

不同脱酸工艺对红花籽油储藏品质的影响

辛乐宇^{1,2,3}, 张泽鹏¹, 萨拉麦提·艾迪热斯^{2,3}, 过利敏^{2,3}, 杨海燕¹

(1. 新疆农业大学食品科学与药学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业科学院农产品贮藏加工研究所, 乌鲁木齐 830091; 3. 新疆农产品加工与保鲜重点实验室, 乌鲁木齐 830091)

摘要:为了选择合适的脱酸工艺,提高红花籽油的储藏品质,以脱胶红花籽油为原料,采用碱炼脱酸和超声波辅助乙醇萃取(UAEE)脱酸工艺制备脱酸红花籽油,并采用Schaal烘箱法进行加速氧化试验,比较加速氧化期间脱酸红花籽油的理化指标(酸值、过氧化值、*p*-茴香胺值)、脂质伴随物(α -生育酚、总酚、总甾醇)含量,以及体外抗氧化能力(DPPH、ABTS自由基清除能力),对比分析2种脱酸工艺对红花籽油储藏品质的影响,并预测货架期的差异。结果表明:随着储藏时间的延长,2种脱酸红花籽油的理化品质、脂质伴随物含量、体外抗氧化能力均呈下降趋势;与碱炼脱酸工艺相比,UAEE脱酸工艺制备的红花籽油储藏品质更优;2种脱酸红花籽油的氧化均符合一级氧化动力学反应,通过动力学方程预测20℃和25℃密封避光条件下,UAEE脱酸红花籽油的货架期分别约为28 d和27 d,而碱炼脱酸红花籽油的分别约为22 d和21 d。综上,与碱炼脱酸相比,UAEE脱酸能提升红花籽油的储藏品质,有利于延长红花籽油的货架期。

关键词:红花籽油;超声波辅助乙醇萃取脱酸;碱炼脱酸;储藏品质;货架期

中图分类号:TQ644.4;TS225.1 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2023)04-0027-06

Effect of deacidification process on storage quality of safflower seed oil

XIN Leyu^{1,2,3}, ZHANG Zepeng¹, SALAMET Edirs^{2,3}, GUO Limin^{2,3}, YANG Haiyan¹

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Institute of Agro-Products Storage and Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences,

Urumqi 830091, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Agro-Products Processing and Preservation, Urumqi 830091, China)

Abstract: In order to select a suitable deacidification process to improve the storage quality of safflower seed oil (SSO), with the degumming SSO as the material, the deacidified SSO were prepared by alkali refining deacidification and ultrasonic assisted ethanol extraction (UAEE) deacidification, and an accelerated oxidation test was carried out by Schaal oven method, and the physicochemical parameters (acid value, peroxide value, *p*-anisidine value), lipid concomitants (α -tocopherol, total phenols, total sterols) content and in vitro antioxidant capacity (DPPH, ABTS radical scavenging capacity) of deacidified SSO during accelerated oxidation were compared so as to analyze the effects of the two deacidification processes on the storage quality of SSO. In addition, the differences in shelf life of two kinds of deacidified SSO were predicted. The results showed that the physicochemical quality, lipid concomitant content and in vitro antioxidant capacity of both deacidified SSO decreased with storage time

prolonging. Compared with alkali deacidification, the UAEE deacidification process was superior in the storage quality of SSO. The oxidation of both deacidified SSO were fitted with the first-order oxidation kinetic reaction, and the kinetic equations predicted the shelf life of approximately 28 d and 27 d for UAEE deacidified SSO under sealed and light-proof conditions at 20℃ and

收稿日期:2022-02-22;修回日期:2022-12-23

基金项目:新疆维吾尔自治区公益性科研院所基本科研项目(KY2020103)

作者简介:辛乐宇(1998),男,硕士研究生,研究方向为农产品加工与综合利用(E-mail)1543141620@qq.com。

通信作者:杨海燕,教授,博士(E-mail)yanghaiyan163@163.com;过利敏,副研究员,博士(E-mail)guolm_xj@163.com。

25 °C, compared to approximately 22 d and 21 d for alkali deacidified SSO. In conclusion, UAEE deacidification can improve the storage quality of SSO and help to extend the shelf life of SSO compared with alkali deacidification.

