

酶解牛肉蛋白肽在美拉德反应中降解趋势

程林坤, 宋焕禄*, 王鹏霄

(北京工商大学 北京市食品风味化学重点实验室, 北京 100048)

摘 要: 目的: 研究牛肉蛋白肽在美拉德(Maillard)反应体系中肽的降解变化, 探究肽 Maillard 反应体系中肉香味产物与反应物之间的对应关系。方法: 分别建立牛肉酶解液及由其制得肽的 Maillard 反应体系以及肽的热降解反应体系; 用高效尺寸排阻色谱、GC-MS 方法分别对牛肉蛋白肽和 Maillard 反应产物进行分析。结果: 牛肉蛋白酶解肽在 Maillard 反应之后与热降解反应之后的尺寸排阻色谱图并不相同, GC-MS 方法从牛肉酶解液的 Maillard 反应体系中检测出 36 种化合物, 肽的反应体系中则检测出 31 种。结论: 牛肉蛋白肽参与 Maillard 反应的主体部分分子质量介于 1000~2000D 之间; 肽参与的 Maillard 反应体系中, 呋喃与呋喃酮类物质主要产生于糖类的热降解反应, 吡嗪类物质产生于肽和木糖的反应, 噻唑、噻吩类及硫醇类物质主要由硫胺素降解产生。

关键词: 牛肉; 酶解蛋白肽; Maillard 反应; 降解

Degradation of Peptides Derived from Enzymatic Hydrolysis of Beef during Maillard Reaction

CHENG Lin-kun, SONG Huan-lu*, WANG Peng-xiao

(Beijing Key Laboratory of Flavor Chemistry, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: Objective: To investigate the degradation of peptides produced by double enzymatic hydrolysis of beef with flavourzyme and papain during Maillard reaction and explore the relationship between flavor products and reactants in model system. Methods: Maillard reaction model systems were established by using beef protein hydrolysate and peptides obtained from it as reaction matrix, respectively, and the resultant reaction products were H-MRPs and P-MRPs. The thermodegradation products of beef protein peptides, named as P-TDPs, served as a control. High performance size exclusion chromatography (HPSEC) and GC-MS were used for the comparative analysis of beef protein peptides and volatile compounds generated from Maillard reaction, respectively. Results: P-MRPs and P-TDPs showed different HPSEC chromatograms. Totally 36 compounds were detected in H-MRPs and the number of compounds found in P-MRPs was 31. The majority of peptides participating in Maillard reaction had a molecular weight from 1000 to 2000D. Furans and furanones were the major products from the degradation of carbohydrates. Pyrazines were produced from the reaction of peptide and xylose. Thiazole, thiophene and thiols were generated from the degradation of thiamin.

Key words: beef; protein hydrolysed peptide; Maillard reaction; degradation

中图分类号: TS251.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2011)09-0046-05

Maillard 反应是肉类产生香味的重要途径之一。随着人们对天然肉类香精需求的不断增加, 采用 Maillard 反应来制备肉类香精已逐渐成为趋势。以动物蛋白酶解物为原料的 Maillard 反应制备肉香味物质的研究也在逐渐增多。1978 年, Chhuy 等^[1]获得了一项专利即用胃蛋白酶/胰蛋白酶水解火鸡肉制备的肉蛋白质酶解物为原料, 配以半胱氨酸、葡萄糖等进行 Maillard 反应制备肉香味物质。迄今, 本实验室通过大量实验, 分别报道了鸡肉、牛肉、猪肉、虾等肉味香精的制备, 并对

产物进行了分析^[2-5]。

在酶解蛋白肽参与 Maillard 反应活性的研究方面, Lieske^[6]报道了在胃蛋白酶/胰蛋白酶水解的鸡肉蛋白酶解物中, 分子质量为 2000~5000D 的肽对挥发性肉香味的贡献最大。而颜治等^[7]则在对肉味香精的调研中发现, 只有相对分子质量小于 200 的化合物才会有牛肉味, 也有研究表明参与 Maillard 反应的肽分子质量在 350~5000D 最好^[8]。由于这些研究之间说法不一, 对于参与 Maillard 反应的肽的分子质量存在分歧, 所以对于

