

复合抗氧化剂对油炸鲜切薯片中丙烯酰胺和氯丙醇酯的抑制作用

李荣蕊, 袁媛*

(吉林大学食品科学与工程学院, 长春 130062)

摘要: **目的** 研究由植酸和鼠尾草酸组成的复合抗氧化剂对油炸鲜切薯片中丙烯酰胺和氯丙醇酯的抑制作用。**方法** 通过测定酸价(acid value, AV)和过氧化值(peroxide value, POV)对不同浓度植酸和鼠尾草酸进行评估, 并利用响应面优化实验确定复合抗氧化剂的最优配比。同时以油炸鲜切薯片为研究对象, 评价复合抗氧化剂对薯片和油脂中丙烯酰胺、氯丙醇酯及其品质的影响。**结果** 在 180°C 30 min 下, 植酸抗氧化最佳浓度为 0.16 g/kg, 鼠尾草酸最佳浓度是 0.4 g/kg。根据响应面优化法设计实验并通过数据方差分析和响应面图可得: 在植酸浓度 0.06 g/kg, 鼠尾草酸浓度 0.2 g/kg 时, AV 和 POV 达到最低, 油脂抗氧化效果最好。复合抗氧化剂对丙烯酰胺的抑制率最高可达 80.5%, 对氯丙醇酯有一定的抑制作用, 其中对 3-氯-1,2-丙二醇酯抑制率最高达到 49.2%。**结论** 复合抗氧化剂在提高棕榈油煎炸稳定性、抑制丙烯酰胺和氯丙醇酯产生方面表现出较好的优势, 能有效延缓煎炸油品质恶化, 并且对煎炸油和薯片品质有一定的保护作用。

关键词: 植酸; 鼠尾草酸; 丙烯酰胺; 氯丙醇酯; 油炸鲜切薯片

Inhibitory effects of composite antioxidants on acrylamide and chloropropanol ester in fried fresh cut potato chips

LI Rong-Rui, YUAN Yuan*

(College of Food Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130062, China)

ABSTRACT: Objective To evaluate the inhibitory effects of composite antioxidants composed of phytic acid and carnosic acid on acrylamide and chloropropanol ester in fried fresh cut potato chips. **Methods** Phytic acid and carnosic acid of different concentrations were evaluated by determining acid value (AV) and peroxide value (POV), and the optimal ratio of composite antioxidants was determined by response surface optimization experiment. The effects of composite antioxidants on acrylamide, chloropropanol ester and their quality in potato chips and oil were evaluated. **Results** The optimal antioxidant concentration of phytic acid and carnosic acid were 0.16 g/kg and 0.4 g/kg respectively at 180°C for 30 min. The experiment was designed according to the response surface optimization method, and through data variance analysis and response surface diagram, it could be obtained: When the concentration of phytic acid was 0.06 g/kg and the concentration of carnosic acid was 0.2 g/kg, the lowest value of AV and POV were found, and the antioxidant effect of oil was the best. The inhibition rate of composite antioxidant on acrylamide was up to 80.5%, it

基金项目: 吉林省科技厅中青年科技创新创业卓越人才(团队)项目(创新类)(20210509024RQ)

Fund: Supported by the Young and Middle-aged Science and Technology Innovation and Entrepreneurship Outstanding Talents (Team) Project of Jilin Provincial Science and Technology Department (20210509024RQ)

***通信作者:** 袁媛, 博士, 教授, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: yuan_yuan@jlu.edu.cn

***Corresponding author:** YUAN Yuan, Ph.D, Professor, College of Food Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130062, China. E-mail: yuan_yuan@jlu.edu.cn

had certain inhibitory effect on chloropropanol ester, among which the inhibition rate of 3-monochloro- 1,2-propanediol fatty acid ester was up to 49.2%. **Conclusion** The composite antioxidants shows good advantages in improving the frying stability of palm oil, inhibiting the production of acrylamide and chloropropanol ester, effectively delaying the deterioration of frying oil quality, and has certain protective effects on frying oil and potato chips quality.

KEY WORDS: phytic acid; carnosic acid; acrylamide; chloropropanol ester; fried fresh cut potato chips

0 引言

棕榈油是一种富含甘油三酯的油脂,由棕榈果实榨取得到,包含大量的饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸,制备成本低,可塑性强,是油炸用油的最佳选择。食品热加工过程中,不可避免的会发生油脂的氧化,并且由于食品和油脂的成分较为复杂,会发生反应产生大量潜在风险因子如苯并芘、丙烯酰胺(acrylamid, AA)、氯丙醇酯、反式脂肪酸等。AA 通过天冬酰胺与还原糖发生美拉德反应而产生,具有神经毒性^[1]、生殖毒性^[2]、肾毒性^[3],并被国际癌症研究机构列为 2A 类致癌物^[4]。高温下富含碳水化合物尤其是还原糖的食品通常会生成较高含量的 AA^[5]。氯丙醇酯是氯丙醇与脂肪酸发生酯化反应形成的,目前单氯丙醇酯中研究最多的两种化合物是 3-氯-1,2-丙二醇酯(3-monochloro-1,2-propanediol fatty acid esters, 3-MCPD 酯)和 2-氯-1,3-丙二醇酯(2-chloro-1,3-propanediol fatty acid esters, 2-MCPD 酯)。3-MCPD 酯在体内可以被水解为 3-MCPD, 3-MCPD 具有潜在致癌性^[6]、肾毒性^[7]和生殖毒性^[8]。

目前,大量文献报道了单一天然抗氧化剂对焙烤、油炸食品中热加工潜在风险因子的抑制作用。例如,张伟敏^[9]在实验研究中发现鼠尾草酸通过抑制油酸甲酯和山茶籽油热氧化反应进而阻断反式脂肪酸(trans-fatty acids, TFAs)的形成。在炸肉丸中加入适量的生姜或迷迭香,可以同时抑制 TFAs、杂环胺和苯并芘的形成^[10]。有研究表明^[11],在抗氧化剂中添加一种或几种其他抗氧化剂,可使复合抗氧化剂各组分间特性互补、协调增效,进而大大提高抗氧化能力。目前针对复合天然抗氧化剂对油脂氧化的研究较多,而复合天然抗氧化剂对热加工潜在风险因子形成的影响鲜见报道。例如 GOH 等^[12]研究发现将迷迭香提取物和生育酚进行复配,分析脂肪中 MCPD 酯类和缩水甘油酯含量,结果表明,生育酚联合迷迭香提取物可有效控制 MCPD 酯和缩水甘油酯的形成。说明利用复合抗氧化剂抑制食品热加工潜在风险因子的方法是可行的。

植酸,又名肌醇六磷酸酯,是一类天然的含磷有机化合物,主要存在于果蔬、谷物类、豆类或油料作物种子中^[13]。植酸是一种天然的抗氧化剂,其生物活性主要有抗氧化作用、肿瘤细胞的免疫杀伤作用,促进癌细胞凋亡、抑制细胞增殖、促进肿瘤细胞分化等^[14]。曾丽华等^[15]构建了基于玉米肽-植酸复合物和柑橘纤维的泡沫乳液体系,有效抑制了牛乳中反式脂肪酸和胆固醇的含量。WANG 等^[16]研究了植酸对美拉德反应和 AA 形成的影响。结果表明,植酸钠和氯

化钙分别处理马铃薯片后,AA 的生成受到极大的抑制。鼠尾草酸广泛存在于鼠尾草、迷迭香等植物中,其生理学功效主要为:抗氧化、抗炎、抑菌、脂肪代谢调节等。有研究发现加入鼠尾草酸的棕榈油反式脂肪酸质量分数与不加鼠尾草酸的反式脂肪酸整体趋势相同,但是加入鼠尾草酸的反式脂肪酸组成含量明显降低^[17]。其他研究也表明鼠尾草酸可以有效抑制油氧化,并延缓马铃薯油炸过程中 AA 的形成^[18]。但目前暂未见使用植酸和鼠尾草酸复合抗氧化剂对油炸鲜切薯片中 AA 和氯丙醇酯抑制作用进行研究的报道。

因此,本研究在植酸和鼠尾草酸单独作用于热加工食品并有效抑制热加工有害产物的基础上,分别测定了植酸和鼠尾草酸在高温条件下对油脂氧化的影响,并确定两种抗氧化剂最佳复配比,选择油炸鲜切薯片作为热加工食品的典例,探究植酸-鼠尾草酸复合抗氧化剂对热加工过程中 AA 和 MCPD 酯的影响,同时考察添加复合抗氧化剂后煎炸油和薯片的品质变化情况,为复合抗氧化剂应用于食品中热加工潜在风险因子的控制提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

