

花生红衣中黄烷醇抑制丙烯酰胺效果及其分离鉴定

赵晓丹¹, 杨婧¹, 吴瑜², 周婷¹, 陈洋¹, 刘睿^{1*}

(1. 华中农业大学食品科技学院, 环境食品学教育部重点实验室, 武汉 430070;

2. 湖北省科技信息研究院, 武汉 430070)

摘要: **目的** 研究花生红衣中提纯的原花青素(peanut skin procyanidins, PSPs-1)在化学模拟体系和食品体系中对丙烯酰胺产生的抑制效果, 并对 PSPs-1 的组成成分进行鉴定。**方法** 以天冬酰胺和葡萄糖反应产生丙烯酰胺作为化学模拟体系, 以油炸薯条生成丙烯酰胺作为食品体系, 通过 HPLC 分析 PSPs-1 对 2 种体系中丙烯酰胺的抑制效果, 并采用反相高效液相色谱-电喷雾-质谱联用(RP-HPLC-ESI-MS/MS)技术对 PSPs-1 进行鉴定。**结果** 在化学模拟体系中, PSPs-1 具有明显的抑制丙烯酰胺生成的效果, 并显示出非线性浓度效应, 在添加量为 0.1 mg/mL 时达到最大抑制率, 为(51.22±3.15)%; 在食品体系中, PSPs-1 的浓度及浸渍薯条时间皆对丙烯酰胺的产生有明显抑制效果, 并显示一定的量效关系, PSPs-1 浓度为 0.1 mg/mL 达到最大抑制率, 为(51.03±2.97)%, 且当浸渍时间为 90 s 时抑制效果最好(50.79±1.86)%。PSPs-1 经 RP-HPLC-ESI-MS/MS 分析与对照品比较, 其可能是由含有儿茶素和表儿茶素的黄烷醇多酚组成。**结论** 由儿茶素和表儿茶素组成的 PSPs-1 在 2 种体系中具有明显抑制丙烯酰胺产生的效果。

关键词: 花生红衣; 黄烷醇; 丙烯酰胺; 抑制作用

Effect of flavanol from peanutskin on inhibiting acrylamide and its separation and identification

ZHAO Xiao-Dan¹, YANG Jing¹, WU Yu², ZHOU Ting¹, CHEN Yang¹, LIU Rui^{1*}

(1. Key Laboratory of Environment Correlative Dietology, Ministry of Education, College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Academy of Scientific and Technical Information, Wuhan 430070, China)

ABSTRACT: Objective To study the inhibition of acrylamide formation by peanut red skin procyanidins (PSPs-1) obtained by polyphenol from peanut red skin in chemical system and in food system and to identify the component of PSPs-1. **Methods** Based on reaction of asparagine and glucose and fried chips as chemical system and food system, respectively, the inhibition of acrylamide formation for 2 kinds of systems was analyzed by high performance liquid chromatography (HPLC). At the same time, PSPs-1 was identified by using reversed phase high-performance liquid chromatography coupled to electrospray ionization tandem mass spectrometry (RP-HPLC-ESI-MS/MS). **Results** In chemical system, PSPs-1 had an obvious effect on inhibiting acrylamide, and it showed a non-linear relationship between addition levels of PSPs-1 and inhibitory rate of acrylamide. The maximum inhibition rate was (51.22±3.15)% when the adding amount was 0.1 mg/mL.

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划创新训练项目(201410504057)

Fund: Supported by National Undergraduate Training Program for Innovation and Entrepreneurship (201410504057)

*通讯作者: 刘睿, 博士, 副教授, 主要研究方向为天然产物化学。E-mail: liurui@mail.hzau.edu.cn

*Corresponding author: LIU Rui, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China. E-mail:liurui@mail.hzau.edu.cn

In food system, the concentration and soak time of PSPs-1 had both obvious inhibitions on acrylamide formation. The maximum inhibition rate was $(50.79 \pm 1.86)\%$ when the soak time was 90 s, and it was $(51.03 \pm 2.97)\%$ when the adding amount was 0.1 mg/mL. PSPs-1 might composed of polyphenols that including catechin and epicatechin by RP-HPLC-ESI-MS/MS and compared with reference substance. **Conclusion** PSPs-1 that composed of catechin and epicatechin has an obvious inhibition of acrylamide formation.

KEY WORDS: peanut red skin; flavanol; acrylamide; inhibition effect

1 引言

2002年瑞典国家食品管理局(SNFA)首次发现在高温油炸薯条、薯片等富含淀粉的食品中含有丙烯酰胺^[1]。由于丙烯酰胺具有致癌性^[2],同时也是神经毒素^[3]、生殖毒素^[4],对人类健康造成威胁,从而引起人们的高度关注。研究表明,天冬酰胺与还原糖发生美拉德反应是丙烯酰胺的主要产生途径^[5-7],其次在高脂类食品中,氨与丙烯醛对丙烯酰胺的形成也起到重要作用^[8]。丙烯酰胺在油炸食品中生成量的控制一直备受国内外的关注,改变加工工艺和添加丙烯酰胺抑制剂是减少食品中丙烯酰胺生成量的2种主要途径^[9]。已有研究表明,维生素对食品体系和化学模型中丙烯酰胺生成具有抑制作用,并发现水溶性维生素效果明显强于脂溶性维生素,其中B族维生素的抑制效果最好^[10]。此外,植物提取物作为一种食品添加剂用以减少食品加工过程中丙烯酰胺的生成是近几年的研究热点,如竹叶提取物能有效降低炸鸡翅、薯片和薯条中丙烯酰胺含量^[11],进一步研究发现竹叶提取物中生物黄酮类物质可有效抑制丙烯酰胺的生成^[12,13],进而引起人们关注植物多酚,如竹叶黄酮^[14]、绿茶提取物^[15]、富含多酚的橄榄油^[16]以及苹果多酚提取物^[17]等对不同体系中丙烯酰胺抑制效果的研究。

