

不同压力介质对“D-核糖 + L-半胱氨酸” Maillard 反应产物影响的研究

许洪高, 高彦祥*

(中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘要: 高压二氧化碳(HP-CO₂)和高压氮气(HP-N₂)对“D-核糖 + L-半胱氨酸”模式体系(初始 pH7.0)在 16MPa, 140℃反应 60min 后的反应产物与传统反应相比: HP-CO₂ 体系的总中间产物较传统体系高, 但褐变程度降低; HP-N₂ 体系的总中间产物及终产物均较传统体系无显著差异($P > 0.05$)。不同压力介质处理后的“D-核糖 + L-半胱氨酸”体系挥发性产物采用顶空固相微萃取富集并经气相色谱质谱检测(HS-SPME-GC-MS)发现: HP-CO₂ 对大部分挥发性物质都表现出抑制作用, 但对体现特征肉类风味的硫醇类、二硫醚类化合物有显著促进作用($P < 0.05$), HP-N₂ 对总的挥发性风味物质没有显著影响($P > 0.05$), 但对 2,3-二氢-6-甲基噻吩并[2,3-*c*]呋喃具有显著促进作用($P < 0.05$)。

关键词: 高压; Maillard 反应; 挥发性产物; 氮气; 二氧化碳; 核糖; 半胱氨酸

Effect of Different Pressure Media on Maillard Reaction Products between D-Ribose and L-Cysteine

XU Hong-gao, GAO Yan-xiang*

(College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: An aqueous ribose-cysteine model system (initial pH 7.0) was heated at 140 °C for 60 min under 16 MPa by high pressure carbon dioxide (HP-CO₂) or high pressure nitrogen (HP-N₂) and 0.28 MPa (conventional condition) and volatile compounds produced under various pressure conditions were analyzed by headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry. Higher amount of overall intermediates and less final products, together with lower browning were determined in the HP-CO₂-treated reaction system in comparison with the conventional condition-treated while no significant differences in overall intermediates and final products were observed between the HP-N₂-treated and the conventional condition-treated reaction systems. HP-CO₂ treatment showed an inhibition effect on the formation of most volatiles, but significantly improved the formation of thiols and disulfides, characteristic meat flavors ($P < 0.05$). There was no significant difference in most volatile compounds between the HP-N₂-treated and the conventional condition-treated reaction systems ($P > 0.05$), but the amount of 2,3-dihydro-6-methyl-thieno[2,3-*c*]furan was enhanced significantly ($P < 0.05$).

Key words: high pressure; Maillard reaction; volatile compounds; nitrogen; carbon dioxide; ribose; cysteine
中图分类号: TS201.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-6630(2009)17-0015-05

高压、超高压加工技术作为一种高新技术在实现杀菌、灭酶、嫩化、粉碎等单元操作的同时具有保持原料的新鲜度和色香味等优点, 因而在食品工业倍受青睐^[1-3]。目前, 食品高压处理前后产品自身的物理、化学和生物学特性的维持与改变为人们所关注, 而食品在高压处理过程中发生的化学和生物化学变化尚不为人类所完全了解与掌握。超高压技术处理食品蕴藏的理论基础及高压-高温技术对食品风味轮廓的影响需要进行深入研究。

高压特别是以水为压力传导介质的超高压等静液压 (high hydrostatic pressure, HHP) 对 Maillard 反应的影响在国外已有一定的研究^[4-7]; Bristow 等发现, HHP 促进 Amadori 重排产物 (amadori rearrangement product, ARP) 的生成, 但抑制其降解^[6]。HHP 能够提高 Maillard 反应中甲基吡嗪等羟醛缩合反应 (aldol condensation) 产物的形成速率^[7]。不同压力介质对 Maillard 反应挥发性产物的影响, 特别是与反应体系直接接触的压力介质 (如二氧

收稿日期: 2008-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(20436020)

作者简介: 许洪高(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事食品添加剂研究。E-mail: zgndxhg@163.com

* 通讯作者: 高彦祥 (1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事食品添加剂及食品高新技术研究。E-mail: gyxcau@126.com

