

儿茶素对面包贮藏期内氧化性质和感官品质的影响

石长波¹, 梁昌谋¹, 赵钜阳¹, 孙昕萌^{1,2}, 徐朔¹

(1. 哈尔滨商业大学 旅游烹饪学院, 哈尔滨 150028;

2. 江苏旅游职业学院 烹饪科技学院, 江苏 扬州 225000)

摘要: **目的** 研究儿茶素对面包贮藏品质的影响。**方法** 将儿茶素(质量分数为 0%、0.025%、0.05%、0.1%、0.2%、0.4%)添加到面团中, 研究不同添加量儿茶素对面包的热性质、比容、感官质量、巯基、氧化稳定性、自由基清除能力、色泽、质构特性的影响。**结果** 随着儿茶素添加量的提高, 面包的比容先增大后减小; 添加质量分数 0.05% 儿茶素的面包的比容最大 ($P < 0.05$)。在贮藏 1~5 d 内, 面包的巯基含量、过氧化值和硫代巴比妥酸值随着儿茶素添加量的增加逐渐降低, DPPH 自由基清除率和 ABTS 自由基清除率总体上逐渐升高。**结论** 将儿茶素加入面包中起到了抗氧化作用, 儿茶素可用于功能型面包的制作。

关键词: 面包; 儿茶素; 贮藏品质; 抗氧化能力

中图分类号: TS213.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)13-0120-12

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.13.015

Effects of Catechin Concentration on Oxidative Property and Sensory Quality of Bread During Storage

SHI Chang-bo¹, LIANG Chang-mou¹, ZHAO Ju-yang¹, SUN Xin-meng^{1,2}, XU Shuo¹

(1. College of Tourism and Cooking, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China;

2. Institute of Culinary Technology, Jiangsu Vocational College of Tourism, Jiangsu Yangzhou 225000, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of catechin concentration on the storage quality of bread. The effects of different concentrations of catechin (0%, 0.025%, 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.4%) on the thermal property, specific volume, sensory quality, sulfhydryl group, oxidation stability, free radical scavenging ability, color and texture of bread were investigated. With the increase of catechin content, the specific volume of bread first increased and then decreased. The specific volume of bread with 0.05% catechin was the largest ($P < 0.05$). During the storage of 1-5 d, the sulfhydryl content, peroxide value and thiobarbiturate value of bread gradually decreased with the addition of catechin, while the DPPH free radical scavenging rate and the ABTS free radical scavenging rate gradually increased. The addition of catechin improved the antioxidant activity of the bread. Catechin can be used in functional breads.

KEY WORDS: bread; catechin; storage quality; antioxidant capacity

面包是一类焙烤性面制食品, 因其口感松软、风味独特而备受青睐。在贮藏一定时间后, 面包因老化

而导致内部组织变硬、水分迁移、表皮软化、风味变差, 最终降低面包的品质^[1-2]。已有研究表明, 多酚

收稿日期: 2022-11-18

基金项目: 哈尔滨商业大学校级教学改革与教学研究项目 (HSDJY202127Z); 黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划 (UNPYSCT-2020213)。

作者简介: 石长波 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为烹饪科学。

通信作者: 赵钜阳 (1987—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为大豆蛋白加工、烹饪科学。

类物质能促进蛋白质发生新的交联作用,改善面筋的网络结构,从而提高面包的品质^[3]。

多酚类物质作为抗氧化剂,具有多种生物活性,可以预防心肌梗塞和糖尿病等疾病,有益于健康^[4-5]。儿茶素作为多酚的一种,广泛存在于茶叶等天然物质中,具有防癌、抗癌^[6]、防止DNA断裂^[7]和防衰老^[8]等多种功效,具有极强的抗氧化能力^[9]。研究发现,儿茶素可与面筋相互作用,改善面筋的结构和面团的性质。Tian等^[7]发现,表儿茶素没食子酸酯(Epicatechin Gallate, ECG)和没食子儿茶素没食子酸酯(Epigallocatechin Gallate, EGCG)单体诱导谷蛋白和富含谷蛋白的部分会形成更紧凑的网络结构,导致富含麦胶溶蛋白部分形成了组织有序的网络,这2种酯型儿茶素单体在提高面筋强度方面发挥了主要作用。

文中通过向面包面团中添加不同含量的儿茶素,对成品面包的热性质、比容、感官品质进行分析,并研究在贮藏期间(1~5 d)添加儿茶素对面包的巯基、过氧化值(Peroxidation Value, POV)、硫代巴比妥酸(Thiobarbituric Acid, TBA)值、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-Diphenyl-2-Trinitrophenylhydrazine, DPPH)自由基清除率、2,2'-叠氮基-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)(2,2'-Azide-(3-Ethylbenzothiazolin-6-Sulfonic Acid), ABTS)自由基清除率、色泽和质构的影响,进而考察儿茶素对面包贮藏特性的影响,为研究功能型面包提供参考。

1 实验

1.1 材料与仪器

主要材料:新良高筋面粉,濮阳面粉公司;舒可曼白砂糖、鸡蛋、盐,天猫超市;面包改良剂、干酵母,安琪酵母股份有限公司;塔拉额吉烘焙黄油,呼和浩特市奥特乳业有限公司;硫氰酸铵、儿茶素(纯度≥98%),合肥博美科技公司;氯化钼,天津市抚育精细化科技有限公司;三氯乙酸、氯化钠、硫酸亚铁、甲醇、盐酸、氯仿,均为分析纯,哈尔滨市道外区欣盛仪器经销部。

主要仪器:KW-60 烤箱,北京盈盛恒泰公司;TA1 质构仪,散丰仪器公司;721N/752 紫外可见光光度计,菁华仪器公司;800-1 离心机,金坛区指前镇旭日实验仪器有限公司;NR10QC 高精度色差仪,南京晓晓仪器公司;JD200-3 天平,沈阳天平仪器公司;FJ200 实验室均质乳化机,深圳市百隆盛达贸易有限公司。

1.2 方法

1.2.1 面包的基本配方及生产工艺流程

面包的基本配方:高筋面粉 250 g,水 150 g,鲜

酵母 5 g,细砂糖 40 g,盐 2 g,鸡蛋 2 个,面包改良剂 5 g,黄油 40 g。面包生产工艺流程:原料→调和面团→加黄油→揉出手套膜→盖布发酵→松弛→分割→滚圆→进模具→二发→烘烤。儿茶素面包的制作根据文瑜等^[10]的实验面包配方稍加改动,以下是具体步骤。

1) 预混。称量不同添加量的儿茶素(0、0.037 5、0.075、0.15、0.3、0.6 g),取高筋面粉 250 g、水 150 g、鲜酵母 5 g、细砂糖 40 g、盐 2 g、面包改良剂 5 g、鸡蛋 2 个、黄油 40 g,将上述原料拌匀。

2) 面团制作。把所有材料(除黄油外)加入和面机,搅拌到面团无粗糙疙瘩。再加入黄油,直到能揉出手套膜。

3) 醒发。将揉好的面团醒发 20 min。

4) 二次醒发。将面团用擀面杖仔细擀过一遍,以去除大气泡,再经切割整圆后,在发酵箱内(35℃,相对湿度 70%)醒发 50 min。

5) 将面团放入预热好的烤箱,上火温度为 180℃,下火温度为 190℃,烤制 35 min。

1.2.2 实验组别设计

根据郑妍等^[11]的实验稍加改动,经预实验确定儿茶素添加量的适宜范围,选取儿茶素的添加量为生面团质量的 0%、0.025%、0.05%、0.1%、0.2%、0.4%,测定生面团的差示扫描量热分析值。将面包分成 2 组:一组用于测定比容和感官评价;另一组用于贮藏(1~5 d),测定面包的 POV 值、TBA 值、自由基清除能力(DPPH 和 ABTS)、色度和质构。