花生红衣是花生深加工过程中产出量较大的副产物,目前没有得到有效利用,花生红衣中含有丰富的包括原花青素在内的黄烷醇类多酚^[18],而富含原花青素提取物能在天冬酰胺和葡萄糖的化学模拟体系和油炸马铃薯的食品体系中抑制丙烯酰胺生成^[17]。目前不少研究报道植物多酚对食品中丙烯酰胺产生具有抑制作用,但大多是以粗提取物或其纯化分离得到的物质进行研究,其成分并不明确,不利于进一步研究其抑制丙烯酰胺的作用机制。本文以花生红衣多酚经 Toyopearl HW-40(S)凝胶色谱分离得到

一个级分 PSPs-1(peanut skin procyanidins)为原料,研究其分别在化学体系和食品体系中对丙烯酰胺产生的抑制效果,同时采用反相高效液相色谱-电喷雾-质谱联用(RP-HPLC-ESI-MS/MS)技术对 PSPs-1 进行鉴定,期望将 PSPs-1 开发为一种成分明晰、功效明确的天然食品添加剂,并为食品加工中抑制丙烯酰胺的生成提供实验依据,有利于进一步揭示 PSPs-1 抑制丙烯酰胺产生的作用机制。

2 材料与方法

2.1 原材料

花生产于辽宁的白沙品种,干燥保存。
速冻薯条(山东绿润食品有限公司)。

2.2 实验试剂

95%乙醇为(食品级,武汉兴和达商贸有限公司);盐酸(分析级,信阳市帝昊化学试剂有限公司);正己烷、亚硫酸氢钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、亚铁氰化钾、硫酸锌、均为分析级(国药集团化学试剂有限公司);L-天门冬酰胺、无水葡萄糖均为分析级(美国 Amresco 公司);乙腈、乙酸、甲醇、丙烯酰胺(色谱级,德国 Merck 公司);AB-8 大孔树脂(天津南开和成科技有限公司);维生素 B₆(色谱级, BIOSHARP 公司);Toyopearl 凝胶 HW-40(S)(日本 TOSOH 公司);儿茶素、表儿茶素(色谱级,芜湖贰尔塔医药科技有限公司)。实验用水均为超纯水。

Carre I 试剂:称取 15 g $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ 溶于 100 mL 水中。

Carrez II 试剂:称取 30 g $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 溶于 100 mL 水中。

2.3 主要仪器设备

BETA2-8LD 真空冷冻干燥机(美国 Christ 公司);B-260 恒温水浴锅、RE52CS-1 旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂);UV-1750 紫外-可见分光光度计(日本岛

津公司); LTQ-XL 液相色谱-质谱联用仪(配有电喷雾离子源(ESI)以及 X-calibur 数据处理系统, 美国 Thermo 公司); HH-WO 智控油浴锅(上海一凯仪器设备有限公司); Waters1525 液相色谱仪(美国 Waters 公司); Hypercarb 色谱柱(100 mm×4.6 mm, 3 μm, Thermo 中国有限公司); Oasis HLB (200 mg)固相萃取小柱(Waters 中国有限公司); 多功能油炸锅(广东容声电器股份有限公司)。

2.4 实验方法

2.4.1 花生红衣原花青素的提取、分离纯化

参考陈洋等^[19]的提取、分离纯化方法, 采用 70% 乙醇溶液进行提取, 通过 AB-8 大孔树脂进行纯化得到高纯度的 PSPs, 再经过 ToyopearlHW-40(S)凝胶色谱的分离得到多个富含多酚的级分, 其中第一个级分为目标物质 PSPs-1。

2.4.2 PSPs-1 在化学模拟体系中对丙烯酰胺的抑制作用

用 pH=6.8, 浓度为 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液(PBS)溶液配成浓度分别为 1.5、1.0、0.5、0.1、0.05、0.01、0.005 mg/mL PSPs-1 溶液。准确称量 2.202 g 天冬酰胺和 3.003 g 葡萄糖, 用 PBS 定容至 50 mL 的容量瓶中, 配制成丙烯酰胺反应液。

分别量取 1.5 mL 丙烯酰胺反应液于耐高温, 耐压螺口试管, 空白对照组中加入 100 μL 的 PBS 缓冲液, 阳性对照组中加入 0.1 mg/mL 维生素 B₆(PM), 试验组中分别添加 100 μL 各浓度的 PSPs-1 溶液。将各组样品试管加盖旋紧, 在 175 °C 温度下加热 40 min 后, 迅速冷却至室温。分别向反应产物中加入 1.5 mL PBS 混合均匀后, 取 1.5 mL 样品溶液于离心管中, 加入 150 μL Carrez I, 150 μL Carrez II, 混匀; 4500 r/min 转速下离心 15 min, 所有上清液分别上样至 SPE 柱中, 先淋洗除去杂质, 然后用 3 mL 洗脱液洗脱, 将收集的洗脱液用 0.22 μm 的滤膜过滤, 通过高效液相色谱(HPLC)法定量分析各组样品中产生丙烯酰胺的量。各组重复试验 3 次^[13,20-23]。

2.4.3 PSPs-1 在食品体系中对丙烯酰胺的抑制作用

(1) 油炸薯条食品体系中丙烯酰胺提取、纯化方法

参考 Zeng^[10]、章宇等^[13]的研究方法, 并进行适当改进。

将冻薯条解冻并吹干样品表面水分后称取 55 g, 在 170 °C 油炸 5 min 后, 立即冷却至室温, 用 100 mL 正己烷浸泡油炸过的薯条样品 15 min 除脂, 取出样

