

减控油炸麻花中丙烯酰胺生成方法

张云焕, 冯亚净, 李书国*

(河北科技大学生物科学与工程学院, 河北 石家庄 050018)

摘要: 国内外研究表明含淀粉的食物经高温油炸、烘烤会形成丙烯酰胺, 国际癌症研究机构认为其具有潜在致癌性和神经毒性。本研究系统地探究了加工工艺条件、不同食品配料对油炸麻花中丙烯酰胺生成的影响以及减控方法。结果表明: 应尽量降低油炸温度和缩短油炸时间, 油炸最佳温度和时间分别为160 °C和180 s; 花生油、玉米油、大豆油在油炸过程中丙烯酰胺的生成量均低于棕榈油; 配方中添加VC、阿魏酸均对丙烯酰胺的生成有较好的抑制作用, 而添加叔丁基对苯二酚时丙烯酰胺的生成量略有增加; 非还原糖的抑制效果由大到小分别是 β -环糊精、甘露醇、山梨醇、赤藓糖醇, β -葡聚糖对其作用不明显, 蔗糖具有促进作用; 半胱氨酸、谷氨酸、赖氨酸、甘氨酸对丙烯酰胺均有较好的抑制作用, 当添加量小于0.2%时, 甘氨酸的抑制作用最好, 当添加量为0.3%~0.5%时, 谷氨酸抑制效果优于其他3种氨基酸, 当添加量为0.5%时, 4种氨基酸对油炸麻花中丙烯酰胺的生成抑制效果最佳。

关键词: 油炸麻花; 丙烯酰胺; 油炸食品; 食品安全

Strategies to Reduce Acrylamide Formation in Fried Dough Twists

ZHANG Yunhuan, FENG Yajing, LI Shuguo*

(College of Biological Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: Acrylamide, a potential carcinogen and neurotoxin recognized by the International Agency for Research on Cancer, is formed mainly in high temperature processed starch-rich foods. This study systematically investigated the effect of processing conditions and ingredients on acrylamide formation during the production of fried dough twists and developed strategies to reduce acrylamide formation. Results showed that the frying temperature and time should be controlled as low as possible and their optimal values were determined as 160 °C and 180 s, respectively. Frying in peanut oil, corn oil and soybean oil reduced the formation of acrylamide compared with palm oil. The formation of acrylamide was inhibited by addition of VC and ferulic acid inhibited but slightly increased by addition of tertiary butylhydroquinone. The non-reducing sugars β -cyclodextrin, mannitol, sorbitol and erythritol had inhibitory effects in decreasing order. The effect of β -glucan was negligible, but sucrose had a promoting effect. In addition, cysteine, glutamate, lysine and glycine could effectively reduce the formation of acrylamide in fried dough twists. Glycine showed the best inhibitory effect at an addition level lower than 0.2%, and the inhibitory effect of glutamate added at 0.3%–0.5% was better than other three amino acids. Four amino acids added at 0.5% provided optimal inhibition of acrylamide inhibition.

Keywords: fried dough twist; acrylamide; fried food; food safety

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201807017

中图分类号: TS202.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2018) 07-0113-06

引文格式:

张云焕, 冯亚净, 李书国. 减控油炸麻花中丙烯酰胺生成方法[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 113-118. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201807017. <http://www.spkx.net.cn>

ZHANG Yunhuan, FENG Yajing, LI Shuguo. Strategies to reduce acrylamide formation in fried dough twists[J]. Food Science, 2018, 39(7): 113-118. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201807017. <http://www.spkx.net.cn>

油炸是现如今最受欢迎的且现存时间悠久的烹调方式之一, 它能使食品产生良好的风味和独特的质构, 但

其产生的弊端也不容忽视。2004年2月, 瑞典国家食品管理局和斯德哥尔摩大学的一项研究表明, 在许多油炸和

收稿日期: 2016-11-08

基金项目: 河北省科技支撑计划项目 (16227104D); 河北省大学生创新创业训练项目 (201310082045)

