颜娜, 何婉莹, 黄展锐, 等. 维生素 E 对氧化引发剂诱导的休闲豆干品质劣化的抑制作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 377−385. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070125

YAN Na, HE Wanying, HUANG Zhanrui, et al. Inhibitory Effect of Vitamin E on the Quality Deterioration of Leisure Dried Tofu Induced by Oxidative Initiators[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 377−385. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070125

· 贮运保鲜 ·

维生素 E 对氧化引发剂诱导的休闲豆干品质劣化的抑制作用

颜　娜, 何婉莹*, 黄展锐*, 周衡平, 陈　浩, 周小虎, 赵良忠

（邵阳学院食品与化学工程学院, 豆制品加工与安全控制湖南省重点实验室, 湘味特色食品绿色加工与装备湖南省工程研究中心, 湖南邵阳 422000）

摘　要: 该研究采用维生素 E 和氧化引发剂（叶绿素和偶氮二异庚腈）处理的卤汁制备休闲豆干，从营养成分、特征氧化指标、质构特性、分子间作用力和微观结构等角度分析维生素 E 对休闲豆干品质劣化的抑制作用。对比引发剂组和引发剂+维生素 E 组豆干品质特性变化趋势发现，贮藏 45 d 时维生素 E 可有效抑制豆干蛋白质（18.69 g/100 g）和脂肪（12.97 g/100 g）的氧化损失，并抑制 POV（0.16 g/100 g）和 TBARS 值（1.38 mg/kg）的早期积累；分子间作用力分析表明维生素 E 在 0~45 d 时能稳定豆干疏水相互作用在 0.20~0.22 范围，且蛋白凝胶结构网络较致密；在 60~90 d 时维生素 E 的抑制效能快速衰退，蛋白质含量下降至 15.46 g/100 g，蛋白凝胶孔隙显著增多，且 POV、TBARS 值、茴香胺值和 b^* 值显著增加。结果表明维生素 E 可用于油脂氧化引起豆干品质变化的贮藏初期快速干预，在 60~90 d 抑制作用较弱或不明显。该研究结果可为维生素 E 应用拓展及休闲豆干质量安全控制提供理论支撑。

关键词: 休闲豆干, 油脂氧化, 维生素 E, 品质变化, 抗氧化

中图分类号: TS214.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0377−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070125

本文网刊:

Inhibitory Effect of Vitamin E on the Quality Deterioration of Leisure Dried Tofu Induced by Oxidative Initiators

YAN Na, HE Wanying*, HUANG Zhanrui*, ZHOU Hengping, CHEN Hao, ZHOU Xiaohu, ZHAO Liangzhong

（College of Food and Chemical Engineering, Shaoyang University, Hunan Provincial Key Laboratory of Soybean Products Processing and Safety Control, Hunan Engineering Research Center of Green Processing and Equipment of Hunan-style Food, Shaoyang 422000, China）

Abstract: In this study, leisure dried tofu (LD-tofu) was prepared with the marinade treated with vitamin E (V_E) and oxidation initiators (chlorophyl and 2,4-dimethylvaleronitrile), and the inhibitory effects of V_E on the quality deterioration of LD-tofu were analyzed from the perspectives of nutritional composition, characteristic oxidation indicators, texture characteristics, intermolecular forces and microstructure. Compared the change trend of LD-tofu quality characteristics between initiators group and initiators+V_E group, it was found that V_E could effectively inhibit the oxidative loss of protein (18.69 g/100 g) and fat (12.97 g/100 g) of LD-tofu under storage for 45 d, and inhibit the early accumulation of POV (0.16 g/100 g) and TBARS value (1.38 mg/kg). The intermolecular force analysis showed that V_E could stabilize the hydrophobic interaction of LD-tofu in the range of 0.20~0.22 in 0~45 d, and the protein gel structure network was relatively dense. The

收稿日期: 2025−07−10

基金项目: 湖南省自然科学基金区域联合基金项目（2024JJ7485）; 湖南省教育厅科学研究项目（23A0542）; 邵阳市科技计划项目（2024GZ1001, 2024PT4043）; 邵阳学院研究生科研创新项目（CX2025SY022）。

作者简介: 颜娜（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 豆制品加工与安全控制, E-mail: 3219439032@qq.com。

*** 通信作者:** 何婉莹（1992−）, 女, 硕士, 实验师, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: hewy228@163.com。

黄展锐（1992−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 豆制品安全控制, E-mail: zhanrui_huang@163.com。

inhibitory effect of V_E declined rapidly, the protein content decreased to 15.46 g/100 g, the pores of protein gel increased significantly, and the POV, TBARS, anisidine and b^* values increased significantly in 60~90 d. The results showed that V_E could be used for rapid intervention in the early stage of storage of LD-tofu caused by oil oxidation, and the inhibitory effect was weak or not obvious in 60~90 d. The research results can provide theoretical support for the expansion of V_E application and the quality and safety control of LD-tofu.

Key words: leisure dried tofu; oil oxidation; vitamin E; quality change; antioxidant

休闲豆干，通常是以酸浆豆腐作为坯子，经烘干、卤制、调味、杀菌和包装而成的休闲豆制食品，因具有独特的风味和丰富的营养物质而颇受消费者喜爱，已成为休闲卤制食品的典型代表，休闲豆干产业已成为湖南省豆制品产业发展的中流砥柱[1]。豆干卤制作为休闲豆干生产加工最为关键的一环，卤汁的品质影响休闲豆干的质量，若卤汁贮存不当或经不同应激条件暴露，其卤制出的豆干在组织微观结构、营养成分及蛋白凝胶特性等方面均会受到不同程度的影响[2]。在湖湘地区的卤制工艺中，常选用富含多不饱和脂肪酸的菜籽油作为卤汁熬制的基础油脂[3]。然而，由于多不饱和脂肪酸结构中存在多个双键，化学性质活泼，致使卤汁在温度波动、氧气接触及光照等环境因素作用下，极易发生油脂氧化反应[4]。该氧化过程会产生大量自由基与过氧化物，不仅加速卤制品的氧化酸败进程，还可能引发一系列食品安全问题，对产品品质与消费者健康构成潜在威胁[5]。

研究表明，油脂氧化酸败产生的自由基不仅会破坏人体细胞膜、损伤蛋白质和基因、诱发心肌梗死和高血压，还会诱导产品中蛋白质氧化而导致其质构特性下降及色香味发生异变等质量问题[6−7]。基于以上研究现状，本课题组前期系统探究了叶绿素、偶氮二异庚腈等不同氧化引发剂对卤汁及卤豆干营养成分的影响规律。研究结果表明，相较于单一引发剂作用，叶绿素与偶氮二异庚腈协同作用时，卤豆干营养成分的变化更为显著[8]。然而，针对光酶引发剂诱导卤汁氧化导致休闲豆干品质改变的有效控制策略鲜有研究，基于天然抗氧化剂的应用防控技术亟待深入研究与开发。