品浸泡在 100 mL 超纯水中, 向其中加入 4 g NaCl, 超声 30 min 提取丙烯酰胺。

取 20 mL 水提取物分成等量的 2 份, 各加入到 30 mL 离心管中, 分别向离心管中加入 10 mL 乙腈、2 mL 正己烷和 4 g 无水硫酸镁, 4500 r/min 转速下离心 5 min 后混合液分为 3 层, 弃去上层正己烷层, 取乙腈层备用; 再向离心管中加入 10 mL 乙腈离心, 同样取乙腈层。2 次乙腈层萃取液混合真空浓缩去除乙腈后, 加入 2 mL 超纯水提取样品。将超纯水提取液上样至 SPE 柱中, 之后处理方法与化学体系相同。

(2) PSPs-1 浸泡薯条时间对油炸薯条中丙烯酰胺抑制效果的影响

用 100 mL 浓度为 0.1 mg/mL 的 PSPs-1 浸泡解冻后的薯条样品, 浸泡时间分别为 10、30、60、90、120、300、600 s。空白对照组、阳性对照组分别用 100 mL 超纯水和浓度为 0.1 mg/mL 维生素 B₆(PM)浸泡相同时间。浸泡后迅速吹干表面水分, 在 170 °C 油炸 5 min 后, 立即冷却至室温, 每组实验重复 3 次。反应产物根据(1)所建立的方法处理, 并通过 HPLC 定量分析产生丙烯酰胺的量, 确定最佳浸泡时间。

(3) PSPs-1 浓度对油炸薯条中丙烯酰胺抑制效果的影响

在最佳浸泡时间条件下, 用超纯水配制 0.001、0.005、0.01、0.05、0.1、0.5、1.0 mg/mL 的 PSPs-1 溶液, 设置空白对照组、维生素 B₆(PM)阳性对照组和 PSPs-1 溶液试验组, 试验组分别用 100 mL 各浓度的 PSPs-1 溶液浸泡一份薯条样品。其他处理方法同(2), 考察 PSPs-1 浓度对油炸薯条中丙烯酰胺抑制效果的影响。

2.4.4 丙烯酰胺含量检测的 HPLC 条件

色谱柱: Hypercarb 的分析柱(100 mm×4.6 mm, 3 μm)和保护柱(10 mm×2 mm); 检测波长: 205 nm; 进样量: 10 μL; 流动相为纯超纯水; 柱温为 40 °C; 流速: 0.6 mL/min; 分析时间: 15 min。

对各组反应终产物中的丙烯酰胺含量进行检测, 与空白对照组相比, 计算 PSPs-1 在不同浓度条件下对丙烯酰胺的抑制率。

$$\text{抑制率}(\%) = \frac{(AM_0 - AM_n)/AM_0}{AM_0} \times 100$$

AM₀ 为空白对照组丙烯酰胺的含量, AM_n 为实验组丙烯酰胺的含量。

2.4.5 PSPs-1 级分的 RP-HPLC-ESI-MS/MS 分析

称取 PSPs-1 粉末 1.0 mg, 溶于 1.0 mL 的甲醇,

通过 0.22 μm 滤器过滤, 得到样液, 待进样。

RP-HPLC-ESI-MS/MS 分析条件: 色谱柱为 Waters Symmetry C_{18} (4.6 mm \times 250 mm, 5 μm); 负离子模式; 离子化方式: ESI-; 扫描范围: m/z 50~700; 干燥气温度 325 $^{\circ}\text{C}$; 干燥气流速: 10 L/min; 喷雾压力: 40 psi; 毛细管电压: 3500 V; 流动相 A: 0.8%冰乙酸; B: 乙腈; 进样量: 10 μL ; 流速: 0.6 mL/min; PDA 检测波长: 280 nm; 柱温: 25 $^{\circ}\text{C}$; 梯度洗脱: 0 min, 15%B; 5 min, 25%B; 25 min, 28%B; 30 min, 30%B; 32 min, 15%B; 35 min, 15%B。

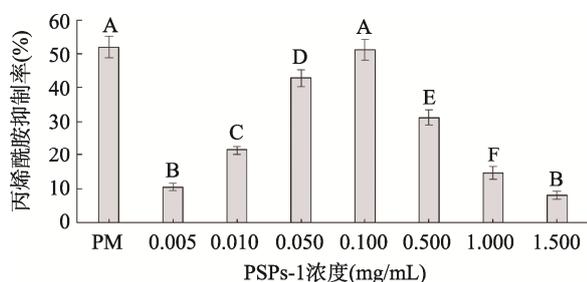
2.4.6 统计学分析

数据表示为平均值 \pm 标准偏差 ($\bar{x}\pm s$), 采用 SPSS17.0 软件进行方差分析(ANOVA)。

3 结果分析

3.1 化学体系中 PSPs-1 抑制丙烯酰胺的效果

在化学体系中 PSPs-1 添加浓度与丙烯酰胺抑制率之间的关系见图 1。结果表明: 化学模拟体系中, PSPs-1 浓度-丙烯酰胺抑制率趋势呈非线性变化, PSPs-1 最佳添加浓度为 0.1 mg/mL, 其抑制率最高可达到(51.22 \pm 3.15)% ($P<0.05$)。



注: 不同字母表示差异显著($P<0.05$)