第一作者简介: 张云焕 (1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品加工原理与技术。E-mail: 980563389@qq.com

*通信作者简介: 李书国 (1969—), 男, 教授, 博士, 研究方向为粮油食品加工与安全。E-mail: shuguolee@126.com

焙烤食物中发现了丙烯酰胺 (acrylamide, Acr)。Acr是一种 α,β -不饱和酰胺, 主要在一些经高温加工的富含碳水化合物的食品当中产生, 其中含量较高的包括炸薯片、炸薯条等油炸食品和焙烤食品^[1-3]。研究表明, 氨基酸天冬酰胺与羰基源类物质的美拉德反应是Acr形成的主要反应途径^[4]。Acr作为一种神经毒素, 一旦进入人体内, 就会快速分散在人体的各个组织中, 对人体的神经系统、生殖系统、免疫系统造成严重影响, 同时具有一定的遗传毒性和致癌性^[5-6]。国际癌症研究机构也通过动物实验得出结论, Acr会导致DNA加合物产生, 引起基因突变和染色体畸变, 被认为是“潜在的人类致癌物”^[4]。

近年来, 国内外学者对食品中Acr的研究大部分集中在Acr检测手段^[7-9]、生成途径^[10-11]、食品中Acr抑制方法的探究^[12-13]等方面, 研究对象也大多集中在薯片^[14-15]、薯条^[16-17]、汉堡包、炸鸡腿^[18]等西式食品, 并且已取得一定研究进展。但是, 我国居民饮食以中式餐饮为主, 其中, 中式传统油炸面食在我国居民的膳食中占很大比重。中式食品在配方工艺和制作过程方面与西式食品有很大的不同; 因此对于中式传统油炸食品中Acr含量的减控措施的探究意义重大。油炸麻花作为深受大众喜爱的传统油炸类面食之一, 人群消费量大且食用频率高, 但是对于影响油炸麻花中Acr生成量的研究鲜见报道。因此本实验分析了影响Acr形成的主要因素, 系统地研究了传统油炸麻花中Acr含量的减控措施, 为大众的健康饮食提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

叔丁基对苯二酚 (tertiary butylhydroquinone, TBHQ)、甘露醇、赤藓糖醇、山梨醇 (均为分析纯)、VC 天津市河东区红岩试剂厂; β -环糊精、 β -葡聚糖 (均为分析纯) 天津市百世化工有限公司; 谷氨酸、半胱氨酸、赖氨酸、甘氨酸、牛磺酸 (食品级)、Acr (纯度>99.9%)、正己烷 (分析纯)、甲酸 (分析纯); 甲醇 (色谱纯) 北京天华化学试剂开发公司; 实验用油、小苏打、小麦面粉 市售; 实验用水均为二次蒸馏超纯水。

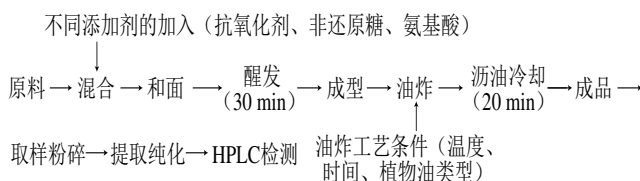
1.2 仪器与设备

LC-10A高效液相色谱 (high performance liquid chromatography, HPLC) 仪 (ODS C₁₈ Hypersi色谱柱 (250 mm×4.6 mm, 5 μ m)、紫外-可见光检测器) 日本岛津公司; TM1810型紫外-可见分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司; 反相C₁₈萃取小柱 江苏天翔新型建材有限公司; FA2204型电子分析天平 上海著海仪器有限公司; KQ2200型超声波清洗机 昆山市超