马铃薯和棕榈油购买于当地超市。

植酸、鼠尾草酸(纯度 $\geq 98\%$,上海源叶生物科技有限公司);冰乙酸、三氯乙酸、乙醚、异丙醇(分析纯,北京化工厂);AA(纯度 $>99\%$,美国 Sigma 公司)、D3-AA 标准品(纯度 $>99\%$,加拿大 C/D/N Isotopes 公司);2-棕榈酸-3-氯丙醇酯(2-dipalmitate-3-chloropropanol ester, PP-3-MCPD)(纯度 $>97\%$)、2-二棕榈酸-2-氯丙醇酯(2-dipalmitate-2-chloropropanol ester, PP-2-MCPD)(纯度 $>99\%$)、氘代 1,2-二棕榈酸-3-氯丙醇酯(deuterated 1,2-dipalmitate 3-chloropropanol ester, PP-3-MCPD-d5)(纯度 $>99\%$)(加拿大 Toronto Research Chemicals 公司);苯硼酸(phenylboronic acid, PBA)、溴化钠、异辛烷、甲酸、甲醇、甲基叔丁基醚、丙酮(色谱纯,上海 Aladdin 公司)。

1.2 仪器与设备

SCI-VS 涡旋振荡器(上海精科实业有限公司);PTX-FA110 电子天平(精度 0.0001 g,福州华志科学仪器有限公司);ZNCL-GS 恒温油浴锅(上海予申仪器有限公司);TGL-16M 冷冻离心机(湖南湘仪离心机有限公司);ACQUITY TQD 高效液相色谱-串联质谱仪(美国 Waters 公司);QP 2010 气相色谱质谱联用仪(日本岛津公司),

RXI-5MS 毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); NK200-1B 氮吹仪(杭州 MIULAB 有限公司); KQ5200 超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); SC-80 色差仪(北京康光有限公司); HHS 型电热恒温水浴锅(上海博迅实业有限公司); CT3 4500 质谱仪(美国 BROOKFIELD 公司); innoval ODS-2 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm, 天津博纳艾杰尔科技公司)。

1.3 方法

1.3.1 高温油脂氧化实验

分别将浓度为 0.04、0.08、0.12、0.16、0.20 g/kg 的植酸和 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 g/kg 的鼠尾草酸加入 500 g 棕榈油中,放置于 1000 mL 烧杯中,搅拌均匀进行充分溶解,在(180±5)℃油浴锅中油浴加热 30 min。取油样检测酸价(acid value, AV)和过氧化值(peroxide value, POV)。

1.3.2 油样指标的测定

油脂 AV 根据 GB 5009.229—2016《食品中酸价的测定》方法中的第一法指示剂滴定法进行测定。油脂 POV 根据 GB 5009.227—2016《食品中过氧化值的测定》方法测定。

1.3.3 鲜切薯片的制作

用手动切片机将马铃薯切成(1.0±0.2) mm 厚,直径 50 mm 的薄片。马铃薯薄片用蒸馏水清洗,用滤纸吸掉多余水分。根据响应面优化实验得出的最佳复合抗氧化剂的浓度配比,以不含抗氧化剂的 1 kg 棕榈油为对照组,另一组在 1 kg 棕榈油中加入浓度为 0.06 g/kg 植酸和 0.2 g/kg 的鼠尾草酸。将两组棕榈油分别倒入油浴锅中,当油浴锅温度保持 180℃,并在 30 min 内无温度变动时,将 10 g 马铃薯薄片加入至棕榈油中开始煎炸。样品油炸 5 min。以第一批加入的薯片记录为 0 h,每隔 2 h 加入薯片进行油炸,依次为 0、2、4、6、8 h,用滤纸将炸好的薯片表面的油脂去除,然后将薯片碾碎备用,每次煎炸后取 10 g 棕榈油,在-20℃下保存以备后续使用。

1.3.4 丙烯酰胺的测定

样品处理:根据 GB 5009.204—2014《食品中丙烯酰胺的测定》和刘黄友^[19]的方法对薯片中 AA 进行了分析。

高效液相色谱-质谱法条件:使用 Alliance 2695 与 MassLynx software 4.1 的 TQ 检测器。目标分析物在 innoval ODS-2 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm)等距洗脱。流动相 A 选择 90%浓度 0.1%的甲酸水,流动相 B 选择 10%的色谱级甲醇,流速设置 0.4 mL/min。柱温设置为 30℃。每个样品的进样量为 10 μL。串联质谱仪器在正电离模式下操作,使用多反应监测(multiple response monitoring, MRM)模式进行灵敏和选择性检测。

电喷雾电离(electrospray ionization, ESI)源参数设置如下:毛细管电压设置为 3.5 kV; AA 锥电压设置为 25 V, D3-AA 锥电压设置为 26 V; 源温度设置为 120℃; 脱溶剂气温度设定为 500℃; 脱溶剂气流量设定为 650 L/h; 锥孔气流量设定为 50 L/h; AA 的碰撞能量为 10 eV, D3-AA 的碰撞

能量为 12 eV。MRM 停留时间为 0.4 s,扫描间隔时间为 0.1 s。AA 采用 m/z 72.1→55.1 跃迁进行定量, D3-AA 采用 m/z 75.1→58.1 跃迁进行定量。

1.3.5 氯丙醇酯的测定

样品处理:根据 GB 5009.191—2016《食品中氯丙醇及其脂肪酸酯含量的测定》和 YUAN 等^[20]的方法对煎炸棕榈油中的单氯丙醇酯(3-MCPD 酯和 2-MCPD 酯)进行了测定。

气相色谱-质谱法条件:采用气相色谱质谱联用仪和 RXI-5MS 毛细管柱对 3-MCPD 酯和 2-MCPD 酯进行检测。程序升温:50℃保持 1 min,以 10℃/min 升温至 210℃,再以 30℃/min 升温至 300℃,保持 5 min。进样量为 1 μL;进样模式选择不分流;进样口温度设置为 250℃;载气选择高纯氦气;传输线温度设置为 280℃; 2-MCPD-PBA 的定性离子 m/z 198, 定量离子 m/z 196; 3-MCPD-PBA 的定性离子 m/z 196、198, 定量离子 m/z 147; 3-MCPD-d5-PBA 的定性离子 m/z 201, 定量离子 m/z 150。

1.3.6 鲜切薯片质构的测定

采用质构仪的 TA43 探头对油炸薯条进行 TPA 质构分析。测前速率 2.00 mm/s、测试速率 0.50 mm/s、测后速率 10.00 mm/s;触发力为 5 g。同一种样品重复测定 4 次。根据质构仪自带的 TexturePro CT V1.8 Build 31 软件,对得到的力-距离曲线进行分析。

1.3.7 鲜切薯片油脂含量的测定

薯片中游离脂肪酸含量根据 GB 5009.6—2016《食品中脂肪的测定》中第一法索氏提取法测定并做了一些改动,取 5 g 研磨后的油炸薯片样品,用 200 mL 沸点为 30~60℃的石油醚溶剂进行索氏提取,进行 4 h 回流,萃取后在旋转真空蒸发器(40℃)中除去溶剂,得到薯片样品中的油脂含量。

1.3.8 鲜切薯片水分的测定

薯片水分根据 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准食品中水分的测定》测定。

1.3.9 煎炸油和鲜切薯片色差的测定

采用自动色差仪测定棕榈油和薯片的色差。记录 L^* 、 a^* 和 b^* , 总色差(ΔE)按式(1)计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (1)$$

其中,带有下标 0 表示未经加热的精制棕榈油或未油炸的马铃薯薄片的 L^* 、 a^* 和 b^* 。

1.4 数据处理与分析

本研究重复 3 次测定,结果采用平均值±标准偏差的形式表示。使用 IBM SPSS Statistics19 软件分析实验数据,Origin 2020 软件绘制图形, $P < 0.05$ 具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 高温条件下植酸浓度对油脂氧化的影响

REDA^[21]采用热重法和差示扫描量热法分析,并以菜籽油在实验室 180℃恒温 10 d 的热氧化为基础,研究发现植酸在 180~200℃开始分解,可以防止食用油的热分解,提高氧化过程的稳定性。不同浓度植酸对高温条件下棕榈

油 AV 和 POV 的影响如图 1 所示。由图 1 可知, 添加抗氧化剂可以显著降低油脂的 POV, 抑制高温油脂的氧化。与空白样相比, 植酸可以抑制高温油脂的氧化, 但是低浓度植酸的效果较差, 原因是植酸的主要作用是螯合金属离子, 供氢能力差^[22]。随着植酸浓度的增加, 抑制 POV 的能力也在增强。未添加抗氧化剂的棕榈油经高温加热后, POV 为 24.163 mmol/kg, AV 为 0.373 mg/g, 添加植酸后 POV 最低含量为 15.590 mmol/kg, AV 含量为 0.312 mg/g。相比 POV, 植酸的浓度对 AV 的影响差异不显著。综合油脂 AV 和 POV 两个指标, 植酸在高温下抑制油脂氧化最佳浓度为 0.16 g/kg。

