

不同氨基酸和糖对美拉德反应产物的影响

钱敏^{1,2}, 白卫东^{1,2,*}, 赵文红^{1,2}, 刘晓艳^{1,2}, 曾晓芳^{1,2}

(1.仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东 广州 510225;

2.广州市广式传统食品加工与安全控制重点实验室, 广东 广州 510225)

摘要: 利用半胱氨酸、甘氨酸、谷氨酸3种氨基酸和木糖、葡萄糖2种还原糖作为反应底物, 模拟美拉德反应制备香精, 并对其香气成分和有害物质进行综合分析。结果表明: 参与反应的氨基酸种类越多, 所测得的挥发性物质种数也越多, 反应产物的风味越丰富; 甘氨酸参与的美拉德反应中丙烯酰胺的生成量较少, 而谷氨酸的参与反应中丙烯酰胺的生成量较多; 还原糖种类对丙烯酰胺的产生影响不大; 谷氨酸参与的美拉德反应产物中, 5-羟甲基糠醛(5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF)含量高, 而半胱氨酸和甘氨酸参与的反应产物中, 5-HMF的含量较低; 木糖可减少产物中的5-HMF的含量。利用本实验条件制备香精, 产物中的丙烯酰胺和5-HMF含量在安全范围内。

关键词: 美拉德反应; 香气成分; 丙烯酰胺; 5-羟甲基糠醛

Effects of Amino Acids and Reducing Sugars on Maillard Reaction Products

QIAN Min^{1,2}, BAI Weidong^{1,2,*}, ZHAO Wenhong^{1,2}, LIU Xiaoyan^{1,2}, ZENG Xiaofang^{1,2}

(1. College of Light Industry and Food, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China;

2. Guangzhou Key Laboratory of Guangdong Style Traditional Food Processing and Safety Control, Guangzhou 510225, China)

Abstract: The aim of this study was to monitor aroma and hazardous compounds in Maillard reaction products (MRPs) derived from model systems consisting of amino acids (cysteine, glycine and glutamic) and reducing sugars (xylose and glucose). The results showed that more kinds of amino acids participating in the Maillard reaction could result in the formation of more volatile compounds and more abundant flavors. The reaction in the presence of glycine could generate less acrylamide, while a higher amount of acrylamide could be formed in the presence of glutamic acid. The type of reducing sugar had no impact on the generation of acrylamide. Higher content of 5-hydroxy methylfurfural (5-HMF) in MRPs was derived from glycine model system, while model systems containing cysteine, glycine or xylose produced lower content of 5-HMF. The amount of acrylamide and 5-HMF was in the safe range under our experimental conditions.

Key words: Maillard reaction; aroma components; acrylamide; 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201613006

中图分类号: TS202.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2016)13-0031-05

引文格式:

钱敏, 白卫东, 赵文红, 等. 不同氨基酸和糖对美拉德反应产物的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(13): 31-35. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201613006. <http://www.spkx.net.cn>

QIAN Min, BAI Weidong, ZHAO Wenhong, et al. Effects of amino acids and reducing sugars on Maillard reaction products[J]. Food Science, 2016, 37(13): 31-35. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201613006. <http://www.spkx.net.cn>

美拉德反应受较多因素的影响, 反应体系的底物是其中一个极其重要的因素^[1-9]。美拉德反应底物包括糖类和氨基化合物。由于双糖产生的风味较差、成本高, 所以在香精的生产过程中, 通常使用葡萄糖和木糖^[10-11]作为反应底物。而氨基化合物也是美拉德反应的必要底物,

若没有蛋白质、肽或氨基酸参与反应, 也就无法形成风味物质。目前对于美拉德反应的研究主要集中在分析美拉德反应的影响因素和反应条件的优化, 但对其香气成分和有害物质的研究较少。碳水化合物在高温下易生成丙烯酰胺及5-羟甲基糠醛(5-hydroxymethylfurfural,

收稿日期: 2015-12-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31371842); 广州市科技计划项目(151800034; 201509010005)