声仪器有限公司; TGL-10B型高速台式离心机 上海安亭科学仪器厂; GZX-9070MBE型电热鼓风干燥箱 上海博迅实业有限公司医疗设备厂。

1.3 方法

1.3.1 油炸麻花工艺流程



1.3.2 麻花油炸条件及配料控制

1.3.2.1 油炸温度对Acr生成量的影响

选定油炸时间180 s, 分别取油炸温度为140、150、160、170 $^{\circ}$ C和180 $^{\circ}$ C, 选取最适油炸温度。

1.3.2.2 油炸时间对Acr生成量的影响

在最适油炸温度下, 分别取油炸时间为80、120、140、160、180 s和190 s, 选取最适时间, 后续实验均在最适油炸温度和时间下进行。

1.3.2.3 植物油类型对Acr生成量的影响

选定油炸时间180 s, 油炸温度160 $^{\circ}$ C, 分别使用棕榈油、花生油、大豆油和玉米油进行油炸。

1.3.2.4 多酚类抗氧化剂对Acr生成量的影响

分别使用VC、阿魏酸和TBHQ, 按0.0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和0.5%面粉质量添加多酚类抗氧化剂。选定油炸时间180 s, 油炸温度160 $^{\circ}$ C, 使用花生油进行油炸。

1.3.2.5 非还原糖对Acr生成量的影响

分别选取甘露醇、山梨醇、赤藓糖醇、蔗糖、 β -葡聚糖和 β -环糊精, 按0.5%面粉质量进行添加。固定油炸时间180 s, 油炸温度160 $^{\circ}$ C, 使用花生油进行油炸。

1.3.2.6 氨基酸对Acr生成量的影响

分别选取半胱氨酸、谷氨酸、赖氨酸和甘氨酸, 按面粉质量0.0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和0.5%进行添加。固定油炸时间180 s, 油炸温度160 $^{\circ}$ C, 使用花生油油炸。

1.3.3 麻花中Acr的提取

称取10 g粉碎后的麻花, 置于50 mL离心管中, 加入20 mL的蚁酸水溶液 ($\varphi=0.1\%$), 振荡摇匀, 8 000 r/min离心15 min, 收集第一次的上清液, 然后在沉淀中再加入20 mL的蚁酸水溶液 ($\varphi=0.1\%$), 进行上述操作, 连续收集2次上清液, 然后在上清液中加入10 mL的正己烷, 再离心20 min, 收集液体。用注射器避开油层吸取上清液中间清液5 mL, 过0.45 μ m的聚偏氟乙烯滤膜, 再取2 mL滤液通过预先活化的C₁₈固相萃取小柱, 待样液全部通过后, 用1 mL水冲洗, 弃去滤液, 最后用2 mL洗脱液

(体积分数10%甲醇+90%水+0.1%甲酸)进行洗脱,弃去最初的0.5 mL滤液,收集剩余的滤液用于HPLC分析。

1.3.4 HPLC法测定麻花中Acr含量

HPLC分析条件:流动相为甲醇-水(5:95, V/V);流速0.50 mL/min;柱温25 ℃;检测波长200 nm;进样量20 μ L。

标准曲线的绘制:准确称取0.10 g Acr标准品,充分溶解并定容于100 mL棕色容量瓶,得到1 mg/mL Acr标准液。准确移取1 mL配制好的Acr标准液,定容到100 mL容量瓶中,制得10 μ g/mL的标准储备液。分别移取Acr标准液0.2、0.4、0.8、1.0 mL和2.0 mL,定容到10 mL容量瓶中,得到质量浓度分别为0.2、0.4、0.8、1.0 μ g/mL和2.0 μ g/mL的系列标准溶液。进行HPLC的测定,并以峰面积- μ g/mL绘制标准曲线图。

