

文章编号:1673-1689(2006)06-0063-07

戊糖的立体异构差异对风味物质形成的影响

侯亚龙¹, 陈正行¹, 罗昌荣², 王光雨²

(1. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214036; 2. 华宝食用香精香料(上海)有限公司, 上海 200000)

摘要:采用 HS-SPME 与 GC-MS 结合的方法,通过对戊糖的 4 种立体异构物(核糖、木糖、阿拉伯糖、来苏糖)与半胱氨酸 Maillard 反应挥发性产物的分析,确定了部分挥发物的相对质量分数,并对其随反应时间的变化情况进行了比较分析,进而推测戊糖的结构与反应活性的关系。0.4 mol/L 等摩尔浓度的戊糖与 L-半胱氨酸在磷酸盐缓冲液中,120 ℃,反应 40 min 时,核糖产生的挥发性产物量远高于其他 3 种戊糖,说明其反应活性最高;当反应时间达到 3 h 后,4 种戊糖的挥发性产物量趋同。

关键词:戊糖-半胱氨酸体系;立体异构;Maillard 反应;反应活性

中图分类号:TS 264.3

文献标识码:A

Effect of Pentose Stereo-Isomerization on the Formation of Volatiles in the Reaction System of Pentose/Cysteine

HOU Ya-long¹, CHEN Zheng-xing¹, LUO Chang-rong², WANG Guang-yu²

(1. School of Food Science and Technology, Southern Yangtze University, Wuxi 214036, China; 2. Huabao Flavors & Chemicals (Shanghai) Co. Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: The type and relative content of volatile substances formed in the reaction system of different pentose/cysteine were determined by HS-SPME method combined with GC/MS. The relationship between pentose structure and reaction activity was analyzed and compared. Pentose and L-cysteine dissolved in the sodium phosphate buffer (0.2 mol/L, pH 5) at equal molar concentration (0.4 mol/L), when the reaction time is 40 minute at 120 ℃, the volatiles quantity of ribose was higher than that of the others. This results demonstrated that the Maillard reaction activity of ribose was the highest. After reacting 3 hours, the volatiles production of four pentose was equally.

Key words: pentose-cysteine system; stereo-isomerization; Maillard reaction; reaction activity

Maillard 反应是形成烹调食品香味的重要途径之一,也是形成肉类风味物质的主要途径^[1-4],采用各种单糖与氨基酸、肽、磷脂等反应可生产各种风

味的肉类香精^[6]。戊糖中的核糖、木糖已广泛用于模式体系的研究,并已在生产中使用。但戊糖的立体异构差异对 Maillard 反应挥发性产物的影响及

收稿日期:2006-03-17; 修回日期:2006-05-15.

基金项目:上海市引进技术的吸收与创新项目(04-20-2).

作者简介:侯亚龙(1971-),女,四川绵阳人,粮食、油脂与植物蛋白工程博士研究生.

其机理的报道不多。作者较系统地比较了4种戊糖与半胱氨酸在不同反应时间所形成风味物质的差异,研究戊糖的不同立体异构对不同风味物质生成量的影响。

目前最常用的分离提取并有效定性定量分析 Maillard 反应产物的方法有溶剂萃取法(如乙醚、正戊烷等)、静态顶空法、吹扫捕集法、同时蒸馏萃取法^[6-11]等。溶剂萃取法溶剂消耗大且浓缩过程中易造成挥发物的损失;静态顶空法虽可较真实体现样品顶空气体的组成,但由于检测仪器灵敏度的限制往往只能检测到浓度较高的组分,且不适于分析沸点较高的物质;吹扫捕集法是用惰性气体将样品中的挥发性物质带到俘获装置(冷阱或吸附管)中,再将捕集到的挥发性物质用溶剂提取或热脱附出来进入 GC 分析,此法耗时多人为误差大;蒸馏萃取法是国内进行 Maillard 反应产物挥发性风味物质分离提取常用的方法,此法需长时间加热样品,会导致 Maillard 反应的进一步进行,故不能真实反应样品的组成。^[12-14]

