

杏鲍菇空气煎炸过程品质变化与羧甲基赖氨酸、羧乙基赖氨酸生成研究

靳雯, 景凯鑫, 张冬鸽, 云少君, 曹谨玲, 程艳芬, 程菲儿, 李永, 冯翠萍

Changes in Quality and the Formation of N^ε-Carboxymethyl-Lysine and N^ε-Carboxyethyl-Lysine during Air-frying of *Pleurotus eryngii*

JIN Wen, JING Kaixin, ZHANG Dongge, YUN Shaojun, CAO Jinling, CHENG Yanfen, CHENG Feier, LI Yong, and FENG Cuiping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023110110>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单糖的类型对模拟体系中晚期糖基化终末产物生成的影响

Effect of Monosaccharide on the Formation of Advanced Glycation Endproducts in Model Systems

食品工业科技. 2019, 40(15): 52-58,65 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.15.009>

鱼新鲜度对其烤鱼片中晚期糖基化终末产物形成的影响

Effect of Fish Freshness on the Formation of Advanced Glycation End-products(AGEs)in Grilled Fish Fillets

食品工业科技. 2020, 41(17): 13-18,31 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.003>

添加糖与酱油对油炸鲟鱼晚期糖化终末产物形成的影响研究

Effect of Soft White Sugar and Soy Sauce Addition on the Formation of Advanced Glycation End Products in Fried Sturgeon Patties

食品工业科技. 2021, 42(22): 30-36 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021020030>

L-精氨酸或L-赖氨酸对反复冻融鸭肉饼品质的影响

Effect of L-Arginine or L-Lysine on the Quality of Duck Meat Patties during Freeze-thaw Cycles

食品工业科技. 2024, 45(4): 78-86 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023040163>

ε-聚赖氨酸对牡蛎的防腐抗菌效果

Antiseptic and Antimicrobial Effects of ε-polylysine on Oysters

食品工业科技. 2019, 40(24): 270-275 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.24.044>

L-赖氨酸功能化纤维素对模拟苹果汁中铅的吸附特性研究

Study on Adsorption Characteristics of Lead in Simulates Apple Juice by L-lysine Functionalized Cellulose

食品工业科技. 2024, 45(8): 97-109 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050197>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

靳雯, 景凯鑫, 张冬鸽, 等. 杏鲍菇空气煎炸过程品质变化与羧甲基赖氨酸、羧乙基赖氨酸生成研究 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(22): 37-45. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110110

JIN Wen, JING Kaixin, ZHANG Dongge, et al. Changes in Quality and the Formation of N^ε-Carboxymethyl-Lysine and N^ε-Carboxyethyl-Lysine during Air-frying of *Pleurotus eryngii*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(22): 37-45. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110110

· 研究与探讨 ·

杏鲍菇空气煎炸过程品质变化与羧甲基赖氨酸、羧乙基赖氨酸生成研究

靳雯¹, 景凯鑫¹, 张冬鸽², 云少君¹, 曹谨玲¹, 程艳芬¹, 程菲儿¹, 李永^{1,*}, 冯翠萍^{1,*}
(1. 山西农业大学食品科学与工程学院, 山西晋中 030801;
2. 万荣县综合检验检测中心, 山西运城 044200)

摘要: 本文以杏鲍菇脆片为研究对象, 分别采用荧光光谱法和超高效液相色谱-三重四极杆串联质谱法测定脆片中荧光性晚期糖基化终末产物 (Advanced glycation end products, AGEs) 以及 2 种极具代表性的典型晚期糖基化终末产物羧甲基赖氨酸 (N^ε-carboxymethyl-lysine, CML) 和羧乙基赖氨酸 (N^ε-carboxyethyl-lysine, CEL) 的含量, 并研究不同煎炸温度、时间对杏鲍菇品质的影响。结果表明: 杏鲍菇脆片在煎炸过程中发生了褐变, 色泽开始由白色变成金黄色, 时间越长、温度越高, 颜色越深。脆片的水分含量显著 ($P<0.05$) 减少, 硬度变化趋势为先减小后增大, 且在煎炸过程中, 煎炸时间和温度对杏鲍菇中 CML 和 CEL 的形成均具有显著 ($P<0.05$) 的影响, 其含量随着煎炸温度和煎炸时间的增加而不断增加。在 180 °C、20 min 下, CML 和 CEL 的含量达到了最高, 分别是 13.75 和 70.63 μg/g。但荧光 AGEs 的生成量在 180 °C、10 min 要比 160 °C、10 min 高 4.5 AU。在 160 °C、10 min 下, CML 和 CEL 的含量分别是 4.54 和 8.34 μg/g, 相比于 160 °C、20 min 下, 分别减少了 46.65% 和 62.48%, 且在此条件下感官评定较好, 与 180 °C、10 min 差异不显著, 同时生成的 AGE 较少。因此结合各个指标的测定结果和感官评价, 最终确定杏鲍菇脆片最佳煎炸条件为 160 °C、10 min。

关键词: 杏鲍菇, 空气煎炸, 荧光性晚期糖基化终末产物, 羧甲基赖氨酸, 羧乙基赖氨酸

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)22-0037-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110110

本文网刊:



Changes in Quality and the Formation of N^ε-Carboxymethyl-Lysine and N^ε-Carboxyethyl-Lysine during Air-frying of *Pleurotus eryngii*

JIN Wen¹, JING Kaixin¹, ZHANG Dongge², YUN Shaojun¹, CAO Jinling¹, CHENG Yanfen¹, CHENG Feier¹,
LI Yong^{1,*}, FENG Cuiping^{1,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China;

2. Wanrong County Comprehensive Inspection and Testing Center, Yuncheng 044200, China)

Abstract: The fluorescent advanced glycation end products (AGEs) and two typical AGEs, N^ε-carboxymethyl-lysine (CML) and N^ε-carboxyethyl-lysine (CEL) were identified in *Pleurotus eryngii* chips using fluorescence spectroscopy and ultra-performance liquid chromatography-triple quadrupole tandem mass spectrometry, respectively. Additionally, the effect of frying temperatures and times on the quality of *Pleurotus eryngii* chips was investigated. The results showed that the *Pleurotus eryngii* chips underwent browning during the frying process, with the color changing from white to golden yellow. The color intensified as the air-frying time and temperature increased. The crispy slices had a significantly ($P<0.05$)

收稿日期: 2023-11-14

基金项目: 食用菌山西省科技创新团队 (201805D131009); 山西农谷建设科研专项项目 (SXNGJSKYZX201903); 山西省现代农业产业技术体系建设项目 (2023CYJSTX09)。

作者简介: 靳雯 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: 1055035049@qq.com。

* 通信作者: 李永 (1986-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品加工与组分变化, E-mail: yong.li@sxau.edu.cn。

冯翠萍 (1970-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: ndfcp@163.com。

reduction in moisture content, while their hardness first dropped and subsequently rose. In addition, during the frying process, both the frying time and temperature significantly ($P<0.05$) impacted the formation of CML and CEL in *Pleurotus eryngii*, with their levels increasing with higher frying temperatures and longer frying times. The concentrations of CML and CEL peaked at 13.75 and 70.63 $\mu\text{g/g}$, respectively, after 180 $^{\circ}\text{C}$ for 20 min. The amounts of fluorescent AGEs generated at 180 $^{\circ}\text{C}$ for 10 min was 4.5 AU higher than at 160 $^{\circ}\text{C}$ for 10 min ($P<0.05$). The contents of CML and CEL were 4.54 and 8.34 $\mu\text{g/g}$, respectively, after 10 minutes at 160 $^{\circ}\text{C}$. These values were 46.65% and 62.48% lower than those observed after 20 min at 160 $^{\circ}\text{C}$. Under these conditions, the sensory evaluation was better, and the difference was not significant compared with 180 $^{\circ}\text{C}$ and 10 min, while the formation of AGEs was lower. Thus, the ideal frying condition of *Pleurotus eryngii* chips determined based on all parameters is at 160 $^{\circ}\text{C}$ for 10 min.

