

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.04.021

胡伯凯, 税会霞, 耿阳阳, 等. 瓶装材料对核桃油品质及预测货架期的影响[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 169-177.

HU B K, SHUI H X, GENG Y Y, et al. Impact of packaging materials on the quality and predicted shelf life of walnut oil[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 169-177.

# 瓶装材料对核桃油品质及 预测货架期的影响

胡伯凯<sup>1</sup>, 税会霞<sup>2</sup>, 耿阳阳<sup>1</sup>✉, 李学琴<sup>2</sup>, 曾亚军<sup>1</sup>, 杨光<sup>3</sup>

- (1. 贵州省林业科学研究院 贵州省核桃研究所,  
贵州省核桃工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550005;  
2. 贵阳信息科技学院, 贵州 贵阳 550025;  
3. 贵州阳光食品有限公司, 贵州 毕节 551600)

**摘要:** 为探究不同瓶装材料对核桃油品质变化的影响, 分别用敞口玻璃烧杯、马口铁罐、玻璃油瓶盛装核桃油, 采用 Schaal 烘箱法加速油脂氧化, 以过氧化值、酸值、脂肪酸组成、驰豫特性为评价指标, 研究不同瓶装材料对核桃油氧化稳定性及预测货架期的影响。结果表明, 以过氧化值 $\leq 0.25$  g/100 g 为限量值时 (植物油国家标准规定), 添加特丁基对苯二酚 (TBHQ) 的烧杯、马口铁罐、玻璃油瓶盛装核桃油和空白对照的预测货架期分别为 160、112、336 和 64 d, 在预测货架期内, 核桃油酸价均在二级核桃油要求范围内。3 种包装材料对添加 TBHQ 的核桃油氧化稳定性强弱顺序为: 玻璃油瓶>烧杯>马口铁罐; 核桃油长期贮藏建议以玻璃油瓶盛装为佳。

**关键词:** 核桃油; 瓶装材料; 预测货架期; 氧化稳定性

中图分类号: TS225.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)04-0169-09

网络首发时间: 2024-07-11 10:34:39

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.ts.20240709.0922.001>

## Impact of Packaging Materials on the Quality and Predicted Shelf Life of Walnut Oil

HU Bo-kai<sup>1</sup>, SHUI Hui-xia<sup>2</sup>, GENG Yang-yang<sup>1</sup>✉, LI Xue-qin<sup>2</sup>,  
ZENG Ya-jun<sup>1</sup>, YANG Guang<sup>3</sup>

- (1. Guizhou Academy of Forestry, Guizhou Institute of Walnut, Guizhou Walnut Engineering Technology Research Center, Guiyang, Guizhou 550005, China; 2. Guiyang Institute of Information Science and Technology, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3. Guizhou Sunshine Food Company Limited, Bijie, Guizhou 551600, China)

收稿日期: 2024-01-10

基金项目: 贵州省林业科研项目 (黔林科合 J 字[2024]09 号); 贵州省科技计划定向重点项目 (黔科合支撑[2022]重点 014 号); 贵州省科技重大专项 (黔科合重大专项字[2019]3006); 贵州省林业科研项目 (黔林科合[2020]10 号)

**Supported by:** Guizhou Forestry Scientific Research Project (Guizhou Forestry Science J [2024]09); Guizhou Science and Technology Plan Orientation Key Project (Guizhou Science and Technology Cooperation Support [2022] Key 014); Guizhou Science and Technology Major Project (Guizhou Science and Technology Cooperation Major Project [2019]3006); Guizhou Forestry Scientific Research Project (Guizhou Forestry Science and Technology [2020]10)

作者简介: 胡伯凯, 男, 1990 年出生, 硕士, 助理研究员, 研究方向为木本油料资源利用与开发。E-mail: 493085995@qq.com

通信作者: 耿阳阳, 男, 1987 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为经济林资源利用与开发。E-mail: todaygeng@qq.com

**Abstract:** In order to investigate the effects of different packaging materials on the quality changes of walnut oil, walnut oil was packaged in open glass beakers, tinplate cans, and glass oil bottles, respectively. The Schaal oven method was used to accelerate the oxidation of oil. The peroxide value, acid value, fatty acid composition and relaxation characteristics were used as evaluation indicators to study the effects of different packaging materials on the oxidative stability and predicted shelf life of walnut oil. When the peroxide value was limited to  $\leq 0.25$  g/100 g according to national standards for vegetable oils, the predicted shelf life of walnut oil packed in beakers, tinplate cans, glass oil bottles with added TBHQ, and the blank control were 160, 112, 336 and 64 days, respectively. Throughout the predicted shelf life, the acid values of the walnut oil remained within the range required for grade 2 walnut oil. The order of strength of the oxidation stability of walnut oil with TBHQ added by three packaging materials was glass oil bottle>beaker>tinplate can, and it is recommended to store walnut oil in glass oil bottles for long-term storage.

