

预处理对云南脆皮薯条中丙烯酰胺形成的抑制效果研究

高 晴¹, 孙浩男¹, 范江平¹, 张应华², 吕 霞², 葛长荣¹, 和劲松^{1*}

(1. 云南农业大学食品科学技术学院, 昆明 650201; 2. 云南省滇台特色农业产业化工程研究中心, 昆明 650201)

摘 要: **目的** 探究预处理对云南脆皮薯条中丙烯酰胺形成的抑制效果。**方法** 通过选取油炸温度、油炸时间和淀粉水溶液浓度的 3 个梯度设计单因素实验, 对其品质变化进行测定以及感官综合评分法评定, 建立云南脆皮薯条的最佳加工工艺。为有效控制丙烯酰胺, 在热加工前, 将马铃薯分别进行热烫(85 °C 下热烫 10 min)、半胱氨酸浸泡(常温下于 3 g/L 的半胱氨酸溶液中浸泡 10 min)、热烫+半胱氨酸浸泡(在 85 °C 下浸泡于 3 g/L 半胱氨酸溶液中 10 min)预处理, 以未处理为对照组。热加工后, 分别对云南脆皮薯条样品的风味品质指标:水分含量、水分活度、质量、颜色、还原糖含量、天冬酰胺、半胱氨酸等进行测定, 分析不同预处理方式对云南脆皮薯条风味品质的影响, 并对丙烯酰胺含量进行测定, 比较 3 种预处理方式对云南脆皮薯条中丙烯酰胺的抑制情况。**结果** 用热烫+半胱氨酸浸泡的预处理方式处理马铃薯后制作云南脆皮薯条, 水分含量、颜色、还原糖、天冬酰胺与未处理组相比没有统计学差异($P>0.05$); 半胱氨酸含量与其他预处理组对比显著增加; 丙烯酰胺含量与单独热烫、未处理组相比明显减少($P<0.05$)。**结论** 运用半胱氨酸溶液浸泡并联热烫预处理云南脆皮薯条能有效降低食物中的丙烯酰胺同时保留食物风味品质。

关键词: 预处理; 云南脆皮薯条; 丙烯酰胺; 抑制

Study on inhibitory effect of pretreatment on acrylamide formation in Yunnan crispy potato chips

GAO Qing¹, SUN Hao-Nan¹, FAN Jiang-Ping¹, ZHANG Ying-Hua², LV Xia², GE Chang-Rong¹, HE Jin-Song^{1*}

(1. College of Food Science and Technology Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. Dian-Tai Engineering Research Center for Characteristic Agriculture Industrialization of Yunnan Province, Kunming 650201, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the inhibitory effect of pretreatment on acrylamide formation in Yunnan crispy fries. **Methods** By selecting 3 gradients of frying temperature, frying time and the concentration of starch solution, a single factor experiment was designed, and its quality changes were measured and evaluated by the sensory comprehensive scoring method, the optimal processing technology of Yunnan crispy potato chips was established. To effectively control acrylamide, potatoes were pretreated with hot stamping (10 min at 85 °C), cysteine

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860474)、云南省应用基础研究计划重点项目(2016FA014)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (31860474), and Yunnan Applied Basic Research Program (2016FA014)

***通讯作者:** 和劲松, 副教授, 主要研究方向为食品非热加工与质量安全控制。E-mail: hejinsong@mail.tsinghua.edu.cn

***Corresponding author:** HE Jin-Song, Associate Professor, College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, No. 452, Fengyuan Road, Panlong District, Kunming 650201, China. E-mail: hejinsong@mail.tsinghua.edu.cn

immersion (10 min at room temperature in 3 g/L cysteine solution) and hot stamping + cysteine immersion (10 min at 85 °C in 3 g/L cysteine solution) respectively before thermal processing, and the control group was not treated. After the hot processing, the flavor and quality indexes of the Yunnan crispy potato chips were measured respectively: water content, water activity, quality, color, reducing sugar content, asparagine, cysteine, etc. The effects of different pretreatment methods on the flavor quality of Yunnan crispy fries were analyzed, and the content of acrylamide was determined. The inhibition of acrylamide in Yunnan crispy fries by the three pretreatment methods was compared.

Results The potato was pretreated with hot and cysteine immersion to make Yunnan crispy potato chips. There was no significant difference in water content, color, reducing sugar and asparagine between the untreated group and the pre-treated group ($P>0.05$). Compared with other pretreatment groups, the content of cysteine increased significantly. The content of acrylamide was significantly reduced compared with that of the heat treatment group and untreated groups ($P<0.05$). **Conclusion** Pretreatment of Yunnan crispy potato chips with cysteine solution can reduce acrylamide in food and retain food flavor quality.

KEY WORDS: pretreatment; Yunnan crispy potato chips; acrylamide; inhibition

1 前言

马铃薯是世界范围内广泛种植、粮菜兼用的作物^[1]。我国是马铃薯种植大国, 马铃薯种植面积居世界第一^[2]。云南省马铃薯种植面积、总产量均居全国第 3 位^[3]。马铃薯作为继水稻、小麦和玉米之后的第 4 大主粮, 通过政策引导和提高生产技术可有效提升中国粮食的自给^[4]。特别是自 2015 年我国实施马铃薯主食化战略以来, 马铃薯主食产品研发取得了丰硕成果, 产品品种已涵盖包括马铃薯馒头系列、马铃薯米制品系列、马铃薯馒头面包系列、马铃薯地方特色系列、马铃薯方便即食系列、马铃薯休闲产品系列等 6 大系列 300 多个品种^[5]。云南脆皮薯条是一种由马铃薯加工而成的方便即食的休闲产品, 在云南的大街小巷随处可见, 消费量巨大, 极具地方特色, 深受云南人喜爱。