收稿日期: 2010-09-14

作者简介: 程林坤(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品风味化学。E-mail: lenqueen@126.com

* 通信作者: 宋焕禄(1961—), 男, 教授, 博士, 研究方向为食品风味化学。E-mail: songhl@th.btbu.edu.cn

Maillard反应中所需肽分子的大小仍需进一步研究才可以确定。

本实验研究在 Maillard 反应过程中,作为反应底物的牛肉蛋白肽的变化。利用高效尺寸排阻色谱,对比肽、Maillard 反应产物(P-MRP)、肽热降解产物(P-TDP)的分子质量的变化;采用气相色谱-质谱(GC-MS)联用法对 P-MRP 中挥发性化合物进行检测,并与以牛肉酶解液为底物的 Maillard 反应产物(H-MRP)进行对比分析,以研究牛肉酶解肽在 Maillard 反应中对生成肉香味化合物的作用。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

牛肉购于北京华光超市,去除脂肪部分、切碎冷冻保存。

复合风味酶(Flavourzyme, F; 500LAPU/g)、木瓜蛋白酶 PSM 500(1:500) 丹麦诺维信公司;乙腈、三氟乙酸均为色谱纯 美国 Fisher 公司。

1.2 仪器与设备

高效液相色谱仪、6890N-5975C 气相色谱-质谱联用仪 美国 Agilent 公司;TDSA2 热脱附自动进样系统 德国 Gerstel 公司;样品吹扫装置 北京 Bomex 玻璃仪器公司;DKB-501A 超级恒温水槽 上海精宏实验设备有限公司;PHS-3D 功能型 pH 计 上海三信仪表厂;TB214 型电子天平 北京赛多利斯仪器系统有限公司;YX-280D 型灭菌锅 江阴滨江医疗设备有限公司;TSK-Gel 2000 SWXL 色谱柱(300mm × 7.8mm) 日本 Tosoh 公司;DB-5 毛细管柱 美国 J&W Scientific 公司。

1.3 方法

1.3.1 牛肉蛋白肽的制备

牛肉解冻后绞碎,称取一定量,加入微量水后于 90℃ 加热变性 5min,调温至 45℃,按 F 与 PSM 质量比为 2:1、总添加量 0.3% 加酶,酶解 1h。酶解完毕,酶解液于 90℃ 灭酶活 10min。酶解液中加入 5 倍体积的 15g/100mL 三氯乙酸溶液,静置 5min,4℃、4000r/min 离心 20min。上清液冷冻干燥所得产物即为牛肉酶解肽。

1.3.2 牛肉蛋白肽分析

高效尺寸排阻法(HPSEC)测分子质量,检测条件:Agilent 高效液相色谱仪,TSK-Gel 2000 SWXL 色谱柱(300mm × 7.8mm),洗脱液为 10% 乙腈水溶液加入 0.05% 三氟乙酸,流速 0.5mL/min,检测波长为 220nm。分子质量校正曲线所用标准品为细胞色素 c(M_w 12500)、抑肽酶(M_w 6512)、杆菌酶(M_w 1422)、谷胱甘肽(M_w 307),校正曲线方程为 $y = -0.1822x + 6.9049$ 。

