

特丁基对苯二酚对休闲豆干品质劣化的抑制作用研究

陈杜润^{1,2,3} 黄展锐^{1,2,3} 胡莲花^{1,2,3} 陈浩^{1,2,3} 赵聃^{1,2,3}

(1. 邵阳学院食品与化学工程学院, 湖南 邵阳 422000; 2. 豆制品加工与安全控制湖南省重点实验室, 湖南 邵阳 422000; 3. 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: [目的] 针对休闲豆干采用温和杀菌后保质期缩短(30~90 d)、易受光酶诱导氧化劣变的产业痛点, 探究特丁基对苯二酚(TBHQ)抑制光酶引发剂诱导休闲豆干品质劣化的作用机理。[方法] 采用 TBHQ 和光酶引发剂(叶绿素、偶氮二异庚腈)处理的卤汁制备休闲豆干, 90 d 贮藏期内动态监测休闲豆干营养成分、特征氧化指标、质构特性、分子间作用力和微观结构的变化规律。[结果] 贮藏前期(0~60 d), TBHQ 能显著延缓豆干蛋白质(18.21 g/100 g)和脂肪(12.54 g/100 g)的氧化损失, 抑制过氧化值(0.16 g/100 g)、酸价(0.98 mg/g)和硫代巴比妥酸值(1.58 mg/kg)上升, 维持 L^* 和 b^* 值接近空白组; TBHQ 可稳定豆干二硫键作用力(1.96~2.48)和氢键作用力(0.16~0.25), 硬度和弹性分别维持在 9.25~11.03 N 和 0.85~0.91; 贮藏后期(75~90 d), TBHQ 仍能持续抑制蛋白质和脂肪损失率, 使豆干凝胶网络孔隙数量和大小低于引发剂组。[结论] TBHQ 对 90 d 贮藏豆干品质变化表现出长效且稳定的抑制效果, 可作为较长贮藏期豆干的优选抗氧化剂。
关键词: 休闲豆干; 油脂氧化; 特丁基对苯二酚; 品质变化; 抗氧化

Inhibitory effect of TBHQ on the deterioration of leisure dried tofu

Chen Durun^{1,2,3} Huang Zhanrui^{1,2,3} Hu Lianhua^{1,2,3} Chen Hao^{1,2,3} Zhao Dan^{1,2,3}

(1. College of Food Science and Chemical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422000, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Soybean Products Processing and Safety Control, Shaoyang, Hunan 422000, China; 3. Hunan Engineering Research Center of Green Processing and Equipment of Hunan-Style Food, Shaoyang, Hunan 422000, China)

Abstract: [Objective] To address key industrial challenges of leisure dried tofu subjected to mild sterilization, namely shortened shelf life (30~90 d) and susceptibility to photoenzyme-induced oxidative deterioration, this study aimed to elucidate the mechanisms by which tert-butylhydroquinone (TBHQ) inhibits quality deterioration in leisure dried tofu induced by photoenzyme initiators. [Methods] Leisure dried tofu was prepared using marinade treated with TBHQ and photoenzyme initiators (chlorophyll and azodiisobutyronitrile). During a 90 d storage period, dynamic changes in nutritional components, characteristic oxidation indices, textural properties, intermolecular forces, and microstructure of the dried tofu were systematically monitored. [Results] During the early storage stage (0~60 d), TBHQ significantly delayed the oxidative loss of protein (18.21 g/100 g) and fat (12.54 g/100 g), inhibited the increase in peroxide value (0.16 g/100 g), acid value (0.98 mg/g), and thiobarbituric acid reactive substances (TBARS, 1.58 mg/kg), and maintained L^* and b^* values close to those of the blank group. TBHQ stabilized disulfide bond interactions (1.96~2.48) and hydrogen bonding (0.16~0.25), while maintaining hardness and elasticity at 9.25~11.03 N and 0.85~0.91, respectively. During the late storage stage (75~90 d), TBHQ continued to inhibit the loss rates of protein and fat, resulting in fewer and smaller pores in the tofu gel network compared with the initiator group. [Conclusion] TBHQ exhibited a long-lasting and stable inhibitory effect on quality deterioration in dried tofu during 90 d of storage and can be considered a

基金项目: 邵阳学院研究生科研创新项目(编号: CX2025SY009); 湖南省自然科学基金区域联合基金项目(编号: 2024JJ7485); 湖南省教育厅科学研究项目(编号: 23A0542); 邵阳市科技计划项目(编号: 2024PT4043)

通信作者: 黄展锐(1992—), 男, 邵阳学院副教授, 博士。E-mail: zhanrui_huang@163.com

收稿日期: 2025-08-21 **改回日期:** 2026-03-06

引用格式: 陈杜润, 黄展锐, 胡莲花, 等. 特丁基对苯二酚对休闲豆干品质劣化的抑制作用研究[J]. 食品与机械, 2026, 42(8): 106-114.

Citation: Chen Durun, Huang Zhanrui, Hu Lianhua, et al. Inhibitory effect of TBHQ on the deterioration of leisure dried tofu[J]. Food & Machinery, 2026, 42(8): 106-114.

preferred antioxidant for dried tofu with extended storage periods.

Keywords: leisure dried tofu; oil oxidation; TBHQ; quality changes; antioxidant

休闲豆干主要是指非发酵型豆制品,以大豆或其他杂豆为原料制成的豆腐干。这类产品将豆腐经过烘干、卤制、调味、包装、杀菌等多道工序制成,口感鲜美、营养丰富且食用方便而颇受消费者喜爱,同时也成为休闲食品市场的重要组成部分^[1]。近年来,卤豆干加工产业规模不断扩大,为控制生产成本,采用相对廉价劣质油脂(如不饱和脂肪酸含量高的非精炼油)、简化生产流程中抗氧化环节以及卤汁循环多次使用等现象逐渐成为行业常见做法^[2-3]。廉价油脂因不饱和脂肪酸占比高在加工升温及贮藏过程中易被氧化产生大量自由基和过氧化物^[4],简化抗氧化环节直接削弱产品对氧化的抵抗能力,卤汁循环使用则会累积前序加工中产生的氧化次级产物(如醛类、酮类)^[5],以上因素均易导致卤豆干在生产后发生氧化型品质劣变(表现为油脂酸败、蛋白质凝胶结构破坏、风味劣变)并引起食品安全风险。

