

不同抗氧化剂对水酶法核桃油储藏稳定性的影响

张献忠, 李 阳, 李 丹, 殷春燕, 陈江魁

(邯郸学院 生命科学与工程学院, 河北 邯郸 056005)

摘要:旨在为水酶法核桃油中抗氧化剂的筛选提供参考,以水酶法核桃油为试验材料,对其进行加速储藏试验,通过测定其过氧化值、酸值、羰基值、生育酚含量的变化,考察二丁基羟基甲苯(BHT)、迷迭香提取物和蒲公英提取物3种抗氧化剂对核桃油储藏稳定性的影响,并以过氧化值为指标建立氧化动力学模型,预测添加不同抗氧化剂核桃油的货架期。结果表明:3种抗氧化剂的抗氧化能力排序为迷迭香提取物>BHT>蒲公英提取物,其中BHT和迷迭香提取物提高水酶法核桃油储藏稳定性的效果较好,最佳添加量分别为0.02%和0.07%,而蒲公英提取物则无明显效果;添加BHT和迷迭香提取物可显著延长核桃油的货架期,其中添加0.02%BHT和0.07%迷迭香提取物核桃油的预测货架期分别为128d和171d,显著高于对照油样的(91d),而添加蒲公英提取物对核桃油货架期的提升作用有限。综上,迷迭香提取物的抗氧化效果最佳,可以有效延缓水酶法核桃油氧化并延长其货架期。

关键词:抗氧化剂;水酶法;核桃油;氧化稳定性;货架期预测

中图分类号:TS225.1;TS221

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2025)09-0027-06

Effects of different antioxidants on storage stability of walnut oil extracted by aqueous enzymatic method

ZHANG Xianzhong, LI Yang, LI Dan, YIN Chunyan, CHEN Jiangkui

(College of Life Science and Engineering, Handan University, Handan 056005, Hebei, China)

Abstract: To provide a reference for the selection of antioxidants in walnut oil produced by aqueous enzymatic method, an accelerated storage test was conducted with the walnut oil obtained via aqueous enzymatic method as the material. The changes in peroxide value, acid value, carbonyl value, and tocopherol content were measured to evaluate the effects of three antioxidants of BHT, rosemary extract, and dandelion extract on the storage stability of walnut oil. In addition, an oxidative kinetics model was established based on the peroxide value to predict the shelf life of walnut oil with different antioxidants added. The results indicated that the antioxidant capacities of the three antioxidants were ranked as follows: rosemary extract > BHT > dandelion extract. BHT and rosemary extract had better effects on enhancing the storage stability of walnut oil, with optimal addition levels of 0.02% and 0.07%, respectively. In contrast, dandelion extract had no significant effect. The shelf life of walnut oil was significantly extended by the addition of BHT and rosemary extract. Specifically, the predicted shelf life of walnut oil with 0.02% BHT and 0.07% rosemary extract was 128 d and 171 d, respectively, which was significantly longer than that of the control oil sample (91 d). However, the addition of dandelion extract had limited impact on extending the shelf life of walnut oil. In summary, rosemary extract exhibits the best antioxidant effect, effectively delaying the oxidation of walnut oil produced by aqueous enzymatic method and extending its shelf life.

Key words: antioxidants; aqueous enzymatic method; walnut oil; oxidation stability; shelf life prediction

收稿日期:2024-08-26;修回日期:2025-06-20

基金项目:邯郸市科学技术研究与发展计划项目(21422067188)

