

李学杰, 宋焕禄, 王中江, 等. 基于 SPME-GC-O-MS 及质构分析对烤牛肉和植物蛋白肉的感官品质探究 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 8-18. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030081

LI Xuejie, SONG Huanlu, WANG Zhongjiang, et al. Research on Sensory Quality of Roasted Beef and Plant-based Meat Analogues Based on SPME-GC-O-MS and Texture Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(12): 8-18. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030081

· 未来食品 ·

基于 SPME-GC-O-MS 及质构分析对烤牛肉和植物蛋白肉的感官品质探究

李学杰¹, 宋焕禄², 王中江³, 李 健^{1,*}

(1. 北京工商大学, 北京市食品添加剂工程技术研究中心, 北京 100048;
2. 北京工商大学, 北京食品营养与人类健康高精尖创新中心, 北京 100048;
3. 东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150038)

摘 要: 采用固相微萃取 (solid-phase microextraction, SPME) 结合气相色谱-嗅闻-质谱联用技术 (gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, GC-O-MS) 对 3 种市售植物蛋白肉 (样品 I、样品 B、样品 O)、1 种自制植物蛋白肉 (样品 C) 和 1 种市售牛肉中的挥发性组分进行分析, 同时结合质构分析和感官评价评估其感官属性。结果表明: 自制植物肉 (样品 C) 中肉味相关化合物含量高, 肉香气、肉滋味与牛肉接近, 整体质量高于 3 种市售植物肉, 但植物肉的外观、质构等感官属性与牛肉相比差距较大。5 种肉样中共鉴定出 154 种挥发性组分, 其中通过 GC-O 鉴定出 40 种气味活性化合物, 牛肉中鉴定出 69 种化合物, 其中 46 种在植物肉中也被鉴定出; 牛肉中与脂肪氧化相关的醛类、醇类等化合物的含量明显高于植物肉, 植物肉中与美拉德反应相关的吡嗪、呋喃等杂环化合物的含量显著高于牛肉, 且自制植物肉 (样品 C) 中杂环化合物含量要高于 3 种市售植物肉。牛肉的硬度、弹性、胶粘性、咀嚼性等质构特性要优于植物肉, 并且植物肉样品 I、样品 O、样品 C 的质构特性要优于样品 B。

关键词: 植物蛋白肉, 挥发性组分, 质构, 气相色谱-嗅闻-质谱 (GC-O-MS), 固相微萃取 (SPME)

中图分类号: TS251.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)12-0008-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021030081

Research on Sensory Quality of Roasted Beef and Plant-based Meat Analogues Based on SPME-GC-O-MS and Texture Analysis

LI Xuejie¹, SONG Huanlu², WANG Zhongjiang³, LI Jian^{1,*}

(1. Beijing Engineering and Technology Research Center of Food Additives,
Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;
2. Beijing Advanced Innovation Center for Food Nutrition and Human Health,
Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China;
3. College of Food, Northeast Agricultural University, Harbin 150038, China)

Abstract: The volatile components in 3 commercial plant-based meat analogues (sample I, sample B, sample O), 1 homemade plant-based meat analogues (sample C) and 1 commercial beef were analyzed by solid-phase microextraction (SPME) combined with gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry (GC-O-MS), and the sensory properties were evaluated by texture analysis and sensory evaluation. The results showed that the homemade plant-based meat analogues (sample C) had a high content of meat flavor-related compounds, and the meat aroma and meat taste were similar to beef, and the overall quality was higher than that of the three commercially samples. However, there was a large gap between plant-based meat analogues and beef in appearance, texture and other sensory properties. A total of 154 volatile components were identified in 5 meat samples, among which 40 odor active compounds were identified by GC-O, 69 compounds were

收稿日期: 2021-03-08

作者简介: 李学杰 (1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: lxj13105161752@163.com。

* 通信作者: 李健 (1985-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: lijian@btbu.edu.cn。

identified in beef, 46 of which were also identified in plant-based meat analogues. The contents of aldehydes, alcohols and other compounds related to fat oxidation in beef were significantly higher than those in plant-based meat analogues, and the contents of pyrazine, furan and other heterocyclic compounds related to Maillard reaction in plant-based meat analogues were significantly higher than those in beef, and the contents of heterocyclic compounds in homemade plant-based meat analogues were higher than those in 3 kinds of commercial samples. The texture properties of beef in terms of hardness, elasticity, viscosity and masticability were better than those of plant-based meat analogues, and the texture properties of samples I, O and C were better than those of sample B.

Key words: plant-based meat analogues; volatile components; texture; gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry (GC-O-MS); solid-phase microextraction (SPME)

肉类被认为是最优质的蛋白质来源之一,它具有较高的营养价值,并且在烹饪过程中可以散发出独特的香气,自古以来就是人们日常饮食中不可或缺的一部分。然而,近年来受到资源、气候、环境、伦理等问题的制约,以及消费者对于营养、经济、健康食品的追求,食物供给系统正在向低肉类消费转变^[1]。随着食品科学技术的发展以及传统农业系统的改变,出现了一些新型的肉类替代品^[2],它们被称为人造肉、肉类似物、植物肉或仿制肉^[3-4]。以大豆、豌豆、小麦等植物蛋白为基础的植物蛋白肉,由于具有良好的营养价值和感官属性,受到越来越多消费者的青睐^[5]。

植物蛋白肉经过挤压、剪切、纺丝等技术进行组织化处理,产生类似肌肉的组织结构,从而具有很多肉的特点(如可见纤维、咀嚼性、弹性、嫩度和多汁性等),食用时具有肉的口感^[6]。风味是食品的一种重要感官属性,不仅可以反映食品的整体香气和质量特性,也是影响消费者接受程度的重要因素^[7]。为了获得与动物肉类似的风味,植物蛋白肉生产过程中往往会添加一些肉味香精来提升其感官属性;除此之外,一些植物来源的风味成分,如植物水解蛋白(HVP)、酵母抽提物(YE)、天然香辛料等被添加到植物蛋白肉中以获得与动物肉类相似的风味^[8]。