近年来,国外一些 Maillard 反应研究者开始使用顶空固相微萃取法,分析 Maillard 反应产物^[15,18]。该法简便快速,萃取效率高,无溶剂,样品组分不发生变化,该法结合 GC-FID、GC-MS 可用于分析多种食品、香精中的挥发性化合物。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂、仪器

D-核糖、D-木糖、D-阿拉伯糖:SIGMA 公司产品;D-来苏糖:纯度>99%,Fluka 公司产品;L-半胱氨酸,BR 级,国药集团上海试剂有限公司产品;磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、氯化钠:AR,国药集团上海试剂有限公司产品。

气相色谱仪:Finnigan GC2000;质谱仪:Finnigan Trace MS;顶空固相微萃取手动进样手柄及 75 μm CAR/PDMS 纤维萃取头,SUPELCO 公司产品。

1.2 实验方法

1.2.1 反应液的制备 样品分为两组,每组由4种不同戊糖分别与 L-半胱氨酸等摩尔溶于 0.2 mol/L 的磷酸盐缓冲溶液中形成浓度为 0.4 mol/L 的溶液,调 pH 值至 5,样品装入具螺旋口的反应管中,拧紧螺旋盖。在精度为 ± 0.02 $^{\circ}\text{C}$ 油浴中 120 $^{\circ}\text{C}$ 反应,两组的反应时间分别为 40 min,3 h。

1.2.2 顶空固相微萃取(HS-SPME)法 反应液 8 mL 加入 15 mL 顶空瓶中,盐饱和,放入磁力搅拌

子,封盖后置于恒温磁力搅拌器上,于 40 $^{\circ}\text{C}$ 恒温,待瓶内溶液温度稳定后将固相微萃取针插入顶空瓶上部,萃取 40 min,吸附顶空瓶上部的挥发性物质。萃取完毕将萃取头插入气相色谱仪的进样口,250 $^{\circ}\text{C}$ 解吸 2 min。

由于用戊糖与 L-半胱氨酸反应会产生大量的含硫化合物,因此选用 75 μm CAR/PDMS 纤维萃取头,该萃取头适用于香气分析,对弱极性、中等极性物质有很好的吸附性,尤其对含硫化合物具有很好的吸附性,检测限可达 0.05~3.00 $\mu\text{g/L}$ ^[12]。适用于 Maillard 挥发性反应产物的分析。

1.2.3 气相色谱—质谱联用法

1) 色谱条件 J&W 的 DB-5(60 m $\times$ 32 mm $\times$ 0.25 μm)毛细管柱,进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$,载气为氮气,体积流量 1.2 mL/min,分流比 10:1,升温程序:40 $^{\circ}\text{C}$,2 min,3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 200 $^{\circ}\text{C}$,5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 250 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min。

2) 质谱条件 电离方式为 EI,电子能量 70 eV,灯丝发射电流 200 μA ,离子源温度 200 $^{\circ}\text{C}$,接口温度 250 $^{\circ}\text{C}$ 。全扫描, m/z 为 33~495。

3) 数据处理 每个样品重复 3 次实验。RSD<10%的组分进行定量(取其平均值)比较,其余组分只作定性比较。

实验数据处理由 Xcalibur 软件系统完成,未知化合物经计算机检索同时与 NIST 谱库(107K 种化合物)和 Wiley 谱库(320K 种化合物)相匹配,当结果的正反匹配度均大于 800(最大值为 1 000)时,予以报道。

1.2.4 挥发性组分相对质量分数的计算 在考虑了萃取头随机脱落对结果影响的基础上,挥发性组分相对质量分数以组分的相对峰面积百分比计算。

2 结果与讨论

2.1 不同戊糖生成挥发性物的反应活性

如图 1 所示,4 种不同戊糖分别与 L-半胱氨酸 120 $^{\circ}\text{C}$ 反应 40 min 后,挥发性物质的生成量不同。其中,核糖所生成的挥发性组分峰面积最大,是其它 3 种戊糖的一倍以上,其次分别为阿拉伯糖,木糖,来苏糖。因此,反应时间为 40 min 时,4 种戊糖对挥发性组分贡献程度的顺序为:核糖>阿拉伯糖>木糖>来苏糖。这与 H. S. Burton 等提出的戊糖稳定性顺序:木糖>阿拉伯糖>核糖是有相关性的^[18],糖的稳定性越高其反应活性越低,短时间内产生的挥发性产物越少。作者首次报道了来苏糖生成挥发性物的反应性能。