Key words: *Pleurotus eryngii*; air frying; fluorescent advanced glycation end products; N^ε-carboxymethyl-Lysine; N^ε-carboxyethyl-Lysine

杏鲍菇隶属侧耳科侧耳属,通常被认为是平菇之王。它原产于欧洲,目前被亚洲、美洲在内的世界其他地区广泛食用^[1],因有杏仁味、菌肉肥厚似鲍鱼而得名,近年来被广泛开发栽培^[2-3]。此外,杏鲍菇中的生物活性成分具有增强人体免疫力、抗动脉粥样硬化、促进消化、降解胆固醇等多种功能^[4]。近年来,随着食品加工研究的不断深入,许多高新设备被应用于食用菌的加工行业,如:市场上常见的食用菌麦片,食用菌速食面,菌菇汤类等都是通过冷冻干燥技术制得的^[5],还有杏鲍菇酸奶、杏鲍菇罐头^[6]及杏鲍菇干制品等的研究,不仅保持了杏鲍菇原有的风味,且充分利用了杏鲍菇的营养特性^[7-9]。

晚期糖基化终末产物(Advanced glycation end products, AGEs)是还原糖与蛋白质经美拉德反应等途径形成的一系列稳定聚合产物的总称^[10],是多种分子结构差异性较大的物质组成的化学危害物,存在于大多数热加工食品的基质中,其种类繁多,生成机理复杂。按照是否自带发色基团分类,AGEs分为非荧光 AGEs 和荧光 AGEs^[11]。其中非荧光 AGEs 有羧甲基赖氨酸(N^ε-carboxymethyl-lysine, CML)、羧乙基赖氨酸(N^ε-carboxyethyl-lysine, CEL)、吡咯素;荧光 AGEs 有戊糖昔素和甲基乙二醛赖氨酸二聚体(MOLD)。在食品的热处理过程中,AGEs 的含量会增加,而在储存过程中,AGEs 会继续变褐。AGEs 可以在体内形成,也可以来自外部来源,如饮食和吸烟^[12]。CML 和 CEL 是 2 种典型的 AGEs,常被作为食品中 AGEs 含量的主要指标^[13]。

随着生活质量的提高,人们对优质食品有了更大的需求,消费者更加注重食品的营养和安全。在食品加工中,美拉德反应常被用来为不同种类的食品提供独特的风味和特别的颜色^[14]。然而,这一过程往往伴随着一些潜在的化学危害,如 AGEs。一些研究表明,AGEs 过量积累会导致多种疾病,如尿毒症、炎症反应、衰老、肾脏疾病、心脑血管疾病,尤其是糖尿病,并且是肿瘤发生和恶变的原因之一^[15-16]。因此,针对食品中 AGEs 的研究也应该越来越受到关注和重视。

大量研究发现 AGEs 主要集中在脂肪类食品

(如黄油、奶酪、蛋黄酱等),蛋白质类食品(如猪肉、鸡肉和牛肉等)和干热加工食品(如饼干、薯条等)等中^[17]。AGEs 主要是通过两种途径在人体内积累,一是通过人体内的营养代谢反应,另一种则是通过饮食直接摄入^[18]。在满足人体营养代谢的基础上,体内过多的营养成分就会与糖发生交联反应形成 AGEs。AGEs 形成最经典的途径就是美拉德反应^[19]。食品加工工艺^[20]、食品原料^[21]、贮藏条件等均会影响食品中 AGEs 的形成。加工条件对食品中 AGEs 的形成具有重要的影响^[22],且加热时间和加热温度对 AGEs 的影响最为显著。赵闪闪^[23]模拟制作秋刀鱼罐头,并确定蒸煮、风干和油炸三种不同的加工方式对 AGEs 形成的影响,结果秋刀鱼罐头中 CML 和 CEL 的含量分布依次为:油炸>风干>蒸煮。潘宏甜^[24]以大豆、藜麦作为豆类和杂粮的代表,探究加热温度、加热时间等加工条件对荧光性 AGEs 形成的影响,在时间相同的情况下,随着加工温度的升高,三种模拟体系中 AGEs 的生成量均表现出先上升后降低趋势,且于 100 $^{\circ}\text{C}$ 时,荧光值达到最大。Sun 等^[25]研究了热处理对牛肉中 CML 和 CEL 形成的影响,结果表明,牛肉中 CML 和 CEL 的含量随温度的升高、时间的延长而增多。通过以上实验,表明了加热时间和温度对 AGEs 含量的影响极其显著^[26]。

加工条件会影响 AGEs 的生成,但是在食用菌制品中还未有相关报道。目前 AGEs 安全性有很多报道,饮食摄入是重要一环,如何表征不同食材及加工过程 AGEs 的积累规律,是开发健康美味食品的基础工作。食用菌大多鲜食,或干制。杏鲍菇煎炸脆片的开发,除了需要关注品质变化还需要研究相关危害物的积累情况,在食用菌加工制品中相关基础数据的积累还很匮乏。

基于此,本文拟研究杏鲍菇在空气煎炸这一热加工过程中,不同温度和加工时间对杏鲍菇品质及 AGEs 形成的影响。试验通过测定杏鲍菇煎炸后的色差、质构、水分含量、AGEs 含量、感官等指标,从而评价杏鲍菇加工品的品质以及安全性。为今后杏鲍菇产品的开发提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜杏鲍菇 山西省晋中市太谷区佳缘生活超市; CML、CEL 美国 Santa Cruz Biotechnology 公司; 乙腈、甲醇、甲酸、邻苯二胺、正己烷、盐酸、硼氢化钠、四硼酸钠、硼酸、氢氧化钠 均为国产分析纯。

Waters UPLC I-Class XEVO TQ-S Micro 三重四极杆液相质谱联用仪、Waters BEH C₁₈ 柱(2.10×100 mm, 1.70 μm) 美国 Waters 公司; KL55-VF509 型空气炸锅 杭州九阳生活电器有限公司; 5417/R 型高速冷冻离心机 上海佐明机械设备有限公司; TMS-PRO 质构仪 美国 FTC 公司; KONICA MINOLTA Spectrophotometer CM-5 全自动色差计 Konica Minolta Sensing Americas, Inc; SCIENTZ-30YD/A 型冷冻干燥机 宁波新芝冻干设备股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品的制备 工艺流程: 挑选原料→清洗→修整切片→漂烫→冷却→沥水→空气煎炸→成品。

