

黑花生衣提取物抑制油炸马铃薯体系中丙烯酰胺形成的研究

欧阳燕林, 王锋, 谭兴和, 郭红英, 张春艳, 张喻

(湖南农业大学食品科学与技术学院, 食品科学与生物技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410128)

摘要: 本论文研究黑花生衣提取物对油炸马铃薯体系中丙烯酰胺形成的影响。采用黑花生衣中提取出的粗提物(BPSE)、原花青素(BPSP)、花色苷(BPSA)以及BPSP分级得到的M1、M2和M3三种不同平均聚合度的原花青素,分别将6种物质添加到马铃薯粉中,油炸后,用高效液相色谱检测丙烯酰胺含量;选择最佳抑制率最大的物质进行动力学试验。结果表明,BPSE、BPSP、BPSA、M1、M2和M3对丙烯酰胺的最佳抑制浓度分别为0.1 μg/mL、1 μg/mL、0.1 μg/mL、1 μg/mL、0.01 μg/mL和0.1 μg/mL,最佳抑制率分别为39.78%、60.63%、25.18%、53.35%、49.02%和43.75%,原花青素能很好地抑制丙烯酰胺形成。通过比较BPSP试验组、空白对照组和橙皮苷阳性对照组对油炸马铃薯体系中丙烯酰胺的形成动力学过程,得出丙烯酰胺在200 s时,生成量最高,BPSP可以有效抑制丙烯酰胺的形成过程。

关键字: 黑花生衣; 花色苷; 原花青素; 丙烯酰胺

文章编号: 1673-9078(2017)2-123-128

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.2.019

Effect of Black Peanut Skin Extracts on the Formation of Acrylamide in Fried Potato

OUYANG Yan-lin, WANG Feng, TAN Xing-he, GUO Hong-ying, ZHANG Chun-yan, ZHANG Yu

(Hunan Provincial Key Laboratory of Food Science and Biotechnology, College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Black peanut skin extracts were used to control the formation of acrylamide in fried potatoes. Six exogenous additives, including crude black peanut skin extract (BPSE), black peanut skin proanthocyanidins (BPSPs), black peanut skin anthocyanins (BPSAs), and three different BPSPs graded according to the degree of polymerization (M1, M2, and M3) were added to the potato powder. After frying, the acrylamide content were measured by high performance liquid chromatography, and the substance with the optimum inhibitory rate was used for kinetic testing. The results indicated that the optimal concentrations of BPSE, BPSP, BPSA, M1, M2, and M3 to inhibit acrylamide formation were 0.1 μg/mL, 1 μg/mL, 0.1 μg/mL, 1 μg/mL, 0.01 μg/mL, and 0.1 μg/mL, respectively, and the optimal inhibitory rates were 39.78%, 60.63%, 25.18%, 53.35%, 49.02%, and 43.75%, respectively. Therefore, proanthocyanidins could effectively inhibit the formation of acrylamide. The kinetics of acrylamide formation in fried potato of the BPSP group, blank control group (negative control), and hesperidin group (positive control) were studied; the results showed that the highest yield of acrylamides was obtained at frying for 200 s, and BPSP could effectively inhibit the process of acrylamide formation.

Key words: black peanut skin; anthocyanin; proanthocyanidin; acrylamide

丙烯酰胺被发现存在多种食物中^[1]。丙烯酰胺无色、无味,可溶于水、醇、丙酮和醚等极性溶剂,易通过口腔、皮肤或呼吸道进入人体内,经过环氧化作

收稿日期: 2016-01-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371817)

作者简介: 欧阳燕林(1990-),女,硕士研究生,研究方向:农产品加工及贮藏

通讯作者: 谭兴和(1959-),男,博士,教授,研究方向:农产品加工及贮藏

用可生成环氧丙酰胺,在生物体内,环氧丙酰胺更容易与大分子物质反应,如血红蛋白、酶以及DNA等,从而导致基因突变和癌症^[2]。富含碳水化合物的食物经过油炸、烘烤和烹饪等热加工,温度超过120℃易形成丙烯酰胺^[3]。

丙烯酰胺主要通过美拉德反应途径形成。游离的天冬酰胺和游离的还原糖经过一系列反应形成丙烯酰胺^[4]。多种抗氧化剂已被证明可以降低丙烯酰胺生成量,特别是植物黄酮来源广泛,安全性高,抑制效果