Key words: safflower seed oil; ultrasonic assisted ethanol extraction deacidification; alkali deacidification; storage quality; shelf life

红花籽油(Safflower seed oil, SSO)是一种极具营养价值的食用油,它含有丰富的不饱和脂肪酸——亚油酸,含量高达73%~85%,有“亚油酸之王”的称号^[1],也因此SSO极易氧化酸败,货架期较短。SSO中还含有丰富的酚类物质、植物甾醇和生育酚等脂质伴随物,具有降脂、降血压、抗氧化、抗炎和抗动脉粥样硬化等多种生理功能^[2],也是评价SSO品质优劣的重要指标^[3]。研究表明,植物油中总甾醇、 α -生育酚等脂质伴随物与油脂抗氧化能力密切相关^[4]。然而油脂精炼过程多涉及高温、酸碱处理等操作条件,使得油脂中的有益脂质伴随物含量大幅下降,可能影响油脂的氧化稳定性。

脱酸是油脂精炼过程中的重要环节,通过去除游离脂肪酸,可提升SSO的储藏品质。碱炼脱酸是应用最为普遍的植物油脱酸工艺,但易造成中性油皂化,并导致脂质伴随物严重损失^[5-6]。超声波辅助乙醇萃取(Ultrasonic assisted ethanol extraction, UAEE)脱酸是一种溶剂脱酸法,能在相对较低的操作温度和较短的处理时间下对油脂进行脱酸,有利于热不稳定组分的保留,具有广阔的应用前景^[7]。本文以脱酸SSO为试验材料,分别采用碱炼脱酸和UAEE脱酸制备SSO,探究了不同储藏时间下2种脱酸工艺对SSO理化品质、脂质伴随物含量及体外抗氧化活性的影响。另外,通过建立2种工艺脱酸SSO的储藏动力学模型,对货架期进行了预测,以期SSO的储藏加工安全提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

脱酸SSO,由新疆伊犁雅其娜农业发展有限公司提供,于4 °C避光储存备用。

石油醚、异丙醇、异辛烷、无水乙醇、冰乙酸、甲醇、正己烷、磷酸(均为分析纯),天津北联公司;硫代硫酸钠、淀粉、碘化钾、三氯化铁、无水碳酸钠、过硫酸钾(均为分析纯),天津市致远化学试剂公司;Folin-Ciocalteu试剂,北京索莱宝公司; α -生育酚(纯度 $\geq 96\%$)、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(ABTS,纯度 $\geq 98\%$),美国

Sigma公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH,纯度 $\geq 98\%$)、水溶性VE(纯度 $\geq 98\%$),上海源叶生物科技有限公司;豆甾醇(纯度 $\geq 96\%$),上海安谱公司。

1.1.2 仪器与设备

1260 Infinity液相色谱仪,美国安捷伦公司;UV2000型紫外分光光度计,日本岛津公司;MS/05DU型分析天平,瑞士梅特勒-托利多公司;101型电热鼓风干燥箱,北京永光明公司;5810R型离心机,德国Eppendorf公司;SB-520DT型超声波清洗仪,宁波新芝生物科技股份有限公司;RF-02B旋转蒸发仪,上海况胜实业公司。

1.2 试验方法

1.2.1 SSO脱酸工艺

1.2.1.1 碱炼脱酸

参考朱远坤等^[8]的方法进行碱炼脱酸。

1.2.1.2 UAEE脱酸

参考康媛解等^[9]的方法进行UAEE脱酸。

1.2.2 Schaal烘箱法加速氧化试验

分别取碱炼脱酸SSO和UAEE脱酸SSO各1 000 mL于丝口瓶中,密封后放置在60 °C恒温烘箱中,每隔5 d取样并测定酸值、过氧化值、*p*-茴香胺值、 α -生育酚含量、总酚含量、总甾醇含量、DPPH自由基清除能力、ABTS自由基清除能力。