挑选长度在 12~15 cm 左右菌肉肥厚、新鲜的杏鲍菇。清洗干净后切成 5 mm 厚度均匀的片状。将杏鲍菇片放入 100 °C 沸水中, 漂烫 2 min。热烫后立即捞起, 在冷水中冷却 2 min。将冷却后的杏鲍菇放置在干净的吸水绵布上, 直至杏鲍菇不滴水。用锡纸包裹烤盘, 将空气炸锅预热到指定温度, 并将杏鲍菇片放入空气炸锅中, 进行空气煎炸并设置煎炸时间^[27]。煎炸条件如下: 煎炸温度为: 160、180 °C; 煎炸时间: 5、10、15 和 20 min。

煎炸完毕, 待杏鲍菇脆片自然冷却后, 一部分用于感官评定、硬度、色泽和水分含量的测定; 其余脆片真空冻干, 之后用研钵磨粉, 于-80 °C 冰箱中冷冻保存, 用于 AGEs 的检测。

1.2.2 色泽的测定 采用色差计测定脆片的色泽。测定之前, 使用标准白板校准色差计。测定 L^* 、 a^* 、 b^* 以表示杏鲍菇脆片的颜色。每种样品测 6 次, 结果取其平均值。

$$\Delta E = \sqrt{(L-L^*)^2 + (a-a^*)^2 + (b-b^*)^2}$$

式中, ΔE 表示煎炸后杏鲍菇脆片与新鲜杏鲍菇之间的色差。其中 L^* 表示白度, 值越大, 色泽越白。 a^* 表示颜色红或绿, 数值为正表示偏红, 为负表示偏绿。 b^* 表示颜色黄或蓝, 数值为正表示偏黄, 为负表示偏蓝。

1.2.3 质构的测定 将杏鲍菇脆片切分为厚度不变, 长和宽均为 1 cm 的杏鲍菇丁, 采用 TMS-PRO 质构仪, TMS 6 mm 不锈钢探头进行破碎力测试。每种样品测 6 次, 结果取其平均值。质构分析参数: 力量感应元的量程 100 N, 探头高度 10 mm, 检测速度

60 mm/min, 测试后速度 120 mm/min。

1.2.4 水分含量的测定 参照 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》中直接干燥法测定杏鲍菇的水分含量。

1.2.5 感官评定 从脆片的形态、色泽、香味和口感四个指标进行感官评定^[28]。感官评价小组由 10 名成员组成。成员由 5 男 5 女组成, 年龄分布在 19~45 岁。

综合评分为评价人员对杏鲍菇脆片的总体接受度。感官评价标准见表 1。

表 1 感官评分标准
Table 1 Sensory scoring criteria

指标	标准	评分(分)	权重
形态	形态平整, 没有卷曲	8~10	30
	较皱缩, 边缘卷曲	4~7	
	有褶皱, 卷曲严重	≤3	
色泽	自然的金黄色, 色泽均匀	8~10	30
	接近原菇色或颜色略暗、轻微褐变, 色泽较均匀	4~7	
	颜色发黑、褐变明显, 色泽均匀性差	≤3	
香味	有杏鲍菇特有的香气、焦香味	8~10	20
	略带香味	4~7	
	无香味, 带有糊味	≤3	
口感	口感酥脆, 味道适中, 易被接受	8~10	20
	较酥脆或偏硬、偏软, 味道正常, 可以被接受	4~7	
	很硬或很软, 味道过重, 很难被接受	≤3	

1.2.6 荧光性 AGEs 的测定 参照喻佩^[29]的实验方法, 并稍作修改, 采用荧光光谱法测定杏鲍菇脆片中的荧光性 AGEs 含量。称取 200 mg 杏鲍菇粉末于离心管中, 加 9 mL 去离子水, 涡旋混匀 1 min, 室温条件下超声(500 W)处理 1 h 后过滤, 保留滤液。预热荧光分光光度计, 激发波长设为 375 nm, 发射波长设为 440 nm, 选择合适的灵敏度, 将样品滤液装入四面透光的比色皿中进行测定。每种样品测 3 次, 结果取其平均值。

1.2.7 非荧光性 AGEs(CML、CEL)的测定 参照 SHI 等^[30]和刘芹邑等^[31]的操作方法, 进行 CML、CEL 的测定。准确称取 100 mg 杏鲍菇粉末于离心管中, 加入 3 mL 正己烷, 涡旋 30 s, 室温条件下静置 0.5 h, 弃去溶剂, 向样品中加入 1 mL 硼酸盐缓冲液(0.20 mol/L, pH9.20)、1 mL 1 mol/L 硼氢化钠溶液和 1~2 滴正辛醇, 敞口放置在 4 °C 冰箱中, 过夜还原。还原液转移至 25 mL 耐压瓶中, 加入 3 mL 水、5 mL 12 mol/L HCl, 氮气吹扫 1 min, 密封, 110 °C 水解 24 h。水解液冷却至室温, 过滤后, 纯水定容至 25 mL, 吸取 0.60 mL 滤液, 氮气吹干, 再用 2 mL 0.1 mol/L HCl 复溶。

用 3 mL 甲醇和 3 mL 0.10 mol/L HCl 活化固相萃取柱, 将上述处理后的溶液转移至小柱中, 用 3 mL 0.10 mol/L HCl, 3 mL 甲醇淋洗, 3 mL 氨化甲醇(5:95, V/V)洗脱, 40 °C 下氮气吹干, 再用 0.60 mL

50%乙腈溶液复溶, 12000 r/min离心10 min, 上清液转移至液相进样瓶中, 供UPLC-MS/MS测试。

液相色谱条件: 色谱柱 ACQUITY UPLC® BEH C18(2.10×100 mm Column, 1.70 μm), 柱温 40 °C, 进样量 2.00 μL, 使用 0.10% 甲酸(A)和乙腈(B)作为流动相进行梯度洗脱, 流速为 0.30 mL/min, 流动相相体积分数如下: 0~0.50 min: 95%A; 0.50~3 min: 10%A; 3~5 min: 95%A。

质谱条件: 如表 2 所示, 离子源 ESI⁺, 离子源温度 120 °C, 脱溶剂气温度 400 °C, 锥孔电压 30 V, 毛细管电压 3 kV。

表 2 多重反应检测模式的质谱参数

Table 2 Mass spectrometric settings for multiple reaction monitoring

目标物	前体离子 (m/z)	产物离子 (m/z)	锥孔电压 (V)	碰撞能量 (eV)
CML	205	84	30	14
CEL	219	84	30	16

1.3 数据处理

以平均值±标准偏差的形式表示结果。使用 Excel 处理数据; 用 Origin 2021 绘图, 用 SPSS 26.0 进行显著性分析, 以 $P<0.05$, $P<0.01$ 为差异具有统计学意义的判定标准。