好,因此备受关注。比如,竹叶提取物、绿茶提取物、肉桂提取物、牛至提取物等黄酮提取物,以及芹菜素、木犀草素、苜蓿素、大豆苷和染料木素等黄酮类单体对丙烯酰胺的生成都有抑制作用^[5-7]。黑花生是一类种衣为黑色的花生品种,与红衣花生相比,其种衣富含花色苷、原花青素等黄酮类化合物^[8],具有很强的抗氧化活性。红衣花生的提取物花生衣红色素已经被批准用于食品添加剂,作为色素使用,而对于黑花生衣提取物的研究和应用还较少。本研究拟在马铃薯粉中添加一定量的黑花生衣原花青素和花色苷,探讨其降低油炸马铃薯体系中丙烯酰胺含量的效果,为食品生产提供参考依据。

天冬酰胺-还原糖模型反应体系是目前主要研究的反应体系,油炸马铃薯体系中的丙烯酰胺主要来源于天冬酰胺-还原糖反应。动力学模型可以清晰地展现美拉德反应中丙烯酰胺形成和消除的过程。本文选择抑制效果最佳的黑花生衣提取物,在最佳添加浓度水平上进行动力学研究,采用形成/消除一级动力学模型进行分析,评价黑花生衣提取物对丙烯酰胺形成和消除的影响,探讨黄酮类物质抑制丙烯酰胺形成的可能机制。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

乙醇、乙酸、硫酸、正己烷、聚酰胺(30~60目)和乙酸乙酯,均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;甲醇(色谱纯),国药集团化学试剂有限公司;HP-20(分析纯),郑州勤实科技有限公司;AB-8(分析纯),天津市光复精细化工研究所;原花青素标准品($\geq 95\%$)、+(-)儿茶素(99.64%),成都曼斯特生物科技有限公司;橙皮苷(95.3%),中国食品药品检定研究院;丙烯酰胺(1 mg/mL),Accustandard;黑花生,购于湖南省江永县义华花生制品有限公司;马铃薯全粉,实验室自制。

1.2 仪器与设备

RE-2000B 旋转蒸发器,巩义市予华仪器有限责任公司;SHZ-D(III)循环水真空泵,巩义市予华仪器有限责任公司;WFJ 7200型可见分光光度计,尤尼柯(上海)仪器有限公司;DF-101S集热式恒温加热磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司;Agilent TC-C18色谱柱(4.6×250 mm, 5 μm)、Agilent TC-C18保护柱,Agilent公司;Waters e2695型高效液相色谱仪、Waters 2995光电二极管阵列检测器,Waters公司。

1.3 黑花生衣黄酮的提取和纯化

黑花生衣磨碎,在pH 3、提取时间120 min、液料比52:1(mL:g)、乙醇体积分数48%、提取温度44 $^{\circ}\text{C}$ 的条件下提取黑花生衣黄酮粗提物^[9],提取液经抽滤,浓缩,冻干,得到粗提物(Black Peanut Skin Extracts, BPSE)粉末,备用。用pH示差法^[10]测定BPSE花色苷含量,用香草醛-硫酸法^[9]测定原花青素含量。

按上述方法提取黑花生衣粗提物,经抽滤,浓缩,用乙酸乙酯按1:1的比例萃取三次。乙酸乙酯部分为原花青素,用AB-8大孔树脂纯化原花青素^[11],冻干后得到原花青素(Black Peanut Skin Proanthocyanidins, BPSP)粉末,用香草醛-硫酸法测定纯度。水相部分主要为花色苷,用HP-20大孔树脂纯化^[12],冻干后得到花色苷(Black Peanut Skin Anthocyanins, BPSA)粉末,用pH示差法测定纯度。

1.4 原花青素分级

取BPSP 300 mg,配成0.5 mg/mL的水溶液,用150 mL聚酰胺分级,以16 Bv/h的流速上样,吸附饱和后,分别用4 Bv体积分数分别为50%、70%和90%的乙醇溶液分级洗脱,分开收集50%乙醇洗脱物(M1)、70%乙醇洗脱物(M2)、90%乙醇洗脱物(M3),浓缩,冷冻干燥。用分光光度计测定M1、M2和M3的平均聚合度^[13]。

