

# 红树莓籽油贮藏稳定性的主成分分析

董丹<sup>1</sup>, 卢志全<sup>2</sup>, 唐琳琳<sup>1</sup>, 何红英<sup>1</sup>, 蒋莹<sup>1</sup>, 张福舜<sup>1</sup>, 晏雨辰<sup>1</sup>, 王金玲<sup>1,3\*</sup>

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040) (2. 黑龙江省宾县农业技术推广中心, 黑龙江哈尔滨 150001)  
(3. 黑龙江省森林食品资源利用重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要:** 通过测定加速贮藏期间红树莓籽油的过氧化值、脂肪酸组成、活性物质含量及抗氧化活性的动态变化, 结合主成分分析法, 阐明红树莓籽油的贮藏稳定性。在监测的 0~35 d 内, 红树莓籽油过氧化值升高 190.89 倍, 饱和脂肪酸升高 0.50%, 不饱和脂肪酸降低 2.53%,  $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚含量以及 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH $\cdot$ )、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸二铵盐) (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonate), ABTS $^{\cdot+}$ ) 自由基清除率均呈现降低趋势; 基于主成分分析法, 提取出 4 个主成分, 总方差贡献率为 93.30%, 其中多不饱和脂肪酸权重最大, 为 9.56%, 综合载荷图、得分图得出: 0~9 d 内油脂的组成变化较大, 其中 0~3 d 内不饱和脂肪酸向饱和脂肪酸的转化速度较快。综上所述, 随着红树莓籽油贮藏时间延长, 红树莓籽油品质变差, 为保持红树莓籽油贮藏稳定性, 建议 20 °C 避光密封保藏条件下在 16 d 内进行抗氧化防腐干预, 此条件下货架期为 336 d。该结果为红树莓籽油的贮藏与开发利用提供理论参考。

**关键词:** 红树莓籽油; 贮藏稳定性; 脂肪酸组成; 主成分分析

文章编号: 1673-9078(2022)01-206-215

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.1.0454

## Principal Component Analysis of Storage Stability of Red Raspberry Seed Oil

DONG Dan<sup>1</sup>, LU Zhiquan<sup>2</sup>, TANG Linlin<sup>1</sup>, HE Hongying<sup>1</sup>, JIANG Ying<sup>1</sup>, ZHANG Fushun<sup>1</sup>, YAN Yuchen<sup>1</sup>,  
WANG Jinling<sup>1,3\*</sup>

(1.School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

(2.Bin County Agricultural Technology Extension Center, Heilongjiang Province, Harbin 150001, China)

(3.Heilongjiang Province Forest Food Resources Utilization Key Laboratory, Harbin 150040, China)

**Abstract:** By measuring the dynamic changes of peroxide value, fatty acid composition, active substance content and antioxidant activity of red raspberry seed oil during accelerated storage, combined with principal component analysis, the storage stability of red raspberry seed oil was clarified. Within 0~35 days of monitoring, the peroxide value of red raspberry seed oil increased 190.89 times, the saturated fatty acid increased 0.50%, and the unsaturated fatty acid decreased 2.53%,  $\beta$ -sitosterol  $\alpha$ -tocopherol content and free radical scavenging rate of 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH $\cdot$ ) and 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonate) (ABTS $^{\cdot+}$ ) showed a decreasing trend. Four principal components were extracted from principal component analysis of comprehensive indicators. The total variance contribution rate was 93.30%. The weight analysis, the polyunsaturated fatty acids had the largest weight (9.56%) and had the greatest impact on the storage stability of red raspberry seed oil. The comprehensive load diagram and score diagram showed that the composition of oil changes greatly in 0~9 days, and the conversion rate from unsaturated fatty acid to saturated fatty acid was faster in 0~3 days. Overall, as the storage time of red raspberry

引文格式:

董丹, 卢志全, 唐琳琳, 等. 红树莓籽油贮藏稳定性的主成分分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(1): 206-215

DONG Dan, LU Zhiquan, TANG Linlin, et al. Principal component analysis of storage stability of red raspberry seed oil [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(1): 206-215

收稿日期: 2021-04-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2572018BA07); 东北林业大学大学生创新项目 (202010225138); 哈尔滨市应用技术研究与开发项目 (2017RAYXJ012)

作者简介: 董丹 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 957331735@qq.com

通讯作者: 王金玲 (1975-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 生物活性物质, E-mail: 122776125@qq.com

seed oil is prolonged, the quality of red raspberry seed oil deteriorates. In order to maintain the storage stability of red raspberry seed oil, it is recommended to carry out anti-oxidation and anti-corrosion intervention within 16 days under the condition of sealed storage at 20 °C, and the shelf life under this condition is 336 days. The experimental results provide a theoretical reference for the storage and utilization of cranberry seed oil.

**Key words:** red raspberry seed oil; storage stability; fatty acid composition; principal component analysis

红树莓 (*Rubus idaeus* L.) 为多年生蔷薇科悬钩子属灌木型植物, 其果实又名覆盆子、托盘等<sup>[1]</sup>, 因其芳香的气味、酸甜的口感和较高的保健价值被誉为“黄金水果”<sup>[2,3]</sup>。红树莓籽是红树莓在生产加工中的副产物, 含有蛋白质、粗脂肪、多种氨基酸、矿物质及维生素<sup>[4]</sup>, 除此之外还含有黄酮、原花青素、花色苷等多种活性成分<sup>[5]</sup>。红树莓籽油是红树莓籽的重要组成成分, 是一种稀有的芳香油, 具有抗氧化、抗炎等功能<sup>[6]</sup>。辛秀兰等<sup>[7]</sup>研究红树莓籽油的脂肪酸组成, 结果表明红树莓籽油中多不饱和脂肪酸含量丰富, 其中亚油酸、亚麻酸含量分别为 57.42%、25.41%。不饱和脂肪酸具有降低人体血清胆固醇含量, 清除人体多余自由基, 预防动脉硬化等功能。因此红树莓籽油具有良好的应用前景和开发价值。

油脂在加工、贮藏过程中受到光照、氧气、高温影响而加剧氧化, 生成的过氧化物和氢过氧化物很不稳定, 最后分解为醛类、酸类、酮类化合物和其他一些氧化物, 这些物质使得油脂品质下降, 风味变差, 严重影响人体健康<sup>[8]</sup>。油脂中脂肪酸种类、含量的差异能够影响其氧化速率。研究表明油脂中不饱和脂肪酸的双键数目越多, 其越易被氧化<sup>[9,10]</sup>, 油酸、亚油酸和亚麻酸由于双键数目不同, 其氧化速度也不同, 且相对氧化速度约为油酸:亚油酸:亚麻酸=1:10:20<sup>[11]</sup>。除脂肪酸外, 油脂中还含有植物甾醇、维生素等伴随物, 具有抗氧化性<sup>[12]</sup>和贮藏稳定性<sup>[13,14]</sup>, 能够减缓油脂的酸败速度。

籽油贮藏过程中的变化是一个复杂的过程, 本研究在分析测定红树莓籽油贮藏过程中过氧化值、脂肪酸含量等指标变化的基础上, 通过主成分分析计算红树莓籽油在贮藏过程中各项指标的权重, 各指标之间的关系和各组分与贮藏时间的关系, 明确在贮藏过程中起重要作用的指标, 为红树莓籽油的开发利用提供理论参考。