Guyon等^[6]研究表明,脂质氧化与蛋白质氧化密切相关,各反应的某些标记物相关性较高。脂质和蛋白质氧化是自由基链式反应,脂质氧化产生的过氧化氢自由基和次级产物(醛类化合物)会促进蛋白质的氧化^[7-8],蛋白质氧化会导致凝胶结构(蛋白质—水和蛋白质—蛋白质)破坏,致使与蛋白质结合的水释放成为自由水,进而影响休闲豆制品的风味、口感和营养价值^[9]。近年来,在休闲豆干工业化生产中,一个核心挑战在于如何实现对产品品质的有效控制,并显著降低潜在的食品安全风险,其关键是确保豆干在经历贮藏、运输及销售等流通环节后,依然能够维持其良好的品质、营养成分,并持久地呈现出其独特的风味特征。而这一贯穿全过程的品质稳定性问题,是提升产业水平的关键难点。因此,课题组前期分析了不同氧化引发剂对卤汁和卤豆干营养成分的影响,发现叶绿素协同偶氮二异庚腈能诱导卤豆干营养成分发生显著变化^[10]。然而,目前如何有效控制光酶引发剂诱导卤汁氧化引起休闲豆干品质变化的研究未见报道,且现有研究未关注光酶诱导下抗氧化剂对豆干蛋白质/脂质协同氧化的调控作用,无法满足企业对该类豆干品质控制的实际需求,成为该领域有待解决的关键技术问题。

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^[11],其中特丁基对苯二酚(TBHQ)是目前市场上应用较广泛的一种高效合成抗氧化剂,其分子结构由两个对位羟基和一个邻位叔丁基组成。这种独特的结构赋予其强大的自由基清除能力:酚羟基通过供氢机制(HAT)直接捕获脂质过氧自由基(LOO·)和烷氧自由基(RO·),终止氧化链式反应;而邻位叔丁基的空间

位阻效应可稳定酚氧自由基中间体,延缓其自身氧化^[12-13]。然而,现有研究多聚焦于单一抗氧化剂效果或贮藏环境影响,而针对“温和杀菌—短保质期—光酶协同氧化”这一特定场景的劣变机制及防控策略研究仍存在空白。

为精准探究氧化因素对休闲豆干品质的影响,研究拟采用TBHQ与光酶氧化引发体系(叶绿素、偶氮二异庚腈)协同处理卤汁,并以不同处理组卤汁卤制豆干,杀菌后系统监测休闲豆干在90 d关键贮藏期内品质特性(营养成分含量、特征氧化指标、质构特性、色差、分子间作用力及微观结构)的变化规律,旨在揭示TBHQ对光酶引发剂诱导豆干品质劣变的抑制机理,为拓宽TBHQ抗氧化应用及温和杀菌豆干品质控制提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

大豆、卤料、菜籽油等原料:市售;

TBHQ标准品、2-巯代巴比妥酸、1-丁醇:分析纯,上海源叶生物科技有限公司;

偶氮二异庚腈、油溶性叶绿素:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

硫代硫酸钠、无水硫酸钠、冰乙酸、三氯甲烷、碘化钾:分析纯,迈森生物科技有限公司;

p-茴香胺、异辛烷、无水硫酸钠:分析纯,广东光华科技有限公司;

其他化学试剂:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

电子天平:AB104-N型,上海第二天平仪器厂;

智能集成制浆设备:ZJJC-100-RC-001型,北京康得利智能科技有限公司;

自动凯氏定氮仪:UDK139型,北京盈盛恒泰科技有限责任公司;

色差仪:CR-400型,日本柯尼卡美能达公司;

质构仪:LS-5型,美国阿美特克有限公司;

真空脉冲卤制设备:FYLZ-1型,北京康得利智能科技有限公司;

扫描电子显微镜:MC1000型,日本HITACHI公司;

紫外可见分光光度计:T-8型,南京菲勒仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 卤汁与休闲豆干的制备 参照伍涛等^[14]的方法制

备卤汁,参照周衡平等^[10]的方法设置引发剂浓度。设置空白组、引发剂组和引发剂+TBHQ组,其中空白组和引发剂组根据周衡平等^[10]的方法处理,引发剂+TBHQ组在引发剂组基础上额外添加 0.02 g/100 g TBHQ(依据 GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》中 TBHQ 的最大使用限量设定)。豆干卤制及样品采集参照颜娜等^[15]的方法。

1.3.2 营养成分测定 参照 Huang 等^[16]的方法。

1.3.3 质构特性测定 参照伍涛等^[14]的方法。

1.3.4 特征氧化指标测定

(1) 过氧化值(POV)和硫代巴比妥酸值(TBARS 值):参照 Huang 等^[16]的方法。

(2) 茴香胺值和酸价:参照侯天宇等^[17]的方法。

1.3.5 色差测定 采用 CR-400 型色差仪。

1.3.6 分子间作用力测定 参照黄嘉琪等^[18]的方法。

1.3.7 微观结构测定 参照黄嘉琪等^[18]的方法。

1.4 数据处理及分析

每个样品均重复进行 3 次,试验数据均以“平均值±标准差”表示,使用 SPSS 22.0 和 Origin 9.1 进行统计分析和方差分析,显著性差异水平设置为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 TBHQ 和引发剂对休闲豆干营养成分的影响

TBHQ 的添加显著改变了氧化引发剂对休闲豆干营养成分的破坏模式(图 1)。在贮藏全程(0~90 d),引发剂+TBHQ 组豆干蛋白质含量始终高于引发剂组,90 d 时仍保持 16.79 g/100 g(较引发剂组高 11.56%),脂肪含量达 11.49 g/100 g(较引发剂组高 3.98%),且水分含量增幅被限制在 10.91%(空白组为 15.82%)。特别在 30~60 d 关键阶段,TBHQ 使蛋白质损失率降低至 0.14%/d(引发剂组为 0.27%/d),这得益于其独特的双酚羟基结构可高效淬灭脂质过氧自由基,同时通过螯合金属离子阻断 Fenton 反应,从而减少活性氧对蛋白质硫醇基团攻击^[19-20]。

