贮藏时间的变化
Figure 1 The value of peroxide varies with storage time at different temperatures

高于零级模型,且所有一级模型的 $R^2 > 0.90$,说明试验数据与方程的一级模型拟合较好,一级模型对应的反应速率常数 k 在 50,60,70 °C 下分别为 0.0477 6,0.0707 4,0.075 6,表明油脂氧化速率与贮藏温度呈正相关,温度越高,氧化速率越快。

2.1.3 过氧化值变化反应的指前因子和活化能 将 $\ln k$ 与 $1/T$ 作图,结果见图 4,获得方程 $y = -2 536.532 6x + 4.906 7$ ($R^2 = 0.929 7$)。由线性方程的斜率求得活化能 $E_a = 21.255 0$ kJ/mol,从截距求得指前因子 $A = 135.594 7$ 。过氧化值反应过程中其活化能较小,说明反应较易进行。油脂氧化动力学参数与其脂肪酸组成等其他生物活性化合物有关^[19]。

2.1.4 过氧化值的变化动力学模型 猪油过氧化值在不同贮藏温度下随贮藏时间的变化符合一级动力学反应,将其活化能、指前因子代入式(7)得:

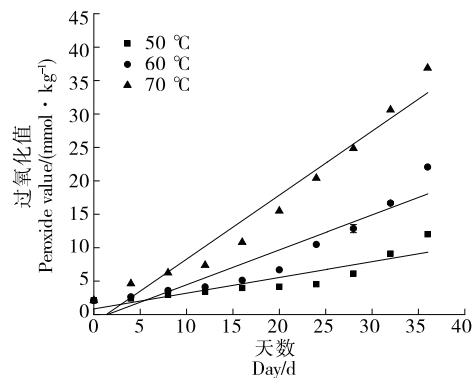


图 2 不同贮藏温度下过氧化值随贮藏时间的变化规律及零级模型拟合结果

Figure 2 The results of zero-level model fitting of the law of peroxide change in the peroxide value of lard at

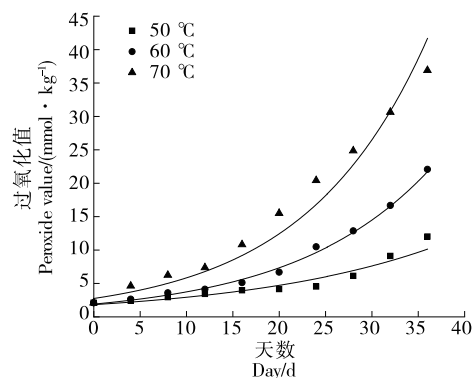


图 3 不同贮藏温度下过氧化值随贮藏时间的变化规律及一级模型拟合结果

Figure 3 The results of first-level model fitting of the law of peroxide change in the peroxide value of lard at different storage

表 1 过氧化值动力学模型的参数及相关系数

Table 1 Parameters and related coefficient values of the dynamic model of peroxide values

贮藏温度/℃	级数	R^2	调整后 R^2	方程	k
50	零级	0.805 6	0.781 3	$y=0.235\ 8x+0.835\ 9$	0.235 80
	一级	0.940 3	0.932 8	$y=1.817\ 4e^{0.047\ 76\ x}$	0.047 76
60	零级	0.863 5	0.846 4	$y=0.522\ 7x-0.773\ 9$	0.567 80
	一级	0.995 2	0.994 6	$y=1.898\ 9e^{0.067\ 69\ x}$	0.070 74
70	零级	0.954 9	0.949 2	$y=0.957\ 9x-1.295$	0.957 90
	一级	0.993 7	0.993 0	$y=2.741\ 3e^{0.075\ 6\ x}$	0.075 60