近几年,越来越多的公司致力于植物基肉类替代品的研发,其中最为著名的是美国的 Beyond Meat 公司和 Impossible Foods 公司。Beyond Meat 作为世界上第一家上市的植物肉公司,他们以植物蛋白(主要是豌豆蛋白)为原料,添加氨基酸、脂类以及甜菜汁等,模仿肉类的外观、风味、营养、口感,推出的 The Beyond Burger 是全球首款在肉食区域售卖的素食汉堡,外观、口感、味道都与真正牛肉相似。美国的 Impossible Foods 公司首次向植物组织蛋白中加入由毕赤酵母合成的植物血红素来制作植物肉产品^[9],血红素的添加不仅使植物肉的外观更加逼真,而且风味也有很大的改善^[10]。他们研发的 Impossible Burger 于 2017 年开始生产,并在 2019 年和全球连锁快餐品牌汉堡王合作推出了一款零牛肉的新产品“不可能皇堡(Impossible Whopper)”,这款新产品汉堡外观上面看上去与普通汉堡并无二样,但这是用植物蛋白肉生产的一款汉堡,与普通汉堡相比,可以减少 15% 的脂肪以及 90% 的胆固醇,受到

广大消费者尤其是素食主义者的欢迎。

目前,关于植物蛋白肉的研究主要集中在原料^[5]、加工方式^[11-12]对产品质量的影响,以及产品的营养性^[13]等方面。除营养健康以外,风味也是消费者在选购产品时考虑的一个重要因素,因此植物蛋白肉产品的感官属性就显得尤为重要。通过文献检索发现,对于植物蛋白肉和牛肉在风味、质构等感官属性差异对比的相关文章较少,本研究采用固相微萃取(solid-phase microextraction, SPME)结合气相色谱-嗅闻-质谱联用技术(gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, GC-O-MS),对 3 种市售植物蛋白肉样品(样品 I、样品 B、样品 O),一种自制植物蛋白肉样品(样品 C)以及一种牛肉样品中的挥发性组分进行鉴定,同时结合质构分析和感官评价分析感官属性,对比其差异,为植物蛋白肉生产工艺的改进奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

样品 I、样品 B、样品 O 来自国外 3 家知名植物肉公司,主要配料有大豆、小麦、豌豆等植物蛋白,椰子油,葵花油,膳食纤维,香辛料,以及牛肉风味前体物等;安格斯牛肉(前肩肉) 北京某商场;木糖、核糖、半胱氨酸、甘氨酸、丙氨酸、丝氨酸、蛋氨酸、I+G、水解植物蛋白、酵母抽提物、硫酸素、变性淀粉、蛋白粉 食品级,上海源叶生物科技有限公司;食用色素 丹尼斯克(中国)有限公司;葵花油、椰子油 北京某商场;C₇-C₃₀ 系列烷烃 美国 Sigma 公司;2-甲基-3-庚酮 色谱级,美国 Sigma 公司。

7890B/5977A 气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)

美国 Agilent 公司;Sniffer 9000 型嗅闻仪 瑞士 Brechbuler 公司;DB-WAX 型毛细管柱(60 m×0.25 mm, 0.25 μm) 美国 J&W 公司;50/30 μm SPME 萃取头(DVB/CAR/PDMS) 美国 Supelco 公司;TMS-Touch 物性分析仪 美国 FTC 公司

1.2 实验方法

1.2.1 植物蛋白肉样品 C 的制备 此产品根据本实验室反复优化的配方制得。将大豆组织蛋白和拉丝蛋白按照 8:2 的比例泡水 2 h。将 1.2 份半胱氨酸、0.8 份甘氨酸、0.8 份丙氨酸、0.8 份丝氨酸、0.8 份蛋氨酸、1.2 份木糖、1.2 份核糖、0.8 份 I+G、2 份植物

水解蛋白、0.8 份酵母抽提物、0.3 份硫胺素等风味前体物在室温条件下溶解在水中配成溶液,用此溶液在 0~4 ℃ 条件下浸泡脱水后的组织/拉丝蛋白 12 h,并均匀搅拌。将一定比例的变性淀粉、蛋白粉、葵花油、椰子油加入水中,与浸泡 12 h 的植物蛋白原料搅拌混匀,并加入一定比例的 TG 酶,最终置于模具中成型。

1.2.2 样品的前处理 将 4 种植物蛋白肉和 1 种牛肉制成直径为 10 cm,高度为 1.5 cm 的肉饼,为模拟汉堡中牛肉饼的烤制温度,进行 100~300 ℃ 的单因素优化,结果表明 200 ℃ 条件下烤制 10 min 效果最佳,烤制结束后切成大小均一的碎肉块。

1.2.3 挥发性风味成分的提取 采取 SPME 的方法对肉饼中的挥发性组分进行提取。准确称量 2.0 g 样品,放在 20 mL 的顶空瓶中,用 10 μL 微量进样器量取 1 μL 2-甲基-3-庚酮(0.816 μg/μL)作为内标加入到样品中。将装有样品的顶空瓶密封后置于 55 ℃ 的水浴锅中平衡 10 min,然后插入 SPME 萃取头在相同温度下吸附 45 min,待萃取结束后将萃取头拔出立即转移至 GC 进样口,在 250 ℃ 条件下解析 5 min。5 个样品均重复上述实验 3 次。

1.2.4 GC-O-MS 参数设置 气相色谱条件^[14]:不分流模式,载气为氦气,柱流量为 1.0 mL/min,前进样口温度设为 250 ℃。升温程序为初始温度 40 ℃,保持 3 min 后,以 2 ℃/min 升至 70 ℃,以 3 ℃/min 升至 130 ℃,再以 10 ℃/min 升至 230 ℃,保持 10 min,后运行时间为 3 min。

质谱条件:电子轰击(Electron impact, EI)离子源,电子能量为 70 eV,离子源温度为 230 ℃,四极杆温度为 150 ℃,溶剂延迟 4 min,质量扫描范围 m/z 为 50~350。