1.3.3 牛肉蛋白肽 Maillard 反应

根据前期反应条件优化^[9],牛肉蛋白肽参与 Maillard 反应(P-MRP)条件为:200mg 牛肉酶解肽溶于 50mL pH5.0 的磷酸盐缓冲液,然后分别加入 120mg L-半胱氨酸、120mg D-木糖、120mg VB₁(硫胺素)。反应温度为 125℃、反应时间 60min。牛肉蛋白肽热反应(空白实验, P-TDP):100mg 肽溶于 50mL pH5.0 的磷酸盐缓冲液,反应温度、时间同上。以牛肉酶解液为底物的 Maillard 反应体系作为对照实验(H-MRP):取 1.3.1 节中酶解、灭酶活后的酶解液 100g,分别加入 1.2g L-半胱氨酸、1.2g D-木糖、1.2g VB₁,反应温度为 125℃、反应时间 60min。以 H-MRP 中检测出的挥发性化合物为标准,比较 P-MRP,以分析牛肉蛋白肽在 Maillard 反应中对形成关键挥发性化合物的作用。

1.3.4 Maillard 反应产物分析

1.3.4.1 动态顶空(DHS)制样

25mL Maillard 反应产物(MRP)置于顶空瓶中,水浴加热维持在 50℃;平衡 30min 后 100mL/min 流速氮气进行吹扫,使用 Tenax 柱捕集挥发性风味化合物 60min。

1.3.4.2 热脱附(TDS)进样

动态顶空所制的样品采用热脱附自动进样系统(TDSA2)进样(热脱附里含有冷进样系统)。Tenax 吸附管放入 TDSA2 自动进样。热脱附系统(TDS3)条件为:初始温度 40℃,保持 0.5min,延迟 2min,以 60℃/min 升温到 230℃,保持 1min,传输线温度 300℃。冷进样系统 CIS4(cooled injection system)条件为:初始温度为 -100℃,平衡 0.2min,以 12℃/min 升温到 300℃,保持 0.5min。

1.3.4.3 气相色谱-质谱分析样品

采用 GC-MS 联用技术对反应所得到的样品进行分析,选用 DB-5 的毛细管柱(30m × 0.25mm, 0.25μm)进行气相色谱分离,采用高纯氦气作为载气,流速为 1.2mL/min(恒流模式)。气相色谱所采用的程序升温为:起始 40℃,保持 3min,以 5℃/min 升到 200℃,保持 0min,再以 10℃/min 升到 250℃ 保持 3min。

质谱电离方式为 EI,电子能量 70eV,离子源温度 230℃,四级杆温度 150℃。溶剂延迟 3min。质谱质量扫描范围 40~550u。化合物的质谱鉴定在谱库 NIST 2.0 进行。

2 结果与分析

2.1 牛肉蛋白肽的分子质量分布分析

牛肉蛋白肽的分子质量分布特点见图 1。根据高效尺寸排阻色谱的分析结果,将牛肉蛋白肽分成 4 段连续的肽段,分子质量范围分别为 2000~3000、1000~2000、500~1000D 和 <500D。使用 Agilent 液相色谱化

学工作站,对谱图进行百分比法处理,各部分占总体的质量百分比见表1。

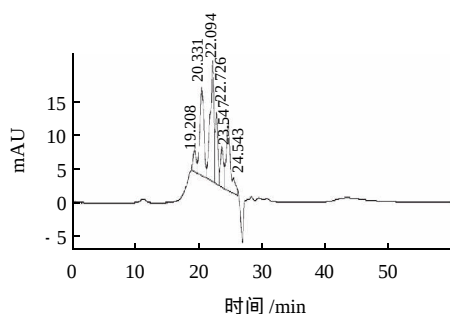


图1 牛肉蛋白肽高效尺寸排阻色谱图

Fig.1 Molecular mass distribution of beef protein peptides determined by HPSEC

表1 牛肉蛋白肽、P-MRP、P-TDP 分子质量分布及降解变化
Table 1 Molecular mass distribution and degradation rates of beef protein peptides in P-MRPs and P-TDPs

肽分子质量范围/D	2000 ~ 3000	1000 ~ 2000	500 ~ 1000	< 500
牛肉蛋白肽 /%	6.2199	25.4283	41.9408	26.4111
P-MRP 百分比 /%	2.9503	18.6073	47.213	31.2295
P-MRP 降解率 /%	- 52.56	- 26.82	+12.57	+18.24
P-TDP 百分比 /%	0	17.1693	68.4887	14.3419
P-TDP 降解率 /%	- 100	- 7.23	+45.06	- 54.08