1.2.3 面包差示扫描量热分析

将 10 mg 生面团用夹子装入坩埚,并放入差示扫描量热仪中。从 30℃开始,按升温速率 10℃/min 升温至 100℃,以空干坩埚为空白对照^[12]。

1.2.4 面包比容的测定

根据关硕等^[13]的方法,并加以调整,采用小米置换法测定比容,按式(1)计算比容。

$$C = \frac{V}{m} \quad (1)$$

式中: C 为比容, cm^3/g ; V 为面包的体积, cm^3 ; m 为面包的质量, g 。

1.2.5 感官评价及评分标准

参考 GB/T 20981—2007 感官评价法,将烤制好的面包自然冷却 30 min,然后由 12 人评定小组对儿茶素面包感官品质进行评分。面包评价标准如表 1 所示,并按式(2)计算得分 $Y^{[4]}$ 。

$$Y = A_n \times 15\% + B_n \times 15\% + C_n \times 15\% + D_n \times 25\% + E_n \times 30\% \quad (2)$$

式中: A_n 、 B_n 、 C_n 、 D_n 、 E_n ($n=1, 2, \dots$) 分别表示各评审因子的得分。

表 1 面包感官评价标准
Tab.1 Criteria for sensory evaluation of bread

评价项目	分值	评价标准
色泽 (A, 15%)	20 ~ 14	色泽均匀一致, 金黄色, 无烤焦现象
	13 ~ 7	色泽较均匀, 棕黄色, 轻微烤焦现象
	6 ~ 0	色泽不均匀, 有焦黑色、发白现象
组织 (B, 15%)	20 ~ 14	细腻, 气孔均匀, 弹性好, 无掉渣现象
	13 ~ 7	较细腻, 较有弹性, 稍有空洞, 切开后轻微掉渣
	6 ~ 0	不细腻, 弹性差, 气孔不均匀, 局部明显空洞和过硬
形态 (C, 15%)	20 ~ 14	完整, 无黑斑, 无裂纹, 丰满
	3 ~ 7	较完整, 少许黑斑, 少许龟裂
	6 ~ 0	表明粗糙, 有较多黑泡或焦斑, 龟裂严重
气味 (D, 25%)	20 ~ 14	有面包特有的浓郁香味, 无异味
	13 ~ 7	面包香味不浓郁, 少许异味
	6 ~ 0	没有明显的面包特有香味, 异味大
口感 (E, 30%)	20 ~ 14	松软适口、口感好, 不黏, 不硌牙
	13 ~ 7	松软度较好, 口感较差, 些许黏
	6 ~ 0	硬, 黏, 硌牙

1.2.6 游离巯基含量的测定

参照 Zhan 等^[14]的方法测定游离巯基含量, 并适当修改。将 2.5 mL 缓冲液加入 50 mg 冻干的面包粉末中, 并在 25 °C 的恒温振荡器中反应 30 min, 在试管中加入 0.025 mL DTNB 溶液(5 mg/mL), 并于 25 °C 恒温振荡器中反应 30 min, 离心(4 000 r/min, 20 min), 取上清液, 于 412 nm 处测量吸光值。用还原型谷胱甘肽标准曲线对游离巯基含量进行分析。

1.2.7 面包过氧化物值的测定

面包过氧化值(POV)的测定参考 GB 5009.227—2016 的方法^[15]。

1.2.8 面包脂肪氧化程度值的测定

脂肪氧化程度(TBA)的测定参照田海娟等^[16]的方法。将 5 g 面包粉末和 2 mL 三氯乙酸(10%)溶液混匀、离心(3 500 r/min, 5 min), 用三氯乙酸溶液将上清液定容至 25 mL, 反应时间为 10 min。各取 2.5 mL 反应液和 TBA 溶液于试管中, 并盖塞, 在 95 °C 水浴锅中加热 50 min 后, 降温 10 min, 在 532 nm 处测定吸光值, 按式(3)计算 TBA 值。

$$B = A_{532} \times 41.5 \quad (1)$$

式中: B 为 TBA 值, mg/kg; A_{532} 为溶液在 532 nm 处的吸光值; 41.5 为每毫升含丙二醛量的换算系数。

1.2.9 抗氧化特性的测定

1.2.9.1 提取液制备

将面包冷冻干燥, 并粉碎。将 5 mL 甲醇(体积

分数为 80%)溶液加入 0.25 g 面包粉末中, 在恒温震器中(37 °C、110 r/min)反应 2 h, 然后超声 30 min, 最后离心(2 800 r/min, 15 min), 取上清液备用^[3]。

1.2.9.2 DPPH 自由基清除率的测定

DPPH 自由基清除率的测定参考裴斐等^[17]的方法进行。将 3 mL 提取液和 3 mL DPPH(0.4 mmol/L)溶液混合, 在暗处反应 30 min, 于 517 nm 处测量吸光值。DPPH 自由基清除率的计算见式(4)。

$$P_D = (1 - \frac{C-D}{E}) \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_D 为 DPPH 自由基清除率, %; C 为 3 mL 提取液与 0.4 mL DPPH 溶液的混合液的吸光值; E 为 3 mL 无水乙醇与 0.4 mL DPPH 溶液的混合液的吸光值; D 为 3 mL 提取液与 0.4 mL 无水乙醇的混合液的吸光值。

1.2.9.3 ABTS 自由基清除率的测定

ABTS 自由基清除率的测定参考陆方菊等^[18]的方法进行。将 ABTS 溶液(6 mmol/L)与过量 MnO_2 反应, 取滤液为 ABTS 原液, 稀释原液, 并在 734 nm 处测定吸光值, 使得吸光值为 0.5 ± 0.02 。取 2.4 mL ABTS 原液与 0.8 mL 提取液充分混匀, 在黑暗处反应 6 min, 并于 734 nm 处测量吸光值。ABTS 自由基清除率的计算见式(5)。

$$P_A = (1 - \frac{F}{G}) \times 100\% \quad (3)$$

式中: P_A 为 DPPH 自由基清除率, %; F 为 0.8 mL 提取液与 2.4 mL ABTS 原液的混合液的吸光值; G 为

0.8 mL 无水乙醇与 2.4 mL ABTS 原液的混合液的吸光值。

1.2.10 面包色泽的测定

参照刘洁等^[19]的方法测定面包的色泽。采用 NR10QC 高精度色差仪测定不同贮藏时间面包的 L^* 、 a^* 、 b^* 。

1.2.11 面包质构的测定

面包质构的测定参考王玉婉等^[4]的方法。将面包切成长、宽、高均为 2 cm 的块。质构仪的参数: 感应力为 0.05 N, 速率为 2 mm/s, 变形量为 50%。

1.3 数据处理

数据分别用软件 Excel 2019 和 Sigmaplot 10 进行处理和画图, 用软件 Statistix 8 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 儿茶素对面包热焓值的影响

差式扫描量热法 (Differential Scanning Calorimetry, DSC) 是一种对样品热容变化进行定性定量的技术, 可以测定淀粉糊化的吸热焓值, 焓值越大, 淀粉老化越严重^[12]。儿茶素的添加量对 DSC 的影响见表 2。儿茶素质量分数 0.1% 组面包的起始温度、峰值温度、结束温度和焓值均小于对照组的对应值, 表明在儿茶素质量分数为 0.1% 时, 淀粉更易糊化。由于多酚的羟基与淀粉分子发生了氢键等非共价作用, 导致淀粉双螺旋结构在形成过程中受到阻碍, 使得淀粉分子的结晶程度减小, 促进了淀粉的糊化^[20-22]。此外, 受 EGCG 与小麦淀粉之间的氢键, 以及 EGCG 的酯基与淀粉的螺旋结构之间的疏水相互作用的影响, 小麦淀粉与 EGCG 的混合物再结晶受到抑制^[23]。在儿茶素的质量分数为 0.025% 时, 焓值达到最大值 (152.91 J/g), 显著 ($P < 0.05$) 高于对照组的焓值, 表明淀粉的结晶程度较大。原因是儿茶素的酚羟基与面筋蛋白发生了新的交联, 增强了面筋蛋白的结构,