嗅闻仪条件:气味输出通道为无涂层填充的色谱柱,温度为 200 ℃,3 名经过培训的感官评价员对气味进行嗅闻,依次记录下每种气味出现的时间、特征及强度。

1.2.5 挥发性组分的定性分析 5 种肉样中的挥发性组分采用质谱库检索(MS)、保留指数(RI)、气味特征(O)3 种方法结合的方式进行定性分析^[15]。质谱库检索(MS):进入质谱检测器的组分通过与 Nist 2.0 数据库对比,选取正反匹配度大于 800 的物质为鉴定组分;保留指数(RI):以 C₇~C₃₀ 的系列烷烃为外标,根据目标物的出峰时间及相同升温条件下系列烷烃的出峰时间计算每种组分的实际保留指数,与文献中报道的理论保留指数对比分析。保留指数计算公式为:

$$RI = 100 \times n + \frac{100(T_a - T_n)}{(T_{n+1} - T_n)}$$

其中, T_a、T_n 和 T_{n+1} 分别为挥发性组分 a、系列烷烃 C_n 和 C_{n+1} 的出峰时间,3 种物质的出峰时间

为 T_n < T_a < T_{n+1}。

嗅闻特征(O):感官评价员对通过 GC-O-MS 分离出的挥发性组分进行记录,将嗅闻结果与该物质标准品的气味特征进行对比分析。

1.2.6 挥发性组分的定量分析 根据刘欢等^[16]的方法稍作修改,样品采取内标半定量的方法进行定量分析。将 1 μL 2-甲基-3-庚酮(0.816 μg/μL)标准品加入到待测肉样品,按照 1.2.4 中样品的升温程序在 GC-MS 模式下进行全扫描检测,通过内标物的浓度和峰面积与待测物的峰面积计算,计算公式为:

$$\rho_x = \frac{A_x \times \rho_1}{A_1}$$

其中, ρ_x 和 A_x 表示待测物的浓度和峰面积, ρ₁ 和 A₁ 表示内标物的浓度和峰面积。

1.2.7 质构的测定 参考马晓丽等^[17]的方法稍作修改,将测定肉样切成长×宽×高为 1 cm×1 cm×1.5 cm 的肉块,对其进行硬度、粘附性、弹性、回复性、胶粘性和咀嚼性的测试,测定条件为:选择 TMS 6 mm Steel 探头,测试速度为 20 mm/min,形变百分量为 30%,起始力为 1 N。

1.2.8 感官评价 5 种肉样的感官评价由 10 名(5 名男生,5 名女生,23~26 岁)长期从事风味方向研究的实验人员在温度为 25±2 ℃,相对湿度 50%~60%,空气新鲜,无风的品评室内进行,依次对 5 种肉样的肉香气、肉滋味、嫩度、多汁性、其它香气、异味以及总体可接受度 7 个方面进行评估,评定结果采取 5 分制(1 分代表最弱,5 分代表最强),每次品尝样品后用清水漱口,且两个样评定间隔 1 min,防止嗅觉疲劳引起的实验误差。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Office 2019 软件进行表格制作,采用 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析和显著性分析,显著性分析采用 Duncan 检验,利用 SIMCA 14.1 进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 挥发性组分的定性定量结果分析

2.1.1 5 种样品的整体风味分析 5 种样品经过 GC-MS 分析后的总离子流图如图 1 所示,挥发性组分的鉴定结果如表 1 和表 2 所示。由表 1 和表 2 可以看出,5 种样品中共鉴定出 154 种化合物,主要包括醛类、醇类、酮类、酸类、酯类、杂环类、含硫类、烯烃类、含苯环类、以及其它类,其中 40 种化合物可以被嗅闻到,为气味活性化合物。牛肉中共鉴定出 69 种化合物,其中有 46 种可以在植物肉中鉴定出来;共有 17 种化合物在 5 种样品中均被鉴定出来,其中大部分为醛类化合物(9 种);5 种化合物在 4 种植物肉产品种都被检测出,而牛肉中未被检测出。样品 B 中鉴定出 73 种挥发性组分,总含量为 5966.81 ng/g,种类和含量均为所有样品中最高,牛肉中的挥发性组