作者简介: 钱敏(1983—), 女, 实验师, 硕士, 研究方向为食品化学。E-mail: 358854770@qq.com

*通信作者: 白卫东(1967—), 男, 教授, 硕士, 研究方向为食品化学。E-mail: whitebai2001@163.com

5-HMF)。丙烯酰胺是具有神经毒性、生殖毒性、发育毒性以及致癌性等^[12-15]的潜在致癌物。一定剂量的5-HMF被机体吸收后,会对肝脏、肾脏、心脏等器官产生不良影响,而且对眼黏膜、上呼吸道黏膜、人体横纹肌及内脏有损害^[16-19]。当前我国对于食品中丙烯酰胺和5-HMF还没有相关的限量标准。

本实验以氨基酸(半胱氨酸、甘氨酸及谷氨酸)和还原糖(木糖、葡萄糖)为主要原料,在合适的加水量、反应时间、和反应温度下进行美拉德反应,利用气相色谱-质谱联用仪(gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS)对其挥发性反应产物进行分析,研究不同反应底物对美拉德反应产物风味的影响,同时利用高效液相色谱法对丙烯酰胺和5-HMF进行检测,探讨不同美拉德反应底物对其含量的影响。本实验旨在为美拉德反应产物的进一步分析提供理论基础,也为制定食品中丙烯酰胺和5-HMF的安全限量标准提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

甘氨酸(99.5%~100.5%)、L-半胱氨酸(99.0%)、D-谷氨酸(98.0%)、5-HMF(98.0%)、丙烯酰胺(99.0%)、亚铁氰化钾(99.0%)、乙酸锌(99.0%)、甲醇 阿拉丁试剂公司;木糖 唐利康木糖厂家;葡萄糖 广州化学试剂厂;氯化钠 天津市福晨化学试剂厂。以上试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

FA2004电子天平 上海良平仪器仪表有限公司; YP1201N电子天平 上海精密科学仪器有限公司; SYQ-DSX-280B手提式不锈钢压力蒸汽灭菌器 上海申安医疗器械厂; SFG-02.300电热恒温鼓风干燥箱 黄石市恒丰医疗器械有限公司; BCD-198H离心机 上海安亭科学仪器厂; SHZ-D循环水式真空泵 巩义市予华仪器有限责任公司; 1100 Series高效液相色谱仪 美国安捷伦公司; N6890c-5973ineit 气相色谱-质谱联用仪 美国安捷伦公司; 85-2A数显恒温磁力搅拌器 江苏金坛市金城国胜实验仪器厂。

1.3 方法

1.3.1 美拉德反应产物的制备

第一组样品反应物配比:氨基酸1.00 g、木糖1.00 g、葡萄糖0.50 g、水40.00 g。其中,样品1、2、3中氨基酸分别为半胱氨酸、甘氨酸和谷氨酸;样品4、5、6中氨基酸分别分半胱氨酸+甘氨酸(1:1, m/m, 下同)、半胱氨酸+谷氨酸(1:1)、甘氨酸+谷氨酸(1:1);样品7中氨基酸为半胱氨酸+甘氨酸+谷氨酸(1:1:1)。

第二组样品反应物配比:氨基酸1.00 g、还原糖

1.00 g、水40.00 g。其中,样品8、9中氨基酸为半胱氨酸;样品10、11中氨基酸为甘氨酸;样品12、13中氨基酸为谷氨酸;样品14、15中氨基酸为半胱氨酸+甘氨酸(1:1);样品16、17中氨基酸为半胱氨酸+谷氨酸(1:1);样品18、19中氨基酸为甘氨酸+谷氨酸(1:1);样品20、21中氨基酸为半胱氨酸+甘氨酸+谷氨酸(1:1:1)。样品8、10、12、14、16、18、20中还原糖为木糖,样品9、11、13、15、17、19、21中还原糖为葡萄糖。

将反应物置于50 mL的三角瓶中,编号,塞紧棉塞,放进手提式不锈钢压力蒸汽灭菌器,在115 ℃条件下,反应60 min。

1.3.2 美拉德反应产物的感官评价

由10名较有经验的评分员(5男5女)对所制得的美拉德反应产物进行感官评分及简单描述。方法如下^[5]:待反应完后的香精冷却到室温,将闻香纸浸入反应完的香精中1~2 cm深,然后在距离评分员2~3 cm处通过2~3 s。评分员给为闻香纸散发的气味进行评分,总分以各项平均分记录,评分内容见表1。液体状态分值说明:分值越高表示液体越澄清香型分值说明:香味等分值高,苦味或者异味分值低;强弱分值说明:气味越强分值越高;留存时间分值说明:香味留存时间越长分值越高;异味分值说明:苦味等不好的味道越多,扣除分越多。