马铃薯含有丰富的营养成分, 马铃薯淀粉, 膳食纤维含量比大米和小麦粉高 2~12 倍, VC 含量约为苹果的 6 倍, 还具有丰富的钾、钙等矿物质^[6]。有研究发现^[7,8], 薯肉中的还原糖和氨基酸在高温下产生的理化反应(焦糖及美拉德)可造成薯类非酶促褐变, 当淀粉含量高的马铃薯制品经过油炸工艺(120~200 °C之间长时间油炸), 容易产生丙烯酰胺(有毒)。

丙烯酰胺(acrylamide, AA)是一种白色无味的晶体物质, 可溶于水以及一些极性溶剂(甲醇、丙酮、醚等)^[9]。丙烯酰胺作为一种蓄积性的神经毒素^[10], 可导致急性、亚急性和慢性中毒^[11]。同时, 丙烯酰胺还具有一定的生殖毒性^[12-17]、遗传毒性^[18]及可能致人类癌症^{[19][20]}等特性。丙烯酰胺具有较强的渗透性, 可通过皮肤、粘膜、呼吸道和消化道等多种途径进入体内, 其中经消化道摄入的丙烯酰胺可以迅速扩散到体内的各个组织, 因此食物中产生的丙烯酰胺对人体危害严重^[21,22]。

目前抑制食品中丙烯酰胺的方法主要有以下几种:一

是通过减少形成丙烯酰胺的重要前体物质(还原糖或天冬酰胺)以降低反应前反应物的浓度, 进而达到降低丙烯酰胺的含量的目的, 方法包括选择天冬酰胺或还原糖含量低的原料、降低体系中的 pH 值、优化漂烫预处理过程以及采用生物法降低前体物质^[23,24]。但这种方法针对性较强, 需要选取特殊品种的马铃薯。二是通过控制热加工的时间和温度、原料的水分活度和气压等加工工艺参数降低丙烯酰胺的生成量^[25-28]。但这些方法在降低丙烯酰胺的同时会影响油炸食品的风味和品质。三是反应前添加半胱氨酸、谷氨酸、脯氨酸等某些氨基酸降低反应后的丙烯酰胺的含量^[29,30]。但这样的方法受到添加量的限制, 如果添加量过多容易对人体造成一定危害。

因此, 本论文以云南传统脆皮薯条为例, 探讨半胱氨酸(cysteine, Cys)溶液浸泡并热烫的预处理方法对云南油炸脆皮薯条中丙烯酰胺的抑制效果, 及其对脆皮薯条风味及品质的影响, 以期最大程度保留云南传统脆皮薯条的风味及品质的同时获得最佳丙烯酰胺抑制效果。

2 材料与方法

2.1 实验材料

马铃薯(品种为合作 88, 当年夏季收获)、面粉、小麦粉、淀粉购于昆明当地农贸市场。

丙烯酰胺标准品纯度 99.9%(色谱纯, 德国 Dr.Ehrenstorfer 公司); 乙腈(色谱纯, 德国 Merck KGaA 公司); 碳酸钠、氢氧化钠、氯化钠、三氯乙酸、葡萄糖、酒石酸钾钠(分析纯, 天津市风船化学试剂科技有限公司); 无水乙醇(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 3,5-二硝基水杨酸(分析纯, 上海博研生物科技股份有限公司); 氢氧化钠(分析纯, 上海晶纯生化科技股份有限公司); 天冬酰胺标准品纯度 99.9%(色谱纯)、半胱氨酸、Tris、DTNB、盐酸(分

析纯)(德国 Sigma-Aldrich 有限公司); 2,4-二硝基氟苯(分析纯, 天津市瑞金特化学品有限公司)。

UltiMate 3000 型液相色谱仪(安捷伦科技有限公司); Q-ToF Premier 型四极杆串联质谱仪(美国 Waters 公司); HH-S1 型恒温油浴锅(常州澳华仪器有限公司); Milli-Q 型超纯水仪(密理博公司); HH-60H 型恒温水浴锅(常州市普达教学仪器有限公司); D-160 型均质机(大龙兴创实验仪器有限公司); KQ3200E 型超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); CR-400 型色差计(柯尼卡美能达中国投资有限公司); HD-3A 型智能水分活度测量仪(无锡市华科仪器有限公司); JP-500B 型高速多功能粉碎机(永康市九品工贸有限公司); 移液枪(大龙医疗设备有限公司); FE20 型 pH 计(梅特勒-托利多仪器上海有限公司); WJF7200 型可见分光光度计(尤尼柯仪器有限公司)。

2.2 实验方法

2.2.1 云南传统脆皮薯条的制备

试样马铃薯洗净、去皮后, 切成 8 cm×5 cm×6 cm 长方体块状, 将蒸煮时间设为:20 min。利用单因素实验选取油炸温度为 145、150、155 °C 3 个梯度, 油炸时间为 6、7、8 min 3 个梯度, 淀粉水溶液浓度为 10%、30%、50%。利用 Design-Expert 8.0 Trial 设计三因素三水平正交实验(表 1)。对其品质变化进行测定以及感官综合评分法评定, 选出最佳加工工艺。进行品尝, 根据评分标准进行评分(表 2)。