2.2 高温条件下鼠尾草酸浓度对油脂氧化的影响

如图 2 所示, 鼠尾草酸在最低添加量时, 油样 POV 较低, 这是因为鼠尾草酸添加量较少, 并未对油脂起到保护作用, 使油脂过早的进入氧化后期, 导致过氧化物分解, 从而降低了 POV。在高浓度鼠尾草酸的高温油脂中, POV 含量也有所减少, 这是由于鼠尾草酸发挥了抗氧化效果。在 0.2~0.5 g/kg, 随着鼠尾草酸浓度的增加, POV 逐渐降低。不同浓度的鼠尾草酸对高温油脂都有抗氧化作用, 随着浓度的增加, AV 含量越来越低, 此结果与 ZUNIN 等^[23]

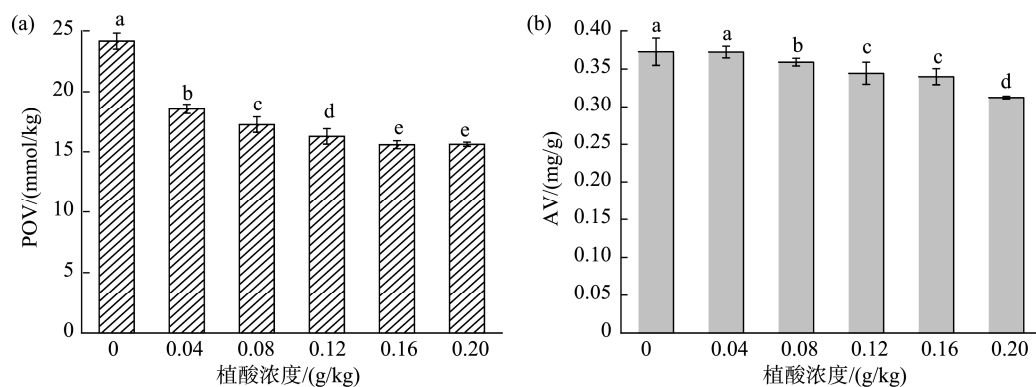
的结果一致, 其研究结果也显示鼠尾草酸对一次和二次氧化产物的形成有剂量依赖的抑制作用, 对自由基清除活性有剂量依赖的增强作用。通过差异性分析, 0.4 g/kg 和 0.5 g/kg 鼠尾草酸浓度下 AV 无显著性差异($P < 0.05$)。综合油脂 AV 和 POV 两个指标, 鼠尾草酸在高温下抑制油脂氧化最佳浓度为 0.4 g/kg。

2.3 高温响应面优化及分析

Central Composite 响应面优化法设计实验条件如表 1 所示。以 AV 和 POV 为响应值, 筛选出植酸和鼠尾草酸的最佳复配比例。通过响应面二次多项式模型的方差分析 (analysis of variance, ANOVA)。高 F 和低 P (< 0.0001) 的模型表明, 预测的模型具有显著的拟合性。植酸和鼠尾草酸的浓度对油脂的 AV 和 POV 均有极显著影响 ($P < 0.01$)。通过软件对结果进行二次回归拟合, 得到 AV 和 POV 的回归方程为:

$$AV = 0.23 + 8.970E^{-003} \times A - 9.032E^{-003} \times B - 0.024 \times AB + 0.037 \times A^2 + 0.032 \times B^2$$

$$POV = 9.63 - 1.01 \times A + 0.10 \times B - 0.14 \times AB + 0.421.18 \times A^2 + 0.28 \times B^2$$



注: 不同小写字母表示有显著差异 ($P < 0.05$), 下同。

图 1 不同浓度植酸对过氧化值(a)和酸价(b)的影响

Fig.1 Effects of phytic acid at different concentrations on peroxide value (a) and acid value (b)

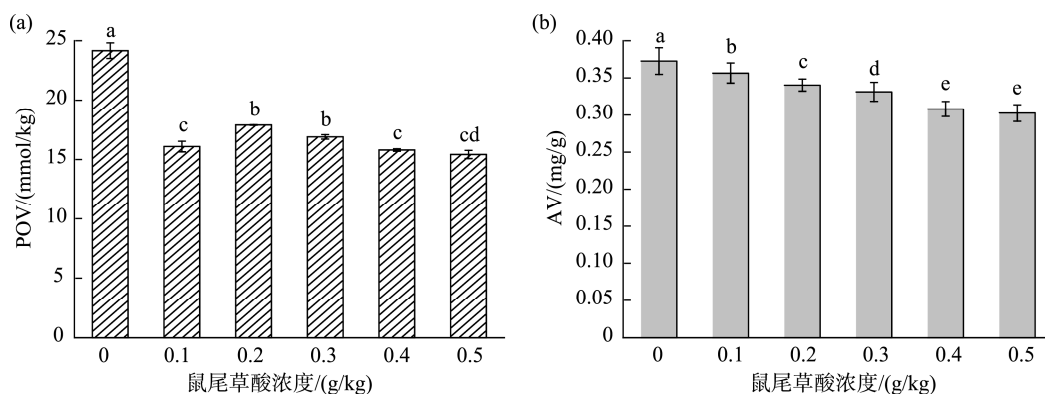


图 2 不同浓度鼠尾草酸对过氧化值(a)和酸价(b)的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of carnosic acid on peroxide value (a) and acid value (b)

模型 $P<0.01$, 表明回归模型非常显著; 失拟项 $P=0.7084>0.05$, 无显著性差异, 表明该模型适合植酸和鼠尾草酸对 AV 影响的数学模型。模型的校正 r^2 值为 $0.9047>0.9$, 因此回归模型拟合度良好。对 POV 影响的数学模型中, 模型 $P<0.01$, 表明回归模型非常显著; 失拟项 $P=0.7428>0.05$, 无显著性差异, 表明该模型适合植酸和鼠尾草酸对 POV 影响的数学模型。

根据响应面优化数据分析(图 3), 在植酸浓度 0.06 g/kg , 鼠尾草酸浓度 0.2 g/kg 时, AV 和 POV 达到最低, 油脂抗氧化效果最好, AV 为 0.2333 mg/g , POV 为 10.0401 mmol/kg 。在实际油脂处理后, AV 为 0.2400 mg/g , POV 为 10.0800 mmol/kg , 预测值与实测值相关性良好。

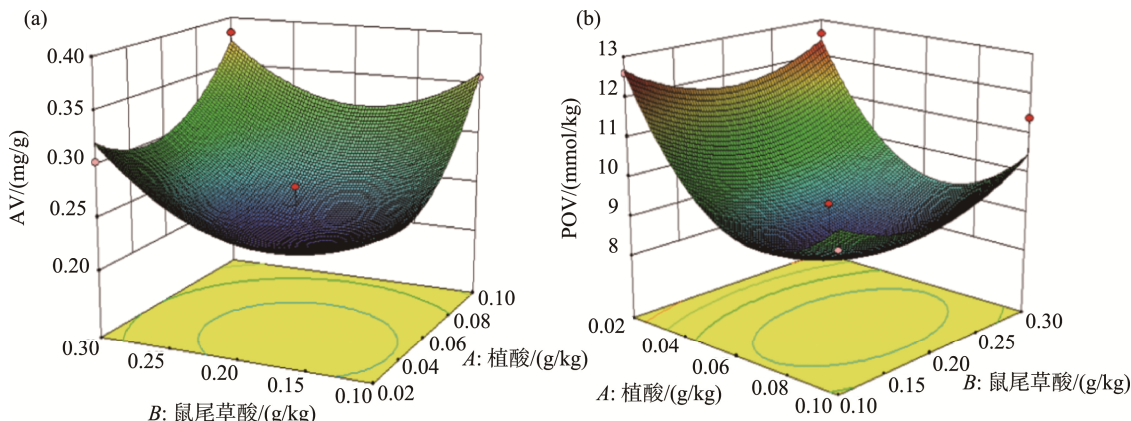


图 3 植酸和鼠尾草酸的响应面结果图
Fig.3 Response surface results of phytic acid and carnosic acid

2.4 复合抗氧化剂对不同温度下对薯片中 AA 含量的影响

为研究复合抗氧化剂对 AA 的影响, 本研究监测了不同温度、不同油炸时间下复合抗氧化剂组和空白组薯片中 AA 的含量。在富含碳水化合物的油炸薯片模型中, AA 主要是通过天冬酰胺和还原糖发生美拉德反应生成, 还原糖和氨基酸反应生成薛夫碱, 进而通过 Amadori 分子重排生成稳定的果糖胺, 生成的果糖胺会继续进行美拉德反应, 最终生成美拉德反应的一系列产物^[24]。本研究采用高效液相色谱-串联质谱法(内标法)对抑制产物 AA 进行定量, 标准品的质谱图如图 4 所示。在不同温度下薯片中 AA 含量变化如图 5 所示, 随着油炸温度的增加, 薯片中 AA 含量也随着增加。这一趋势与前人关于烹饪温度与富含碳水化合物的食物中 AA 形成之间关系的研究结果一致^[25]。添加植酸和鼠尾草酸组成的复合抗氧化剂可以显著降低薯片中 AA 的含量, 可能是由于抗氧化剂的添加与葡萄糖结合, 使得葡萄糖被大量消耗, 抑制了美拉德反应。以 180°C 时 AA 含量为例, 空白组薯片中 AA $0.54\sim1.24\text{ mg/kg}$, 而添加复合抗氧化剂的薯片中 AA 的最大含量仅为 0.6 mg/kg , 对 AA 的抑制率达到 50% 以上。在 180°C 煎炸 2 h 时, 复合抗氧化剂对 AA 的抑制率最高, 为 80.5% 。