化碳、氮气等)对 Maillard 反应挥发性产物的影响尚未见报道。

核糖与半胱氨酸是肉类特征风味化合物的前体物质^[8]。本实验通过研究传统和高压条件下“D-核糖+L-半胱氨酸”模式体系的 Maillard 反应,旨在揭示不同压力介质(二氧化碳、氮气)在高温高压(140℃、16MPa)条件下对“D-核糖+L-半胱氨酸”反应产物的褐变程度及挥发性风味物质的影响。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

D-核糖(>98%) 美国 Amresco 公司; L-半胱氨酸、焦磷酸钠、正己烷、正庚烷(均为分析纯) 国药集团化学试剂有限公司; 焦磷酸二氢二钠、C₈~C₂₀ 正构烷烃混标、正十三烷 Sigma-Aldrich Chemical 公司; 二氢-3-(2H)-噻吩酮、糠基硫醇、糠醛、糠醇、二氢-2-甲基-3(2H)-噻吩酮、双(2-甲基-3-咪喃基)二硫醚、2-乙酰基噻唑、甲基吡嗪、2,6-二甲基吡嗪、3-巯基-2-丁酮、3-巯基-2-戊酮 国内某香精香料公司。

1.2 仪器与设备

手动固相微萃取(solid phase microextraction, SPME)手柄、DVB/CAR/PDMS(50/30μm, 1cm)萃取头 美国 Supelco 公司; 6890N-5973 气相色谱-质谱联用仪 美国 Agilent 公司; CWYF-2 型高压反应设备(图1) 南通华安石油科研仪器有限公司; UV757CRT 紫外可见分光光度计 上海精密科学仪器有限公司。

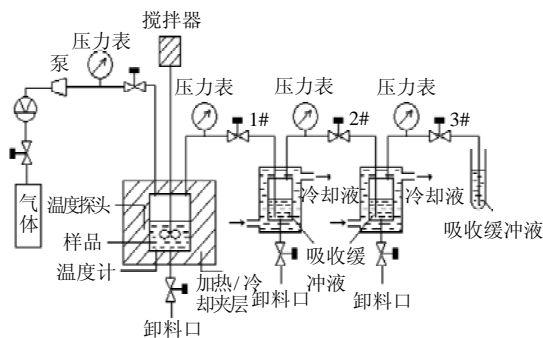


图1 高压反应设备简图

Fig.1 Schematic diagram of high pressure reaction system

1.3 样品制备

等摩尔浓度(0.1mol/L)的核糖与半胱氨酸磷酸盐溶液(pH7.0)各50ml在高压反应釜中机械混合均匀后,密闭通入一定量的高纯度氮气(>99.999%,北京普莱克斯气体有限公司)或高纯度二氧化碳气体(>99.99%,北京普莱克斯气体有限公司)后,升温至140℃并保持60min,体

系反应结束后用(0±3)℃的30%(V/V)乙醇水溶液冷却至室温后卸压;将载有挥发性风味物质的N₂或CO₂依次通过两个预先贮有50ml 0.2mol/L pH 7.0的磷酸盐缓冲液的收集釜后,再用50ml相同磷酸盐缓冲液对收集釜II出口(图1中3#阀)气体可能携带的挥发性物质进行吸收。反应结束后,对反应釜中的反应产物、收集釜内及收集釜II出口的缓冲液吸收液分别灌装。反应釜中的部分反应液采用分光光度法检测总的中间产物和终产物,而其余反应物及缓冲液吸收液保存于-20℃,待用。为了比较不同压力介质热处理及传统热处理 Maillard 反应产物的区别,核糖与半胱氨酸混合液于上述反应釜中,在无N₂或CO₂参与的情况下,140℃密闭反应60min作为对照。所有样品均制备两个平行样且每个样品的分析不低于3个平行。

1.4 总中间产物与终产物测定

用分光光度计分别检测反应产物280nm和420nm波长处的吸光度以评价总中间产物及终产物的相对含量^[9-10]。

1.5 挥发性物质的分析

1.5.1 挥发性产物样品制备

将反应产物及吸收缓冲液于4℃解冻后,取1ml反应液或15ml吸收缓冲液分装于15ml及60ml的聚四氟乙烯/硅胶隔垫、开孔盖的棕色样品瓶中,添加15.13ng正十三烷内标后密封;于60℃水浴中预先恒温平衡10min,然后将老化后的萃取纤维(DVB/CAR/PDMS, 1cm)裸露于样品瓶顶部空间对挥发性产物萃取20min后,热解吸进样分析。