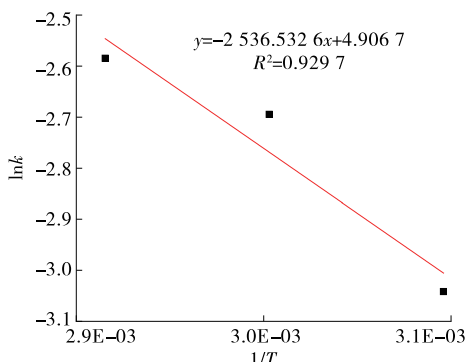


图 4 不同贮藏温度下猪油过氧化值变化的 Arrhenius 方程

Figure 4 Arrhenius equation for changes in the peroxide value of lard at different storage temperatures

$$B_{POV} = B_{POV,0} e^{135.594\ 7 \exp(-2.125\ 5 \times 10^4 / RT)} \quad (8)$$

对猪油过氧化值在不同贮藏温度下随贮藏时间变化的实测值和预测值进行相关性分析,结果如图 5 所示。由图 5 可知,50,60,70 ℃下过氧化值实测值与预测值的相关系数分别为 0.952 5,0.995 2,0.968 6,试验数据和拟合模型之间相关性好、拟合度高,说明该模型可以在一定贮藏温度下预测猪油的过氧化值。

2.2 硫代巴比妥酸值变化动力学模型的构建

2.2.1 贮藏温度对猪油硫代巴比妥酸值的影响 由图 6 可知,同一贮藏温度下,硫代巴比妥酸值随贮藏时间的延

长而增大,且差异显著 ($P < 0.05$);同一贮藏时间下,硫代巴比妥酸值随贮藏温度的升高而变大,且差异显著 ($P < 0.05$),贮藏第 36 天,50,60,70 ℃下硫代巴比妥酸值分别为 4.46,5.03,6.21 mg/kg。与过氧化值增长趋势类似,猪油中的硫代巴比妥酸值随贮藏时间的延长不断增加,且贮藏温度增高,硫代巴比妥酸值变化越明显。这可能取决于脂肪酸结构和脂质氧化敏感性的增加,较高的不饱和脂肪酸含量导致较高的氧化变化,氢过氧化物也可能在热效应下分解引发脂质氧化最终产物的形成,醛类等次级氧化产物还可能发生聚合反应或者与其他聚合物(如蛋白质)相互作用^[20],但硫代巴比妥酸值总体呈上升趋势,说明氢过氧化物分解产生的丙二醛含量大于丙二醛与其他产物的聚合反应。贮藏温度越高,脂质氧化程度越高,与 Lee 等^[21]的结论相似。

2.2.2 硫代巴比妥酸值的变化速率及反应级数 硫代巴比妥酸值的零级或一级动力学方程拟合结果见图 7、图 8 和表 2。不同贮藏温度下硫代巴比妥酸值一级模型的 R^2 均高于零级模型的,且 $R^2 > 0.90$,表明硫代巴比妥酸值变化与一级模型拟合较好,随着贮藏温度的升高,速率常数 k 逐渐增加。

2.2.3 硫代巴比妥酸值变化反应的指前因子和活化能

对硫代巴比妥酸值的一级反应模型的 $\ln k$ 与 $1/T$ 作图,获得方程 $y = -276.594\ 7x - 2.006\ 12$ ($R^2 = 0.974\ 7$),求得其活化能 $E_a = 2.299\ 6$ kJ/mol 和指前因子 $A =$