表 1 响应面实验结果 Table 1 Experimental results of response surface				
序号	A: 植酸浓度/ (g/kg)	B: 鼠尾草酸 浓度/(g/kg)	AV/ (mg/g)	POV/ (mmol/kg)
1	0.02	0.30	0.302215	12.6166
2	0.06	0.20	0.262189	9.29807
3	0.10	0.10	0.355785	9.71076
4	0.06	0.20	0.234733	11.032
5	0.06	0.34	0.288094	9.99191
6	0.06	0.20	0.213212	9.25803
7	0.06	0.20	0.23187	9.26093
8	0.12	0.30	0.31018	10.8041
9	0.06	0.20	0.216669	9.21206
10	0.06	0.06	0.296169	10.5028
11	0.10	0.30	0.283748	10.3897
12	0.12	0.20	0.313008	10.7594
13	0.02	0.10	0.285792	11.5999

2.5 复合抗氧化剂对煎炸油中 3-MCPD 酯含量的影响

如图 6 显示了 3-MCPD 酯类在油炸过程中的含量变化。图 6 为氯丙醇酯标准样品选择离子谱图。目前关于 3-MCPD 酯形成的确切机制还在研究中, 相关文献已报道的形成过程存在 3 种途径: 氯离子亲核进攻途径、环氧氯丙酮离子中间体和缩水甘油酯中间体途径、环氧化物自由基途径^[26]。煎炸油中 3-MCPD 酯的含量随油炸时间的延长呈现先上升后下降的趋势, 这一结果与 LI 等^[27]先前报道的研究一致。由图 7 可知, 在 $0\sim2\text{ h}$ 时, 3-MCPD 酯逐渐升高, 并且达到最大值, 从 2 h 之后, 3-MCPD 酯含量逐渐降低并趋于稳定。由数据分析可知, 随着油炸温度的升高, 3-MCPD 酯含量也是呈现先增加后降低的趋势, 随着温度的上升不断分解, 分解速率大于形成速率, 从 180°C 开始, 3-MCPD 酯下降。其结果与 KANG 等^[28]研究温度对 3-MCPD 酯的形成规律一致。鼠尾草酸自身作为断链型自由基终止剂, 通过捕获过氧自由基来有效抑制过氧化链式反应进而抑制油脂氧化反应。由于油脂中 3-MCPD 酯的产生也有自由基的参与, 因此鼠尾草酸和植酸组成的复合抗氧化剂有效抑制了 3-MCPD 酯的产生。添加复合抗氧化剂对 3-MCPD 酯有一定的抑制作用, 热处理后的抑制率最高分别可达到 49.2% (170°C)。

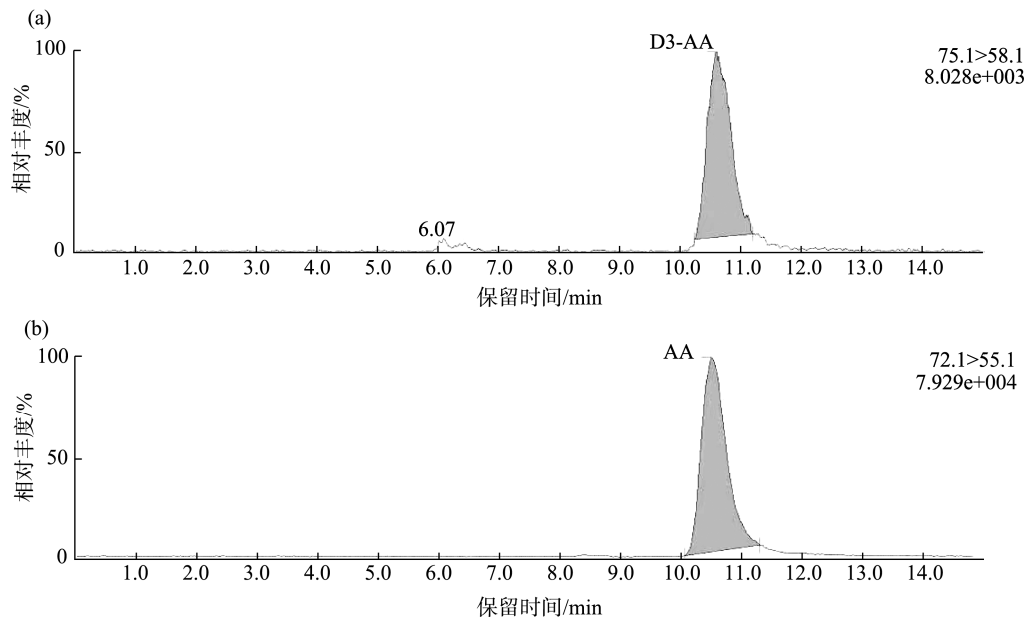
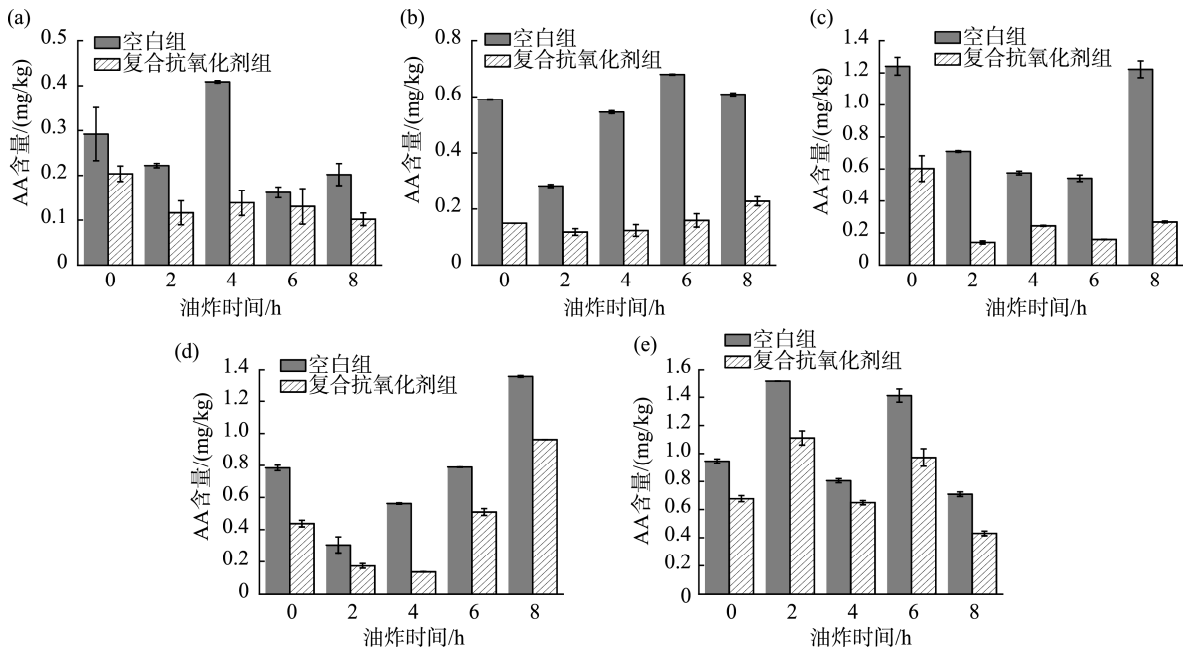


图 4 丙烯酰胺(AA)定量质谱图
Fig.4 Quantitative mass spectrums of acrylamide (AA)



注: (a)为 160℃, (b)为 170℃, (c)为 180℃, (d)为 190℃, (e)为 200℃, 图 7、9 同。

图 5 棕榈油在不同温度(160~200℃)热加工过程中丙烯酰胺(AA)的变化情况

Fig.5 Changes of acrylamide (AA) during hot processing of palm oil at different temperatures (160~200℃)

2.6 复合抗氧化剂对煎炸油中 2-MCPD 酯含量的影响

2-MCPD 在酸水解蛋白溶液中部分以游离形式存在, 部分是与脂肪酸结合; 在烘焙、精炼植物油等高温热处理体系中, 多以 2-MCPD 酯形式出现。2-MCPD 酯一般由游离的 2-MCPD 和脂肪酸通过酯化反应得到的^[29]。图 8