TBHQ 对豆干中碳水化合物的保护呈现两阶段特征:前 60 d 内碳水化合物含量稳定在 8.65~8.39 g/100 g(变异系数 $<2\%$),但在 75~90 d 出现明显下降(至 7.45 g/100 g)。这可能与 TBHQ 对美拉德反应的调控作用相关,前期通过抑制脂质氧化终产物(如丙二醛)的生成,延缓还原糖与氨基化合物的结合^[21];后期因体系水分活度升高,TBHQ 对非酶褐变的抑制作用减弱。此外,引发剂+TBHQ 组豆干在整个贮藏期维持较低的自由水比例,

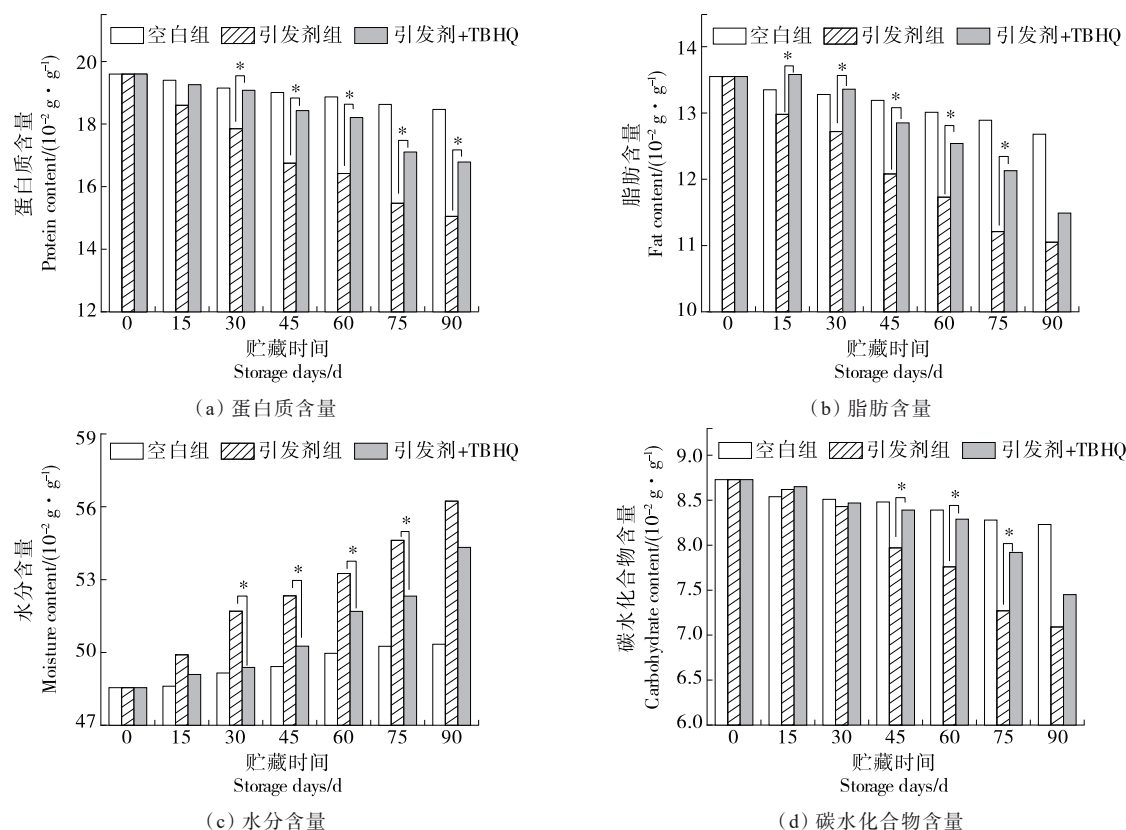


图 1 TBHQ 和引发剂作用下休闲豆干营养成分含量变化

Figure 1 Effects of TBHQ and initiators on nutrient content of leisure dried tofu