提高了淀粉的重结晶速率, 导致面包迅速老化^[24]。儿茶素的质量分数为 0.2% 和 0.4% 时, 焓值显著 ($P < 0.05$) 提高。这可能是因儿茶素浓度过高, 通过氢键与淀粉相互作用, 阻止了淀粉网络的疏水作用, 防止了淀粉的降解^[20]。

2.2 儿茶素对面包比容的影响

在面包质量相同的条件下, 比容会影响面包的组织 and 口感^[25]。如图 1 所示, 随着儿茶素比例的增加, 面包的比容先增大后减小。当儿茶素的质量分数为 0.05% 时, 面包比容达到最大值, 表明添加适量儿茶素增加了面包比容。烷基和芳香族氨基酸中含有 CH 供体基团的 CH- π 键, 儿茶素酚羟基通过 2~3 个弱 CH- π 键包围 1 个淀粉分子, 1 个多酚分子同时与多个淀粉分子相互作用, 使得淀粉的水合作用增强, 淀粉颗粒吸水溶胀^[26]。当继续增加儿茶素时, 面包比容逐渐降低, 这与陈南等^[3]的研究结果一致。当儿茶素的质量分数大于 0.1% 时, 儿茶素限制了淀粉分子之间的接触, 多酚淀粉复合物在水中的溶解度较低, 减弱了水分子与淀粉的结合, 抑制了淀粉分子的吸水溶胀^[27], 因此过量的儿茶素不利于面包的膨松, 比容反而降低。以上结果表明, 适量添加儿茶素会提高面包的比容, 改善面包的品质。

2.3 儿茶素对面包感官品质的影响

如图 2 所示, 面包的颜色随着儿茶素浓度的提高, 由金黄色变暗, 面包组织由粗糙变细腻。添加不同的儿茶素后, 面包的组织、形态、口感、色泽和气味如图 3 所示。由图 3 可知, 儿茶素组面包在口感、组织、色泽和气味的评分均低于对照组, 这可能由于儿茶素对面包的感官特征会产生不利影响。在儿茶素的质量分数为 0.05% 时, 面包外形完整、丰满平滑、弹性适中, 但气孔不均匀。当儿茶素的质量分数达到 0.2% 时, 面包组织得分大于对照组和其他处理组, 表明面包细腻有弹性、气孔较均匀、纹理清晰。推测是因儿茶素的酚羟基与面筋蛋白侧链上的氨基结合, 形

表 2 儿茶素对面包热焓值的影响
Tab.2 Effect of catechin on enthalpy of bread

儿茶素质量分数/%	起始温度/°C	峰值温度/°C	结束温度/°C	焓值/(J·g ⁻¹)
0	29.91±0.15 ^a	38.21±0.1 ^b	92.75±0.25 ^a	33±2.24 ^c
0.025	30.23±0.19 ^a	73.76±1.73 ^a	95.57±0.03 ^a	152.91±6.5 ^a
0.05	27.96±0.02 ^a	73.33±3.04 ^a	95.68±0.13 ^a	88.93±0.27 ^b
0.1	29.46±1.47 ^a	34.17±4.44 ^b	36.63±2.41 ^b	26.85±3.47 ^c
0.2	31.79±0.36 ^a	72.51±2.32 ^a	91.91±2.44 ^a	69.58±2.76 ^b
0.4	29.11±0.98 ^a	45.91±7.81 ^b	91.94±3.77 ^a	85.33±5.57 ^b

注: 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下表同。

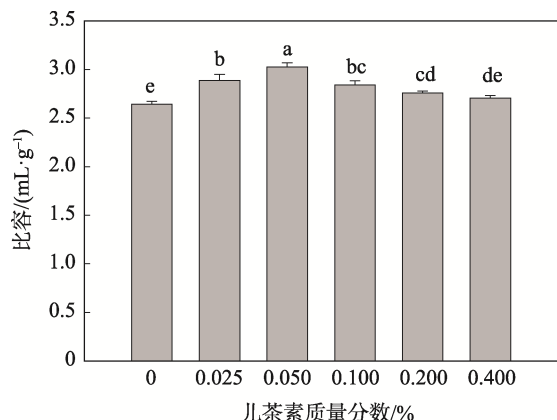


图1 儿茶素对面包比容的影响

Fig.1 Effects of catechin on specific volume of bread

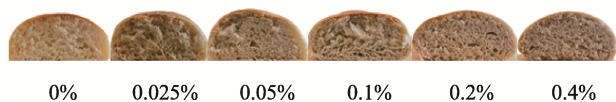
注: 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

图2 添加及未添加儿茶素的面包横截面外观

Fig.2 Cross-sectional appearance of bread with and without catechin

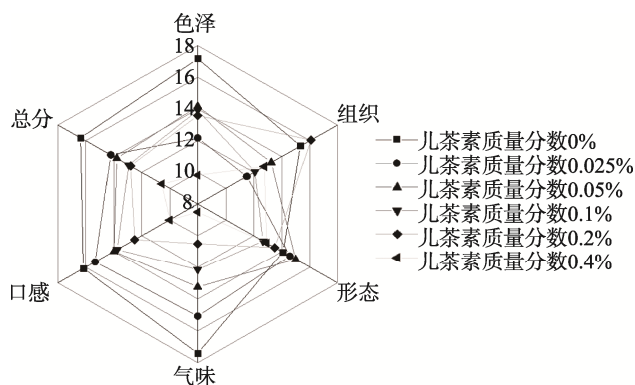


图3 儿茶素对面包感官品质的影响

Fig.3 Effect of catechin on sensory quality of bread

成了氢键, 氢键促进了面筋网络的形成, 提高了面包的品质^[3]。随着儿茶素比例的提高, 面包的气味和口感得分逐渐降低, 在添加量为 0.4% 时分别达到最低值 8.5 分和 10 分, 说明添加质量分数为 0.4% 的儿茶素时, 面包香味浓郁、松软度较好, 但有少许异味、口感较差。这可能是由于过量的多酚不利于面筋网络的生成, 导致面包的口感较差。多酚具有热敏性, 过量酚类物质的掺入会对烘焙产品的一些品质特性产生负面影响, 如色泽、体积、风味和质地^[28]。由此可见, 添加适量的儿茶素可以改善面包的品质, 但添加过量的儿茶素会降低面包的感官质量及消费者的购买意愿。

2.4 儿茶素对面包贮藏期内游离巯基含量的影响

游离巯基含量反映面筋聚集二硫键的变化情况, 二硫键在决定蛋白质聚集和维持蛋白质基质稳定性方面起着重要作用^[29-30]。除分子之间相互作用外, 小麦面粉中的麦谷蛋白和醇溶蛋白的巯基会形成二硫键, 进一步加强面筋网络的稳定, 因此巯基含量的可以间接反映二硫键的含量及面筋网络结构的稳定^[31]。随着儿茶素含量的增加, 游离巯基含量不断下降。儿茶素的酚基具有还原性, 酚基通过形成醌, 并提供电子参与氧化还原反应, 可能是因儿茶素的还原性破坏了巯基基团, 导致游离巯基的含量下降^[32]。据报道, 儿茶素的抗氧化能力取决于芳香环上羟基的数量和位置, 其中 EGCG 和 ECG 的抗氧化活性较强^[33], 因此儿茶素较高的抗氧化能力可能反映较强的游离巯基抑制能力。从图 4 中可以看到, 随着贮藏时间的延长, 对照组面包的游离巯基含量从 1.94 mmol/g 增至 3.19 mmol/g, 增加了约 64%。表明随着冷藏时间的延长, 面筋的网络结构变差。这是因为面筋蛋白在冷藏条件下发生了变性, 二硫键断裂, 形成了游离巯基, 导致游离巯基的含量升高^[34]。表明儿茶素能保护面筋的网络结构, 延缓面包中游离巯基的增长速度。