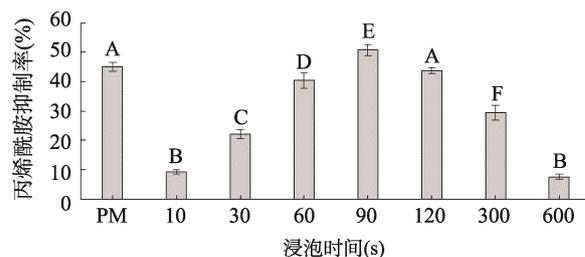
图 1 化学体系中 PSPs-1 添加量与丙烯酰胺抑制率的关系

Fig. 1 Relationship between PSPs-1 addition level and acrylamide inhibition rate in chemical system

3.2 食品体系中 PSPs-1 抑制丙烯酰胺的效果

3.2.1 浸泡时间与丙烯酰胺抑制率的量效关系

薯条在油炸前经 PSPs-1 浸泡处理, 对薯条油炸后丙烯酰胺的生成量有影响, 浸泡时间与丙烯酰胺抑制率的关系见图 2。结果表明: 食品体系中 PSPs-1 对丙烯酰胺抑制效果同化学体系相似, 亦呈非线性变化。PSPs-1 最佳浸泡时间为 90 s, 其抑制率最高可达到(50.79 \pm 1.86)% ($P<0.05$)。



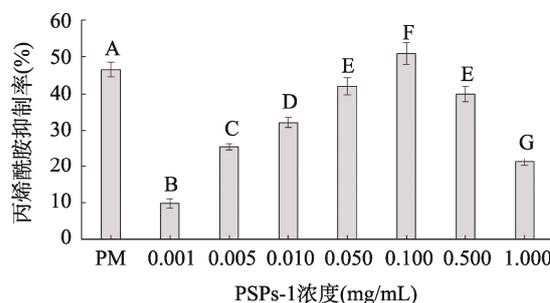
注: 不同字母表示差异显著($P<0.05$)

图 2 食品体系中 PSPs-1 (薯条)浸泡时间与丙烯酰胺抑制率的关系

Fig. 2 Relationship between PSPs-1 soak time and acrylamide inhibition rate in food system

3.2.2 PSPs-1 浓度与丙烯酰胺抑制率的量效关系

同样, PSPs-1 的浓度对薯条油炸后丙烯酰胺的生成量也会产生影响, PSPs-1 的浓度与丙烯酰胺抑制率之间的关系见图 3。结果表明: 不同浓度 PSPs-1 浸泡薯条后, 对丙烯酰胺抑制效果不同, 呈非线性变化, 效果最好的是 0.1 mg/mL, 其抑制率达到(51.03 \pm 2.97)% ($P<0.05$)。



注: 不同字母表示差异显著($P<0.05$)

图 3 食品体系中 PSPs-1 浓度与丙烯酰胺抑制率的关系

Fig. 3 Relationship between PSPs-1 level and acrylamide inhibition rate in food system

3.3 PSPs-1 级分的 RP-HPLC-ESI-MS/MS 结果分析

为明确 PSPs-1 的组成成分, 分别采用 RP-HPLC-ESI-MS/MS 对儿茶素和表儿茶素的对照品以及 PSPs-1 进行分析和鉴定, 通过保留时间和质谱信息进行定性。儿茶素和表儿茶素的对照品的 HPLC 色谱图见图 4(A), PSPs-1 的 HPLC 色谱图见图 4(B)。

PSPs-1 的液相色谱图中出现 2 个色谱峰, 峰 1 和峰 2 的保留时间分别与儿茶素和表儿茶素对照品

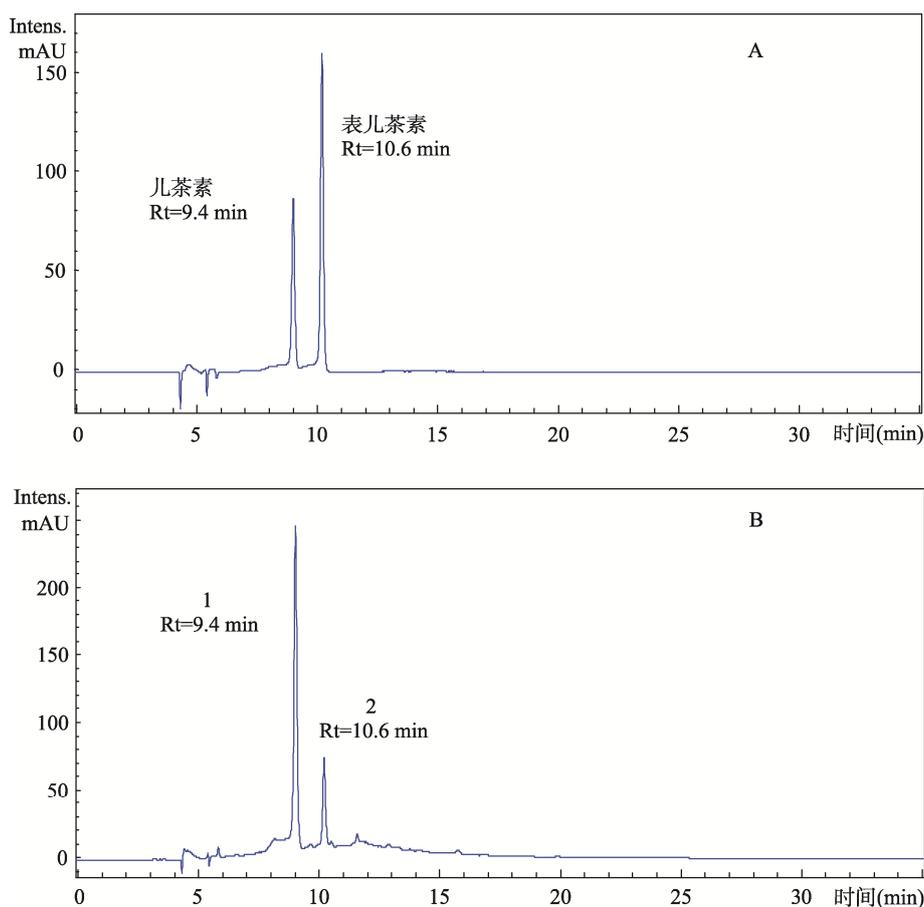


图 4 儿茶素和表儿茶素对照品(A)与 PSPs-1(B)的 HPLC 分析色谱图

Fig. 4 HPLC chromatogram of catechin and epicatechin (A) and PSPs-1 (B)