表 1 正交实验因素表
Table 1 Orthogonal experimental factors

水平	淀粉水溶液/%	因素油炸温度/°C	油炸时间/min
1	10	145	6
2	30	150	7
3	50	155	8

表 2 感官评定表
Table 2 Sensory evaluation table

项目	评分标准	分值
色泽(2分)	A: 金黄色, 颜色明亮	1.5~2分
	B: 黄色较深, 颜色灰暗	1.0~1.5分
	C: 黄色较淡, 颜色不纯正	<1分
香味(4分)	A: 无糊味, 香味纯正	3.0~4分
	B: 略带糊味, 香气尚纯正	2.0~3分
	C: 明显糊味, 香气不纯正	<2分
质地及口感(2分)	A: 质地松软, 口感均衡	1.5~2分
	B: 质地较软, 口感尚可	1.0~1.5分
	C: 口感较硬, 口感不佳	<1分
可接受程度(2分)	A: 很喜欢	1.5~2分
	B: 可接受, 感觉一般	1.0~1.5分
	C: 不可接受	<1分

2.2.2 马铃薯的预处理

将马铃薯条等量分为 4 组, 分别在 85 °C 下热烫

10 min、在常温下于 3 g/L 的半胱氨酸溶液中浸泡 10 min、在 85 °C 下浸泡于 3 g/L 半胱氨酸溶液中 10 min、以未处理为对照组。处理完后待后续测定使用。

2.2.3 水分含量测定

将马铃薯样品捣碎磨细, 称取 2 g 样品, 放入称量瓶中, 加盖, 称量后, 置 95 °C 干燥箱中, 干燥 2 h 左右至恒重为止。每个处理 3 个平行, 取平均值^[31]。

2.2.4 水分活度测定

将加工好的马铃薯样品剪碎磨细至颗粒小于 2 mm, 准确称取 3 g 研磨后的样品, 均匀平铺在水分活度仪测量盒中, 控制室温 25 °C, 测定水分活度, 每个处理 3 个平行, 取平均值^[32]。

2.2.5 质量变化测定

精密称量待处理的新鲜马铃薯片, 记录称量数据, 按实验条件进行加工处理, 油炸后放于凉油中迅速冷却, 置于漏网 5 min, 滤纸吸干表面多余油脂, 精密称量。计算油炸加工处理前后的质量变化。每个处理 3 个平行, 取平均值。

2.2.6 颜色变化测定

使用 CR-400 色差计, 采用国际照明委员会(Commission International de L'Eclairage, CIE)的 L^* 、 a^* 、 b^* 色彩空间对色差进行测定。将马铃薯样品剪碎磨细至颗粒, 称取 5 g 平铺于比色皿中。对样品粉末, 进行测定测试时, 首先让仪器充分预热, 用仪器自带的白板校正, 每个处理 3 个平行, 记录颜色参数 L^* 、 a^* 、 b^* 值。根据式(1)计算色差 ΔE ^{[33],[34]}。

$$\Delta E = [(L_t^* - L_0^*)^2 + (a_t^* - a_0^*)^2 + (b_t^* - b_0^*)^2]^{1/2} \quad (1)$$

式中, L_t^* 为测量样品明度; L_0^* 为原始测量明度; a_t^* 为测量样品红绿值; a_0^* 为原始测量红绿值; b_t^* 为测量样品黄蓝值; b_0^* 为原始测量黄蓝值。

2.2.7 还原糖含量测定

(1) 配制 3,5-二硝基水杨酸溶液

按文献方法配制 3,5-二硝基水杨酸溶液, 配制 1 mol/L NaOH 溶液, 称取 2.5 g 3,5-二硝基水杨酸溶于 50 mL 水中, 水浴 45 °C。逐步加入 100 mL 1 mol/L 的 NaOH 溶液, 同时不断搅拌, 溶液温度不能超过 48 °C, 直到溶液清澈。逐步加入 75g 酒石酸钾钠, 同时补超纯水到 200 mL, 不断搅拌, 直到加入的物质完全溶解。停止加热, 待冷却后定容至 250 mL 容量瓶。储存于棕色瓶子中, 避光保存^[35]。

(2) 绘制标准曲线, 测定还原糖含量

配制浓度为 10 g/L 的葡萄糖标准液。取 5、10、30、50、70 μL 葡萄糖标准液于 50 mL 玻璃试管补充到 0.5 mL, 并加入 0.5 mL 3,5-二硝基水杨酸溶液, 100 °C 沸水浴 5 min。取出立刻冷却试管, 加入 4 mL 超纯水, 混合均匀。蒸馏水作为空白对照(校零), 540 nm 处测定吸光度。以吸光度为纵坐标 Y, 浓度为横坐标 X, 绘制标准曲线 $[Y=0.6721X-0.0302(r^2>0.999)]$ 。准确称取 5 g 马铃薯产品, 加入 10 mL 85%乙醇于碾钵中碾碎后过滤, 按上述方法操作测定还原糖含量。

2.2.8 天冬酰胺高效液相色谱法分析

(1)NaAc 缓冲溶液的配制:称取 NaAc 2.9 g 加超纯水 700 mL, 用 36%醋酸调 pH 值至 6.2, 加 7 mL N,N-二甲基甲酰胺, 用超纯水定容至 850 mL, 备用。

(2)衍生缓冲溶液的配制:称取 NaHCO_3 4.2 g 加超纯水溶解并定容至 100 mL, 得 0.5 mol/L 的 NaHCO_3 溶液(pH 值为 9.0), 备用。

(3)衍生溶液的配制:精确量取 2,4-二硝基氟苯 1 mL 置于 100 mL 容量瓶中, 用乙腈稀释至刻度, 备用。

(4)平衡溶液的配制:准确称取 KH_2PO_4 3.4 g 置于 500 mL 的容量瓶中, 加超纯水溶解, 加入 0.1 mol/L NaOH 145.5 mL, 加超纯水定容, 备用。

(5)标准工作曲线制作

天冬酰胺标准溶液:准确称取天冬酰胺固体粉末 2.5 mg, 加入 100 mmol/L Tris-HCl 缓冲溶液(pH 值为 8.0)使其溶解, 并稀释至 25 mL, 配成 0.1 g/L 的天冬酰胺标准溶液^[36]。