表1 产品风味感官评定标准
Table 1 Criteria for sensory evaluation of MRPs

标准	液体状态	香型	强弱	留存时间	异味	评分结果	综合描述
分值	0~10	0~30	0~40	0~20	-10~0	总分	文字描述

1.3.3 香气成分的测定

气相色谱条件:色谱柱为HP-5MS(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)毛细管柱;进样量1 μL;进样口温度:260 ℃;柱温程序:起始温度40 ℃,保留2 min,以5 ℃/min的速率升温至120 ℃,再以12 ℃/min的速率升温至250 ℃,保持3 min,最后以10 ℃/min的速率升温至260 ℃,后运行30 min;载气:氮气,流速:0.76 mL/min。

质谱条件:EI源,电离电压70 eV;离子源温度230 ℃;质量扫描范围50~550 amu。

1.3.4 丙烯酰胺含量的测定

参考文献[20-25]的方法。取10 mL样品溶液于20 mL离心管中,分别添加0.2 mL的亚铁氰化钾溶液(15 g/100 mL)和乙酸锌溶液(30 g/100 mL),剧烈混匀后于3 500 r/min, 4 ℃条件下离心15 min,取上清液1 mL用0.45 μm的聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)微孔滤膜过滤后进行高效液相测定。

检测条件为：色谱柱：ZORBAX Eclipse Plus C₁₈柱（250 mm×4.6 mm，5 μm）；流动相：甲醇-水（体积比为5:95）；流速：1.0 mL/min；柱温：30 ℃；检测波长：210 nm；进样量：5 μL。

1.3.5 5-HMF的测定

样品前处理方法同丙烯酰胺。

检测条件为：色谱柱：ZORBAX Eclipse Plus C₁₈柱（250 mm×4.6 mm，5 μm）；流动相：甲醇-水（体积比为5:95）；流速：1.0 mL/min；柱温：30 ℃；检测波长：285 nm；进样量：5 μL。

2 结果与分析

2.1 底物对美拉德反应产物的影响

2.1.1 氨基酸对美拉德反应产物风味的影响

表2 样品风味感官评价结果

Table 2 Sensory evaluation results of samples

样品 编号	液体状态 (0~ 10分)	香型 (0~ 30分)	强弱 (0~ 40分)	留存时间 (0~ 20分)	异味 (-10~ 0分)	评分 结果	综合描述
1	7	24	35	15	0	81	液体呈蛋清色；咸鸡肉味， 气味较单调
2	8	25	35	13	0	81	液体呈酒红色；焦糖味
3	7	23	33	10	-1	72	液体呈浅橘色；苦杏仁味
4	8	28	37	15	0	88	液体呈淡黄色； 咸鸡肉味较浓郁
5	8	27	35	14	-1	83	液体呈蛋清色；鸡肉味
6	8	26	35	14	0	73	液体呈茶色；略带苦杏仁味
7	8	29	37	15	0	89	液体呈蛋清色； 鸡肉味较丰富、浓郁

由表2可知，样品1、4、5、7有半胱氨酸参与反应的产物中有鸡肉味，这可能与半胱氨酸中含有硫元素有关^[26]；样品2、7中，甘氨酸反应后生成焦糖气味，可以丰富产物的风味，且使产物风味更易被接受；而谷氨酸的参与（样品3、6）会使反应产物产生苦杏仁等异味。美拉德反应过程中，氨基酸种类越多，反应后产物风味越丰富，半胱氨酸、甘氨酸和谷氨酸3种氨基酸共同参与的反应产物风味最好。

2.1.2 氨基酸对美拉德反应产物的影响

由表3可知，参与反应的氨基酸种类越多，所测得的挥发性物质种数越多，这也验证了前面的感官评价结果，即参与反应的氨基酸种类越多，其产生的风味越丰富。而从挥发性物质的检测结果来看，3种氨基酸参与的反应产物中，不仅挥发性物质种数多，且以咪唑、吡嗪、呋喃、酯类、醇类为主，而这些物质恰好是咸味香精中的重要呈香物质，这也说明了3种氨基酸共同参与美拉德反应产物对其产物风味起着十分重要的作用。