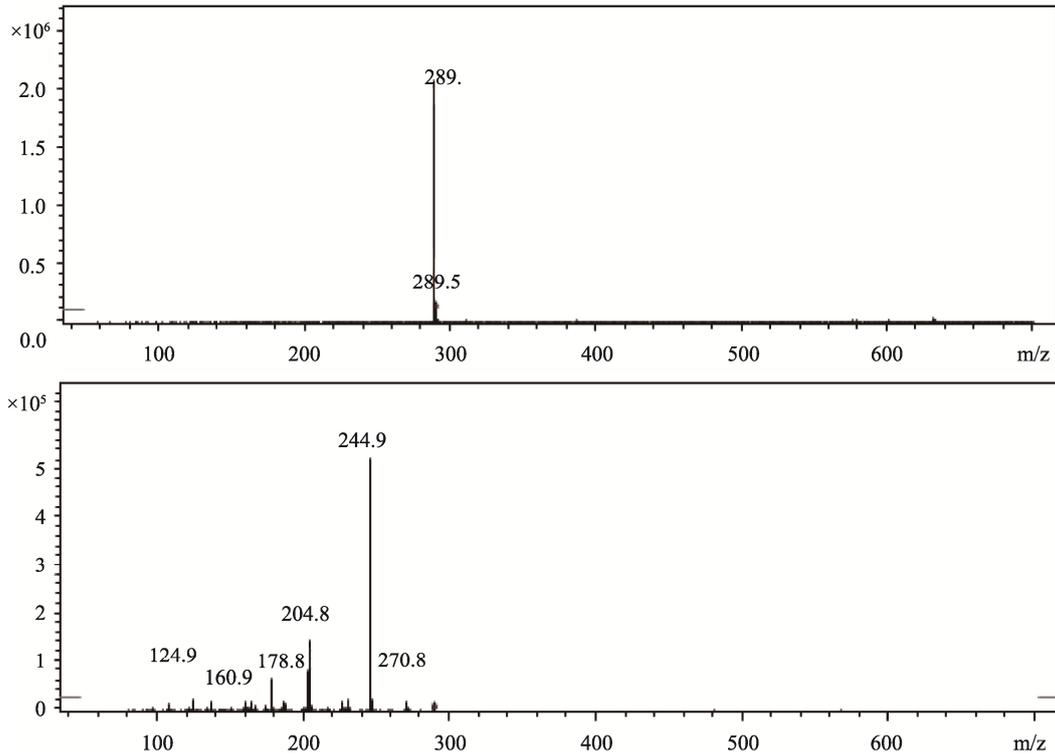
的保留时间相同, 推论 PSPs-1 可能是由儿茶素和表儿茶素组成。为进一步验证上述推论, 将 PSPs-1 经 HPLC 分析的色谱峰 1 和峰 2 与儿茶素和表儿茶素进行质谱鉴定, 结果见图 5~6。

从图 6 可以看出, 保留时间为 9.4、10.6 min 时 2 个色谱峰对应的分子离子分别为 m/z 289.0 和 m/z 289.5, 其主要的二级碎片离子分别是 m/z 244.8(M-44)、 m/z 204.8(M-84)、 m/z 178.8(M-110), 其符合儿茶素和表儿茶素的裂解规律, 见图 5。保留时间和质谱信息表明 PSPs-1 可能是由黄酮醇化合物儿茶素和表儿茶素组成。