作者简介:张献忠(1982),男,讲师,博士,研究方向为食品加工与安全(E-mail)auhzzx@126.com。

核桃,属胡桃科核桃属,在我国种植历史悠久,是我国北方重要的木本油料之一^[1]。核桃含有丰富的蛋白质和脂肪,具有预防心血管疾病、滋补肺肾、润肠通便等多种功能^[2-3]。核桃油是以成熟核桃仁为原料加工而成的食用植物油,富含亚油酸、亚麻酸等多种不饱和脂肪酸,还含有维生素 E、甾醇、多酚类物质等,具有较高的营养价值^[4-5]。核桃油的制备工艺有溶剂提取法、压榨法、水酶法^[6]。其中,水酶法是近年来发展起来的新兴植物油制备技术,其工艺条件温和,安全环保,没有溶剂残留,是非常有前景的核桃油制备技术之一^[7]。目前关于水酶法制备核桃油的研究主要集中在制油工艺、酶制剂选择以及生物活性研究等领域^[8-10]。

水酶法核桃油由于富含不饱和脂肪酸,在储藏过程中极易发生氧化酸败,导致核桃油产品品质下降,进而影响其货架期。植物油氧化稳定性分析方法包括常规储藏分析、氧化诱导法和 Schaal 烘箱法等,其中 Schaal 烘箱法因具有操作简单、成本低廉、分析时间短等优点,已在植物油氧化稳定性分析中广泛应用^[11]。在油脂工业中常通过添加外源抗氧化剂延缓核桃油氧化酸败,并延长其货架期。现有的植物油抗氧化剂包括合成抗氧化剂和天然抗氧化剂。二丁基羟基甲苯(BHT)作为传统合成抗氧化剂,目前仍被广泛应用于动植物油脂、焙烤食品等产品中^[12]。但随着人们对健康的关注度提升,天然抗氧化剂的研究及应用已成为植物油抗氧化领域的热点之一^[13-14]。迷迭香提取物作为 GB 2760—2014 中允许使用的天然抗氧化剂,其主要抗氧化成分为二萜类、黄酮等^[15]。蒲公英提取物作为天然抗氧化剂也可有效延缓植物油氧化^[16],其抗氧化成分主要为绿原酸等多酚类物质^[17]。目前,关于抗氧化剂对水酶法核桃油氧化稳定性影响的研究较少。

本文以水酶法核桃油为试验材料,将合成抗氧化剂 BHT、典型天然抗氧化剂迷迭香提取物和新型植物源抗氧化剂蒲公英提取物添加到核桃油中,采用 Schaal 烘箱法研究不同抗氧化剂对水酶法核桃油储藏稳定性的影响,并建立氧化动力学方程对其货架期进行预测,以期水酶法核桃油抗氧化剂的筛选,并进一步延长其货架期提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

太行山核桃仁,购于河北鼎康粮油有限公司。

木瓜蛋白酶(2 000 U/mg)、纤维素酶(1 000 U/mg),山东隆科特酶制剂有限公司;BHT,食品级,河南万邦实业有限公司;迷迭香提取物、蒲公英提取

物,食品级,河南三和生物公司;三氯甲烷冰乙酸混合液、酸值检测异-石混合液,分析纯,广检检测科技有限公司;硫代硫酸钠、氢氧化钾、苯、三氯乙酸、氢氧化钠、碘化钾、无水乙醇,分析纯,天津奥普升化工有限公司;2,4-二硝基苯肼,分析纯,天津瑞金特公司;脂肪酸甲酯混合标准品,色谱纯,Supelco 公司; α -、 β -、 γ -、 δ -生育酚标准品, Sigma 公司。

FW-200 高速粉碎机,常州国旺仪器制造有限公司;KH-55A 电热恒温鼓风干燥箱,康恒仪器有限公司;CL5 医用离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;pH 检测计,东莞万创电子制品有限公司;TU-1901 双光束紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;LC-2010CHT 液相色谱仪,日本岛津公司。