1.2.3 理化指标的测定

酸值测定参照GB 5009.229—2016;过氧化值测定参照栾真杰等^[10]的异辛烷-冰乙酸滴定法;*p*-茴香胺值测定参照GB/T 24304—2009。

1.2.4 脂质伴随物含量的测定

1.2.4.1 α -生育酚

参考纪佳璐等^[11]的方法并略作改动。使用 α -生育酚标准品,配制不同质量浓度的标准工作液,进行HPLC分析,以 α -生育酚质量浓度(*x*)为横坐标,峰面积(*y*)为纵坐标,绘制标准曲线,并得到标准曲线回归方程 $y = 134\,491x + 417\,039$ ($R^2 = 1$)。

取1 g SSO,按料液比1:1.25加入甲醇,旋涡振荡2 min后超声(300 W)提取20 min,然后以4 000 r/min离心5 min,取上清液。按以上方法重

复操作3次,合并上清液。将上清液浓缩至干后加入1 mL甲醇复溶,过0.22 μm 滤膜,进行HPLC检测,根据标准曲线回归方程计算 α -生育酚含量。

HPLC条件: Diamonsil - C18柱(4.6 mm \times 250 mm, 5 μm);紫外检测波长295 nm;流动相为甲醇,等度洗脱;进样量20 μL ;柱温30 $^{\circ}\text{C}$;流速1.0 mL/min。

1.2.4.2 总甾醇

参考李晓^[12]的方法测定SSO中总甾醇含量。

1.2.4.3 总酚

参考李园园^[13]的方法,采用福林酚法测定SSO中总酚含量。

1.2.5 体外抗氧化能力的测定

参考李志晓等^[14]的方法测定SSO对DPPH、ABTS自由基的清除能力。

1.2.6 氧化反应动力学模型的建立

分别取碱炼脱酸SSO和UAEE脱酸SSO各4份(每份200 mL)于丝口瓶中,密封后分别放置在30、40、50、60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温烘箱中,每隔5 d取样测定过氧化值。将油样在不同温度下的过氧化值分别与零级($C = C_0 + kt$)和一级($C = C_0 e^{kt}$)反应动力学方程进行拟合,确定最适合的反应动力学模型,然后结合

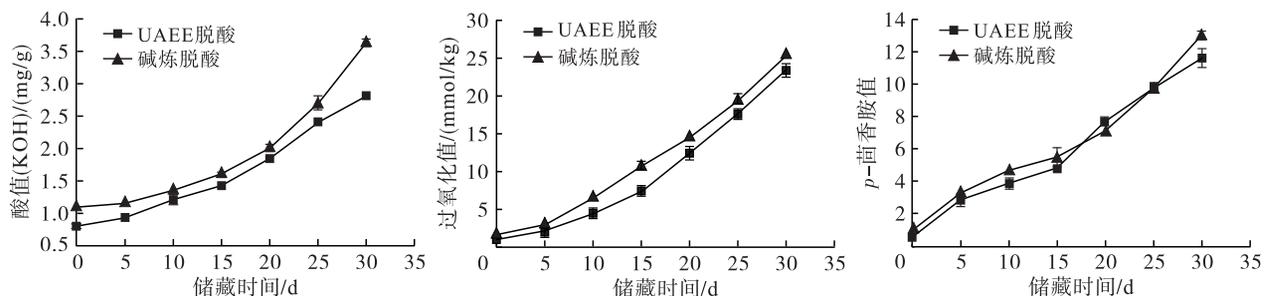


图1 脱酸工艺对储藏SSO酸值、过氧化值、 p -茴香胺值的影响

由图1可知,随着储藏时间的延长,2种脱酸SSO的酸值均呈上升趋势。其中,UAEE脱酸SSO初始酸值较低且上升速率平稳,而碱炼脱酸SSO初始酸值较高。当储藏30 d时,碱炼脱酸SSO的酸值(KOH)达到3.66 mg/g,而UAEE脱酸SSO的酸值(KOH)仅为2.83 mg/g。2种脱酸SSO在储藏过程中过氧化值的变化趋势相似,均随着储藏时间的延长不断上升,且上升速率逐渐增大。储藏30 d时,UAEE脱酸SSO的过氧化值为23.54 mmol/kg,低于碱炼脱酸SSO的25.27 mmol/kg。2种脱酸SSO的 p -茴香胺值在储藏期间持续上升,其中碱炼脱酸SSO的 p -茴香胺值在储藏20 d后快速增加,储藏30 d时达到12.93,略高于UAEE脱酸SSO的11.64。试验结果表明,UAEE脱酸SSO储藏过程中的理化品质明显优于碱炼脱酸SSO的,这可能