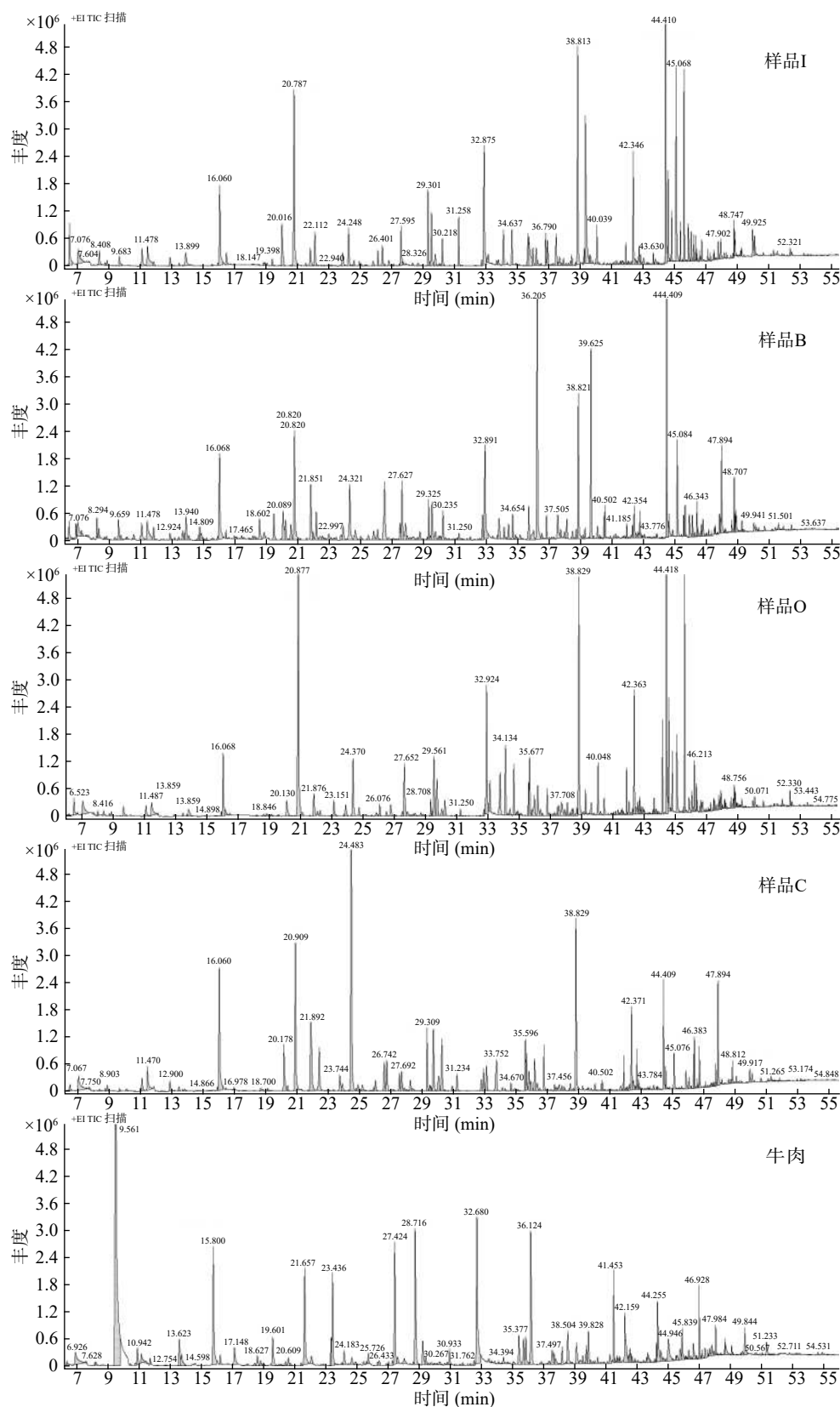


图 1 5 种样品经过 GC-MS 分析的总离子流图

Fig.1 Total ion chromatogram of 5 samples analyzed by GC-MS

分总浓度为 5339.92 ng/g, 仅次于样品 B, 但是种类较少, 仅有 58 种。从表 2 中可以看出, 无论是植物肉还是牛肉, 它们的醛类、醇类、酮类、酯类、含硫类以及杂环类化合物的种类及含量都十分丰富, 这些化合物主要通过脂肪降解以及美拉德反应产生, 对牛肉

特征风味的形成具有突出贡献^[18]。

2.1.2 醛类化合物 醛类物质主要来源于不饱和脂肪酸的热氧化, 具有脂肪、黄油和绿植等香味^[19]。由表 2 可知, 植物肉样品 I、B、O、C 中的醛类化合物含量分别为 1711.54、2070.74、915.57、946.01 ng/g,

表 1 通过 SPME-GC-O-MS 对植物蛋白肉和牛肉中的挥发性组分鉴定结果

Table 1 Volatile components identified by SPME-GC-O-MS from the plant-based meat analogues and roasted beef