**Key words:** walnut oil; packaging materials; predicted shelf life; oxidative stability

核桃在我国所有木本油料作物中的产量位居首位<sup>[1]</sup>, 核桃油作为核桃的深加工产品, 富含多不饱和脂肪酸和甾醇、维生素 E、角鲨烯等多种脂肪伴随物, 具有健脑、降血脂等功效, 是一种理想的保健油脂<sup>[2]</sup>。然而, 核桃油由于多不饱和脂肪酸含量高, 在加工、储存和使用过程中易受到多种因素(如光照、氧气、温度等)影响而发生氧化酸败<sup>[3-5]</sup>, 导致其风味发生改变、营养物质含量降低, 缩短货架期。因此, 选择合适的瓶装材料是减缓核桃油氧化速率、延长保质期的重要因素<sup>[6]</sup>。

尽管在油脂包装材料方面已有一些研究成果, 如郭健<sup>[7]</sup>等的研究发现亚麻籽油聚合物包装的亲水性对其氧化变化有较大影响; 丁明<sup>[8]</sup>等研究表明对贮藏茶油酸价和过氧化值影响因素最大的是容器材质; 李敏利<sup>[9]</sup>等的研究结论是葵花籽油的瓶内残氧量越低越有利于质量稳定。但关于瓶装材料对核桃油氧化稳定性和预测货架期的影响却未见报道。低场核磁共振技术广泛应用于食品质量控制, 具有分析快、易操作、低成本等优点, 郭娟<sup>[10]</sup>证实低场核磁共振技术可用于玉米脂肪酸值预测; 徐广飞<sup>[11]</sup>等研究表明低场核磁共振技术可用于食用油氧化的快速评价, 因而可用于核桃油脂氧化的评价。

本研究以核桃油为原料, 分别以不同瓶装材料盛装, 利用 Schaal 烘箱法进行加速氧化实验, 对核桃油的氧化稳定性和预测货架期进行探讨, 以为核桃油瓶装材料的选择提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

自制核桃油: 核桃仁原料购自正规网络销售平台, 经液压榨油机压榨 3 h 获取, 过滤后置于 4 °C 冰箱内保存。

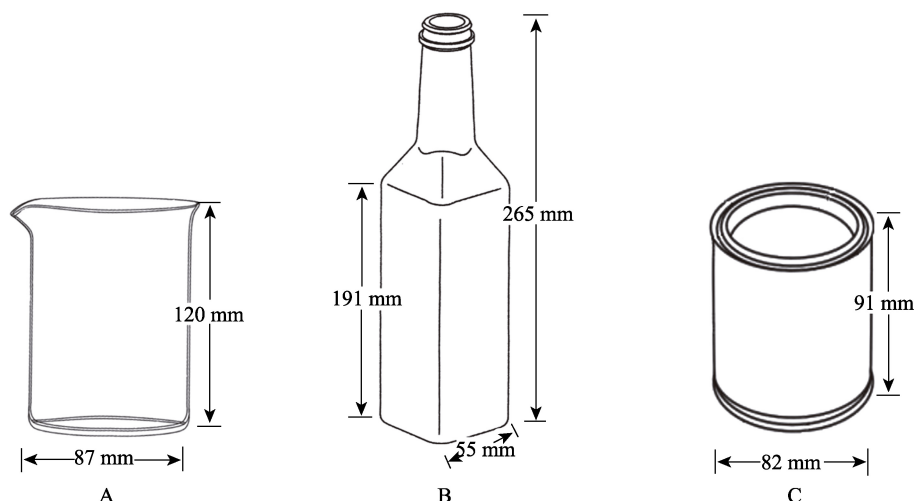
异辛烷为色谱纯: 重庆川东化工集团有限公司; NaOH 标准溶液(0.01 mol/L)、Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 标准溶液(0.01 mol/L): 上海易恩化学技术有限公司; 碘化钾、酚酞指示剂、淀粉指示剂、石油醚(沸程 30~60 °C)、三氯甲烷、冰乙酸、乙醚、甲醇、硫酸氢钠等均为分析纯: 国药集团化学试剂有限公司; 37 种脂肪酸甲酯混合标准溶液: 上海安谱实验科技股份有限公司。

GC 9720 福立气相色谱仪(配备氢火焰离子化检测器): 浙江福立分析仪器股份有限公司; MS 104 TS 万分之一电子天平: 梅特勒-托利多仪器有限公司; CP-Sil 88 毛细管柱(100 mm×0.25 mm, 0.20 μm): 美国安捷伦有限公司; NMI20-040V-I 低场核磁共振(LF-NMR)分析仪: 苏州纽迈电子科技有限公司; WSL-2 色差仪: 上海悦丰仪器仪表有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 实验油样的制备

称取核桃油 12 份, 每份 500 g, 分别置于 6 个 500 mL 烧杯、3 个 500 mL 马口铁罐和 3 个 500 mL 玻璃油瓶中(如图 1), 其中 3 个烧杯装油样中不



注：A 为烧杯；B 为玻璃油瓶；C 为马口铁罐。

Note: A is the beaker; B is a glass oil bottle; C is a tinplate can.

图 1 瓶装材料形状及规格

Fig.1 Shape and specifications of packaging materials

添加抗氧化剂，作为空白对照组，其余油样中加入油质量 0.02% 的特丁基对苯二酚 (TBHQ) 抗氧化剂，充分搅拌溶解。

### 1.2.2 油脂加速氧化实验

采用 Schaal<sup>[12]</sup> 烘箱法，按照 Schaal 烘箱法的 1 d 相当于 25 °C 下贮藏 16 d。将油样敞口置于 65 °C 数显恒温干燥箱中，持续 24 d，每天每个处理共取样 45 g 用于检测酸价、过氧化值、折光指数、色差、脂肪酸组成及含量、弛豫特性等指标。

### 1.2.3 理化指标的测定

酸价的测定参照 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》；

过氧化值的测定参照 GB 5009.227—2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》；

折光指数的测定参照 GB/T 5527—2010《动植物油脂 折光指数的测定》。

### 1.2.4 色差的测定

在室温下使用色差仪对核桃油进行测定，测定前使用标准白板进行校正，每组测定重复 3 次，得到表示色度的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值。其中， $L^*$  表示样品的明亮度； $a^*$  表示样品的红绿度； $b^*$  表示样品的黄蓝度。

### 1.2.5 脂肪酸组成及含量的测定

参照 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》中第三法，对比待测样与 37 种混合脂肪酸标准溶液的出峰时间确定其脂肪