注: - 此部分肽段在 Maillard 反应或热反应降解后占总体的百分比下降; +. 百分比增加; 表中数据平行测定两次。

2.2 牛肉蛋白肽在 Maillard 反应中的降解变化

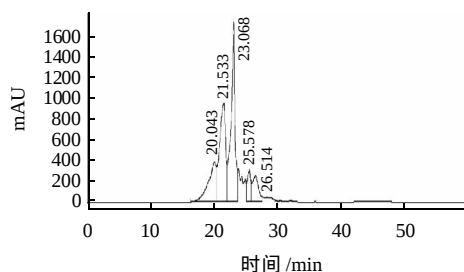


图2 P-TDP 高效尺寸排阻色谱图

Fig.2 Molecular mass distribution of peptides P-TDP determined by HPSEC

Maillard 反应中,热反应是肽降解的重要方式之一。图2所示为P-TDP的高效尺寸排阻色谱图,与图1中的牛肉蛋白肽的色谱图在分子质量的分布及各部分的含量区别比较明显,说明肽在热反应中发生了降解。2000~3000D 分子质量范围的肽全部降解,分子质量低于500D的肽段降解也比较明显,而只有500~1000D肽段的含量不减反增,因此推测,在热反应过程中各部分肽段实际都发生了降解,2000~3000D肽段范围全部发生降解生成1000~2000D的肽,甚至包括500~1000D

和<500D分子质量范围肽产生,因此1000~2000D范围的肽降解率比较低;在热反应产物中,500~1000D段肽的相对含量增加,表明此分子质量范围肽段在热降解中反应活性较低,且大分子肽的热降解反应以生成此分子段的肽为主。

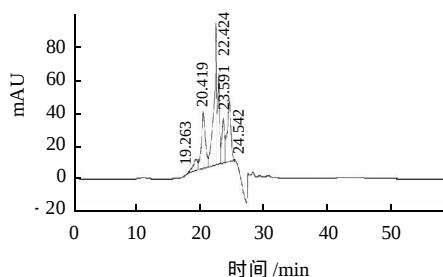


图3 P-MRP 高效尺寸排阻色谱图

Fig.3 Molecular mass distribution of P-MRP determined by HPSEC

图3为P-MRP的高效尺寸排阻色谱图,与图1和图2对比均有明显的区别,说明 Maillard 反应中肽既发生了变化,又不只是简单的热降解。2000~3000D范围的肽降解率为52.56%,而此范围的肽在热反应中全部降解,根据Hodge^[10]提出的 Maillard 反应路线中, Maillard 反应的初始阶段是氨基酸中的氨基和还原糖中的羰基发生羰氨缩合反应,因此可以推断这部分肽在降解后,又由低分子质量的肽发生羰氨缩合反应,且反应产物分子质量介于2000~3000D之间。1000~2000D分子段的肽在 Maillard 反应中降解率为26.82%,远高于此部分肽在热反应中的降解率,由此可以推测得出,此肽段部分即为牛肉蛋白肽参与 Maillard 反应的主体部分。分子质量小于500的肽段在 Maillard 反应后质量百分比有所增加,而热反应中发生明显降解,达到了54.08%。由此推测,由于高效尺寸排阻色谱柱分子质量检测范围在100~5000D,牛肉蛋白肽中分子质量小于500D的肽通过热降解生成了分子质量更小的化合物,因而质量百分比下降明显;而在 Maillard 反应中,一部分小分子质量的化合物通过聚合反应,生成了分子质量介于100~500D的产物,造成质量百分比有所增加。