核糖、阿拉伯糖、木糖和来苏糖间的差异仅为构型不同,两两间互为差向异构体(图2)。可以推测,戊糖的生成挥发性物的反应性能与其羟基的空间位置有关。在 Maillard 反应初期,羟基的位置对1,2-烯醇化、2,3-烯醇化^[14-15]的速度及分子内脱水的速度可能有明显的影响,H. S. Burton 曾提出过C₂和C₃上羟基的顺式构型更有利于 Maillard 反应的进行^[16]。从4种戊糖的分子结构来看,核糖的C₂羟基位置使得1,2-烯醇化时C₁和C₂双键的构型为Z-型,C₃羟基位置使得2,3-烯醇化时C₂和C₃双键的构型为顺式;而阿拉伯糖和来苏糖在进行1,2-烯醇化时C₁和C₂双键的构型为E-型,木糖在进行1,2-烯醇化时C₁和C₂双键的构型为Z-型;2,3-烯醇化时阿拉伯糖和木糖的C₂和C₃双键的构型为反式,来苏糖的C₂和C₃双键的构型为顺式。在本实验条件下戊糖主要是走1,2-烯醇化路径(见图3)。1,2-烯醇化后发生分子内脱水、脱氨基,此时羟基的空间位置的差异可能导致不同戊糖反应所需能量不同,故不同戊糖的反应速度和产物量都不同。

当反应时间达到3 h时,4种戊糖的挥发性产物峰面积接近(图1),说明随着反应时间的延长,4种戊糖的反应活性趋于一致,挥发性产物量趋同。核糖反应3 h的挥发性产物量远低于反应40 min的,其它3种糖的挥发性产物量均明显上升。核糖的挥发性产物量下降可能与某些挥发性组分参与聚合反应形成大分子聚合物而不再具有挥发性有关,这一点可以从40 min反应产物在420 nm波长的吸收值远远小于3 h反应产物的吸收值得到证明。说明挥发性物质的生成量并不总是随着反应进行而增加。

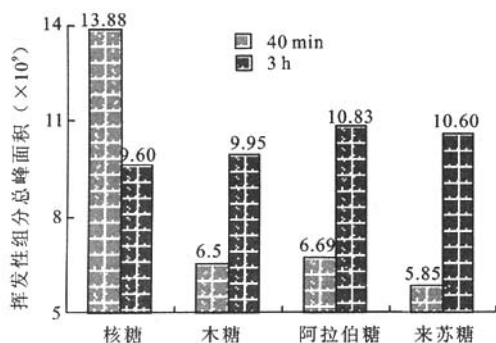


图1 不同反应时间4种戊糖与L-半胱氨酸 Maillard 反应挥发性组分总峰面积比较

Fig.1 Comparing the total peak area of volatiles produced by the Maillard reaction of four pentose/L-cysteine systems at different reaction time

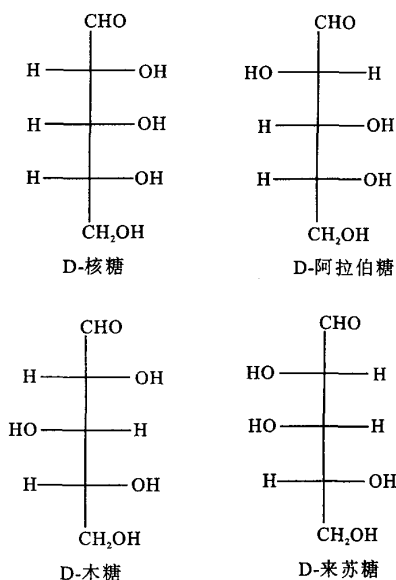


图2 4种戊糖的分子结构式

Fig.2 The molecular structure of four pentose

2.2 不同戊糖 Maillard 反应产物挥发性组分分析

在进行峰面积积分时发现萃取头的随机脱落对总峰面积的计算造成影响,因此对其进行校正,按照1.2.4方法进行相对峰面积百分比的计算得到表1,组分的相对质量分数以组分的相对峰面积百分比表示。