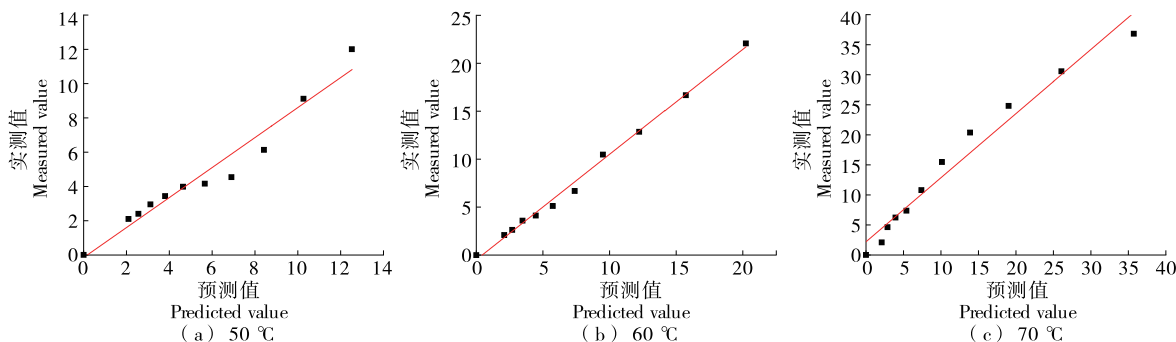
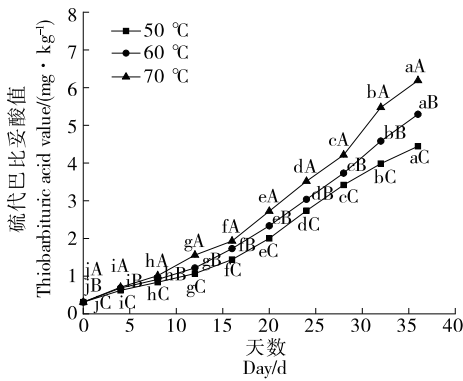


图 5 不同贮藏温度下过氧化值实测值与预测值之间的关系

Figure 5 The relationship between the measured and predicted values of acid price at different storage temperatures



大写字母不同表示同一贮藏时间下不同贮藏温度间差异显著 ($P<0.05$);小写字母不同表示同一贮藏温度下不同贮藏时间差异显著 ($P<0.05$)

图 6 不同贮藏温度下硫代巴比妥酸值随贮藏时间的变化
Figure 6 The change of thiobarbituric acid value with storage time at different temperatures

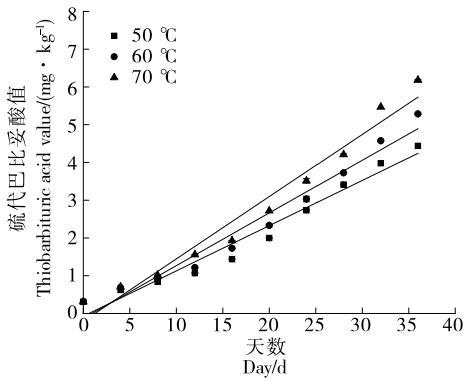


图 7 不同贮藏温度下硫代巴比妥酸值随贮藏时间的变化规律及零级模型拟合结果
Figure 7 The results of the zero-stage model fitting of the TBARS variation law of lard at different storage temperatures

0.134 5。硫代巴比妥酸值反应活化能较小,说明反应易进行。

2.2.4 猪油的硫代巴比妥酸值变化动力学模型 将活化能 E_a 和指前因子 A 代入式(7),得硫代巴比妥酸值变化的一级动力学模型:

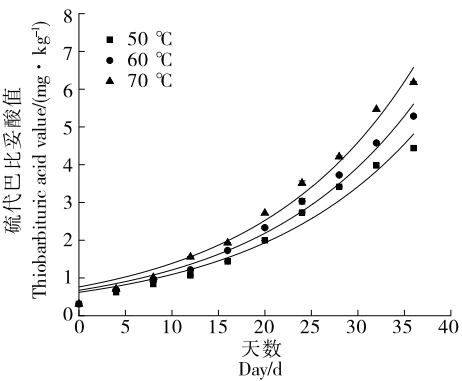


图 8 不同贮藏温度下硫代巴比妥酸值随贮藏时间的变化规律及一级模型拟合结果

Figure 8 The results of the first-level model fitting of TBARS with the law of change over time at different storage temperatures of lard

$$B_{TBARS} = B_{TBARS,0} e^{0.134 5 t \exp(2.299 6 \times 10^3 / RT)} \quad (9)$$