目前，抑制油脂氧化主要包括低温贮藏、气调保鲜、添加抗氧化剂等措施[9]，其中维生素 E 是一种强有效的脂溶性植物源抗氧化剂，主链是生育酚，有一个长的烃链，可嵌入细胞膜或蛋白质的疏水区域[10]。维生素 E 的抗氧化作用主要是通过提供氢原子，终止脂质过氧化链式反应，可更有效地保护疏水区域，减少疏水相互作用的异常增强，防止疏水基团的暴露[11−12]。魏红艳等[13] 在双低菜籽油中添加 0.2 g/kg 维生素 E，发现贮藏期间双低菜籽油的酸值、硫代巴比妥酸值、茴香胺值及过氧化值显著降低。胥亚夫等[14] 分析了在虾油萃取阶段添加维生素 E 对磷虾油质量品质与氧化活性的影响，结果表明 0.2% 维生素 E 抗氧化效果明显强于茶多酚和迷迭香提取物。常旋等[15] 研究了维生素 E 对椰子油乳液氧化稳定的影响及在咖啡饮料中的应用，结果表明添加维生素 E 组椰子油在 55 ℃ 贮藏 8 周期间粒径 $D_{[4,3]}$ 和粒径分布无显著性变化，维生素 E 的加入更明显地减少了咖啡中油脂的氧化产物堆积，能有效抑制油脂氧化异味的产生，香气更加协调。目前，相关研究主要聚焦于单一抗氧化剂的作用效果或特定贮藏条件的影响，而对于光酶协同引发剂诱导的氧化机制解析及其有效防控策略的研究仍鲜有报道。

因此，本研究将维生素 E 与光敏氧化引发剂（叶绿素、偶氮二异庚腈）同步添加至卤汁体系，通过构建不同处理试验组进行豆干卤制，豆干经 105 ℃、30 min 杀菌后，系统分析各试验组休闲豆干在 90 d 贮藏期内营养成分含量、特征氧化指标、质构特性、色差、分子间作用力和微观结构变化规律，深入探究维生素 E 对豆干品质劣变的抑制作用机理。本研究创新性地将维生素 E 与光酶引发剂结合应用于卤汁及卤制品体系，系统研究其对豆干长期贮藏品质的抑制保护效应，为复杂氧化环境下豆干品质控制提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

大豆、卤料、菜籽油等原料　邵阳市双清区志成商行；油溶性叶绿素、偶氮二异庚腈　天津市科密欧化学试剂有限公司；维生素 E 标准品、1-丁醇、2-硫代巴比妥酸　上海源叶生物科技有限公司；无水硫酸钠、异辛烷、p-茴香胺　广东光华科技有限公司；冰乙酸、三氯甲烷、碘化钾、硫代硫酸钠、无水硫酸钠　迈森生物科技有限公司；其它化学试剂　国药集团化学试剂有限公司。

ZJJC-100-RC-001 智能集成制浆设备、FYLZ-1 真空脉冲卤制设备　北京康得利智能科技有限公司；UDK139 自动凯氏定氮仪　北京盈盛恒泰科技有限责任公司；LS-5 质构仪　美国阿美特克有限公司；CR-400 色差仪　日本柯尼卡美能达公司；T-8 紫外可见分光光度计　南京菲勒仪器有限公司；MC 1000 扫描电子显微镜　日本 HITACHI 有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 卤汁与休闲豆干的制备　参考伍涛等[16] 方法熬制和配制卤汁，根据前期实验设置引发剂（叶绿素和偶氮二异庚腈）浓度[8]，并将卤汁与引发剂混合。卤汁设 3 个处理组，包括空白组、引发剂组和引发

剂+维生素 E 组，具体处理如下：

空白对照组：卤汁中不添加任何引发剂或维生素 E，避光贮藏；

引发剂组：卤汁中添加 30 mg/kg 叶绿素（光敏剂）与 0.2 mmol 偶氮二异庚腈（自由基引发剂）；

引发剂+维生素 E 组：在引发剂组基础上额外添加 0.2%（w/w）维生素 E（浓度选择基于国标限量要求，并根据前期优化试验确定）。

所有组别卤汁均质处理后用于卤制豆干，确保处理条件一致性。按照 Huang 等[2] 方法制备豆干，将制作完成的豆腐白胚切块（7 cm×4 cm×1.5 cm，40.00±0.50 g），置于 85 ℃ 带式机烘干 3 h，冷却后即得金黄色豆干。选取贮藏 28 d 各试验组卤汁，按照 Huang 等[2] 方法将豆干置于真空脉冲卤制设备中卤制 80 min（0.03 MPa，80 ℃），真空包装后置于反式灭菌锅 105 ℃ 杀菌 30 min 后得到休闲豆干。分别将各实验组休闲豆干置于 25 ℃ 环境下贮藏 90 d，在 15、30、45、60、75、90 d 贮藏时间节点每组随机选择豆干样品，进行营养成分含量、特征氧化指标、质构特性、色差、分子间作用力和微观结构检测。

1.2.2　休闲豆干营养成分测定　豆干样品蛋白质含量、脂肪含量、水分含量和碳水化合物含量参照 Huang 等[2] 方法进行测定。使用直接干燥法测定每个豆干样品的水分含量；采用凯氏定氮法测定蛋白质含量（蛋白质转化系数为 6.25）；采用乙醚提取法测定脂肪含量；通过苯酚-硫酸法测定包括粗纤维在内的总碳水化合物，其中苯酚溶液（0.5 g/L）用作酚类化合物，D-葡萄糖用作标准糖源。

1.2.3　休闲豆干特征氧化指标测定　POV 值、酸价的测定分别参考 GB/T 5009.227-2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》、GB/T 5009.229-2025《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》。

硫代巴比妥酸值（TBARS 值）参照 Huang 等[2] 方法进行测定。

茴香胺值参照侯天宇等[17] 方法进行测定。取 2.0 g 充分均质豆干样品置于 25 mL 容量瓶中，加入异辛烷溶解并定容至刻度。取 5 mL 溶解液加 1 mL 冰醋酸，摇匀后 23±3 ℃ 暗处放 10 min（未反应溶液组）。另取 5 mL 溶解液加 1 mL 茴香胺试剂，同条件放置 10 min（反应溶液组）。取 5 mL 异辛烷加 1 mL 茴香胺试剂，同条件放置 10 min（空白组）。将以上溶液置于 350 nm 处测定吸光度，并根据下式计算样品中茴香胺值：

$$X = \frac{100 \times QV}{m}[1.2 \times (A_1 - A_2 - A_0)]$$

式中：Q 表示测定溶液中样品质量浓度（0.01 g/mL）；V 表示溶解样品异辛烷体积，mL；m 表示样品的质量，g；A_0 表示未反应溶液组吸光度；A_1 表示反应溶液组吸光度；A_2 表示空白组吸光度；1.2 表示 1 mL 茴香胺试剂或冰乙酸溶液稀释测试溶液的校正因子。

1.2.4　休闲豆干质构特性测定　豆干样品质构特性（硬度、咀嚼度、内聚性、弹性）参照伍涛等[16] 方法进行测定。采用质构分析仪在豆干的四个角和中心测定质构特性，探针模型为 P/0.5（12.7 mm），测试模式为 TPA（Texture Profile Analysis）。测试前、测试中和测试后的速度分别为 2.0、1.0 和 1.0 mm/s，压缩距离设置为 4 mm，间隔时间为 2.0 s，同时使用触发类型“自动”和数据采集频率为 50.0 PPS（每秒脉冲数）。