1.5 黑花生衣提取物抑制丙烯酰胺的效果研究

取BPSE、BPSP、BPSA、M1、M2和M3,分别配制成浓度为0 $\mu\text{g/mL}$ 、0.001 $\mu\text{g/mL}$ 、0.01 $\mu\text{g/mL}$ 、0.1 $\mu\text{g/mL}$ 、1 $\mu\text{g/mL}$ 、10 $\mu\text{g/mL}$ 、100 $\mu\text{g/mL}$ 和1000 $\mu\text{g/mL}$ 的7组水溶液,备用。

准确称取0.25 g马铃薯全粉,加入0.1 mL上述配制的水溶液,对照组加0.1 mL水,拌匀,倒入装有10 g棕榈油的锥形瓶中,在180 $^{\circ}\text{C}$ 下油炸200 s,取出,用冰水迅速冷却至室温。加入5 mL、0.1%的甲酸水溶液提取丙烯酰胺,将提取液过0.45 μm 滤膜后用HPLC检测。检测条件:色谱柱Agilent TC-C18(4.6×250 mm, 5 μm),保护柱Agilent TC-C18,流动相 $V_{\text{甲醇}}:V_{\text{水}}=5:95$,流速0.6 mL/min,柱温30 $^{\circ}\text{C}$,进样量10 μL ,二极管阵列检测器于波长210 nm处检测。

1.6 原花青素抑制丙烯酰胺的动力学研究

1.6.1 试验方法

称取 0.25 g 马铃薯粉，设置 BPSP 试验组、空白对照组、阳性对照组（橙皮苷对照组），将 0.1 mL 浓度 1 μg/mL 的 BPSP 和浓度为 10⁻⁸ mol/L 的橙皮苷^[14] 分别添加到马铃薯粉中，空白对照组加入同体积的水，分别于 180 °C 下油炸 100 s、150 s、200 s、250 s、300 s、350 s 和 450 s，按照 1.5 中的方法操作，得出每个样品的丙烯酰胺生成量。

1.6.2 丙烯酰胺形成/消除一级动力学模型的建立

参考 Claey^[15] 的方法，采用形成/消除一级动力学模型模拟油炸马铃薯体系中丙烯酰胺含量的变化。故丙烯酰胺的含量可以表示为形成量和消除量之和，动力学方程如下：

$$\frac{dC}{dt} = -k_f \cdot C \quad (1)$$

$$\frac{dC_{AA}}{dt} = k_f \cdot C - k_e \cdot C_{AA} \quad (2)$$

$$\frac{dC_D}{dt} = k_e \cdot C_{AA} \quad (3)$$

式中，C、C_{AA} 和 C_D 分别表示天冬酰胺/还原糖、丙烯酰胺含量和丙烯酰胺降解产物含量；k_f 和 k_e 分别表示丙烯酰胺的形成速率和丙烯酰胺的消耗速率。

本试验所采用的马铃薯全粉含天冬酰胺为 34.52 mg/kg，还原糖为 14.35 mg/kg。当 t=0 时，天冬酰胺为 8.6300 mg，还原糖为 1.0875 mg，故 C=7.94，C_{AA}=0，C_D=0。

1.6.3 数据统计分析

试验结果以平均值±标准差表示，采用 Origin 8.0 (OriginLab 公司) 对动力学曲线进行非线性拟合，并对动力学拟合得到的参数进行多重比较 (Duncan's 法，p≤0.05)。

2 结果与分析

2.1 材料性质

表 1 BPSE、BPSP 和 BPSA 的纯度

Table 1 Purity of anthocyanins and proanthocyanidins

样品	BPSE	BPSP	BPSA
原花青素/%	64.05±0.96	86.80±3.49	-
花色苷/%	23.88±0.88	-	40.41±0.52

BPSE、BPSP 和 BPSA 的性质检测结果如表 1，BPSE 的原花青素和花色苷含量分别为 64.05% 和 23.88%。BPSE 经过分离、纯化得到 BPSP 和 BPSA，BPSP 主要成分是原花青素，纯度为 86.80%；BPSA 主要成分是花色苷，纯度为 40.41%。

表 2 M1、M2 和 M3 的平均聚合度

Table 2 Mean degree of polymerization of M1, M2, and M3

样品	质量/μg	物质的量/μmol	平均聚合度
M1	112.82±2.75	0.18±0.01	2.07±0.12
M2	99.45±0.97	0.13±0.01	2.42±0.12
M3	130.37±1.49	0.15±0.01	2.76±0.08

BPSP 经过聚酰胺分级得到 M1、M2 和 M3 三种原花青素，用分光光度法测定平均聚合度，结果如表 2。M1、M2 和 M3 的平均聚合度分别为 2.07、2.42 和 2.76。