对猪油硫代巴比妥酸值变化的实测值和预测值进行相关性分析,结果如图 10 所示。50,60,70 °C 下硫代巴比妥酸值实测值与预测值之间的相关系数分别为 0.989 4, 0.988 2, 0.980 0,试验数据和拟合模型之间相关性好、拟合度高。

2.3 酸价变化动力学模型的构建

2.3.1 贮藏温度对猪油酸价的影响 由图 11 可知,同一贮藏温度下,酸价随贮藏时间的延长逐渐增加,且差异显著 ($P<0.05$);同一贮藏时间下,贮藏温度越高,酸价增加得越快,且差异显著 ($P<0.05$),贮藏第 36 天,50,60,70 °C 下酸价从 (0.36 ± 0.01) mg/g 分别升高至 (0.86 ± 0.01) , (0.96 ± 0.04) , (1.23 ± 0.50) mg/g,分别提高了 138.89%,166.67%,241.67%。说明猪油中不饱和脂肪酸在高温作用下分解产生游离脂肪酸,温度越高,氧化反应进行得越快,游离脂肪酸产生得越多^[22],另一方面,油脂经复杂的氧化反应产生的醛酸类小分子也会使酸价升高^[23]。酸价变化与过氧化值和硫代巴比妥酸值变化趋势一致,均随贮藏温度的升高而变大,因此猪油应尽量低温贮藏。

表 2 硫代巴比妥酸值动力学模型的参数及相关系数

Table 2 Parameters and related coefficient values of the TBARS dynamics model

贮藏温度/°C	级数	R^2	调整后 R^2	方程	k
50	零级	0.966 1	0.961 9	$y=0.120 40x-0.075 08$	0.120 40
	一级	0.971 2	0.967 6	$y=0.620 27e^{0.057 00x}$	0.057 00
60	零级	0.967 2	0.963 1	$y=0.140 30x-0.134 62$	0.140 30
	一级	0.982 1	0.979 8	$y=0.675 1e^{0.058 89x}$	0.058 89
70	零级	0.966 6	0.962 4	$y=0.165 60x-0.209 87$	0.165 60
	一级	0.980 6	0.978 2	$y=0.763 87e^{0.059 91x}$	0.059 91

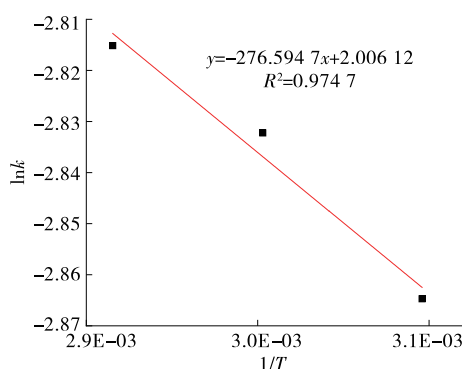


图 9 不同贮藏温度下硫代巴比妥酸值变化的 Arrhenius 方程

Figure 9 Arrhenius equation for changes in lard TBARs at different storage temperature

2.3.2 酸价的变化速率及反应级数 酸价的模型拟合结果如图 12、图 13 和表 3 所示。不同贮藏温度下酸价一级动力学方程的 R^2 均明显优于零级动力学方程的,表明一

级动力学方程具有较好的拟合度。50, 60, 70 °C 下,一级模型下的反应速率常数 k 分别为 0.023 49, 0.026 97, 0.033 07,表明油脂氧化速率与贮藏温度紧密相关,贮藏温度越高,氧化速率越快。

2.3.3 酸价变化反应的指前因子和活化能 根据式(5)对酸价一级反应速率常数的对数 $\ln k$ 与贮藏温度的倒数 $1/T$ 作图,得到图 14,获得方程 $y = -1\,890.564\,3x + 2.089\,67$ ($R^2 = 0.983\,7$)。