1.2.5　休闲豆干色差测定　采用色差仪测定豆干样品的亮度（L^*）、红度（a^*）和黄度（b^*）。将豆干切成厚度均匀（10 mm）的片状，色差仪设置为透射模式，校正调零后进行测定，亮度值 L^*（范围为 0~100，100 代表白色，0 代表黑色）、红绿值 a^*（+代表红色，-代表绿色）和黄蓝值 b^*（+代表黄色，-代表蓝色）。

1.2.6　休闲豆干分子间作用力测定　参照毛佳怡[18] 方法测定豆干样品分子间作用力（氢键作用力、二硫键作用力、疏水相互作用）。将豆干样品全部冷冻干燥后粉碎过 100 目筛细网，取 0.25 g 样品于烧杯中，分别加入 10 mL 下述各试剂：a.0.035 mol/L pH7.6 磷酸盐缓冲液；b.0.035 mol/L pH7.6 磷酸盐缓冲液、8 mol/L 尿素溶液；c.0.035 mol/L pH7.6 磷酸盐缓冲液、0.1 mol/L 2-巯基乙醇溶液；d.0.035 mol/L pH7.6 磷酸盐缓冲液、1.5% SDS 溶液；常温下搅拌浸提 1 h 后离心 15 min（12000×g、10 ℃），取上清液置于 4 ℃ 贮存备用，沉淀再次加入上述试剂，重复两次浸提离心，弃沉淀，将上清液混合。取 0.05 mL 上清液于 1.5 mL 离心管中，加入 0.95 mL 去离子水，混匀后，采用 BCA 法测定各样品中可溶性蛋白含量，通过计算上清液蛋白质浓度与总蛋白质浓度百分比计算蛋白质溶解度。不同豆干样品蛋白质氢键作用力为溶解度 b-a，蛋白质二硫键为溶解度 c-a，蛋白质疏水相互作用为溶解度 d-a。

1.2.7　休闲豆干微观结构测定　参照毛佳怡[18] 方法采用扫描电子显微镜观察豆干样品微观结构。将豆干样品均切分成 0.5 cm×0.5 cm×0.1 cm 薄片，放置于 pH6.8 戊二醛溶液中室温固定 2 h，再转移至 4 ℃ 保存，再用 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液（pH6.8）冲洗样品 2~3 次（每次 15 min），依次置于浓度 30%、50%、70%、90%、95% 乙醇中进行脱水（每次 15 min），脱水完成后放入 100 % 乙醇-叔丁醇（1∶1）溶液中置换 15 min，放入冷冻干燥机中冻干，沾样、喷金，进行微观结构观察。

1.3　数据处理

每个样品均重复进行 3 次实验，实验数据均以“平均值±标准差”表示，分别采用 SPSS 22.0 和 Origin 9.1 进行方差分析及作图，显著性差异水平设置为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 维生素 E 对氧化引发剂诱导的休闲豆干营养成分变化的影响

不同贮藏阶段下维生素 E 干预对豆干营养成分的影响呈现显著的时间依赖性(图 1)。引发剂+维生素 E 组在贮藏前 45 d 内表现出对蛋白质和脂肪氧化的有效抑制作用,其蛋白质含量在 45 d 时维持在 18.69 g/100 g(较引发剂组高 11.58%),脂肪含量达 12.97 g/100 g(较引发剂组高 7.37%),且碳水化合物损失率降低至 0.71%(引发剂组为 6.01%)。此阶段水分含量仅从 48.55 g/100 g 微增至 50.12 g/100 g,显著低于引发剂组的增幅(P<0.05)。这种现象与维生素 E 的脂溶性抗氧化特性密切相关,其通过嵌入脂质双分子层阻断自由基链式反应[19],抑制卤汁中油脂初级氧化产物的生成,从而延缓蛋白质侧链氨基酸(如组氨酸、蛋氨酸)的氧化修饰[20],维持豆干凝胶网络对水分和小分子营养物质的束缚能力。

然而在 60~90 d 贮藏后期,维生素 E 的保护效能显著减弱。贮藏 90 d 时蛋白质含量较 45 d 下降了 17.28%(15.46 g/100 g),脂肪含量降至 11.09 g/100 g,与引发剂组差异不显著(P>0.05)。水分含量则快速上升至 55.78 g/100 g,接近引发剂组水平。需说明的是,真空包装常温贮藏的休闲豆干常规保质期为 60~90 d,本研究中 60 d 时引发剂+维生素 E 组蛋白质损失率仅 10.77%(引发剂组达 16.22%),仍符合产品营养品质要求;90 d 时引发剂组蛋白质损失率超 20%,已超出品质阈值,而引发剂+维生素 E 组虽效能衰退,但仍能延缓营养劣化速度。推测这可能与两方面机制相关:其一,维生素 E 分子在长期贮藏中因自身氧化消耗导致浓度阈值失效,其二,豆干体系内水分活度升高引发相分离,使脂溶性维生素 E 在亲水性蛋白基质中分布不均,局部抗氧化效能降低。碳水化合物含量贮藏 90 d 时仍保持 7.81 g/100 g(较引发剂组高 10.16%),表明维生素 E 对糖类物质的抑制作用具有持续性,可能与 α-生育酚醌等降解产物对美拉德反应的抑制作用有关[21]。

2.2 维生素 E 对氧化引发剂诱导的休闲豆干特征氧化指标变化的影响

维生素 E 对氧化引发剂诱导豆干特征氧化指标变化的抑制作用呈现显著的阶段性特征(图 2)。在贮藏前 45 d 内,引发剂+维生素 E 组豆干的 POV、酸价及 TBARS 值分别被控制在 0.16 g/100 g、0.73 mg/g、1.38 mg/kg 以下,较引发剂组降低 41.49%~44.35%,且茴香胺值增幅减缓,45 d 时仅增高至 23.87(引发剂组为 42.38)。POV、酸价、TBARS 值是衡量氧化异味的核心指标,行业可接受阈值分别为 0.2 g/100