## 1 材料与方

### 1.1 材料

红树莓 (品种: 秋福) 采自黑龙江省尚志市, 速冻后运回东北林业大学食品科学与工程实验室冻藏。

### 1.2 仪器与设备

KQ-300DE 型数控超声波清洗器, 中国昆山市超声仪器有限公司; FA25 型高剪切分散乳化机, 上海弗鲁克流体机械制造有限公司; RE-2000A 旋转蒸发器, 河南省巩义市予华仪器有限公司; SHB-IIIIS 循环水式多用真空泵, 郑州长城科工贸有限公司; 6890N-5973N 气相色谱-质谱联用仪, 美国安捷伦科技有限公司; UV-5500PC 紫外可见分光光度计, 上海元析仪器有限公司; 1200 型高效液相色谱仪, 美国安捷伦科技有限公司。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 红树莓籽油的制备

参考唐琳琳等<sup>[15]</sup>的方法制备红树莓籽油, 通过高剪切-超声提取法提取红树莓籽油, 红树莓籽粉碎度 100 目、液料比 10 g/mL, 在超声波中间歇性的高剪切 (启动高剪切 10 s, 暂停 20 s 为 1 个周期, 转速 15000 r/min) 超声 15 min, 超声温度 40 °C, 超声功率 270 W, 此时红树莓籽油得率为 23.34±0.49 g/100 g。

#### 1.3.2 红树莓籽油的贮藏稳定性

采用 Schaal 烘箱法研究红树莓籽油贮藏稳定性, 参考 Przybylski 等人<sup>[16]</sup>的方法略有修改, 将红树莓籽油避光、密封, 置于 (60±1 °C) 烘箱中连续加速氧化 35 d, 每隔 24 h 振荡油样, 每 3 d 取样, 21 d 后每 7 d 取样。

### 1.4 理化指标分析检测方法

过氧化值参照 GB5009.227-2016 滴定法, 通过气相色谱-质谱联用法测定红树莓籽油脂肪酸组成; 通过液相色谱法测定红树莓籽油中  $\beta$ -谷甾醇和  $\alpha$ -生育酚; 根据 DPPH·、ABTS<sup>+</sup> 清除率判断红树莓籽油抗氧化能力测定, 均参考唐琳琳等人<sup>[15]</sup>的测定方法。

### 1.5 数据统计分析

每个实验三次重复, 数据采用平均值±标准差表示, 采用 Excel 2013 统计软件进行数据统计与整理; 采用 Origin 2021、SPASS 20.0 对数据进行处理分析并作图; 采用邓肯多重范围检验法 (Duncan's Multiple-

Rang test) 分析不同数据间的差异显著性 ( $p < 0.05$ ); 采用相关性分析衡量变量因素的相关密切程度; 采用主成分分析法提取主成分, 计算各个指标权重。

## 2 结果与分析

### 2.1 红树莓籽油贮藏过程中脂肪酸的动态变化

红树莓籽油脂肪酸甲酯的总离子流图以第 0 d、第 35 d 红树莓籽油为例, 如图 1 所示, 红树莓籽油贮藏过程中脂肪酸的动态变化见表 1。

表 1 红树莓籽油贮藏过程中脂肪酸的动态变化

Table 1 Dynamic changes of fatty acids of red raspberry seed oil during storage

序号	RT/min	化合物	贮藏时间/d											
			0	3	6	9	12	15	18	21	28	35		
1	20.28	15-甲基-11-十六碳烯酸甲酯 (C16:1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	20.9	14-甲基十六烷酸甲酯 (C16:0)	0.07	0.05	0.07	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08
3	25.54	十四烷酸 (豆蔻酸) 甲酯 (C14:0)	0.02	0.04	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
4	32.56	9-十六碳烯酸 (棕榈油酸) 甲酯 (C16:1)	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
5	32.73	十六烷酸 (棕榈酸/软脂酸) 甲酯 (C16:0)	2.14	2.19	2.10	2.25	2.05	2.39	2.19	2.20	2.18	2.21	2.21	2.21
6	32.74	7-十六烯酸甲酯 (C17:1)	0.10	0.07	0.05	0.14	0.09	0.15	0.12	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12
7	33.53	14-甲基十五烷酸甲酯 (C15:0)	2.89	3.01	2.84	2.85	2.94	2.93	2.90	2.98	3.02	3.07	3.07	3.07
8	36.46	2-己基环丙烷辛酸甲酯 (C19:1)	0.15	0.10	0.09	0.08	0.13	0.20	0.15	0.15	0.17	0.18	0.18	0.18
9	37.33	十七烷酸甲酯 (C17:0)	0.08	0.05	0.09	0.12	0.08	0.09	0.12	0.14	0.11	0.13	0.13	0.13
10	38.19	3-羟基十八烷酸甲酯 (C18:0)	0.08	0.05	0.06	0.08	0.13	0.09	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.10
11	40.14	9,12-十八碳二烯酸 (亚油酸) 甲酯 (C18:2)	48.07	48.00	48.53	47.95	47.58	47.82	47.85	47.67	47.55	47.39	47.39	47.39
12	40.31	9-十八碳烯酸 (油酸) 甲酯 (C18:1)	12.33	12.57	12.22	12.30	11.58	12.02	12.05	11.88	11.75	11.51	11.51	11.51
13	40.39	9,12,15-十八碳三烯酸 (亚麻酸) 甲酯 (C18:3)	29.98	29.89	29.84	28.75	28.68	28.91	29.54	29.42	29.38	28.97	28.97	28.97
14	40.64	7,10,13-十六碳三烯酸甲酯 (C16:3)	0.20	0.15	0.23	0.27	0.18	0.19	0.24	0.18	0.20	0.17	0.17	0.17
15	41.02	十八烷酸 (硬脂酸) 甲酯 (C18:0)	1.09	1.07	1.32	1.24	1.28	1.35	1.33	1.35	1.42	1.55	1.55	1.55
16	43.60	2-十一烷基环丙烷戊酸甲酯 (C19:1)	0.08	0.08	0.10	0.15	0.08	0.08	0.05	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
17	44.52	10-甲基十八烷酸甲酯 (C18:0)	0.02	0.01	-	0.03	0.05	0.04	0.04	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05
18	45.70	二十四烷酸 (木蜡酸) 甲酯 (C24:0)	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	47.04	10,13-二十碳二烯酸甲酯 (C20:2)	0.08	0.05	0.07	0.09	0.15	0.13	0.07	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06
20	47.20	11-二十碳烯酸甲酯 (C20:1)	0.28	0.26	0.27	0.32	0.28	0.30	0.26	0.29	0.30	0.32	0.32	0.32
21	48.17	二十烷酸 (花生酸) 甲酯 (C20:0)	0.52	0.42	0.56	0.51	0.48	0.44	0.47	0.47	0.45	0.43	0.43	0.43
22		SFA	3.85	3.78	4.08	4.14	3.90	4.30	4.13	4.19	4.19	4.35	4.35	4.35
23		MUFA	12.36	12.59	12.24	12.33	11.60	12.04	12.07	11.89	11.77	11.52	11.52	11.52
24		PUFA	78.05	77.89	78.37	76.70	76.26	76.73	77.39	77.09	76.93	76.36	76.36	76.36
25		UFA	90.41	90.48	90.61	89.03	87.86	88.77	89.46	88.98	88.70	87.88	87.88	87.88
26		TFA	98.21	98.09	98.47	97.24	95.86	97.26	97.57	97.20	97.04	96.44	96.44	96.44
27		MUFA/SFA	3.21	3.33	3.00	2.98	2.97	2.80	2.92	2.84	2.81	2.65	2.65	2.65
28		PUFA/SFA	20.27	20.61	19.21	18.53	19.55	17.81	18.74	18.40	18.36	17.55	17.55	17.55
29		UFA/SFA	23.48	23.94	22.21	21.50	22.53	20.64	21.66	21.23	21.17	20.20	20.20	20.20
30		$\omega$ -6/ $\omega$ -3	1.60	1.61	1.63	1.67	1.66	1.65	1.62	1.62	1.62	1.64	1.64	1.64