1.5.2 色谱分析

吸附于固相微萃取纤维的挥发性产物在气相色谱仪270℃的进样口不分流模式热解吸10min。挥发性物质经DB-5ms毛细管色谱柱(60m×0.32mm, 0.5μm)分离。载气为He,流速1.6ml/min,恒流模式;程序升温:接口温度280℃,起始柱温40℃,以20℃/min升至60℃,保留5min,再以4℃/min升至250℃,保留10min^[11-13]。

质谱条件:离子源温度230℃,四极杆温度150℃,电离方式EI,电离电压70eV,灯丝电流36mA, m/z扫描范围20~380amu。挥发性产物的线性保留指数(linear retention index, LRI)根据相同条件下C₆、C₇、C₈~C₂₀正构烷烃的分析结果进行计算。

1.5.3 定性定量分析

挥发性产物经计算机检索后初步与NIST98和Wiley7n数据库匹配定性,并尽可能根据标准品或文献报道的线性保留指数进行验证;定量分析通过总离子流图中各挥发性产物与内标物峰面积之间的比较而获得(假设不同挥发物与内标物的质谱检测器的响应系数为1),这仅仅对反应物顶部空间的挥发性产物的比例进行了近

似定量分析。报道数据均是两次平行实验结果的平均值，挥发性产物的平均变异系数 < 20%。

1.6 统计分析

选用 OriginPro 7.5 软件(OriginLab Corporation, Northampton, USA)对数据进行单边方差分析(ANOVA)。显著性分析采用 Tukey 检验，显著性水平采用 0.05。

2 结果与分析

pH 值是影响 Maillard 反应的重要因素之一，预实验发现：0.05mol/L 的“D-核糖+L-半胱氨酸”磷酸盐缓冲液反应体系在初始 pH7.0、140℃反应 60min 的产物具有典型的火腿风味、且挥发性产物的量较其他 pH 值体系大，所以本研究选择采用 pH7.0 的磷酸盐缓冲液反应体系。

2.1 不同压力介质对总中间产物及终产物的影响

Maillard 反应产物在 280nm 和 420nm 的吸光度通常用作总中间产物及终产物的评价指标，不同压力介质对既定模式体系 Maillard 反应的总中间产物及褐变程度的影响见表 1。

表 1 “D-核糖+L-半胱氨酸”不同压力介质 140℃反应 60min 产物的 pH 值及吸光度

Table 1 Effects of various pressure media on formation of overall intermediates and final products from ribose-cysteine model system (heated at 140 °C for 60 min, the same below)

	传统	HP-N ₂	HP-CO ₂
初始 pH	7.0	7.0	7.0
最终 pH	6.2	6.3	6.0
A _{280nm}	0.430*	0.419*	0.690**
A _{420nm}	0.664 ⁱ	0.647 ⁱ	0.465 ⁱⁱ

注：A_{280nm} 及 A_{420nm} 是反应产物分别稀释 100 倍和 10 倍后的检测结果；同行数据后符号相同者表示差异不显著(P > 0.05)；符号不同者表示差异显著(P < 0.05)。

从表 1 可知，HP-N₂ 对总的中间产物及终产物的生成与传统反应相比没有显著差异(P > 0.05)，这与超高压等静液压对 Maillard 反应的作用结果并不一致^[5,10]，这可能是 HP-N₂ 压力较低(< 100MPa)导致的；而 HP-CO₂ 对总中间产物的生成有明显的促进作用(P < 0.05)，这可能是既定条件下，CO₂ 成为超临界态，反应体系成为均相，反应有效体积增大而易于向分解方向进行；另外与传统反应产物的褐变程度相比，HP-CO₂ 能显著抑制反应体系的褐变(P < 0.05)，此乃 HP-CO₂ 体系 pH 值的降幅高于传统和 HP-N₂ 体系，从而 Maillard 反应褐变受到抑制^[14]。