样品质量浓度计算:称取各种条件下提取所得样品,根据标准曲线方程,计算麻花样品种Acr质量浓度。

2 结果与分析

2.1 HPLC法测定麻花中Acr质量浓度

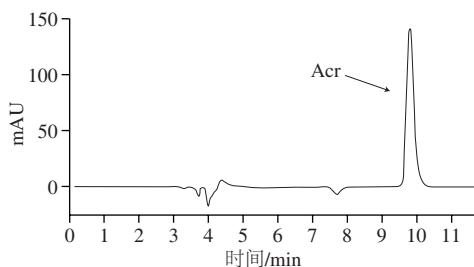


图1 Acr标准品HPLC图

Fig. 1 High performance liquid chromatogram of Acr standard

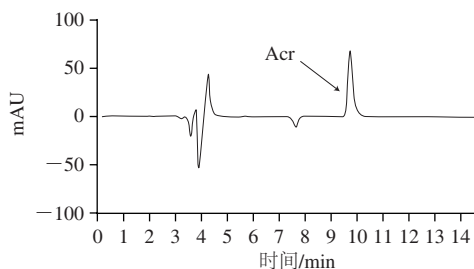


图2 油炸麻花样品中Acr的HPLC图

Fig. 2 High performance liquid chromatogram of Acr in fried dough twist

Acr标准品在选取的HPLC条件下分离效果较好,且保留时间均为9.84 min。Acr标准品色谱图见图1,自制麻花样品种Acr的HPLC图见图2。对0.2、0.4、0.8、1.0 μ g/mL和2.0 μ g/mL这5个质量浓度的标准溶液进样分析,以色谱峰的峰面积为纵坐标,以Acr生成量为横坐标作标准曲

线(图3),其回归方程: $y=1\,627.2x-52.334$,线性相关系数 $R^2=0.998\,7$,结果表明,Acr在0.2~2.0 μ g/mL质量浓度范围内线性关系良好。

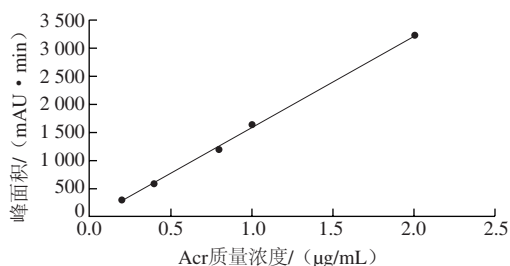


图3 Acr标准曲线图

Fig. 3 Standard curve of Acr

2.2 油炸条件对麻花中Acr生成量的影响

在食品加工过程中,影响美拉德反应的因素也会影响Acr的形成。其中,主要的影响因素有食品基质、加工温度、加热时间、加工方式、水分含量和pH值等^[19]。

2.2.1 油炸温度对麻花中Acr生成量的影响

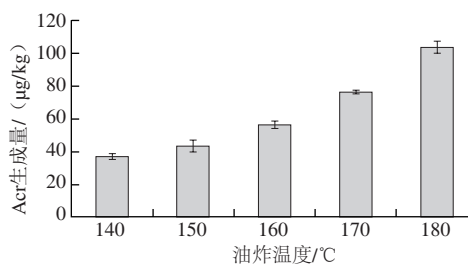


图4 油炸温度对麻花中Acr生成量的影响

Fig. 4 Effect of frying temperature on Acr formation in fried dough twist

由图4可知,控制油炸温度在140~160 ℃范围之内,Acr生成量呈微小的上升趋势,但在160~180 ℃的范围内时,Acr生成量显著增多;这是因为油炸麻花样品种中含有大量的淀粉,而淀粉在高温油炸环境中会自动分解为一些小分子类单糖,这些单糖经过非酶促反应形成了丙烯醛,丙烯醛进一步反应成Acr^[20]。综合考虑Acr生成量和麻花的感官评价,确定适宜的油炸温度为160 ℃。

2.2.2 油炸时间对麻花中Acr生成量的影响

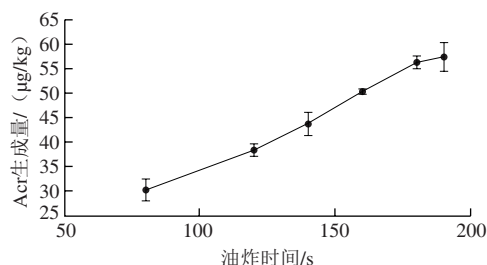


图5 油炸时间对麻花中Acr生成量的影响

Fig. 5 Effect of frying time on Acr formation in fried dough twist

在油炸温度为160℃时,进行不同油炸时间的实验。从油炸时间对Acr生成量的变化曲线(图5)可知,在80~190 s的范围内,Acr的生成量随着油炸时间的延长而呈上升趋势,即时间越长,Acr的生成量越多。考虑到麻花生熟程度,综合油炸温度和油炸时间的实验结果,最终将后续实验的条件设为160℃油炸180 s。