从表1可以清楚地看到,4种戊糖 Maillard 反应40 min和3 h的挥发性组分差别很大。

(1)醇类 反应40 min时核糖的挥发性产物组分中乙醇、3-辛醇的量远大于其它戊糖,3 h后却基本消失,说明它们是早期产物,乙醇可能来源于半胱氨酸的 Strecker 降解。薄荷醇在4种戊糖的40 min产物中均未检出,3 h产物中除核糖外均有检出,说明此物质可能是中后期产物。核糖中没有此物检出,可能已转化为其它物质。(2)醛类物质 检出4种,包括己醛、糠醛、壬醛、3,5-二叔丁基-4-羟基苯甲醛等,除糠醛外其余含量均很低。反应40 min核糖的糠醛量低于其它戊糖,这是由于糠醛只是糖降解生成的初级产物^[17],它进一步被转化成其它 Maillard 产物,如糠硫醇等^[18]。这可以从反应3 h后4种戊糖的糠醛量均大幅下降得到验证。这又一次证明在形成挥发性风味物质时核糖的反应活性高于其它戊糖。(3)酮类 检出17种,反应40 min核糖的3-戊烯-2-酮、3-巯基-2-戊酮的相对含量明显高于其它戊糖,并且4种戊糖的这两种酮类产物的相对含量在反应3 h后均明显减少并趋于一致。说明这两种物质为糖的早期分解产物,而1-甲巯基-2-丁酮、1-(2-呋喃基)-2-丙酮恰恰相反,在反