2.2 黑花生衣提取物对丙烯酰胺的抑制效果

与结果分析

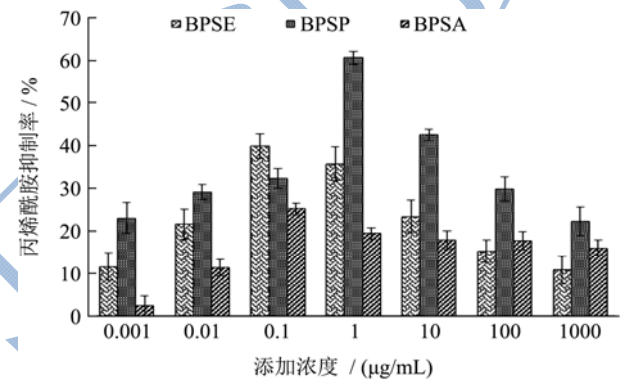


图 1 丙烯酰胺抑制率与 BPSE、BPSP、BPSA 添加浓度的关系

Fig.1 Relationship between the rates of inhibition of acrylamide formation and concentrations of added BPSE, BPSP, and BPSA

由图 1 可知，BPSE、BPSP 和 BPSA 的添加浓度顺序都为 0.001 μg/mL、0.01 μg/mL、0.1 μg/mL、1 μg/mL、10 μg/mL、100 μg/mL、1000 μg/mL。随着 BPSE 的添加浓度依次增加，抑制率先上升后下降，分别为 11.63%、21.60%、39.78%、35.67%、23.41%、15.22% 和 10.81%；BPSP 的添加浓度依次增加，抑制率先上升后下降，分别为 23.06%、29.12%、32.30%、60.63%、42.44%、29.82% 和 22.26%；按照添加浓度顺序，BPSA 对丙烯酰胺形成的抑制率先上升后下降，分别为 2.42%、11.38%、25.18%、19.40%、17.91%、17.72% 和 16.04%。添加 BPSA 试验组的丙烯酰胺抑制率变化趋势相对于另外两组试验组比较平缓，对丙烯酰胺生成的抑制效果稍差，最高抑制率为 25.18%。BPSA 的主要成分是花色苷，试验结果表明花色苷不能很好地抑制丙烯酰胺生成。添加 BPSE 和 BPSP 试验组中的丙烯酰胺抑制率变化趋势比较明显，对丙烯酰胺形成都有较好的抑制效果，最大抑制率分别为 39.78% 和 60.63%，BPSE 和 BPSP 的主要成分都是原花青素，

原花青素纯度较高的 BPSP 具有更好的抑制效果, 结果表明原花青素可以有效抑制丙烯酰胺形成。BPSE、BPSP 和 BPSA 的最佳添加浓度分别是 0.1 $\mu\text{g/mL}$ 、1 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.1 $\mu\text{g/mL}$, 三种物质的最佳添加浓度各不相同, 原因可能是三种物质各自的成分及成分比例各不相同, 作用机制可能有所差异, 导致最佳添加浓度不同。

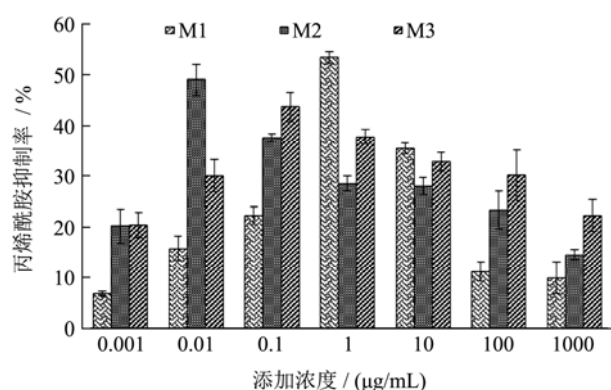


图2 丙烯酰胺抑制率与 M1、M2 和 M3 添加浓度的关系

Fig.2 Relationship between the rates of inhibition of acrylamide formation and the concentrations of added M1, M2, and M3