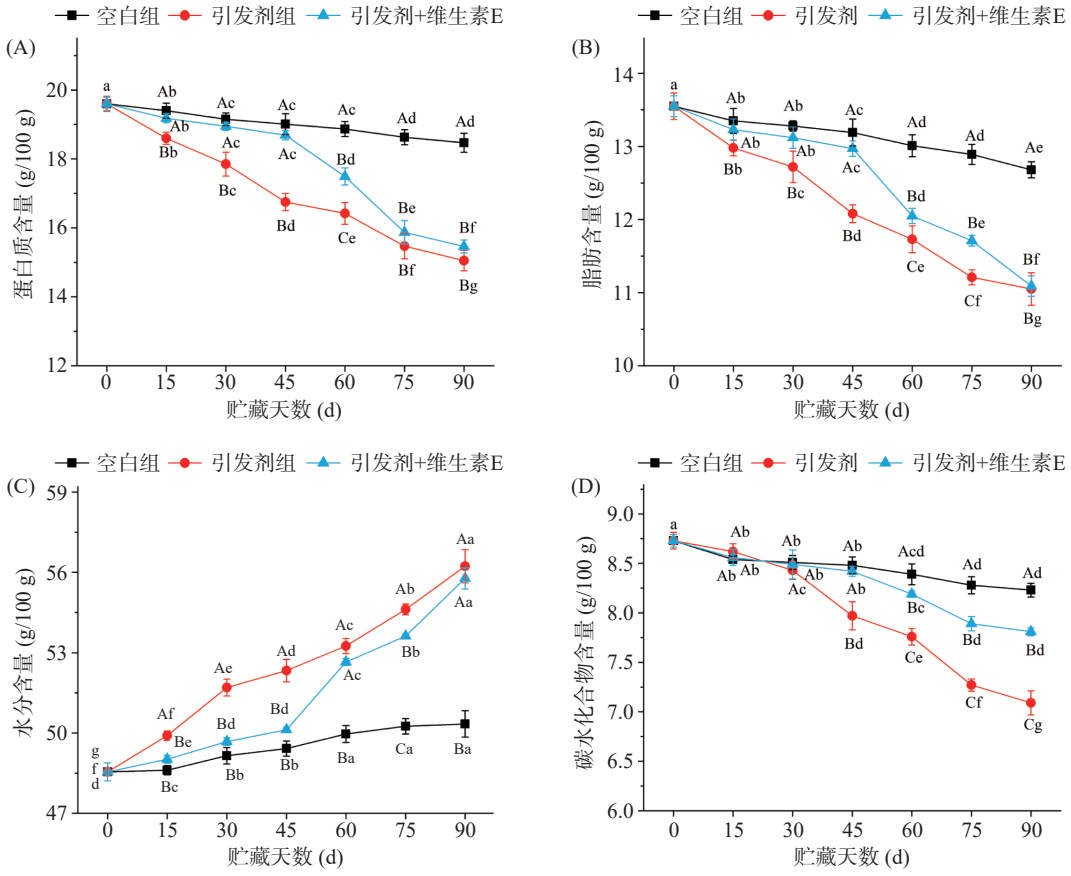


图 1 维生素 E 和引发剂作用下休闲豆干营养成分含量变化

Fig.1 Changes in nutritional components of LD-tofu treated with vitamin E and oxidation initiators

注:A 为蛋白质,B 为脂肪,C 为水分,D 为碳水化合物;图中不同大写字母表示不同实验组间存在显著性差异(P<0.05),不同小写字母表示同一实验组内不同贮藏时间存在显著性差异(P<0.05),图 2~图 4 同。

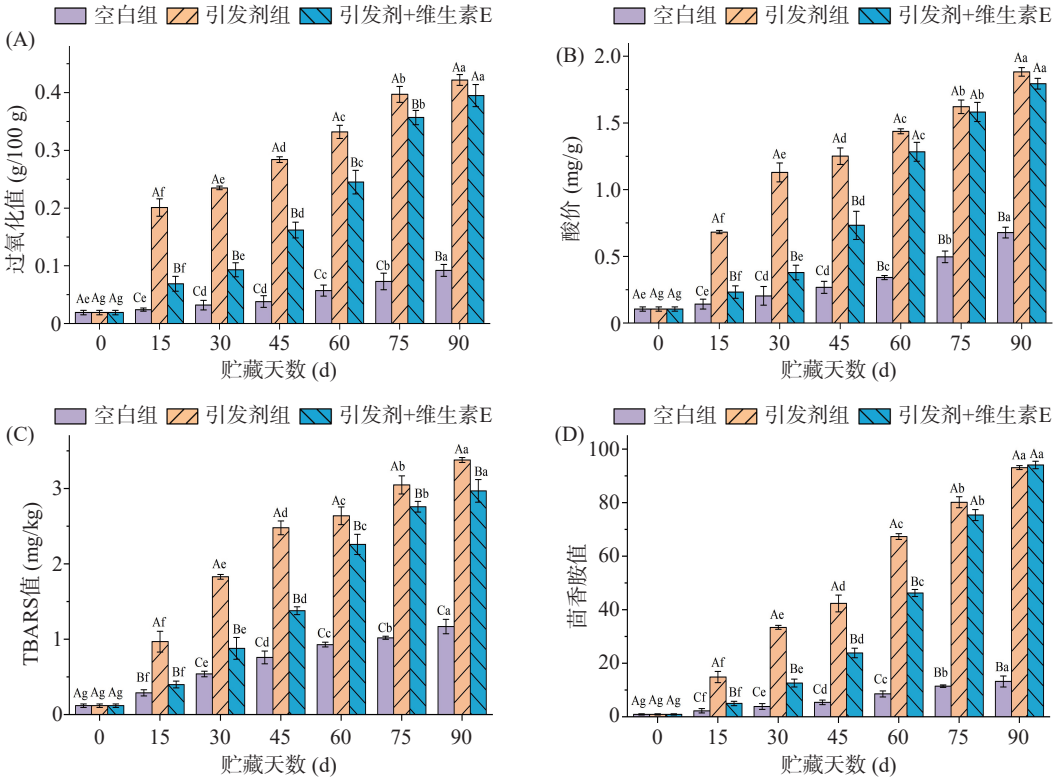


图 2　维生素 E 和引发剂作用下休闲豆干特征氧化指标变化

Fig.2　Changes in characteristic oxidation indexes of LD-tofu treated with vitamin E and oxidation initiators

g、1.0 mg/g、2.0 mg/kg，此阶段引发剂+维生素 E 组远低于阈值，表明无氧化异味风险。其原因推测是维生素 E 通过其苯并二氢吡喃环结构优先捕捉脂质过氧自由基，同时阻断脂氧合酶（LOX）与底物的结合位点，显著延缓初级氧化产物的积累[22]。这与油脂体系中 α-生育酚对氢过氧化物分解的抑制作用高度相关，其效能在前中期可维持脂质氧化诱导期延长 2~3 倍[23]。

然而，75~90 d 贮藏后期，维生素 E 的氧化抑制能力显著衰退。贮藏 90 d 时 POV、酸价及 TBARS 值分别飙升至 0.40 g/100 g、1.79 mg/g、2.97 mg/kg（均已突破氧化酸败阈值），与引发剂组差异缩小至 4.68%~12.13%。茴香胺值达 94.16，较 45 d 时增加了 70.29，表明次级氧化产物大量生成。这种现象可能源于两方面：其一，维生素 E 在持续抗氧化过程中被氧化生成 α-生育醌，其自由基清除效率仅为母体化合物的 22%~27%[24]；其二，豆干水分迁移导致局部区域 A_w 值过高（超过 0.85），脂溶性维生素 E 在亲水-疏水界面发生相分离，形成抗氧化盲区[25]。