说明其通过增强蛋白质-脂肪相互作用力,改善凝胶网络持水性,这种特性可能源于TBHQ苯环上的疏水基团能维持蛋白结构完整性并促进蛋白分子间疏水缔合^[22]。

2.2 TBHQ和引发剂对休闲豆干特征氧化指标的影响

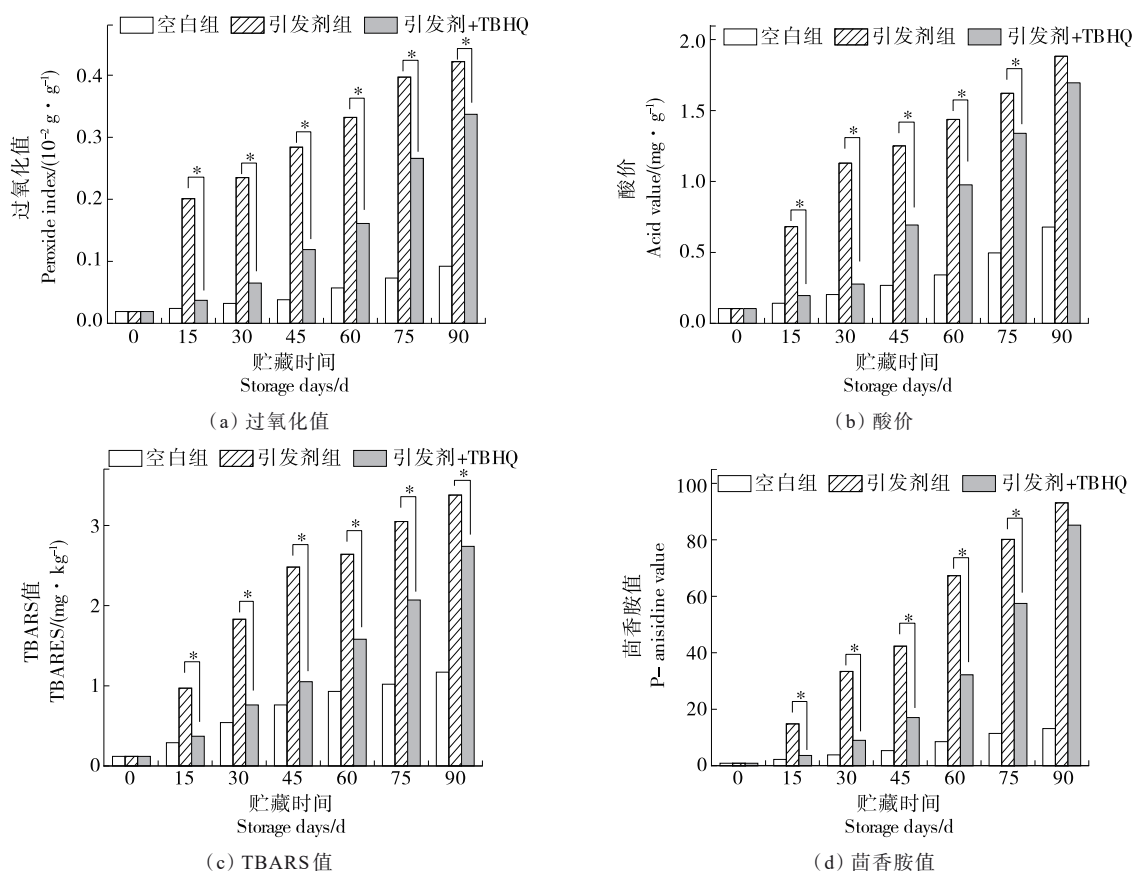
不同贮藏时间下各试验组休闲豆干POV、酸价、TBARS值及茴香胺值变化如图2所示。TBHQ对氧化引发剂诱导的豆干特征氧化指标变化展现出贯穿贮藏全程的强效抗氧化特性。引发剂+TBHQ组豆干在60 d时POV、酸价、TBARS值及茴香胺值分别为0.16 g/100 g, 0.98 mg/g, 1.58 mg/kg, 32.27, 较引发剂组降低51.51%, 32.08%, 40.15%, 52.09%, 且所有指标在贮藏期内始终低于氧化酸败阈值(POV $\leq$ 0.2 g/100 g, 酸价 $\leq$ 1.0 mg/g, TBARS值 $\leq$ 2.0 mg/kg)。这种长效稳定性源于TBHQ的双重作用机制:①其邻位二酚羟基结构可快速还原脂质过氧自由基,阻断自由基链式传递^[23];②TBHQ的叔丁基空间位阻效应可螯合Fe²⁺/Cu²⁺等促氧化金属离子,抑制羟自由基通过Fenton反应生成^[24]。

特别在贮藏后期(75~90 d),TBHQ对引发剂诱导豆干特征氧化指标变化的抑制优势更加显著。此阶段豆干

中POV日均增幅仅为0.002 4 g/100 g(引发剂组为0.004 3 g/100 g),而茴香胺值增速减缓至0.82 d⁻¹(引发剂组为1.37 d⁻¹)。这种持续性可能与TBHQ的分子稳定性有关:其苯环上的疏水基团可嵌入蛋白质疏水腔,避免与水相中的亲核物质反应^[24];同时,TBHQ在高温高湿环境下的半衰期较天然抗氧化剂延长3~5倍^[19],确保长期贮藏中的有效浓度,这可能是其维持豆干色泽与风味稳定的重要机制。

2.3 TBHQ和引发剂对休闲豆干质构特性的影响

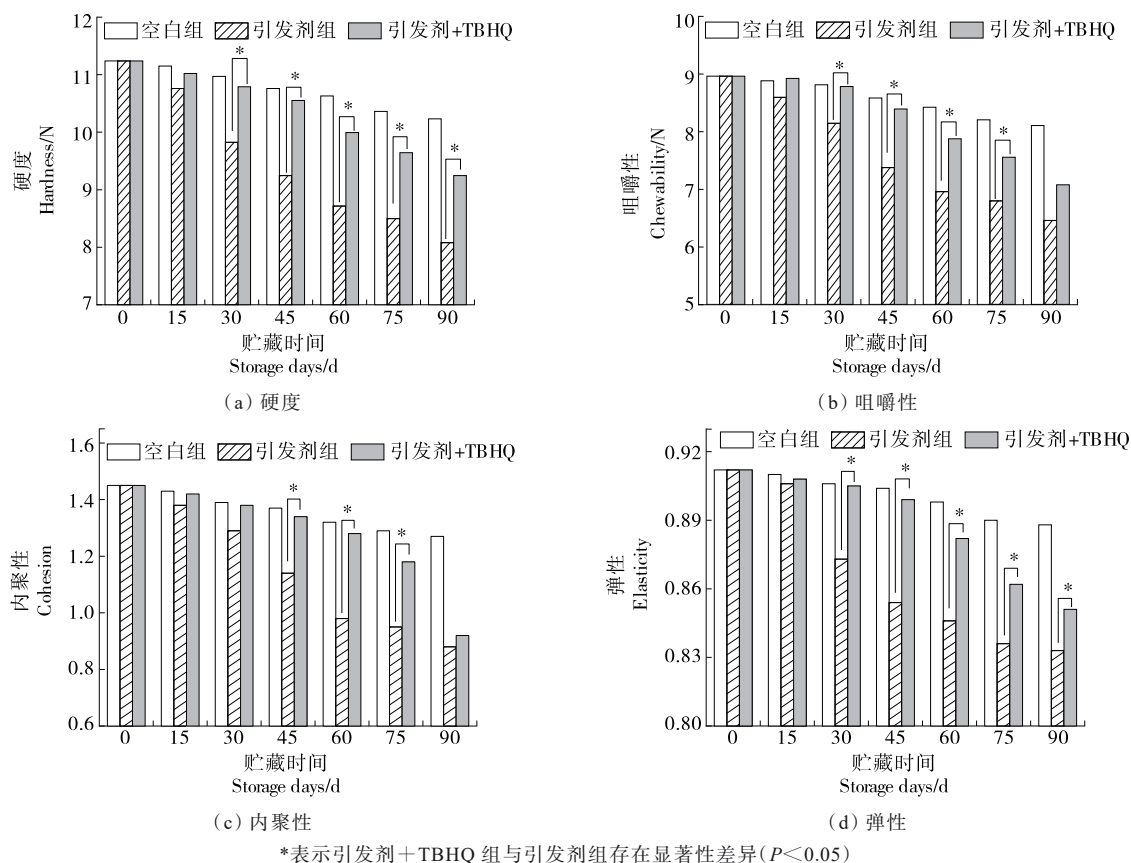
同贮藏时间下各试验组休闲豆干质构特性变化如图3所示,TBHQ展现出对豆干质构特性的长效稳定作用。在整个贮藏周期(0~90 d),引发剂+TBHQ组豆干硬度始终高于9.25 N(60 d时为9.99 N,较引发剂组高12.74%),咀嚼性维持在7.08~8.93 N范围(变异系数 $<$ 8.36%)。内聚性和弹性分别稳定在0.92~1.42和0.85~0.91,0~45 d与空白对照组无统计学差异($P>0.05$)。这种稳定性源于TBHQ的双重抑制机制:①其邻位酚羟基通过清除自由基减少蛋白质侧链氧化以及羰基含量,维持大豆蛋白头部结构稳定性^[25];②叔丁基疏水基团促