为 2-MCPD 酯标准样品选择离子色谱图。由图 9 可知, 2-MCPD 酯的含量随着油炸时间的延长先升高后降低, 这与 HAMLET 等^[30]的研究结果一致。较于 3-MCPD 酯, 2-MCPD 酯的含量及变化幅度均较小, 加入复合抗氧化剂的煎炸油中 2-MCPD 酯的含量也有所降低, 但是效果不显著, 因为 2-MCPD 酯在一定条件下可以转化为缩水甘油酯,

并且有可能进一步转化为 3-MCPD 酯, 添加复合抗氧化剂虽然没有大幅度降低油脂中 2-MCPD 酯含量, 但是也没有增加其含量, 可能复合抗氧化剂在 2-MCPD 酯转化后发挥

作用。在 170℃时, 添加复合抗氧化剂对 2-MCPD 酯抑制率最高为 37.09%。在 160、190 和 200℃下, 复合抗氧化剂对 2-MCPD 酯的形成基本没有抑制作用。

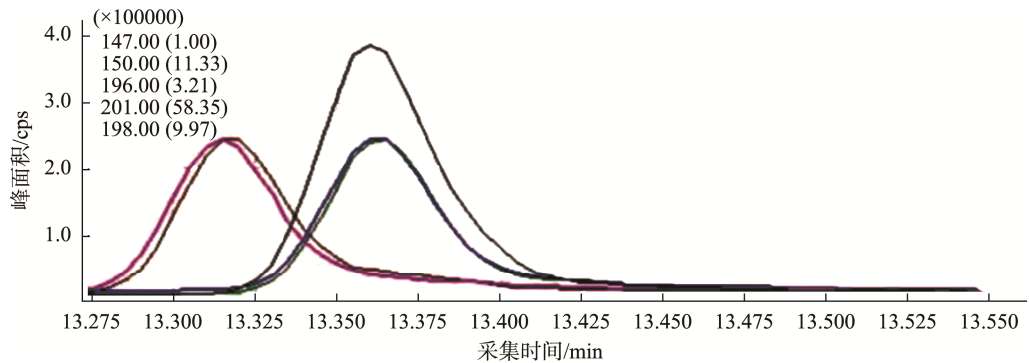


图 6 3-MCPD 酯定量质谱图
Fig.6 Quantitative mass spectra of 3-MCPD ester

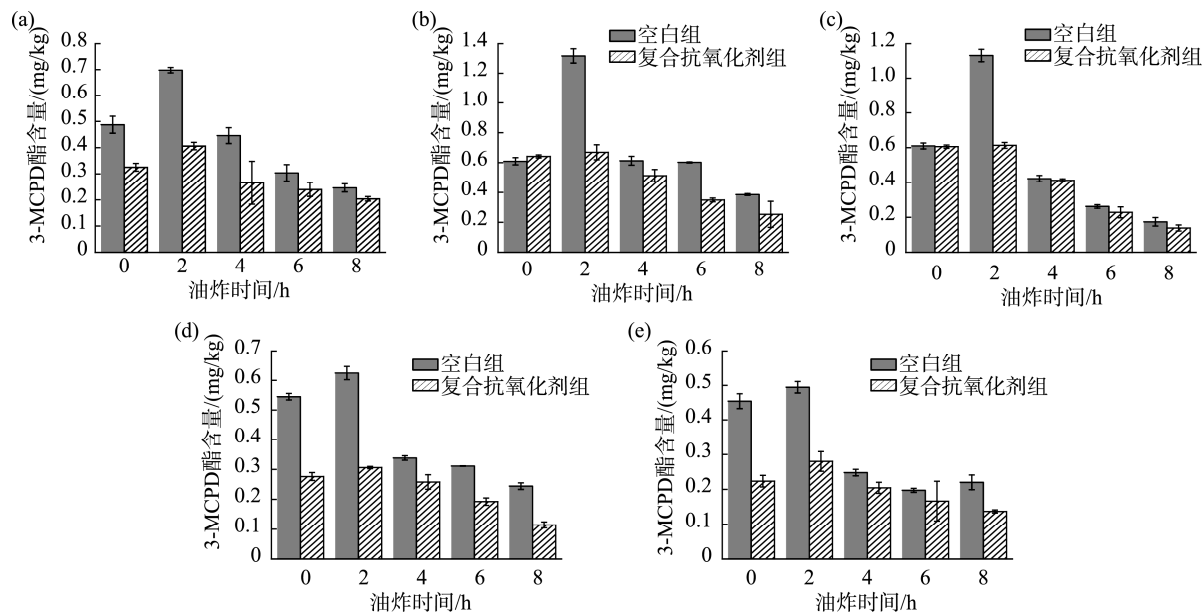


图 7 棕榈油在不同温度(160~200℃)热加工过程中 3-MCPD 酯的变化情况
Fig.7 Changes of 3-MCPD esters during hot processing of palm oil at different temperatures (160-200℃)

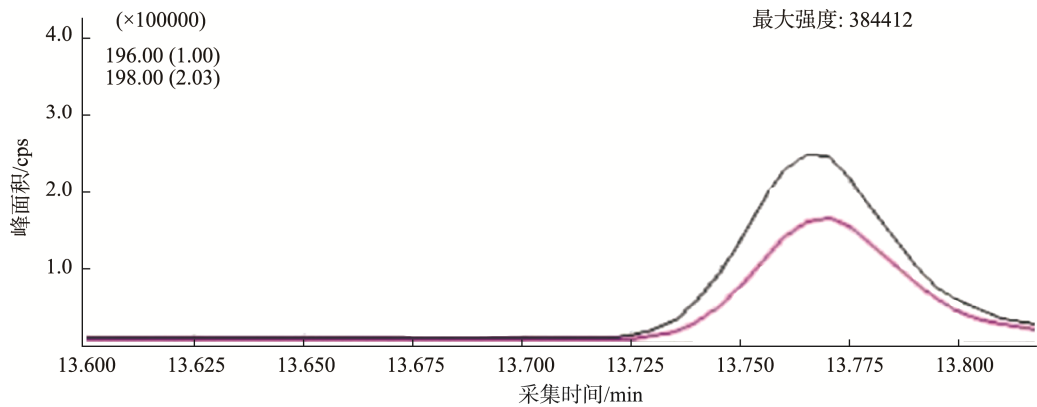


图 8 2-MCPD 酯定量质谱图
Fig.8 Quantitative mass spectra of 2-MCPD ester

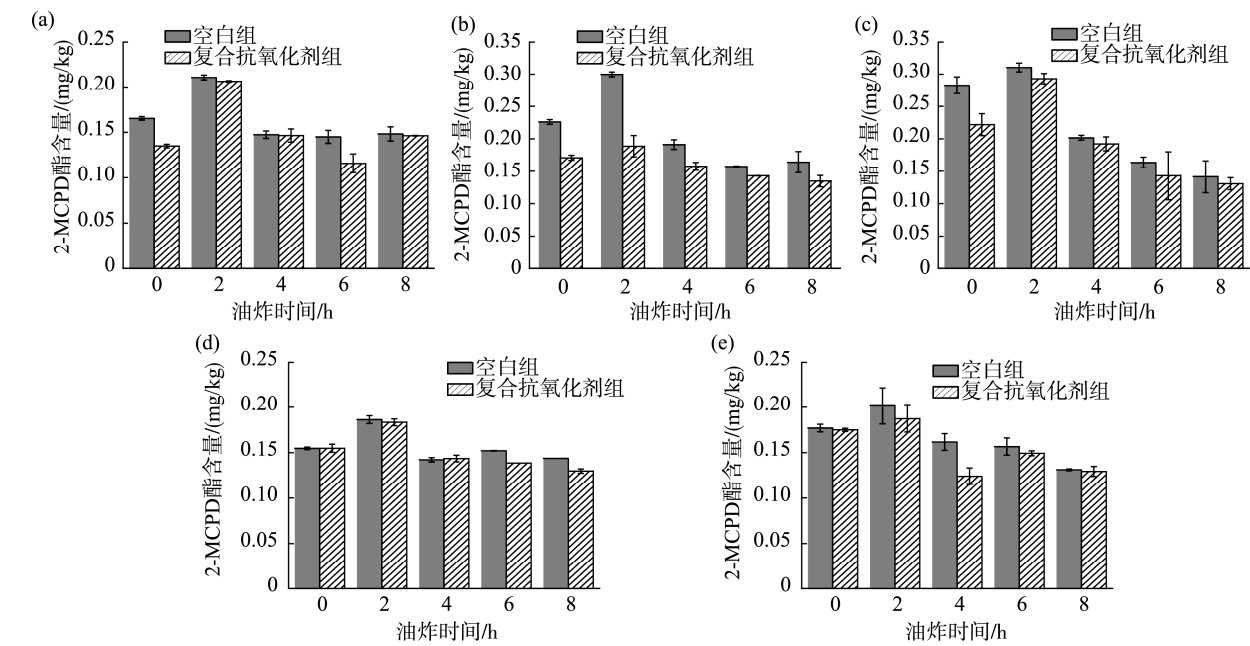


图9 棕榈油在不同温度(160~200℃)热加工过程中 2-MCPD 酯的变化情况
Fig.9 Changes of 2-MCPD esters during hot processing of palm oil at different temperatures (160-200℃)