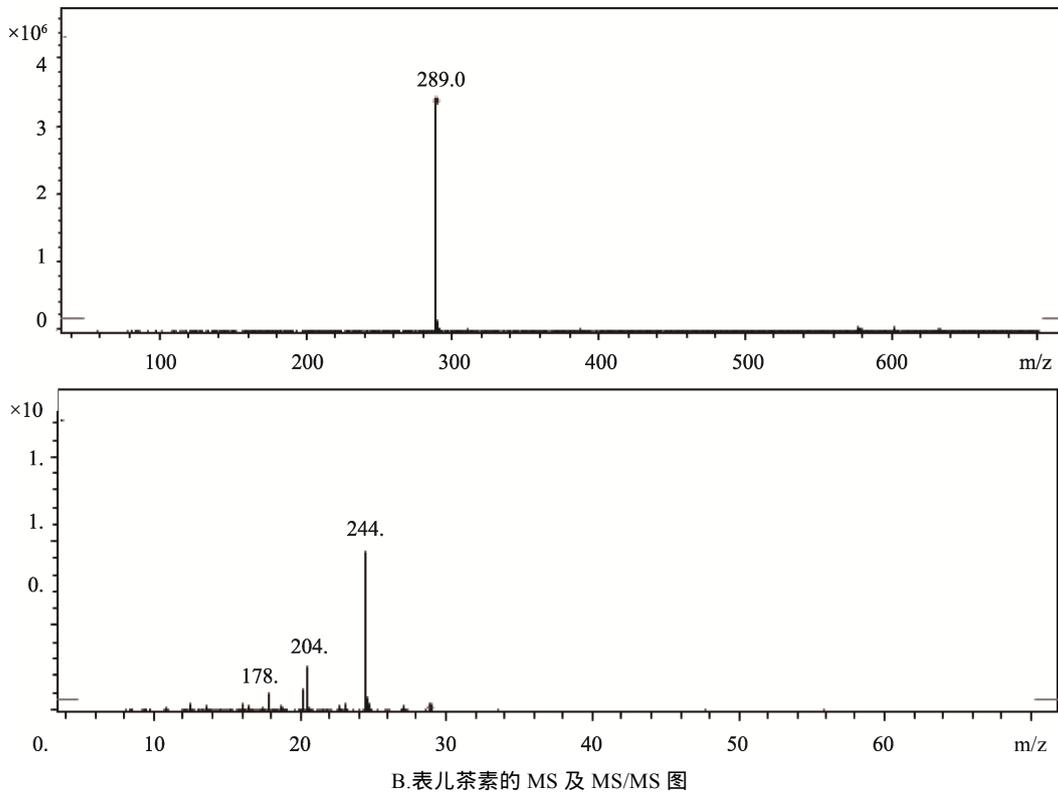
4 讨论

在化学模拟体系中, 不同浓度 PSPs-1 均有抑制丙烯酰胺的效果。PSPs-1 的浓度-丙烯酰胺抑制率趋势呈非线性变化, 在添加浓度为 0.005~0.1 mg/mL 范

围内, 丙烯酰胺抑制率呈明显上升趋势; 在添加浓度为 0.1~1.5 mg/mL 条件下, 丙烯酰胺抑制率没有升高反而下降。在黄酮醇抑制丙烯酰胺的研究中^[24], 6 种黄酮醇对丙烯酰胺形成作用的效果都呈现出该种趋势。除此之外, 樊星等^[25]研究天然抗氧化剂对丙烯酰胺的抑制时, 水飞蓟素提取物、葛根黄酮提取物、竹叶黄酮提取物及迷迭香提取物对丙烯酰胺抑制率也出现先升高后下降的趋势。丙烯酰胺的抑制效果与所在体系的抗氧化性有关^[13], PSPs-1 经 RP-HPLC-ESI-MS/MS 鉴定由儿茶素和表儿茶素组成, 因此, 推测出现这种趋势可能与 PSPs-1 的抗氧化性有关。上述实验结果表明当 PSPs-1 浓度为 0.1 mg/mL 时, 其对丙烯酰胺的抑制率达到最大值, 为 (51.22±3.15)%。Zeng 等^[10]研究发现 B 族维生素对丙烯酰胺生成抑制效果最好, 而通过维生素 B₆ 的对照试验, 可以发现 PSPs-1 同其抑制效果相似。



A. 儿茶素的 MS 及 MS/MS 图



B. 表儿茶素的 MS 及 MS/MS 图

图 5 儿茶素的 MS 及 MS/MS 图(A)和表儿茶素 MS 及 MS/MS 图(B)
Fig. 5 MS spectra and MS/MS spectra of catechin(A) and epicatechin(B)