*表示引发剂+TBHQ组与引发剂组存在显著性差异($P < 0.05$)

图2 TBHQ和引发剂作用下休闲豆干特征氧化指标变化

Figure 2 Effects of TBHQ and initiators on characteristic oxidation indicators in leisure dried tofu



*表示引发剂+TBHQ 组与引发剂组存在显著性差异($P < 0.05$)

图3 TBHQ和引发剂作用下休闲豆干质构特性变化

Figure 3 Effects of TBHQ and initiators on textural properties of leisure dried tofu

进蛋白质—脂质复合体的形成^[26],增强凝胶网络机械强度。

特别在贮藏后期(75~90 d),TBHQ对氧化引发剂诱导的豆制品质构特性变化的抑制优势还较为突出。此阶段硬度降幅仅为0.12%/d(引发剂组为0.31%/d),弹性维持在0.85以上。这种持续性可能与TBHQ的分子构型相关:其空间位阻效应可抑制抗氧化剂自身氧化,同时通过螯合金属离子阻断羟自由基对胶原蛋白的切割作用^[27]。此外,TBHQ通过抑制美拉德反应晚期产物积累(荧光值降低29.8%)^[28],延缓非酶交联导致的凝胶脆性增加,这是其维持豆干咀嚼性的重要机制。

2.4 TBHQ和引发剂对休闲豆干色差的影响

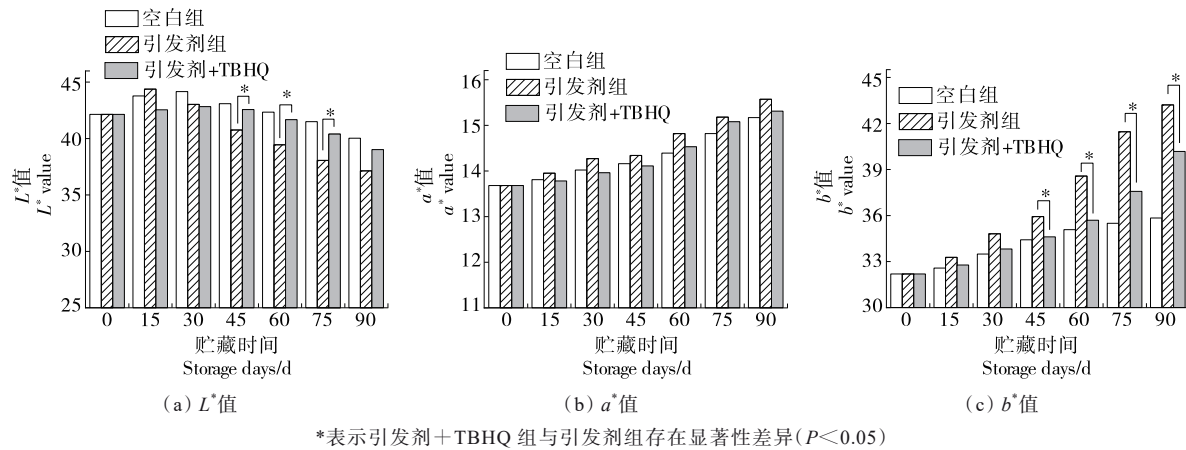
不同贮藏时间下空白组、引发剂组和引发剂+TBHQ组豆干色差变化如图4所示,各试验组豆干 a^* 值均随贮藏时间延长出现小幅增高趋势,分别从初始值13.68逐渐增加至15.17,15.57,15.31。由图4可知,TBHQ展现出对豆干色泽的全周期稳定抑制作用。在整个贮藏期(0~90 d),引发剂+TBHQ组豆干 L^* 值始终高于39(90 d时为39.02),较引发剂组高5.09%; b^* 值增幅被限制在 0.09 d^{-1} (引发剂组为 0.13 d^{-1}),90 d时仅为40.18(较引发剂组低

7.01%)。这种长效护色效应源于TBHQ的多靶点抑制机制:首先,其邻位酚羟基通过淬灭单线态氧,减少光敏色素降解;其次,叔丁基空间位阻效应可特异性抑制羧甲基赖氨酸等晚期美拉德产物的形成;此外,TBHQ通过螯合 Cu^{2+} ,阻断金属离子催化的多酚氧化酶促褐变反应^[27]。

特别在贮藏后期(75~90 d),TBHQ的护色优势比茶多酚和维生素E更为突出。此阶段 L^* 值降幅仅为0.12%/d(引发剂组为0.38%/d), b^* 值增速减缓至 0.09 d^{-1} (引发剂组为 0.24 d^{-1})。这种持续性可能与其分子稳定性密切相关:TBHQ在Aw 0.85~0.90条件下的降解半衰期较维生素E延长2~4倍,且其疏水苯环可嵌入蛋白质疏水结构域,避免与水相中亲核物质(如氨基化合物)发生副反应^[29]。此外,TBHQ通过抑制脂质—蛋白质协同氧化,使荧光性AGEs(如pentosidine)含量减少^[30],这是其维持豆干亮度的关键机制。