2.3　维生素 E 对氧化引发剂诱导的休闲豆干质构特性变化的影响

维生素 E 对氧化引发剂诱导豆干质构特性变化的抑制作用呈现显著的时间差异性（图 3）。在贮藏 15~45 d 内，引发剂+维生素 E 组豆干硬度维持在 1051.03~1132.48 gf 范围（较引发剂组高 3.12%~11.42%），咀嚼性达 862.24~896.33 gf，与空白对照组差异较小。质构中硬度是影响豆干口感的关键指标，行业普遍认为硬度降幅≤20% 时口感无显著变差，此阶段引发剂+维生素 E 组硬度仅发生小幅下降，表明产品货架期内的感官品质稳定性好且符合消费者可接受口感要求。此阶段内聚性和弹性分别稳定在 1.31~1.41 和 0.89~0.91，表明维生素 E 通过抑制脂质氧化维持蛋白质三级结构完整性。其作用机制与 α-生育酚嵌入脂质双层阻止膜流动性异常升高有关，同时通过减少丙二醛对肌原纤维蛋白的交联破坏[26]，维持凝胶网络持水能力。研究证实，维生素 E 可有效提升大豆分离蛋白的 β-折叠含量[27]，这有助于增强蛋白质分子间氢键作用力。

但在 60~90 d 贮藏中后期，引发剂+维生素 E 组豆干的质构劣化显著加速。硬度从 45 d 的 1051.03 gf 骤降至 90 d 的 830.12 gf（降幅达 21.02%），咀嚼性同步下降至 681.86 gf，与引发剂组差异缩小至 22.78 gf。此时引发剂+维生素 E 组硬度降幅略超 20% 阈值，但仍低于引发剂组的 28.16%（已严重影响口感），说明维生素 E 仍能延缓质构劣化，使产品在保质期内保持相对较好的口感。同时，在 60~90 d 贮藏期豆干内聚性降至 0.91（较 45 d 降低 30.53%），弹性下降至 0.83，表明凝胶网络出现不可逆破坏。这可能归因于两方面：其一，维生素 E 自身氧化生成的生育酚醌具有促氧化活性，加速蛋白质巯基氧化为二硫键[26]；其二，自由水增加以及水分迁移引发的相分离导致局部区域疏水作用力失衡，使蛋白质-脂质复合体解离。尽管后期质构参数恶化，引发剂+维生素 E 组在 60~75 d 时的弹性仍较引发剂组高 4.68%~

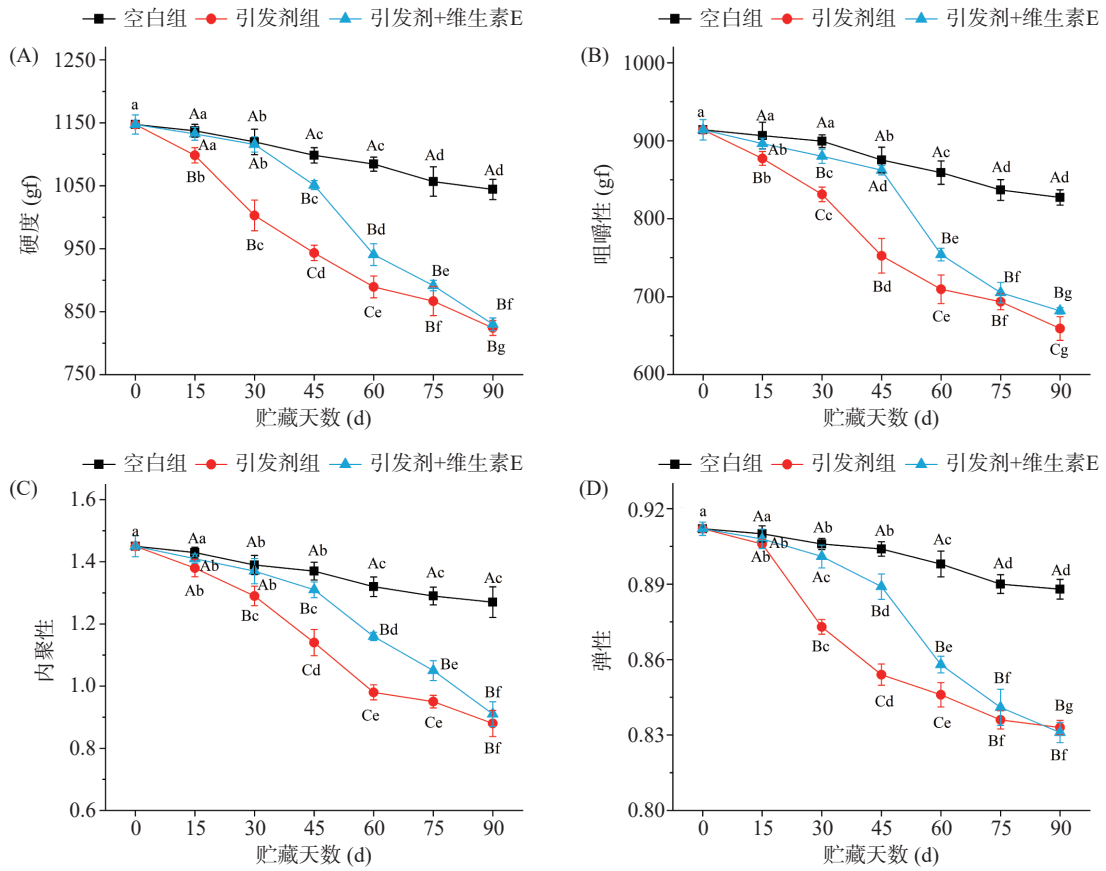


图 3　维生素 E 和引发剂作用下休闲豆干质构特性变化

Fig.3　Changes in texture characteristics of LD-tofu treated with vitamin E and oxidation initiators

7.42%, 提示其对蛋白质构象的早期保护具有残留效应。

2.4　维生素 E 对氧化引发剂诱导的休闲豆干色差变化的影响

不同贮藏时间下空白组、引发剂组和引发剂+维生素 E 组豆干色差变化如图 4 所示, 各试验组豆干 a^*值均随贮藏时间延长出现小幅增高趋势, 分别从初始值 13.68 逐渐增加至 15.17、15.57、15.63。与空白组和引发剂组相比发现, 维生素 E 对氧化引发剂引起休闲豆干 L^*值和 b^*值变化的抑制作用呈现明显的阶段性差异。在贮藏前 45 d 内, 引发剂+维生素 E 组豆干 L^*值稳定在 42.73~43.11 范围(变异系数<2.1%), b^*值增幅被控制在 1.97/30 d(引发剂组为 2.66/30 d)。此阶段色差值始终低于 3.0(食品工业可接受阈值), 表明维生素 E 通过抑制初级氧化产物(如氢过氧化物)的积累, 有效延缓美拉德反应前期阶段(氨基-羰基缩合)的进程[28]。

已有研究证实, α-生育酚可降低己醛生成量, 这类短链醛类是形成黄褐色聚合物的关键前体物质[29]。此外, 维生素 E 通过维持细胞膜完整性, 减少油脂色素(如叶黄素)的氧化降解, 从而延缓豆干表面淡黄色向暗黄色的转变[30]。但在 60~90 d 贮藏中后期, 维生素 E 对豆干色泽的保护效能显著衰退, 表现为豆干 L^*值从 45 d 的 42.73 骤降至 90 d 时的 36.91(降幅达 13.62%), b^*值加速上升至 42.74(日均增幅 0.18/d)。这种现象可能与两个机制相关: 其一, 维生素 E 氧化生成的 α-生育酚醌具有光敏特性, 在光照条件下催化单线态氧生成, 加速类胡萝卜素等色素的氧化分解[31]; 其二, 体系水分活度升高(A_w>0.85)促使美拉德反应进入高级阶段(如 Strecker 降解)。