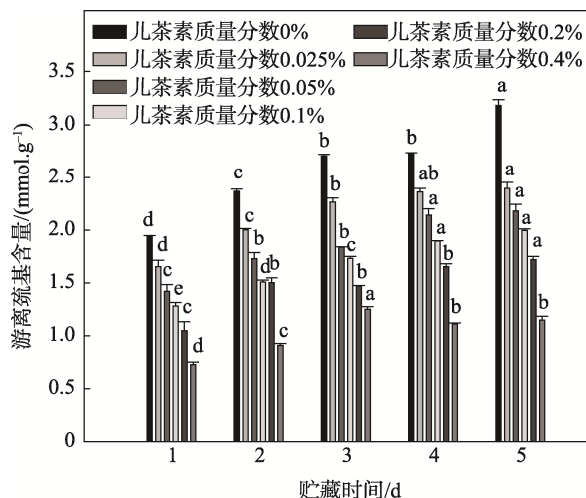


图4 儿茶素对游离巯基含量的影响

Fig.4 Effect of catechin on free sulfhydryl content

2.5 儿茶素对面包贮藏期内 POV 值的影响

POV 是衡量脂肪初级氧化产物的指标, 反映脂肪初级氧化程度^[35]。在氧化过程中, 脂肪会生成氢过氧化物, 通过测定脂肪 POV, 就能判断脂肪氧化程度^[36]。一般来说, POV 值越大, 脂肪酸败越严重。由图 5 可知, 随着贮藏时间的延长, 面包的 POV 值逐渐变大, 表明脂肪氧化程度随着贮藏时间的延长而增大。初级脂质氧化产物 (如氢过氧化物) 不稳定, 对温度敏感, 并可能发生降解, 生成复杂的次级产物

混合物(如醛、酮、醇和酯),导致面包的品质发生劣变^[37]。处理组面包的 POV 值随着儿茶素添加量的增加都不同程度地下降。在贮藏第 1 天,对照组面包的 POV 值为 0.015 mmol/kg,儿茶素质量分数 0.4% 组面包的 POV 值为 0.008 mmol/kg,与对照组的 POV 值相比,下降了约 47%。添加儿茶素的面包中其 POV 值在贮藏期间内的增加速度较慢。在贮藏第 5 天时,对照组面包的 POV 值为 0.045 mmol/kg,儿茶素质量分数 0.4% 组面包的 POV 值为 0.029 mmol/kg,与对照组的 POV 值相比,下降了约 36%。这些结果表明,在面包中添加儿茶素有助于更好地保护脂质,防止面包在储存过程中发生过度氧化^[38],从而提高了面包的贮藏品质。

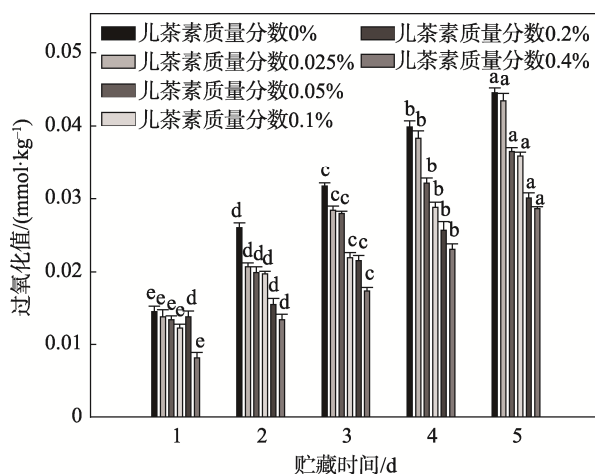


图 5 儿茶素对面包过氧化物值的影响
Fig.5 Effect of catechin on peroxide value of bread

2.6 儿茶素对面包贮藏期内 TBA 值的影响

TBA 值反映次级脂质氧化程度。TBA 值越高,表示脂肪氧化酸败越严重,说明产品的品质越差^[39]。如图 6 所示,各组面包的 TBA 值随着贮藏时间的延长而增大,表明面包脂肪氧化程度加深。未添加儿茶素面包的 TBA 值在贮藏时间内最高,表明面包在储存期间形成的氢过氧化物分解为大量二级化合物^[38]。添加儿茶素组面包的 TBA 值均不同程度地上升,上升幅度小于对照组。儿茶素面包的次级脂质氧化产物含量较低。随着儿茶素的加入,面包的 TBA 值逐渐减小。在贮藏第 1 天时,对照组面包的初始 TBA 值为 9.74 mg/kg,儿茶素质量分数 0.4% 组面包的 TBA 值为 2.23 mg/kg,较对照组下降了约 77%。这些结果表明,在面团的制备和烘焙过程中,儿茶素保护了脂肪,有效地抑制了储存期间过氧化物产物的分解,提高了面包的抗氧化能力。研究表明,儿茶素能够整合金属离子,它们会捕获自由基,抑制并阻止脂质过氧化过程中的自由基链式反应^[40-41]。

2.7 儿茶素对面包贮藏期内抗氧化特性的影响

儿茶素对 DPPH 自由基清除率的影响如图 7a 所

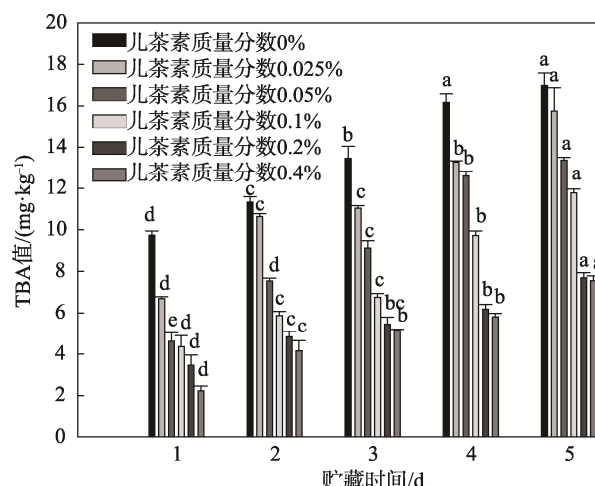


图 6 儿茶素对 TBA 值的影响
Fig.6 Effect of catechin on TBA value of bread

示,儿茶素对 ABTS 自由基清除率的影响如图 7b 所示。DPPH 乙醇溶液在 517 nm 处有特征吸收峰,当遇到抗氧化剂时,吸光度下降,可以反映多酚的抗氧化活性^[42]。由图 7a 可以看出,随着贮藏时间的延长,面包的 DPPH 自由基清除率逐渐下降;儿茶素组面包的 DPPH 自由基清除率始终大于对照组的 DPPH 自由基清除率,可见添加儿茶素能提高儿茶素的抗氧化能力。这可能是因面粉中含有植酸等具有抗氧化活性物质,并且面团在烘焙过程中发生了美拉德反应,其产物有一定的抗氧化活性^[43]。由图 7a 可知,随着儿茶素的增加,面包的自由基清除能力增强,这与 Mashkour 等^[44]的研究结果一致。儿茶素 B 环上邻位-3'4'-二羟基或 3'4'5'-三羟基、C 环 3 位的没食子酸基团,以及 A 环的 5 位和 7 位的羟基是良好的供氢体,它与 DPPH 自由基反应,生成了稳定的苯氧自由基,导致自由基链式反应中断^[45-47]。