注: (1) -表示未检测到; (2) SFA: Saturated fatty acid, 饱和脂肪酸; (3) MUFA: Monounsaturated fatty acid, 单不饱和脂肪酸; (4) PUFA: Polyunsaturated fatty acid, 多不饱和脂肪酸; (5) UFA: Unsaturated fatty acid, 不饱和脂肪酸; (6) TFA: total fatty acids, 总脂肪酸。

由表 1 可知, 红树莓籽油共检测出 20 种脂肪酸。在贮藏的 0~35 d 内, 脂肪酸的各个组成成分呈波动性变化。总脂肪酸变化范围为 95.86%~98.21%, 在

35 d 的动态监测中降低了 1.77%; 饱和脂肪酸变化范围为 3.78%~4.35%, 在 35 d 的动态监测中增加了 0.50%, 其中主要含有的软脂酸和硬脂酸变化范围分

别为 2.05%~2.39%、1.07%~1.55%，在 35 d 的动态监测中增加了 3.27%、0.46%。不饱和脂肪酸变化范围为 87.86%~90.48%，在 35 d 的动态监测中降低了 2.53%，其中主要含有的油酸、亚油酸、亚麻酸变化范围分别为 11.51%~12.57%、28.68%~29.98%、47.39%~48.53%，在 35 d 的动态监测中降低了 0.82%、0.68%、1.01%。14-甲基十五烷酸增加了 0.18%、11-二十碳烯酸增加了 0.04%、二十烷酸降低了 0.09%，其他脂肪酸的变化不大。

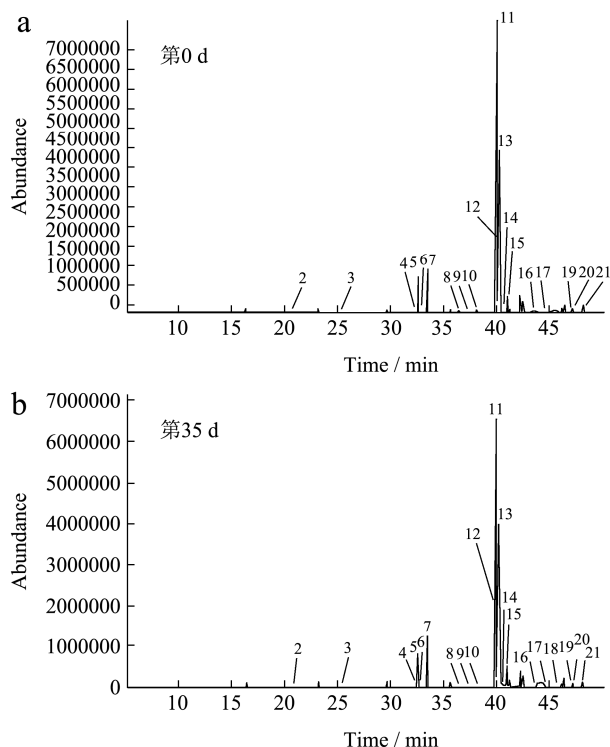


图 1 红树莓籽油脂肪酸甲酯总离子流图

Fig.1 Total ion chromatogram of fatty acid methyl ester of red raspberry seed oil

脂肪酸的组成对油脂的氧化稳定性起重要作用<sup>[17]</sup>，油脂的不饱和脂肪酸含量越高，饱和脂肪酸含量越低，其稳定性越低<sup>[18]</sup>。Ali 等人<sup>[19]</sup>对热氧化过程中 170 °C 微波焙烤南瓜籽油脂的组成进行研究，结果表明焙烤 12 min 后的南瓜籽油热氧化 9 h 后饱和脂肪酸含量增加了 2.75%，多不饱和脂肪酸含量降低了 2.93%，多不饱和脂肪酸比饱和脂肪酸含量降低了 7.69%。Chew 等人<sup>[20]</sup>对粗、精制红麻籽油在加速贮藏过程中的氧化稳定性进行研究，结果表明粗、精制红麻籽油在加速贮藏过程中饱和脂肪酸含量增加，单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸含量减少，以上实验与本实验结果相似。脂肪酸的氧化速率取决于不饱和程度，不饱和脂肪酸含有的不稳定的双键易断裂，氧化速率加快<sup>[21]</sup>。在氧化过程中，多不饱和脂肪酸减少是由于多不饱和脂肪酸含有的双键易分解为单不

饱和脂肪酸的单双键，随后分解为饱和脂肪酸的单键<sup>[22]</sup>。单不饱和脂肪酸的增加或减少取决于转移到单不饱和脂肪酸中的多不饱和脂肪酸的氧化速率和转移到饱和脂肪酸的单不饱和脂肪酸的氧化速率<sup>[23]</sup>。