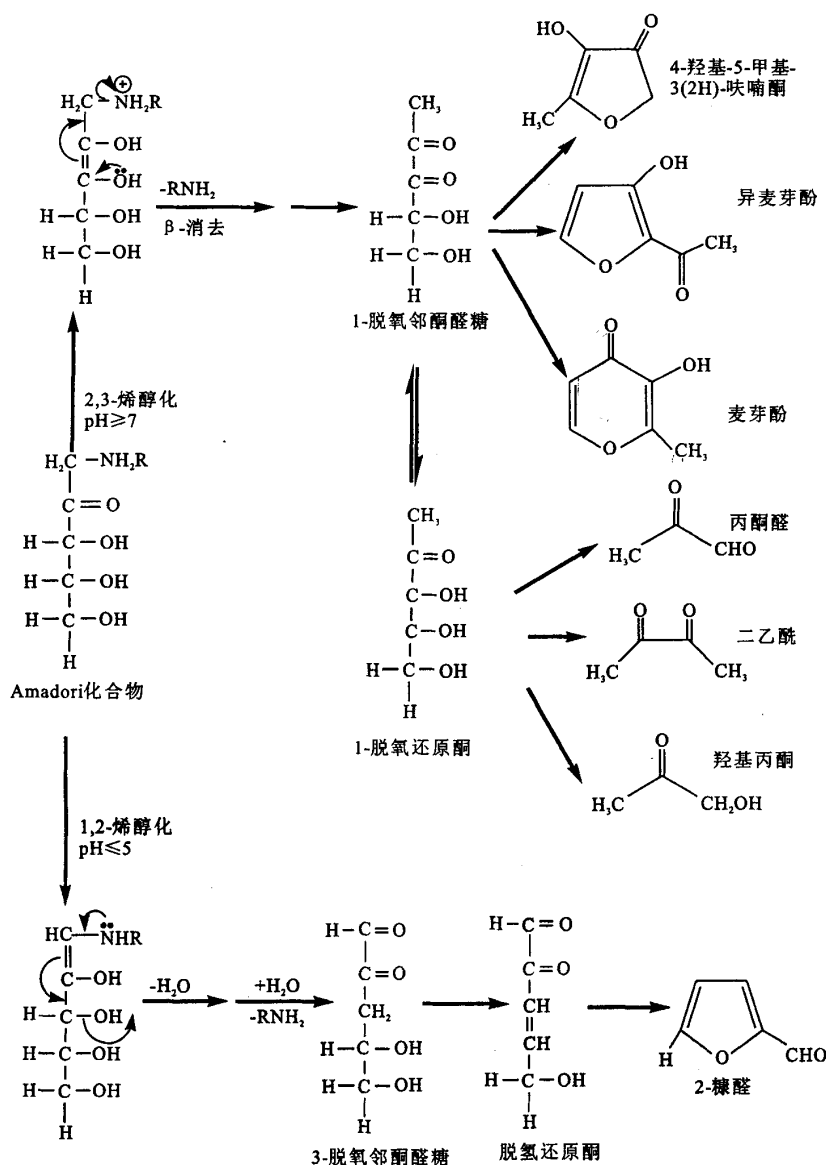


图3 核糖 Amadori 化合物降解过程

Fig. 3 The degradation of ribose Amadori compound

应 40 min 时量很小或没有检出,反应 3 h 后二者的量均明显增多并接近。1-(2-呋喃基)-1-丙酮、3-羟基-2,4-戊二酮、1-巯基-3-戊酮、二氢-4(5)-甲基-3(2H)-噻吩酮、二氢-2-甲基-3(2H)-噻吩酮、1-(2-呋喃基)-2-丁酮、1-(2-呋喃基)-3-丁酮、1-(2-呋喃基)-3-戊酮、1-(3-噻吩基)-2-丙酮的生成情况与 1-(2-呋喃基)-2-丙酮相似,40 min 时无检出,3 h 后均有检出。(4)酸类 共鉴定出 10 种,分别为甲酸、乙酸、丁酸、硫羟乳酸、己酸、3-巯基丙酸、苯甲酸、辛酸、邻苯二甲酸酐、癸酸等,其中硫羟乳酸的量变化最为明显,反应 40 min 时核糖和木糖反应产物中有少量检出,阿拉伯糖和来苏糖反应产物中无检出,反应 3

h 后相对含量均明显增加,木糖反应产物中增加的最多,其余 3 种糖反应产物中的量接近。

(5)酯类 检出 8 种,包括丁酸甲酯、甲酸丁酯、乙酰乙酸异戊酯、硫代乙酸甲酯、2-巯基丙酸乙酯、硫代丁酸甲酯、2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇异丁酯、3-羟基-2,2,4-三甲基戊基异丁酸酯等。这些物质无论是在 40 min 还是 3 h 产物中生成量均很小。(6)呋喃类 鉴定出 6 种。4 种戊糖反应 40 min 的产物中 2-甲基呋喃的相对含量均低于反应 3 h 的,40 min 时 2-甲基呋喃的相对含量由高到低依次为:木糖>来苏糖>阿拉伯糖>核糖,3 h 后 2-甲基呋喃的相对含量由高到低依次为:来苏糖>木糖>阿拉伯糖>核