2 结果与分析

2.1 不同煎炸温度与时间对杏鲍菇脆片色泽的影响

色泽是评判食品品质优劣的重要指标之一, 影响产品色泽的主要因素是煎炸温度和煎炸时间。 ΔE 表示煎炸后杏鲍菇脆片与新鲜杏鲍菇之间的色差。煎炸时间越长, 脆片与新鲜杏鲍菇的色差越明显。由图 1 I、图 1 II 可以看出, a^* 、 b^* 都呈现出上升的趋势。此外, 各煎炸时间下的 L^* 、 a^* 和 b^* 均与新鲜杏鲍菇的 L^* 、 a^* 、 b^* 有显著性差异 ($P<0.05$)。 L^* 经常用来表示油炸食品的质量控制参数, L^* 越大, 表明食品白度越大, 更容易被人们接受。由图 1 III 可以看出, 随着煎炸温度的升高、时间的延长, 脆片的 L^* 逐渐减小, 表示白度值减小。结合图 2 也能明显的看出杏鲍菇脆片的色泽发生了显著的变化, 时间越长、温度越高, 脆片的颜色越深, 变化越明显。当煎炸时间为 10 min 及以上时, 2 种温度之间的 L^* 和 a^* 均存在显著性差异 ($P<0.05$); 当煎炸时间为 15 min 及以上时, 2 种温度之间的 b^* 开始出现显著性差异 ($P<0.05$)。由图 1 IV 可知, 空气煎炸过程中, 脆片的总色差呈上升趋势。当煎炸时间为 10 min 及以上时, 2 种温度之间的 ΔE 开始出现显著性差异 ($P<0.05$)。从图 2 可以观察到, 在煎炸 5 min 时, 杏鲍菇脆片呈现黄白色, 色泽均匀; 煎炸 10 min 时, 颜色变化不明显, 稍微变黄; 15 min 时, 脆片逐渐金黄, 并略带褐色; 当煎炸 20 min 后, 脆片褐变明显, 颜色发黑。在煎炸过程中, L^* 降低, a^* 、 b^* 升高, ΔE 色差增

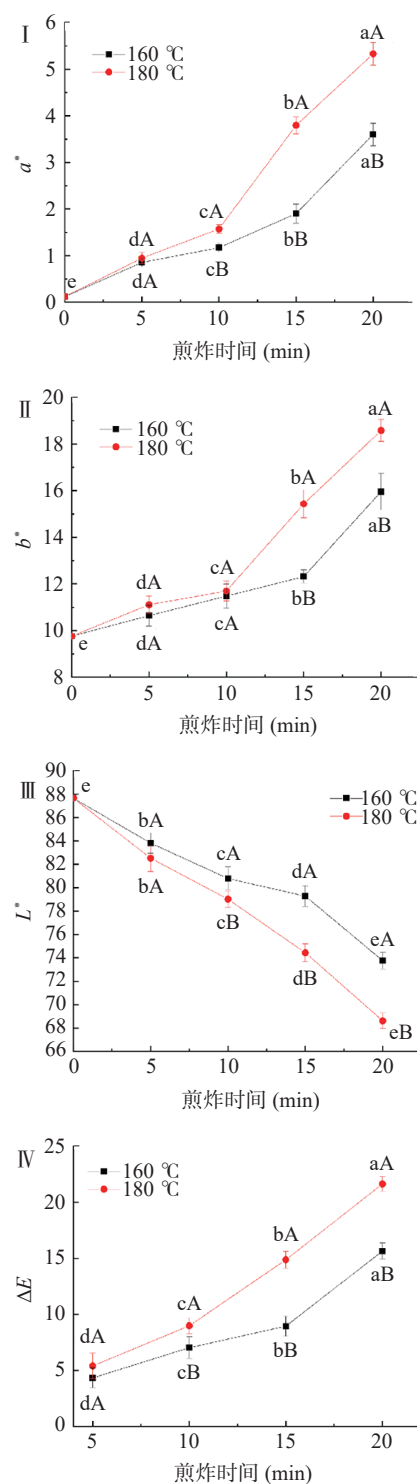


图 1 煎炸温度和时间对杏鲍菇脆片色泽的影响

Fig.1 Effects of frying temperature and time on product color
注: I: a^* ; II: b^* ; III: L^* ; IV: ΔE ; 不同小写字母表示同一温度不同时间之间差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母表示同一时间不同温度间差异显著 ($P<0.05$), 图 3~图 4、图 5~图 6 同。

大。这是由于脆片在加热过程中发生了褐变, 而且脆片中含有较高的油脂含量以及蛋白质和碳水化合物, 为脂质氧化和美拉德反应的缓慢发生提供了有利条件^[32]。因此, 当空气煎炸条件为 160 °C、5 min 时的脆片色泽最白, ΔE 最小, 为 4.28 ± 0.87 ; 空气煎炸条件为 180 °C、20 min 时的脆片色泽最深, ΔE 最大, 为

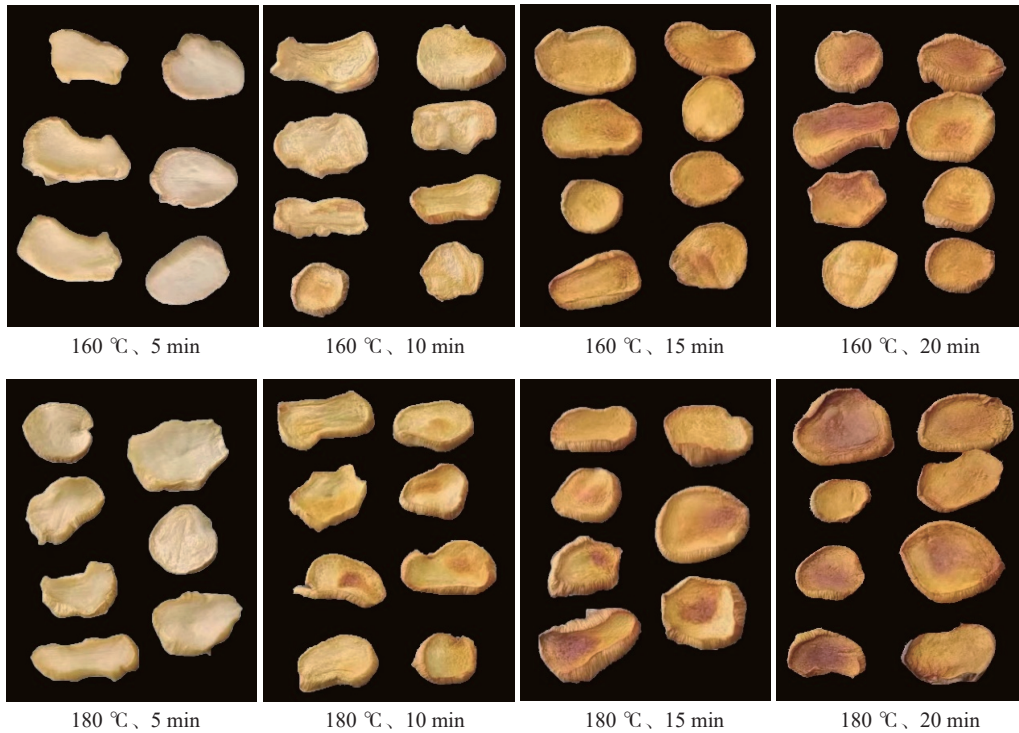


图 2 不同煎炸条件处理后的杏鲍菇脆片外观

Fig.2 Appearance of *Pleurotus eryngii* crisp after different frying conditions

21.63±0.66。这与赵迪青等^[31]的研究结果一致,随着油炸时间的增长,杏鲍菇脆片的 L^* 减小, a^* 呈现上升趋势,而对 b^* 来说,同样地也是随着油炸时间的增加呈现上升趋势,黄度值增加。