2.7 复合抗氧化剂对鲜切薯片质构的影响

为研究添加复合抗氧化剂(0.06 g/kg 植酸+0.2 g/kg 鼠尾草酸)对薯片品质的影响,选择测定 180℃在棕榈油中加入复合抗氧化剂和未添加抗氧化剂后薯片的质构特性。薯片的质构反映了薯片外壳的硬度,煎炸过程中,物料受热后表面水分大量蒸发,引发各种复杂的反应,如蛋白质变性和淀粉糊化等,同时物料与油脂也会发生相互作用,并由此形成了煎炸食品的外壳^[31]。由表 2 可知,随着油炸时间的增加,薯片的硬度逐渐变小。本研究结果与 TIMALSINA 等^[32]得到一致的结论。另有研究指出,薯片在油炸过程中表面脱水从而形成酥脆的外壳,薯片硬度值的下降与薯片表面的脱水程度下降有关^[33],添加抗氧化剂组薯片硬度减少的幅度相比空白组要小,表明添加抗氧化剂延缓连续油炸过程中

鲜切薯片质构的下降。根据差异性分析结果显示:添加复合抗氧化剂后没有提高薯片的硬度和弹性,与空白组薯片无显著性差异。因此,对油炸马铃薯进行抗氧化处理并不影响薯片质构。

2.8 复合抗氧化剂对鲜切薯片水分、含油量和色泽的影响

水分蒸发和吸油被认为是煎炸中两个最主要的传质过程^[34]。油炸食品的含水量是决定油炸食品质构特征的因素之一。有研究发现槲皮素的添加可明显降低甘薯片油炸过程中油脂的分解,增强油脂的传热效率,使甘薯片含水量减少,品质得到提高^[35]。由表 3 可知,经过复合抗氧化剂处理后的薯片含水量略低于空白对照组,表明添加复合抗氧化剂降低了薯片的水分含量,增加了油炸过程中薯片

表 2 复合抗氧化剂对鲜切薯片质构的影响
Table 2 Effects of compound antioxidants on texture of fresh-cut potato chips

油炸时间/h	薯片种类	硬度/g	硬度形变量/mm	弹性/mm
0	空白组	536.25±1.25 ^{Aa}	2.60±0.58 ^{Bb}	1.45±0.35 ^{Bb}
	抗氧化剂组	499.75±2.25 ^{Aa}	2.46±0.52 ^{Bb}	1.65±0.20 ^{Ab}
2	空白组	439.25±3.25 ^{Bb}	2.66±0.90 ^{Bb}	1.75±0.24 ^{Aa}
	抗氧化剂组	406.25±3.75 ^{Bb}	2.95±0.68 ^{Aa}	1.16±0.09 ^{Cc}
4	空白组	399.50±6.50 ^{Bb}	2.58±0.97 ^{Bb}	1.21±0.11 ^{Cc}
	抗氧化剂组	336.75±5.25 ^{Cd}	2.40±0.27 ^{Bb}	1.76±0.31 ^{Aa}
6	空白组	420.50±8.50 ^{Bb}	2.61±0.33 ^{Bb}	1.85±0.20 ^{Aa}
	抗氧化剂组	361.75±2.75 ^{Cc}	2.03±0.47 ^{Cc}	1.86±0.03 ^{Aa}
8	空白组	313.75±2.75 ^{Dc}	2.87±0.79 ^{Aa}	1.53±0.28 ^{Bb}
	抗氧化剂组	339.50±3.00 ^{Dd}	2.85±0.83 ^{Aa}	1.54±0.22 ^{Bb}

注:不同小写字母表示煎炸时间对薯片质构有显著差异($P<0.05$);不同大写字母表示薯片种类对薯片品质有显著差异($P<0.05$),下同。

的脱水程度。薯片油炸过程中的脱水程度与油脂传热效率下降有关^[36], 食品水分含量的增加表明其吸收的热量减少, 油脂中的氧化物、游离脂肪酸等成分越多, 对传热的影响也越大^[37], 而植酸和鼠尾草酸两种抗氧化剂可以抑制油脂的降解, 因而复合抗氧化剂的添加降低油炸薯片中油脂成分的复杂性, 从而提升水分的蒸发, 降低了薯片的水分含量, 提高薯片的品质, 延缓了油炸过程薯片品质的下降。由表 3 的差异性分析($P<0.05$)可得: 空白组薯片中油脂含量最高为 $29.37\%\pm0.14\%$, 复合抗氧化剂组薯片油脂含量最高为 $19.46\%\pm0.27\%$, 添加了复合抗氧化剂的薯片相比于空白对照组薯片中的含油量低, 猜测植酸和鼠尾草酸两种抗氧化剂与油脂内部分子结合, 降低了油脂黏度从而降低了含油量, 也有相关研究发现向煎炸油中添加迷迭香提取物显著降低了薯片中的含油量^[38]。

油炸食品色泽的形成是美拉德反应、焦糖化反应及其他多种复杂反应共同作用的结果。其中美拉德反应作为最主要的反应之一, 受到温度和时间的影响, 产生色素是由羰基和氨基反应形成的, 并由此降低了薯片的亮度^[39]。薯片的颜色对于马铃薯加工行业来说是一个特别重要的特征, 它与消费者的接受度密切相关^[40]。薯片的颜色通常用单位 L^* 、 a^* 、 b^* 来测量^[41]。 L^* 是亮度或明度, 范围从 0~100, 随着油炸温度的延长薯片的亮度有所降低, 根据差异性分析可得添加复合抗氧化剂提高了薯片的亮度。参数 b^* (黄-蓝) 在 11.36~11.60 之间, 呈现正值, 即呈现出食物的黄色特征。对于参数 a^* (红-绿), 值为负值, 从 1.10~3.57, 这表明薯片的颜

色更偏向于绿色而不是红色。如 GRANDA 等^[42]所述, 正值的出现表明薯片炸焦了。对比可以看出, 添加复合抗氧化剂后大部分油炸的薯片 L^* 和 b^* 比空白对照组薯片略高, 改善了薯片的感官品质。可能是由于复合抗氧化剂改变了薯片内部水分活度, 或改变了薯片表面和内部温度变化。这与研究中得到的抗氧化剂可减轻食品变色, 增加薯片口感的结果一致^[43]。为同类油炸淀粉类食品加工工艺提供数据支持。

2.9 复合抗氧化剂对煎炸油色泽的影响

色泽是一种非常关键的物性参数, 能够直接反映出油炸后的油质状况。棕榈油油脂在煎炸过程中的色泽变化如表 4 所示。高温煎炸过程中, 当油脂开始发生水解及聚合等反应时, 油脂的色泽则不断加深^[44]。由表 4 可以看出, 随着油炸时间的延长, L^* 均显著降低($P<0.05$), 这是因为随着煎炸过程的进行, 油脂的透明度下降, 油脂的色泽颜色从浅黄色向褐色转变, 棕榈油色泽随着煎炸时间的延长而加深, 这是由于薯片在煎炸过程中发生美拉德反应和焦糖化反应等产生棕色或黑色的碎屑溶于油脂中。这与 ALADEDUNYE 等^[45]研究发现在煎炸薯条过程中, 煎炸油的色泽变化结果一致。 b^* 和 ΔE 在煎炸过程整体呈现先增加后降低的趋势, 产生上述色泽变化的原因可能与薯条中的淀粉在油炸中发生的美拉德反应, 美拉德反应生成的色素会使油脂的色泽迅速加深^[46]。本研究中空白组棕榈油初始 L^* 要显著高于复合抗氧化剂组, 是因为鼠尾草酸呈黄色, 在加入过程中影响了油脂的明度。煎炸 8 h, 空白组棕榈油