糖,与戊糖稳定性的排序存在相关性。呋喃甲酸、2,2'-亚甲基二呋喃、反-2,2'-乙烯亚基二呋喃等在 40 min 的挥发性产物中基本没有检出,在 3 h 产物中均有检出。说明本实验条件下在一定时间段内呋喃类物质的生成量也是随反应程度的加深而增加。(7)硫醇类 2-甲基-3-呋喃硫醇、糠硫醇是典型的肉类风味物质^[19],在挥发性物质中的相对含量很高,前者含量随反应时间的延长变化不十分明显;后者的变化在 4 种戊糖的产物中表现不一致,核糖和阿拉伯糖的糠硫醇量为:反应 3 h 的明显大于 40 min 的,而木糖反应 3 h 的仅略大于 40 min 的,来苏糖则相反:反应 3 h 的小于 40 min 的,其原因有待进一步研究。(8)硫醚类 鉴定出 9 种,包括甲基 5-甲基呋喃硫醚、2-糠基甲基硫醚、甲基,2-甲基-3-呋喃基二硫醚、糠硫醚 A、糠硫醚 B、双(2-甲基-3-呋喃基)-二硫醚、双(2-糠基)-二硫醚 A、双(2-糠基)-二硫醚 B、双(2-糠基)-二硫醚 C 等,其中双(2-甲基-3-呋喃基)-二硫醚、双(2-糠基)-二硫醚 A 含量较大。4 种戊糖反应 3 h 时二者的相对含量均大大高于 40 min 的,说明二者皆为 Maillard 反应后期产物。(9)噻吩类 检出 18 种,噻吩、2-甲酰基噻吩、2-乙酰基噻吩、5-甲基-2-甲酰基噻吩、2-乙酰基-5-甲基噻吩、2-丙酰基噻吩、4-羟基苯并噻吩、二氢噻吩基噻吩、甲基噻吩基噻吩、噻吩甲酸、甲基二氢

噻吩基噻吩、5-乙基-2-噻吩甲酸等在反应 40 min 的产物中未检出,反应 3 h 后有检出。该类产物中除 2-甲基噻吩外,其余皆是反应 3 h 的量高于反应 40 min 的。四种戊糖反应 3 h 产物中的该类物质含量较为接近,说明此类物质是 Maillard 反应后期产物。(10)噻唑、吡咯类 检出噻唑两种(2-丁酰基噻唑、苯并噻唑)、吡咯一种,两种噻唑在反应 40 min 的产物中即已出现,反应 3 h 后并未有明显变化,说明该类产物形成后较为稳定。吡咯在反应 40 min 的产物中没有检出,在反应 3 h 的产物中有检出但量不大。4 种戊糖反应 3h 产物中的这两类物质含量基本接近。(11)烷烃类 鉴定出 42 种,核糖反应 40 min 的产物中烷烃的种类和相对含量都是最大的,其余 3 种戊糖 40 min 的产物中也有很多种烷烃检出,但反应 3 h 后 4 种戊糖的产物中烷烃的种类和量都减少到可以忽略不计,说明烷烃类物质是过渡性中间产物。这在其他文献中未见报道。(12)其它 二氧化硫是半胱氨酸的降解产物,反应过程中会参与硫杂环化合物的形成,本身也是猪肉的挥发性风味物质^[20]。甲氧基苯基肼是在其它文献中未见报道的,在反应 40 min 的 4 种戊糖的挥发性产物中均无检出,反应 3 h 产物中的相对含量较大,说明该类物质为 Maillard 反应后期产物。4 种戊糖反应 3 h 产物中的这两类物质含量相差不大。

表 1 4 种戊糖 Maillard 反应产物中主要挥发性组分相对质量分数

Tab. 1 Relative content of main volatiles produced by the Maillard reaction of four pentose/L-cysteine systems

挥发性组分化合物名称	相对质量分数/%							
	核糖		木糖		阿拉伯糖		来苏糖	
	40 min	3 h	40 min	3 h	40 min	3 h	40 min	3 h
醇类								
乙醇	2.39	*	—	**	**	1.61	—	3.44
3-辛醇	1.54	—	*	—	—	—	—	—
2-噻吩甲醇	*	**	—	*	—	—	—	**
薄荷醇	—	—	*	—	*	—	*	—
醛类								
糠醛	7.09	5.28	8.15	4.24	9.43	4.98	8.71	2.87
酮类								
2-戊酮	**	**	**	*	1.16	**	*	**
3-戊酮	*	*	*	*	*	*	*	*
3-戊烯-2-酮	1.05	*	**	*	**	*	*	*
2,5-呋喃二酮	*	*	*	*	—	*	*	*
3-巯基-2-戊酮	6.68	3.6	5.56	2.88	5.27	2.86	5.61	3
1-甲巯基-2-丁酮	*	1.52	*	1.52	*	1.11	*	1.34
5-甲基-2(5H)-呋喃酮	*	*	*	—	—	—	*	—
1-(2-呋喃基)-2-丙酮	—	1.05	—	**	—	**	—	**
二氢-2-甲基-3(2H)-噻吩酮	—	1.12	—	**	—	*	—	**