## 2.2 红树莓籽油贮藏过程中过氧化值、活性物质含量及抗氧化活性的动态变化

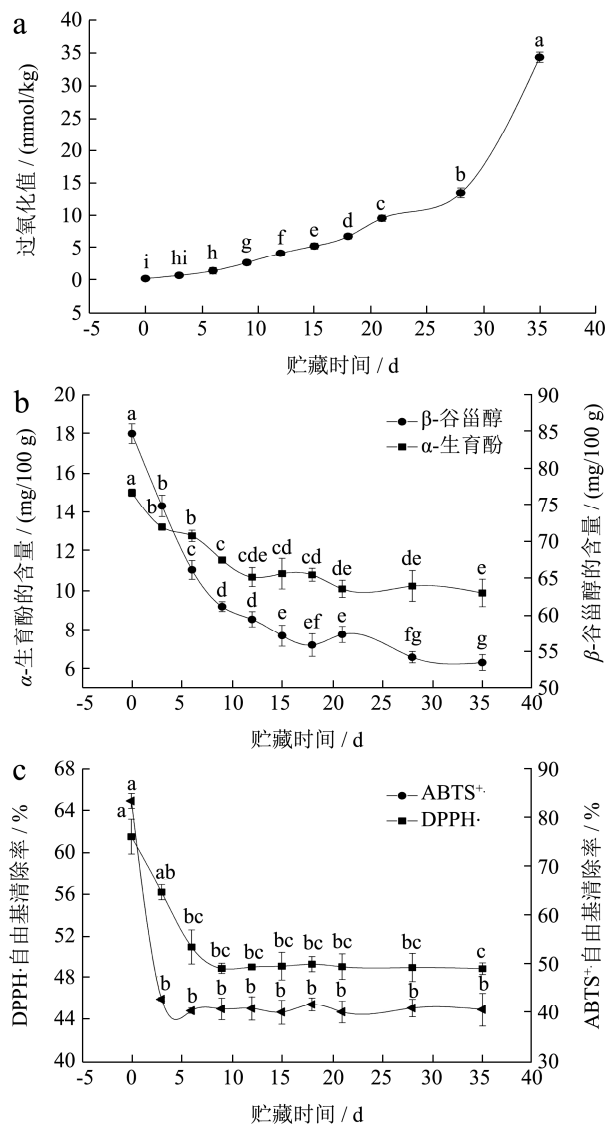


图 2 红树莓籽油在贮藏过程中部分指标的动态变化

Fig.2 Dynamic changes of some indexes of raspberry seed oil during storage

图 2 为红树莓籽油在 60 °C 避光保存条件下贮藏 0~35 d 中过氧化值、活性物质含量及抗氧化活性的动态变化，其中图 2a 为过氧化值的动态变化结果、图 2b 为  $\beta$ -谷甾醇与  $\alpha$ -生育酚的动态变化结果、图 2c 为 DPPH· 与 ABTS<sup>+</sup> 清除率的动态变化结果。

过氧化值是表示油脂和脂肪酸等被氧化程度的一项重要指标。高温是促进过氧化物形成的因素之一

[24]。由图 2a 可知,在贮藏过程中红树莓籽油过氧化值呈上升趋势。在 0~21 d 过氧化值平稳上升,第 21 d 达到  $9.56 \pm 0.49$  mmol/kg; 在 28~35 d 过氧化值迅速上升,大于 0~28 d 过氧化值的上升速率,油脂氧化速度加快,氧化酸败加剧,在第 35 d 达到  $34.36 \pm 0.78$  mmol/kg,此时是第 0 d 的 190.89 倍,这与易志<sup>[8]</sup>贮藏条件对亚麻籽油氧化稳定性的影响的研究中 50 °C 的条件下贮藏的过氧化值变化规律相似,但低于其 60 °C 时的过氧化值变化值。随贮藏时间的延长过氧化值增加,油脂氧化酸败加快。

由图 2b 可知,在贮藏过程中红树莓籽油中  $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚含量呈先下降后平稳趋势。在 0~9 d 时  $\beta$ -谷甾醇含量下降迅速,第 9 d  $\beta$ -谷甾醇含量为  $61.12 \pm 0.66$  mg/100 g; 在 9~35 d 时  $\beta$ -谷甾醇含量下降缓慢。在 0~12 d 时  $\alpha$ -生育酚含量下降迅速,第 12 d  $\alpha$ -生育酚含量为  $10.67 \pm 0.48$  mg/100 g; 在 12~35 d 时  $\alpha$ -生育酚下降缓慢并趋于平缓。推测产生这种变化的原因为油脂刚开始氧化时  $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚含量相对较高, $\alpha$ -生育酚失去 H 结合到过氧化物上, $\beta$ -谷甾醇作为  $\alpha$ -生育酚的增效剂将失去 H 补充给  $\alpha$ -生育酚,继续氧化后  $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚含量相对变少,达到化学平衡, $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚含量变化趋于平缓。方冰等<sup>[25]</sup>通过研究不同生育酚及甾醇含量对大豆油氧化稳定性的影响时发现, $\beta$ -谷甾醇和  $\alpha$ -生育酚的含量在 0.30%±1.29% 以下,均可以提高大豆油的氧化稳定性,甾醇通过与生育酚的协同作用发挥氧化稳定性;夏钰<sup>[26]</sup>通过研究贮藏过程中葡萄籽油伴随流出物的变化发现葡萄籽油  $\alpha$ -生育酚含量前期下降明显后期下降趋势较小;总甾醇含量呈下降趋势, $\beta$ -谷甾醇下降趋势明显,这与该文中的数据变化规律相匹配。

由图 2c 和表 2 可知,第 0 d 红树莓籽油 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>清除率均低于 VE。贮藏过程中红树莓籽油 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>清除率先下降后趋于稳定。在 0~9 d 时籽油 DPPH·清除率迅速下降,第 9 d DPPH·清除率为 48.88%,此时 IC<sub>50</sub> 值为 9.07 mg/100 g; 在 9~35 d 时 DPPH·清除率无显著性变化。夏钰<sup>[26]</sup>发现葡萄籽油贮藏过程中伴随流出物的变化,DPPH·清除率在 0~35 d 内呈线性下降。红树莓籽油在 0~3 d 时籽油 ABTS<sup>+</sup>清除率迅速下降,第 3 d ABTS<sup>+</sup>清除率为 42.68%,此时 IC<sub>50</sub> 值为 45.12 mg/100 g; 在 3~35 d 时籽油 ABTS<sup>+</sup>清除率无显著性变化。Leong 等人<sup>[27]</sup>通过研究加速贮藏对红麻籽油的影响发现红麻籽油对 ABTS<sup>+</sup>清除率呈先下降后趋于稳定的变化趋势,

与本实验结果相似。

### 2.3 红树莓籽油贮藏过程中油脂的组成与抗氧化活性的相关性分析

由表 3 可知,在贮藏过程中红树莓籽油过氧化值、脂肪酸、籽油中  $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚与 DPPH·清除率、ABTS<sup>+</sup>清除率呈现不同相关性。硬脂酸与过氧化值、SFA、DPPH·清除率,油酸与亚油酸、MUFA、MUFA/SFA、 $\alpha$ -生育酚,亚油酸与 MUFA、PUFA,亚麻酸与 PUFA, MUFA 与  $\alpha$ -生育酚、MUFA/SFA, PUFA 与  $\alpha$ -生育酚, MUFA/SFA 与 PUFA/SFA、UFA/SFA、 $\beta$ -谷甾醇、生育酚, PUFA/SFA 与 UFA/SFA、 $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚, UFA/SFA 与  $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚,  $\beta$ -谷甾醇与  $\alpha$ -生育酚, DPPH·清除率与 ABTS<sup>+</sup>清除率存在极显著正相关;硬脂酸与油酸、MUFA、MUFA/SFA、PUFA/SFA、UFA/SFA、 $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚, SFA 与 MUFA/SFA、PUFA/SFA、UFA/SFA、 $\beta$ -谷甾醇, DPPH·清除率与 MUFA/SFA、PUFA/SFA、MUFA/SFA、 $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚, ABTS<sup>+</sup>与  $\alpha$ -生育酚、 $\beta$ -谷甾醇存在极显著负相关。