表 3 鲜切薯片水分和色泽
Table 3 Moisture and colour in fresh-cut potato chips

油炸时间/h	薯片种类	水分含量/(g/100 g)	油脂含量/%	L^*	a^*	b^*
0	空白组	1.62±0.03 ^{Aa}	27.72±0.09 ^{Bc}	53.64±0.06 ^{Ba}	3.57±0.06 ^{Aa}	15.88±0.01 ^{Aa}
	抗氧化剂组	1.16±0.01 ^{Cb}	18.70±0.07 ^{Cb}	56.78±0.10 ^{Aa}	2.15±0.19 ^{Aa}	16.15±0.14 ^{Aa}
2	空白组	1.55±0.06 ^{Ba}	29.37±0.14 ^{Aa}	50.17±0.05 ^{Ca}	2.58±0.36 ^{Aa}	16.60±0.08 ^{Aa}
	抗氧化剂组	1.09±0.03 ^{Db}	19.46±0.27 ^{Ca}	51.43±0.27 ^{Ca}	2.45±0.32 ^{Aa}	15.32±0.33 ^{Aa}
4	空白组	1.64±0.04 ^{Aa}	28.50±0.07 ^{Ab}	52.94±0.01 ^{Ba}	1.67±0.31 ^{Aa}	14.25±0.04 ^{Aa}
	抗氧化剂组	1.15±0.04 ^{Cb}	17.19±0.00 ^{Dc}	50.41±0.20 ^{Ca}	1.41±0.06 ^{Bb}	14.52±0.32 ^{Aa}
6	空白组	1.60±0.02 ^{Aa}	26.86±0.07 ^{Bd}	48.34±0.05 ^{Da}	1.41±0.21 ^{Bb}	11.58±0.08 ^{Bb}
	抗氧化剂组	1.14±0.10 ^{Cb}	16.44±0.24 ^{Dd}	43.02±0.07 ^{Eb}	1.38±0.01 ^{Bb}	12.22±0.01 ^{Bb}
8	空白组	1.59±0.01 ^{Aa}	27.84±0.01 ^{Ac}	45.62±0.11 ^{Eb}	1.10±0.04 ^{Bb}	12.73±0.09 ^{Bb}
	抗氧化剂组	1.11±0.02 ^{Cb}	17.76±0.11 ^{Dc}	46.96±0.12 ^{Ea}	1.28±0.01 ^{Bb}	11.36±0.42 ^{Bb}

表 4 复合抗氧化剂对煎炸油色泽的影响
Table 4 Effects of compound antioxidants on color of frying oil

油炸时间/h	煎炸油脂种类	L^*	a^*	b^*	ΔE
0	空白组	91.00±0.01 ^{Aa}	-5.86±0.03 ^{Ba}	24.56±0.02 ^{Dc}	2.84±0.03 ^{Bbc}
	抗氧化剂组	90.13±0.02 ^{Ba}	-5.69±0.02 ^{Ba}	25.88±0.04 ^{Dc}	3.04±0.05 ^{Ac}
2	空白组	89.32±0.01 ^{Bb}	-6.10±0.01 ^{Ab}	26.50±0.05 ^{Ca}	3.17±0.12 ^{Aa}
	抗氧化剂组	88.85±0.00 ^{Cb}	-5.85±0.02 ^{Bb}	27.73±0.03 ^{Bb}	3.47±0.20 ^{Aa}
4	空白组	87.94±0.01 ^{Dc}	-6.47±0.01 ^{Ac}	24.81±0.10 ^{Db}	2.68±0.06 ^{Cc}
	抗氧化剂组	87.03±0.02 ^{Dc}	-6.13±0.02 ^{Ac}	27.49±0.05 ^{Bb}	3.37±0.03 ^{Aa}
6	空白组	86.00±0.02 ^{Ed}	-6.65±0.01 ^{Ad}	24.91±0.07 ^{Db}	2.67±0.04 ^{Cc}
	抗氧化剂组	86.86±0.01 ^{Ed}	-6.30±0.02 ^{Ad}	28.55±0.07 ^{Aa}	3.37±0.01 ^{Aa}
8	空白组	85.26±0.02 ^{Fe}	-6.61±0.02 ^{Ad}	26.33±0.09 ^{Ca}	2.93±0.04 ^{Bb}
	抗氧化剂组	85.35±0.01 ^{Fe}	-6.23±0.02 ^{Ad}	27.67±0.08 ^{Bb}	3.19±0.12 ^{Ab}

L^* 降低了 5.74 ± 0.06 , 复合抗氧化剂组棕榈油 L^* 降低了 4.78 ± 0.03 , 表明添加复合抗氧化剂后油脂变暗的程度较轻。祝婷婷等^[47]在研究中发现没食子酸丙酯和 L -抗坏血酸棕榈酸酯两种天然抗氧化剂都可以抑制棕榈油煎炸过程中色泽的加深, 特丁基对苯二酚对色泽无显著性影响。

3 结 论

通过单因素实验和响应面优化实验, 研究了植酸和鼠尾草酸对 180°C 高温油脂的影响, 研究表明: 随着浓度的增加, 植酸和鼠尾草酸对高温油脂氧化抑制作用增强; 响应面优化法结果表明鼠尾草酸浓度 0.2 g/kg , 植酸浓度 0.06 g/kg 时抗氧化效果强于单一抗氧化剂。以鲜切薯片作为热加工食品的典例, 对优化后的复合抗氧化剂(0.2 g/kg 鼠尾草酸+ 0.06 g/kg 植酸)进行实际应用, 通过研究添加复合抗氧化剂对 AA 和 MCPD 酯的影响发现: 在 $160\sim 200^\circ\text{C}$ 煎炸 8 h 下, 复合抗氧化剂对 AA 有较好的抑制作用, 抑制率最高达到 80.5% , 对 3-MCPD 酯有一定的抑制作用, 抑制率最高达到 49.2% 。复合抗氧化剂对 2-MCPD 酯的抑制作用不显著。通过研究复合抗氧化剂对棕榈油在高温煎炸薯片过程中油脂和薯片品质的影响发现: 复合抗氧化剂的加入对薯片的质构无显著性差异, 对薯片含油量、水分和色泽方面, 发现添加抗氧化剂的薯片油脂含量和水分显著低于空白组($P < 0.05$), 添加复合抗氧化剂可以降低煎炸油 L^* 降低的幅度, 使薯片和煎炸油具有较好的色泽。

参考文献

- [1] DAHRAN N, ABD-ELHAKIM YM, MOHAMED AAR, *et al.* Palliative effect of *Moringa* olifera-mediated zinc oxide nanoparticles against acrylamide-induced neurotoxicity in rats [J]. Food Chem Toxicol, 2023, 171: 113537.
- [2] WU SL, JU JQ, JI YM, *et al.* Exposure to acrylamide induces zygotic genome activation defects of mouse embryos [J]. Food Chem Toxicol, 2023, 171: 113753.
- [3] KANDEMIR FM, YILDIRIM S, KUCUKLER S, *et al.* Protective effects of morin against acrylamide-induced hepatotoxicity and nephrotoxicity: A multi-biomarker approach [J]. Food Chem Toxicol, 2020, 138: 111190.
- [4] ZAMANI E, SHOKRZADEH M, FALLAH M, *et al.* A review of acrylamide toxicity and its mechanism [J]. Pharm Biomed Res, 2017, 3(1): 1-7.
- [5] HUANG Y, LI C, HU H, *et al.* Simultaneous determination of acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural in heat-processed foods employing enhanced matrix removal-lipid as a new dispersive solid-phase extraction sorbent followed by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. J Agric Food Chem, 2019, 67(17): 5017-5025.
- [6] SEVIM Ç, ÖZKARACA M, KARA M, *et al.* Apoptosis is induced by sub-acute exposure to 3-MCPD and glycidol on Wistar Albino rat brain cells [J]. Environ Toxicol Pharmacol, 2021, 87: 103735.
- [7] LU J, LU J, CHEN Y, *et al.* 3-Chloro-1,2-propanediol inhibits autophagic flux by impairment of lysosomal function in HepG2 cells [J]. Food Chem Toxicol, 2020, 144: 111575-111575.
- [8] SCHULTRICH K, HENDERSON CJ, BRAEUNING A, *et al.* Correlation between 3-MCPD-induced organ toxicity and oxidative stress response in male mice [J]. Food Chem Toxicol, 2020, 136: 110957.
- [9] 张伟敏. 鼠尾草酸抑制油脂热加工过程中反式脂肪酸形成的机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [10] ZHANG WM. Mechanism of carnosic acid inhibiting trans fatty acid formation during hot processing of oil [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.
- [11] HE X, LI B, YU X, *et al.* Inhibiting effects of ginger and rosemary on the formation of heterocyclic amines, polycyclic aromatic hydrocarbons, and trans fatty acids in fried pork balls [J]. Foods, 2022, 11(23): 3767.
- [12] 李静凤. 盐肤木叶多酚与天然抗氧化剂复配及在油脂保鲜中的应用研究[D]. 太原: 山西大学, 2021.
- [13] LI JF. Study on the combination of *Rhus chinensis* leaves polyphenols and natural antioxidants and their application in oil preservation [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2021.
- [14] GOH KM, WONG YH, ABAS F, *et al.* Changes in 3,2-monochloropropandiol and glycidyl esters during a conventional baking system with addition of antioxidants [J]. Foods, 2020, 9(6): 739.
- [15] 严静, 查园园, 钱家美, 等. 麦麸中植酸的脱除工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(13): 5369-5374.
- [16] YAN J, ZHA YY, QIAN JM, *et al.* Removal technology of phytic acid from wheat bran [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(13): 5369-5374.
- [17] KIM YT, KIMMEL R, WANG XY. A new method to determine antioxidant activities of biofilms using a pH indicator (Resazurin) model system [J]. Molecules, 2023, 28(5): 2092.
- [18] 曾丽华, 阮奇琨, 王金梅, 等. 基于玉米肽-植酸复合物和柑橘纤维的泡沫乳液的制备及其性质[J]. 现代食品科技, 2019, 35(1): 121-128, 96.
- [19] ZENG LH, RUAN QJ, WANG JM, *et al.* Preparation and properties of foam emulsion based on maize peptide-phytic acid complex and citrus fiber [J]. Mod Food Sci Technol, 2019, 35(1): 121-128, 96.
- [20] WANG H, ZHOU Y, MA J, *et al.* The effects of phytic acid on the Maillard reaction and the formation of acrylamide [J]. Food Chem, 2013, 141(1): 18-22.
- [21] 赵昕. 鼠尾草酸对棕榈油氧化稳定性的影响研究[J]. 食品科技, 2019, 44(11): 222-226.
- [22] ZHAO X. Effect of carnosic acid on oxidation stability of palm oil [J]. Food Sci Technol, 2019, 44(11): 222-226.
- [23] ZHAO L, ZHANG M, WANG H, *et al.* Effects of carbon dots in combination with rosemary-inspired carnosic acid on oxidative stability of deep frying oils [J]. Food Control, 2021, 125: 107968.
- [24] 刘黄友. 天然植物黄酮对美拉德模拟体系中丙烯酰胺及 5-羟甲基糠醛的协同抑制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [25] LIU HY. Study on synergistic inhibition of acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural in Maillard simulation system by natural plant flavonoids [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [26] YUAN Y, CUI C, LIU H, *et al.* Effects of oxidation and hydrolysis of frying oil on MCPD esters formation in Chinese fried dough sticks [J]. LWT-Food Sci Technol, 2022, 154: 112576.
- [27] REDA SY. Evaluation of antioxidants stability by thermal analysis and its protective effect in heated edible vegetable oil [J]. Food Sci Technol, 2011, 31(2): 475-480.
- [28] 袁长梅, 贺晓云, 马丽艳, 等. 植酸及其检测方法研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(4): 396-400.
- [29] YUAN CM, HE XY, MA LY, *et al.* Research progress of phytic acid and its detection methods [J]. Food Ind, 2021, 42(4): 396-400.
- [30] ZUNIN P, LEARDI R, BISIO A, *et al.* Oxidative stability of virgin olive oil enriched with carnosic acid [J]. Food Res Int, 2010, 43(5): 1511-1516.
- [31] 周艳玲, 梁文娟, 高晴, 等. 氨基酸对葡萄糖-天冬酰胺模拟体系中丙烯酰胺形成的抑制作用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(8):