续表 1

挥发性组分化合物名称	相对质量分数/%							
	核糖		木糖		阿拉伯糖		来苏糖	
	40 min	3 h	40 min	3 h	40 min	3 h	40 min	3 h
酸类								
乙酸	*	**	*	*	*	*	*	*
硫羟乳酸	*	1.02	*	2.27	—	1.12	—	0.96
苯甲酸	**	*	**	*	**	*	*	*
呋喃类								
呋喃	*	*	*	**	*	**	*	1.16
2-甲基呋喃	4.77	1.99	9.98	4.57	6.07	4.46	8.96	5.82
3,4-二甲氧基呋喃	—	**	—	0.95	—	1.03	—	**
硫醇类								
3-甲基-2-丁硫醇	*	*	*	*	*	*	*	*
2-甲基-3-呋喃硫醇	9.84	8.29	8.71	9.28	10.10	9.74	9.77	9.11
糠硫醇	5.89	7.92	8.31	8.74	4.99	7.96	9.00	7.71
2-甲基-3-噻吩硫醇	—	*	—	*	—	**	—	**
2-噻吩甲基硫醇	—	*	—	*	—	*	—	*
2-噻吩硫醇	—	1.3	—	1.37	—	1.18	—	1.41
硫醚类								
双(2-甲基-3-呋喃基)-二硫醚	1.38	4.32	0.98	5.3	3.37	6.51	4.94	6.68
双(2-糠基)-二硫醚 A	*	0.68	*	1	*	0.95	**	1.1
噻吩类								
2-甲基噻吩	1.49	**	1.30	0.95	1.24	1.29	1.08	1.12
2-乙酰基-3-甲基噻吩	—	1.54	—	1.13	—	1.25	—	1.12
噻吩基-(3,2B)-噻吩	—	1.4	—	1.41	—	**	—	1.27
3-甲基-2-甲酰基噻吩	*	*	*	*	*	*	*	*
3-乙基-2-甲酰基噻吩	*	2.13	*	1.14	—	1.42	*	1.25
二甲基甲酰基噻吩	**	3.3	—	2.7	—	3.31	—	2.82
甲基二氢噻吩基噻吩	—	0.83	—	0.75	—	1.36	—	1.69
5-乙基-2-噻吩甲酸	—	0.88	—	1.39	—	1.1	—	1.17
噻唑、吡咯								
2-丁酰基噻唑	*	*	*	*	*	*	*	**
苯并噻唑	*	*	*	*	*	*	*	*
吡咯	—	*	—	*	—	*	—	*
其它								
二氧化硫	**	3.62	4.20	3.22	3.10	3.75	3.91	4.1
二硫化碳	—	*	—	*	—	*	—	*
甲氧基苯基胍	—	1.31	—	1.54	—	1.71	—	1.45

注：“—”表示产物中无此组分检出；“*”表示组分的相对峰面积百分比≤0.5%；“**”表示组分相对峰面积百分比>0.5%但 RSD>10%的,其余组分的量值其 RSD<10%

3 结 论

通过上述实验数据的分析,可得出以下结论:4种戊糖 Maillard 反应 40 min 时挥发性物质的产量及组成差别巨大。核糖的挥发性组分生成量最大且种类最多,说明核糖产生挥发性风味物质的反应活性最高;反应 3 h 后,4 种戊糖的挥发性产物生成总量趋于一致,各主要组分的相对含量也趋向一致。说明反应时间达到 3 h 后,4 种戊糖产生挥发性风味物质的反应活性趋向一致;反应时间 40 min 时,核糖产生的烷烃类物质的量是木糖、阿拉伯糖的两倍多,是来苏糖的 5 倍多;但当反应时间达到 3 h 后,烷烃类物质明显减少,说明烷烃类物质是生成