2.5　维生素 E 对氧化引发剂诱导的休闲豆干蛋白质分子间作用力变化的影响

对比不同贮藏时间下空白组、引发剂组和引发剂+维生素 E 组豆干蛋白分子间作用力变化发现, 维生素 E 对氢键作用力的保护效能呈现显著局限性(表 1)。在 15~90 d 贮藏期内, 引发剂+维生素 E 组氢键作用力始终低于引发剂组(0.17~0.33 vs 0.18~0.36), 但与引发剂组差异较小。这种弱势保护源于维生素 E 的分子特性: 其脂溶性结构优先嵌入蛋白质疏水核心, 对极性氢键区域的直接干预能力有限[32]。虽然维生素 E 通过清除脂质过氧自由基(LOO·)减少了氧化应激源, 但无法有效阻断极性氧化产物(如羟基自由基·OH)对氢键供体/受体基团(如-NH、-OH)的攻击[32−33]。

同时, 维生素 E 对豆干蛋白质分子二硫键的抑制作用随贮藏时间延长呈逐渐减弱趋势。在 0~60 d 贮藏阶段, 引发剂+维生素 E 组豆干二硫键含量略比引发剂组高, 但这种差异在 75~90 d 快速缩小。表明维生素 E 抑制作用具有间接性, 维生素 E 可通过抑制脂质过氧化副产物(如 MDA)的生成, 减少 MDA

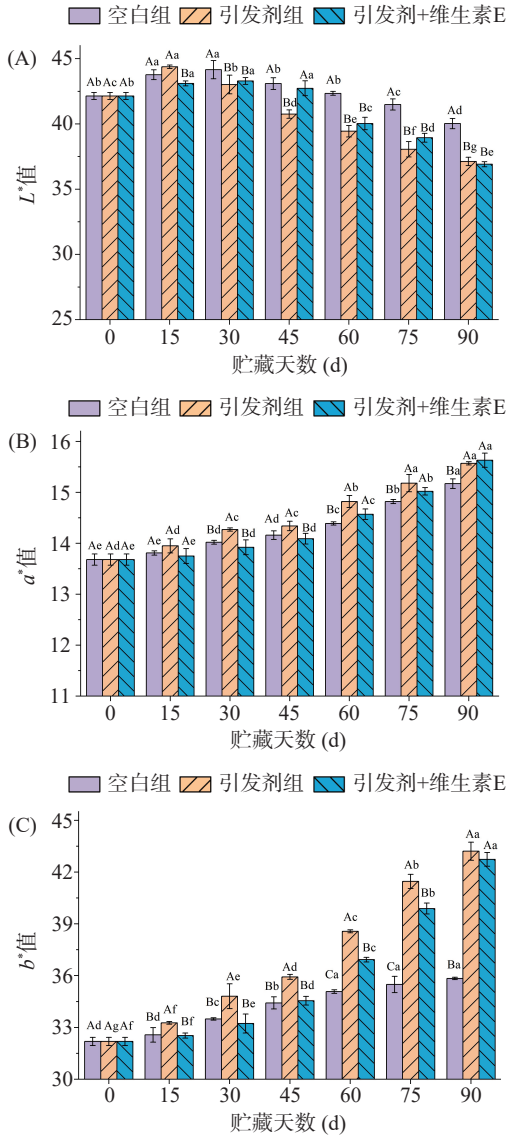


图 4　维生素 E 和引发剂作用下休闲豆干色差变化

Fig.4　Changes in color difference of LD-tofu treated with vitamin E and oxidation initiators

与半胱氨酸残基的 Schiff 碱交联，从而延缓二硫键断裂[20]。然而，维生素 E 对硫醇基(-SH)的直接抗氧化效率低于茶多酚，且其分子缺乏与二硫键的定向结合位点。直至贮藏后期(75~90 d)，维生素 E 氧化生成的 α-生育酚醌甚至可能催化硫醇-二硫键交换反应[21]，导致抑制作用可忽略不计。

此外，维生素 E 对豆干蛋白质分子疏水相互作用展现出全阶段优势。引发剂+维生素 E 组疏水作用力在 90 d 时为 0.27，显著低于引发剂组(0.47，P<0.05)。维生素 E 的这种特异性抑制作用可能源于其分子结构的双重优势：a.空间锚定效应：维生素 E 的植醇侧链(16 碳疏水链)可深入蛋白质疏水腔，与缬氨酸、亮氨酸等疏水残基形成范德华力，阻断氧化介质对核心疏水区的侵袭[34]；b.自由基清除靶向性：其苯并二氢吡喃环优先淬灭脂溶性自由基(如脂质烷氧自由基 RO·)，有效保护疏水界面稳定性[35]。

2.6　维生素 E 对氧化引发剂诱导的休闲豆干微观结构变化的影响

对比不同贮藏时间下空白组、引发剂组和引发剂+维生素 E 组豆干微观结构变化发现，维生素 E 对豆干微观结构的抑制作用呈现“前密后疏”的阶段性特征(图 5)。在贮藏前 30 d 时，引发剂+维生素 E 组豆干的蛋白质凝胶网络保持致密均匀，无明显断裂现象出现。出现上述现象的原因一方面可能是维生素 E 的植醇侧链嵌入脂质双层，抑制氧化导致的膜流动性异常增加，减少脂质过氧化物向蛋白基质的扩散[26]；另一方面是维生素 E 的苯并二氢吡喃环优先清除脂溶性自由基，阻断丙二醛(MDA)对疏水氨基酸(如亮氨酸、异亮氨酸)的交联破坏[36]。

但在 60~90 d 贮藏中后期，维生素 E 组的微观结构劣化显著加速，孔隙率逐渐增高、局部区域出现塌陷孔洞。微观结构劣化与营养成分、质构指标变化高度关联：60 d 后凝胶网络孔隙增多，导致水分束缚能力下降(水分含量升高)、蛋白质交联破坏(硬度下降)，进一步验证了维生素 E 在后期效能衰退的机制，且这种微观变化与产品保质期内的宏观品质劣化直接对应。推测出现上述转变现象相关的作用机理包括：a.维生素 E 氧化生成的 α-生育酚醌具有促氧化活性，催化蛋白质酪氨酸残基形成二酪氨酸交联，破坏网络均一性[20]；b.水分活度升高导致维生素 E 在亲水-疏水界面分布系数下降，形成抗氧化盲区；c.贮藏后期积累的脂氢过氧化物浓度超过阈值，引发链式氧化反应，导致凝胶结构崩溃[22]。

表 1　维生素 E 和引发剂作用下休闲豆干蛋白质分子间作用力变化

Table 1　Changes in intermolecular forces of LD-tofu treated with vitamin E and oxidation initiators