2.3 牛肉蛋白肽美拉德反应产物分析

牛肉酶解液和蛋白肽美拉德反应产物中挥发性化合物的GC-MS分析结果列于表2。已有研究表明,呋喃类、噻吩类、吡嗪类、噻唑类等杂环化合物对牛肉香气的形成非常重要。H-MRP中共鉴定出36种化合物,将其含量均定义为100,以此为标准,利用Agilent GC-MS数据分析软件将P-MRP的分析结果与其比对计算得出P-MRP中各挥发性成分的种类及含量,对其分析如下。

表2 H-MRP、P-MRP中挥发性化合物的种类及含量
Table 2 Volatile compounds and their contents in H-MRPs and P-MRPs

化合物名称	含量	
	H-MRP	P-MRP
呋喃与呋喃酮类	2,3-二氢-5-甲基-呋喃	100
	二氢-2-甲基-3-(2H)-呋喃酮	100
	5-甲基-2(5H)-呋喃酮	100
	2-丁酯呋喃	100
	4,5-二氢-2(3H)-呋喃酮	100
	二氢-5-甲基-5-苯基-2(3H)-呋喃酮	100
	2,3-二氢-5-甲基-呋喃	100
吡嗪类	4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮	100
	2-乙基-3-甲基-吡嗪	100
	2-(甲基丙基)-吡嗪	100
噻唑及噻吩	4-甲基-噻唑	100
	2-甲基-噻吩	100
	2-丁基-噻吩	100
硫醇类	3-甲基-2-丁硫醇	100
	2-甲基-3-戊硫醇	100
	2-糠硫醇	100
	2-甲基-3-呋喃硫醇	100
酮类	1-羟基-2-丙酮	100
	3-羟基-2-丁酮	100
	1-羟基-2-丁酮	100
	3,3,6-三甲基-4,5-庚二烯-2-酮	100
	3,6-二甲基-1,4-二噻烷-2,5-二酮	100
杂环酮类	5,5-二甲基-1,3-噻-2-酮	100
	二氢-3(2H)-噻吩酮	100
	2-亚胺-4(5H)-噻唑酮	100
	2-(甲硫)-4(1氢)-噻唑酮	100
	3,4-二氢-1-甲基-4-硫代-2(1H)-噻唑酮	100
含硫/杂环化合物	2-巯基苯酚	100
	2-甲氧基苯硫酚	100
	六氢-1,2,4,5-四噻	100
	糠硫化物	100
其他	己烷	100
	苯甲酸	100
	2-乙基-1-己醇	100
	六氢-1,2,4,5-四噻	100
	4-甲基-5-噻乙醇	100

注：—，未检测出。

2.3.1 呋喃与呋喃酮类物质

呋喃类物质是最丰富的 Maillard 反应的挥发性产物。呋喃酮在硫供体存在的条件下会进一步反应生成噻吩酮和噻吩。据报道，这些成分拥有烹煮过的肉类风味特征^[11]，对应于碳水化合物被加热后所产生的焦糖气味。H-MRP 中共检出 8 种呋喃与呋喃酮类物质，2,3-二氢-5-甲基-呋喃在 P-MRP 中未被检出。其中 4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮(HDMF)是这类物质的代表性化合物，Wang 等^[12]研究发现，半胱氨酸可以和糖的代谢产物丙酮醛反应生成 HDMF，在微酸条件下，半胱氨酸降解产物的还原性是影响 HDMF 生成的主要因素，它可

以促进 HDMF 产量的极大提高。Silke 等^[13]通过模型体系研究发现，磷酸盐溶液的浓度及鼠李糖、赖氨酸等前驱物的浓度是影响产量的重要因素，一般磷酸盐溶液的浓度越高，反应生成的 HDMF 越多。