CAS号		气味特征	理论RI	实际RI	定性方式	风味化合物浓度(ng/g)					
						样品I	样品B	样品O	样品C	牛肉	
醛类											
1	96-17-3	2-甲基丁醛	—	907	913	MS,RI	5.2±1.17 ^a	7±1.56 ^a	2.06±0.1 ^b	6.95±0.1 ^a	1.99±0.23 ^b
2	590-86-3	3-甲基丁醛	—	912	917	MS,RI	11.38±2.55 ^b	8.44±0.75 ^c	4.06±0.2 ^d	16.3±1.39 ^a	4±0.18 ^d
3	142-83-6	(E,E)-2, 4-己二烯醛	—	1398	951	MS	—	—	1.21±0.19	—	—
4	110-62-3	戊醛	麦芽、杏仁味	979	978	MS,RI,O	37.97±5.18 ^b	71.71±8.75 ^a	18.49±2.68 ^c	39.44±1.74 ^b	76.63±10.33 ^a
5	123-73-9	(E)-2-丁烯醛	—	1037	1039	MS,RI	51.94±7.11	—	—	—	—
6	66-25-1	己醛	青草味	1080	1081	MS,RI,O	205.12±18.25 ^c	295.03±27.92 ^b	77.51±3.63 ^d	364.05±4.69 ^b	532.53±81.77 ^a
7	1576-87-0	(E)-2-戊烯醛	—	1125	1131	MS,RI	7.22±0.86	—	—	—	—
8	111-71-7	脂肪、酸败味	1186	1182	MS,RI,O	36.55±6.25 ^c	230.46±50.14 ^b	33.13±2.23 ^c	—	458.6±66.48 ^a	
9	6728-26-3	(E)-2-己烯醛	—	1219	1219	MS,RI	36.41±1.57 ^a	49.45±11.73 ^a	17.53±4.28 ^b	—	—
10	124-13-0	辛醛	清香、脂肪味	1291	1288	MS,RI,O	65.1±8.85 ^c	191.46±9.91 ^b	63.23±8.51 ^c	45.5±5.52 ^c	548.22±32.61 ^a
11	18829-55-5	(E)-2-庚烯醛	肥皂、苦杏仁味	1320	1326	MS,RI,O	89.12±14.58 ^b	136.3±34.05 ^a	33.75±1.61 ^c	12.46±0.37 ^c	—
12	124-19-6	壬醛	—	1390	1394	MS,RI	232.16±27.09 ^c	356.31±56.77 ^b	123.48±24.3 ^d	68.44±12.27 ^d	751.37±78.6 ^a
13	2548-87-0	(E)-2-辛烯醛	清香、脂肪味	1434	1433	MS,RI,O	53.75±5.39 ^b	91.22±15.69 ^a	26.53±1.19 ^c	18.9±0.98 ^c	29.29±4.18 ^c
14	112-31-2	癸醛	肥皂、牛油味	1500	1501	MS,RI,O	20.57±2.22 ^c	66.44±0.53 ^b	12.63±2.88 ^c	—	81.66±9.59 ^a
15	100-52-7	苯甲醛	苦杏仁味	1529	1534	MS,RI,O	409.42±31.56 ^a	376.59±37.98 ^a	258.95±20.16 ^b	362.24±17.57 ^a	160.76±26.12 ^c
16	18829-56-6	(E)-2-壬烯醛	清香、黄瓜味	1542	1546	MS,RI,O	16.91±3.08 ^b	32.06±7.07 ^b	9.64±0.61 ^b	11.76±1.18 ^b	129.74±25.35 ^a
17	112-44-7	十一醛	—	1609	1609	MS,RI	4.5±0.48 ^b	—	3.45±0.79 ^b	—	36.25±13.8 ^a
18	3913-81-3	(E)-2-癸烯醛	牛油味	1648	1654	MS,RI,O	132.79±16.06 ^a	76.45±10.68 ^b	73.75±22.04 ^b	—	—
19	5910-87-2	(E,E)-2,4-壬二烯醛	—	1706	1713	MS,RI	9.97±1.68 ^a	—	4.15±0.24 ^b	—	—
20	53448-07-0	(E)-2-十一醛	—	1761	1765	MS,RI	88.43±12.47 ^a	—	39.15±0.46 ^b	—	—
21	2363-88-4	2,4-癸二烯醛	—	1795	1827	MS,RI	41.83±6.96 ^a	22.93±4.9 ^b	13.44±0.67 ^b	—	—
22	25152-84-5	(E,E)-2,4-癸二烯醛	煎炸、脂肪味	1795	1827	MS,RI,O	155.18±26.75 ^a	58.88±9.96 ^b	99.42±37.74 ^{ab}	—	—
醛类总含量							1711.54±104.35 ^c	2070.74±72.31 ^b	915.57±71.81 ^d	946.01±12.37 ^d	2811.03±383.41 ^a
醇类											
1	15250-22-3	2,7-二甲基-1-辛醇	—	—	829	MS	—	3.16±0.19	—	—	—
2	19550-05-1	3,4-二甲基-2-己醇	—	—	960	MS	—	—	—	—	9.11±0.76
3	41453-56-9	(Z)-2-壬烯-1-醇	甜瓜、柠檬味	—	1053	MS,O	—	—	—	2.62±0.03	—
4	38285-42-6	(E)-2-壬烯-2-醇	—	—	1053	MS	—	3.78±0.29	—	—	—
5	2088-07-5	2-甲基-1-戊烯-3-醇	—	—	1058	MS	—	23.18±1.26	—	—	—
6	69668-90-2	(Z)-3-壬烯-2-醇	黄瓜味	—	1060	MS,O	—	11.34±2.49	—	—	—
7	78-83-1	2-甲基-1-丙醇	—	1094	1102	MS,RI	—	—	—	—	82.17±23.18
8	112-42-5	1-十一醇	柑橘味	—	1127	MS,O	—	42.19±2.08 ^b	—	—	56.8±2.77 ^a
9	137-32-6	2-甲基-1-丁醇	—	1208	1209	MS,RI	—	—	—	—	82.36±15.84
10	123-51-3	3-甲基-1-丁醇	—	1211	1211	MS,RI	—	—	—	—	360.26±44.47
11	3913-02-8	2-丁基-1-辛醇	—	—	1234	MS	—	59.27±8.31	—	—	—
12	112-53-8	1-十二醇	—	1981	1234	MS	—	—	—	—	42.86±7.04
13	71-41-0	1-戊醇	—	1255	1261	MS,RI	32.04±1.93 ^b	39.93±1.05 ^a	12.17±1.65 ^c	25.78±5.07 ^b	45.23±5.03 ^a
14	111-27-3	己醇	青草、树脂味	1360	1361	MS,RI,O	106.06±15.55 ^a	23.23±4.43 ^{cd}	6.73±1.07 ^d	39.29±1.12 ^c	61.73±10.95 ^b
15	111-35-3	3-乙氧基-1-丙醇	—	1359	1379	MS,RI	—	—	—	—	6.14±0.15
16	21570-35-4	2-甲基-4-庚醇	—	—	1382	MS	—	—	—	—	6.08±0.91
17	69668-82-2	3, 5-辛二烯-2-醇	—	—	1412	MS	—	9.74±0.04	—	—	—
18	3391-86-4	1-辛烯-3-醇	蘑菇味	1456	1456	MS,RI,O	42.89±3.95 ^d	94.65±14.09 ^b	56.3±3.2 ^{cd}	71.04±3.32 ^c	124.38±16.06 ^a
19	111-70-6	庚醇	青草味	1462	1463	MS,RI,O	37.23±1.04 ^c	60.78±11.17 ^b	23.43±7.24 ^c	—	102.19±12.92 ^a
20	104-76-7	2-乙基己醇	—	1484	1496	MS,RI	78.15±15.92 ^a	—	11.87±3.4 ^{b1}	18.28±3.62 ^b	—
21	78-70-6	芳樟醇	—	1552	1558	MS,RI	—	—	—	5.48±0.8	—
22	111-87-5	辛醇	—	1564	1570	MS,RI	50.02±5.48 ^b	31.99±0.91 ^{bc}	32.58±10.02 ^{bc}	15.86±0.77 ^c	106.13±14.33 ^a
23	18409-17-1	(E)-2-辛烯-1-醇	—	1622	1622	MS,RI	7.31±0.01 ^a	—	3.31±1.02 ^b	—	—
24	98-55-5	α-松油醇	—	1698	1710	MS,RI	—	—	2.8±0.24	—	—
25	100-51-6	苯甲醇	甜味、花香味	1886	1894	MS,RI,O	10.6±1.31 ^a	—	3.09±0.4 ^b	13.84±2.55 ^a	—
26	60-12-8	苯乙醇	—	1923	1934	MS,RI	11.91±1.11 ^b	—	—	—	195.86±47 ^a
27	770-35-4	1-苯氧基-2-丙醇	—	—	2064	MS	—	69.69±14.97	—	—	—
28	4169-04-4	2-苯氧基-1-丙醇	—	—	2109	MS	—	13.26±4.76	—	—	—
醇类总含量							376.20±27.97 ^b	486.20±35.96 ^b	152.28±12.70 ^c	192.18±4.94 ^c	1281.31±195.62 ^a