1.2 试验方法

1.2.1 水酶法核桃油的制备

将核桃仁用粉碎机粉碎,准确称取一定量核桃仁粉于烧杯中,按料液比 1:4 加入蒸馏水,搅拌均匀后用 2 mol/L 氢氧化钠溶液调节 pH 至 6.5,混匀后置于沸水浴 10 min,以对核桃原料自身的酶灭活。取出烧杯并冷却至室温,向烧杯中添加 2% (以核桃粉质量计)的木瓜蛋白酶-纤维素酶(质量比 2:1)复合酶,充分搅拌均匀后置于 40℃ 水浴中搅拌酶解 2 h,酶解结束后,置于沸水浴灭酶 10 min。然后冷却至室温,以 5 000 r/min 离心 20 min,取上层油相,抽滤除去杂质后,即得水酶法核桃油,置于棕色试剂瓶中,于 4℃ 冷藏备用。

1.2.2 水酶法核桃油的加速储藏试验

采用 Schaal 烘箱法研究不同抗氧化剂对水酶法核桃油氧化稳定性的影响。准确称取 100 g 水酶法核桃油,置于 250 mL 棕色试剂瓶中,向其中添加一定量的抗氧化剂(抗氧化剂添加量依据 GB 2760—2014 规定添加,其中 BHT 和迷迭香提取物的最大添加量分别为 0.02% 和 0.07%,蒲公英提取物添加量参照迷迭香提取物),强力搅拌 10 min 使其充分溶解,将油样置于(60±1)℃ 的电热恒温鼓风干燥箱中避光保存,以不添加抗氧化剂的油样为对照,分别在 0、3、6、10、14 d 及 18 d 取样分析。

1.2.3 理化指标测定

折光指数测定参照 GB/T 5527—2010 中的第一法;相对密度测定参照 GB/T 5526—1985 中的第一法;过氧化值测定参照 GB 5009.227—2023 中的滴定法;酸值测定参照 GB 5009.229—2016 中的冷溶剂滴定法;皂化值测定参照 GB/T 5534—2008;碘

值测定参照 GB/T 5532—2022;甾醇含量测定参照 GB/T 25223—2010;羰基值测定参照 GB 5009.230—2016;生育酚含量测定参照 GB 5009.82—2016 中第一法。

1.2.4 水酶法核桃油氧化动力学分析及货架期预测

将水酶法核桃油过氧化值随储藏时间的变化分别与零级、一级反应模型^[18-19]方程进行拟合,建立核桃油氧化动力学模型,零级反应模型拟合方程见式(1),一级反应模型拟合方程见式(2)。

$$C_t = -kt + C_0 \tag{1}$$

$$C_t = C_0 e^{-kt} \tag{2}$$

式中: C_0 和 C_t 分别为储存 0 d 和 t d 时核桃油的过氧化值的倒数; t 为储藏时间, d; k 为反应速率常数。

以 GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》中植物油过氧化值的最高允许限量 9.85 mmol/kg 为指标,通过建立的水酶法核桃油氧化动力学模型预测水酶法核桃油的货架期。