2.3.2 吡嗪类物质

吡嗪类化合物一般具有坚果香、烤香并有土豆的气味，可以为多种食品带来愉悦的风味，是一类重要的香味化合物。吡嗪类化合物在 Maillard 反应中由羰基化合物和氨基化合物反应生成，且其生成反应受 pH 值影响很大，Leahy 等^[14]研究发现，只有 pH ≥ 5.0 时，热反应才可生成吡嗪。本实验中 H-MRP 中检测出两种吡嗪类化合物，牛肉蛋白肽的 Maillard 反应体系既有肽提供氨基化合物、木糖为羰基化合物，又有磷酸盐缓冲液保证 pH 值环境，两种吡嗪类化合物均有产生。对于肽在 Maillard 反应中对此类反应产物的影响作用方面，Ho 等^[15]在分析了 Gly(甘氨酸)、Gly-Gly、Gly-Gly-Gly、Gly-Gly-Gly-Gly 等与葡萄糖 Maillard 反应产生的挥发性化合物后发现，4 种反应体系中仅有甘氨酸与葡萄糖反应不产生吡嗪酮类物质，因此他们认为吡嗪酮类物质只产生于肽参与的 Maillard 反应。本研究中并没有检测出吡嗪酮类物质，因而无法证实这一结论。

2.3.3 噻唑及噻吩类物质

噻唑及噻吩类化合物中的烷基或乙酰基取代物多具有坚果香、烤香、肉香，一些还具有水果的香气，如本实验中在两种反应产物中检测出的 4-甲基-噻唑具有坚果香、水果香。这些化合物的主要生成途径之一便是由硫胺素降解产生，已有研究表明，硫胺素热降解可产生 5-羟甲基-异噻唑、4,5-二甲基-噻唑、2-乙基-5-丙基-噻吩、2-甲基-噻吩等^[16-17]。

2.3.4 硫醇类物质

H-MRP 中共检测出 4 种硫醇类化合物，其中 2-糠硫醇和 2-甲基-3-呋喃硫醇被 Grosch^[18]鉴定为对煮牛肉风味有重要贡献的风味物质。2-甲基-3-呋喃硫醇具有肉香、烤香、鱼香等香味特性，在牛肉、猪肉、鸡肉中都有被检测到，对该牛肉香精的整体风味具有重要贡献。这种化合物可以通过硫胺素的热降解形成^[19]。在本研究中 H-MRP 和 P-MRP 反应体系中均有 2-甲基-3-呋喃硫醇产生；而 2-糠硫醇作为 2-甲基-3-呋喃硫醇的氧化产物在 P-MRP 中则没有被检出，说明牛肉蛋白肽的反应体系更容易促进 2-甲基-3-呋喃硫醇的生成，而对于 2-糠硫醇的产生并没有积极的影响；Grosch 等^[20]通过研究发现，在硫胺素降解产生 2-甲基-3-呋喃硫醇和 2-糠硫醇的实验中，加入半胱氨酸能够使 2-甲基-3-呋喃硫醇的产量提高 7 倍，2-糠硫醇的产量却没有得到提高，也在一定程度上证明了本研究的结论。

Maillard 反应体系十分复杂, 反应物、中间产物之间相互影响, 对于本实验中检测出的酮类、杂环酮类及其他类挥发性化合物, 虽没有文献明确报道其对美拉德反应产物中肉香味化合物生成的直接作用, 但可以推断其在关键性肉香味的形成及最终所呈现的整体牛肉风味方面, 都有着十分重要的作用。

3 结 论

牛肉蛋白肽参与 Maillard 反应的主体部分为分子量范围在 1000 ~ 2000D 的肽段; 牛肉蛋白肽、D- 木糖、L- 半胱氨酸、VB₁ 组成 Maillard 反应体系, 关键的挥发性反应产物中, 呋喃与呋喃酮类物质主要产生于糖类的热反应, 吡嗪类物质产生于肽和木糖的反应, 噻唑、噻吩类及硫醇类物质主要由硫胺素降解产生。总之, 肽-Maillard 反应体系中挥发性芳香化合物的产生是食品风味化学的重要研究方向之一, 蛋白的水解度、肽链的长短以及蛋白肽中氨基酸序列都会对特征香气化合物的产生有着重要影响作用。分析、鉴定出 Maillard 反应中肽“专有”的芳香性化合物, 以期开发出整体更加协调的风味体系, 应该能够吸引更多研究者的兴趣和关注度。