表3 氨基酸对美拉德反应产物的影响

Table 3 Effect of amino acids on Maillard reaction products

样品编号	挥发性物质种数	鉴定出的化合物
1	7	N-甲基牛磺酸、丙酰胺、2,5-二甲氧基-4-（甲磺酰基）嘧啶、2-乙氧基苯丙胺、N-甲基辛胺、3,3,4,4-四氟-1,5-己二烯、4-乙基苯甲醛
2	7	4-溴-2,5-二甲氧基苯丙胺、DL-丙氨酸-DL-缬氨酸、苯丙胺、2-氨基-6-甲基庚烷、2,5-二甲氧基-4-（甲磺酰基）苯基、丙酮胺、2-氯-4-喹啉甲酸、糠醛
3	10	4-溴-2,5-二甲氧基苯丙胺、2,5-二甲氧基-2-（甲磺酰基）苯基酰胺、糠醛、四氢呋喃-3-甲醚、α-吡啶酮、2-（2-呋喃甲酰基胍基）乙酸、3-（3,4-二甲苯基）-丙酰胺、2-（甲磺酰基）乙醇、4-碘-3-甲氧基苯丙胺、N-乙酰基-2-丙氧基苯丙胺
4	12	L-丙氨酸-4-硝基苯胺、（E）-3-（二甲氨基）-3-乙氧基-2-丙烯醛、3-（3,4-甲基苯基磺酰基）丙酰胺、糠醛、2H-吡喃-2-酮、柠檬烯、丙酰胺、N-甲基-1-辛胺、1-萘-1-基-2-（2-三氟甲基-咪唑烷-2-基）-乙酮、3-[4-氯苯氧基]-α-甲基苯乙胺、2-丙炔醇、α-（1-氨基乙基）-N-羟基-辛醇
5	11	硫酸、5-甲基-2-苯基-1H-咪唑、N-甲基-1-十八烷基胺、苯甲醛、2,3-二甲氧基苯丙胺、3-糠醛、糠醛、N-二甲基-甲磺酰胺、乙基N'-异丙基胍基乙酸酯、卡西酮、2,5-二甲氧基-4-（甲磺酰基）苯丙胺
6	12	N-甲基、α-甲基-苯乙胺、4-溴-2,5-二甲氧基苯丙胺、3-乙氧基苯基丙胺、L-丙氨酸-4-硝基苯胺、糠醛、2-己炔醇、羟基脱甲基咪唑、柠檬烯、1-咪唑-4-基（醚）-1,2,3-丙三醇、1-萘-1-基-2-（2-三氟甲基-咪唑烷-2-基）-乙酮、N-甲基-1-十八烷基胺
7	14	2,5-二甲氧基-4-（甲磺酰基）苯丙胺、4-溴-2,5-二甲氧基苯丙胺、2,6-二氯卡酮、糠醛、2,4-二甲基-呋喃、2（1H）-吡啶酮、2H-吡喃-2-酮、N-甲基-1-十八烷基胺、5-甲基-2-苯基-1H-咪唑、乙烷、2-（甲磺酰基）-乙醇、4-甲基-2-戊胺、胆甾-8-烯-3,6-二醇

2.2 反应底物对丙烯酰胺含量的影响

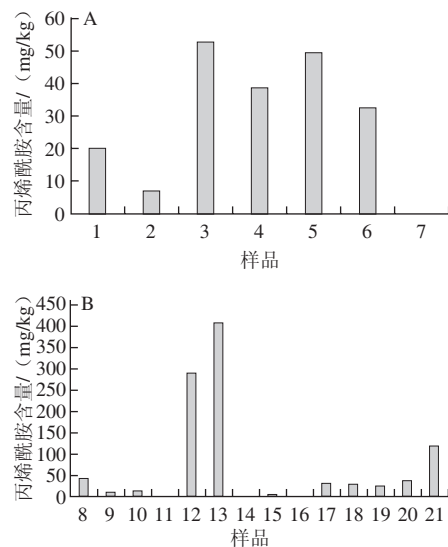


图1 氨基酸（A）和还原糖（B）对美拉德反应产物中丙烯酰胺含量的影响

Fig. 1 Effect of amino acids (A) and reducing sugars (B) on the content of acrylamide

图1A中，样品1、2、3为半胱氨酸、甘氨酸及谷氨酸3种氨基酸单独参与反应。甘氨酸的反应产物中丙烯酰胺含量最少；样品4、5、6为3种氨基酸两两混合参与反应，它们之间丙烯酰胺的含量相差不大，甘氨酸和谷氨酸混合的样品含量相对较少；而样品7为3种氨基酸混合参与反应，在此条件下，产生的丙烯酰胺痕量、未检