是因为碱炼脱酸过程中SSO长时间处于高温环境,

1.2.7 货架期的预测

以GB 2716—2018中规定的食用植物油过氧化值最高许可量9.85 mmol/kg为指标,利用建立的氧化动力学模型预测SSO的货架期。

1.2.8 数据处理

每组试验均重复测定3次,使用SPSS 16.0处理数据,所得结果用“ $\bar{x} \pm s$ ”表示,使用origin 2018作图并拟合数据。

2 结果与讨论

2.1 脱酸工艺对储藏SSO酸值、过氧化值、 p -茴香胺值的影响

酸值、过氧化值、 p -茴香胺值是评价油脂品质的重要指标。酸值反映了植物油中游离脂肪酸的含量,是评价油脂劣变程度的主要指标^[15-16]。过氧化值是植物油初级氧化阶段的重要指标,反映了油脂初级氧化产物氢过氧化物的含量^[17]。油脂初级氧化产物极不稳定,易分解成小分子化合物如醛、酮、酸等,这些分解产物的含量通常用 p -茴香胺值表示, p -茴香胺值是反映动植物油脂次级氧化程度的重要指标^[18]。脱酸工艺对储藏SSO酸值、过氧化值、 p -茴香胺值的影响见图1。

是因为碱炼脱酸过程中SSO长时间处于高温环境,使其酸值、过氧化值升高,有益脂质伴随物含量降低,康媛解等^[9]的研究结果也证实了这一点。

2.2 脱酸工艺对储藏SSO中 α -生育酚、总酚、总甾醇含量的影响

酚类化合物、生育酚及植物甾醇是赋予SSO营养价值和保健功能的主要脂质伴随物^[19]。SSO富含维生素E,且SSO中的维生素E以 α -生育酚为主^[20]。生育酚能够保护细胞膜,从而提高人体免疫力、延缓衰老^[21]。植物甾醇是SSO中主要的功能性物质之一,具有抗炎、抗肿瘤等重要功效^[22]。多酚是植物油中重要的脂质伴随物,具有抗氧化、抑菌等功效,它与油脂的氧化稳定性密不可分^[23]。脱酸工艺对储藏SSO中 α -生育酚、总酚、总甾醇含量的影响如图2所示。