衍生化处理:分别取 80、60、40、10、5 μL 的天冬酰胺标准溶液于 10 mL 容量瓶中, 加衍生缓冲溶液 1.0 mL, 迅速摇匀, 再加衍生溶液 1.0 mL, 迅速摇匀; 避光, 于 60 $^\circ\text{C}$ 水浴中保温反应 1.0 h, 放冷, 加平衡溶液至刻度, 放置 15 min 后测定。

(6)天冬酰胺 HPLC 样品分析前处理

准确称取马铃薯制品 5 g, 剪碎研磨后放入 250 mL 锥形瓶中, 加入 50 mL 超纯水在加热套中回流提取 2 h^[37], 过滤后定容于 50 mL 容量瓶中。准确取 1 mL 置于 10 mL 容量瓶中, 加衍生缓冲溶液 1 mL, 摇匀; 再加衍生溶液 1 mL, 避光下于 60 $^\circ\text{C}$ 恒温水浴锅中衍生 1 h, 取出放冷, 加平衡溶液稀释至刻度, 摇匀, 放置 15 min, 高效液相色谱进样测定前经 0.45 μm 微孔滤膜过滤^[38]。

2.2.9 Cys 含量测定

(1)配制 standard buffer 溶液:0.086 mol/L Tris 加入 0.09 mol/L 甘氨酸, 加入 4 mmol/L Na_2EDTA , 稀盐酸调 pH 值至 8.0。

(2)配制 4 g/L 的 DTNB 溶液:准确称取 0.4 g 的 DTNB 于 50 mL 烧杯, 加 standard buffer 溶液溶解后定容至 100 mL^[39]。

(3)绘制标准曲线, 测定 Cys 含量

配制不同浓度的 Cys 标准液:10、20、30、40、50 $\mu\text{mol/L}$ 。各标准溶液分别取 3 mL, 加入 0.03 mL DTNB 溶液。对照组取 3 mL, 加入 0.03 mL DTNB 溶液。混合后迅速混匀, 室温放置 30 min, 蒸馏水作为空白对照(校零), 412 nm 处测定吸光度。以吸光度为纵坐标 Y, 浓度为横坐标 X, 绘制标准曲线。称取 2 g 的马铃薯样品, 加入 20 mL standard buffer 溶液, 放入均质机中均质 3 min。均质后用活性炭过滤 2 次后按上述方法操作测定 Cys 含量。

2.2.10 丙烯酰胺高效液相色谱-质谱法分析

准确称取 50 mg 的马铃薯样本, 研磨粉碎后放于 10 mL 离心管中, 加入 800 μL 甲醇, 漩涡振荡 1 min, 涡旋

混合均匀后在 4 $^\circ\text{C}$ 下避光静置 1 h, 将其置于组织研磨仪中于 65 Hz 下研磨 90 s, 研磨后涡旋混匀 30 s, 而后置于 4 $^\circ\text{C}$ 离心机中, 12000 r/min 离心 15 min。吸取 200 μL 上清液, LC-MS 进样测定前经 0.45 μm 滤膜过滤^[40], 转入进样小瓶中待 LC-MS 检测分析。利用外标一点法计算样品中丙烯酰胺含量[公式(2)(3)], 准确称取 5.5 μg 丙烯酰胺标准品, 加入超纯水配制 5.5 $\mu\text{g/mL}$ 的丙烯酰胺标准溶液。

$$\text{Ca}=(\text{Aa}\times 5.5)/\text{As} \quad (2)$$

$$\text{Cm}=(\text{Ca}\times 0.8/50)\times 1000 \quad (3)$$

式中:Ca 为丙烯酰胺的进样浓度; Aa 为样本中丙烯酰胺峰面积; As 为标准品峰面积; Cm 为丙烯酰胺在样本中的质量浓度; 5.5 为标准品的浓度(5.5 $\mu\text{g/mL}$); 0.8 为预处理样本时溶剂体积(0.8 mL 即 800 μL); 50 为样本的质量(mg 为单位); 乘以 1000 是将单位转换为 mg/kg。

2.3 数据处理与分析

数据拟合、制图与统计处理应用 Origin Pro(Ve.8, Origin Lab, US)、Excel 进行。研究数据均用 $\text{Mean}\pm\text{SD}$ 表示, 每个样品 3 个平行样, 多重比较使用 Tukey 方法进行比较, 显著性水平选取 $P=0.05$ 。

3 结果与分析

3.1 云南传统脆皮薯条正交实验结果

根据正交表进行实验, 实验结果如表 3。通过下表我们可以看出, 淀粉水溶液(A)、油炸温度(B)、油炸时间(C)实际评分最佳油炸工艺为 $A_2B_3C_1$ 组合, 理论计算最优工艺与实际感官评分结果一致, 故选取最佳油炸工艺组合为 $A_2B_3C_1$ 。即淀粉水溶液为 30%, 油炸温度为 155 $^\circ\text{C}$, 油炸时间 6 min, 对脆皮薯条的感官影响程度大小是 $A > C > B$ 。

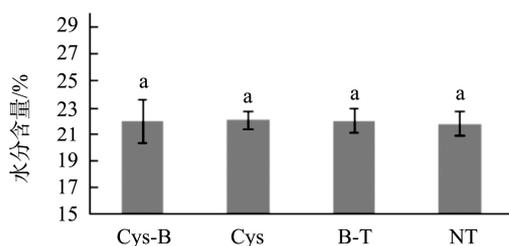
表 3 正交实验分析
Table 3 Orthogonal experimental analysis