ABTS 是一种水-醇体系,蓝绿色的 ABTS 自由基在有抗氧化物(如酚类物质)存在时,被还原为无色中性形式,常用于评价样品的抗氧化活性^[48-49]。由图 7b 可以看出,儿茶素对 ABTS 自由基清除率的影响趋势大致与 DPPH 一致。在贮藏 1 d 时,儿茶素组面包与对照组面包相比,其 ABTS 自由基清除率显著提高($P<0.05$)。表明儿茶素经高温加热后,在面包中仍具有较强的抗氧化能力。这可能是因儿茶素提供的 1 个电子与 1 个 ABTS 分子结合,生成了半醌自由基;然后半醌自由基与另一个 ABTS 自由基阳离子反应,生成了多酚化合物,最终达到儿茶素对 ABTS 自由基的清除效果^[50]。此外,儿茶素能赋予淀粉醛酚羟基,与 ABTS 自由基发生反应,形成稳定的邻苯二酚自由基,中断自由基链式反应^[51]。

2.8 儿茶素对面包贮藏期内色泽的影响

不同浓度儿茶素对面包色泽的影响如表 3 所示。在贮藏 1 d 时,与对照组相比,儿茶素添加量为 0.05%~0.4%

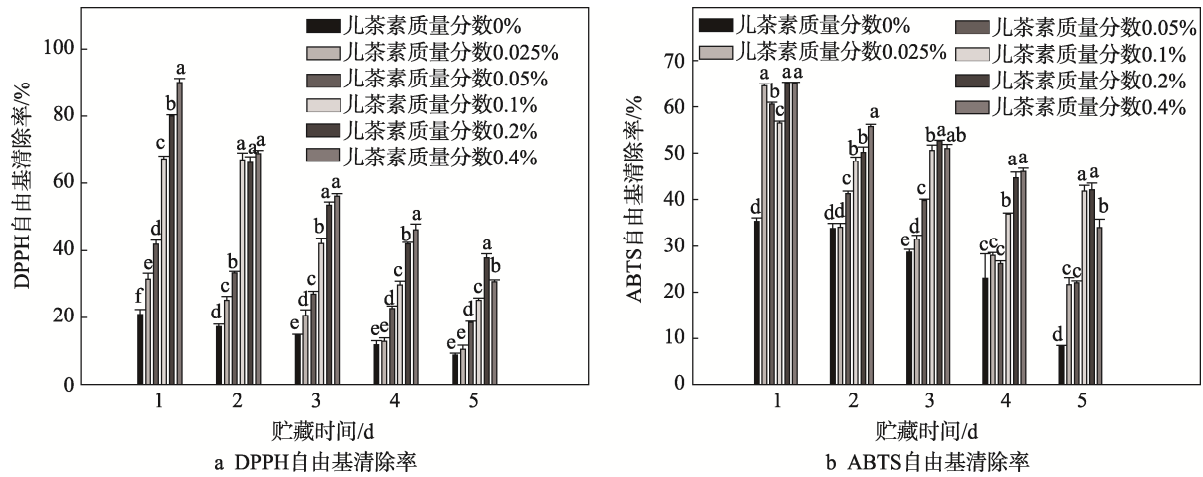


图7 儿茶素对面包抗氧化特性的影响
Fig.7 Effects of catechin on antioxidant property of bread

表3 儿茶素对面包色泽的影响
Tab.3 Effect of catechin on color of bread

儿茶素质量 分数/%	贮藏 时间/d	指标		
		L^*	a^*	b^*
0	1	65.11±6.97 ^a	11.553±3.249 ^a	33.730±4.109 ^{ab}
	2	65.31±3.90 ^a	10.993±3.718 ^a	10.993±3.718 ^b
	3	70.55±9.36 ^a	10.993±3.718 ^a	28.673±5.146 ^a
	4	65.34±7.65 ^a	9.053±5.470 ^a	23.09±10.238 ^{ab}
	5	56.27±2.12 ^a	11.053±3.082 ^a	24.09±12.082 ^{ab}
0.025	1	69.06±2.13 ^a	7.217±1.684 ^a	31.733±0.694 ^a
	2	55.99±1.77 ^a	5.810±1.881 ^a	5.810±1.881 ^c
	3	70.55±9.36 ^a	5.810±1.881 ^a	24.957±4.238 ^{ab}
	4	65.34±7.65 ^a	8.547±3.549 ^a	18.453±4.609 ^b
	5	56.27±2.12 ^a	9.880±4.445 ^a	17.453±4.615 ^b
0.05	1	54.94±5.44 ^a	14.923±0.568 ^a	37.84±0.9 ^a
	2	66.26±4.34 ^a	7.303±4.754 ^a	7.303±4.754 ^b
	3	66.35±9.21 ^a	7.303±4.754 ^a	26.83±8.523 ^a
	4	59.50±12.89 ^a	10.470±2.927 ^a	25.043±2.926 ^a
	5	64.93±2.58 ^a	10.197±1.302 ^a	26.727±3.468 ^a
0.1	1	60.90±3.55 ^a	14.670±2.663 ^a	29.9±6.279 ^a
	2	67.12±2.03 ^a	7.633±4.961 ^a	7.633±4.961 ^b
	3	70.37±6.78 ^a	7.633±4.961 ^a	32.657±6.13 ^a
	4	67.90±5.35 ^a	7.353±3.782 ^a	23.723±1.975 ^{ab}
	5	68.39±4.83 ^a	7.397±3.039 ^a	25.423±2.71 ^a
0.2	1	64.57±3.11 ^{ab}	11.617±3.773 ^a	37.253±0.265 ^a
	2	67.79±1.97 ^{ab}	8.177±3.414 ^a	8.177±3.414 ^c
	3	73.53±4.92 ^a	8.177±3.414 ^a	29.31±3.018 ^{ab}
	4	74.24±5.17 ^a	7.587±4.236 ^a	22.707±3.15 ^b
	5	70.20±3.88 ^a	7.590±2.166 ^a	24.677±4.535 ^b
0.4	1	56.27±2.12 ^b	17.747±1.054 ^a	17.747±1.054 ^c
	2	64.93±2.58 ^{ab}	7.437±1.249 ^b	7.437±1.249 ^d
	3	68.39±4.83 ^a	7.437±1.249 ^b	27.843±3.101 ^b
	4	70.20±3.88 ^a	6.160±3.086 ^b	20.36±2.561 ^c
	5	67.90±5.35 ^a	6.873±3.364 ^b	21.7±2.835 ^c