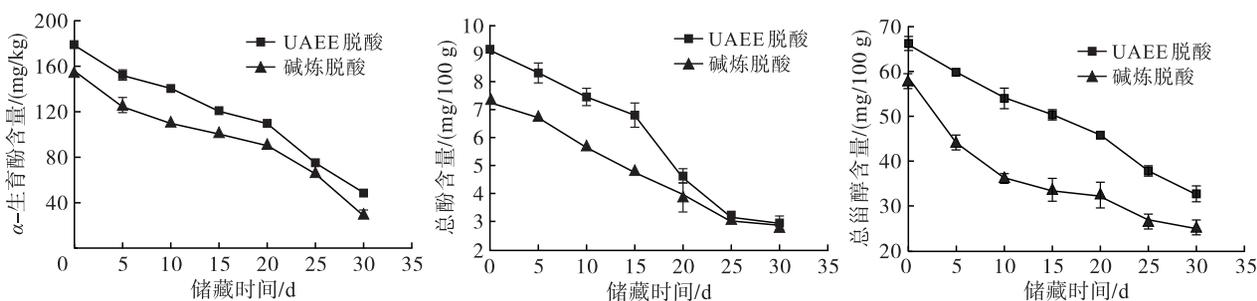


图2 脱酸工艺对储藏SSO中 α -生育酚、总酚、总甾醇含量的影响

由图2可知,在储藏期间,2种脱酸SSO的 α -生育酚含量不断降低,且变化趋势相似,其中UAEE脱酸SSO的 α -生育酚含量始终高于碱炼脱酸SSO的。当储藏30d时,UAEE脱酸SSO的 α -生育酚含量为47.86 mg/kg,而碱炼脱酸SSO的则为29.05 mg/kg,说明与碱炼脱酸工艺相比,UAEE脱酸工艺能更好地保留SSO中的 α -生育酚。2种脱酸SSO的总酚含量均随储藏时间的延长呈下降趋势,其中UAEE脱酸SSO的总酚含量在储藏15d后下降速率增大,这可能是由于酚类物质具备很好的抗氧化性,在该阶段充当反应底物被损耗,这一结果与亚麻籽油储藏过程中总酚变化趋势^[24]一致。随着储藏时间的延长,脱酸SSO中总甾醇含量快速降低。其中,UAEE脱酸SSO的总甾醇含量初始值较高,且在整个储藏过程中始终高于碱炼脱酸SSO的,表明UAEE脱酸工艺能有效保留SSO中的植物甾醇物质。生育酚、多酚、植物甾醇多具有热敏性,

高温下容易发生氧化分解和聚合,在精炼过程中易损失^[25]。储藏期间UAEE脱酸SSO的 α -生育酚、总酚、总甾醇含量始终高于碱炼脱酸SSO的,这可能是由于UAEE脱酸的温度相对较低,改善了SSO在碱炼脱酸过程中 α -生育酚、总甾醇、总酚损失较大的问题。与此同时,UAEE脱酸SSO中 α -生育酚等物质的含量较高也可能是由于超声波处理后,脱酸时间缩短,减少了脱酸过程中脂质伴随物的损失,这种现象同样出现在微波辅助提取姜黄油中^[26]。

2.3 脱酸工艺对储藏SSO DPPH、ABTS 自由基清除能力的影响

SSO中含有大量不饱和脂肪酸,这些不饱和脂肪酸会受到外界氧气、温度、光照等因素的影响而发生氧化酸败,植物油抗氧化性则是油脂抵御氧化酸败的能力。为了探究储藏过程中2种脱酸SSO的抗氧化活性,测定了储藏期间SSO的DPPH、ABTS自由基清除能力,结果如图3所示。

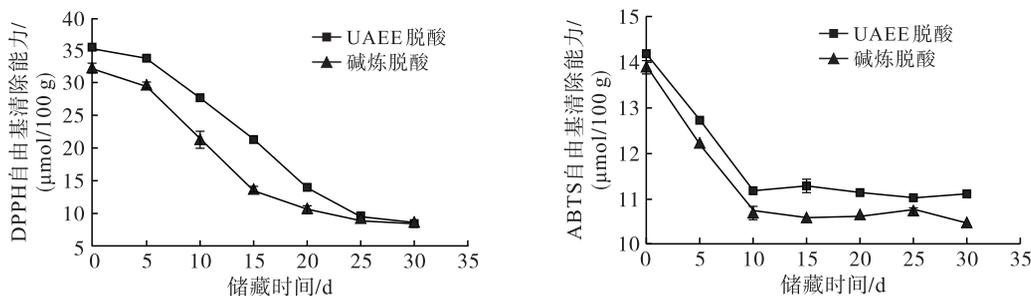


图3 脱酸工艺对储藏SSO DPPH、ABTS 自由基清除能力的影响

由图3可知,储藏期间2种脱酸SSO的DPPH自由基清除能力均呈现下降趋势。储藏0~5d时,DPPH自由基清除能力下降速率较缓慢,5d后下降速率增加,这可能是由于油脂氧化初期总酚等抗氧化物质充当氧化底物,间接地延缓了油脂的氧化^[27]。而抗氧化物质的消耗导致油脂在氧化中后期抗氧化活性迅速降低。2种脱酸SSO的ABTS自由基清除能力随储藏时间延长均呈先下降后趋于稳定的趋势,但存在一定差异。在储藏30d时,UAEE脱酸SSO的ABTS自由基清除能力为11.11 $\mu\text{mol}/100\text{g}$,略高于

碱炼脱酸SSO的10.47 $\mu\text{mol}/100\text{g}$ 。植物油的抗氧化能力与脂质伴随物之间存在一定的关系,如:Gao等^[23]研究发现,核桃油中的多酚和生育酚与自由基清除能力呈正相关,核桃油中脂质伴随物含量的增加有助于提高核桃油的抗氧化能力;Cheng等^[28]研究发现,亚麻籽油中的酚类物质与其抗氧化能力密切相关。因此,与碱炼脱酸SSO相比,储藏期间UAEE脱酸SSO的DPPH、ABTS自由基清除能力较强,这可能与UAEE脱酸工艺更好地保留了SSO中的脂质伴随物密切相关。