2.2 不同煎炸温度与时间对杏鲍菇脆片硬度的影响

由图 3 可知,在煎炸过程中,脆片硬度变化的趋势为先降低后升高。煎炸时间在 5 min 以内时,产品硬度减小,之后,其硬度逐渐增大。煎炸初期脆片水分蒸发过快,破坏了细胞的结构,细胞成分流出^[34],细胞间粘性增大,导致杏鲍菇变软,继续煎炸,产品温度升高,水分快速蒸发导致产品变硬,因此其硬度变化趋势为先减小后增大。温度一定的条件下,当煎炸时间为 15 min 时,脆片的硬度发生显著性变化($P < 0.05$)。煎炸时间为 20 min 时,2 种温度下脆片的硬度存在显著性差异($P < 0.05$)。实验发现,160 °C、

5 min 与 180 °C、5 min 条件下得到的产品硬度较小,硬度分别为 1.07±0.37 N、1.09±0.18 N,原因是杏鲍菇组织中的水分含量较大,所以其不具有酥脆特性;煎炸条件为 160 °C、15 min 的杏鲍菇脆片拥有适度的脆性,硬度为 4.99±0.51 N;煎炸时间为 20 min 时,杏鲍菇脆片的硬度过大,不易被人们接受。马文玉^[35]在微波膨化浆果脆片过程中,加热速率显著影响树莓脆片质构品质,脱水越多,硬度越高。颜未来^[36]曾研究不同油炸温度对香芋片质构特性的影响,发现香芋片的硬度随着油炸温度的上升而上升。虽然油炸、微波膨化等加工方式与本研究中采用的空气煎炸在传热过程中有差异,但是总体变化趋势都是随着加工时间的延长产品硬度升高。

2.3 不同煎炸温度与时间对杏鲍菇脆片水分含量的影响

由图 4 可知,煎炸时间越长、温度越高,杏鲍菇脆片的水分含量越低,且各温度之间、各时间之间均呈显著性差异($P < 0.05$),可知温度和时间对其水分含量有着重要影响。由于脆片中含有大量油脂、蛋白质和碳水化合物,导致脆片也发生了缓慢的油脂氧化和美拉德反应。煎炸过程中,杏鲍菇脆片的水分含量显著($P < 0.05$)减少。新鲜杏鲍菇的水分含量为 92.23%±1.10%,空气煎炸 5 min 后,水分含量有所降低;煎炸 15 min 后,水分含量大幅降低。180 °C、20 min 条件下,水分含量降至 2.58%±0.33%。由此可知,煎炸时间和煎炸温度均与杏鲍菇脆片的水分含量成反比,煎炸时间越长,温度越高,杏鲍菇脆片的含水量越低,反之越高。任爱清等^[37]对香菇脆片的研

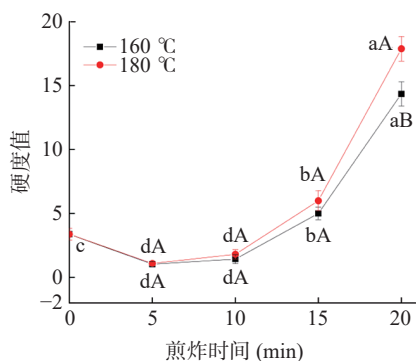


图 3 空气煎炸过程中温度和时间对硬度的影响

Fig.3 Effects of temperature and time on hardness during air frying

究得出同样的结论,香菇脆片的含水率随着油炸时间的增加而逐渐降低。

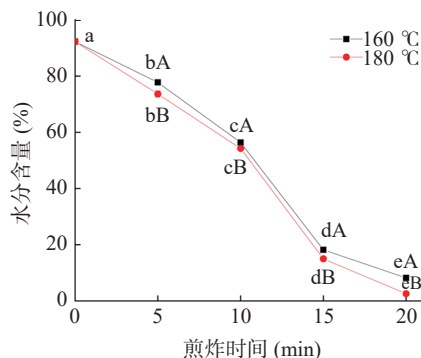


图4 煎炸温度和时间对水分含量的影响
Fig.4 Effects of frying temperature and time on moisture content

2.4 杏鲍菇脆片感官评价分析

由表3、图2可知,各条件处理后的杏鲍菇脆片在形态上没有明显的变化,都具有较好的外观,并无发生严重的卷曲现象,但皱缩较明显,脆片体积减小,煎炸条件为160 °C、5 min的杏鲍菇脆片形态最为平整。煎炸条件为180 °C、10 min的杏鲍菇脆片色泽最佳,为金黄色且色泽均匀。煎炸条件为160 °C、10 min与180 °C、10 min的杏鲍菇脆片香味最佳,有诱人的焦香味,且没有糊味。煎炸条件为160 °C、10 min、180 °C、10 min的杏鲍菇脆片口感最佳,酥脆可口,味道最易让人接受。

由表3可知,杏鲍菇脆片的感官得分随煎炸时间的延长而先升高后降低。经过180 °C、10 min煎炸处理的杏鲍菇脆片感官最佳,感官得分为7.03±0.44分,160 °C、10 min煎炸处理后的杏鲍菇脆片次之,得分为6.90±0.33分,这两种条件下差异不显著。从形态上可以选出,160 °C、5 min脆片为最佳,但是其口感较软,杏鲍菇味道过重;从色泽上观察,可以看出180 °C、10 min金黄且色泽均匀,煎炸时间越短、温度越低,脆片偏白,并不能够显现出煎炸后杏鲍菇的金黄色色泽,时间越长、温度越高,脆片则褐变明显,颜色偏褐,不易被人们接受;从香味和口感可以看出,160 °C、10 min与180 °C、10 min均较好。