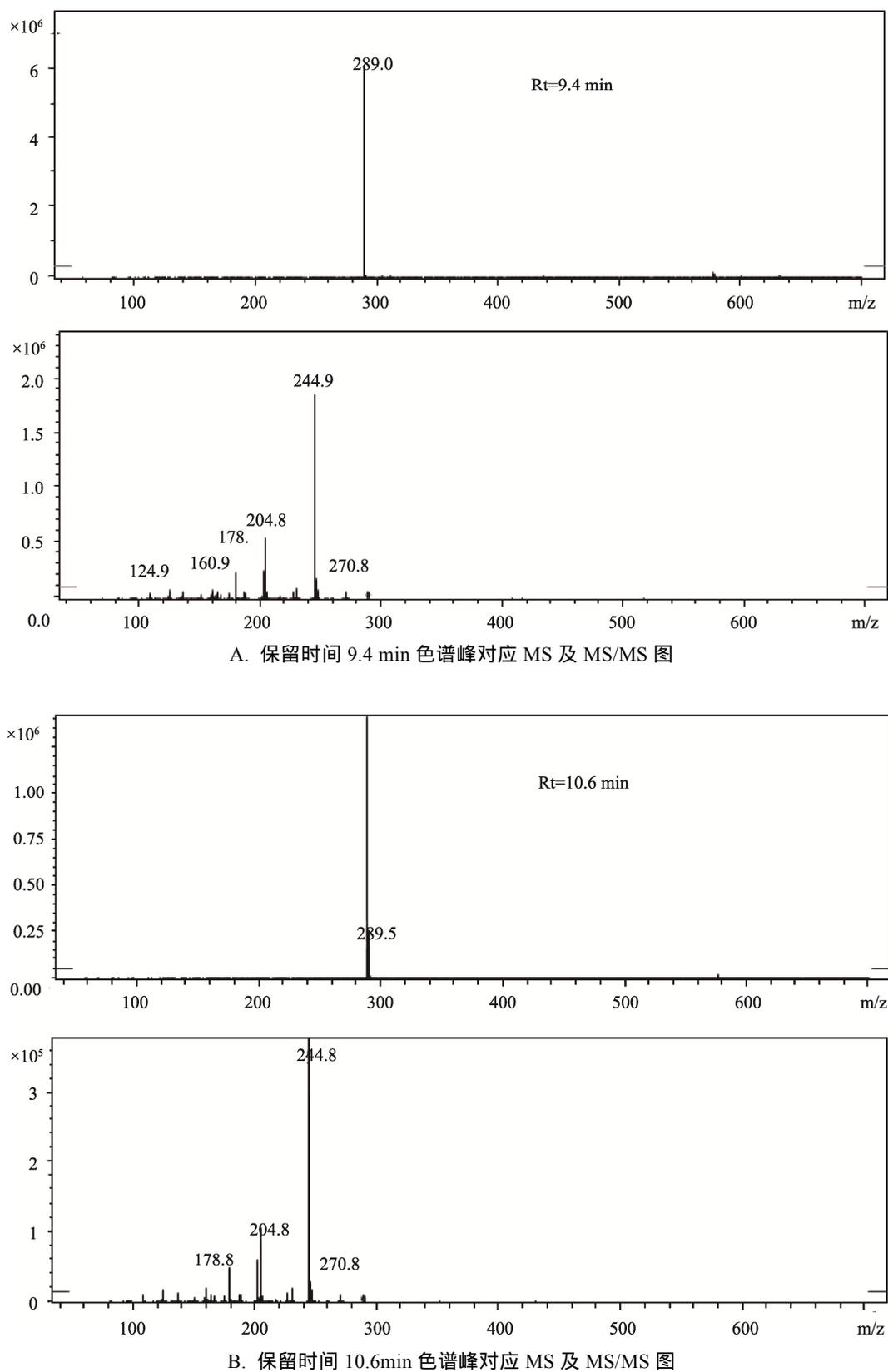


图 6 PSPs-1 不同色谱峰的质谱图及主要分子离子的二级质谱图

Fig. 6 MS spectra of different chromatographic peaks and MS/MS spectra of major molecular ions of PSPs-1

说明 PSPs-1 具有较好的丙烯酰胺抑制效果。

从图 2 可以看出, 在油炸薯条的食品体系中, 0.1 mg/mL PSPs-1 溶液浸泡薯条时间与丙烯酰胺抑制率呈非线性变化, 浸泡时间改变薯条的水分含量以及 PSPs-1 渗透度。当浸泡时间为 90 s 时, 丙烯酰胺抑制率达到(50.79±1.86)%, 浸泡时间超过 90 s 后, 丙烯酰胺抑制率缓慢下降, 这可能与薯条的水分活度变化有关, 也可能与 PSPs-1 渗透度有关。在美拉德反应过程中, 水分过多和过少都不利于美拉德反应的进行。有研究表明丙烯酰胺生成量与食品的含水量有关^[26], 在高水分样品中形成的丙烯酰胺含量很低; 在较低水分含量时丙烯酰胺形成和降解速率都加快, 使丙烯酰胺含量相对保持恒定。浸泡时间较长的薯条, 含水量升高, 影响丙烯酰胺生成, 进而可能表现出抑制效果降低。图 3 中, 食品体系中 PSPs-1 对丙烯酰胺抑制效果同化学体系相似, 亦呈非线性变化, PSPs-1 的浓度为 0.1 mg/mL 时达到最大抑制率, 为(51.03±2.97)%。与阳性对照维生素 B₆ 比较可知, 0.1 mg/mL 维生素 B₆ 抑制丙烯酰胺的效果同 PSPs-1 相似。经油脂氧化所产生的丙烯醛和丙烯酸能够与热加工过程中的蛋白质特别是天冬酰胺结合产生丙烯酰胺^[27], 抗氧化物质能够抑制丙烯醛的产生, 进而抑制丙烯酰胺的形成。PSPs-1 含有黄烷醇多酚, 具有抗氧化活性, 其对丙烯酰胺的抑制作用也为深入探讨丙烯酰胺抑制率与抗氧化活性之间的相关性提供依据。

RP-HPLC-ESI-MS/MS 分析结果表明 PSPs-1 可能是由含有儿茶素和表儿茶素的黄烷醇多酚组成。章宇^[13]在研究生物黄酮抑制丙烯酰胺构效关系时得出: 黄烷醇及其衍生物对丙烯酰胺抑制率的范围在 50.1%~91.9%, 最高的是表没食子酸儿茶素没食子酸酯(EGCG), 最低的是表儿茶素(EC)也达到 50.1%。其结果与本实验的研究结果一致。

此外, 儿茶素和表儿茶素两者是否有协同效应以及是否需要将 PSPs-1 进一步分离后用于食品加工中还有待进一步进行研究。

参考文献

- [1] Mottram DS, Wedzicha BL, Dodson AT. Acrylamide is formed in the Maillard reaction [J]. *Nature*, 2002, 419: 448-449.
- [2] Friedman M. Chemistry, biochemistry, and safety of acrylamide: a review [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51: 4504-4526.
- [3] 郭灿烂, 李斌, 肖经纬. 丙烯酰胺神经毒性机制研究概况[J]. *卫生研究*, 2010, 39(3): 282-285.
Guo CL, Li B, Xiao JW. General survey of mechanisms of acrylamide neurotoxicity [J]. *J Hyg Res*, 2010, 39(3): 282-285.
- [4] Osta LG, Deng H, Greggotti C, *et al.* Comparative studies on the neuro- and reproductive toxicity of acrylamide and its epoxide metabolite glycidamide in the rat [J]. *Neurotoxicol*, 1992, 13(1): 219-224.
- [5] Becalski A, Lau BPL, Lewis D, *et al.* Acrylamide in foods: occurrence, sources and modeling [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(3): 802-808.
- [6] Stadler RH, Blank I, Varge N, *et al.* Acrylamide from Maillard reaction products [J]. *Nature*, 2002, 419: 449-450.
- [7] Zyzak DV, Sanders RA, Stojanovic M, *et al.* Acrylamide formation mechanism in heated foods [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(16): 4782-4787.
- [8] 郭波莉, 魏益民, 潘家荣. 食品中丙烯酰胺风险评估及其形成机理研究进展[J]. *食品科学*, 2006, 27(3): 247-253.
Guo BL, Wei YM, Pan JR. Advance review on the risk assessment and formation mechanism of acrylamide in food [J]. *Food Sci*, 2006, 27(3): 247-253.
- [9] 龙小涛, 何嘉锐, 叶雪丽. 食品中丙烯酰胺的抑制方法研究进展[J]. *现代食品科技*, 2012, 28(6): 688-689
Long XT, He JR, Ye XL. Study on inhibition methods of acrylamide in food [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2012, 28(6): 688-689.
- [10] Zeng X, Cheng KW, Jiang Y, *et al.* Inhibition of acrylamide formation by vitamins in model reactions and fried potato strips [J]. *Food Chem*, 2009, 116(1): 34-39.
- [11] Zhang Y, Xu W, Wu X, *et al.* Addition of antioxidant from bamboo leaves as an effective way to reduce the formation of acrylamide in fried chicken wings [J]. *Food Addit Contam*, 2007, 24(3): 242-251.
- [12] 张英, 龚金炎, 李栋, 等. 竹叶黄酮最新研究进展之二—竹叶酚性化学素抑制食品中丙烯酰胺形成及化解人体丙毒危害的作用和机制研究[J]. *中国食品添加剂*, 2009, 05(07): 56-62.
Zhang Y, Gong JY, Li D, *et al.* Advanced research of bamboo leaf flavonoids (II): reducing and protecting mechanism of bamboo leaf phenolic chemicals from acrylamide and its toxicity [J]. *China Food Addit*, 2009, 05(07): 56-62.
- [13] 章宇. 生物黄酮抑制食品中丙烯酰胺形成的机理及其构效关系研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
Zhang Y. Studies on reduction mechanism and structure-activity relationship of acrylamide in foods by Bio-flavonoids [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [14] Zhang Y, Chen J, Zhang X, *et al.* Addition of antioxidant of bamboo leaves (AOB) effectively reduces acrylamide formation