实验号	A	B	C	感官分数
1	1	1	1	7.2
2	1	2	2	6.9
3	1	3	3	7.1
4	2	1	2	8.7
5	2	2	3	7.3
6	2	3	1	8.9
7	3	1	3	7.2
8	3	2	1	8.2
9	3	3	2	8.5
K_1	21.2	23.1	24.3	
K_2	24.9	22.4	24.1	
K_3	20.6	24.5	21.6	
k_1	7.0	7.7	8.1	
k_2	8.3	7.5	8.0	
k_3	6.9	8.2	7.2	
R	1.4	0.7	0.9	

3.2 并联加工对云南传统脆皮薯条中水分含量的影响

为探讨 3 种前处理方式对云南传统脆皮薯条的水分含量的影响, 将切好的马铃薯分别用 3 种预处理方式处理, 蒸煮 20 min 后, 测定马铃薯在 155 °C 下油炸 0~12 min 的过程中水分含量的变化。

如图 1 所示, 经 3 种不同预处理方式, 油炸温度为 155 °C, 油炸 6 min 后的云南传统脆皮薯条中的水分含量与对照组相比没有显著性差异($P>0.05$)。



注: 不同字母表示存在显著性差异, $P<0.05$; NT:对照组; B-T:热烫处理; Cys:Cys 溶液浸泡处理; Cys-B:Cys 溶液中热烫处理, 下图同。

图 1 3 种预处理方式对脆皮薯条中水分含量的影响($n=3$)

Fig.1 Effects of 3 kinds of pretreatment methods on the content of moisture in fried ($n=3$)

3.3 并联加工对云南传统脆皮薯条 L^* 值的影响

为探讨 3 种前处理方式对云南传统脆皮薯条 L^* 值的影响, 将切好的马铃薯分别用 3 种预处理方式处理, 测定马铃薯在 155 °C 下油炸 0~14 min 的过程中颜色的变化。

如图 2 所示, 经 3 种不同预处理方式, 油炸温度为 155 °C, 油炸 8 min 后, 经 Cys 浸泡+热烫、Cys 溶液常温浸泡和经热烫过的云南传统脆皮薯条的 L^* 值与对照组相比无显著性差异($P>0.05$)。

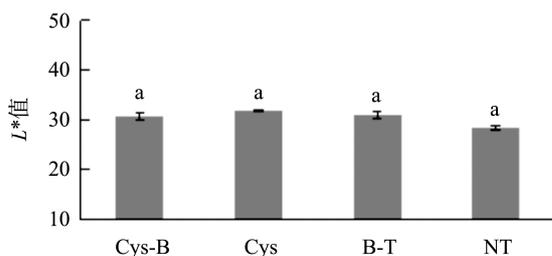


图 2 3 种预处理方式对脆皮薯条中 L^* 的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of 3 kinds of pretreatment methods on the L^* in fried ($n=3$)

3.4 并联加工对云南传统脆皮薯条还原糖含量的影响

为探讨 3 种前处理方式对云南传统脆皮薯条还原糖含量的影响, 将切好的马铃薯分别用 3 种预处理方式处理,

测定马铃薯在 160 °C 下油炸 0~10 min 的过程中还原糖含量的变化。

如图 3 所示, 经 3 种不同预处理方式, 油炸温度为 155 °C, 油炸 6 min 后, 经 Cys+热烫、普通热烫、Cys 溶液常温浸泡的云南传统脆皮薯条中的还原糖含量与对照组相比没有显著性差异($P>0.05$)。

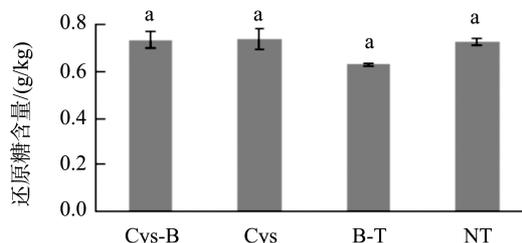


图 3 3 种预处理方式对脆皮薯条中还原糖的影响($n=3$)

Fig.3 Effects of 3 kinds of pretreatment methods on the reducing sugar in fried ($n=3$)

3.5 并联加工对云南传统脆皮薯条中天冬酰胺含量的影响

为探讨 3 种前处理方式对云南传统脆皮薯条天冬酰胺含量的影响, 将切好的马铃薯分别用 3 种预处理方式处理, 测定马铃薯在 155 °C 下油炸 0~14 min 的过程中天冬酰胺含量的变化。

如图 4 所示, 经 3 种不同预处理方式, 油炸温度为 155 °C, 油炸 6 min 后, 经 Cys 浸泡+热烫、普通热烫、Cys 溶液常温浸泡的云南传统脆皮薯条中的天冬酰胺含量与对照组相比没有显著性差异($P>0.05$)。

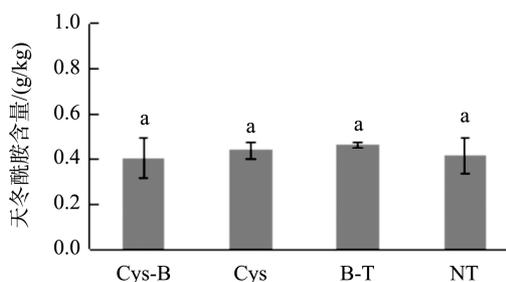


图 4 3 种预处理方式对脆皮薯条中天冬酰胺的影响($n=3$)

Fig.4 Effects of 3 kinds of pretreatment methods on the asparagines in fried ($n=3$)

3.6 并联加工对云南传统脆皮薯条中 Cys 含量的影响

为探讨 3 种前处理方式对云南传统脆皮薯条 Cys 含量的影响, 将切好的马铃薯分别用 3 种预处理方式处理, 测定马铃薯在 155 °C 下油炸 0~14 min 的过程中 Cys 含量的变化。