作用力	组别	0 d	15 d	30 d	45 d	60 d	75 d	90 d
氢键作用力	空白组	0.15±0.01^{a}	0.16±0.03^{Aa}	0.14±0.03^{Aa}	0.15±0.01^{Aa}	0.17±0.05^{Ba}	0.18±0.04^{Bb}	0.21±0.04^{Ba}
	引发剂组		0.18±0.03^{Ad}	0.20±0.02^{Ad}	0.26±0.05^{Ac}	0.31±0.02^{Ab}	0.35±0.03^{Aa}	0.36±0.02^{Aa}
	引发剂+维生素E组		0.17±0.03^{Ab}	0.18±0.01^{Bb}	0.23±0.03^{Cc}	0.29±0.03^{Ab}	0.30±0.02^{Aa}	0.33±0.01^{Aa}
二硫键作用力	空白组	2.46±0.02^{a}	2.49±0.01^{Aa}	2.45±0.01^{Aa}	2.37±0.06^{Ab}	2.35±0.01^{Ab}	2.28±0.05^{Ac}	2.21±0.03^{Ad}
	引发剂组		2.16±0.08^{Bb}	2.10±0.05^{Bb}	1.75±0.02^{Bc}	1.60±0.02^{Bd}	1.48±0.03^{Be}	1.33±0.03^{Bf}
	引发剂+维生素E组		2.22±0.06^{Bb}	2.12±0.02^{Bb}	1.83±0.01^{Bc}	1.67±0.03^{Bd}	1.50±0.02^{Be}	1.32±0.01^{Bf}
疏水相互作用	空白组	0.22±0.01^{a}	0.21±0.04^{Aa}	0.19±0.03^{Bb}	0.20±0.04^{Ab}	0.23±0.03^{Aa}	0.28±0.03^{Ba}	0.29±0.03^{Ba}
	引发剂组		0.24±0.02^{Aa}	0.27±0.01^{Bb}	0.29±0.04^{Bb}	0.37±0.03^{Ab}	0.45±0.01^{Aa}	0.47±0.03^{Aa}
	引发剂+维生素E组		0.21±0.02^{Aa}	0.20±0.02^{Bb}	0.22±0.03^{Ab}	0.23±0.02^{Bb}	0.23±0.02^{Bb}	0.27±0.01^{Ba}

注：表中不同大写字母表示不同实验组间存在显著性差异(P<0.05)，不同小写字母表示同一实验组内不同贮藏时间存在显著性差异(P<0.05)。

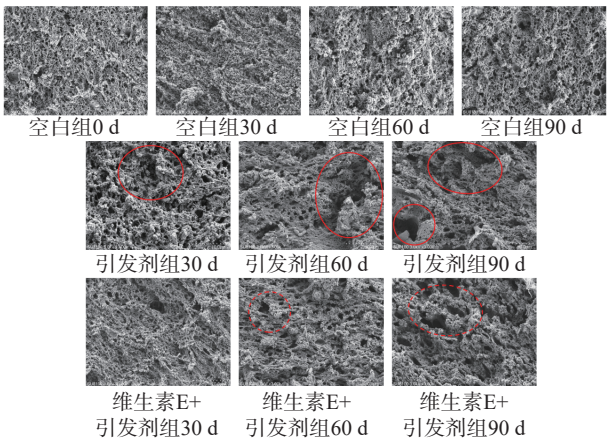


图 5 维生素 E 和引发剂作用下休闲豆干微观结构变化（3000×）

Fig.5 Changes in microstructure of LD-tofu treated with vitamin E and oxidation initiators (3000×)

3 结论

本研究旨在从营养成分、特征氧化指标、质构特性和微观结构等角度分析维生素 E 对休闲豆干品质劣化的抑制作用。研究发现 0.2% 维生素 E 在贮藏前期（0~45 d）可通过抑制蛋白质氧化、二硫键断裂、疏水相互作用和凝胶网络结构破坏，能显著拮抗氧化引发剂的负向劣化效应，表明维生素 E 可应用于贮藏初期干预因油脂氧化引起的豆干品质劣变。该研究成果为维生素 E 应用拓展及休闲豆干质量安全控制提供理论支撑，后续将进一步探究维生素 E 与氧化产物相互作用、特定氧化产物与色差关联性、维生素 E 抗氧化作用递送效能与稳定性提升。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 吴国庆, 黄展锐, 郑奕柔, 等. 不同卤汁循环次数下卤豆干及卤汁品质特性变化规律研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(16): 228−234,241. [WU Guoqing, HUANG Zhanrui, ZHENG Yirou, et al. Study on change rule of quality characteristics of leisure-dried tofu and marinade under different marinade recycling cycles[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(16): 228−234,241.]

[2] HUANG Zhanrui, ZHOU Hengping, JIANG Qionghua, et al. Study on the quality change and deterioration mechanism of leisure dried tofu under different storage temperature conditions[J]. LWT, 2022, 172: 114257.

[3] 陈浩, 杨莹, 赵良忠, 等. 湘派卤汁循环使用安全监测及预警模型的构建[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(21): 181−187. [CHEN Hao, YANG Ying, ZHAO Liangzhong, et al. The safety monitoring and early-warning model construction for Xiangpai brine recycling[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(21): 181−187.]

[4] 蒋琼华, 赵良忠, 李化强, 等. 休闲豆制品贮藏期的品质变化及腐败机理研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 116−119,211. [JIANG Qionghua, ZHAO Liangzhong, LI Huaqiang, et al. Research on quality changes and spoilage mechanism of leisure soybean food during storage[J]. Food & Machinery, 2015, 31(1): 116−119,211.]

[5] HUANG Yanqi, ZHENG Yirou, HUANG Zhanrui, et al. Evaluating the effect of different recycling frequencies on marinade quality, characteristics, and volatile constituents[J]. Food Science and Biotechnology, 2025, 34(4): 893−904.

[6] SAM Al-Dalali, LI Cong, XU Baocai. Effect of frozen storage on the lipid oxidation, protein oxidation, and flavor profile of marinated raw beef meat[J]. Food Chemistry, 2022, 376: 131881.

[7] 冯红霞, 刘宇, 王文亲, 等. 山桐子油适度精炼温度优化及其对品质及货架期的影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(10): 158−165. [FENG Hongxia, LIU Yu, WANG Wenqin, et al. Optimization of moderate refining temperature for *Idesia polycarpa* Maxim oil and its effects on quality and shelf life[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(10): 158−165.]

[8] 周衡平, 黄展锐, 赵良忠, 等. 不同氧化条件对卤汁和卤豆干营养成分的影响[J]. 农产品加工, 2024(9): 9−13. [ZHOU Hengping, HUANG Zhanrui, ZHAO Liangzhong, et al. Effects of different oxidation conditions on nutritional components of marinate and marinated dried tofu[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2024(9): 9−13.]

[9] 李欣, 郭咪咪, 范文广, 等. 食用植物油抗氧化的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(3): 109−116. [LI Xin, GUO Mimi, FAN Wenguang, et al. Research progress on the antioxidation of edible vegetable oils[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(3): 109−116.]

[10] 李甜甜, 黄丽君, 周蕊, 等. 维生素 E 在油脂中抗氧化与促氧化研究进展[J]. 农村经济与科技, 2017, 28(21): 155−157,184. [LI Tiantian, HUANG Lijun, ZHOU Rui, et al. Research progress of vitamin E in antioxidation and oxidation promotion of oils and fats[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2017, 28(21): 155−157,184.]