1.2.5 数据处理

试验重复测定 3 次,结果取平均值,所获数据分别采用 Excel 2007 和 Origin 2022 软件进行统计分析及图表绘制。

2 结果与分析

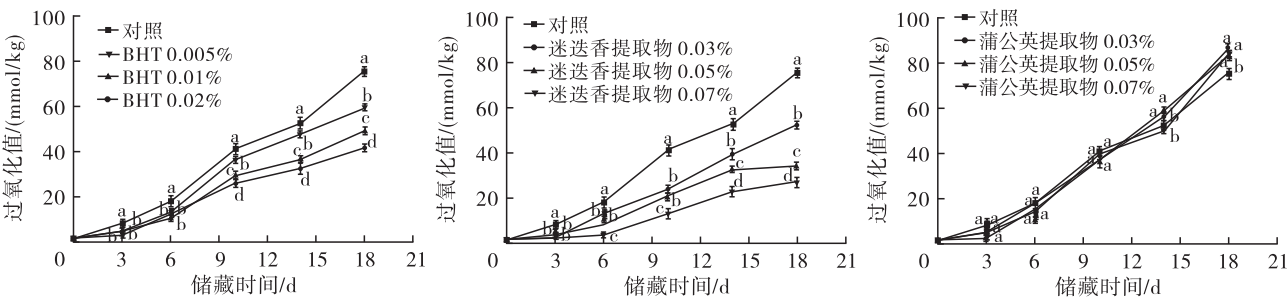
2.1 水酶法核桃油的理化指标

水酶法核桃油的折光指数(20℃)为 1.47,相对密度(20℃)为 0.91,过氧化值为 1.23 mmol/kg,酸值(KOH)为 0.28 mg/g,皂化值(KOH)为 190 mg/g,碘值为 159 g/100 g,甾醇含量为 1 452 mg/kg,以上各指标均符合 T/SSX 005—2022《核桃油》中的要求。此外,水酶法核桃油的羰基值为 1.95 meq/kg,生育酚总量为 31.83 mg/100 g。

2.2 不同抗氧化剂对水酶法核桃油储藏稳定性的影响

2.2.1 对核桃油过氧化值的影响

不同抗氧化剂对水酶法核桃油过氧化值的影响见图 1。



注:不同字母代表同一储藏时间下具有显著差异($p < 0.05$)

Note: Different letters represent significant difference under the same storage time ($p < 0.05$)

图 1 不同抗氧化剂对水酶法核桃油过氧化值的影响

Fig. 1 Effects of different antioxidants on peroxide value of aqueous enzymatic walnut oil

由图 1 可知,在 60℃ 加速氧化条件下,所有核桃油样品的过氧化值均随储藏时间延长呈增加的趋势。添加 BHT 和迷迭香提取物核桃油的过氧化值均显著低于对照油样的,且 BHT 和迷迭香提取物的添加量越大,其过氧化值越小,抗氧化效果越好。添加 0.02% BHT 油样和添加 0.07% 迷迭香提取物油样在储藏 18 d 时的过氧化值,相较于对照油样分别显著降低 44.97% 和 64.22% ($p < 0.05$),说明添加 BHT 和迷迭香提取物最佳添加量分别为 0.02% 和 0.07%。储藏 0~10 d 时,添加蒲公英提取物油样的过氧化值与对照油样的无明显差异,储藏 18 d 时,添加蒲公英提取物油样的过氧化值反而比对照油样的高($p < 0.05$),说明蒲公英提取物对水酶法核桃油的抗氧化作用不明显,这可能是因为蒲公英

提取物中含有不溶性杂质,影响其抗氧化效果。综上,3 种抗氧化剂对水酶法核桃油的抗氧化效果排序为迷迭香提取物 > BHT > 蒲公英提取物。

2.2.2 对核桃油酸值的影响

酸值是衡量植物油品质的重要指标,主要表征油脂水解酸败程度^[20]。不同抗氧化剂对水酶法核桃油酸值的影响见图 2。

由图 2 可知,随着储藏时间的延长,所有油样的酸值均呈逐渐增加的趋势。添加抗氧化剂油样的酸值总体上稍低于对照油样的,表明添加 BHT、迷迭香提取物和蒲公英提取物对核桃油的酸值上升有一定的抑制作用,但效果并不明显。储藏 18 d 时,所有油样酸值均满足 GB/T 22327—2019 规定的一级核桃油的酸值(KOH)不超过 1.0 mg/g 要求,其中

对照油样的酸值(KOH)最高,为 0.59 mg/g。综上,与过氧化值相比,酸值不适合作为水酶法核桃油氧化程度的评判指标,这与陈江魁等^[21]得出的与过氧化值相比,酸值并不是文冠果油氧化敏感和变质的评价指标的研究结果一致。