由图 2 可知, M1、M2 和 M3 的添加浓度顺序都为 0.001 $\mu\text{g/mL}$ 、0.01 $\mu\text{g/mL}$ 、0.1 $\mu\text{g/mL}$ 、1 $\mu\text{g/mL}$ 、10 $\mu\text{g/mL}$ 、100 $\mu\text{g/mL}$ 、1000 $\mu\text{g/mL}$ 。随着 M1 的添加浓度依次增加, 抑制率先上升后下降, 分别为 6.79%、15.78%、22.2%、53.35%、35.45%、11.11%和 9.92%; M2 的添加浓度依次增加, 抑制率先上升后下降, 分别为 20.17%、49.02%、37.65%、28.51%、28.00%、23.30%和 14.58%; 按照添加浓度顺序, M3 的抑制率先上升后下降, 分别为 20.38%、30.09%、43.75%、37.84%、32.74%、30.16%和 22.28%。添加 M1、M2 和 M3 的三组试验组中, 丙烯酰胺抑制率变化趋势都比较明显, 对丙烯酰胺生成的抑制效果较好。M1、M2 和 M3 的最佳添加浓度分别是 1 $\mu\text{g/mL}$ 、0.01 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.1 $\mu\text{g/mL}$ 。M1、M2 和 M3 的聚合体种类和比例各不相同, 作用机制也可能会有所差异, 以至最佳添加浓度不同。M2 的最佳添加浓度低, 最大抑制率略低于 M1, 在节约成本方面, 比 M1 和 M3 更有优势。试验结果表明, 随着 M1、M2 和 M3 的平均聚合度依次增加, 其最大抑制率依次降低, 平均聚合度低的原花青素在抑制丙烯酰胺形成方面更有优势。

多种抗氧化剂可以与美拉德反应的中间产物发生反应, 改变反应途径, 从而减少丙烯酰胺形成^[16]。黄酮是广泛存在于植物中的天然抗氧化剂, 多种黄酮已被证明具有抑制丙烯酰胺形成的作用。以上研究表明黑花生衣提取物具有抑制丙烯酰胺形成的作用。(1)

BPSA 对丙烯酰胺形成的抑制效果相对较差, 原因可能是花色苷结构中带有葡萄糖苷, 与某些带葡萄糖苷的黄酮结构相似, 章宇^[17]的研究结果中, 芹菜素-7-O-葡萄糖苷、木犀草素-7-O-葡萄糖苷和木犀草素-4'-O-葡萄糖苷三种黄酮对丙烯酰胺的抑制率分别为 25.3%、37.3%和 35.7%; 也可能是 BPSA 中残留的原花青素起到一定的抑制作用, 而花色苷本身并无明显抑制作用; 还可能是花色苷不稳定, 在高温油脂体系中抗氧化效果不好。(2) BPSE、BPSP、M1、M2 和 M3 对丙烯酰胺形成都有明显的抑制作用, 这 5 种物质都具有高含量的原花青素, 说明原花青素可以有效抑制丙烯酰胺形成。原花青素可以有效清除美拉德反应中的羰基化合物, 从而抑制丙烯酰胺的形成^[18]。Sarnoski^[19]和 Appeldoorn^[20]的研究表明, 花生衣中的原花青素以 A 型原花青素为主, 在水溶体系中 B 型原花青素比 A 型原花青素清除自由基的能力强, 在油脂体系中, A 型原花青素清除自由基的能力比 B 型原花青素强^[11], 故花生衣原花青素有利于抑制油炸马铃薯体系中丙烯酰胺的形成。原花青素属于黄烷醇类, 黄烷醇及其衍生物对丙烯酰胺形成具有很好的抑制效果, 抑制率范围为 50.1%~91.9%, 抑制效果比黄酮、黄酮醇和异黄酮好^[17]。本研究中, PBSP、M1、M2 和 M3 的最大抑制率都在 50%左右, 且 PBSP 的最大抑制率可达 60.63%。(3) Sarnoski^[19]用 RP-HPLC-MS/MS 分离鉴定出花生衣中含有原花青素二聚体、三聚体、四聚体, 原花青素的抗氧化活性与聚合度有关, 聚合度低的原花青素具有更强的抗氧化活性, 抗氧化活性随聚合度增加逐渐降低^[21,22], 故聚合度低的原花青素可能对丙烯酰胺形成有更好的抑制效果; 陈洋^[23]的研究表明原花青素二聚体比三聚体的抑制效果好, 本研究中, M1、M2 和 M3 的平均聚合度依次增大, 对丙烯酰胺形成的抑制率也呈现依次减弱的现象, 表明原花青素聚合度越低, 对抑制丙烯酰胺形成的效果越明显。聚酰胺对原花青素的吸附能力强, 但洗脱能力稍差, 在分级洗脱的过程中, 有些色素不能完全被洗脱下来, 这可能会导致某些有效成分缺失, 影响洗脱后的原花青素对丙烯酰胺形成的抑制效果, 导致 M1、M2 和 M3 的抑制效果稍差于 PBSP 的抑制效果; BPSP 中各种聚合体的数量构成比列与 M1、M2 和 M3 不同, 几种聚合体同时用于抑制丙烯酰胺形成可能存在协同作用, 故聚合体的数量构成比列不同, 协同作用也会有所不同, 导致 BPSP 的抑制效果比 M1、M2 和 M3 好。根据以上分析可知, 原花青素能很好地抑制丙烯酰胺形成, 其抑制效果与聚合度、组分及各组分数量有关。