2.2.3 植物油种类对油炸麻花中Acr生成量的影响

本实验选用4种不同植物油:花生油、玉米油、大豆油和棕榈油,研究不同类型的油对油炸麻花中Acr生成量的影响,结果见图6。

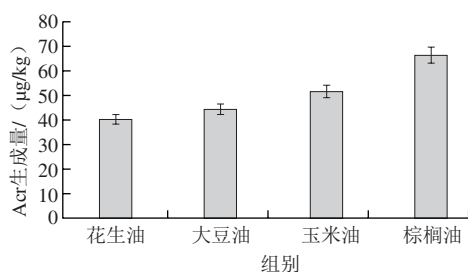


图6 不同类型植物油对麻花中Acr生成量的影响

Fig. 6 Effect of vegetable oils on Acr formation in fried dough twist

使用棕榈油处理的麻花Acr生成量为(65.12±0.18) μg/kg,比花生油实验组、大豆油实验组和玉米油实验组产生的Acr分别高出62.5%、44.4%和30.0%。Kotsiou等^[21]也曾得出类似的结论,他们将棕榈油提取物加入模拟体系中,发现Acr的生成量明显增多。主要原因是棕榈油的主要成分是裂环烯醚萜,裂环烯醚萜结构中含有醛基,可与氨基酸发生反应,促进了Acr的形成。

在食品工业生产中,用于油炸食品的油类一般是棕榈油,因其性质稳定,且在油炸烹饪过程中不易发生分解,所以广泛地应用于油炸食品当中;但棕榈油经高温产生的Acr生成量相对较多,因此在日常烹饪中,应尽量避免棕榈油的使用,尽可能选择Acr生成量较少的花生油、大豆油和玉米油等。

2.3 麻花配料对麻花中Acr生成的影响

2.3.1 酚类抗氧化剂对麻花中Acr生成量的影响

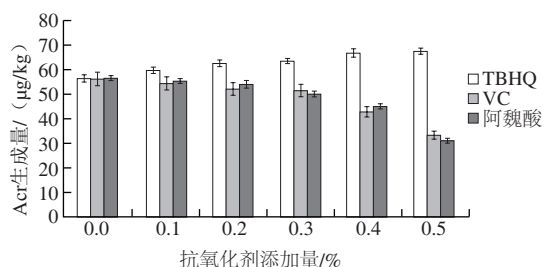


图7 酚类抗氧化剂对麻花中Acr生成量的影响

Fig. 7 Effect of phenolic antioxidants on Acr formation in fried dough twist

由图7可知,未添加任何食品添加剂时Acr的产生量为56.2 μg/kg,添加VC和阿魏酸均有抑制效果,且当添加量在0.1%~0.3%范围内,抑制作用不很明显;继续增大添加量至0.4%,VC和阿魏酸产生明显的抑制效果,抑制率可达23.85%和19.92%;当添加量为0.5%时抑制率最大,分别为40.93%和45.02%。VC虽然起初对Acr的生成有促进作用,但最终会大量减少Acr的生成;阿魏酸可使Acr的生成量减少近50%,这可能是由于阿魏酸会与Acr前体及中间产物反应;而TBHQ在添加量0.1%~0.5%范围内,添加量与Acr生成量呈正相关趋势。

Acr的形成不是单纯的氧化过程,抗氧化剂的作用主要是通过抑制油脂氧化而阻止羰基类化合物形成Acr。一些酚类抗氧化剂的醌型结构会通过氨基类物质反应破坏Acr,从而降低Acr生成量,而酚型结构则可能促进Acr形成。综合本实验结果及前人研究推断,抗氧化剂可能通过以下两种方式抑制Acr的形成:其一是抗氧化产物破坏生成的Acr;其二是形成的醌或羰基化合物与Acr的主要前体天冬酰胺和3-氨基丙酰胺反应,从而抑制Acr的形成^[22-23]。总之,抗氧化剂对Acr形成的影响因抗氧化剂种类和植物来源而异,有的抑制Acr生成,有的促进Acr生成,因此对其作用机理还需做深入研究。