酸种类，以峰面积归一化法进行定量。

### 1.2.6 LF-NMR 弛豫特性的测定

取待测油样于水浴中恒温至 32.00 °C，吸取 2.5 mL 注入 LF-NMR 玻璃管 (直径 25 mm) 中待测。将样品放入检测器后等待 60 s，再使用 CPMG 脉冲序列测量<sup>[13]</sup>。

设置 LF-NMR 检测参数为：磁场强度 0.50 T；质子共振频率 21 MHz；谱宽 250 kHz；90° 脉冲宽度 7.52  $\mu$ s；180° 脉冲宽度 15.52  $\mu$ s；回波个数 8 000；回波时间 250  $\mu$ s；累加采样 8 次，重复采样等待时间 1 500 ms。

通过系统自带反演软件将自由诱导指数衰减曲线转换成横向弛豫特性数据， $T_{2w}$  是将样品看作整体组分分析时的单组分弛豫时间；将样品看作多组分分析时，可得到样品的多组分弛豫图谱峰比例面积 (按出峰时间从小到大命名为  $S_{21}$ 、 $S_{22}$ …… $S_{2i}$ ) 等弛豫特性数据。

## 1.3 数据处理

每个实验重复 3 次，数据以平均值 (标准偏差表示)；用 Origin 2019 对实验数据进行绘图；数据的统计分析采用 SPSS 26.0 软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 核桃油理化指标及色差分析

核桃油酸价的变化如图 2 所示，随着加速氧

化时间的延长, 瓶装核桃油的酸价呈缓慢上升趋势<sup>[14]</sup>, 玻璃油瓶装核桃油和马口铁罐装核桃油的酸值略高于烧杯装核桃油和对照的酸价, 玻璃油瓶装核桃油的酸值在第 12 d 时出现了陡升陡降, 与吴雪辉<sup>[15]</sup>、张磊<sup>[16]</sup>等研究的现象相似, 敞口贮藏条件下样品的稳定性较差。在整个加速氧化过程中, 各瓶装核桃油酸价均在二级核桃油<sup>[17]</sup>要求范围内。

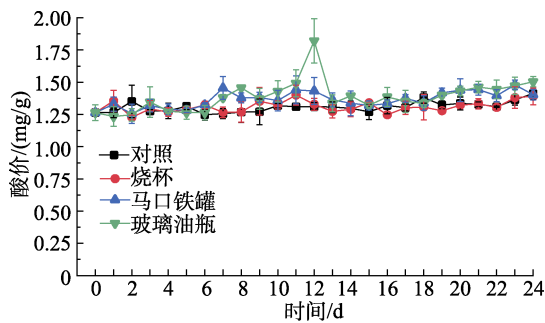


图 2 瓶装材料对核桃油酸价的影响  
Fig.2 Effect of packaging materials on the acidity value of walnut oil

核桃油过氧化值的变化如图 3 所示, 随着加速氧化时间的延长, 对照的过氧化值快速上升, 在第 4 d 时达到 0.25 g/100 g (国标限定值<sup>[18]</sup>); 马口铁罐、烧杯和玻璃油瓶装核桃油的过氧化值呈缓慢上升的趋势, 分别在第 7、10 和 21 d 时达到, 按照折算系数计算, 空白对照、添加 TBHQ 的马口铁罐、烧杯、玻璃油瓶装核桃油的预测货架期分别为 64、112、160 和 336 d。马口铁罐中存在一定的微量金属元素, 可能会与抗氧化剂反应<sup>[19]</sup>, 也可能促进油脂和氧气接触<sup>[22]</sup>, 导致油脂加速氧化, 烧杯装核桃油的预测货架期是对照的 2.5 倍, 说明油中添加 TBHQ 能有效延长货架期。值得注意的是, 玻璃油瓶装核桃油的过氧化值在第 12 d 时出现了短暂的急剧上升, 和酸价的骤变

保持了一致性, 这一类现象发生的原因主要是油脂氧化过程中的氢过氧化物在不断的产生和分解<sup>[20]</sup>。

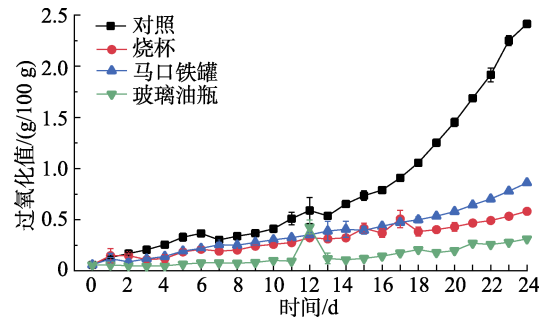


图 3 瓶装材料对核桃油过氧化值的影响  
Fig.3 Effect of packaging materials on the peroxide value of walnut oil

折光指数及色差的变化如图 4~5 所示, 核桃油的折光指数在加速氧化过程中变化不明显, 对照和烧杯装核桃油在第 13 d 时变化到 1.673, 而玻璃油瓶装核桃油和马口铁罐装核桃油在第 19 d 时分别为 1.674 和 1.672。

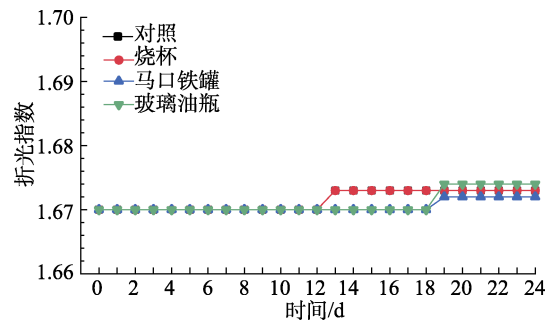


图 4 瓶装材料对核桃油折光指数的影响  
Fig.4 Effect of packaging materials on the refractive index of walnut oil