2.3.4 酸价变化的动力学模型与验证 将活化能 E_a 和指前因子 A 代入式(7),得

$$B_{AV} = B_{AV,0} e^{8.082\,2 \exp(-1.571\,8 \times 10^4 / RT)} \quad (10)$$

对猪油酸价变化的实测值和预测值进行相关性分析,结果如图 15 所示。50, 60, 70 °C 下酸价实测值与预测值之间的相关系数分别为 0.998 8, 0.991 7, 0.989 0,说明模型拟合度高,在一定贮藏温度下,此模型可行有效。

3 结论

研究表明,不同贮藏温度下猪油的氧化指标(过氧化

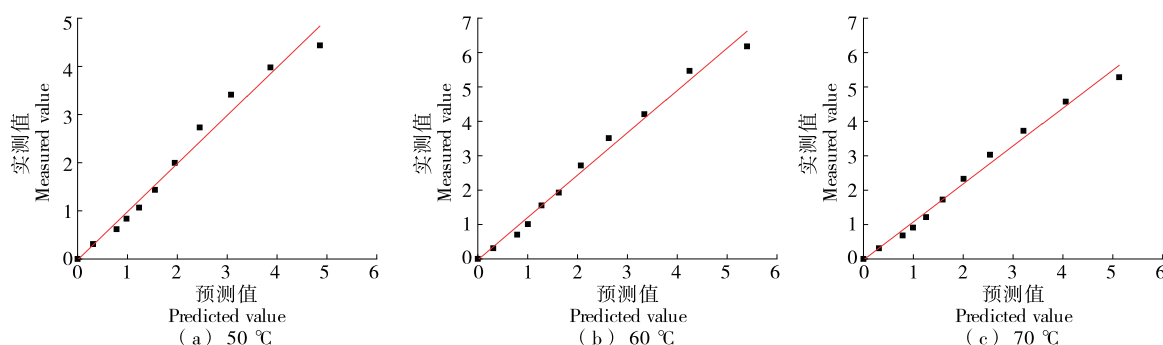
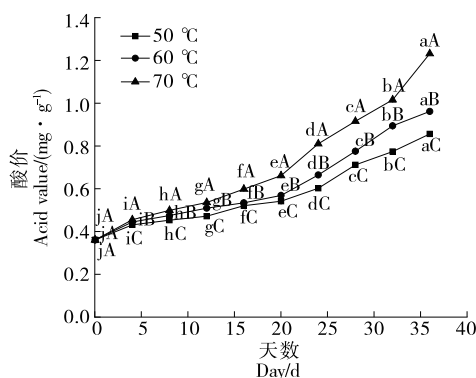


图 10 不同贮藏温度下硫代巴比妥酸值实测值与预测值之间的关系

Figure 10 The relationship between the measured TBARS and the predicted value at different storage temperatures



大写字母不同表示同一贮藏时间下不同贮藏温度间差异显著 ($P < 0.05$);小写字母不同表示同一贮藏温度下不同贮藏时间差异显著 ($P < 0.05$)

图 11 不同贮藏温度下酸价随储藏时间的变化

Figure 11 Acid value varies with storage time at different temperatures

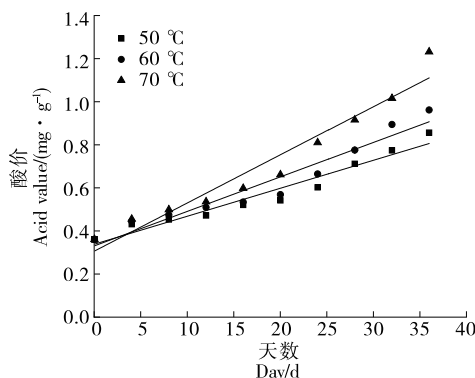


图 12 不同贮藏温度下酸价随贮藏时间的变化规律及零级模型拟合结果

Figure 12 The results of the zero-stage model fitting of the acid value change law over time at different storage temperatures of lard