2.3.2 非还原性糖对麻花中Acr生成量的抑制作用

表1 非还原糖对麻花中Acr生成量的抑制作用
Table 1 Inhibitory effect of non-reducing saccharides on Acr formation in fried dough twist

非还原糖	Acr生成量/(μg/kg)	抑制率/%
空白对照	56.2	0
甘露醇	38.2	+32.0
山梨醇	47.4	+15.7
赤藓糖醇	51.6	+8.2
蔗糖	70.4	-25.3
β-葡聚糖	56.0	+0.36
β-环糊精	37.9	+32.6

注: +表示抑制Acr生成; -表示促进Acr生成。

非还原性糖对Acr生成量的抑制作用见表1,甘露醇、山梨醇、赤藓糖醇、β-葡聚糖和β-环糊精均对Acr生成量有抑制作用,效果由大到小依次是β-环糊精、甘露醇、山梨醇、赤藓糖醇、β-葡聚糖。蔗糖的加入没有抑制Acr生成,反而增加了Acr的生成量,增加率为25.3%,表明虽然油炸食物中物质种类较丰富,存在比较复杂的体系,但是非还原糖对于Acr的作用规律受其他因素影响较小。因此可以考虑在实际油炸食品制作过程中添加一定比例的非还原糖,可起到改善口感和抑制Acr生成的作用。

环糊精的分子具有特殊中空的略呈锥形的圆筒立体环状结构,其“内腔疏水,外壁亲水”^[24-26],具有较好的包埋作用,可以阻隔天冬酰胺与葡萄糖、果糖等还原糖的接触从而降低二者之间的反应,抑制Acr的形成。

2.3.3 氨基酸种类对麻花中Acr生成量的影响

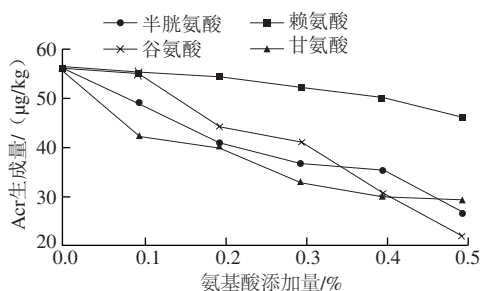


图8 不同种类氨基酸对麻花中Acr生成量的影响

Fig. 8 Effect of amino acid type on Acr formation in fried dough twist

研究了4种氨基酸分别与Acr反应,结果显示它们对Acr的生成均有一定的抑制作用,且随着添加量的增大,Acr生成量不断减少,但减小的程度不同(图8)。当氨基酸添加量小于0.2%时,甘氨酸的抑制作用最为显著,半胱氨酸、谷氨酸次之,赖氨酸无明显抑制效果;当氨基酸添加量在0.3%~0.5%范围内,谷氨酸对应的Acr生成量迅速下降,最终抑制效果优于其他3种氨基酸;当添加量为0.5%,半胱氨酸、谷氨酸、赖氨酸、甘氨酸抑制率达到最大,分别为53.20%、60.85%、18.14%、48.40%,赖氨酸仅18.14%,原因可能是赖氨酸在水溶液的溶解度较小。

氨基酸抑制Acr的形成可能有以下机制,一是氨基酸能竞争性地消耗Acr的前体或者通过氨基酸的亲核反应来增加消除Acr的能力;二是某些氨基酸可以和天冬酰胺竞争还原糖,Acr主要是由氨基酸与还原糖发生美拉德反应生成,其中天冬氨酸与还原糖反应生成的Acr最多,其他氨基酸只生成少量的Acr,因此通过加入除天冬氨酸以外的氨基酸,可以和天冬氨酸竞争反应进而减少Acr的含量;三是某些氨基酸的活性氨基或巯基与Acr发生迈克尔加成反应^[27-29],如半胱氨酸的巯基会与Acr反应生成半胱-S-丙氨酸,从而降低Acr生成量,某些谷氨酸、甘氨酸、L-半胱氨酸对Acr的抑制率分别达到95%、91%和87%;因此一些氨基酸如谷氨酸、甘氨酸、L-半胱氨酸等可以成为食品中的Acr抑制剂,应用于油炸食品。