色泽是反应油脂质量变化最直观的指标之一, 核桃油的色差在加速氧化过程的变化不明显, 直至实验结束, 核桃油的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值在小范围内波动, 自加速氧化过程第 1 d 至结束, 核桃油

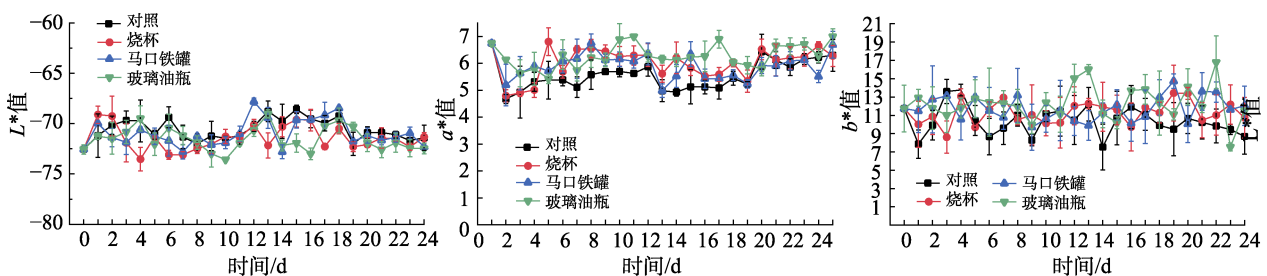


图 5 瓶装材料对核桃油色差的影响 ( $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ )  
Fig.5 Effect of packaging materials on the color difference of walnut oil

的  $a^*$  值略有增加, 可能是因为油脂发生了回色现象<sup>[21]</sup>, 其与磷脂残留、金属离子、生育酚及色素氧化等有关<sup>[22]</sup>。

## 2.2 核桃油脂脂肪酸组成及含量分析

核桃油主要含有 5 种脂肪酸, 分别为棕榈酸、硬脂酸、油酸、亚油酸和  $\alpha$ -亚麻酸。这 5 种脂肪酸在加速氧化过程中的变化如图 6~10 所示。

### 2.2.1 饱和脂肪酸变化分析

棕榈酸和硬脂酸是核桃油中主要的两种饱和脂肪酸<sup>[23]</sup>, 它们在贮存过程中的变化较小<sup>[24]</sup>。

核桃油棕榈酸的变化如图 6 所示, 在加速氧化过程中, 对照核桃油的棕榈酸含量缓慢上升, 其它包装核桃油的棕榈酸含量缓慢下降, 棕榈酸含量的大小排序是: 对照>烧杯>马口铁罐, 玻璃油瓶的棕榈酸含量波动较频繁, 这可能与取样均匀度有关。

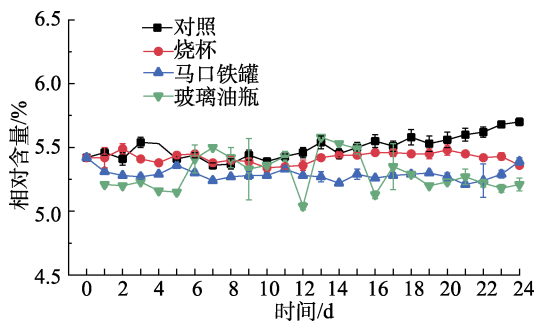


图 6 瓶装材料对核桃油棕榈酸的影响

Fig.6 The impact of packaging materials on palmitic acid in walnut oil

加速氧化过程中核桃油硬脂酸的变化如图 7 所示, 对照和烧杯装核桃油的硬脂酸含量基本不变, 马口铁罐和玻璃油瓶装核桃油的硬脂酸含量则略低, 以玻璃油瓶装核桃油在加速氧化过程前期的含量降幅较为明显。

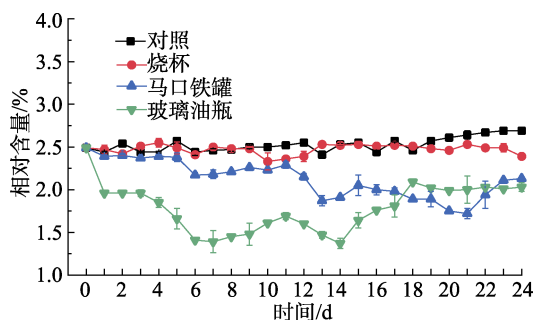


图 7 瓶装材料对核桃油硬脂酸的影响

Fig.7 The impact of packaging materials on stearic acid in walnut oil

### 2.2.2 不饱和脂肪酸变化分析

核桃油中含量最高的 2 种脂肪酸是油酸和亚油酸<sup>[25]</sup>, 占脂肪酸含量的 62.5% 以上<sup>[17,26]</sup>, 长链脂肪酸受氧化影响的程度高于短链脂肪酸, 是核桃油易氧化变质的原因<sup>[27]</sup>。核桃油油酸的变化如图 8 所示, 加速氧化过程各处理的油酸含量缓慢增加, 与孙田娇<sup>[28]</sup>的结果一致。在加速氧化过程的前中期, 对照和烧杯装核桃油的油酸含量略低于马口铁罐和玻璃油瓶装核桃油, 它们于加速氧化过程的后期逐渐超过后者。加速氧化结束后, 不同瓶装核桃油的油酸含量均有不同程度的增加, 按照增幅排序分别是对照、烧杯、马口铁罐、玻璃油瓶。