2.5 杏鲍菇脆片中荧光性 AGEs 含量的分析

由图5可知,新鲜的杏鲍菇中荧光性 AGEs 的荧光强度为9.07±0.15 AU,煎炸条件为180 °C、20 min的杏鲍菇脆片中荧光性 AGEs 的含量最高,为41.93±0.15 AU,足足增加了4.6倍。各煎炸条件下得到的杏鲍菇脆片中,荧光性 AGEs 含量均与新鲜杏鲍菇中的荧光性 AGEs 含量存在显著性差异($P<0.05$)。当煎炸时间为0~5 min时,两种温度条件下 AGEs 的荧光强度皆趋于平缓,无显著性差异($P>0.05$),但当煎炸时间高于5 min时,180 °C下 AGEs 的荧光强度快速增加,两种温度条件间的荧光强度存在显著性差异($P<0.05$)。180 °C、10 min下 AGEs 的荧光强度是160 °C、10 min的1.43倍。

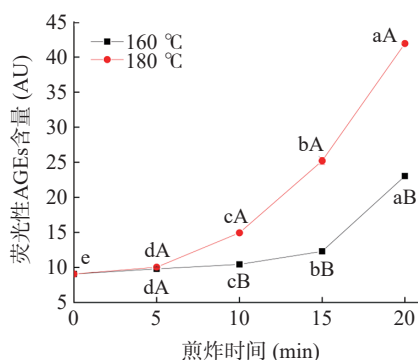


图5 煎炸温度和时间对荧光性 AGEs 含量的影响
Fig.5 Effects of frying temperature and time on fluorescence AGEs content

煎炸温度和时间是煎炸食品加工过程中的主要工艺参数,同时也是 AGEs 形成的重要影响因素。随着空气煎炸过程中温度的升高、时间的延长,杏鲍菇脆片中荧光性 AGEs 的含量呈上升趋势。杏鲍菇脆片中荧光性 AGEs 的形成依赖于煎炸时间和温度。这是因为杏鲍菇加工温度和它对美拉德反应和脂质过氧化反应的影响最为直接,温度越高,时间越长,生成的美拉德产物和脂质过氧化产物的种类和总量越多,相应的 AGEs 的总量越高。热诱导的美拉德反应通常发生在100 °C以上,当烘烤温度达到120~200 °C时,会加速形成 AGEs,温度越高,生成量越大^[38]。

表3 不同煎炸条件处理后的杏鲍菇脆片感官得分

Table 3 Sensory scores of *Pleurotus eryngii* chips after different frying conditions

处理条件	形态	色泽	香味	口感	感官得分
160 °C、5 min	较平整,边缘稍有卷曲	黄白色,色泽较均匀	略带香味	很软,杏鲍菇味道过重	5.50±0.47
160 °C、10 min	较皱缩,边缘稍有卷曲	黄白色,色泽均匀	有杏鲍菇特有的香味,焦香味	较软,味道正常	6.90±0.33
160 °C、15 min	较皱缩,边缘稍有卷曲	金黄、略带褐色,色泽较均匀	略带香味	口感酥脆,味道适中	6.50±0.32
160 °C、20 min	较皱缩,边缘稍有卷曲	颜色发黑,褐变明显	几乎无香味,带有糊味	很硬,糊味过重	4.37±0.43
180 °C、5 min	较皱缩,边缘卷曲	黄白色,色泽较均匀	略带香味	较软,味道正常	5.96±0.70
180 °C、10 min	较皱缩,边缘卷曲	金黄色,色泽均匀	有杏鲍菇特有的香味,焦香味	口感较酥脆,味道适中	7.03±0.44
180 °C、15 min	较皱缩,边缘稍有卷曲	颜色略暗,稍微褐变	略带香味	较硬,味道正常	6.28±0.54
180 °C、20 min	较皱缩,边缘稍有卷曲	颜色发黑,褐变明显	几乎无香味,带有糊味	很硬,糊味过重	4.08±0.44

2.6 杏鲍菇脆片中非荧光性 AGEs (CML、CEL) 含量的分析

由图 6 可知,经空气煎炸处理后的杏鲍菇脆片中 CML、CEL 含量均高于新鲜杏鲍菇中的含量。在 180 °C、20 min 条件下,杏鲍菇脆片中的 CML 含量是新鲜杏鲍菇中的 4.95 倍,CEL 含量是新鲜杏鲍菇中的 20.62 倍,相对于新鲜杏鲍菇来说显著增加 ($P<0.05$)。对于 CML 来说,160 °C、20 min,180 °C、15 min 和 180 °C、20 min 这三种处理方法得到的脆片中 CML 含量与新鲜杏鲍菇中的 CML 含量呈显著性差异 ($P<0.05$)。而对于 CEL 来说,160 °C、15 min,160 °C、20 min 和 180 °C、20 min 这三种处理方法得到的脆片中 CEL 含量与新鲜杏鲍菇脆片中 CEL 含量呈显著性差异 ($P<0.05$)。煎炸时间小于 10 min 时,热加工对脆片中 CML、CEL 的形成影响较小,只有少量 CML、CEL 形成;但当煎炸时间超过 10 min 时,热加工对脆片中 CML、CEL 的形成影响较大,其含量急剧上升。160 °C、10 min 时,CML 的含量为 4.54 $\mu\text{g/g}$,CEL 的含量为 8.34 $\mu\text{g/g}$,分别比同温度 20 min 条件下减少了 3.97 和 13.89 $\mu\text{g/g}$;180 °C、10 min 时,CML 的含量为 4.86 $\mu\text{g/g}$,CEL 的含量为 7.8 $\mu\text{g/g}$,比同温度 20 min 减少了 8.89 和 62.83 $\mu\text{g/g}$ 。可能是由于长时间的高温热处理,导致杏鲍菇脆片中蛋白质的 Amadori 产物的氧化降解,进而导致 AGEs 含量升高^[39]。图 6 中可以看出,在 160 °C、10 min 和 180 °C、10 min 下,脆片 CML、

CEL 含量差异不显著,且均与新鲜脆片含量差异不显著。

CML、CEL 的生成是一个动态的过程,在生成的同时又同时在发生降解和交联,这与刘文婷^[40]对葵花籽的研究结果保持一致,在 100~130 °C 温度范围内,CML 和 CEL 的生成量并不与温度呈现依赖性。在 140 °C 的条件下,CML 和 CEL 的生成量显著增加,且随着加热时间的延长,CML 和 CEL 的含量随之增加。但加热至 50 min 后,CML 和 CEL 的含量不再上升,CML 含量甚至出现了下降的情况。因此,在保证杏鲍菇品质的同时,应尽可能采取低的煎炸温度和时间,以降低 CML、CEL 的形成,这与朱玉洁^[41]采用 UPLC-MS/MS 法测定的结果一致。

3 结论

在空气煎炸过程中,杏鲍菇脆片的品质发生了显著的变化。杏鲍菇脆片在煎炸过程中发生了褐变,色泽由白色变成金黄色,时间越长、温度越高,颜色越深。继续煎炸颜色变褐, L^* 减小, b^* 增大。煎炸过程中脆片的水分含量显著减少,硬度变化趋势为先减小后增大。160 °C、10 min 和 180 °C、10 min 煎炸条件下感官评分差异不显著,且达到最高分,此时脆片品质最佳,最宜食用。杏鲍菇本身含有 AGEs,其含量受加工温度、时间的影响。在空气煎炸过程中,CML、CEL 和荧光性 AGEs 均不断生成和积累。而适当缩短煎炸时间,可以缓解该反应的发生。160 °C、10 min 和 180 °C、10 min 脆片的 CML 和 CEL 的含量均保持在较低水平,且差异不显著。而荧光性 AGEs 含量 160 °C、10 min 较 180 °C、10 min 低。综合感官评定结果和生成荧光性 AGEs、CML、CEL 的含量,最终确定杏鲍菇脆片的最佳煎炸条件为 160 °C、10 min,此时脆片品质最好,荧光性和非荧光性 AGEs 均处于较低水平。