如图 5 所示, 经 3 种不同预处理方式, 油炸温度为 155 °C, 油炸 7 min 后, 经 Cys+热烫预处理后的云南传统脆皮薯条中 Cys 含量与对照组相比有显著性差异($P<0.05$), 经 Cys 溶液浸泡预处理后的云南传统脆皮薯条中 Cys 含量与对照组相比有显著性差异($P<0.05$), 普通热烫的云南传统脆皮薯条中的 Cys 含量与对照组相比无显著性差异($P>0.05$)。因此说明添加 Cys 进行预处理会增加云南传统脆皮薯条中的 Cys 的含量。

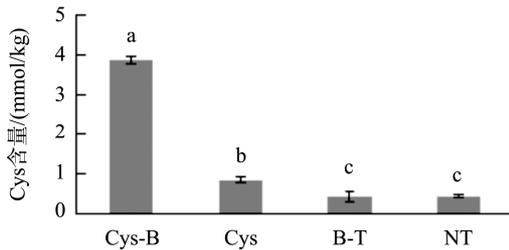


图 5 3 种预处理方式对脆皮薯条中 Cys 的影响($n=3$)

Fig.5 Effects of 3 kinds of pretreatment methods on the Cys in fried ($n=3$)

3.7 并联加工对云南传统脆皮薯条中丙烯酰胺含量的影响

为探讨 3 种前处理方式对云南传统脆皮薯条中丙烯酰胺含量的影响, 将切好的马铃薯分别用 3 种预处理方式处理, 测定马铃薯在 170 °C 下油炸 10 min 时丙烯酰胺的含量。

如图 6 所示, 对照组的丙烯酰胺含量为(3.18±0.16) mg/kg、经过热烫预处理的云南传统脆皮薯条丙烯酰胺含量为(3.32±0.29) mg/kg、经过 Cys 溶液浸泡的云南传统脆皮薯条丙烯酰胺含量为(0.19±0.03) mg/kg、经过 Cys+热烫预处理的云南传统脆皮薯条丙烯酰胺含量为(0.15±0.08) mg/kg。

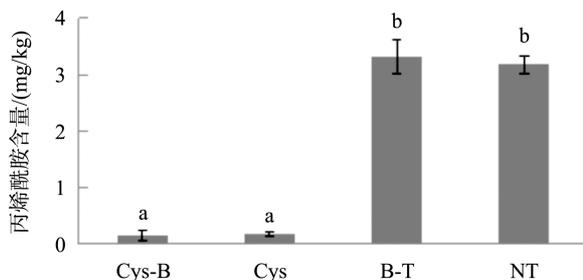


图 6 3 种预处理方式对脆皮薯条中丙烯酰胺含量的影响($n=3$)

Fig.6 Effects of 3 kinds of pretreatment methods on the acrylamide in fried ($n=3$)

以上结果表明, 马铃薯在 85 °C 下浸泡于 3 g/L 半胱氨酸溶液中 10 min, 可有效抑制脆皮薯条中丙烯酰胺形成。当 Cys 溶液浓度为 3 g/L 时, 浸泡温度为 85 °C, 与单独 Cys

溶液浸泡处理相比, 无显著性差异($P>0.05$), 虽然 2 种预处理方式都能降低云南脆皮薯条中丙烯酰胺的含量, 但热烫+Cys 浸泡的预处理不影响云南脆皮薯条的风味及品质, 而单独 Cys 溶液浸泡的预处理方式会降低云南脆皮薯条中 Cys 的含量。热烫+Cys 浸泡与对照组和热烫预处理组相比出现抑制效应, 丙烯酰胺含量存在显著差异性($P<0.05$)。由于云南传统脆皮薯条油炸前蒸煮 20 min, 因此单独热烫处理组与对照组相比丙烯酰胺的含量无显著差异($P>0.05$)。

4 讨论与结论

通过正交实验选取出了最佳风味下的加工工艺, 之后又对水分含量、色差、还原糖、天冬酰胺的测定是为了探讨马铃薯品质的变化情况, 由结果可知, 运用热烫+Cys 浸泡的处理方式进行预处理, 可以很好地保留马铃薯相关品质。由于添加某些氨基酸能降低反应后的丙烯酰胺的含量^[29,30], 通过测定 Cys 的含量, 可以观察到添加 Cys 时抑制丙烯酰胺生成的情况, 因此通过图 5、图 6 可以看到添加了 Cys 溶液可以明显减少丙烯酰胺的生成。

运用热烫+Cys 浸泡的预处理方式与文献中^[23,24]通过减少丙烯酰胺前体物含量的方法相比, 均有降低食物中丙烯酰胺的作用。然而运用热烫+Cys 浸泡的预处理方式, 能在几乎不减少水分含量、天冬酰胺、还原糖等物质的条件下降低食物中丙烯酰胺的含量。运用热烫+浸泡的预处理方式与文献中^[25,26]运用控制反应条件及中间产物的方法相比, 均有降低食物中丙烯酰胺的作用。然而运用热烫+浸泡的预处理方式, 食品的风味品质等特性保留较为完整。因此, 运用热烫+浸泡的方式对马铃薯进行预处理, 能在降低丙烯酰胺的同时最大化保留食物风味品质等成分。

综上所述, Cys 溶液浸泡并联热烫的预处理方式和 Cys 浸泡方式能有效抑制云南脆皮薯条中丙烯酰胺的形成, 但 Cys 溶液浸泡并联热烫的预处理方式能有效提高马铃薯中 Cys 的含量, 为热加工过程对丙烯酰胺的协同抑制效应奠定理论基础。并且, 运用 Cys 溶液浸泡并联热烫的方式对马铃薯进行预处理, 能在降低云南脆皮薯条中的丙烯酰胺同时保留食物风味品质。满足了“最少加工、最小剂量、最佳效果”这一现代食品绿色加工理念的丙烯酰胺控制技术。

参考文献

- [1] Bamberg J, Greenway G. Nutritional and economic prospects for expanded potato outlets [J]. *Am J Potato Res*, 2019, 96(2): 206–215.
- [2] 徐进, 朱杰华, 杨艳丽, 等. 中国马铃薯病虫害发生情况与农药使用现状[J]. *中国农业科学*, 2019, (16): 2800–2808.
- [3] 吴郁青, 包丽仙, 田志梅, 等. 马铃薯产业在加快云南省扶贫攻坚中的

Xu J, Zhu JH, Yang Y L, *et al.* Status of major diseases and insect pests of potato and pesticide usage in China [J]. *Sci Agric Sin*, 2019, (16): 2800–2808.