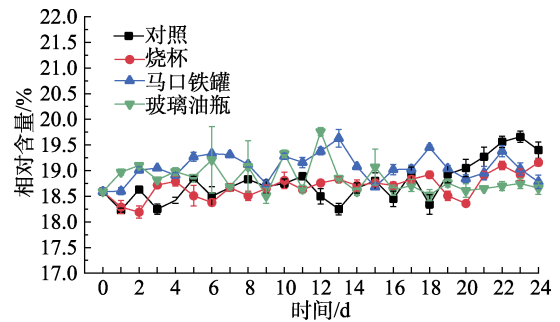


图 8 瓶装材料对核桃油油酸的影响

Fig.8 The impact of packaging materials on oleic acid in walnut oil

加速氧化过程中核桃油亚油酸的变化如图 9 所示, 整个加速氧化过程中, 玻璃油瓶装核桃油的亚油酸含量先曲折上升后基本保持不变, 是所有处理中最高的, 而对照核桃油的亚油酸含量缓慢下降, 至加速氧化实验结束降低到 60.99%, 是四个处理中下降幅度最大的。自加速氧化第 18 d 起至实验结束, 各处理的亚油酸含量差异明显,

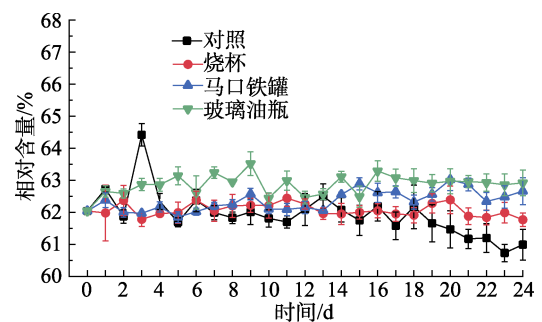


图 9 瓶装材料对核桃油亚油酸的影响

Fig.9 The impact of packaging materials on linoleic acid in walnut oil

玻璃油瓶和马口铁罐装核桃油的亚油酸含量略高于初始值，对照和烧杯装核桃油的亚油酸含量较初始值偏低，是因为亚油酸的烯丙基较为活跃，在贮存过程中容易被氧化<sup>[29-30]</sup>，同时也侧面说明玻璃油瓶和马口铁罐的氧气接触面小与减小亚油酸的损失有关。

核桃油  $\alpha$ -亚麻酸的变化如图 10 所示，在加速氧化过程中各处理的  $\alpha$ -亚麻酸含量在逐渐下降，这是由于亚麻酸的高不饱和度使其在氧化初期的链反应过程易被引发<sup>[31]</sup>，氧化过程中  $\alpha$ -亚麻酸不断氧化降解，这与 Suri、张东等<sup>[32-33]</sup>的结果一致。 $\alpha$ -亚麻酸含量以对照的下降幅度最大，其次是马口铁罐，然后是玻璃油瓶，最后是烧杯。

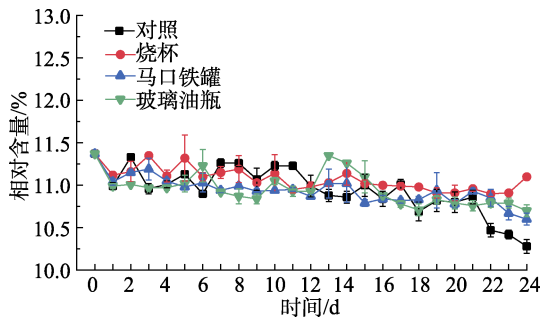


图 10 瓶装材料对核桃油  $\alpha$ -亚麻酸的影响

Fig.10 The impact of packaging materials on  $\alpha$ -linolenic acid in walnut oil

### 2.3 核桃油低场核磁弛豫特性分析

核桃油的低场核磁弛豫特性如图 11~13 所示。核桃油的单组分弛豫时间变化如图 11 所示，随着加速氧化时间的延长， $T_{2w}$  信号幅度整体呈下降趋势，是由于加速氧化过程中油脂聚合物逐渐增多，使得分子间作用力增强，氢质子自由度

降低<sup>[34]</sup>，进而降低了  $T_{2w}$ ；在加速氧化过程中，所有处理的  $T_{2w}$  在加速氧化的第 8 d 发生骤降，与卢海燕的结果接近<sup>[35]</sup>，这可能与核桃油中的水分蒸发有关；之后的 11 d 内  $T_{2w}$  逐渐增加，自加速氧化第 19 d 后，马口铁罐和烧杯装核桃油的  $T_{2w}$  维持在 118 ms 左右，而玻璃油瓶装核桃油逐渐增加至 126.62 ms，对照则逐渐降低至 106.00 ms。值得注意的是，在加速氧化的第 8~19 d 里，各处理的  $T_{2w}$  表现出良好的线性关系，可为核桃油油脂氧化程度的判定和预测提供思路。

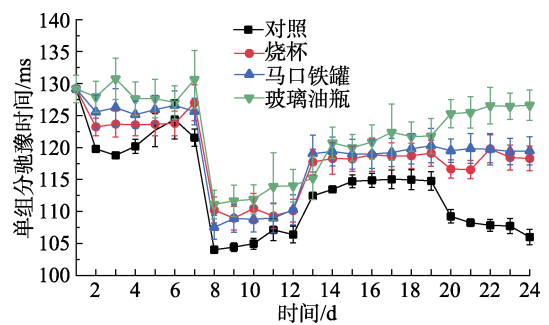


图 11 瓶装材料对核桃油单组分弛豫时间 ( $T_{2w}$ ) 的影响

Fig.11 The impact of packaging materials on  $T_{2w}$  in walnut oil

核桃油弛豫峰面积变化如图 12 所示，在整个加速氧化过程中，不同处理的  $S_{21}$  峰面积在 69.20%~76.46% 波动，呈现缓慢上升的趋势； $S_{22}$  峰面积在 22.59%~28.94% 波动，呈现缓慢下降的趋势。 $S_{22}$  峰主要代表受不饱和键影响的氢质子，而  $S_{21}$  峰则代表受不饱和键影响较小的氢质子<sup>[36]</sup>，随着加速氧化进程的推进，油脂不饱和度下降，饱和脂肪酸含量上升，因此  $S_{21}$  峰呈上升趋势， $S_{22}$  峰则呈下降趋势。