2.3 BPSP 抑制丙烯酰胺的动力学分析

表 3 油炸马铃薯体系下丙烯酰胺形成/消除一级动力学模型参数 (n=3)

Table 3 Parameters of the first-order kinetic model of acrylamide formation/elimination in fried potato (n=3)

油炸马铃薯体系	k_f	k_e	R^2	RMSE
空白对照组	$(2.15 \pm 0.87) \times 10^{-2} A$	$(6.95 \pm 2.04) \times 10^{-4} A$	0.9004	0.6731
阳性对照组	$(7.00 \pm 0.83) \times 10^{-3} B$	$(3.84 \pm 0.31) \times 10^{-3} B$	0.9270	0.1346
BPSP 试验组	$(5.98 \pm 0.57) \times 10^{-3} B$	$(4.95 \pm 0.31) \times 10^{-3} C$	0.9457	0.0689

图 3 是 BPSP 抑制油炸马铃薯体系中丙烯酰胺形成/消除的动力学拟合曲线, 试验设置空白对照组和阳性对照组。橙皮苷是一种二氢黄酮, 可以抑制美拉德反应的中间产物向丙烯酰胺转化的过程, 从而降低丙烯酰胺生成量, 橙皮苷添加浓度为 10^{-8} mol/L 时, 丙烯酰胺抑制率可达 53.57%^[14], 本试验采用橙皮苷作为阳性对照。从图 3 可以看出, 丙烯酰胺在 200 s 内的形成速度较快, 之后丙烯酰胺呈缓慢消除趋势。与空白对照组和阳性对照组相比, BPSP 试验组丙烯酰胺生成量最低, BPSP 比橙皮苷的抑制效果好。图 3 中 3 条曲线的拟合结果见表 3, 表中空白对照组、阳性对照组和 BPSP 试验组 3 个模型的修正决定系数 (R^2) 都在 0.9 以上, 接近 1, 均方根误差 (RMSE) 也都比较小, 说明该模型拟合度较好, 精确度和可靠度较高。 k_f 和 k_e 分别表示丙烯酰胺的形成速率和消除速率。 k_f 的大小顺序为空白对照组>阳性对照组>BPSP 试验组, 空白对照组的 k_f 与阳性对照组和 BPSP 对照组的 k_f 相比都有显著差异, 阳性对照组的 k_f 与 BPSP 试验组的 k_f 无显著差异, 说明 BPSP 能使丙烯酰胺的形成速率显著降低, 且与阳性对照组的丙烯酰胺形成速率无显著差异; k_e 的大小顺序为空白对照组<阳性对照组<BPSP 试验组, 空白对照组、阳性对照组和 BPSP 试验组三组间的 k_e 都存在显著差异, 说明 BPSP 的添加会使丙烯酰胺的消除速率加快。分析可知, 该模型能较好地描述油炸马铃薯体系中丙烯酰胺形成/消除的动力学过程, BPSP 可以有效抑制丙烯酰胺形成的动力学过程, 加快丙烯酰胺的消除过程。