AGEs 的产生是多种因素共同影响的结果,如加工时间、加工温度、食品成分、添加物等都会影响其含量,降低加工温度和加工时间是减少 AGEs 含量最简单有效的途径。本研究对相关健康产品的开发具有一定的理论指导。同时关于食用菌脆片加工过程 AGEs 生成的影响因素(如加工过的护色),减控措施是未来急需解决的问题。关于饮食中 AGEs 的摄入还没有明确的安全限量,因此尽量减少从食物中摄取 AGEs 是保证食品安全和机体健康的重要措施。

© The Author(s) 2024. 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] CHANG X Y, YANG A, BAO X, et al. An innovative structured fruit (SF) product made from litchi juice, king oyster mushroom (*Pleurotus eryngii*) and gellan gum: Nutritional, textural, sensorial properties[J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 152:

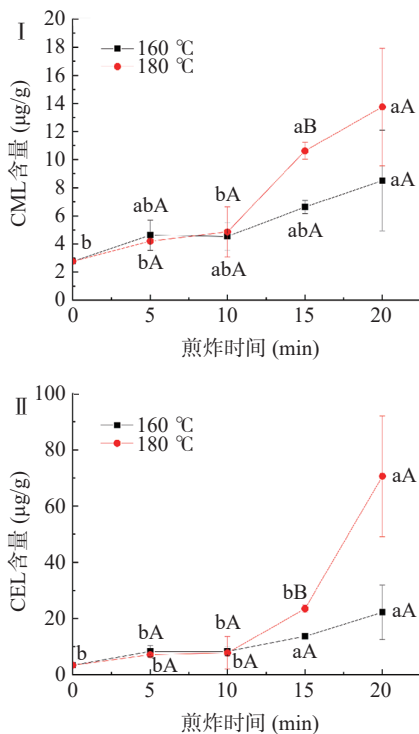


图 6 煎炸温度和时间对 CML、CEL 含量的影响

Fig.6 Effects of frying temperature and time on CML and CEL content

注: I: CML、II: CEL。

- 152.
- [2] WU D Z, JIA X, ZHENG X L, et al. Physicochemical and functional properties of *Pleurotus eryngii* proteins with different molecular weight[J]. *LWT*, 2023, 184: 115102.
- [3] ZHANG B R, LI Y Y, ZHANG F M, et al. Extraction, structure and bioactivities of the polysaccharides from *Pleurotus eryngii*: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules: Structure, Function and Interactions*, 2020, 150: 150.
- [4] 吴欣灿, 刘世柱, 胡丽玲, 等. 杏鲍菇多糖的生物活性研究进展[J]. *食药菌*, 2023, 31(3): 177-181. [WU X C, LIU S Z, HU L L, et al. Research progress on the biological activities of *Pleurotus eryngii* polysaccharide[J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 2023, 31(3): 177-181.]
- [5] 张桓, 辛松林, 刘美仑, 等. 国内食用菌产业及其产品发展状况[J]. *山西农经*, 2023(1): 100-103. [ZHANG H, XIN S L, LIU M L, et al. Domestic edible mushroom industry and its product development status[J]. *Shanxi Agricultural Economy*, 2023(1): 100-103.]
- [6] 冯嫣. 五香味杏鲍菇酱罐头加工工艺研究[J]. *中国调味品*, 2022, 47(2): 117-121. [FENG Y. Study on the processing technology of canned *Pleurotus eryngii* sauce with five-spices flavor[J]. *China Condiment*, 2022, 47(2): 117-121.]
- [7] 谭佩毅, 黄和升, 黄秀锦. 杏鲍菇苦荞复合饮料的研制[J]. *轻工科技*, 2017, 33(11): 1-2. [TAN P Y, HUANG H S, HAUNG X J. Development of *Eryngium pleurotus* Tartary buckwheat compound beverage[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2017, 33(11): 1-2.]
- [8] 张林婷, 韩维, 许兴华, 等. 杏鲍菇微粉果冻的研制及品质评价[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(11): 135-141. [ZHANG L T, HAN W, XU X H, et al. Preparation and quality evaluation of *Pleurotus eryngii* micro powder jelly[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(11): 135-141.]
- [9] 张文静. 杏鲍菇发酵饮料研制及其品质特性研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2023. [ZHANG W J. Research on preparation and quality characteristics of *Pleurotus eryngii* fermented beverage[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2023.]
- [10] 程威威, 王霞, 张忠飞, 等. 基于UPLC-QqQ-MS/MS同步检测热加工食品中典型晚期糖基化终末产物[J]. *食品科学*, 2021, 42(10): 316-321. [CHENG W W, WANG X, ZHANG Z F, et al. Simultaneous determination of typical advanced glycation end products in thermally processed foods by ultra-high performance liquid chromatography-quadrupole-tandem mass spectrometry[J]. *Food Science*, 2021, 42(10): 316-321.]
- [11] PERRONE A, GIOVINO A, BENNY J, et al. Advanced glycation end products (AGEs): Biochemistry, signaling, analytical methods, and epigenetic effects[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2020, 2020(3): 1-18.
- [12] LIU Y, LU L, YUAN S F, et al. Formation of advanced glycation end-products and α -dicarbonyl compounds through Maillard reaction: Solutions from natural polyphenols[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 120: 105350.
- [13] ZHANG Z N, CHEN Y, DENG P, et al. Isotope dilution-HPLC-MS/MS to investigate the production patterns and possible pathways of free and protein-bound AGEs and 4-MI in cookies[J]. *Food Research International*, 2023, 173: 113477.
- [14] 何颖, 李红, 潘雪男, 等. 日粮蛋白质与美拉德反应[J]. *国外畜牧学(猪与禽)*, 2022, 42(5): 1-3. [HE Y, LI H, PAN X N, et al. Immunomodulation by processed animal feed: The role of Maillard reaction products and advanced glycation end-products(AGEs)[J]. *Animal Science Abroad (Pigs and Poultry)*, 2022, 42(5): 1-3.]
- [15] CHEN X, WANG C F, ZHOU D, et al. Accumulation of advanced glycation end products promotes atrophic nonunion incidence in mice through a CtBP1/2-dependent mechanism[J]. *Experimental Cell Research*, 2023, 432(1): 113765.
- [16] CEPAS V, COLLINO M, MAYO J C, et al. Redox signaling and advanced glycation endproducts (AGEs) in diet-related diseases[J]. *Antioxidants*, 2020, 9(2): 142.
- [17] 龚频, 裴舒亚, 韩业雯, 等. 食源性晚期糖基化终末产物对人体的健康危害研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(6): 443-451. [GONG P, PEI S Y, HAN Y W, et al. Research on the harm of food-derived advanced glycation end products to human health[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(6): 443-451.]
- [18] 陈梁凯. 晚期糖基化终末产物及其受体与2型糖尿病的关联性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021. [CHEN L K. The association between advanced glycation end-products, receptor for advanced glycation end-products and type 2 diabetes mellitus[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.]
- [19] WEI S Y, YANG X, LIN M Y, et al. Development of a two-step pretreatment and UPLC-MS/MS-based method for simultaneous determination of acrylamide, 5-hydroxymethylfurfural, advanced glycation end products and heterocyclic amines in thermally processed foods[J]. *Food Chemistry*, 2024, 430: 136726.
- [20] BAI X, LI Y, LIANG W W, et al. Formation of advanced glycation end products of chicken breast meat induced by freeze-thaw cycles and subsequent cooking[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 244: 125387.
- [21] ZHANG L, ZHOU Q M, XU L, et al. Extraction optimization and identification of four advanced glycation-end products inhibitors from lotus leaves and interaction mechanism analysis[J]. *Food Chemistry*, 2023, 414: 135712.
- [22] WEN P P, ZHANG L, KANG Y W, et al. Effect of baking temperature and time on advanced glycation end products and polycyclic aromatic hydrocarbons in beef[J]. *Journal of Food Protection*, 2022, 85(12): 1726-1736.
- [23] 赵闪闪. 鱼类罐头食品体系中晚期糖基化终末产物的形成与控制[D]. 南昌: 南昌大学, 2022. [ZHAO S S. Formation and control of advanced glycation end products in the canned fish food system[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.]
- [24] 潘宏甜. 热处理对植物蛋白晚期糖基化末端产物和蛋白聚集形成的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2022. [PAN H T. Effects of heat treatment on the formation of advanced glycation end products and protein aggregates in plant proteins[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2022.]
- [25] SUN X H, TANG J M, WANG J, et al. Formation of advanced glycation endproducts in ground beef under pasteurisation conditions[J]. *Food Chemistry*, 2015, 172: 802-807.
- [26] 李华韬, 张巧智, 倪皓洁, 等. 食源性晚期糖基化终末产物检测技术研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(17): 362-371. [LI H T, ZHANG Q Z, NI H J, et al. Recent advances in detection technologies for dietary advanced glycation end products[J]. *Food Science*, 2022, 43(17): 362-371.]
- [27] 李伟荣, 任爱清, 陈国宝, 等. 杏鲍菇微波干燥研究与参数优化[J]. *农产品加工: 下*, 2016(6): 3. [LI W R, REN A Q, CHEN G B, et al. Study on microwave drying and parameter optimization of *Pleurotus eryngii* slices[J]. *Products Processing*, 2016(6): 3.]
- [28] 刘媛, 王健, 宋鹏飞, 等. 风味油炸杏鲍菇片加工工艺研究[J]. *粮食加工*, 2020, 45(2): 74-77. [LIU Y, WANG J, SONG P F, et al. Study on processing technology of fried apricot and abalone