参 考 文 献 :

- [1] CHHUY C, EDGAR A. Edible compositions having a meat flavor and processes for making same: US Patent, 4081565[P]. 1978-03-28.
- [2] 黄师荣, 宋焕禄. 热反应鸡肉香精的制备研究[J]. 北京工商大学学报: 自然科学版, 2001, 19(3): 9-13.
- [3] 夏玲君, 宋焕禄. Maillard反应制备牛肉香精及其香味成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2006, 32(8): 82-85.
- [4] 陈冠清, 宋焕禄, 张振波, 等. 热反应猪肉香精的制备及其气味活性化合物的鉴定[J]. 食品科学, 2009, 30(8): 221-226.
- [5] 祖道海, 宋焕禄, 李大明, 等. Maillard反应制备虾味香精[J]. 食品科学, 2006, 27(9): 147-150.
- [6] LIESKE B. Protein hydrolysis: the key to meat flavoring systems[J]. Food Reviews International, 1994, 10(3): 287-312.
- [7] 颜治, 郑诗超, 幸治梅. 肉味香精及其在肉制品中的应用[J]. 肉类工业, 2004(1): 39-42.
- [8] 潘丽红, 周光宏, 徐幸莲, 等. 美拉德反应在肉味香精生产中的应用[J]. 肉类工业, 2007(8): 29-31.
- [9] 吕玉, 宋焕禄. 不同模型体系产肉香味化合物的对比[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(1): 60-63.
- [10] HODGE J E. Chemistry of browning reactions in model systems[J]. Agric Food Chem, 1953, 1(15): 928-943.
- [11] ASHURST P R. 食品香精的化学与工艺学[M]. 汤鲁宏, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 2005: 199-203.
- [12] WANG Y, HO C T. Formation of 2,5-dimethyl-4-hydroxy-3(2H)-furanone through methylglyoxal: a maillard reaction intermediate[J]. J Agric Food Chem, 2003, 56: 7405-7409.
- [13] SILKE I, TOMAS D, ELISABETH G. Generation of 4-hydroxy-2,5-dimethyl-3(2H)-furanone from rhamnose as affected by reaction parameters: experimental design approach[J]. J Agric Food Chem, 2009, 57: 2889-2895.
- [14] LEAHY M M, REINECCIUS G A. Kinetics of alkylpyrazines formation: effect of pH and water activity[M]// PARLIAMENT T H, MCCORRIN R J, HO C T. Thermal generation of aromas. Washington DC: American Chemical Society, 1989: 191-208.
- [15] HO C T, OH Y C, ZHANG Y, et al. Peptides as flavor precursors in model maillard reactions[M]// TERANISHI R, TAKEOKA G R, GUNTER M. Flavor precursors: thermal and enzymatic conversion. Washington DC: American Chemical Society, 1991: 193-202.
- [16] 谢建春, 孙宝国, 刘玉平, 等. 维生素B₆微波加热降解香味成分分析[J]. 食品科学, 2004, 25(10): 241-244.
- [17] GUY J H, JAMES T C, JIRGEN D S, et al. Volatile products formed from the thermal degradation of thiamin at high and low moisture levels[J]. J Agric Food Chem, 1984, 32: 1015-1018.
- [18] GROSCH W. Evaluation of the key odorants of foods by dilution experiment, aroma models and omission[J]. Chem Senses, 2001, 26: 533-545.
- [19] GUNTERT M, BRUNING J, EMBERGER R, et al. Identification and formation of some selected sulfur-containing flavor compounds in various meat model systems[J]. J Agric Food Chem, 1990, 38: 2027-2041.
- [20] GROSCH W, GABRIELE Z H. Formation of meatlike flavor compounds [M]//TERANISHI R, TAKEOKA G R, GUNTER M. Flavor precursors: thermal and enzymatic conversion. Washington DC: American Chemical Society, 1991: 183-192.