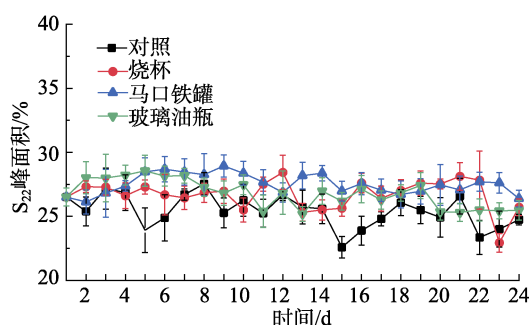
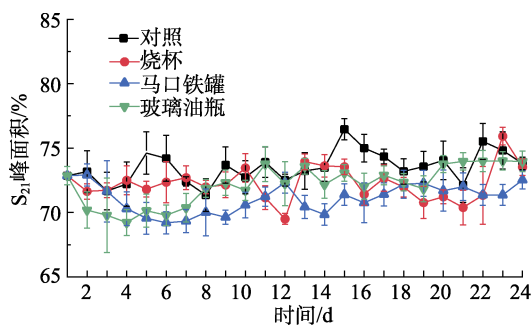
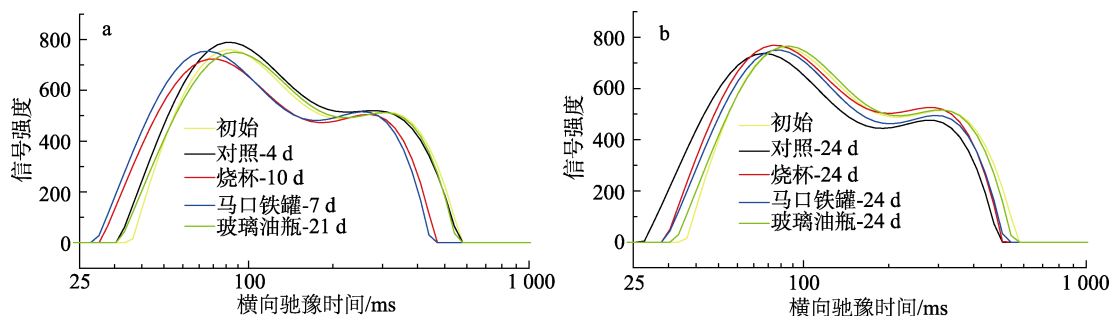


图 12 瓶装材料对核桃油弛豫峰面积 ( $S_{21}$ 、 $S_{22}$ ) 的影响

Fig.12 The impact of packaging materials on  $S_{21}$  and  $S_{22}$  in walnut oil

横向弛豫时间图谱上小于 25 ms 的弛豫峰信号与水质子的变化更为相关<sup>[37]</sup>, 为简化表述选择人为剔除, 核桃油横向弛豫时间图谱变化如图 13 所示, 四个处理的横向弛豫图谱均较初始时发生了左移, 这主要是核桃油的自动氧化生成了大量的氢过氧化物, 使得分子间作用力增强, 质子密

度增大, 减弱其移动性<sup>[38-39]</sup>。图 13 (a) 中, 按  $S_{21}$  峰起始时间排序为马口铁罐<烧杯<对照<玻璃油瓶, 图 13 (b) 中, 按  $S_{21}$  峰起始时间排序为对照<烧杯<马口铁罐<玻璃油瓶, 造成两图中左移量差异较大的原因可能是后续加速氧化时间不同导致的。



注: a 为油脂过氧化值达 0.25 g/100 g 时, b 为实验终点。

Note: a represented the lipid peroxide value reaching 0.25 g/100 g, b was the endpoint of the experiment.

图 13 瓶装材料对核桃油横向弛豫时间图谱的影响

Fig.13 The impact of packaging materials on the distribution of  $T_2$  relaxation times in walnut oil

### 3 结论

本研究通过以不同包装材料对核桃油包装后进行 Schaal 烘箱法加速氧化实验, 并对核桃油样品的理化指标、脂肪酸组成、低场核磁共振弛豫特性的变化趋势进行分析, 明确了不同包装材料对核桃油氧化稳定性和预测货架期的影响。以过氧化值  $\leq 0.25$  g/100 g 为限, 添加 TBHQ 的烧杯、马口铁罐、玻璃油瓶盛装核桃油和空白对照的预测货架期分别为 160、112、336 和 64 d, 在预测货架期内, 核桃油酸价均在二级核桃油要求范围内。三种包装材料对添加 TBHQ 的核桃油氧化稳定性强弱顺序为: 玻璃油瓶>烧杯>马口铁罐; 核桃油长期贮藏建议以玻璃油瓶盛装为佳。

### 参考文献:

[1] 曹娜, 夏飞. 我国核桃油产业创新发展机遇、挑战与实现路径[J]. 中国油脂, 2023, 48(10): 6-10.  
CAO N, XIA F. Opportunities, challenge and implementation paths for innovation-driven development of walnut oil industry in China[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(10), 6-10.