续表 1

CAS号			气味特征	理论RI	实际RI	定性方式	风味化合物浓度(ng/g)				
							样品I	样品B	样品O	样品C	牛肉
酮类											
1	2550-21-2	3-甲基-2-己酮	—	1095	812	MS	—	3.46±0.53	—	—	—
2	105-42-0	4-甲基-2-己酮	—	—	811	MS	—	—	—	—	10.82±3.75
3	67-64-1	丙酮	—	814	815	MS,RI	91.63±11.41 ^a	47.99±6.53 ^b	15.75±1.6 ^c	22.1±0.31 ^c	—
4	2371-19-9	3-甲基-2-庚酮	—	—	899	MS	—	—	—	—	15.51±2.84
5	110-12-3	5-甲基-2-己酮	—	1155	826	MS	—	3.64±0.45	—	—	—
6	78-93-3	2-丁酮	—	900	903	MS,RI	33.49±3.6 ^a	29.15±5.87 ^a	4.84±0.26 ^b	6.87±0.35 ^b	—
7	123-54-6	乙酰丙酮	—	—	1052	MS	—	—	—	—	25.2±1.83
8	106-35-4	3-庚酮	—	—	1149	MS	—	—	—	—	4.3±1.23
9	110-43-0	2-庚酮	肥皂味	1183	1184	MS,RI,O	—	—	—	278.97±0.03	—
10	2550-21-2	3-甲基-2-己酮	—	—	1217	MS	—	18.3±4.29	—	—	—
11	589-63-9	4-辛酮	—	1224	1222	MS,RI	—	—	—	—	8.38±1.27
12	541-85-5	5-甲基-3-庚酮	—	—	1255	MS	—	38.54±3.91	—	—	—
13	111-13-7	2-辛酮	—	1278	1286	MS,RI	3.48±0.17 ^c	55.79±4.23 ^a	3.76±0.57 ^c	50.77±8.8 ^a	18.52±1.54 ^b
14	513-86-0	3-羟基-2-丁酮	黄油味	1287	1293	MS,RI,O	—	61.31±11.82	—	—	—
15	3214-41-3	2, 5-辛二烯酮	—	—	1320	MS	—	—	—	—	140.11±29.67
16	110-93-0	6-甲基-5-庚烯-2-酮	蘑菇、橡胶味	1341	1340	MS,RI,O	49.43±6.39 ^{bc}	109.19±14.41 ^a	73.13±18.99 ^b	36.31±9.41 ^c	—
17	821-55-6	2-壬酮	—	1398	1391	MS,RI	11.72±0.26 ^b	85.24±11.92 ^a	13.39±1.21 ^b	—	19.65±2.02 ^b
18	1669-44-9	3-辛烯-2-酮	—	—	1411	MS	—	—	—	37.27±3.61	—
19	14309-57-0	3-壬烯-2-酮	—	—	1521	MS	5.49±1.14 ^{ab}	7.51±1.83 ^a	—	4.19±0.41 ^b	—
20	30086-02-3	(E, E)-3, 5-辛二烯-2-酮	—	1569	1581	MS,RI	—	47.77±4.36 ^a	12.22±2.61 ^b	10.79±1.36 ^b	—
21	112-12-9	2-十一烷酮	—	1598	1604	MS,RI	—	10.06±2.28 ^a	1.83±0.37 ^b	—	16.58±4.10 ^a
22	98-86-2	苯乙酮	—	1652	1665	MS,RI	—	—	7.75±2.31	—	—
23	585-25-1	2, 3-辛二酮	—	—	1674	MS	11.85±2.42 ^a	—	5.03±0.2 ^b	—	—
24	593-08-8	2-十三酮	—	1816	1820	MS,RI	—	42.66±8.79 ^a	3.1±0.78 ^b	—	6.95±1.89 ^b
酮类总含量							207.08±16.31 ^d	560.62±18.12 ^a	140.78±22.01 ^c	447.26±21.20 ^b	266.03±32.73 ^c
酸											
1	64-19-7	乙酸	—	1452	1457	MS,RI	88.79±7.53 ^a	—	9.38±2.56 ^b	—	—
2	1979-9-4	丙酸	—	1535	1548	MS,RI	375.91±45.23	—	—	—	—
3	142-62-1	己酸	—	1861	1857	MS,RI	39.77±2.64 ^{bc}	53.85±5.59 ^b	15.48±5.45 ^d	21.43±0.39 ^{cd}	98.4±19.30 ^a
4	124-07-2	辛酸	—	2072	2072	MS,RI	21.05±0.45 ^a	—	13.00±2.87 ^b	—	—
5	112-05-0	壬酸	—	2169	2164	MS,RI	—	—	—	—	73.8±23.46
6	143-07-7	月桂酸	—	2479	2487	MS,RI	—	—	—	—	18.91±1.57
酸类总含量							525.52±51.76 ^a	53.85±5.59 ^c	37.86±6.53 ^c	21.43±0.39 ^c	191.12±42.23 ^b
酯类											
1	79-20-9	乙酸甲酯	—	825	826	MS,RI	—	—	1.8±0.34	—	—
2	141-78-6	乙酸乙酯	—	898	888	MS,RI	—	—	4.81±0.39	—	—
3	108-05-4	乙酸乙烯酯	—	—	976	MS	—	—	—	6.62±0.06	—
4	556-24-1	异戊酸甲酯	—	1018	1019	MS,RI	14.96±5.2 ^b	—	—	22.98±7.65 ^a	—
5	124-25-4	肉豆蔻醛	—	1924	1249	MS	—	18.9±1.73	—	—	—
6	106-32-1	辛酸乙酯	脂肪味	1440	1437	MS,RI,O	—	16.84±4.02	—	—	—
7	512-56-1	磷酸三甲酯	—	—	1482	MS	—	—	—	—	19.55±4.11
8	111-55-7	1, 2-乙二醇二乙酸酯	—	—	1558	MS	—	414.29±58.07	—	—	—
9	93-89-0	苯甲醛乙酯	—	1653	1680	MS,RI	—	—	5.83±0.97	—	—
10	140-11-4	乙酸苄酯	—	1742	1743	MS,RI	—	—	53.48±1.25	—	—
11	109-21-7	丁酸丁酯	—	1216	1873	MS	—	—	—	—	95.27±4.66
12	104-67-6	桃醛	苦杏仁味	—	1948	MS,O	4.78±0.71 ^b	9.51±2.83 ^a	3.37±0.73 ^b	—	—
13	616-38-6	碳酸二甲酯	—	—	2125	MS	—	—	—	—	50.8±13.28
14	112-39-0	棕榈酸甲酯	—	2233	2222	MS, RI	—	—	—	—	45.78±3.63
15	5129-61-3	异硬脂酸甲酯	—	—	2427	MS	—	—	—	—	17.89±11.51
酯类总含量							19.74±6.91 ^c	459.55±74.03 ^a	69.28±3.03 ^c	29.60 ±7.59 ^c	229.29±20.61 ^b
含硫类											
1	624-92-0	二甲基二硫醚	洋葱味	1066	1071	MS,RI,O	4.08±0.29 ^b	6.3±0.93 ^a	1.41±0.27 ^c	—	—
2	592-88-1	二烯丙基硫醚	—	1143	1141	MS,RI	20.83±3.47	—	—	—	—
3	2179-58-0	烯丙基甲基二硫醚	—	1281	1277	MS,RI	4.69±0.47	—	—	—	—
4	3268-49-3	3-甲硫基丙醛	肉味	1456	1459	MS,RI,O	—	—	—	55.83±5.32	—