2.4 脱酸工艺对 SSO 货架期的影响

2.4.1 碱炼脱酸 SSO 氧化动力学模型的分析 and 建立
油脂的氧化过程通常属于零级或一级反应。不

同储藏温度下碱炼脱酸 SSO 过氧化值(C)与储藏时间(t)的变化关系可采用零级反应动力学方程或一级反应动力学方程进行拟合,结果如表 1 所示。

表 1 碱炼脱酸 SSO 在不同储藏温度下过氧化值的回归方程

| 储藏温度/℃ | 零级反应 | | 一级反应 | |
|--------|------------------------|---------------|--------------------------|---------------|
| | 回归方程 | 决定系数(R^2) | 回归方程 | 决定系数(R^2) |
| 30 | $C = 1.496 + 0.392 1t$ | 0.855 7 | $C = 1.496e^{0.092 57t}$ | 0.952 6 |
| 40 | $C = 1.496 + 0.449 4t$ | 0.916 4 | $C = 1.496e^{0.096 24t}$ | 0.930 1 |
| 50 | $C = 1.496 + 0.438 7t$ | 0.794 9 | $C = 1.496e^{0.097 80t}$ | 0.997 6 |
| 60 | $C = 1.496 + 0.729 7t$ | 0.964 5 | $C = 1.496e^{0.111 23t}$ | 0.817 3 |

由表 1 可知,一级反应动力学方程的决定系数基本高于零级反应动力学方程的,更贴合碱炼脱酸 SSO 过氧化值的变化规律,表明碱炼脱酸 SSO 的氧化反应为一级反应。根据一级反应方程,得到碱炼脱酸 SSO 在 30、40、50、60℃ 下的氧化速率常数(k)。

根据 Arrhenius 公式,油脂氧化速率常数与温度的关系可以用式(1)表示。

$$k = A_0 e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (1)$$

式中: k 为反应速率常数; R 为摩尔气体常数,

为 8.314 kJ/(mol/K); T 为热力学温度,K; A_0 为频率因子(指前因子); E_a 为表观活化能,kJ/mol。

以 $\ln k$ 对 $1/T$ 作图,经拟合计算可以得到 E_a 和 A_0 ,从而得到碱炼脱酸 SSO 储藏过程中氧化反应速率(k)与储藏温度(T)之间的关系为 $k = 0.590 3e^{-\frac{566.663 8}{T}}$ 。

2.4.2 UAEE 脱酸 SSO 氧化动力学模型的分析 and 建立

以 2.4.1 中方法对不同储藏温度条件下 UAEE 脱酸 SSO 过氧化值数据进行分析,结果见表 2。

表 2 UAEE 脱酸 SSO 在不同储藏温度下过氧化值的回归方程

| 储藏温度/℃ | 零级反应 | | 一级反应 | |
|--------|--------------------------|---------------|----------------------------|---------------|
| | 回归方程 | 决定系数(R^2) | 回归方程 | 决定系数(R^2) |
| 30 | $C = 0.963 9 + 0.339 2t$ | 0.744 9 | $C = 0.963 9e^{0.089 60t}$ | 0.956 5 |
| 40 | $C = 0.963 9 + 0.371 2t$ | 0.845 2 | $C = 0.963 9e^{0.091 17t}$ | 0.966 7 |
| 50 | $C = 0.963 9 + 0.405 4t$ | 0.772 6 | $C = 0.963 9e^{0.095 63t}$ | 0.996 2 |
| 60 | $C = 0.963 9 + 0.637 0t$ | 0.909 3 | $C = 0.963 9e^{0.108 05t}$ | 0.927 7 |