过氧化值与 SFA,棕榈酸与  $\alpha$ -生育酚,油酸与 PUFA、UFA/SFA、 $\beta$ -谷甾醇,亚油酸与花生酸、 $\alpha$ -生育酚,亚麻酸与  $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚, SFA 与 DPPH·清除率, MUFA 与 PUFA、UFA/SFA、 $\beta$ -谷甾醇, PUFA 与 MUFA/SFA、 $\beta$ -谷甾醇存在显著性正相关;过氧化值与棕榈酸、油酸、亚油酸、MUFA、MUFA/SFA、PUFA/SFA、UFA/SFA,亚麻酸与 DPPH·清除率, SFA 与  $\alpha$ -生育酚存在显著性负相关。红树莓籽油贮藏过程中氧化稳定性降低,过氧化值升高, SFA 升高, PUFA 降低, UFA/SFA、UFA/SFA、 $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚、DPPH·清除能力、ABTS<sup>+</sup>清除能力降低。 $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚、DPPH·清除能力、ABTS<sup>+</sup>清除能力与过氧化值无显著相关性,可能对油脂初级氧化影响较小。Zhang 等人<sup>[28]</sup>通过对红麻籽油在加速贮藏过程中生物活性物质进行研究,发现在贮藏过程中红麻籽油中 VE 和总甾醇含量均降低,且与过氧化值呈负相关,这与本实验中  $\beta$ -谷甾醇与  $\alpha$ -生育酚极正显著相关的关系相符。Redondo-Cuevas 等人<sup>[29]</sup>对植物油组分与氧化稳定性的相关性进行分析,采用 Rancimat 仪测定油脂氧化稳定性,结果表明氧化稳定性与 UFA、PUFA、总生育酚呈负相关,总生育酚与 UFA、PUFA 呈正相关,总生育酚与 SFA 呈负相关,与本实验结果相似。

表 2 红树莓籽油贮藏过程中 DPPH·、ABTS<sup>+</sup>清除能力 IC<sub>50</sub> 值的动态变化

Table 2 Dynamic changes of DPPH· and ABTS<sup>+</sup> free radical scavenging rate IC<sub>50</sub> during storage of red raspberry seed oil

IC <sub>50</sub>	VE	0 d	3 d	6 d	9 d	12 d	15 d	18 d	21 d	28 d	35 d
DPPH·IC <sub>50</sub> /(mg/100 g)	6.95±0.32 <sup>cd</sup>	7.04±0.16 <sup>cd</sup>	7.87±0.09 <sup>bc</sup>	8.98±0.08 <sup>ab</sup>	9.07±0.10 <sup>a</sup>	9.18±0.22 <sup>a</sup>	9.23±0.20 <sup>a</sup>	9.14±0.15 <sup>a</sup>	9.16±0.22 <sup>a</sup>	9.14±0.16 <sup>a</sup>	9.15±0.06 <sup>a</sup>
ABTS <sup>+</sup> ·IC <sub>50</sub> /(mg/100 g)	4.26±0.2 <sup>d</sup>	22.69±0.58 <sup>c</sup>	45.12±1.48 <sup>b</sup>	49.22±0.29 <sup>a</sup>	47.31±1.50 <sup>ab</sup>	47.13±3.03 <sup>ab</sup>	49.12±1.67 <sup>a</sup>	48.56±2.04 <sup>ab</sup>	48.85±1.77 <sup>ab</sup>	48.41±1.25 <sup>ab</sup>	48.51±0.75 <sup>ab</sup>

表 3 红树莓籽油贮藏过程中油脂的组成与抗氧化活性的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of oil composition and antioxidant activity of raspberry seed oil during storage

项目	过氧化值	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	花生酸	SFA	MUFA	PUFA	MUFA/SFA	PUFA/SFA	UFA/SFA	β-谷甾醇	α-生育酚	DPPH·	ABTS <sup>+</sup> ·
过氧化值	1																
棕榈酸	-0.671*	1															
硬脂酸	0.817**	-0.664*	1														
油酸	-0.719*	0.601	-0.817**	1													
亚油酸	-0.696*	0.492	-0.548	0.770**	1												
亚麻酸	-0.339	0.117	-0.483	0.599	0.592	1											
花生酸	-0.481	0.492	-0.242	0.283	0.712*	0.242	1										
SFA	0.664*	-0.482	0.882**	-0.546	-0.402	-0.481	-0.213	1									
MUFA	-0.724*	0.613	-0.820**	1.000**	0.771**	0.594	0.289	-0.549	1								
PUFA	-0.538	0.298	-0.568	0.745*	0.843**	0.933**	0.48	-0.501	0.742*	1							
MUFA/SFA	-0.748*	0.583	-0.965**	0.814**	0.598	0.600	0.241	-0.930**	0.816**	0.669*	1						
PUFA/SFA	-0.672*	0.474	-0.893**	0.625	0.499	0.603	0.252	-0.988**	0.627	0.626	0.957**	1					
UFA/SFA	-0.691*	0.496	-0.911**	0.660*	0.519	0.604	0.249	-0.984**	0.662*	0.636*	0.970**	0.999**	1				
β-谷甾醇	-0.578	0.578	-0.865**	0.727*	0.596	0.662*	0.356	-0.795**	0.730*	0.709*	0.877**	0.848**	0.858**	1			
α-生育酚	-0.623	0.663*	-0.833**	0.783**	0.728*	-0.679*	0.467	-0.735*	0.786**	0.779**	0.855**	0.813**	0.817**	0.974**	1		
DPPH·	-0.391	-0.498	0.872**	-0.625	-0.381	-0.673*	-0.151	-0.726*	-0.627	-0.62	-0.794**	-0.777**	-0.784**	0.963**	-0.898**	1	
ABTS <sup>+</sup> ·	0.305	-0.563	0.609	-0.376	-0.244	-0.474	-0.307	-0.55	-0.383	-0.426	-0.556	-0.576	-0.576	-0.832**	-0.785**	0.896**	1

注: (1) \*\*在 0.01 水平 (双侧) 上极显著相关; (2) \*在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关。

表4 红树莓籽油贮藏过程中综合品质指标主成分的特征值及方差贡献率

Table 4 Characteristic values and variance contribution ratios of main components of comprehensive quality indicators during

组分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差的%	累积%	合计	方差的%	累积%
1	9.830	65.535	65.535	9.830	65.535	65.535
2	1.631	10.872	76.407	1.631	10.872	76.407
3	1.439	9.593	86.000	1.439	9.593	86.000
4	1.095	7.301	93.301	1.095	7.301	93.301
5	0.570	3.799	97.101			
6	0.210	1.400	98.501			
7	0.140	0.936	99.437			
8	0.077	0.516	99.953			
9	0.007	0.047	100.000			

表5 主成分载荷矩阵、特征向量和权重分析

Table 5 Principal component load matrix, feature vector and weight analysis

组分	第一主成分		第二主成分		第三主成分		第四主成分		综合指标	权重	排序
	载荷	特征向量	载荷	特征向量	载荷	特征向量	载荷	特征向量			
过氧化值	-0.757	-0.282	-0.216	-0.252	0.462	0.375	0.153	0.117	-0.180	0.0570	10
棕榈酸	0.660	0.246	-0.089	-0.104	-0.617	-0.501	0.171	0.131	0.119	0.0378	15
硬脂酸	-0.884	-0.329	0.217	0.253	0.260	0.211	0.283	0.217	-0.163	0.0517	12
油酸	0.880	0.328	0.219	0.255	-0.064	-0.052	-0.316	-0.242	0.236	0.0747	6
亚油酸	0.802	0.299	0.544	0.634	-0.017	-0.014	0.152	0.116	0.291	0.0924	3
亚麻酸	0.741	0.276	0.075	0.087	0.624	0.506	-0.002	-0.002	0.256	0.0812	4
花生酸	0.487	0.181	0.400	0.466	-0.249	-0.202	0.698	0.534	0.203	0.0643	9
SFA	-0.753	-0.280	0.338	0.394	0.152	0.123	0.205	0.157	-0.126	0.0400	13
MUFA	0.883	0.329	0.214	0.249	-0.075	-0.061	-0.309	-0.236	0.235	0.0746	7
PUFA	0.854	0.318	0.294	0.342	0.409	0.332	0.066	0.051	0.301	0.0956	1
UFA	0.917	0.341	0.285	0.332	0.268	0.217	-0.059	-0.045	0.297	0.0943	2
$\beta$ -谷甾醇	0.926	0.345	-0.325	-0.379	0.055	0.045	0.054	0.041	0.206	0.0653	8
$\alpha$ -生育酚	0.962	0.358	-0.167	-0.195	0.021	0.017	0.123	0.094	0.238	0.0755	5
DPPH·	0.846	0.315	-0.480	-0.559	0.210	0.170	0.057	0.044	0.177	0.0561	11
ABTS <sup>+</sup>	0.649	0.242	-0.572	-0.666	0.080	0.065	0.432	0.331	0.125	0.0395	14