- 2565–2572.
- ZHOU YL, LIANG WJ, GAO Q, *et al.* Study on the inhibitory effect of Amino acids on the formation of acrylamide in glucose-asparagine simulation system [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(8): 2565–2572.
- [25] IYER AM, DADLANI V, PAWAR HA. Review on acrylamide: A hidden hazard in fried carbohydrate-rich food [J]. *Curr Nutr Food Sci*, 2022, 18(3): 274–286.
- [26] 李荷丽, 程雅晴, 贝君, 等. 食品中氯丙醇酯脂肪酸酯风险及应对措施概述[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(17): 7043–7051.
- LI HL, CHENG YQ, BEI J, *et al.* Overview of risk and countermeasures of chloropropanol fatty acid esters in food [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(17): 7043–7051.
- [27] LI C, ZHOU Y, ZHU J, *et al.* Formation of 3-chloropropane-1,2-diol esters in model systems simulating thermal processing of edible oil [J]. *Food Sci Technol*, 2016, 69: 586–592.
- [28] KANG JH, JOUNG WY, RHO HJ, *et al.* Factors affecting the formation of bound 3-monochloropropane-1,2-diol in a fried snack model [J]. *Korean J Food Sci Technol*, 2020, 52(6): 565–572.
- [29] 张忠飞. 2-氯丙醇酯的合成、检测和急性毒性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- ZHANG ZF. Study on Synthesis, detection and acute toxicity of 2-chloropropanol ester [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [30] HAMLET CG, SADD PA, GRAY DA. Influence of composition, moisture, pH and temperature on the formation and decay kinetics of monochloropropanediols in wheat flour dough [J]. *Eur Food Res Technol*, 2003, 216(2): 122–128.
- [31] CONTARDO I, PARADA J, LEIVA A, *et al.* The effect of vacuum frying on starch gelatinization and its *in vitro* digestibility in starch gluten matrices [J]. *Food Chem*, 2016, 197: 353–358.
- [32] TIMALSINA P, PRAJAPATI R, BHAKTARAJ S, *et al.* Sweet potato chips development and optimization of chips processing variables [J]. *Open Agric*, 2019, 4(1): 118–128.
- [33] CHRISTIAN G. Fundamentals of the frying process [J]. *Eur J Lipid Sci Technol*, 2014, 116(6): 669–674.
- [34] BAIK O, MITTAL G. Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying [J]. *Food Res Int*, 2005, 38(2): 183–191.
- [35] PEREGRINA C, ARLABOSSE P, LECOMTE D, *et al.* Heat and mass transfer during fry-drying of sewage sludge [J]. *Dry Technol*, 2006, 24(7): 797–818.
- [36] LI Y, GUO Q, WANG K, *et al.* Monitoring the changes in heat transfer and water evaporation of french fries during frying to analyze its oil uptake and quality [J]. *Foods*, 2022, 11(21): 3473.
- [37] 张赫宇, 徐瑞. 甘草抗氧化物对肉制品脂肪氧化的影响[J]. 食品安全导刊, 2022, (24): 97–100, 105.
- ZHANG HY, XU R. Effects of glycyrrhiza antioxidants on fat oxidation of meat products [J]. *China Food Saf Magaz*, 2022, (24): 97–100, 105.
- [38] KASHIF G, BETÜL Y, FAHAD ALJ, *et al.* Effect of frying on physicochemical and sensory properties of potato chips fried in palm oil supplemented with thyme and rosemary extracts [J]. *J Oleo Sci*, 2020, 69(10): 1219–1230.
- [39] NOURIAN F, RAMASWAMY H. Kinetics of quality change during cooking and frying of potatoes: part II. Color [J]. *J Food Process Eng*, 2003, 26(4): 395–411.
- [40] POURMAND E, GHAEMI E, ALIZADEH N. Determination of acrylamide in potato-based foods using headspace solid-phase microextraction based on nanostructured polypyrrole fiber coupled with ion mobility spectrometry: A heat treatment study [J]. *Anal Method*, 2017, 9(35): 5127–5134.
- [41] TREGOAT V, BROHEE M, CORDEIRO F, *et al.* Immunofluorescence detection of advanced glycation end products (AGEs) in cookies and its correlation with acrylamide content and antioxidant activity [J]. *Food Agric Immunol*, 2009, 20(3): 253–268.
- [42] GRANDA C, MOREIRA RG, TICHY SE. Reduction of acrylamide formation in potato chips by low-temperature vacuum frying [J]. *J Food Sci*, 2004, 69(8): E405–E411.
- [43] 杨庆余, 王妍文, 李芮芷, 等. 马铃薯食品研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 420–426.
- YANG QY, WANG YW, LI RZ, *et al.* Research progress of potato food [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(9): 420–426.
- [44] MASKAN M. Change in colour and rheological behaviour of sunflower seed oil during frying and after adsorbent treatment of used oil [J]. *Eur Food Res Technol*, 2003, 218: 20–25.
- [45] ALADEDUNYE FA, PRZYBYLSKI R. Degradation and nutritional quality changes of oil during frying [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2009, 86(2): 149–156.
- [46] 张文龙, 黄成义, 赵晨伟, 等. 植物油中的色素及吸附脱色研究进展[J]. 中国油脂, 2022, 47(6): 21–28.
- ZHANG WL, HUANG CY, ZHAO CW, *et al.* Research progress of pigment and adsorption decolorization in vegetable oils [J]. *China Oils Fats*, 2022, 47(6): 21–28.
- [47] 祝婷婷, 于梦丹, 苏沛, 等. 3 种合成抗氧化剂在棕榈油煎炸过程中的损耗及其对煎炸油品质的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(8): 46–50.
- ZHU TT, YU MD, SU P, *et al.* Loss of three synthetic antioxidants during frying of palm oil and their effects on the quality of frying oil [J]. *China Oils Fats*, 2019, 44(8): 46–50.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



李荣蕊, 硕士, 主要研究方向为食品安全与卫生检验。
E-mail: lrr980102@163.com



袁媛, 博士, 教授, 主要研究方向为食品质量与安全。
E-mail: yuan_yuan@jlu.edu.cn