由表 2 可知,一级反应动力学方程的决定系数均高于零级反应的,可见 UAEE 脱酸 SSO 的氧化反应为一级反应。根据一级反应方程,得到 UAEE 脱酸 SSO 在 30、40、50、60℃ 下的氧化速率常数(k)。同理,可以得到 UAEE 脱酸 SSO 储藏过程中氧化反应速率(k)与储藏温度(T)之间的关系为 $k = 0.650 6e^{-\frac{608.550 2}{T}}$ 。

2.4.3 2 种脱酸 SSO 货架期预测

通过 Arrhenius 方程可计算出不同储藏温度下碱炼脱酸 SSO 和 UAEE 脱酸 SSO 的氧化反应速率,代入一级反应动力学方程中即可预测 2 种脱酸 SSO 在不同储藏温度下的货架期。

以 GB 2716—2018 中规定的食用植物油过氧化值最高许可量 9.85 mmol/kg 为指标,可推测出 UAEE 脱酸 SSO 在 20、25℃ 密封避光条件下的货架期分别约为 28 d 和 27 d,碱炼脱酸 SSO 的分别约为 22 d 和 21 d。

3 结论

在储藏过程中,脱酸 SSO 的酸值、过氧化值、 p -茴香胺值持续增长,且随着储藏时间的延长,酸

值、过氧化值增长速率加快;在整个储藏过程中, α -生育酚、总酚、总甾醇等脂质伴随物以及 DPPH、ABTS 自由基清除能力均出现不同程度的降低。与传统碱炼脱酸工艺相比,UAEE 脱酸工艺制备的 SSO 表现出更好的理化品质、脂质伴随物含量以及体外抗氧化能力。同时,通过建立不同脱酸工艺 SSO 在不同储藏温度下的氧化动力学模型,预测在 20、25℃ 密封避光条件下,UAEE 脱酸 SSO 的货架期分别约为 28 d 和 27 d,而碱炼脱酸 SSO 的货架期分别仅为 22 d 和 21 d。UAEE 脱酸 SSO 较碱炼脱酸 SSO 表现出更好的储藏稳定性。碱炼脱酸是工业生产中广泛采用的一种传统脱酸工艺,但脱酸后成品油活性成分损失较大。UAEE 脱酸工艺具有操作温度低、处理时间短、活性成分保留率高等优势。今后有必要在改善超声强度的控制及稳定性、降低设备整体造价等方面加大研究开发的力度,以加快 UAEE 脱酸工艺的规模化生产应用。

参考文献:

[1] CHAKRADHARI S, PERKONS I, MIŠINA I, et al.