出。因此推测,游离的还原性糖(羰基来源)和游离的天冬酰胺是产生丙烯酰胺的基础^[27-28]。但半胱氨酸、甘氨酸、谷氨酸与还原糖之间的美拉德反应,也会产生丙烯酰胺。其中,甘氨酸参与的反应中丙烯酰胺的生成量较少,而有谷氨酸参与的反应中,丙烯酰胺的生成较多。

通过比较图1B中各样品生成量丙烯酰胺的含量可以看出,在美拉德反应中,木糖与葡萄糖对丙烯酰胺的产生影响差别不大。

由图1可知,在相同的反应条件下,丙烯酰胺含量最高的是样品13,其丙烯酰胺的含量约为407.32 mg/kg;而样品7、11、14、16中丙烯酰胺的含量均为痕量,未检出。动物实验表明,鼠口服丙烯酰胺半致死量是100~270 mg/kg,皮肤接触的半致死量是400 mg/kg,人口服可能致命剂量为50~500 mg/kg。日本“食品添加剂之神”安部司曾做过一个换算得出:一个人每天摄入的添加剂大约10 g。且香精使用要求限定:香精在食品中添加时需要稀释100~1 000倍。依此推算,一人一天食用稀释100~1 000倍后的香精质量为10 g,测定含量最高的样品13则可能摄入4.07~40.07 μ g丙烯酰胺,远低于致死剂量。

2.3 反应底物对5-HMF含量的影响

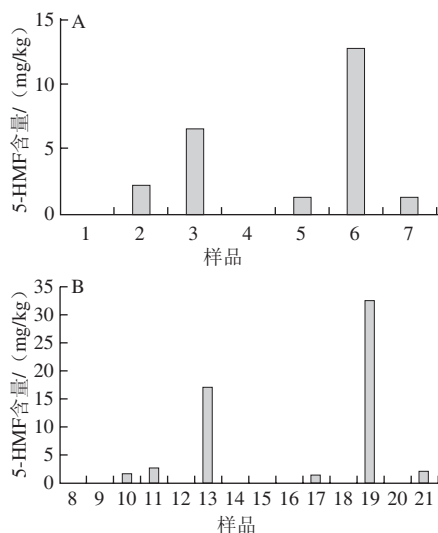


图2 氨基酸(A)和还原糖(B)对美拉德反应产物中5-HMF含量的影响

Fig. 2 Effect of amino acids (A) and reducing sugars (B) on the content of 5-HMF

氨基酸对5-HMF含量的影响由图2A可知,样品1、2、3分别为半胱氨酸、甘氨酸和谷氨酸,在这3种样品中,谷氨酸进行美拉德反应后,所产生的5-HMF最多,而半胱氨酸参与的美拉德反应产物中5-HMF为痕量;样品4、5、6分别为半胱氨酸+甘氨酸、半胱氨酸+谷氨酸、甘氨酸+谷氨酸,其产物中5-HMF含量由高到底依次为样品6>样品5>样品4。由此可推测,谷氨酸参与的

美拉德反应产物中,5-HMF含量高,而半胱氨酸和甘氨酸参与的反应产物中,5-HMF的含量较低。

由图2B可知,有甘氨酸和谷氨酸参与的反应中,而谷氨酸、半胱氨酸+谷氨酸、甘氨酸+谷氨酸、半胱氨酸+甘氨酸+谷氨酸与木糖反应不产生5-HMF,与葡萄糖反应产生5-HMF;甘氨酸与木糖或葡萄糖反应都产生5-HMF,但与葡萄糖反应时5-HMF的含量更高。因此,在相同氨基化合物参与的美拉德反应中,若需要降低产物中的5-HMF,则选择木糖比选择葡萄糖更好。

食品中的5-HMF一般由葡萄糖或果糖降解产生。而在本实验中,有半胱氨酸存在的反应中,还原糖不论是葡萄糖还是木糖,均未检测出5-HMF的生成,推测半胱氨酸的存在可能对美拉德反应中5-HMF的生成有抑制作用,具体的机理有待进一步探讨。