### 2.4 红树莓籽油贮藏过程中综合品质的主成分分析

采用主成分分析法以红树莓籽油贮藏过程中过氧化值、棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸、亚麻酸、花生酸、SFA、MUFA、PUFA、UFA、 $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚、DPPH·清除率、ABTS<sup>+</sup>清除率为指标进行主成分分析。结果见表4、表5。

根据红树莓籽油在 0~35 d 的贮藏中各个组分的含量，用于主成分分析。结合表4、表5可知，提取出的4个主成分的累积方差贡献率为93.30%>80%，即可解释原变量93.30%的信息且基本反映了所有原

变量的信息。在红树莓籽油加速贮藏过程中 PUFA、UFA、亚油酸、亚麻酸、 $\alpha$ -生育酚、油酸、MUFA、 $\beta$ -谷甾醇、花生酸、过氧化值、DPPH·清除率、硬脂酸占红树莓籽油加速贮藏过程中综合指标中88.26%的权重，是红树莓籽油加速贮藏稳定性的重要指标，其中的PUFA权重最高为9.56%，其次为UFA 9.43%，再次亚油酸9.24%，权重越高则对籽油的贮藏稳定性影响越大。第一主成分的特征值为9.83，贡献率为65.54%，代表了全部信息的65.4%，主要反映了棕榈酸、油酸、亚油酸、亚麻酸、花生酸、MUFA、UFA、PUFA、 $\alpha$ -生育酚、 $\beta$ -谷甾醇、DPPH·清除率、ABTS<sup>+</sup>清除率正显著相关，过氧化值、硬脂酸负显著相关，对第一主成分贡献最大的为 $\alpha$ -生育酚和 $\beta$ -谷甾醇，载荷

量分别是 0.962 和 0.926; 第二主成分的特征值为 1.631, 贡献率为 10.87%, 主要代表亚油酸和 ABTS<sup>+</sup> 的含量; 第三主成分特征值为 1.439, 贡献率为 9.59%, 主要代表棕榈酸的含量; 第四主成分特征值为 1.095, 贡献率为 7.30%, 主要代表过氧化值的含量。

可利用 F1、F2、F3 和 F4 这 4 个新的综合指标来替代原来的 15 个指标对红树莓籽油的贮藏的过程中各个组分进行分析。第一主成分的特征向量分别乘以 15 个原始变量标准化之后的变量即为第一主成分的函数表达式, 同理可以得出第二、第三主成分和第四主成分的函数表达式, 计算整理得到的 4 个主成分的函数表达式分别为 (其中  $Z_{\text{过氧化值}}$ 、 $Z_{\text{ABTS}^+}$  为标准化变量):

$$F_1 = -0.282 Z_{\text{过氧化值}} + 0.246 Z_{\text{棕榈酸}} - 0.329 Z_{\text{硬脂酸}} + 0.328 Z_{\text{油酸}} + 0.299 Z_{\text{亚油酸}} + 0.276 Z_{\text{亚麻酸}} + 0.181 Z_{\text{花生酸}} - 0.280 Z_{\text{SFA}} + 0.329 Z_{\text{MUFA}} + 0.318 Z_{\text{PUFA}} + 0.341 Z_{\text{UFA}} + 0.345 Z_{\beta\text{-谷甾醇}} + 0.358 Z_{\alpha\text{-生育酚}} + 0.315 Z_{\text{DPPH}} + 0.242 Z_{\text{ABTS}^+}$$

$$F_2 = -0.252 Z_{\text{过氧化值}} - 0.104 Z_{\text{棕榈酸}} + 0.253 Z_{\text{硬脂酸}} + 0.255 Z_{\text{油酸}} + 0.634 Z_{\text{亚油酸}} + 0.087 Z_{\text{亚麻酸}} + 0.466 Z_{\text{花生酸}} + 0.394 Z_{\text{SFA}} + 0.249 Z_{\text{MUFA}} + 0.342 Z_{\text{PUFA}} + 0.332 Z_{\text{UFA}} - 0.379 Z_{\beta\text{-谷甾醇}} - 0.195 Z_{\alpha\text{-生育酚}} - 0.559 Z_{\text{DPPH}} - 0.666 Z_{\text{ABTS}^+}$$

$$F_3 = 0.375 Z_{\text{过氧化值}} - 0.501 Z_{\text{棕榈酸}} + 0.211 Z_{\text{硬脂酸}} - 0.152 Z_{\text{油酸}} - 0.014 Z_{\text{亚油酸}} + 0.506 Z_{\text{亚麻酸}} - 0.202 Z_{\text{花生酸}} + 0.123 Z_{\text{SFA}} - 0.061 Z_{\text{MUFA}} + 0.332 Z_{\text{PUFA}} + 0.217 Z_{\text{UFA}} + 0.045 Z_{\beta\text{-谷甾醇}} + 0.017 Z_{\alpha\text{-生育酚}} + 0.170 Z_{\text{DPPH}} + 0.065 Z_{\text{ABTS}^+}$$

$$F_4 = 0.117 Z_{\text{过氧化值}} + 0.131 Z_{\text{棕榈酸}} + 0.217 Z_{\text{硬脂酸}} - 0.242 Z_{\text{油酸}} + 0.116 Z_{\text{亚油酸}} - 0.002 Z_{\text{亚麻酸}} + 0.534 Z_{\text{花生酸}} + 0.157 Z_{\text{SFA}} - 0.236 Z_{\text{MUFA}} + 0.051 Z_{\text{PUFA}} - 0.045 Z_{\text{UFA}} + 0.041 Z_{\beta\text{-谷甾醇}} + 0.049 Z_{\alpha\text{-生育酚}} + 0.044 Z_{\text{DPPH}} + 0.331 Z_{\text{ABTS}^+}$$

各因素权重计算: 将各因素在综合得分模型中的系数进行归一化处理。权重 = 综合系数绝对值 / 各因素综合系数绝对值之和。

红树莓籽油的贮藏第一主成分 (PC1) 和第二主成分 (PC2) 相关载荷图和主成分得分图如图 3 所示, PC1 主要对贮藏时间进行了划分, 其中贮藏的 0 d 和 3 d 的红树莓籽油分布在 PCA 得分图 (3b) 的第四象限, 说明其与 PC1 成正相关, 与 PC2 成负相关, 棕榈酸、 $\alpha$ -生育酚、 $\beta$ -谷甾醇、DPPH 清除率、ABTS<sup>+</sup> 清除率与 PC1 呈正相分布, 与 PC2 呈负相分布; 在贮藏的 6 d 和 9 d 的红树莓籽油分布在 PCA 得分图 (3b) 的第一象限, 说明其与在 PC1 和 PC2 均为正相关, 亚油酸、亚麻酸、花生酸、PUFA、UFA、油酸、MUFA 在 PC1 和 PC2 上呈正向分布, 即这些组分在红树莓籽油贮藏的 6 d 和 9 d 均与 PC1、PC2 呈正相关; 贮藏的 12 d 和 35 d 的红树莓籽油分布在第二、三象限, 与 PC1 成负相关, 其中 15、18、21 d 与 PC2 呈正相关并与 SFA 和硬脂酸对应, 12、