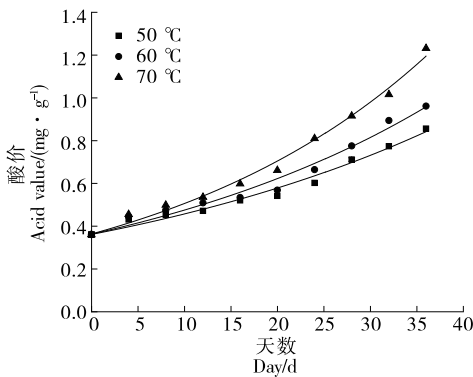


图 13 不同贮藏温度下酸价随贮藏时间的变化规律及一级模型拟合结果

Figure 13 The first-level model fitting results of the acid value of lard change over time at different storage temperatures

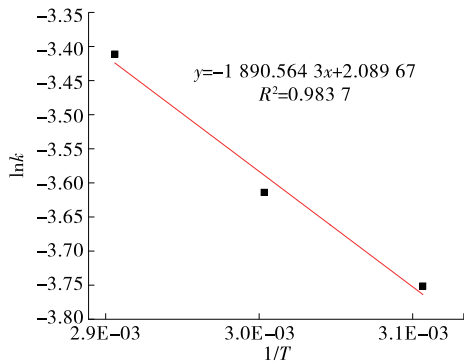


图 14 不同贮藏温度下猪油酸价变化的 Arrhenius 方程

Figure 14 Arrhenius equation of acid value of lard under different storage temperatures

表 3 酸价动力学模型的参数及相关系数

Table 3 Parameters and related coefficient values of the acid value dynamics model

贮藏温度/℃	级数	R^2	调整后 R^2	方程	k
50	零级	0.949 2	0.942 9	$y=0.012\ 9x+0.338\ 5$	0.012 90
	一级	0.981 3	0.979 0	$y=0.361\ 3e^{0.023\ 49x}$	0.023 49
60	零级	0.942 9	0.932 7	$y=0.016\ 0x+0.330\ 8$	0.016 00
	一级	0.978 4	0.975 7	$y=0.362\ 7e^{0.026\ 97x}$	0.026 97
70	零级	0.946 9	0.940 3	$y=0.022\ 3x+0.306\ 46$	0.022 30
	一级	0.990 2	0.988 9	$y=0.363\ 3e^{0.033\ 07x}$	0.033 07

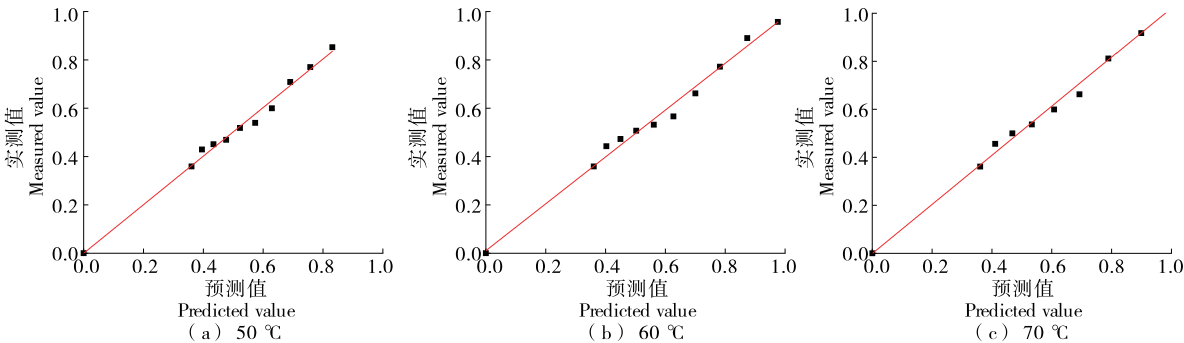


图 15 不同贮藏温度下酸价实测值与预测值之间的关系

Figure 15 Relationship between acid value measured and predicted values at different storage temperatures