- 重要作用探讨[J]. 云南农业科技, 2019, (4): 20–22.
- Wu YQ, Bao LX, Tian ZM, *et al.* Discussion on the important role of potato industry in accelerating poverty alleviation in Yunnan province [J]. *Yunnan Agric Sci Technol*, 2019, (4): 20–22.
- [4] Wang N, Reidsma P, Pronk AA, *et al.* Can potato add to China's food self-sufficiency? The scope for increasing potato production in China [J]. *Eur J Agron*, 2018, 101: 20–29.
- [5] 佚名. 我国已研发出六大种类 300 多种马铃薯主食产品[J]. 农业科技与信息, 2019, (13): 24.
- Anonymous. China has developed six categories of more than 300 potato staple products [J]. *Agric Sci-Technol Inform*, 2019, (13): 24.
- [6] 文丽. 马铃薯营养价值探讨[J]. 现代农业科技, 2016, (4): 293–294.
- Wen L. Study on nutritional value of potato [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2016, (4): 293–294.
- [7] 陈金发, 吴昊, 田先翠. 不同加工工艺对马铃薯颗粒全粉营养成分的影响[J]. 食品工业, 2017, 38(2): 135–137.
- Chen J F, Wu H, Tian X C. Different processing technology on the influence of potato powder particles all nutrients [J]. *Food Ind*, 2017, 38(2): 135–137.
- [8] 郭红英, 阚旭辉, 谭兴和, 等. 食品中丙烯酰胺的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(3): 33–36.
- Guo HY, Kan XH, Tan XH, *et al.* Study progress on acrylamide in food [J]. *Cere Oils*, 2017, 30(3): 33–36.
- [9] Liu ZG, Song G, Zou C, *et al.* Acrylamide induces mitochondrial dysfunction and apoptosis in BV-2 microglial cells [J]. *Free Radical Bio Med*, 2015, 84: 42–53.
- [10] Hu Q, Xu X, Fu Y, *et al.* Rapid methods for detecting acrylamide in thermally processed foods: A review [J]. *Food Control*, 2015, 56: 135–146.
- [11] Reagan KE, Jensen KF, Friedman MA, *et al.* Patterns of GAP43 (B50) expression and accumulation in subchronic acrylamide neurotoxicity [J]. *Neuroence Res Commun*, 2015, 27(3): 199–212.
- [12] Katen AL, Stanger SJ, Anderson AL, *et al.* Chronic acrylamide exposure in male mice induces DNA damage to spermatozoa; potential for amelioration by resveratrol [J]. *Reprod Toxicol*, 2016, 63: 1–12.
- [13] Hamdy S, El-Khayat Z, Farrag ARH, *et al.* Hepatoprotective effect of Raspberry ketone and white tea against acrylamide-induced toxicity in rats [J/OB]. *Drug Chem Toxicol*, 2020, <https://doi.org/10.1080/01480545.2020.1772279>.
- [14] Viviane M, Paula BS, Fernanda I, *et al.* Acrylamide: A review about its toxic effects in the light of developmental origin of health and disease (DOHaD) concept [J]. *Food Chem*, 2019, 283: 422–430.
- [15] 李名薇, 孙建霞, 许伟, 等. 丙烯酰胺对睾丸间质细胞 R2C 活性及孕酮合成功能的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(17): 247–251.
- Li MW, Sun JX, Xu W, *et al.* Effect of acrylamide on the viability and progesterone biosynthesis function of rat R2C leydig cells [J]. *Food Sci*, 2015, 36(17): 247–251.
- [16] Katen AL, Chambers CG, Nixon B, *et al.* Chronic acrylamide exposure in male mice results in elevated DNA damage in the germline and heritable induction of CYP2E1 in the testes [J]. *Biol Reprod*, 2016, 95(4): 86.
- [17] Fernanda I, Viviane MO, Isabela MO, *et al.* Prepubertal acrylamide exposure causes dose-response decreases in spermatid production and functionality with modulation of genes involved in the spermatogenesis in rats [J]. *Toxicology*, 2020, 436: 152428.
- [18] 曹秀明, 罗飞, 樊宇, 等. 丙烯酰胺对斑马鱼各器官的毒性作用及生殖细胞的 DNA 损伤[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(1): 382–388.
- Cao XM, Luo F, Fan Y, *et al.* Toxic effects of acrylamide on zebrafish organs and DNA damage of germ cell [J]. *Asian J Ecotoxicol*, 2016, 11(1): 382–388.
- [19] Nachi I, Fhoula I, Smida I, *et al.* Assessment of lactic acid bacteria application for the reduction of acrylamide formation in bread [J]. *LWT*, 2018, 92: 435–441.
- [20] Sung WC, Chang YW, Chou YH, *et al.* The functional properties of chitosan-glucose-asparagine Maillard reaction products and mitigation of acrylamide formation by chitosans [J]. *Food Chem*, 2018, 243: 141–144.
- [21] 张璐佳, 杨柳青, 王鹏璞, 等. 丙烯酰胺毒性研究进展[J]. 中国食品学报, 2018, 18(8): 274–283.
- Zhang LJ, Yang LQ, Wang PP, *et al.* Study progress of acrylamide toxicity [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2018, 18(8): 274–283.
- [22] Sumner SC, Williams CC, Snyder RW, *et al.* Acrylamide: A Comparison of metabolism and hemoglobin adducts in rodents following dermal, Intraperitoneal, oral, or inhalation exposure [J]. *Toxicol Sci*, 2003, 75(2): 260–270.
- [23] 左少华. 耐热 L-天冬酰胺酶的性质鉴定及酶法控制食品中丙烯酰胺含量的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
- Zuo SH. Characterization of thermostable L-asparaginases and enzymatic control of acrylamide level in food [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [24] 刘欣, 刘黄友, 袁媛. 生物抗氧化剂抑制丙烯酰胺形成的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(5): 1688–1692.
- Liu X, Liu HY, Yuan Y. Research progress on acrylamide inhibition by biological antioxidants [J]. *J Food Saf Qual*, 2017, 8(5): 1688–1692.
- [25] 豆康宁, 罗海澜, 彭新然, 等. 馒头中丙烯酰胺的抑制工艺及添加剂配方[J]. 食品科学, 2014, 35(16): 71–75.
- Dou KN, Luo HL, Peng XR, *et al.* Inhibition of acrylamide formation in dried bun slice by improving baking conditions and adding food additives [J]. *Food Sci*, 2014, 35(16): 71–75.
- [26] Marta M, Cristina DA, Morales FJ. Alternative food matrices for snack formulations in terms of acrylamide formation and mitigation [J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(4): 2048–2051.
- [27] Jin C, Wu X, Zhang Y. Relationship between antioxidants and acrylamide formation: A review [J]. *Food Res Int*, 2013, 51(2): 611–620.
- [28] Wang H, Feng F, Guo Y, *et al.* HPLC-UV quantitative analysis of acrylamide in baked and deep-fried Chinese foods [J]. *J Food Compos Anal*, 2013, 31(1): 7–11.
- [29] Shen YT, Chen GJ, Li YH. Effect of added sugars and amino acids on acrylamide formation in white pan bread [J]. *Cere Chem*, 2019, 96(3): 545–553.
- [30] Ou JJ, Zheng J, Huang JQ, *et al.* Interaction of acrylamide, acrolein, and 5-hydroxymethyl furfural with amino acids and DNA [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68(18): 5039–5048.
- [31] GB/T 5009.3–2003 卫生部食品卫生监督检验所 食品中水分测定[S]. GB/T 5009.3–2003 Institute of food hygiene supervision and inspection, ministry of health-Determination of moisture in food [S].
- [32] GB 8858–1988 水果、蔬菜产品中干物质和水分含量的测定方法[S]. GB 8858–1988 Methods for the determination of dry matter and moisture content in fruit and vegetable products [S].