组面包的 L^* 均降低, 其中 0.4% 组面包的 L^* 显著降低 ($P < 0.05$)。结合图 2 可知, 儿茶素添加量为 0.05%~0.4% 组面包均比对照组面包暗, 说明儿茶素降低了面包芯的亮度。在贮藏第 5 天时, 添加儿茶素质量分数大于 0.025% 后, 儿茶素组面包的 L^* 大于对照组面包的 L^* , 面包色泽变亮。在贮藏第 1 天时, 除儿茶素质量分数 0.025% 组外, 其他处理组面包的 a^* 大于对照组的 a^* 。通过肉眼观察看出, 对照组面包比添加儿茶素的面包稍黄。含有儿茶素的面包与对照组面包相比, 颜色更深, 呈红褐色。经焙烤后, EGCG 发生了氧化, 并参与焦糖化, 被还原糖氧化, 导致儿茶素粉末变成深粉色, 使面包屑的颜色更深、更红^[52]。随着儿茶素含量的增加, 0.4% 组面包在不同贮藏时间的 b^* 与对照组面包相比都显著下降 ($P < 0.05$)。可能是因面筋蛋白的 S—S 键交换, 形成了 S—H 基团, 加深了面包的颜色。结合图 2 中面包横截面图片可以看出, 儿茶素组面包呈棕褐色, 色泽显著深于对照组面包。有研究表明, 多酚的氧化及其氧化产物会与氨基酸发生反应, 从而影响颜色, 多酚氧化酶、热或高 pH 值会使多酚氧化成喹诺酮^[28]。美拉德反应在颜色的形成中也起着重要作用。茶、迷迭香和肉桂中存在许多不同的多酚化合物, 已被证明是 α -二羰基捕集剂, 它们是加速美拉德反应的反应性中间体。因为它们与葡萄糖相比, 具有更高的反应性^[53]。

2.9 儿茶素对面包贮藏期内质构特性的影响

面包的质构特性与面包的口感、组织、比容等指标密切相关, 因此在一定程度上可以反映面包的感官质量^[54]。如表 4 所示, 儿茶素面包的质构特性主要包括咀嚼性、硬度、内聚性、胶黏性和弹性。由于咀嚼性、内聚性和胶黏性在面包贮藏时期内无显著性差异, 因此未列出数据。添加儿茶素组面包的硬度总体上低于对照组面包。在儿茶素的质量分数为 0.2% 时, 与对照组相比, 其硬度呈显著下降趋势 ($P < 0.05$)。此变化可能是因在面筋网络结构形成过程中, 儿茶素与面筋蛋白的二硫键相互作用, 生成了 S—H 基团, 使得面筋强度减弱, 导致面包硬度下降^[55]。另外, 儿茶素 B 环和 C 环的羟基附着在淀粉链段上, 并通过氢键相互作用, 削弱了淀粉链之间的联系^[56-57], 降低了面包的硬度。当儿茶素的质量分数为 0.05% 时, 面包的弹性与对照组相比得到明显提高, 可能是因儿茶素的酚羟基与面筋蛋白中的氨基相互作用, 提高了面筋网络结构的持气能力, 从而提高了面包弹性。在贮藏的前 4 d, 0.4% 儿茶素组面包的弹性显著低于对照组的弹性 ($P < 0.05$)。这可能是因过量儿茶素与面筋蛋白发生了非共价相互作用, 导致二级结构重排, 弱化了面筋的网络结构, 使得面包弹性下降^[32]。此外, 非共价键的重排也会影响醇溶蛋白的黏弹性^[58]。

表 4 儿茶素对面包质构特性的影响
Tab.4 Effect of catechin on texture characteristics of bread

儿茶素 质量分数/%	贮藏 时间/d	指标	
		硬度/N	弹性/mm
0	1	41.61±5.25 ^a	10.09±0.29 ^a
	2	73.67±3.33 ^a	9.90±0.24 ^{ab}
	3	69.96±5.10 ^a	9.87±0.41 ^{ab}
	4	60.29±0.69 ^a	8.59±0.08 ^b
	5	37.30±3.59 ^a	3.13±0.51 ^c
0.025	1	32.49±1.39 ^{ab}	10.33±0.77 ^b
	2	62.37±2.28 ^b	11.37±0.22 ^b
	3	68.75±5.37 ^a	6.72±0.47 ^c
	4	72.59±4.57 ^a	7.79±0.12 ^c
	5	32.65±1.48 ^{ab}	15.57±0.05 ^a
0.05	1	22.28±5.37 ^{bc}	14.31±0.62 ^a
	2	23.24±1.35 ^d	11.88±1.23 ^a
	3	65.70±0.96 ^a	7.30±0.68 ^b
	4	67.50±5.39 ^a	11.43±0.30 ^a
	5	36.69±1.00 ^{ab}	11.39±0.30 ^a
0.1	1	31.67±2.30 ^{abc}	11.01±0.34 ^b
	2	27.15±2.19 ^{cd}	13.68±0.63 ^a
	3	57.75±2.08 ^a	9.02±0.27 ^c
	4	63.12±1.50 ^a	8.34±0.20 ^c
	5	29.07±0.56 ^{ab}	12.13±0.20 ^b
0.2	1	19.63±1.88 ^c	11.78±0.06 ^a
	2	54.35±1.41 ^b	10.80±0.55 ^{ab}
	3	30.73±2.98 ^b	10.33±0.72 ^{ab}
	4	41.83±0.45 ^b	9.23±0.60 ^b
	5	27.50±0.41 ^b	12.39±0.02 ^a
0.4	1	30.29±0.73 ^{abc}	9.91±0.38 ^b
	2	34.11±1.73 ^c	6.42±0.19 ^c
	3	38.49±6.45 ^b	6.98±0.32 ^c
	4	63.04±0.41 ^a	6.82±0.12 ^c
	5	28.29±0.60 ^{ab}	11.32±0.50 ^a

3 结论

通过添加不同质量分数的儿茶素到面团中, 研究儿茶素对面包的巯基、DSC、质构特性、色差、硫代巴比妥酸值、抗氧化特性的影响。结果表明, 儿茶素改善了面包的质构特性, 提高了面包的抗氧化能力, 抑制了面包中脂肪的氧化。与对照组相比, 添加儿茶

素可延缓硬度的增加,并对氧化初级产物和次级产物的生成有较好的抑制作用。儿茶素质量分数 0.1%组面包的起始温度、峰值温度、结束温度和焓值都低于对照组面包的对应值。儿茶素的质量分数在 0%~0.05%之间时,有助于保持面包的质量,增大面包的体积。其中,儿茶素质量分数为 0.05%时,面包的比容最大,且在贮藏时间内保持着较高的弹性。此外,在贮藏时间 1~5 d 内,随着儿茶素添加量的增加,面包的巯基含量、过氧化值和硫代巴比妥酸值逐渐降低,DPPH 自由基清除率和 ABTS 自由基清除率总体上逐渐提高,表明儿茶素的添加提高了面包的抗氧化能力,改善了面包的贮藏品质。该实验可为功能型面包的生产提供一定的参考依据。

参考文献:

- [1] XU Jing-wen, LI Yong-hui, ZHAO Yong, et al. Influence of Antioxidant Dietary Fiber on Dough Properties and Bread Qualities: A Review[J]. *Journal of Functional Foods*, 2021, 80: 104434.
- [2] 孝英达. 冷藏发酵面团及其面包品质变化及提升[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 1-4.
XIAO Ying-da. Study on the Effect of Refrigerated Storage on Dough/Bread Properties and Their Improvement[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016: 1-4.
- [3] 段云龙. 茶叶提取物对面包品质影响及其抗氧化能力研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 34-36.
DUAN Yun-long. Effect of Tea Extracts on the Bread Quality and Polyphenols Antioxidant Activity[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016: 34-36.
- [4] 王玉婉, 涂政, 叶阳. 超微茶粉对全麦面包品质及其淀粉消化特性的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(1): 79-85.
WANG Yu-wan, TU Zheng, YE Yang. Effect of Super-fine Tea Powder on Quality and Starch Digestion Properties of Whole-Wheat Bread[J]. *Food Science*, 2021, 42(1): 79-85.
- [5] 陈南, 陈龙, 何强, 等. 茶多酚对小麦淀粉理化特性和面包品质的影响及机理[J]. *食品科学*, 2021, 42(21): 8-16.
CHEN Nan, CHEN Long, HE Qiang, et al. Effects of Tea Polyphenols on Physicochemical Properties of Wheat Starch and Bread Quality and Their Action Mechanism[J]. *Food Science*, 2021, 42(21): 8-16.
- [6] 张一然, 李丛, 王岚, 等. 六安瓜片营养标签的研制[J]. *茶叶通讯*, 2022, 49(3): 379-386.
ZHANG Yi-ran, LI Cong, WANG Lan, et al. Development of Nutrition Label for Lu'an Guapian Green Tea[J]. *Journal of Tea Communication*, 2022, 49(3): 379-386.
- [7] TIAN Chao, ZHEN Tian-yuan, MA Meng, et al. Contribution of Catechin Monomers in Tea Polyphenols to the Structure and Physicochemical Properties of Wheat Gluten and Its Sub-Fractions[J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 101: 103306.
- [8] MATSUOKA Y, HASEGAWA H, OKUDA S, et al. Ameliorative Effects of Tea Catechins on Active Oxygen-Related Nerve Cell Injuries[J]. *The Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 1995, 274(2): 602-608.
- [9] 朱君, 付立霞, 支青, 等. 桑枝乙醇提取物通过 NF- κ B 和 MAPKs 信号通路对 LPS 诱导 RAW_{264.7} 细胞的抗炎作用[J]. *中成药*, 2022, 44(11): 3648-3653.
ZHU Jun, FU Li-xia, ZHI Qing, et al. Anti-Inflammatory Effects of Ethanol Extract from Mulberry Branches on LPS-Induced RAW_{264.7} Cells through NF- κ B and MAPKs Signaling Pathways[J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2022, 44(11): 3648-3653.
- [10] 文瑜, 彭凌, 杨华进, 等. 马铃薯吐司面包的配方研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(23): 137-142.
WEN Yu, PENG Ling, YANG Hua-jin, et al. Study on the Recipe of Potato Toast Bread[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(23): 137-142.
- [11] 郑妍, 张馨匀, 隋勇. 莲原花青素对面包品质及功能特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(8): 62-68.
ZHENG Yan, ZHANG Xin-yun, SUI Yong. Effect of Lotus Seedpod Procyanidins on Bread Quality and Functional Properties[J]. *Food Science*, 2020, 41(8): 62-68.
- [12] 田海娟, 谢黎明, 李小艳, 等. 发酵紫苏粉对蛋糕储藏稳定性的影响[J]. *食品工业*, 2022, 43(1): 199-202.
TIAN Hai-juan, XIE Li-ming, LI Xiao-yan, et al. Effect of Fermented Perilla Powder on Storage Stability of Cake[J]. *The Food Industry*, 2022, 43(1): 199-202.
- [13] 关硕, 刘瑞, 于章龙, 等. 不同制粉方式对运黑 161 全麦粉加工特性的影响[J]. *核农学报*, 2022, 36(11): 2229-2238.
GUAN Shuo, LIU Rui, YU Zhang-long, et al. Effects of Milling Methods on Processing Quality of Yunhei 161 Whole Wheat Powder[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(11): 2229-2238.
- [14] ZHAN Jing, MA Sen, WANG Xiao-xi, et al. Effect of Baked Wheat Germ on Gluten Protein Network in Steamed Bread Dough[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(10): 2839-2846.

- [15] GB 5009.227—2016, 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定[S].
GB 5009.227-2016, Determination of Peroxide Value in Food Safety National Standard [S].
- [16] 田海娟, 胡征宇, 孙宇, 等. 发酵紫苏粉对面包储藏品质影响的研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(23): 261-265.
TIAN Hai-juan, HU Zheng-yu, SUN Yu, et al. Study on the Influence of Fermented Perilla Powder on the Bread Storage Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(23): 261-265.
- [17] 裴斐, 杜逸飞, 孙磊, 等. 固态发酵对麸皮抗氧化特性及全麦面包感官品质的提升作用[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 212-220.
PEI Fei, DU Yi-fei, SUN Lei, et al. Effect of Solid-State Fermentation on Antioxidant Properties of Wheat Bran and Sensory Quality of Whole Wheat Bread[J]. Food Science, 2022, 43(6): 212-220.
- [18] 陆方菊, 彭斌, 何松贵, 等. 红曲米添加量对红曲酒多酚成分及其抗氧化活性的影响[J]. 中国酿造, 2019, 38(5): 113-118.
LU Fang-ju, PENG Bin, HE Song-gui, et al. Effect of Hongqu Rice Addition on Polyphenol Components and Antioxidant Properties of Hongqu Rice Wine[J]. China Brewing, 2019, 38(5): 113-118.
- [19] 刘洁, 王亚丹, 满勇, 等. 甘氨酸和淀粉膜对面包中丙烯酰胺的协同控制作用[J]. 食品科学, 2018, 39(16): 34-39.
LIU Jie, WANG Ya-dan, MAN Yong, et al. Synergistic Effect of Glycine and Starch Coating on Reduction of Acrylamide in Bread[J]. Food Science, 2018, 39(16): 34-39.
- [20] ZHU Fan. Interactions between Starch and Phenolic Compound[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 43(2): 129-143.
- [21] DU Jing, YAO Fen, ZHANG Meng-ying, et al. Effect of Persimmon Tannin on the Physicochemical Properties of Maize Starch with Different Amylose/Amylopectin Ratios[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 132: 1193-1199.
- [22] BORDENAVE N, HAMAKER B R, FERRUZZI M G. Nature and Consequences of Non-Covalent Interactions between Flavonoids and Macronutrients in Foods[J]. Food & Function, 2014, 5(1): 18-34.
- [23] PAN Jun-xian, LI Ming, ZHANG Shi-kang, et al. Effect of Epigallocatechin Gallate on the Gelatinisation and Retrogradation of Wheat Starch[J]. Food Chemistry, 2019, 294: 209-215.
- [24] 周枫, 李飞, 张园园, 等. 茶多酚对面包品质及贮藏特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(7): 153-156.
ZHOU Feng, LI Fei, ZHANG Yuan-yuan, et al. Effects of Tea Polyphenols on Bread Quality and Storage Characteristics[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(7): 153-156.
- [25] 徐吉祥, 钟桂兴, 孙楚楠, 等. 不同品种莲子对纯莲蓉馅料加工品质影响作用的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2022(1): 34-38.
XU Ji-xiang, ZHONG Gui-xing, SUN Chu-nan, et al. Effect of Different Varieties of Lotus Seeds on Processing Quality of Pure Lotus Paste Fillings[J]. Cereal & Feed Industry, 2022(1): 34-38.
- [26] NISHIO M, UMEZAWA Y, FANTINI J, et al. Hydrogen Bonds in Biological Macromolecules[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2014, 16(25): 12648-12683.
- [27] LI Li, LIU Yan-hong, XUE Yan, et al. Preparation of a Ferulic Acid-Phospholipid Complex to Improve Solubility, Dissolution, and B16F10 Cellular Melanogenesis Inhibition Activity[J]. Chemistry Central Journal, 2017, 11(1): 1-8.
- [28] OU Juan-ying, WANG Ming-fu, ZHENG Jie, et al. Positive and Negative Effects of Polyphenol Incorporation in Baked Foods[J]. Food Chemistry, 2019, 284: 90-99.
- [29] QIAN Xiao-jie, GU Yu-juan, SUN Bing-hua, et al. Changes of Aggregation and Structural Properties of Heat-Denatured Gluten Proteins in Fast-Frozen Steamed Bread during Frozen Storage[J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130492.
- [30] TANG Yu, YANG Ya-xuan, WANG Qi-ming, et al. Combined Effect of Carboxymethylcellulose and Salt on Structural Properties of Wheat Gluten Proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 97: 105189.
- [31] WANG Xiang-yu, GUO Xiao-na, ZHU Ke-xue. Polymerization of Wheat Gluten and the Changes of Glutinin Macropolymer (GMP) during the Production of Chinese Steamed Bread[J]. Food Chemistry, 2016, 201: 275-283.
- [32] PAN Jun-xian, ZHANG Hai-hua, LIU Jun, et al. Effects of Catechins on the Polymerisation Behaviour, Conformation and Viscoelasticity of Wheat Gluten[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(2): 753-761.
- [33] BOURASSA P, CÔTÉ R, HUTCHANDANI S, et al. The Effect of Milk Alpha-Casein on the Antioxidant Activity of Tea Polyphenols[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2013, 128: 43-49.