续表 1

CAS号	气味特征	理论RI	实际RI	定性方式	风味化合物浓度(ng/g)					
					样品I	样品B	样品O	样品C	牛肉	
5 2179-57-9	二烯丙基二硫醚	洋葱、肉味	1475	1484	MS,RI,O	62.72±12.77	—	—	—	—
6 2179-57-9	己二烯二硫醚	—	1475	1485	MS,RI	—	—	3.18±0.74	—	—
	含硫类总含量					92.32±20.27 ^a	6.30±1.14 ^c	4.59±0.74 ^c	55.83±5.32 ^b	—
	杂环类									
1 290-37-9	吡嗪	烤榛子味	1257	1217	MS,RI,O	—	—	—	56.01±0.29	—
2 109-08-0	甲基吡嗪	—	1261	1272	MS,RI	19.93±2.56 ^b	—	16.82±1.34 ^b	106.28±5.62 ^a	—
3 123-32-0	2,5-二甲基吡嗪	—	1329	1331	MS,RI	30.93±1.74 ^c	—	43.96±3.47 ^b	170.79±8.35 ^a	—
4 108-50-9	2,6-二甲基吡嗪	烤牛肉味	1334	1337	MS,RI,O	6.52±0.64 ^b	35.02±9.79 ^a	6.92±1.56 ^b	—	—
5 13925-00-3	乙基吡嗪	烤花生味	1338	1342	MS,RI,O	—	—	—	32.72±7.74	—
6 5910-89-4	2,3-二甲基吡嗪	—	1342	1355	MS,RI	—	—	1.74±0.31 ^b	14.95±0.73 ^a	—
7 13360-64-0	5-甲基-2-乙基-吡嗪	咖啡、烤坚果味	1393	1399	MS,RI,O	—	—	35.68±3.78 ^b	63.65±3.18 ^a	—
8 40790-29-2	2,5-二甲基-3-丁基-吡嗪	—	—	1407	MS	—	—	—	—	38.72±14.83
9 13925-03-6	6-甲基-2-乙基吡嗪	—	1390	1400	MS,RI	23.14±2.67 ^b	97.74±6.15 ^a	—	—	—
10 14667-55-1	三甲基吡嗪	烤土豆味	1410	1414	MS,RI,O	11.42±0.12	81.04±14.02 ^a	44.27±3.07	72.26±0.17 ^a	—
11 13360-65-1	2,5-二甲基-3-乙基吡嗪	烤杏仁、烤土豆味	1449	1455	MS,RI,O	7.31±0.61 ^c	—	30.18±2.23 ^b	115.86±8.2 ^a	—
12 13925-07-0	3,5-二甲基2-乙基吡嗪	土豆味	1462	1472	MS,RI,O	—	—	7.72±0.18 ^b	23.14±5.71 ^a	—
13 18138-05-1	2-甲基3,5-二乙基吡嗪	—	1492	1504	MS,RI	—	—	12.49±1.64	—	—
14 620-02-0	5-甲基糠醛	焦糖味	1574	1583	MS,RI,O	—	72.26±4.33 ^a	—	18.77±0.52 ^b	19.19±3.07 ^b
15 22047-25-2	乙酰基吡嗪	—	1629	1641	MS,RI	—	—	10.06±1.32	—	—
16 98-00-0	糠醇	焦香味	1665	1670	MS,RI,O	32.6±2.29 ^b	—	13.52±0.98 ^c	63.74±4.99 ^a	—
17 3208-16-0	2-乙基呋喃	—	945	951	MS,RI	—	—	—	11.39±0.19	—
18 1004-29-1	2-丁基四氢呋喃	—	—	1158	MS	—	—	—	—	16.84±3.04
19 3777-69-3	2-戊基呋喃	豆腥味	1228	1226	MS,RI,O	77.26±4.89 ^c	214.75±2.61 ^b	85.38±11.62 ^c	777.51±49.89 ^a	51.07±10.37 ^c
20 98-01-1	糠醛	杏仁味	1467	1468	MS,RI,O	44.12±7.14 ^c	934.37±64.75 ^a	29.23±6.52 ^c	82.18±5.68 ^{bc}	131.81±19.49 ^b
21 1192-62-7	2-乙酰基呋喃	—	1501	1513	MS,RI	—	56.1±6.23 ^a	11.36±2.13 ^b	10.7±0.63 ^b	—
22 4179-38-8	2-辛基呋喃	—	—	1542	MS	0.77±0.19	—	—	—	—
23 98-00-0	2-呋喃甲醇	焦香味	1665	1670	MS,RI,O	—	61.88±9.87 ^a	—	—	44.78±14.99 ^a
24 3658-77-3	呋喃酮	—	2033	2056	MS,RI	—	24.55±5.84	—	—	—
25 616-44-4	3-甲基噻吩	脂肪味	1114	1089	MS,RI,O	31.96±4.32	—	—	—	—
	杂环类总含量					285.96±12.35 ^b	1577.71±130.29 ^a	349.33±9.58 ^b	1619.96±72.07 ^a	302.41±33.88 ^b
	含苯环类									
1 108-88-3	甲苯	—	1037	1038	MS,RI	—	19.92±1.82 ^b	13.25±1.6 ^b	—	98.56±33.86 ^a
2 108-38-3	1,3-二甲基苯	—	1141	1119	MS,RI	—	9.29±1.5	—	—	—
3 106-42-3	对二甲苯	—	1130	1133	MS,RI	5.96±0.44 ^b	—	6.68±1.18 ^b	5.68±0.89 ^b	25.16±4.18 ^a
4 95-47-6	邻二甲苯	—	1130	1133	MS,RI	5±0.85 ^b	—	—	—	13.01±1.36 ^a
5 103-65-1	丙苯	—	1207	1203	MS,RI	—	35.18±4.18	—	—	—
6 527-84-4	邻-异丙基苯	—	1298	1266	MS,RI	42.17±1.11 ^a	—	—	52.81±18.3 ^a	—
7 95-63-6	1,2,4-三甲基苯	—	1278	1275	MS,RI	—	—	—	—	6.79±0.6
8 104-51-8	丁苯	—	1312	1311	MS,RI	—	31.54±5.63	—	—	—
9 135-77-3	1,2,4-三甲氧基苯	—	—	1979	MS	—	—	3.9±0.51	—	—
	含苯环类总含量					53.13±1.60 ^{bc}	95.93±5.06 ^b	23.84±2.74 ^c	58.49±17.62 ^{bc}	143.52±48.18 ^a
	烯烃类									
1 111-67-1	2-辛烯	—	—	836	MS	—	28.41±2.42	—	—	—
2 124-11-8	1-壬烯	—	931	938	MS,RI	—	61.04±2.64	—	—	—
3 20063-77-8	3-壬烯	—	—	953	MS	—	9.01±0.58 ^b	—	—	15.34±3.62 ^a
4 872-05-9	1-癸烯	—	1047	1039	MS,RI	—	92.9±4.81	—	—	—
5 19689-18-0	4-癸烯	—	—	1055	MS	—	20.37±0.84	—	—	—
6 4941-53-1	5-十一烯	—	—	1142	MS	—	77.76±19.15	—	—	—
7 5989-27-5	柠檬烯	—	—	1187	MS	73.9±2.35 ^b	74.91±42.64 ^b	140.56±23.06 ^a	13.65±1.76 ^c	—
8 99-85-4	γ-松油烯	—	1235	1239	MS,RI	11.27±1.83 ^b	20.98±1.54 ^a	—	—	—
9 100-42-5	—	—	1255	1255	MS,RI	14.25±0.99 ^b	—	8.06±1.32 ^b	110.28±29.14 ^a	15.51±4.55 ^b
10 527-84-4	伞花烃	—	1298	1268	MS,RI	—	—	84.69±13.85	—	—
	烯烃类总含量					99.42±0.87 ^c	385.39±53.26 ^a	233.30±38.52 ^b	123.94±27.38 ^c	30.86±3.44 ^d