- in potato crisps and French fries [J]. *J Agric Food Chem*, 2007, 55: 523–528.
- [15] Zhang Y, Zhang Y. Effect of natural antioxidants on kinetic behavior of acrylamide formation and elimination in lowmoisture asparagine-glucose model system [J]. *J Food Eng*, 2008, 85: 105–115.
- [16] Napolitano A, Morales F, Sacchi R, *et al.* Relationship between virgin olive oil phenolic compounds and acrylamide formation in fried crisps [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56: 2034–2040.
- [17] Cheng KW, Shi JJ, Ou SY, *et al.* Effects of fruit extracts on the formation of acrylamide in model reactions and fried potato crisps [J]. *J Agric Food Chem*, 2010, 58(1): 309–312.
- [18] 管文荻. 花生红衣中原花色素的提取与纯化工艺研究[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2013.
Guan WD. Researchs on extraction and purification process of proanthocyanidins from peanut red skin [D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2013.
- [19] 陈洋, 王冰, 玉佳男, 等. RP-HPLC-ESI-MS/MS 分离鉴定花生红衣原花青素 A 型和 B 型二聚体[J]. *食品科学*, 2013, 34(23): 142–146.
Chen Y, Wang B, Yu JN, *et al.* Separation and Identification of A-type and B-type dimers of procyanidins from peanut skin by RP-HPLC-ESI-MS/MS [J]. *Food Sci*, 2013, 34(23): 142–146.
- [20] Tareke E, Rydberg P, Karlsson P, *et al.* Analysis of acrylamide, a carcinogen formed in heated foodstuffs [J]. *J Agric Food Chem*, 2002, 50: 4998–5006.
- [21] Gokmen V, Senyuva HZ, Acar J, *et al.* Determination of acrylamide in potato chips and crisps by high-performance liquid chromatography [J]. *J Chromatogr A*, 2005, 1088: 193–199.
- [22] Wang HY, Lee AWM, Shuang SM, *et al.* SPE/HPLC/UV studies on acrylamide in deep-fried flour-based indigenous Chinese foods [J]. *Microchem J*, 2008, 89: 90–97.
- [23] Karasek L, Wenzl T, Anklam E. Determination of acrylamide in roasted chestnuts and chestnut-based foods by isotope dilution HPLC-MS/MS [J]. *Food Chem*, 2009, 114: 1555–1558.
- [24] 程军, 任一平, 张英. 黄酮醇抑制丙烯酰胺在美拉德反应中的形成及与抗氧化间的相关性[J]. *浙江大学学报*, 2013, 39 (2): 178–184.
Cheng J, Ren YP, Zhang Y. Effect of on flavonol reduction of acrylamide in Maillard reaction and its correlation with antioxidant capacity [J]. *J Zhejiang Univ*, 2013, 39 (2): 178–184.
- [25] 樊星, 江秀霞, 董鑫, 等. 天然抗氧化剂对丙烯酰胺的抑制及与抗氧化的关系[J]. *食品工业*, 2013, 34(11): 176–179.
Fan X, Jiang XX, Dong X, *et al.* Effect of natural antioxidants on reduction of acrylamide and its correlation with antioxidant capacity [J]. *Food Ind*, 2013, 34(11): 176–179.
- [26] 李向丽, 杨公明, 张延杰. 食品中丙烯酰胺含量及抑制技术的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(5): 252–255.
Li XL, Yang GM, Zhang YJ. Research progress of contents and inhibitory techniques of acrylamide in food [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2015, 43 (5): 252–255.
- [27] Ehling S, Hengel M, Shibamoto T. Chemistry and safety of acrylamide in food [M]. New York: Springer, 2005.

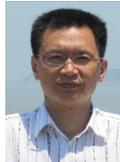
(责任编辑: 李振飞)

作者简介



赵晓丹, 本科生, 主要研究方向为食品质量与安全。

E-mail: 18202762261@163.com



刘睿, 博士, 副教授, 主要研究方向为天然产物化学。

E-mail: liurui@mail.hzau.edu.cn