2.5 TBHQ和引发剂对休闲豆干蛋白质分子间作用力的影响

不同贮藏时间下空白组、引发剂组和引发剂+TBHQ组豆干蛋白质分子间作用力变化如图5所示。首先,TBHQ对氢键作用力的保护呈现“表面优先、全程稳定”特



*表示引发剂+TBHQ组与引发剂组存在显著性差异($P < 0.05$)

图4 TBHQ和引发剂作用下休闲豆干色差变化

Figure 4 Effects of TBHQ and initiators on color difference of leisure dried tofu

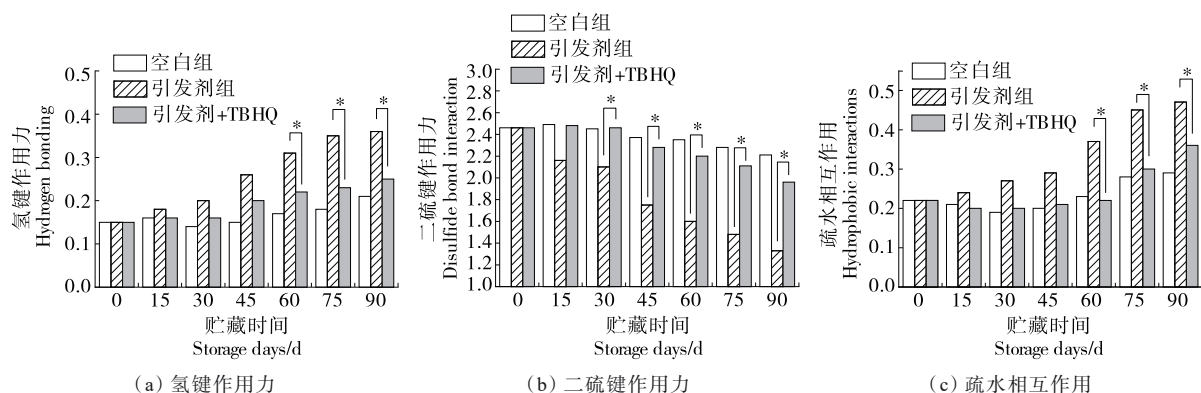
征。贮藏期内,引发剂+TBHQ组氢键作用力始终低于引发剂组(0.16~0.25 vs 0.18~0.36),且与空白组(0.16~0.21)无显著差异($P > 0.05$)。推测这种高效调控源于TBHQ分子结构优势:① 小分子渗透性:TBHQ相对分子质量仅为维生素E的1/3,可快速扩散至蛋白质表面极性区域,在氧化应激初期(0~15 d)即形成保护层^[31];② 自由基清除靶向性:其邻位酚羟基优先淬灭脂质过氧自由基($\text{LOO}\cdot$),速度较维生素E和茶多酚快^[31-32],有效阻断自由基对氢键供体(如谷氨酰胺侧链— NH_2)的氧化修饰。此外,有研究^[33]证实,TBHQ通过形成氢键与蛋白质表面极性残基(如天冬氨酸— COOH)结合,可阻断水分子的竞争性氢键形成,从而抑制豆干贮藏后期蛋白质分子间氢键的异常增强。

此外,TBHQ对豆干蛋白质分子间疏水相互作用的保护呈现“前期高效、后期衰减”特征。在0~60 d阶段,引发剂+TBHQ组豆干蛋白质分子间疏水作用力接近空白组,增幅显著低于引发剂组;但在75~90 d阶段,疏水

相互作用增幅略有上升至0.36(显著低于引发剂组0.47)。猜测出现以上现象的原因有:① TBHQ的苯环疏水性显著低于维生素E,难以深入蛋白质疏水核心^[34];② TBHQ对已暴露的疏水基团(如通过氧化形成的疏水斑块)缺乏结构修复功能,仅能通过清除自由基延缓进一步氧化^[32];③ TBHQ在高水分活度($A_w > 0.85$)下,TBHQ在脂—水界面的分配系数下降^[33],削弱对深层疏水区的保护。

2.6 TBHQ和引发剂对休闲豆干微观结构的影响

不同贮藏时间下空白组、引发剂组和引发剂+TBHQ组豆干微观结构如图6所示。在整个贮藏期,引发剂+TBHQ组蛋白质凝胶网络保持高度均一,平均孔径和孔隙率始终低于引发剂组。TBHQ对氧化引发剂诱导豆干蛋白质凝胶微观结构变化的抑制机制可能包括:① 自由基靶向清除:TBHQ邻位酚羟基对脂质过氧自由基强清除作用,能有效阻断氧化应激对蛋白质主链的攻击^[25];② 金属螯合屏障:通过螯合 $\text{Fe}^{2+}/\text{Cu}^{2+}$ 抑制金属催化型羟



*表示引发剂+TBHQ组与引发剂组存在显著性差异($P < 0.05$)

图5 TBHQ和引发剂作用下休闲豆干蛋白质分子间作用力变化

Figure 5 Effects of TBHQ and initiators on intermolecular forces of proteins in leisure dried tofu

自由基生成,有效降低蛋白质羰基含量^[27];③ 构象稳定效应:TBHQ 的小分子特性使其渗透至蛋白质疏水腔,通过 π - π 堆积作用稳定 β -折叠构象,抑制氧化诱导的 α -螺旋向无规卷曲转变^[26,35]。

与其他抗氧化剂相比,TBHQ 的微观结构保护具有“全域均衡”特征,其主要原因可能包括 3 个方面:① 亲水-疏水协同作用,酚羟基保护极性区域,叔丁基稳定疏水核心^[36],使氧元素分布均匀;② 动态适应能力,氧化生

成的 TBHQ(叔丁基对苯二酚)仍可通过醌-氢醌循环,持续清除新生自由基;③ 结构-功能耦联,微观结构与质构特性(硬度、弹性)呈显著正相关,证实其保护机制的系统性。此外,各试验组豆干微观结构变化与其质构特性变化相关联,阐明了 TBHQ 能有效抑制引发剂诱导豆干品质特性变化,基于 TBHQ 强抗氧化作用能有效维持蛋白质凝胶结构和持水性,进而保护豆干营养成分和质构特性变化。