[2] 胥玲花, 李新林. 核桃油贮藏过程中功能性成分的变化[J]. 经济林研究, 2023, 41(1): 71-85.  
XU L H, LI X L. Changes of functional components of walnut oil during storage[J]. Non-wood Forest Research, 2023, 41(1),

71-85.

[3] MARTÍNEZ L M, PENCI C M, IXTAINA V, et al. Effect of natural and synthetic antioxidants on the oxidative stability of walnut oil under different storage conditions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 51(1): 44-50.

[4] WANG J Y, TANG J Y, RUAN S L, et al. A comprehensive review of cereal germ and its lipids: Chemical composition, multi-objective process and functional application[J]. Food Chemistry, 2021, 362, 130066.

[5] GILBERT A, ADAM G L, MARTIN G, et al. Nuclear magnetic resonance spectroscopic analysis of the evolution of peroxidation products arising from culinary oils exposed to thermal oxidation: an investigation employing sup1/supH and sup1/supH-sup1/supH COSY and TOCSY Techniques[J]. Foods, 2022, 11(13): 1864.

[6] CAMILETTI O F, RIVEROS C G, AGUIRRE A, et al. Sunflower oil preservation by using chickpea flour film as bio-packaging material[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(1): 61-67.

[7] 郭健, 呼延宗尧, 刘鸿运, 等. 四种聚合物包装材料对亚麻籽油氧化产物的影响研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(8): 72-76.  
GUO J, HUYAN Z Y, LIU H Y, et al. Effects of four polymer packaging materials on linseed oil oxidation products[J]. China Oils and Fats, 2019, 44(8): 72-76.

[8] 丁明, 费学谦. 茶油储藏条件对酸价和过氧化值的影响[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(6): 1112-1116.  
DING M, FEI X Q. Effect of storage conditions on acid value and peroxide value of Camellia oleifera seed oil[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2011, 33(6): 1112-1116.

[9] 李敏利, 李宗军, 熊巍林, 等. 包装葵花籽油氧化稳定性研究

- [J]. 中国油脂, 2018, 43(6): 42-45.  
 LI M L, LI Z J, XIONG W L, et al. Oxidative stability of packaged sunflower seed oil[J]. *China Oils and Fats*, 2018, 43(6): 42-45.
- [10] 郭娟. 基于近红外光谱/低场核磁共振技术的玉米脂肪酸值检测研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.  
 GUO J. Determination of corn fatty acid value based on near infrared spectroscopy/low field nuclear magnetic resonance technology[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2023.
- [11] 徐广飞, 汪希平, 吴越, 等. 基于低场核磁共振方法快速评价食用油脂氧化的研究[C]. Abstract Book of the 14th Asian Congress of Nutrition-The thematic areas. Abstract Book of the 14th Asian Congress of Nutrition-The thematic areas. 中国营养学会, 2023: 43.  
 XU G F, WANG X P, WU Y, et al. Research on rapid evaluation of edible oil oxidation based on low field nuclear magnetic resonance method[C]. Abstract Book of the 14th Asian Congress of Nutrition-The thematic areas. Abstract Book of the 14th Asian Congress of Nutrition-The thematic areas. Chinese Nutrition Society, 2023: 43.
- [12] 周婵玉, 涂静, 陈伟, 等. 牡丹籽油氧化稳定性研究及货架期预测[J]. 农产品加工, 2016, (14): 23-26+29.  
 ZHOU C Y, TU J, CHEN W, et al. Study on oxidation stability of peony oil and forecast shelf life[J]. *Farm Products Processing*, 2016, (14): 23-26+29.
- [13] 胡伯凯, 王纪辉, 刘亚娜, 等. GC 和 LF-NMR 结合化学计量学方法检测掺假油茶籽油[J]. 中国油脂, 2023, 48(8): 61-68.  
 HU B K, WANG J H, LIU Y N, et al. Detection of adulterated oil-tea camellia seed oil by GC and LF-NMR combined with chemometrics methods[J]. *China Oils and Fats*, 2023, 48(8): 61-68.
- [14] AMPOFO J, GRILO F S, LANGSTAFF S, et al. Oxidative stability of walnut kernel and oil: chemical compositions and sensory aroma compounds[J]. *Foods*, 2022, 11(19): 3151.
- [15] 吴雪辉, 寇巧花. 光照与容器材料对茶油贮藏品质影响研究[J]. 粮食与油脂, 2014, 27(3): 45-49.  
 WU X H, KOU Q H. Effect of light and packaging material on storage quality of camellia oil[J]. *Cereals & Oils*, 2014, 27(3): 45-49.
- [16] 张磊, 刘璐, 马珊, 等. 不同贮藏条件对番茄红素核桃油品质的影响[J]. 现代食品, 2020, (5): 214-216.  
 ZHANG L, LIU L, MA S, et al. Effects of Different Storage Conditions on the Quality of Lycopene Walnut Oil[J]. *Modern Food*, 2020, (5): 214-216.
- [17] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会. 核桃油: GB/T 22327—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.  
 State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Walnut oil: GB/T 22327—2019[S]. Beijing: Standard Press of China, 2019.
- [18] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会. 食品安全国家标准 植物油: GB 2716—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.  
 State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. National Food Safety Standard Vegetable Oil: GB/T 2716—2018[S]. Beijing: Standard Press of China, 2018.
- [19] 王振, 胡晓军, 殷龙龙, 等. 包装材料、储存环境及储油罐充氮对亚麻籽油保质期的影响[J]. 中国油脂, 2021, 46(9): 99-102.  
 WANG Z, HU X J, YING L L, et al. Effects of packaging materials, storage environment and nitrogen filling of oil tank on shelf life of linseed oil[J]. *China Oils and Fats*, 2021, 46(9): 99-102.
- [20] 高雅馨, 牟德华. 不同储存条件下核桃油的氧化稳定性研究[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(12): 49-55.  
 GAO Y X, MOU D H. Oxidation stability of walnut oil under different storage conditions[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2018, 33(12): 49-55.
- [21] 尤梦圆, 陈焱, 刘芯羽, 等. 玉米油和大豆油回色关键因素及控制措施研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(11): 143-149.  
 YOU M Y, CHEN Y, LIU X Y, et al. Research on key factors and control measures of color reversion in plant oils[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(11): 143-149.
- [22] 梁雨, 黄振伟, 黄丹. 一级大豆油回色影响因素的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2023, (22): 189-192.  
 LIANG Y, HUANG Z W, HUANG D. Research progress on the factors influencing the color reversion of first grade bean oil[J]. *China Food Safety Magazine*, 2023, (22): 189-192.
- [23] LI H K, HAN J J, ZHAO Z K, et al. Roasting treatments affect oil extraction rate, fatty acids, oxidative stability, antioxidant activity, and flavor of walnut oil[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 9, 1077081.
- [24] 卢银洁, 郝利平, 郭雨萱. 贮藏过程中胡麻油主要脂肪酸含量及组成变化[J]. 食品与机械, 2016, 32(6): 115-117.  
 LU Y J, HAO L P, GUO Y X. Contents and changes of main fatty acids in the linseed oil[J]. *Food & Machinery*, 2016, 32(6): 115-117.
- [25] AYA Y, DAISUKE T, TAKASHI N, et al. Comparative Evaluation of Fatty Acid Composition, Tocopherols, and Volatile Compounds of Walnut Oil between *Juglans mandshurica* Maxim. var. *sachalinensis* (Komatsu) Kitam and *J. regia* L.[J]. *Journal of oleo science*, 2022, 71 (12): 1743-1748.
- [26] 徐飞, 石爱民, 刘红芝, 等. 核桃油中脂肪酸和内源抗氧化物质含量及其氧化稳定性相关性分析[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(3): 53-58.  
 XU F, SHI A M, LIU H Z, et al. The content of fatty acids and endogenous antioxidant components of walnut oil and their correlation with oxidative stability index[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(3): 53-58.