28、35 d 与 PC2 呈负相关并与过氧化值对应, 即在红树莓籽油贮藏的 0~9 d 油脂的成分变化较大, 且以 0~3 d 内的  $\alpha$ -生育酚、 $\beta$ -谷甾醇、DPPH 清除率、ABTS<sup>+</sup> 清除率变化较大, 表现出油脂的起始氧化速度较快, 并对这些指标有较大影响, 3~9 d 内不饱和脂肪酸变化较大, 对于向饱和脂肪酸的大量转化具有指向性, 在 15~21 d 内 SFA 和硬脂酸含量变化较大, 在 28~35 d 内过氧化值含量变大即油脂氧化速度加快, 氧化酸败加剧。

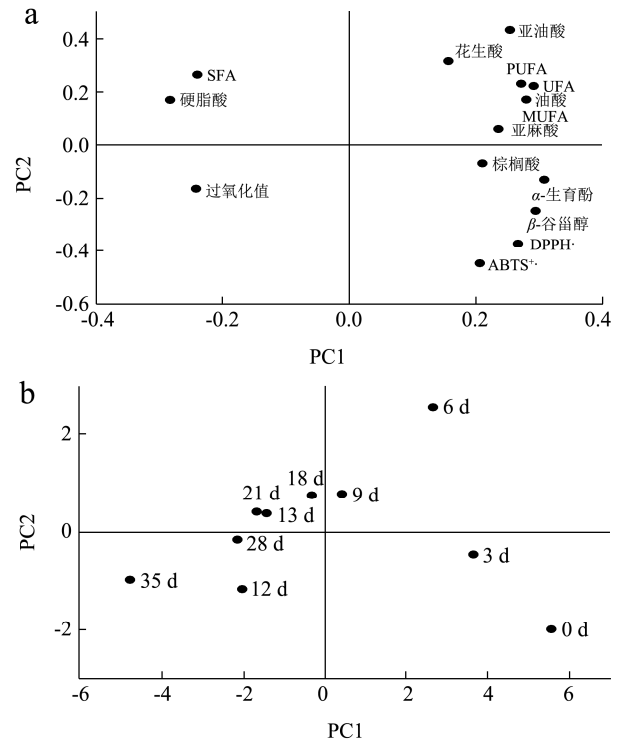


图 3 红树莓籽油在贮藏过程中各组分在主成分 1 和主成分 2 上的载荷图 (a) 和 PCA 得分图 (b)

Fig.3 Load diagram (a) and PCA score plot(b) of each component on principal component 1 and principal component 2 during storage of raspberry seed oil

采用 Schaal 烘箱法对红树莓籽油货架期进行预测, 60 °C 条件下实验 1 d 相当于 20 °C 条件下储存 16 d<sup>[30]</sup>。根据植物油食品安全国家标准 (GB 2716-2018) 规定, 植物原油的过氧化值应 ≤0.25 g/100g 即 ≤9.85 mmol/kg, 红树莓籽油在 60 °C, 避光密封保藏贮藏条件下第 21 d 达到 9.56±0.49 mmol/kg 接近标准上限, 预测 20 °C 货架寿命为 336 d, 并通过与 PCA 分析结果结合, 籽油在 20 °C, 避光密封保藏贮藏条件下在 16 d 内进行抗氧防腐干预较佳, 48 d 以后干预则抗氧防腐效果微弱。王芳梅等<sup>[31]</sup>对通过 Schaal 烘箱法对新疆打瓜籽油进行货架期预测, 结果表明 60 °C 条件下货架期为 204 h, 预测 20 °C 货架期为 136 d。除此之外还可通过和建立动力学模型预测货架期, 朱式业等<sup>[32]</sup>研究茶多酚对牡丹籽油氧化稳定性影响及货架期预测, 结



果表明牡丹籽油氧化反应动力学模型为

$$k = 822.46e^{-\frac{33476.32}{RT}}$$

茶多酚的牡丹籽油货架期为 645.30 h。本实验中红树莓籽油为毛油, 如果经过加工去除杂质、脱胶、脱酸等精炼工艺, 通过降低籽油的杂质, 并适当添加抗氧化剂, 抑制氧化反应的速率, 则实际货架期可能更长。

### 3 结论

对加速贮藏期间红树莓籽油的脂肪酸组成、过氧化值、活性物质含量及抗氧化活性的动态变化进行测定, 并采用主成分分析法进行权重分析。结果表明: 随着红树莓籽油贮藏时间的延长, 红树莓籽油鉴定出的 21 种脂肪酸组成发生变化, 总脂肪酸的含量降低 1.77%, 饱和脂肪酸含量增加了 0.57%, 不饱和脂肪酸降低了 2.53%, 不饱和脂肪酸变化量最大; 红树莓籽油的过氧化值呈持续上升趋势, 在 28 d 后呈指数型增长, 35 d 是第 0 d 的 190.89 倍; 红树莓籽油中  $\beta$ -谷甾醇和  $\alpha$ -生育酚含量、DPPH $^{\cdot}$  和 ABTS $^{\cdot+}$  清除率都呈现先下降后趋于平缓的动态趋势变化; 相关性分析表明过氧化值与 SFA、MUFA、PUFA、 $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚、DPPH $^{\cdot}$ 、ABTS $^{\cdot+}$  清除率具有一定相关性; PUFA 是对红树莓籽油贮藏稳定性影响最大的指标; 红树莓籽油贮藏的 0~9 d 油脂的组成变化较大, 且以 0~3 d 内的不饱和脂肪酸的向饱和脂肪酸的转化速度较快; 预测籽油在 20  $^{\circ}$ C, 避光密封保藏贮藏条件下在 16 d 内进行抗氧防腐干预较佳, 48 d 以后干预则抗氧防腐效果微弱。本实验结果为红树莓籽油的贮藏与开发利用提供理论参考。

### 参考文献

- [1] 唐莹, 贾仕杰, 张健, 等. 红树莓叶茶的制备及与红树莓叶片、绿茶的比较[J/OL]. 食品科学, DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20200801-001  
TANG Ying, JIA Shijie, ZHANG Jian, et al. Preparation of red raspberry leaf tea and comparison with red raspberry leaf and commercial green tea [J/OL]. Food Science, DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20200801-001
- [2] 贾仕杰, 张海华, 张焕, 等. 东北 6 种红树莓叶酚类化合物的鉴定及抗氧化活性分析[J]. 食品科学, 2019, 40(20): 227-233  
JIA Shijie, ZHANG Haihua, ZHANG Huan, et al. Phenolic compounds and antioxidant capacities of six varieties of red raspberry leaves from northeast China [J]. Food Science, 2019, 40(20): 227-233
- [3] Teng H, Fang T, Lin Q, et al. Red raspberry and its anthocyanins: bioactivity beyond antioxidant capacity [J].