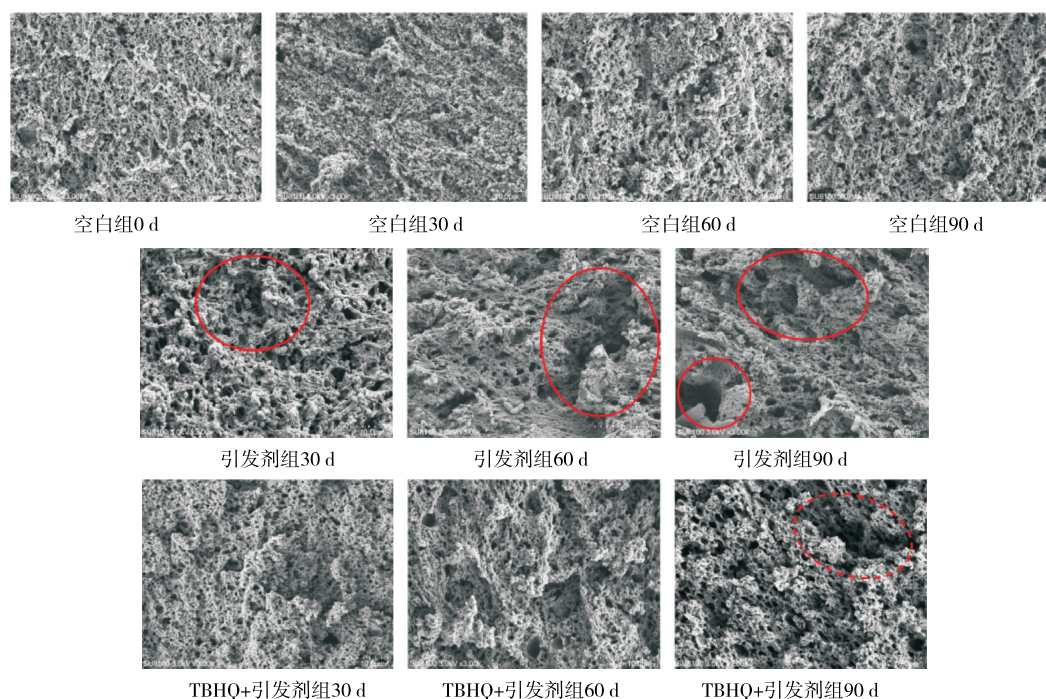


图 6 TBHQ 和引发剂作用下休闲豆干微观结构变化

Figure 6 Effects of TBHQ and initiators on microstructure of leisure dried tofu

3 结论

特丁基对苯二酚在 90 d 贮藏全程对光酶引发剂诱导的豆干品质劣变均表现出较稳定的抑制作用。相较于未加特丁基对苯二酚的光酶引发剂组,特丁基对苯二酚能显著延缓蛋白质和脂肪的氧化损失,抑制过氧化值、酸价和硫代巴比妥酸值上升,并维持 L^* 和 b^* 值接近空白组水平。分子间作用力分析表明特丁基对苯二酚通过稳定二硫键作用力和氢键作用力,维持硬度和弹性保持较好水平,使凝胶网络孔隙数量和大小全程低于引发剂组。需客观指出,特丁基对苯二酚组豆干部分指标略低于空白组,推测原因在于特丁基对苯二酚主要通过供氢机制清除自由基,对已生成的次级氧化产物的降解能力有限导致后期与空白组存在一定差异。后续将开展特丁基对苯二酚与天然抗氧化剂的复配研究,并利用分子对接或荧光猝灭等技术解析特丁基对苯二酚与蛋白质/脂质的相互

作用位点及其作用机制。

参考文献

- [1] 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 Q H, Zhao L Z, Li H Q, et al. Research on quality changes and spoilage mechanism of leisure soybean food during storage [J]. Food & Machinery, 2015, 31(1): 116-119, 211.
- [2] 杜垒, 谢伟, 徐幸莲, 等. 复卤前后盐水鸭老卤基本成分与安全指标变化[J]. 食品科学, 2009, 30(13): 101-104.
Du L, Xie W, Xu X L, et al. Changes of main components of old brine used in production of water-boiled salted duck and determination of safety indexes before and after rebrining[J]. Food Science, 2009, 30(13): 101-104.
- [3] 吴俊师, 刘巧瑜, 陈俊文, 等. 重复卤制对卤汁品质的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(7): 70-75.
Wu J S, Liu Q Y, Chen J W, et al. Effect of repeated marinating