值、硫代巴比妥酸值和酸价等)随贮藏时间的延长而不断增加;随着贮藏温度的升高,氧化指标变化幅度增大,且差异显著($P<0.05$),反应速率随贮藏温度的升高而增大。猪油各氧化指标变化均符合一级动力学模型,过氧化值、硫代巴比妥值和酸价变化的活化能分别为 21.255 0, 2.299 6, 15.718 2 kJ/mol。由于 3 个氧化指标中,过氧化值的变化幅度最大,因此以过氧化值为 10 mmol/kg 为贮藏终点,通过模型计算得到 50, 60, 70 °C 下猪油贮藏时间分别为 31.42, 24.76, 19.81 d, 企业在贮藏猪油制品及猪肉制品时应低于这些贮藏时间。此外,企业可以通过测定某

个样品的过氧化指标,通过模拟的动力学方程快速便捷地预测已贮藏的时间、还能贮藏的时间和保质期。经验证表明各预测模型均能很好地预测不同贮藏温度下猪油的氧化变化,关于猪油脂质氧化动力学研究方向后续应考虑结合不同的贮藏温度范围,以更好地理解脂质氧化机理和相关的活化能来预测保质期。

参考文献

[1] 万向, 郭志有. 肉制品中脂肪氧化影响因素研究[J]. 畜禽业, 2012(9): 48-51.