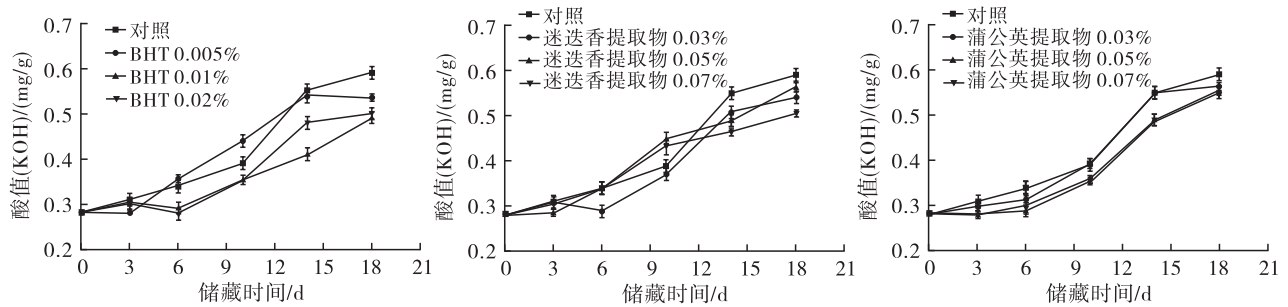


图 2 不同抗氧化剂对水酶法核桃油酸值的影响
Fig.2 Effects of different antioxidants on acid value of aqueous enzymatic walnut oil

2.2.3 对核桃油羰基值的影响
羰基值主要反映油脂醛、酮等羰基化合物的含量,是评价油脂劣变程度的重要指标^[22]。不同抗氧化剂对水酶法核桃油羰基值的影响见图 3。

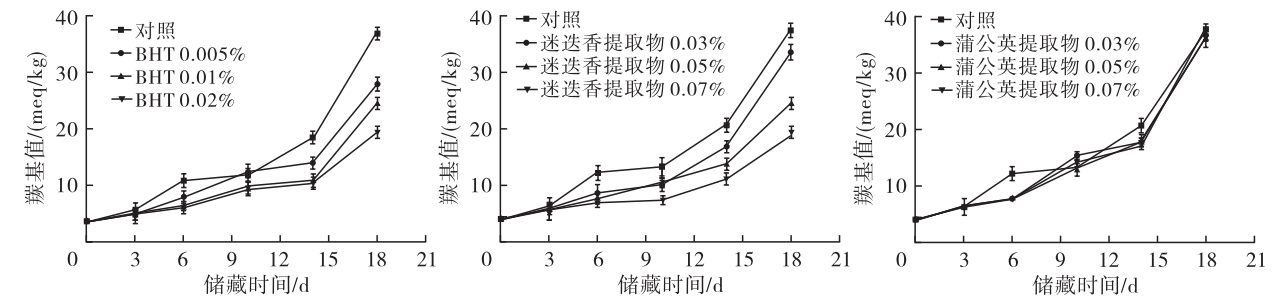


图 3 不同抗氧化剂对水酶法核桃油羰基值的影响
Fig.3 Effects of different antioxidants on carbonyl value of aqueous enzymatic walnut oil

由图 3 可知,随着储藏时间的延长,所有油样的羰基值均呈上升趋势。添加 BHT 和迷迭香提取物油样的羰基值在储藏期间基本均低于对照油样的,且羰基值基本随抗氧化剂添加量的增加而降低。储藏 18 d 时,添加 BHT 和迷迭香提取物油样分别在添加量 0.02% 和 0.07% 时羰基值最低,分别为 21.66 meq/kg 和 18.77 meq/kg,相较于对照油样,分别降低 42.10% 和 50.00%,说明 BHT 和迷迭香提取物对水酶法核桃油羰基值的增加具有良好的抑制作用。在储藏期间,添加蒲公英提取物油样的羰基值与对照油样差异不大,说明蒲公英提取物对水酶法核桃油羰基值增加无明显抑制作用。综上,3 种抗氧化剂对水酶法核桃油羰基值作用大小顺序为迷迭香提取物>BHT>蒲公英提取物。