[11] 李颖平, 耿丹, 杨继生, 等. 油脂氧化日粮添加维生素 E 和抗氧化剂对肉鸡生长性能、肉品质和抗氧化性能的影响[J]. 中国饲料, 2018(2): 44−49. [LI Yingping, GENG Dan, YANG Jisheng, et al. Effects of vitamin E and antioxidant on growth performance, meat quality and antioxidation of broilers fed with oxidized oil[J]. China Feed, 2018(2): 44−49.]

[12] NYSTRÖM L, ACHRENIUS T, LAMPI A M, et al. A comparison of the antioxidant properties of steryl ferulates with tocopherol at high temperatures[J]. Food Chemistry, 2007, 101(3): 947−954.

[13] 魏红艳, 张玉斌, 石岩. 3 种天然抗氧化剂在双低菜籽油中的抗氧化效果[J]. 中国油脂, 2022, 47(3): 38−40. [WEI Hongyan, ZHANG Yubin, SHI Yan. Antioxidant effects of three natural antioxidants on double low rapeseed oil[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(3): 38−40.]

[14] 胥亚夫, 俞存兵, 余奕珂, 等. 抗氧化剂对南极磷虾油氧化稳定性的影响研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(6): 1−5. [XU Yafu, YU Cunbing, YU Yike, et al. Study on the effects of antioxidants on oxidative stability of Antarctic krill oil[J]. Food Research and Development, 2021, 42(6): 1−5.]

[15] 常旋, 徐春明, 陈佳, 等. 抗氧化剂筛选复配及在咖啡饮料中的应用研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(1): 148−154. [CHANG Xuan, XU Chunming, CHEN Jia, et al. Research on screening and compounding of antioxidants and application in coffee beverages[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(1):

148−154.］
［16］ 伍涛, 彭希林, 赵良忠, 等. 湘派豆干及卤汁在卤制过程中的变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(19): 146−154. ［WU Tao, PENG Xilin, ZHAO Liangzhong, et al. Variation law of Xiangpai dried tofu and brine during marinating process[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(19): 146−154.］
［17］ 侯天宇, 谢礼文, 梁永霞, 等. 不同精炼程度山茶油油炸过程中品质变化的研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(9): 107−114. ［HOU Tianyu, XIE Liwen, LIANG Yongxia, et al. Study on quality changes of *Camellia* oil during frying with different refining degrees[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(9): 107−114.］
［18］ 毛佳怡. 加卤技术对卤豆干风味品质影响研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020. ［MAO Jiayi. Effects of different marinating methods on the quality and flavor profiles of marinated dried bean curd [D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.］
［19］ 赵丹阳, 吴雨珊, 李军国, 等. 饲粮添加亚麻籽和维生素 E 对北京油鸡肌肉 n-3 多不饱和脂肪酸富集和抗氧化特性的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(11): 5243−5254. ［ZHAO Danyang, WU Yushan, LI Junguo, et al. Effects of adding flaxseed and vitamin E in diets on n-3 polyunsaturated fatty acids enrichment and antioxidant properties of muscle in Beijing fatty chicken[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(11): 5243−5254.］
［20］ DIAS P C G J, dos SANTOS I J, GALLO S B, et al. Performance, meat quality and gene expression of grazing lambs supplemented with Macadamia oil and vitamin E[J]. Applied Sciences, 2024, 14(19): 8870.
［21］ 王玉婷. 脂类及其氧化对美拉德反应伴生危害物形成的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2019. ［WANG Yuting. Effects of lipids and their oxidation on the formation of harzard compounds derived from Maillard reaction[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.］
［22］ WANG Zitong, XU Rujian, YANG Hongbing, et al. Vitamin E regulates the collagen contents in the body wall of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) via its antioxidant effects and the TGF-*β*/Smads pathway[J]. Antioxidants, 2024, 13(7): 847.
［23］ 周洋, 杨文婧, 操丽丽, 等. 生育酚抑制油脂氧化机制研究进展[J]. 中国油脂, 2018, 43(8): 32−38. ［ZHOU Yang, YANG Wenjing, CAO Lili, et al. Progress in mechanism of tocopherol inhibiting oil oxidation[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(8): 32−38.］
［24］ 李昌璞. 维生素 E 对油脂氧化的保护作用[J]. 食品安全导刊, 2018(24): 151. ［LI Changpu. Protective effect of vitamin E on oil oxidation[J]. China Food Safety Magazine, 2018(24): 151.］
［25］ BOTTEGAL D N, LATORRE M Á, LOBÓN S, et al. Impacts of carob pulp (*Ceratonia siliqua* L.) and vitamin E on pork colour, oxidative stability, lipid composition and microbial growth [J]. Meat Science, 2025, 220: 109710.
［26］ 唐林. 水包油型乳液中磷脂对生育酚界面分配及抗氧化性质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2023. ［TANG Lin. Effect of phospholipids on the interfacial distributions and antioxidant properties of tocopherols in oil-in-water emulsions[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.］
［27］ GENG Mengjie, FENG Xumei, WU Xixi, et al. Encapsulating vitamins C and E using food-grade soy protein isolate and pectin particles as carrier: Insights on the vitamin additive antioxidant effects[J]. Food Chemistry, 2023, 418: 135955.
［28］ 张卓. 美拉德反应产物的抗氧化性在鸡肉糜中的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022. ［ZHANG Zhuo. Study on antioxidant activity of Maillard reaction products in minced chicken[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.］
［29］ SMITH J R, JOHNSON A B. *α*-Tocopherol inhibits hexanal formation in lipid oxidation: Mechanistic insights from model systems[J]. Journal of Food Science, 2018, 83(5): 1242−1250.
［30］ WANG L, CHEN H, ZHANG Y, et al. Membrane stabilization by vitamin E in plant-based foods: Effects on pigment degradation and oxidative stability[J]. Food Chemistry, 2020, 312: 126035.
［31］ 彭桂林. 玉米黄质与生育酚在油脂中的抗氧化作用研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2023. ［PENG Guilin. Study on antioxidant effect of zeaxanthin and tocopherol in oil[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2023.］
［32］ YAKOUBI S, KOBAYASHI I, UEMURA K, et al. Development of a novel colloidal system enhancing the dispersibility of tocopherol nanoparticles in a nanoscale nutraceutical delivery system[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 668: 131348.
［33］ NIKI E. Role of vitamin E as a lipid-soluble peroxyl radical scavenger: *In vitro* and *in vivo* evidence[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2014, 66: 3−12.
［34］ ZAREI H, BAHREINIPOUR M, SEFIDBAKHT Y, et al. Radioprotective role of vitamins C and E against the gamma ray-induced damage to the chemical structure of bovine serum albumin [J]. Antioxidants, 2021, 10(12): 1875.
［35］ 刘国安, 李杰林, 李双越, 等. 维生素 C 和维生素 E 的联合抗氧化活性研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(2): 66−72,84. ［LIU Guoan, LI Jielin, LI Shuangyue, et al. Antioxidant activity studies of vitamin C and vitamin E[J]. Journal of Northwest Normal University (Natural Science), 2015, 51(2): 66−72,84.］
［36］ JIANG Yifan, SU Mengke, YU Ting, et al. Quantitative determination of peroxide value of edible oil by algorithm-assisted liquid interfacial surface enhanced Raman spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128709.