2.2 不同压力介质对挥发性物质形成的影响

不同条件下“D-核糖+L-半胱氨酸”模式体系传统 Maillard 反应的挥发性产物超过 180 种^[15]，本研究采用的 DB-5ms 毛细管色谱柱能够分析的物质超过 100 种，表 2 中列举的是在反应体系中能够完全分离鉴定的物质，但未对每种物质的响应系数进行校正，也未考虑不同挥发性物质在萃取纤维与反应物间分配系数的差异，但相同萃取条件下获得的表 2 数据在某种程度上能够阐释 HP-N₂ 及 HP-CO₂ 压力介质对不同挥发性物质形成的影响。

表 2 不同压力介质对“D-核糖+L-半胱氨酸”Maillard 反应挥发性物质的影响

Table 2 Effects of various pressure media on formation of volatile compounds from ribose-cysteine model system

LRI ^a	挥发性物质	传统	N ₂	CO ₂	鉴定方法 ^c
嘌呤类					
773	2-甲基嘌呤	5.00	4.87	—	ms + LRI ^[12]
873	2,5-二甲基嘌呤	4.78	3.51	—	ms + LRI ^[12]
1068	2-噻吩基甲醇	9.11	6.55	27.94	ms
1095	2-乙酰基嘌呤	15.06	20.69	4.18	ms + LRI ^[16]
1100	2-甲酰-3-甲基嘌呤	+	7.62	5.82	ms
1128	5-甲基-2-噻吩基甲醛	22.78	21.58	59.67	ms + LRI ^[17]
1136	噻吩基乙醛	-	1.45	21.44	ms
1149	2-(2-甲基丙基)-噻吩	6.29	5.46	-	ms
1189	1-(2-噻吩基)-1-丙酮	11.82	10.56	18.02	ms + LRI ^[11]
1192	3-丙酰基嘌呤	4.92	5.94	6.98	ms + LRI ^[11]
1194	2-乙酰基-3-甲基嘌呤	16.60	18.05	5.98	ms
1208	3-乙基-2-甲酰基嘌呤	13.52	6.84	19.05	ms + LRI ^[16]
1289	3-乙酰基-2,5-二甲基嘌呤	17.19	32.85	11.88	ms
吡嗪类					
825	甲基吡嗪	47.94	46.34	4.80	MS + LRI
914	2,6-二甲基吡嗪	11.72	14.39	—	MS + LRI
999	2-乙基-6-甲基吡嗪	8.03	6.10	4.01	ms + LRI ^[11]
硫醇类					
818	3-巯基-2-丁酮	—	—	tr	MS + LRI
869	2-甲基-3-咪唑基硫醇	—	—	19.08	MS + LRI
904	3-巯基-2-戊酮	—	—	0.51	MS + LRI
913	2-糠基硫醇	—	—	17.60	MS + LRI
980	3-噻吩基硫醇	—	—	7.70	ms + LRI ^[16]
1066	2-甲基-3-噻吩基硫醇	—	0.92	11.13	ms + LRI ^[12]
噻唑类					
933	4,5-二甲基噻唑	tr	7.82	—	ms + LRI ^[13]
1022	2-乙酰基噻唑	36.71	37.59	7.83	MS + LRI
1113	2-乙酰基-4-甲基噻唑	3.22	3.56	—	ms
咪唑类					
832	糠醛	—	—	6.20	MS + LRI
850	糠醇	—	—	3.48	MS + LRI
952	1-(2-咪唑基)-2-丙酮	—	—	3.97	ms
稠环噻吩类					
1197	2,3-二氢-6-甲基噻吩并[2,3-c]咪唑	44.85	155.23	127.35	ms + LRI ^[16]
1220	噻吩并[2,3-b]噻吩	41.09	46.54	18.54	ms + LRI ^[16]
1262	噻吩并[3,2-b]噻吩	42.33	60.59	11.52	ms
1306	2-甲基-噻吩并[2,3-b]噻吩	4.53	4.47	—	ms