- on the quality of marinade[J]. China Condiment, 2021, 46(7): 70-75.
- [4] Huang Y Q, Zheng Y R, Huang Z R, 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.
- [5] 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 H, Yang Y, Zhao L Z, et al. The safety monitoring and early-warning model construction for Xiangpai brine recycling [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(21): 181-187.
- [6] Guyon C, Meynier A, De Lamballerie M. Protein and lipid oxidation in meat: a review with emphasis on high-pressure treatments[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 50: 131-143.
- [7] 瞿丞, 贺稚非, 王兆明, 等. 不同食盐添加量腌制对鸡肉脂质氧化、蛋白质氧化及食用品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 77-85.
- Qu C, He Z F, Wang Z M, et al. Effects of different salt concentrations on lipid oxidation, protein oxidation and eating quality of cured chicken meat[J]. Food Science, 2020, 41(16): 77-85.
- [8] 李泽坤, 肖宇, 焦阳, 等. 脂质和蛋白质氧化对肉品质的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(7): 438-449.
- Li Z K, Xiao Y, Jiao Y, et al. Effects of lipid and protein oxidation on meat quality[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(7): 438-449.
- [9] 张蒙琪. 鸡蛋蛋白与大豆分离蛋白间相互作用及其凝胶特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 34.
- Zhang M Q. The research of interaction between hen egg proteins and soybean protein isolate and its gelation properties [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 34.
- [10] 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 H P, Huang Z R, Zhao L Z, et al. Effects of different oxidation conditions on nutritional components of marinade and marinated dried tofu[J]. Agricultural Products Processing, 2024(9): 9-13.
- [11] 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 X, Guo M M, Fan W G, 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.
- [12] 于立芹, 张华南, 徐如冰, 等. 特丁基对苯二酚与迷迭香提取物对亚麻籽贮藏稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(5): 257-261.
- Yu L Q, Zhang H N, Xu R B, et al. Effects of tert-butylhydroquinone and rosemary extract on the storage stability of *Camelina sativa* (L.) crantz seed oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(5): 257-261.
- [13] Rababah M T, Ereifej I K, Alhamad N M, et al. Effects of green tea and grape seed and TBHQ on physicochemical properties of baladi goat meats[J]. International Journal of Food Properties, 2011, 14(6): 1 208-1 216.
- [14] 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 T, Peng X L, Zhao L Z, et al. Variation law of Xiangpai dried tofu and brine during marinating process[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(19): 146-154.
- [15] 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.
- Yan N, He W Y, Huang Z R, 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.
- [16] Huang Z R, Zhou H P, Jiang Q H, et al. Study on the quality change and deterioration mechanism of leisure dried tofu under different storage temperature conditions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 172: 114257.
- [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 T Y, Xie L W, Liang Y X, 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] 黄嘉琪, 刁欣蕊, 向佳豪, 等. 茶多酚对氧化引发剂诱导的休闲豆干品质劣化的保护作用研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(22): 288-295.
- Huang J Q, Diao X R, Xiang J H, et al. Study on protective effect of tea polyphenols on quality deterioration of leisure dried tofu induced by oxidative initiators[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(22): 288-295.
- [19] Ignacio G, Sara L, Patricia M, et al. Terpenoids and polyphenols as natural antioxidant agents in food preservation [J]. Antioxidants, 2021, 10(8): 1 264.
- [20] Maleki H M, Daneshniya M, Latifi Z, et al. Evaluating the potential of phytochemicals as natural substitute for synthetic antioxidant: a review[J]. Asian Journal of Research in Biochemistry, 2022, 10(1): 36-62.
- [21] Shams A, Mortazavi A S, Khosravi K, et al. A comparison between ascorbylpalmitate encapsulated with nanoliposomes as a natural antioxidant and conventional antioxidants (TBHQ and BHA) in the oxidative stability of sunflower oil[J]. Biosciences Biotechnology Research Asia, 2016, 13(4): 2 135-2 142.
- [22] 李军, 毕艳兰, 孙尚德, 等. 叔丁基对苯二酚及其氧化产物与牛血清蛋白的相互作用[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(4): 133-140.
- Li J, Bi Y L, Sun S D, et al. Interaction among tertiary butylhydroquinone and its oxidation product with bovine

- serum albumin[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(4): 133-140.
- [23] 高沛, 姜启兴, 李姝琦, 等. TBHQ 对油炸花生米抗氧化稳定性的影响研究[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(3): 186-189.
Gao P, Jiang Q X, Li S Q, et al. Study on the effects of TBHQ on antioxidation stability of fried peanuts[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(3): 186-189.
- [24] 徐梦琪, 祝振杰, 陈小军, 等. 特丁基对苯二酚在不同油脂贮存过程中转化产物的识别、分离与鉴定[J]. 食品科学, 2024, 45(4): 42-49.
Xu M Q, Zhu Z J, Chen X J, et al. Identification and separation of transformed products of tert-butylhydroquinone added in different oils and fats during storage[J]. Food Science, 2024, 45(4): 42-49.
- [25] Tongdeesontorn W, Mauer L J, Wongruong S, et al. Antioxidant films from cassava starch/gelatin biocomposite fortified with quercetin and TBHQ and their applications in food models[J]. Polymers, 2021, 13(7): 1 117.
- [26] Abegaz G E, Kerr L W. Effect of moisture, sugar and tertiary butylhydroquinone on color, texture and microstructure of peanut paste[J]. Journal of Food Quality, 2006, 29(6): 643-657.
- [27] Squizzato A L, Richter E M, Munoz R A A. Voltammetric determination of copper and tert-butylhydroquinone in biodiesel: a rapid quality control protocol[J]. Talanta, 2019, 201: 433-440.
- [28] Han L P, Lin Q N, Liu G Q, et al. Inhibition mechanism of catechin, resveratrol, butylated hydroxyanisole, and tert-butylhydroquinone on carboxymethyl 1, 2-dipalmitoyl-sn-glycero-3-phosphatidylethanolamine formation[J]. Journal of Food Science, 2019, 84(8): 2 042-2 049.
- [29] 刘普, 张丽娜, 张江磊, 等. 几种天然抗氧化剂对牡丹籽油氧化稳定性的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(7): 54-61.
Liu P, Zhang L N, Zhang J L, et al. Effects of several natural antioxidants on the oxidative stability of peony seed oil[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(7): 54-61.
- [30] Xiao S L, Zhuang H, Zhou G H, et al. Investigation of inhibition of lipid oxidation by *L*-carnosine using an oxidized-myoglobin-mediated washed fish muscle system[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 97: 703-710.
- [31] 叶绮云, 宋思园, 全育集, 等. 天然抗氧化剂在食用油脂中抗氧化作用的研究[J]. 现代食品, 2022, 28(11): 177-180.
Ye Q Y, Song S Y, Quan Y J, et al. Study on antioxidation of natural antioxidants in edible oil[J]. Modern Food, 2022, 28(11): 177-180.
- [32] Xu M Q, Yu Y X, Li J, et al. A mechanistic perspective: how does tert-butylhydroquinone retain antioxidative efficacy in edible oils during storage? [J]. Food Chemistry, 2025, 493(Pt 3): 145963.
- [33] Li J, Chen J L, Bi Y L, et al. Insight into synergistic antioxidation mechanisms of butyl hydroxyanisole with common synthetic antioxidants[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2022, 5(3): 114-130.
- [34] Hajar Z, Mostean B, Yahya S, 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): 1 875.
- [35] Abdollah S H, Hanieh P, Askar G. Evaluation of oxidative stability of cupcake oil: comparison of antioxidant properties of dracocephalum kotschyi essential oil versus TBHQ[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2022, 124(7): 2100197.
- [36] Zeng Y, Yu Z W, Zhang Y B, et al. Comparative study on the antioxidant efficacy of *adinandra nitida* extracts in inhibiting lipid oxidation in edible oils[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101783.