2.2.4 对核桃油生育酚含量的影响

生育酚是植物油中重要的营养活性成分,自身能作为天然抗氧化剂延缓油脂氧化,因此其含量对于植物油氧化稳定性有着重要影响^[23]。不同抗氧化剂对储藏 18 d 的水酶法核桃油生育酚含量的影响见表 1。

表 1 不同抗氧化剂对水酶法核桃油生育酚含量的影响
Table 1 Effects of different antioxidants on tocopherol content in aqueous enzymatic walnut oil

抗氧化剂	添加量/%	δ-生育酚/(mg/100 g)	γ-生育酚/(mg/100 g)	总生育酚/(mg/100 g)
对照		2.69±0.05 ⁱ	0.78±0.01 ⁱ	3.44±0.05 ⁱ
BHT	0.005	2.90±0.05 ^g	5.89±0.05 ^e	8.80±0.02 ^e
	0.01	4.45±0.01 ^b	6.70±0.02 ^d	11.10±0.03 ^d
	0.02	3.94±0.02 ^c	9.48±0.06 ^c	13.40±0.01 ^c
迷迭香提取物	0.03	3.83±0.01 ^d	4.73±0.02 ^f	8.55±0.01 ^e
	0.05	4.62±0.03 ^a	10.70±0.07 ^b	15.30±0.04 ^b
	0.07	4.57±0.02 ^a	25.70±0.16 ^a	30.20±0.12 ^a
蒲公英提取物	0.03	3.11±0.01 ^f	0.76±0.01 ⁱ	3.86±0.01 ^h
	0.05	2.82±0.01 ^h	1.18±0.01 ^h	4.00±0.01 ^g
	0.07	3.14±0.01 ^e	1.31±0.01 ^g	4.46±0.01 ^f

注:同列不同字母表示差异显著($p<0.05$)。下同
Note: Different letters in the same column indicate significant difference ($p<0.05$). The same below

由表 1 可以看出,与对照油样相比,在加速氧化条件下,添加不同抗氧化剂核桃油的生育酚含量总体呈现不同程度的上升趋势,其中:添加 0.07% 迷

迭香提取物和 0.02% BHT 的油样经过 18 d 加速氧化后,其总生育酚含量均显著高于对照和其他添加量下油样的($p < 0.05$),分别是对照油样的 8.78 倍和 3.90 倍,说明迷迭香提取物和 BHT 均能有效延缓核桃油中生育酚的氧化分解。添加蒲公英提取物油样的总生育酚含量则与对照油样的差异较小,其中添加 0.07% 蒲公英提取物油样的总生育酚含量仅为对照油样的 1.30 倍,表明蒲公英提取物对抑制核桃油生育酚的氧化分解无明显作用。综上,不同

抗氧化剂对水酶法核桃油生育酚的保护能力大小排序为迷迭香提取物 > BHT > 蒲公英提取物。

2.3 水酶法核桃油氧化动力学模型及货架期预测

由 2.2 结果可知,水酶法核桃油在加速储藏试验中最敏感的氧化指标为过氧化值,因此选择过氧化值作为核桃油品质评价指标。将加速储藏试验中的过氧化值随储藏时间的变化分别与零级和一级反应动力学方程进行拟合,结果见表 2。