续表 2

LRI ^b	挥发性物质	传统	N ₂	CO ₂	鉴定方法 ^c
1311	一种二氢噻吩并噻吩	+	+	9.70	ms + LRI ^[16]
1325	一种二氢噻吩并噻吩	888.24	873.41	480.91	ms
1345	5-乙基-2-噻吩基甲酸	13.72	13.80	2.80	ms
1364	一种甲基噻吩并噻吩	13.80	17.37	37.77	ms
1381	一种甲基二氢噻吩并噻吩	74.11	81.84	84.16	ms + LRI ^[16]
1418	一种甲基二氢噻吩并噻吩	8.30	7.14	37.06	ms + LRI ^[16]
1423	一种甲基二氢噻吩并噻吩	46.40	42.67	68.51	ms + LRI ^[16]
二硫醚类					
1542	双(2-甲基-3-咪唑基)二硫醚	-	-	11.30	MS + LRI
1596	3-(2-咪唑基)二硫基-2-丁酮	-	-	2.74	LRI ^[18]
1643	2-甲基-3-(2-噻吩基)咪唑	-	-	1.74	LRI ^[18]
1702	2,3-二氢-5-甲基-4-(2-甲基-3-咪唑基)二硫基咪唑	-	-	6.77	ms
1713	4-巯基-1-(2-甲基-3-噻吩基)硫基-1-丁酮	-	-	4.75	ms
1745	2-甲基-3-(2-甲基-3-噻吩基)二硫基咪唑	-	-	6.80	LRI ^[16]
1921	2-甲基-3-(2-噻吩基)二硫基噻吩	-	-	1.74	ms
噻吩酮类					
959	二氢-3(2H)-噻吩酮	-	1.98	-	MS + LRI
996	二氢-2-甲基-3(2H)-噻吩酮	12.75	15.75	27.17	MS + LRI
1026	(E/Z)-二氢-2,(4/5)-二甲基-3(2H)-噻吩酮	7.04	4.78	5.68	ms + LRI ^[16]
多硫杂环化合物类					
1153	(E或Z)-3,5-二甲基-1,2,4-三硫杂环戊烷	12.34	17.79	-	MS ^[19]
1160	(E或Z)-3,5-二甲基-1,2,4-三硫杂环戊烷	15.22	18.03	-	MS ^[19]
1185	1,2-二硫杂环己烷-4-酮	-	-	8.30	ms
1232	3-甲基-1,2-二硫杂环己烷-4-酮	-	-	11.40	MS ^[19]
1266	3-甲基-1,2,4-三硫杂环己烷	31.01	49.41	-	MS ^[19]
1274	2-(异丙基)-1,3-二硫杂环戊烷	-	1.29	10.15	MS ^[19]
1413	(E或Z)-4,6-二甲基-1,2,3,5-四硫杂环己烷	17.30	7.92	tr	MS ^[19]
1471	3,6-二甲基-1,2,4,5-四硫杂环己烷	2.49	-	-	MS ^[19]

注:表中数据为“D-核糖+L-半胱氨酸”模式体系140℃反应60min的产物顶空近似含量(ng/ml),两次平行实验结果的平均值;tr.痕量(< 0.3ng/ml);-,低于检测限而未检测到(< 0.07ng/ml);+,少量存在但与其他峰未完全分开。b.线性保留指数(linear retention index, LRI)。c.MS + LRI,质谱和LRI都与标准品相吻合;ms + LRI,质谱与NIST98或Wiley7n谱库中的标准化合物吻合且LRI与引用的文献值吻合;MS,质谱与引用文献吻合;ms,质谱与NIST 98或Wiley 7n谱库中的标准化合物谱图吻合。

从表2可以看出,既定条件下,“D-核糖+L-半胱氨酸”模式体系的Maillard反应挥发性产物大致可分为噻吩、硫醇、稠环噻吩、二硫醚等几大类,其中又以噻吩类物质最多。根据数据处理软件对不同样品总离子流图(total ion counts, TIC)的积分处理发现:与传统反应相比,HP-N₂提高了总挥发性产物生成量,而HP-CO₂对总挥发性产物起抑制作用;但对某类物质或某种物质而言,不同压力介质的作用效果不尽相同。