- [27] NELSON R G, CARLOS A G. Lipid, protein, and ash contents, and fatty acid and sterol composition of peanut (*Arachis hypogaea* L.) Seeds from Ecuador[J]. *Peanut Science*, 1995, 22: 84-89.
- [28] 孙田娇. 不同贮藏方法对‘凤丹’籽粒及其籽油油脂品质的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.  
SUN T J. Effects of different storage methods on the quality of ‘Fengdan’ seed and seed oil[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020.
- [29] 张钰莹. 平欧榛子油贮藏稳定性及氧化规律的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.  
ZHANG Y Y. Study on storage stability and oxidation regularity of Flat-European hybrid hazelnut oil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [30] FRANKEL EN. *Lipids Oxidation*[M]. London Woodhead Publishing Second Edition, 2012: 25-50.
- [31] 杜乐. 油脂中 C18 不饱和脂肪酸氧化产物的分析[D]. 天津: 天津科技大学, 2019.  
DU L. Analysis of oxidation products of C18 unsaturated fatty acids in oils[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2019.
- [32] SURI K, SINGH B, KAUR A, et al. Influence of microwave roasting on chemical composition, oxidative stability and fatty acid composition of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil[J]. *Food Chemistry*, 2020, 326: 126974.
- [33] 张东, 段晓亮, 王少甲, 等. 烘烤对亚麻籽油理化品质、化学组成和抗氧化活性的影响[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(12): 105-113.  
ZHANG D, DUAN X L, WANG S J, et al. Effect of dry-air roasting on the physicochemical properties, chemical composition, and antioxidant activities of flaxseed oils[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2023, 23(12): 105-113.
- [34] 彭丹, 陈名扬, 史翠熠, 等. 基于低场核磁共振弛豫特性结合多元线性回归同步评价菜籽煎炸油品质[J]. *分析化学*, 2023, 51(6): 1042-1050.  
PENG D, CHEN M Y, SHI C Y, et al. Synchronous evaluation of rapeseed frying oil quality indexes based on low-field nuclear magnetic resonance relaxation properties combined with multiple linear regression[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(6): 1042-1050.
- [35] 卢海燕. 基于<sup>1</sup>H-NMR 和 FT-NIR 技术的葵花籽油氧化过程的品质监测研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2014.  
LU H Y. Assessment of sunflower oil quality based on <sup>1</sup>H-NMR and FT-NIR during oxidation process[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2014.
- [36] 杨丹. 影响煎炸薯条吸油特性的关键因素及其机制[D]. 无锡: 江南大学, 2021.  
YANG D. The key factors affecting the oil absorption properties of fried potato strips and its underlying mechanism[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [37] WANG C, SU G, WANG X, et al. Rapid assessment of deep frying oil quality as well as water and fat contents in French fries by low-field nuclear magnetic resonance[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(8): 2361-2368.
- [38] 陈康明. 油炸公干鱼品质变化规律及其煎炸油的复配研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.  
CHEN K M. Research on quality variation of fried *Stolephorus commersonii* and its mixture of frying oil[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [39] 夏义苗, 王欣, 毛锐, 等. 不同温度下葵花籽油低场核磁弛豫特性的变化及与理化指标的关系[J]. *中国油脂*, 2016, 41(3): 30-35.  
XIA Y M, WANG X, MAO R, et al. Change of LF-NMR relaxation properties of sunflower seed oil at different temperatures and its correlation with physicochemical indexes[J]. *China Oils and Fats*, 2016, 41(3): 30-35. ㊞

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。