- [33] Skred EG. Color quality of blackcurrant syrups during storage evaluated by hunter L^* , a^* , b^* values [J]. *J Food Sci*, 1985, 50(2): 514–517.
- [34] Dadali G, Aparad K, Zbek B. Color change kinetics of okra undergoing microwave drying [J]. *Dry Technol*, 2007, 25(5): 925–936.
- [35] Cristian R, Camila M, Helena N, *et al.* Study of effect of sodium alginate on potato starch digestibility during *in vitro* digestion [J]. *Food Hydrocolloid*, 2015, 44(44): 328–332.
- [36] 张继, 于丹, 向文胜, 等. 天冬酰胺合成酶 B 抑制剂高效液相色谱筛选方法的建立与应用[J]. *色谱*, 2009, 27(4): 472–475.
Zhang J, Yu D, Xiang WS, *et al.* Development and application of screening method for asparagine synthetase B inhibitors by high performance liquid chromatography [J]. *Chin J Chromatogr*, 2009, 27(4): 472–475.
- [37] 刘惠文. 高效液相色谱法测定朝鲜蓟中的天冬酰胺[J]. *现代科学仪器*, 2006, 6: 107–108.
Liu HW. Determination of asparagine in artichoke by high performance liquid chromatography [J]. *Mod Sci Instrum*, 2006, 6: 107–108.
- [38] 万绍晖, 杨浩, 耿秀梅. 柱前衍生化反向高效色谱法测定板蓝根中的氨基酸[J]. *色谱*, 2005, 23(4): 408–410.
Wan SH, Yang H, Geng XM. Determination of amino acids in isatis indigotica fort by reversed-phase high performance liquid chromatography with pre-column derivatization [J]. *Chin J Chromatogr*, 2005, 23(4): 408–410.
- [39] Shimada K, Cheftel JC. Determination of sulfhydryl groups and disulfide bonds in heat-induced gels of soy protein isolate [J]. *J J Agric Food Chem*, 1988, 36 (1): 147–153.
- [40] 章宇, 焦晶晶, 张英, 等. 液相色谱-串联质谱法测定焙烤和油炸食品中丙烯酰胺的含量[J]. *中国食品学报*, 2007, 7(1): 131–136.
Zhang Y, Jiao JJ, Zhang Y, *et al.* Determination of acrylamide in baked and Fried food by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2007, 7(1): 131–136.

(责任编辑: 王 欣)

作者简介



高 晴, 硕士, 实验师, 主要研究方向为食品营养、食品安全。
E-mail: 2763911754@qq.com.

和劲松, 博士, 硕士生导师, 副教授, 主要研究方向为食品非热加工与质量安全控制。
E-mail: hejinsong@mail.tsinghua.edu.cn