其它物质的有效中间产物,这实验结果从未报道;在烷烃类物质明显减少的同时,噻吩类物质明显增多;醛类物质随反应时间的延长明显减少,说明醛类物质也是中间产物;酸类物质随反应时间的延长而增加,这与反应体系 pH 值随反应的进行而逐渐下降是相一致的;硫醇类物质的变化不规律,而由硫醇聚合而成的硫醚类物质的量则明显随反应时间的延长而增加。

通过分别对反应时间 40 min 和 3 h 反应产物的比较,对反应过程中挥发性产物的组成及生成情况有了大致了解,在生产实践中可为反应的过程控制提供理论依据。

致谢 感谢江南大学分析检测中心的刘杨斌、王利平老师在 HS-SPME-GC-MS 分析时提供的指导和帮助。

参考文献:

- [1] Hurrell R F. Maillard Reaction in Flavour[M]. Amsterdam: Elsevier, 1982.
- [2] Nursten H E. Aroma Compounds from the Maillard Reaction[M]. London: Elsevier, 1986.
- [3] Tressl R, Helak B, Kersten E. Formation of Flavor Compounds by Maillard Reaction[M]. Weinheim: VCH, 1993.
- [4] Mottram D S. Flavour Compounds Formed during the Maillard Reaction[M]. Washington DC: American Chemical Society, 1994.
- [5] 陈坤, 宋焕禄. 肉味香精的研究概况及其应用[J]. 北京工商大学学报:自然科学版, 2004, 22(2):1-4.
- [6] 仇厚援, 王志勇, 贺利民. 气质联用法分析对虾头酶解液与木薯淀粉糖浆美拉德反应物[J]. 食品科学, 2003, 24(2):121-123.
- [7] 彭奇均. 对以美拉德反应形成的肉类香精在气相色谱分析中不同富集方法比较[J]. 无锡轻工业学院学报, 1991, 10(1):13-22.
- [8] Fayle S E, Gerrad J A. The Maillard Reaction[M]. London: The Royal Society of Chemistry, 2002.
- [9] 吴昊, 许时婴. 牛肉风味料的香气成分[J]. 无锡轻工大学学报, 2001, 20(2):158-163.
- [10] 何香, 许时婴. 蒸煮鸡肉的挥发性香气成分[J]. 无锡轻工大学学报, 2001, 20(5):497-499.
- [11] 宋焕禄. 鸡肉酶解物/酵母抽提取物—Maillard 反应产生肉香味化合物的研究[J]. 食品科学, 2001, 22(10):83-85.
- [12] Hiroyuki Kataoka. Applications of solid-phase microextraction in food analysis [J]. *Chrom A*, 2000, 880:35-62.
- [13] 沈同. 生物化学[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- [14] Bailey M E. Maillard Reactions and Meat Flavor Development[M]. New York: Blackie Academic & Professional, 1998.
- [15] Nagodawithana T W. Savory Flavors[M]. Milwaukee: Esteekey Associates Inc, 1995.
- [16] Burton H S. Non-enzymatic browning reactions; consideration of sugar stability[J]. *Nature*, 1963, 197:266-268.
- [17] Mottram D S, Nobrega Ian. Formation of sulfur aroma compounds in reaction mixtures containing cysteine and three different forms of ribose[J]. *Agric Food Chem*, 2002, 50:4080-4086.
- [18] Cerny Christoph. Formation of aroma compounds from ribose and cysteine during the Maillard reaction[J]. *Agric Food Chem*, 2003, 51: 2714-2721.
- [19] Mottram D S. Flavor formation in meat and meat products: a review[J]. *Food Chemistry*, 1998, 62(4):415-424.
- [20] Elmore J S. Two-fibre solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry for the analysis of volatile aroma compounds in cooked pork[J]. *Chrom A*, 2000, 905: 233-240.

(责任编辑:朱明)