3 结论

油炸温度、油炸时间、油炸用油对油炸麻花中Acr的形成均有显著影响,Acr的形成随着油炸温度升高和油炸时间的延长而增加,油炸温度高于160℃后Acr的生成量快速增加,综合考虑确定最佳的油炸温度和油炸时间分别为160℃和180s;使用花生油、玉米油、大豆油油炸麻花的Acr生成量均显著低于棕榈油;抗氧化剂VC和阿魏酸均能抑制Acr的生成,当添加量大于0.5%时,对Acr的抑制效果明显增加,而TBHQ反而促进Acr的产生;非

还原糖中 β -环糊精对Acr的抑制效果最明显,而蔗糖则起到促进作用;由于竞争机制和迈克尔加成反应的存在,半胱氨酸、谷氨酸、赖氨酸、甘氨酸均能抑制Acr的生成,添加量低于0.2%时,甘氨酸对Acr形成的抑制效果最佳,添加量在0.3%~0.5%时,谷氨酸抑制效果最佳。综上所述,通过控制油炸麻花的油炸温度、时间、植物油类型以及添加合适的食品抗氧化剂、氨基酸以及非还原糖或糖醇等可以显著抑制Acr的形成,提高油炸麻花的食用安全水平。

参考文献:

- [1] 李军,邓洁红,谭兴和,等. 丙烯酰胺毒性及油炸食品丙烯酰胺抑制方法研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2010(9): 31-33. DOI:10.3969/j.issn.1003-6202.2010.09.011.
- [2] 陈冬妍,刘黄友,汪恩婷,等. 丙烯酰胺和环氧丙酰胺的毒性及大蒜素对其毒性的保护作用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(1): 238-243.
- [3] 孟娟娟. 食品中丙烯酰胺含量的研究进展[J]. 学周刊, 2014(16): 226. DOI:10.3969/j.issn.1673-9132(a).2014.06.235.
- [4] 郑宗平,秦川,兰山,等. 食品体系中丙烯酰胺的研究进展:抑制剂及其抑制机理[J]. 食品科学, 2014, 35(1): 282-288. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201401056.
- [5] 章银良,白明星,熊卫东. 食品中丙烯酰胺分析方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2009, 2(6): 140-143. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201508050.
- [6] MUCCI L A, DICKMAN P W, STEINECK G, et al. Dietary acrylamide and cancer of the large bowel, kidney, and bladder: absence of an association in a population-based study in Sweden[J]. British Journal of Cancer, 2003, 88(1): 84-89. DOI:10.1038/sj.bjc.6600726.
- [7] 于萍. 食品中丙烯酰胺检测方法的研究进展[J]. 福建分析测试, 2011, 20(6): 21-23. DOI:10.3969/j.issn.1009-8143.2011.06.006.
- [8] PRESTON A, FODEY T, ELLIOTT C. Development of a high-throughput enzyme-linked immunosorbent assay for the routine detection of the carcinogen acrylamide in food, via rapid derivatisation pre-analysis[J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 608(2): 178-185. DOI:10.1016/j.aca.2007.12.013.
- [9] NERIN C, SALAFRANCA J, AZNAR M, et al. Critical review on recent developments in solventless techniques for extraction of analytes[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2009, 393(3): 809-833. DOI:10.1007/s00216-008-2437-6.
- [10] 章银良,白明星. 葡萄糖/天冬酰胺模拟体系丙烯酰胺形成[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(4): 35-38. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2010.04.010.
- [11] VIKSTROM A C, ABRAMSSON-ZETTERBERG L, NARUSZEWICZ M, et al. In vivo doses of acrylamide and glycidamide in humans after intake of acrylamide-rich food[J]. Toxicological Sciences, 2010, 119(1): 41-49. DOI:10.1093/toxsci/kfq323.
- [12] 程军,任一平,张英,等. 黄酮醇抑制丙烯酰胺在美拉德反应中的形成及与抗氧化剂的相关性[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2013, 39(2): 178-184. DOI:10.3785/j.issn.1008-9209.2012.11.610.
- [13] 李钦. 油炸马铃薯片中丙烯酰胺含量的控制方法研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2013: 12-31.
- [14] 刘凡岩,申杰,张丽,等. 高效液相色谱法测定薯片中丙烯酰胺的不确定度评定[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2010, 30(2): 158-163; 184. DOI:10.3969/j.issn.1000-1565.2010.02.011.