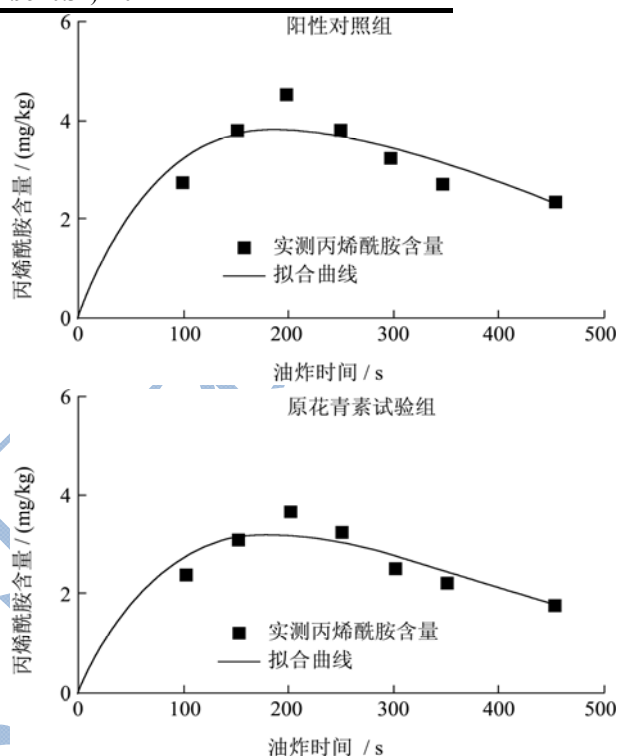
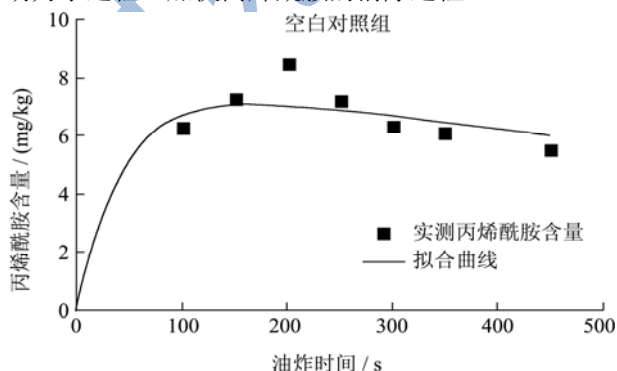


图 3 油炸马铃薯体系中丙烯酰胺的形成/消除动力学拟合曲线 (n=3)

Fig.3 Kinetic fitting curves of acrylamide formation/elimination in fried potato (n=3)

3 结论

本文研究了黑花生衣提取物对马铃薯油炸食品中丙烯酰胺形成的抑制作用。从黑花生衣中得到 BPSE、BPSP、BPSA、M1、M2 和 M3。BPSE、BPSP、BPSA、M1、M2、M3 的最佳添加浓度分别为 0.1 $\mu\text{g/mL}$ 、1 $\mu\text{g/mL}$ 、0.1 $\mu\text{g/mL}$ 、1 $\mu\text{g/mL}$ 、0.01 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.1 $\mu\text{g/mL}$, 对丙烯酰胺的最大抑制率分别为 39.78%、60.63%、25.18%、53.35%、49.02%和 43.75%。试验结果表明, 原花青素能很好地抑制丙烯酰胺形成, 抑制效果与其聚合度、组分及各组分数量有关。BPSP 的抑制率最高, 达 60.63%, 且分离成本不高。通过 BPSP 抑制丙烯酰胺的动力学研究可知, 形成/消除一级动力学模型能较好地拟合油炸马铃薯体系中丙烯酰



胺形成和消除的动力学曲线。丙烯酰胺在 200 s 内生成速度较快, 200 s 后丙烯酰胺缓慢消除, 且 BPSP 对丙烯酰胺的形成动力学过程具有明显的抑制作用。BPSP 对丙烯酰胺形成的抑制效果比作为阳性对照的橙皮苷好, 且橙皮苷价格高, 不适合用于生产实践。黑花生衣作为加工的副产物, 其价格低廉, 用于提取 BPSP 可以综合利用资源。此外, BPSP 的分离成本不高, 可以很好地用于降低油炸食品中丙烯酰胺的含量, 是一种经济、天然的丙烯酰胺抑制剂。