- Trends in Food Science & Technology, 2017, 66: 153-165
- [4] 迟超, 杨宪东, 孙琪, 等. 不同品种红树莓果籽营养成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(12): 218-223  
CHI Chao, YANG Xiandong, SUN Qi, et al. Assessment of nutritional components in five cultivars of red raspberry seeds [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(12): 218-223
- [5] González E A, Agrasar A T, Castro L M P, et al. Solid-state fermentation of red raspberry (*Rubus idaeus* L.) and arbutus berry (*Arbutus unedo* L.) and characterization of their distillates [J]. Food Research International, 2011, 44(5): 1419-1426
- [6] 迟超. 红树莓籽成分分析及提取物的体外抗氧化、降脂、抗菌活性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018  
CHI Chao. Polyphenols extraction, vitro antioxidative, hypolipidemic, antimicrobial activities and compound analysis of red raspberry seeds [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018
- [7] 辛秀兰, 陈亮, 吴迪, 等. 红树莓籽油的脂肪酸成分分析[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(7): 100-103  
XIN Xiulan, CHEN Liang, WU Di, et al. Analysis of fatty acid compositions in red raspberry seed oil [J]. Food Research and Development, 2011, 32(7): 100-103
- [8] 易志. 亚麻籽油贮藏稳定性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016  
YI Zhi. Study on storage stability of linseed oil [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016
- [9] Aladedunye F, Przybylski R. Frying stability of high oleic sunflower oils as affected by composition of tocopherol isomers and linoleic acid content [J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2373-2378
- [10] Freire L M S, Filho J R C, Moura C V R, et al. Evaluation of the oxidative stability and flow properties of quaternary mixtures of vegetable oils for biodiesel production [J]. Fuel, 2012, 95: 126-130
- [11] 葛林梅, 郜海燕, 穆宏磊, 等. 山核桃加工过程脂肪酸氧化及抗氧化能力变化研究[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(1): 61-65, 71  
GE Linmei, GAO Haiyan, MU Honglei, et al. The effect of processing on fatty acid oxidation and antioxidant ability of walnut (*Carya cathayensis* Sarg) [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(1): 61-65, 71
- [12] 张莉莎.  $\alpha$ -生育酚、植物甾醇和  $\gamma$ -谷维素清除 DPPH 自由基相互作用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019  
ZHANG Lisha. Effects of interaction between  $\alpha$ -tocopherol, phytosterol and  $\gamma$ -oryzanol on the antiradical activity against

- DPPH radical [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019
- [13] Choe E. Interaction of light and temperature on tocopherols during oxidation of sunflower oil [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2013, 90(12): 1851-1857
- [14] Naziri E, Mitić M N, Tsimidou M Z. Contribution of tocopherols and squalene to the oxidative stability of cold-pressed pumpkin seed oil (*Cucurbita pepo* L.): pumpkin seed oil autoxidation and photo-oxidation studies [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2016, 118(6): 898-905
- [15] 唐琳琳,桑英,陈思睿,等.不同提取方法的红树莓籽油品质及体外抗氧化活性对比[J].现代食品科技,2020,36(3):80-88  
TANG Linlin, SANG Ying, CHEN Sirui, et al. Comparison of antioxidant activity and quality of red raspberry seed oil extracted by different methods [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(3): 80-88
- [16] Przybylski R, Malcolmson L J, Eskin N A M, et al. Stability of low linolenic acid canola oil to accelerated storage at 60 °C [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 1993, 26(3): 205-209
- [17] Maszewska M, Florowska A, Dłużewska E, et al. Oxidative stability of selected edible oils [J]. *Molecules*, 2018, 23(7): 1746
- [18] De Camargo A C, Regitano-d'Arce M A B, De Alencar S M, et al. Chemical changes and oxidative stability of peanuts as affected by the dry-blanching [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2016, 93(8): 1101-1109
- [19] Ali M A, Nargis A, Othman N H, et al. Oxidation stability and compositional characteristics of oils from microwave roasted pumpkin seeds during thermal oxidation [J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(11): 2569-2580
- [20] Chew S C, Tan C P, Nyam K L. Oxidative stability of crude and refined kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) seed oil during accelerated storage: 2[J]. *Sains Malaysiana*, 2019, 48(2): 329-335
- [21] Ng S-K, Jessie L-Y L, Tan C-P, et al. Effect of accelerated storage on microencapsulated kenaf seed oil [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2013, 90(7): 1023-1029
- [22] Cheong A M, Tan C P, Nyam K L. Physicochemical, oxidative and anti-oxidant stabilities of kenaf seed oil-in-water nanoemulsions under different storage temperatures [J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 95: 374-382
- [23] Xie C, Ma Z F, Li F, et al. Storage quality of walnut oil containing lycopene during accelerated oxidation [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(4): 1387-1395
- [24] Said G, Hicham H, Badr K. Oxidative stability of cosmetic argan oil: a one-year study [J]. *Journal of Cosmetic Science: The Official Journal of the Society of Cosmetic Chemists*, 2014, 65(2): 81-87
- [25] 方冰,王瑛瑶,栾霞,等.生育酚及甾醇含量对大豆油氧化稳定性及贮藏稳定性的影响[J].中国粮油学报,2016,31(11): 69-73  
FANG Bing, WANG Yingyao, LUAN Xia, et al. Effect of tocopherol and sterol content on the oxidation stability and storage stability of soybean oil [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(11): 69-73
- [26] 夏钰.提取方式对葡萄籽油伴随物及其抗氧化活性的影响[D].无锡:江南大学,2018  
XIA Yu. Effects of extraction methods on accompaniments and antioxidant activities of grape seed oil [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018
- [27] Leong M-H, Tan C-P, Nyam K-L. Effects of accelerated storage on the quality of kenaf seed oil in chitosan-coated high methoxyl pectin-alginate microcapsules: effects of accelerated storage on the kenaf seed oil microcapsules [J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(10): C2367-C2372
- [28] Zhang Z, Zhang L, Xie Q, et al. Effect of accelerated storage on fatty acids, thermal properties and bioactive compounds of kenaf seed oil [J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(8): 2121-2127
- [29] Redondo-cuevas L, Castellano G, Torrens F, et al. Revealing the relationship between vegetable oil composition and oxidative stability: a multifactorial approach [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2018, 66: 221-229
- [30] Xie C, Ma Z F, Li F, et al. Storage quality of walnut oil containing lycopene during accelerated oxidation [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(4): 1387-1395
- [31] 王芳梅,张鑫,谷盼盼,等.新疆打瓜籽油氧化稳定性的研究及货架期预测[J].食品与发酵工业,2019,45(5):164-169  
WANG Fangmei, ZHANG Xin, GU Panpan, et al. Study on oxidative stability of Xinjiang seeding-watermelon seeds oil and its shelf-life prediction [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(5): 164-169
- [32] 朱式业,熊武国,李加兴,等.茶多酚对牡丹籽油氧化稳定性的影响及货架期预测[J].中国油脂,2019,44(1):92-96  
ZHU Shiye, XIONG Wuguo, LI Jiaying, et al. Effect of tea polyphenol on oxidative stability of peony seed oil and shelf life prediction [J]. *China Oils and Fats*, 2019, 44(1): 92-96