- [15] 欧仕益, 张玉萍, 黄才欢, 等. 几种添加剂对油炸薯片中丙烯酰胺产生的抑制作用[J]. 食品科学, 2006, 27(5): 137-140. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2006.05.027.
- [16] 李金旺, 于帆, 唐清华, 等. 外源添加剂对油炸薯条中丙烯酰胺抑制作用研究[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(2): 61-64. DOI:10.3969/j.issn.1007-7561.2015.02.015.
- [17] 江秀霞. 复配天然抗氧化剂对油炸薯条中丙烯酰胺抑制作用的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013: 19-44. DOI:10.7666/d.Y2295772.
- [18] 杨立亭, 普岳红, 谷大海, 等. 碳烤鸡肉加工过程中丙烯酰胺含量的变化[J]. 中国食品工业, 2016(3): 54-58. DOI:10.3969/j.issn.1006-6195.2016.03.030.
- [19] 蔡芸. 几种添加剂和豆粉对Maillard体系中丙烯酰胺和羟甲基糠醛形成的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2014: 37-50.
- [20] 武丽荣, 蒋新正, 鲍元奇. 油炸食品中丙烯酰胺的形成及减少措施[J]. 中国油脂, 2005, 30(7): 18-21. DOI:10.3321/j.issn:1003-7969.2005.07.003.
- [21] KOTSIU K, TASIOLA-MARGARI M, KUKUROVA K, et al. Impact of oregano and virgin olive oil phenolic compounds on acrylamide content in a model system and fresh potatoes[J]. Food Chemistry, 2010, 123(4): 1149-1155. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.05.078.
- [22] OU S Y, SHI J J, HUANG C H, et al. Effect of antioxidants on elimination and formation of acrylamide in model reaction systems[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 182(1/2/3): 863-868. DOI:10.1016/j.jhazmat.2010.06.124.
- [23] 欧仕益. 酚类抗氧化剂对Maillard反应的影响及其作用机制[J]. 生物技术进展, 2011, 1(5): 327-333; 381.
- [24] 张雯文, 马建武, 任和, 等. 环糊精包合技术及在食品工业中的应用进展[J]. 食品工业, 2014, 35(9): 256-260.
- [25] 豆康宁, 黄亚伟, 王飞. 面包加工工艺对其丙烯酰胺含量影响[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(1): 27-30.
- [26] 颜雪玲. 环糊精修饰丙烯酰胺聚合物对L485钢的腐蚀行为研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015: 4-10.
- [27] 范云露, 陆启玉. 复配氨基酸对丙烯酰胺抑制研究[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(11): 16-19. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2013.11.005.
- [28] 何秀丽, 谭兴和, 王燕, 等. 油炸马铃薯片中丙烯酰胺形成的影响因素的研究[J]. 食品科技, 2007, 32(3): 54-58. DOI:10.3969/j.issn.1005-9989.2007.03.015.
- [29] 张玉萍, 欧仕益, 袁霖. 3种添加剂对油炸薯片丙烯酰胺产生和质构的影响[J]. 中国粮油学报, 2007, 22(3): 131-133; 139. DOI:10.3321/j.issn:1003-0174.2007.03.032.