参考文献

- [1] Friedman Mendel. Chemistry, biochemistry and safety of acrylamide. A review [J]. J. Agric. Food Chem., 2003, 51(16): 4504-4526
- [2] Claus Achim, Carle Reinhold, Schieber Andreas. Acrylamide in cereal products a review [J]. Journal of Cereal Science, 2008, 47(2): 118-133
- [3] Tareke Eden, Rydberg Per, Karlsson Patrik, et al. Analysis of acrylamide, a carcinogen formed in heated foodstuffs [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(17): 4998-5006
- [4] Mottram Donald-S, Wedzicha Bronislaw-L, Dodson Andrew-T. Acrylamide from Maillard reaction products [J]. Nature, 2002, 419(6906): 449-450
- [5] Zhang Yu, Zhang Ying. Effect of natural antioxidants on kinetic behavior of acrylamide formation and elimination in low-moisture asparagines-glucose model system [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(1): 105-115
- [6] Cheng Jun, Chen Xin-yu, Zhao Sheng, et al. Antioxidant-capacity-based models for the prediction of acrylamide reduction by flavonoids [J]. Food Chemistry, 2015, 168: 90-99
- [7] Morales Gema, Jimenez Maribel, Garcia Oscar, et al. Effect of natural extracts on the formation of acrylamide in fried potatoes [J]. LWT-Food Science and Technology, 2014, 58(2): 587-593
- [8] 杜蕾, 李新华. 黑、红花生衣中原花色素的分析[J]. 食品科学, 2014, 35(4): 190-194
DU Lei, LI Xin-hua. Analysis of proanthocyanidins in black and red peanut skins [J]. Food Science, 2014, 35(4): 190-194
- [9] 欧阳燕林, 谭兴和, 王锋, 等. 黑花生衣原花青素和花色苷的提取工艺研究[J]. 中国酿造, 2015, 34(8): 28-34
OUYANG Yan-lin, TAN Xing-he, WANG Feng, et al. Optimization of extraction process for proanthocyanidins and anthocyanins from black peanut skin [J]. China Brewing, 2015, 34(8): 28-34
- [10] Lee J, Durst R W, Wrolstad R E. Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study [J]. Journal of Aoac International, 2005, 88(5): 1269-1278
- [11] DONG Xiao-qian, ZOU Bo, ZHANG Ying, et al. Preparation of A-type proanthocyanidin dimers from peanut skins and persimmon pulp and comparison of the antioxidant activity of A-type and B-type dimers [J]. Fitoterapia, 2013, 91: 128-139
- [12] 王锋. 黑花生衣色素的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007
WANG Feng. Study on the black peanut skin pigment [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007
- [13] 彭芳刚. 红莲外皮原花青素的提取、分级分离及分析鉴定[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013
PENG Fang-gang. Studies on extraction, fractionation, and analysis of proanthocyanidins from red skin of red locus seed [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013
- [14] 蔡文. 柑桔黄酮抑制薯片丙烯酰胺形成的机理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014
CAI Wen. Extraction and purification research of citrus flavonoids and its inhibitory mechanism on acrylamide formation in foods [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014
- [15] Claeys Wl, Vleeschouwer K-De, Hendrickx Me. Kinetics of acrylamide formation and elimination during heating of an asparagine-sugar maple model system [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(26): 9999-10005
- [16] Cheng Jin, Xiao-qin Wu, Ying Zhang. Relationship between antioxidants and acrylamide formation: a review [J]. Food Research International, 2013, 51(2): 611-620
- [17] 章宇. 生物黄酮抑制食品中丙烯酰胺形成的机理[D]. 杭州: 浙江大学, 2008
ZHANG Yu. Studies on reduction mechanism and structure-activity relationship of acrylamide in food by bio-flavonoids [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008
- [18] Granvogl Michael, Schieberle Peter. Thermally generated 3-aminopropionamide as a transient intermediate in the formation of acrylamide [J]. J. Agric. Food Chem., 2006, 54(16): 5933-5938
- [19] Sarnoski Paul-J, Johnson Jodie-V, Reed Kyle-A, et al. Separation and characterisation of proanthocyanidins in Virginia type peanut skins by LC-MS [J]. Food Chemistry, 2012, 131: 927-939
- [20] Appeldoorn Maaikje-M, Sanders Mark, Vincken Jean-Paul, et

- al. Efficient isolation of major procyanidin A-type dimers from peanut skins and B-type dimers from grape seeds [J]. Food Chemistry, 2009, 117(4): 713-720
- [21] ZHANG Liang-liang, LIN Yi-ming, ZHOU Hai-chao, et al. Condensed tannins from mangrove species *Kandelia candel* and *Rhizophora mangle* and their antioxidant activity [J]. Molecules, 2010, 15(1): 420-431
- [22] Lotito Silvana-B, Actis-goretta Lucas. Influence of oligomer chain length on the antioxidant activity of procyanidins [J]. Communications, 2000, 276(3): 945-951
- [23] 陈洋. 花生红衣原花青素的分离鉴定及其对丙烯酸胺抑制作用的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014
- CHEN Yang. Study on solation and identification of procyanidins from peanut skins and reduction of acrylamide [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014

现代食品科技