- mushroom slices with flavor[J]. *Grain Processing*, 2020, 45(2): 74–77.]
- [29] 喻佩. 美拉德反应中羧甲基赖氨酸和羧乙基赖氨酸的形成及调控机理的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017. [YU P. Formation and reduction mechanism of N^ε-(carboxymethyl)lysine and N^ε-(carboxyethyl)lysine in Maillard reaction[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.]
- [30] SHI H N, QIN R K, WU R L, et al. Effect of cryoprotectants on the formation of advanced glycation end products and acrylamide in fried fish cakes[J]. *Food Bioscience*, 2021, 44: 101433.]
- [31] 刘芹邑, 张琪, 安婧, 等. 添加糖与酱油对油炸鲟鱼晚期糖化终末产物形成的影响研究[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(22): 30–36. [LIU Q Y, ZHANG Q, AN J, et al. Study on the effect of adding sugar and soy sauce on the formation of advanced glycation end products in fried sturgeon[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(22): 30–36.]
- [32] 伍玉菡, 杨松, 郭家刚, 等. 真空浸渍对低温真空油炸杏鲍菇脆片品质的影响研究[J]. *农产品加工*, 2020(4): 6–9. [WU Y H, YANG S, GUO J G, et al. The influence study of vacuum-impregnation on vacuum low-temperature frying *Pleurotus eryngii*[J]. *Products Processing*, 2020(4): 6–9.]
- [33] 赵迪青, 张懿, 孙晓明, 等. 氯化钠浸泡处理对微波辅助真空油炸和真空油炸杏鲍菇效率及品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2015, 34(11): 1192–1197. [ZHAO D Q, ZHANG M, SUN X M, et al. Effect of NaCl soaking on the efficiency and quality of *Pleurotus eryngii* using microwave-assisted vacuum frying and vacuum frying[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2015, 34(11): 1192–1197.]
- [34] 郑雯. 真空油炸杏鲍菇脆片的生产工艺及其褐变机理的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. [ZHENG W. Study on the processing technology and browning mechanism of vacuum fried crispy *Pleurotus eryngii*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.]
- [35] 马文玉. 微波膨化树莓脆片的质构品质形成机理及工艺优化研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023. [MA W Y. Study on formation mechanism and process optimization of texture and quality of microwave puffing raspberry snacks[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.]
- [36] 颜未来. 不同加工工艺对油炸香芋片品质特性的影响研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013. [YAN W L. Studies on the quality characteristics of the deep-fried fragrant taro clips by different processes[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013.]
- [37] 任爱清, 邓珊, 唐小闲, 等. 香菇脆片真空油炸过程中传质规律[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(4): 50–54, 114. [REN A Q, DENG S, TANG X X, et al. Mass transfer during vacuum frying of shiitake mushroom chips[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(4): 50–54, 114.]
- [38] XU L L, LIU H, DONG L Z, et al. Research advance on AGEs generation, detection, influencing factors and inhibition mechanism in bakery products processing[J]. *Food Bioscience*, 2024, 57: 103404.]
- [39] 樊贺雨. 油炸牛肉饼中晚期糖基化终末产物和杂环胺形成受加工条件的影响及控制[D]. 南昌: 南昌大学, 2023. [FAN H Y. The formation and inhibitory effect of processing conditions on the formation of advanced glycation end products and heterocyclic aromatic amines in fried beef patties[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.]
- [40] 刘文婷. 加工条件和加工辅料对烘烤葵花籽中伴生危害物生成的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2023. [LIU W T. Effects of processing conditions and ingredients on heat-induced hazards in sunflower seeds process[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.]
- [41] 朱玉洁. UPLC-MS/MS 分析食物煎炸过程中 2 种晚期糖基化终末产物的研究[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(7): 88–91. [ZHU Y J. Analysis of two advanced glycosylation end products in fried foods by UPLC-MS/MS during frying process[J]. *Cereals & Oils*, 2019, 32(7): 88–91.]