- WAN Xiang, GUO Zhi-you. Research of factors on fat oxidation in meat products[J]. Livestock and Poultry Industry, 2012(9): 48-51.
- [2] HUBER G M, RUPASINGHE H P V, SHAHIDI F. Inhibition of oxidation of omega-3 polyunsaturated fatty acids and fish oil by quercetin glycosides[J]. Food Chem, 2009, 117(2): 290-295.
- [3] 陈芳, 陈伟娜, 胡小松. 基于油脂氧化的食品加工伴生危害物形成研究进展[J]. 中国食品科学报, 2015, 15(12): 9-15.
CHEN Fang, CHEN Wei-na, HU Xiao-song. Research progress on the formation of toxic compounds in food processing based on lipid oxidation[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2015, 15(12): 9-15.
- [4] 李蕊. 茶多酚与维生素协同作用对食用油脂抗氧化活性的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014: 6-8.
LI Rui. Effect of tea polyphenols and vitamins' synergistic effect on the antioxidant activity of edible oil[D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2014: 6-8.
- [5] 曹少谦, 郑啸谷, 毛志康, 等. 脉冲强光对油脂氧化稳定性的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(3): 183-191.
CAO Shao-qian, ZHENG Xiao-gu, MAO Zhi-kang, et al. Effect of intense pulsed light on the oxidation stability of oils[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(3): 183-191.
- [6] 刘婷. 刺葡萄酒渣中白藜芦醇的提取及其抗油脂氧化性能研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015: 47-48.
LIU Ting. Extraction of resveratrol from *Vitis davidii* fruit wine residues and antioxidation for oil[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015: 47-48.
- [7] 韩山山. 磷脂与游离脂肪酸对植物油烟点形成与氧化稳定性的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 6-7.
HAN Shan-shan. Studies on effects of phospholipids and free fatty acids on formation of smoke and oxidation stability in vegetable oils[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014: 6-7.
- [8] 刘春菊, 钱曼, 宋江峰, 等. 速冻莲藕片贮藏过程中品质变化动力学模型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 301-308.
LIU Chun-ju, QIAN Min, SONG Jiang-feng, et al. Establishment of dynamic model for quality change in frozen lotus root slices during storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(6): 301-308.
- [9] 袁博. DHA 藻油抗氧化稳定性及其氧化动力学研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019: 3-7.
YUAN Bo. Study on antioxidant activity of DHA algae oil and its oxidative kinetics[D]. Wuhan: Wuhan University of Light Industry, 2019: 3-7.
- [10] 龙婷, 林树真, 林树红, 等. 基于不同贮藏温度下油茶籽油氧化模型的建立[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(5): 105-109.
LONG Ting, LIN Shu-zhen, LIN Shu-hong, et al. Establishment of Oxidation Model of Camellia oleifera Seed Oil Based on Different Storage Temperatures[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(5): 105-109.
- [11] TAN C P, MAN Y B C, SELAMAT J, et al. Application of Arrhenius kinetics to evaluate oxidative stability in vegetable oils by isothermal differential scanning calorimetry[J]. J Am Oil Chem Soc, 2001, 78(11): 1 133.
- [12] 高辉, 姚慧, 吕晓玲. 迷迭香酸对火腿肠的抗氧化作用[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(10): 20-23.
GAO Hui, YAO Hui, LU Xiao-ling. Antioxidant effect of rosmarinic acid in ham[J]. Food Research and Development, 2012, 33(10): 20-23.
- [13] LABUZA T P, SHAPER M. Prediction of nutrient losses[J]. J Food Process Pres, 1978(2): 91-99.
- [14] LABUZA T P, SCHMIDL M K. Accelerated shelf-life testing of foods[J]. Food Technol, 1985, 39(9): 57-64.
- [15] GOMEZ-ALONSO S, MANCEBO-CAMPOS V, SALVADOR M D, et al. Oxidation kinetics in olive oil triacylglycerols under accelerated shelf-life testing (25~75 °C)[J]. Eur J Lip Sci Tech, 2004, 106(6): 369-375.
- [16] 马攀, 赵明烨, 陈敏, 等. 汉麻籽油的氧化稳定性及货架期预测[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(2): 88-91.
MA Pan, ZHAO Ming-ye, CHEN Min, et al. Oxidation stability study and shelf life prediction on china-hemp seed oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(2): 88-91.
- [17] 卢海燕, 王欣, 赵婷婷, 等. 葵花籽油贮藏过程理化性质与 LF-NMR 弛豫特性的相关性[J]. 分析测试学报, 2014, 33(4): 395-402.
LU Hai-yan, WANG Xin, ZHAO Ting-ting, et al. Relationship between analytical indicators of sunflower oil and the LF-NMR relaxation characteristics during storage process[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2014, 33(4): 395-402.
- [18] LÓPEZ-DUARTE A L, VIDAL-QUINTANAR R L. Oxidation of linoleic acid as a marker for shelf life of corn flour[J]. Food Chem, 2009, 114: 478-483.
- [19] VELOSO A C A, RODRIGUES N, OUAROUER Y, et al. A Kinetic-Thermodynamic Study of the effect of the cultivar/total phenols on the oxidative stability of olive oils[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2020, 97(6): 625-636.
- [20] NACAK B, ÖZTURK-KERIMOĞLU B, YILDIZ D, et al. Peanut and linseed oil emulsion gels as potential fat replacer in emulsified sausages[J]. Meat Sci, 2021, 176: 108464.
- [21] LEE F Z, PARK K H, EUN J B. Antioxidative effect of bamboo smoke distillates in palm oil and lard during storage[J]. Korean J Food Sci Technol, 2004, 36: 905-910.
- [22] 曲文娟, 凡威, 马海乐, 等. 滚筒催化红外—热风联合干燥核桃的贮藏特性[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 168-173, 240.
QU Wen-juan, FAN Wei, MA Hai-le, et al. Storage properties of walnuts dried by drum catalytic infrared-hot air[J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 168-173, 240.
- [23] 王赛楠, 郭立净, 智文莉, 等. 食用油、油脂及其制品的质量安全风险分析与监管对策研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(9): 38-42, 66.
WANG Shai-nan, GUO Li-jing, ZHI Wen-li, et al. Risk analysis and supervision countermeasure on quality safety of edible oils, oils and fats, and their products[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(9): 38-42, 66.