- Profiling of the bioactive components of safflower seeds and seed oil: cultivated (*Carthamus tinctorius* L.) vs. wild (*Carthamus oxyacantha* M. Bieb.) [J]. *Eur Food Res Technol*, 2020, 246(3): 449–459.
- [2] NIMROUZI M, RUYVARAN M, ZAMANI A, et al. Oil and extract of safflower seed improve fructose induced metabolic syndrome through modulating the homeostasis of trace elements, TNF- α and fatty acids metabolism [J/OL]. *J Ethnopharmacol*, 2020, 254: 112721 [2022-02-22]. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.112721>.
- [3] 张文雅, 张玉茹, 卢荣华, 等. 卫红花籽和卫红花籽饼的营养成分分析[J]. *中国油脂*, 2019, 44(8): 120–122, 129.
- [4] 张忠, 王呈馨, 范柳萍, 等. 不同提取工艺翅果油抗氧化能力与活性成分的分析[J]. *中国油脂*, 2020, 45(9): 23–29.
- [5] WANG B, SUM S, YAO N, et al. A novel method for simultaneous degumming and deacidification of corn oil by miscella refining in one step [J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2021, 137: 110480 [2022-02-22]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110480>.
- [6] ȘTEFAN N G, IANCU P, PIEȘU V, et al. Highly efficient deacidification process for *Camelina sativa* crude oil by molecular distillation [J/OL]. *Sustainability*, 2021, 13(5): 2818 [2022-02-22]. <https://doi.org/10.3390/SU13052818>.
- [7] 任娜, 刘玉环, 韩东平, 等. 超声波辅助法在光皮树油脱酸工艺中的应用研究[J]. *粮油加工*, 2010(4): 21–23.
- [8] 朱远坤, 张振山, 谢庆方, 等. 精炼工艺对杜仲籽油品质的影响[J]. *中国油脂*, 2017, 42(12): 44–48.
- [9] 康媛解, 张丽霞, 张振山. 超声波辅助米糠油乙醇萃取脱酸工艺研究[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(10): 14–18.
- [10] 栾真杰, 李佩佩, 李朵, 等. 马蔺籽油的索氏提取工艺、成分分析及抗氧化活性研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(9): 1–7.
- [11] 纪佳璐, 吴莹, 徐斐然, 等. 马泡瓜籽油理化特性、组成分析及氧化稳定性[J]. *食品科学*, 2020, 41(21): 15–21.
- [12] 李晓. 水酶法提取红花籽油及其抗氧化活性与氧化稳定性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [13] 李园园. 月见草油精炼过程对其营养成分和抗氧化性能影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [14] 李志晓, 金青哲, 叶小飞, 等. 精炼过程中油茶籽油活性成分和抗氧化性的变化[J]. *中国油脂*, 2015, 40(8): 1–5.
- [15] GRAJZER M, WIATRAC B, GEBAROWSKI T, et al. Chemistry, oxidative stability and bioactivity of oil extracted from *Rosa rugosa* (Thunb.) seeds by supercritical carbon dioxide [J/OL]. *Food Chem*, 2021, 335: 127649 [2022-02-22]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127649>.
- [16] 刘芳, 王超, 杨菊, 等. 油脂酸价和过氧化值检测方法的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(14): 4478–4482.
- [17] NDUKA J K C, OMOZUWA P O, IMANAH O E. Effect of heating time on the physicochemical properties of selected vegetable oils [J/OL]. *Arab J Chem*, 2021, 14(4): 103063 [2022-02-22]. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103063>.
- [18] TANG W Z, WANG B, WANG M M, et al. Ultrasound-assisted extraction of *Osmanthus fragrans* fruit oil and evaluation of its fatty acid composition, physicochemical properties and antioxidant activity [J/OL]. *J Appl Res Med Aroma*, 2021, 25: 100331 [2022-02-22]. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2021.100331>.
- [19] 耿树香, 宁德鲁, 杨明佳, 等. 云南11种油料作物油脂主要功能性成分评价[J]. *中国油脂*, 2021, 46(1): 108–111.
- [20] 李彩云, 康健. 红花籽油的研究进展[J]. *食品工业*, 2016, 37(6): 218–222.
- [21] LEWIS E D, MEYDANI S N, WU D. Regulatory role of vitamin E in the immune system and inflammation [J]. *IUBMB Life*, 2019, 71(4): 487–494.
- [22] 贾文聪, 方恩华, 吴易峰, 等. 油茶籽油甾醇存在形态及其在精炼和贮藏过程中动态变化分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(16): 39–45.
- [23] GAO P, LIU R J, JIN Q Z, et al. Effects of processing methods on the chemical composition and antioxidant capacity of walnut (*Juglans regia* L.) oil [J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2021, 135: 109958 [2022-02-22]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109958>.
- [24] 戚颖欣, 刘赫冰. 不同制油工艺亚麻籽油的储藏性能研究[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(7): 16–20.
- [25] TAHIR M H, MAHMOOD M A, ÇAKMAN G, et al. Pyrolysis of oil extracted safflower seeds: product evaluation, kinetic and thermodynamic studies [J/OL]. *Bioresour Technol*, 2020, 314: 123699 [2022-02-22]. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123699>.
- [26] FERNÁNDEZ-MARÍN R, FERNANDES C M, ANDRÉS M A, et al. Microwave-assisted extraction of *Curcuma longa* L. oil: optimization, chemical structure and composition, antioxidant activity and comparison with conventional Soxhlet extraction [J]. *Molecules*, 2021, 26(6): 15–16.
- [27] 石小翠, 曹冬花, 李佳, 等. 三种香茅精油的化学成分及体外抗氧化和抗炎活性评价[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 83–90.
- [28] CHENG C, YU X, MCCLEMENTS D J, et al. Effect of flaxseed polyphenols on physical stability and oxidative stability of flaxseed oil-in-water nanoemulsions [J/OL]. *Food Chem*, 2019, 301: 125207 [2022-02-22]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125207>.