表 2 加速储藏时间与过氧化值的拟合方程

Table 2 Fitting equation of accelerated storage time and peroxide value

抗氧化剂	添加量/%	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)
对照		$C = -0.032\ 2t + 0.448\ 9$	0.484\ 2	$C = 0.332\ 7e^{-0.207\ 3t}$	0.848\ 9
BHT	0.005	$C = -0.034\ 5t + 0.488\ 5$	0.565\ 5	$C = 0.427\ 4e^{-0.210\ 9t}$	0.882\ 6
	0.01	$C = -0.034\ 2t + 0.491\ 5$	0.569\ 4	$C = 0.441\ 3e^{-0.197\ 6t}$	0.892\ 5
	0.02	$C = -0.036\ 5t + 0.530\ 0$	0.632\ 3	$C = 0.488\ 8e^{-0.195\ 7t}$	0.876\ 5
迷迭香提取物	0.03	$C = -0.040\ 8t + 0.593\ 0$	0.696\ 0	$C = 0.593\ 4e^{-0.218\ 1t}$	0.892\ 3
	0.05	$C = -0.035\ 9t + 0.528\ 4$	0.638\ 1	$C = 0.514\ 7e^{-0.187\ 9t}$	0.906\ 6
	0.07	$C = -0.040\ 6t + 0.628\ 6$	0.809\ 5	$C = 0.742\ 7e^{-0.185\ 9t}$	0.957\ 9
蒲公英提取物	0.03	$C = -0.037\ 8t + 0.535\ 4$	0.643\ 4	$C = 0.526\ 4e^{-0.240\ 1t}$	0.911\ 7
	0.05	$C = -0.034\ 0t + 0.475\ 9$	0.542\ 2	$C = 0.404\ 5e^{-0.224\ 4t}$	0.891\ 6
	0.07	$C = -0.035\ 1t + 0.494\ 6$	0.579\ 5	$C = 0.456\ 0e^{-0.228\ 1t}$	0.909\ 7

由表 2 可知,加速氧化中一级反应拟合方程的 R^2 更高,说明水酶法核桃油氧化反应更符合一级反应动力学特征。

根据范德霍夫理论,植物油在 60 ℃ 环境下储藏 1 d 相当于常温(20 ℃)下储藏 16 d^[24],以国标要求的植物油中过氧化值不超过 9.85 mmol/kg 作为水酶法核桃油货架期终点,通过核桃油氧化动力学拟合方程(一级)预测出其常温下的货架期,结果见表 3。

表 3 添加不同抗氧化剂核桃油的货架期预测

Table 3 Shelf life prediction of walnut oil with different antioxidants

抗氧化剂	添加量/%	货架期/d
对照		91 ^h
BHT	0.005	109 ^e
	0.01	118 ^d
	0.02	128 ^c
迷迭香提取物	0.03	129 ^c
	0.05	138 ^b
	0.07	171 ^a
蒲公英提取物	0.03	109 ^e
	0.05	98 ^g
	0.07	105 ^f

由表 3 可知,添加 0.07% 迷迭香提取物核桃油的预测货架期最长,为 171 d,显著高于添加 BHT 和蒲公英提取物核桃油的预测货架期和对照核桃油的预测货架期($p < 0.05$),说明在国标规定的添加量下,迷迭香提取物对于延长水酶法核桃油货架期的效果最好,而蒲公英提取物对水酶法核桃油货架期提升作用比较小。

3 结 论

BHT、迷迭香提取物和蒲公英提取物 3 种抗氧化剂对水酶法核桃油抗氧化能力排序为迷迭香提取物 > BHT > 蒲公英提取物。迷迭香提取物添加量为 0.07% 时,可将水酶法核桃油货架期从 91 d 提升至 171 d;BHT 添加量为 0.02% 时,可将水酶法核桃油货架期延长至 128 d;而添加蒲公英提取物对核桃油货架期提升作用较小。综上,迷迭香提取物的抗氧化效果最佳,可以有效延缓水酶法核桃油氧化并延长其货架期。

参考文献:

[1] 郑悦雯, 吴书天, 沈丹玉, 等. 10 个品种核桃油品质比较[J]. 中国油脂, 2020, 45(10): 47–51.
[2] GAO P, LIU R, JIN Q, 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 [2024-08-26].
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109958>.
- [3] RÉBUFA C, ARTAUD J, LE DRÉAU Y. Walnut (*Juglans regia* L.) oil chemical composition depending on variety, locality, extraction process and storage conditions: A comprehensive review [J/OL]. J Food Compos Anal, 2022, 110: 104534 [2024-08-26]. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104534>.
- [4] 刘梁, 张煜, 方晓璞, 等. 不同抗氧化剂对核桃油氧化稳定性和预测货架期的影响[J]. 中国油脂, 2023, 48(2): 55-57, 97.
- [5] 高军龙, 赵美钰, 李童, 等. 传统压榨山核桃油理化性质及脂肪酸组成分析[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(11): 2633-2635, 2687.
- [6] 张煜, 孟佳, 张旋, 等. 不同工艺制取核桃油的研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2022, 29(5): 1-3.
- [7] 冯红霞, 王文亲, 郑舒文, 等. 精炼对水酶法核桃油的品质及其抗氧化活性的影响[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(2): 49-52, 59.
- [8] GAO Y, HU J, SU X, et al. Extraction, chemical components, bioactive functions and adulteration identification of walnut oils: A review [J]. Grain Oil Sci Technol, 2024, 7(1): 30-41.
- [9] 邓健康, 赵慧博, 耿明雪, 等. 水酶法提取核桃油研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(15): 149-155.
- [10] 刘璇璇, 武莹敏, 朱振宝, 等. 水酶法联产核桃油和核桃多肽工艺优化及油脂脂肪酸分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(18): 217-224.
- [11] 张宇, 彭子芯, 严雨寒, 等. 花椒油和藤椒油加速氧化过程中风味品质变化[J]. 中国油脂, 2024, 49(2): 33-41.
- [12] 戴素仪, 程海军, 刘雄民, 等. 酸碱环境下丁基羟基甲苯的氧化特性及氧化产物[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 30-36.
- [13] WU Z, SHI X, WANG X, et al. Modeling and analysis of synergistic phenolic antioxidants in edible oil: Integrating molecular simulation and artificial neural network approach [J/OL]. J Mol Struct, 2024, 1315: 138959 [2024-08-26]. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.138959>.
- [14] UPADHYAY R, MISHRA H N. Predictive modeling for shelf life estimation of sunflower oil blended with oleoresin rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.) and ascorbyl palmitate at low and high temperatures [J]. LWT - Food Sci Technol, 2015, 60(1): 42-49.
- [15] 翟彩宁, 陈佩, 黄镜源, 等. 迷迭香活性成分的提取工艺、功能及其在动物生产中的应用[J]. 饲料研究, 2024, 47(14): 172-176.
- [16] 王彦博, 石燕, 袁毅君. 秦岭山脉野生蒲公英提取物的抗氧化活性及其对胡麻油氧化稳定性的影响[J]. 中国油脂, 2020, 45(5): 42-47.
- [17] 张思琪, 王浩男, 梁朵, 等. 蒲公英茶叶总多酚的提取及其在饮料中的初步应用[J]. 食品科技, 2023, 48(5): 198-204.
- [18] 王莹, 杨梦男, 曾祥辉, 等. 迷迭香抗氧化剂在花生油中的复配筛选及货架期模型构建[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(6): 92-97.
- [19] 曹君. 不同脂肪酸结构食用油的氧化规律及其动力学研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [20] 钟静, 金宁, 李浩杰. 菜籽油在常温储存过程中品质变化的研究[J]. 粮食储藏, 2012, 41(4): 39-41.
- [21] 陈江魁, 李静, 殷春燕, 等. 4种抗氧化剂对文冠果油氧化稳定性及脂肪酸组成影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 70-76.
- [22] LIU X, WANG S, MASUI E, et al. Real-time model for carbonyl value as a function of total polar compounds in oil during frying [J]. Anal Lett, 2021, 54(18): 2813-2825.
- [23] YANG R, ZHANG L, LI P, et al. A review of chemical composition and nutritional properties of minor vegetable oils in China [J]. Trends Food Sci Technol, 2018, 74: 26-32.
- [24] 谭名, 张海波, 叶萍萍, 等. 植物油加速氧化过程中品质变化进程的研究[J]. 食品科技, 2022, 47(6): 203-210.