- [34] 徐敏. 茶叶提取物对中式挂面品质及小麦淀粉理化性质的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020: 34-37.
XU Min. Effect of Tea Extracts on Quality Characteristics of Chinese Dried Noodles and Physicochemical Properties of Wheat Starch[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020: 34-37.
- [35] 陈雪琪. 抗坏血酸对TBHQ的抗氧化再生作用及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 36-38.
CHEN Xue-qi. Study on the Antioxidant Regeneration of TBHQ by Ascorbic Acid and Its Application[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 36-38.
- [36] 张建友, 赵瑜亮, 张梦雨, 等. 不同贮藏温度酱鸭品质变化及其货架期预测[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 250-257.
ZHANG Jian-you, ZHAO Yu-liang, ZHANG Meng-yu, et al. Quality Changes and Predictive Modeling of Shelf Life of Sauced Duck Stored at Different Temperatures[J]. Food Science, 2019, 40(5): 250-257.
- [37] GHARBY S, HARHAR H, MATTHÄUS B, et al. The Chemical Parameters and Oxidative Resistance to Heat Treatment of Refined and Extra Virgin Moroccan Picholine Olive Oil[J]. Journal of Taibah University for Science, 2016, 10(1): 100-106.
- [38] KOZŁOWSKA M, ŻBIKOWSKA A, SZPICER A, et al. Oxidative Stability of Lipid Fractions of Sponge-Fat Cakes after Green Tea Extracts Application[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(5): 2628-2638.
- [39] 刘文博, 柯志刚, 徐霞, 等. 镀冰衣对鲢鱼冷冻贮藏过程中鲜度品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(17): 214-221.
LIU Wen-bo, KE Zhi-gang, XU XIA, et al. Effect of Ice Glazing on the Quality of Skipjack Tuna during Frozen Storage[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(17): 214-221.
- [40] NIKOO M, REGENSTEIN J M, AHMADI GAVLIGHI H. Antioxidant and Antimicrobial Activities of (-)-Epigallocatechin-3-Gallate (EGCG) and Its Potential to Preserve the Quality and Safety of Foods[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(3): 732-753.
- [41] TAGHVAEI M, JAFARI S M. Application and Stability of Natural Antioxidants in Edible Oils in Order to Substitute Synthetic Additives[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(3): 1272-1282.
- [42] 张佩, 陈忠琴, 曹文红, 等. 牡蛎抗氧化及降糖肽的结构特征及其体外模拟消化特性[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(21): 196-203.
ZHANG Pei, CHEN Zhong-qin, CAO Wen-hong, et al. Structural Characteristics of Antioxidant and Hypoglycemic Peptides from Oyster (*Crassostrea Hongkongensis*) and Their Simulated Digestive Properties in Vitro[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(21): 196-203.
- [43] 代雅杰, 黑雪, 邓莉梅, 等. 橘皮粉对面包烘焙品质及其酚类物质抗氧化能力的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(4): 154-158.
DAI Ya-jie, HEI Xue, DENG Li-mei, et al. Effect of Flavedo Powder on the Bread Baking Quality and Poly Phenols Antioxidant Activity[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(4): 154-158.
- [44] MASHKOUR M, AZARI A, HASHEMI SHAHRAKI M, et al. Effect of Green Tea Powder on Physicochemical Properties and Glycemic Potential of Sponge Cake[J]. Journal of Food Quality, 2022, 2022: 1-7.
- [45] NAMAL SENANAYAKE S P J. Green Tea Extract: Chemistry, Antioxidant Properties and Food Applications - a Review[J]. Journal of Functional Foods, 2013, 5(4): 1529-1541.
- [46] WANG Yu, HO C T. Polyphenolic Chemistry of Tea and Coffee: A Century of Progress[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(18): 8109-8114.
- [47] OLIVER S, VITTORIO O, CIRILLO G, et al. Enhancing the Therapeutic Effects of Polyphenols with Macromolecules[J]. Polymer Chemistry, 2016, 7(8): 1529-1544.
- [48] AWIKA J M, ROONEY L W, WU Xian-li, et al. Screening Methods to Measure Antioxidant Activity of Sorghum (*Sorghum Bicolor*) and Sorghum Products[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(23): 6657-6662.
- [49] 王存堂, 高增明, 姜辰昊, 等. 黄色洋葱皮不同溶剂多酚提取物的总酚、总黄酮含量及抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(20): 325-328.
WANG Cun-tang, GAO Zeng-ming, JIANG Chen-hao, et al. Content of Total Phenols, Flavonoids and Its Antioxidant Activities of Various Solvent Polyphenol Extracts from Yellow Onion Peel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(20): 325-328.
- [50] OSMAN A M, WONG K K Y, FERNYHOUGH A. ABTS Radical-Driven Oxidation of Polyphenols: Isolation and Structural Elucidation of Covalent Adducts[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2006, 346(1): 321-329.
- [51] HEIM K E, TAGLIAFERRO A R, BOBILYA D J. Fla-

- vonoid Antioxidants: Chemistry, Metabolism and Structure-Activity Relationships[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2002, 13(10): 572-584.
- [52] FU Zheng-jie, YOO M J Y, ZHOU Wei-biao, et al. Effect of (-)-Epigallocatechin Gallate (EGCG) Extracted from Green Tea in Reducing the Formation of Acrylamide during the Bread Baking Process[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 162-168.
- [53] LUND M N, RAY C A. Control of Maillard Reactions in Foods: Strategies and Chemical Mechanisms[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(23): 4537-4552.
- [54] 王宝贝, 蒋霖锴, 刘璐璐, 等. 鲭鱼活性肽对吐司面包品质的影响及其生物活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(22): 150-156.
- WANG Bao-bei, JIANG Lin-pu, LIU Lu-lu, et al. Mackerel Bioactive Peptides and the Effect of these Peptides on Bread Quality[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(22): 150-156.
- [55] 贾祥祥, 丁卫星, 王圣宝, 等. 小麦品质指标与面包感官评价和质构特性的关系研究[J]. 现代面粉工业, 2015, 29(6): 23-28.
- JIA Xiang-xiang, DING Wei-xing, WANG Sheng-bao, et al. Study on the Relationship between Wheat Quality Index and Sensory Evaluation and Texture Characteristics of Bread[J]. Modern Flour Milling Industry, 2015, 29(6): 23-28.
- [56] DENG Nan, DENG Zhong, TANG Can, et al. Formation, Structure and Properties of the Starch-Polyphenol Inclusion Complex: A Review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 667-675.
- [57] ZHAO Jing-wen, Jie-Chen, HU Wen-xuan, et al. Effect of Polyphenolic Compounds on Starch Retrogradation and in Vitro Starch Digestibility of Rice Cakes under Different Storage Temperatures[J]. Food Biophysics, 2021, 17: 26-37.
- [58] WANG Pei, ZOU Min, LIU Ke-xin, et al. Effect of Mild Thermal Treatment on the Polymerization Behavior, Conformation and Viscoelasticity of Wheat Gliadin[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 984-992.

责任编辑: 彭颖