在所有反应体系中,样品19的5-HMF含量最高,为32.57 mg/kg。据相关资料显示,食品中可检测到的糠醛的含量可以达到几百毫克每千克,而HMF的含量则相对较低,一般不超过几十毫克每千克。欧盟食品安全委员会食品添加剂、香料、加工助剂及食品接触材料科学小组以修正理论加权最大日摄入量(modified theoretical added maximum daily intake, mTAMDI)法为基础进行研究,认为每人每天摄入的HMF的上限为1.6 mg,远高于联合食品添加剂专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)在1996年通过大量急性和亚急性动物毒理实验所得到的每人每天540 μ g的标准。若按此标准,以人均每天食用该食品添加剂10 g计算,则可能进入人体的5-HMF含量约为326 μ g,远低于HMF的摄入上限。

3 结论

目前,美拉德反应的探索研究主要集中在美拉德反应的影响因素分析和反应条件优化,但对其香气成分和有害物质的研究较少。本实验研究不同反应底物对美拉德反应产物风味所起的影响,同时利用高效液相色谱法对产物中丙烯酰胺和5-HMF进行检测,结果表明:半胱氨酸参与反应的产物中有鸡肉味;甘氨酸反应后生成焦糖风味,可以丰富产物的风味,且使产物风味更易被接受;而谷氨酸的参与会使反应产物产生苦杏仁等异味。美拉德反应过程中,氨基酸种类越多,反应后产物风味越丰富,半胱氨酸、甘氨酸和谷氨酸3种氨基酸共同参与的反应产物中,风味物质最多,风味最好。

半胱氨酸、甘氨酸和谷氨酸与还原糖之间的美拉德反应,也会产生丙烯酰胺。其中,甘氨酸参与的反应中丙烯酰胺的生成量较少,而谷氨酸参与的反应中丙烯酰胺的生成量较多。木糖和葡萄糖对丙烯酰胺的产生差别

影响不大。谷氨酸参与的美拉德反应产物中, 5-HMF含量高, 而半胱氨酸和甘氨酸参与的反应产物中, 5-HMF的含量较低。半胱氨酸的存在可能对美拉德反应中5-HMF的生成有抑制作用, 具体机理有待进一步探讨。在相同氨基化合物参与的美拉德反应中, 若需要降低产物中的5-HMF含量, 则选择木糖比选择葡萄糖更好。利用本实验条件制备香精, 产物中的丙烯酰胺和5-HMF含量在安全范围内。

参考文献:

- [1] 李伶俐, 曾茂茂, 陈洁, 等. 葡萄糖/L-半胱氨酸美拉德反应动力学的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(10): 73-75.
- [2] 吴惠玲, 王志强, 韩春, 等. 影响美拉德反应的几种因素研究[J]. 现代食品科技, 2010, 26(5): 441-444. DOI:10.3969/j.issn.1673-9078.2010.05.003.
- [3] KWAK E J, LIM S I. The effect of sugar, amino acid, metal ion, and NaCl on model Maillard reaction under pH control[J]. Amino Acids, 2004, 27(1): 85-90. DOI:10.1007/s00726-004-0067-7.
- [4] 马振龙, 李菁, 刘骞, 等. 猪骨蛋白水解物与3种还原糖美拉德反应产物的理化特性及抗氧化活性的研究[J]. 食品科技, 2013, 38(4): 31-36.
- [5] 刘平. 美拉德肽的形成机理及功能特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 25.
- [6] 张佳敏, 王卫, 张志宇. 利用美拉德反应生产天然肉味香料及其风味成分分析[J]. 食品科技, 2011, 36(2): 248-252.
- [7] 高尧来, 朱晶莹. 美拉德反应与肉的风味[J]. 现代食品科技, 2004, 20(1): 91-94. DOI:10.3969/j.issn.1673-9078.2004.01.034.
- [8] 曾茂茂, 李伶俐, 何志勇, 等. 甘氨酸对美拉德反应体系及产生肉香味物质的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(7): 32-36.
- [9] 李伶俐. 美拉德反应体系中影响烤肉风味形成的因素研究[D]. 无锡: 江南大学, 2011: 1-5.
- [10] 钱敏, 白卫东, 赵文红, 等. 半胱氨酸-还原糖模拟美拉德反应制备肉味香精的香气成分分析[J]. 中国食品添加剂, 2015(6): 66-72. DOI:10.3969/j.issn.1006-2513.2015.06.003.
- [11] JAEGER H, JANOSITZ A, KNORR D. The Maillard reaction and its control during food processing. The potential of emerging technologies[J]. Pathologie Biologie, 2010, 58(3): 207-213. DOI:10.1016/j.patbio.2009.09.016.
- [12] 金成, 章宇, 陆柏益, 等. 食品中Maillard反应伴生化学危害物的形成机制与控制技术研究[J]. 中国食品学报, 2011, 11(9): 170-175. DOI:10.3969/j.issn.1009-7848.2011.09.017.
- [13] 孙凤祥, 赵浮梅, 杨晓云. 丙烯酰胺对小鼠的毒性作用[J]. 中国公共卫生, 2004, 20(5): 569-570. DOI:10.3321/j.issn:1001-0580.2004.05.029.
- [14] 罗荣, 赵维. 食物中丙烯酰胺对人体毒性研究[J]. 中国预防医学杂志, 2004, 5(5): 416-418. DOI:10.3969/j.issn.1009-6639.2004.05.057.
- [15] BULL R J, ROBINSON M, LAURIE R D, et al. Carcinogenic effects of acrylamide in Sencar and A/J mice[J]. Cancer Research, 1984, 44(1): 107-111.
- [16] CAPUANO E, FERRIGNO A, ACAMPA I, et al. Characterization of Maillard reaction in bread crisps[J]. European Food Research and Technology, 2008, 228(2): 311-319. DOI:10.1007/s00217-008-0936-5.
- [17] CAPUANO E, FERRIGNO A, ACAMPA I, et al. Effect of flour type on Maillard reaction and acrylamide formation during toasting of bread crisp model systems and mitigation strategies[J]. Food Research International, 2009, 42(9): 1295-1302. DOI:10.1016/j.foodres.2009.03.018.
- [18] 章银良, 周文权. 美拉德反应产物5-羟甲基糠醛含量与抗氧化活性关系研究[J]. 中国调味品, 2013, 38(1): 36-40. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2013.01.011.
- [19] 罗昌荣, 谢焰, 印黔黔, 等. 木糖/脯氨酸共裂解过程挥发性化合物形成规律[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 1-7. DOI:10.3969/j.issn.1003-5788.2013.02.001.
- [20] 陆文蔚, 黄玥, 艾清, 等. 高效液相色谱法检测月饼中丙烯酰胺的含量[J]. 食品研究与开发, 2013, 34(13): 92-95. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2013.13.025.
- [21] 李吉平, 刘文森, 高宏伟, 等. 固相萃取HPLC联用法测定食品中丙烯酰胺含量的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(2): 250-254. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2007.02.064.
- [22] 程雷, 郑炎夏, 徐虹, 等. 固相萃取-高效液相色谱-串联质谱法测定食品中的丙烯酰胺[J]. 食品科学, 2012, 33(2): 231-234. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2007.02.064.
- [23] 叶艳芬, 徐立恒. 固相萃取-高效液相色谱法测定面粉类食品中丙烯酰胺[J]. 分析实验室, 2013, 32(7): 95-97.
- [24] SUN Shiyu, FANG Yun, XIA Yongmei. A facile of acrylamide in starch food by using a solid extraction-GC strategy[J]. Food Control, 2012, 26(2): 220-222. DOI:10.1016/j.foodcont.2012.01.028.
- [25] 邵美丽, 郝星宇, 刘巍, 等. 固相萃取-高效液相色谱法检测油炸猪肉中丙烯酰胺[J]. 食品科学, 2015, 36(8): 231-235. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201508043.
- [26] 蔡培钿, 白卫东, 钱敏. 美拉德反应在肉味香精中的研究进展[J]. 中国酿造, 2009(5): 7-10. DOI:10.3969/j.issn.0254-5071.2009.05.003.
- [27] de VLEESCHOUWER K, van der PLANCKEN I, VANLOEY A, et al. Modelling acrylamide changes in foods: from single-response empirical to multiresponse mechanistic approaches[J]. Trends in Food Science and Technology, 2009, 20(3/4): 155-167. DOI:10.1016/j.tifs.2009.01.060.
- [28] 曾稳稳, 刘玉环, 阮榕生, 等. 美拉德反应所引起的食品安全问题的研究进展[J]. 食品工业科技, 2011, 32(7): 447-450.