在传统体系、高压氮气(HP-N₂)和高压二氧化碳(HP-CO₂)体系产生的挥发性产物中,一种二氢噻吩并噻吩(LRI = 1325)的含量最高,HP-N₂对此物质的影响并不显著($P > 0.05$),而HP-CO₂显著抑制此化合物的生成($P < 0.05$)。稠环化合物中的2,3-二氢-6-甲基噻吩并[2,3-c]咪唑在高压处理后均显著高于传统体系($P > 0.05$)。

硫醇类化合物和二硫醚类化合物在低浓度时均体现强烈的肉的特征风味,由于极低的香气阈值而表现出较高的香气强度。从表2可以看出,HP-CO₂处理的反应体系与其他两个反应体系相比有较多硫醇类和二硫醚类风味物质得到鉴定。这可能与反应过程中CO₂溶解于反应底物体系降低pH值有关^[20],因为糠硫醇和二硫醚化合物更易于在低pH值体系生成^[8]。

噻吩类化合物是检测到的挥发性产物中种类最多的一类。与传统体系相比,HP-N₂及HP-CO₂处理对不同产物的作用不尽相同。3-甲基-2-噻吩醛是HP-CO₂体系中检出量最多的噻吩类化合物,达到59.67ng/ml,而3-乙酰-2,5-二甲基噻吩是HP-N₂体系中含量最多的噻吩类物质(32.85ng/ml)。

糠醛是戊糖参与Maillard反应产物中的一种重要中间产物。糠醛具有甜香、焦糖香、茴香辛香和木香等香韵,几乎存在于各种食品中。在核糖参与的Maillard反应过程中,糠醛是ARP沿1,2-烯醇化路径通过羟基消除步骤形成3-脱氧戊糖再经过脱氢和环化步骤而产生的^[21]或由核糖在酸性、高温条件下直接环化、脱水生成。Mottram等认为ARP沿1,2-烯醇化路径发生降解在低pH值体系更容易发生^[8],而HP-CO₂体系中,与反应底物直接接触的大量CO₂会降低体系的pH值^[14],从而使ARP沿1,2-烯醇化路径进行形成糠醛。

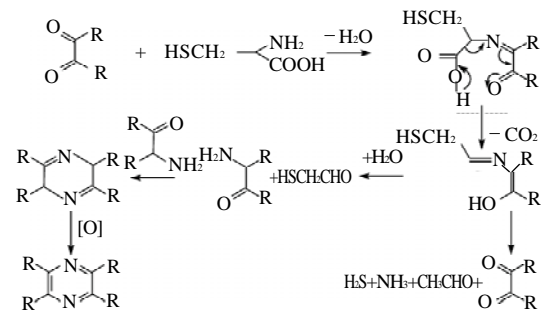


图2 半胱氨酸的Strecker降解及烷基吡嗪的形成路径^[8]
Fig.2 Strecker degradation of cysteine and formation of alkyl pyrazines^[8]

3 结论

CO₂高压介质,由于其自身的溶解性引起“D-核糖+L-半胱氨酸”高水分模式体系pH值的降低,从而抑制了Maillard反应的褐变;pH值的降低,挥发性风味物质中的硫醇类、二硫醚类特征肉类风味成分得到累积。非活泼性的N₂介质,在16MPa的实验条件下,对所选模式体系总的中间产物及终产物与传统体系相比没有显著差异($P > 0.05$);而部分稠环类化合物及半胱氨酸降解产物聚合物的产量则较传统反应高。但更多风味物

质含量之间的差异在目前还不能解释, HP-N₂ 及 HP-CO₂ 对 Maillard 反应的影响还有待进一步深入系统研究。

参考文献:

- [1] SAN MARTÍN M F, BARBOSA-CÁNOVAS G V, SWANSON B G. Food processing by high hydrostatic pressure[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2002, 42(6): 627-645.
- [2] BEILKEN S L, MACFARLANE J J, JONES P N. Effect of high pressure during heat treatment on the wanner-bratzler shear force values of selected beef muscles[J]. *Journal of Food Science*, 1990, 5(1): 15-18.
- [3] BAYINDIRLI A, ALPAS H, BOZOĞLU F, et al. Efficiency of high pressure treatment on inactivation of pathogenic microorganisms and enzymes in apple, orange, apricot and sour cherry juices[J]. *Food Control*, 2006, 17(1): 52-58.
- [4] TAMAOKA T, ITOH N, HAYASHI R. High pressure effect on Maillard reaction[J]. *Agricultural and Biological Chemistry*, 1991, 55(8): 2071-2074.
- [5] MORENO F J, MOLINA E, OLANO A, et al. High-pressure effects on Maillard reaction between glucose and lysine[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(2): 394-400.
- [6] BRISTOW M, ISAACS N S. The effect of high pressure on the formation of volatile products in a model Maillard reaction[J]. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2*, 1999, 28(10): 2213-2218.
- [7] HILL V M, ISAACS N S, LEDWARD D A, et al. Effect of high hydrostatic pressure on the volatile components of a glucose-lysine model system[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1999, 47(9): 3675-3681.
- [8] MOTTRAM D S. Flavor compounds formed during the Maillard reaction[M]//PARLIAMENT T H, MORELLO M J, MCGORRIN R J. *Thermally generated flavors: Maillard, microwaves, and extrusion processes*. Washington, DC: American Chemical Society, 1994: 104-126.
- [9] KOMTHONG P, KATO H, IGURA N, et al. Effect of high hydrostatic pressure combined with pH and temperature on glucose/fructose-leucine/lysine/glutamate browning reactions[J]. *Journal of Faculty of Agriculture Kyushu University*, 2003, 48(1/2): 135-142.
- [10] HILL V M, LEDWARD D A, AMES J M. Influence of high hydrostatic pressure and pH on the rate of Maillard browning in a glucose-lysine system[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44(2): 594-598.
- [11] MOTTRAM D S, WHITFIELD F B. Maillard-lipid interactions in nonaqueous systems: volatiles from the reaction of cysteine and ribose with phosphatidylcholine[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995, 43(5): 1302-1306.
- [12] AMES J M, GUY R C E, KIPPING G J. Effect of pH and temperature on the formation of volatile compounds in cysteine/reducing sugar/starch mixtures during extrusion cooking[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(4): 1885-1894.
- [13] MOTTRAM D S, WHITFIELD F B. Volatile compounds from the reaction of cysteine, ribose, and phospholipid in low-moisture systems [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995, 43(4): 984-988.
- [14] ENICK R M, BECKMAN E J, SHI C M, et al. Remediation of metal-bearing aqueous waste streams via direct carbonation[J]. *Energy and Fuels*, 2001, 15(2): 256-262.
- [15] CHEN Y, HO C T. Effect of carnosine on volatile generation from Maillard reaction of ribose and cysteine[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(8): 2372-2376.
- [16] WHITFIELD F B, MOTTRAM D S. Investigation of the reaction between 4-hydroxy-5-methyl-3(2H)-furanone and cysteine or hydrogen sulfide at pH 4.5[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1999, 47(4): 1626-1634.
- [17] PARKER J K, HASSELL G M E, MOTTRAM D S, et al. Sensory and instrumental analyses of volatiles generated during the extrusion cooking of oat flours[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(8): 3497-3506.
- [18] MOTTRAM D S, MADRUGA M S, WHITFIELD F B. Some novel meatlike aroma compounds from the reactions of alkanediones with hydrogen sulfide and furanathiols[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995, 43(1): 189-193.
- [19] ZHANG Y, CHIEN M, HO C T. Comparison of the volatile compounds obtained from thermal degradation of cysteine and glutathione in water [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1988, 36(5): 992-996.
- [20] GEVAUDAN S, LAGAÚDE A, DE LA FUENTE B T, et al. Effect of treatment by gaseous carbon dioxide on the colloidal phase of skim milk [J]. *Journal of Dairy Science*, 1996, 79(10): 1713-1721.
- [21] WHITFIELD F B, MOTTRAM D S, BROCK S, et al. Effect of phospholipid on the formation of volatile heterocyclic compounds in heated aqueous solutions of amino acids and ribose[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1988, 42(3): 261-272.