续表 1

CAS号		气味特征	理论RI	实际RI	定性方式	风味化合物浓度(ng/g)					
						样品I	样品B	样品O	样品C	牛肉	
其它类											
1	501-92-8	4-烯丙基苯酚	—	—	1740	MS	—	—	—	3.61±0.21	—
2	90-05-1	2-甲氧基苯酚	—	1889	1879	MS,RI	—	59.98±6.08	—	—	—
3	90-05-1	愈创木酚	—	1889	1879	MS,RI	24.72±0.19 ^a	—	15.65±2.46 ^b	—	—
4	1072-83-9	2-乙酰基吡咯	—	1980	1997	MS,RI	—	—	6.64±0.7	—	—
5	118-71-8	麦芽酚	—	1981	1999	MS,RI	—	210.55±25.83	—	—	—
6	118-71-8	甲基麦芽酚	焦糖味	1981	1999	MS,RI,O	—	—	—	188.35±8.03	—
7	118-71-8	麦芽酚	—	1981	2001	MS,RI	—	—	10.1±2.29	—	—
8	108-95-2	苯酚	—	2006	2007	MS,RI	—	—	—	—	48.82±10.78
9	120-72-9	吡嗪	—	2441	2473	MS,RI	—	—	—	—	35.58±1.53
其它类总含量							24.72±0.19 ^d	270.53±37.36 ^a	32.38±1.36 ^d	191.96±8.23 ^b	84.40±11.84 ^c
所有化合物总含量							3395.63±76.50 ^b	5966.81±305.69 ^a	1959.23±136.14 ^c	3686.67±34.65 ^b	5339.98±740.99 ^a

表 2 5 种肉样中的化合物含量和数量汇总

Table 2 Summary of compounds content and variety 5 meat samples

	化合物含量(ng/g)					化合物数量(种)				
	样品I	样品B	样品O	样品C	牛肉	样品I	样品B	样品O	样品C	牛肉
醛类	1711.54±104.35 ^c	2070.74±72.31 ^b	915.57±71.81 ^d	946.01±12.37 ^d	2811.03±383.41 ^a	21	16	20	10	12
醇类	376.20±27.97 ^b	486.20±35.96 ^b	152.28±12.70 ^c	192.18±4.94 ^c	1281.31±195.62 ^a	9	14	9	8	14
酮类	207.08±16.31 ^d	560.62±18.12 ^a	140.78±22.01 ^c	447.26±21.20 ^b	266.03±32.73 ^c	7	14	10	8	10
酸类	525.52±51.76 ^a	53.85±5.59 ^c	37.86±6.53 ^c	21.43±0.39 ^c	191.12±42.23 ^b	4	1	3	1	3
酯类	19.74±6.91 ^c	459.55±74.03 ^a	69.28±3.03 ^c	29.60 ±7.59 ^c	229.29±20.61 ^b	2	4	5	2	5
含硫类	92.32±20.27 ^a	6.30±1.14 ^c	4.59±0.74 ^c	55.83±5.32 ^b	0	4	1	2	1	0
杂环类	285.96±12.35 ^b	1577.71±130.29 ^a	349.33±9.58 ^b	1619.96±72.07 ^a	302.41±33.88 ^b	11	9	14	15	6
含苯环类	53.13±1.60 ^{bc}	95.93±5.06 ^b	23.84±2.74 ^c	58.49±17.62 ^{bc}	143.52±48.18 ^a	3	4	3	2	4
烯炔类	99.42±0.87 ^c	385.39±53.26 ^a	233.30±38.52 ^b	123.94±27.38 ^c	30.86±3.44 ^d	3	8	3	2	2
其它类	24.72±0.19 ^d	270.53±37.36 ^a	32.38±1.36 ^d	191.96±8.23 ^b	84.40±11.84 ^c	1	2	3	2	2
汇总	3395.63±76.50 ^b	5966.81±305.69 ^a	1959.23±136.14 ^c	3686.67±34.65 ^b	5339.98±740.99 ^a	65	73	72	51	58

而牛肉中醛类化合物量为 2811.03 ng/g, 显著高于植物肉样品 ($P<0.05$), 并且植物肉样品 I 和样品 B 中的醛类化合物含量要高于样品 O 和样品 C。由表 1 可以看出, 牛肉中的己醛 (532.53 ng/g)、庚醛 (458.6 ng/g)、辛醛 (548.22 ng/g)、壬醛 (751.37 ng/g) 等饱和醛类含量丰富, 这是导致其醛类化合物含量高于植物肉的主要原因; (*E,E*)-2, 4-己二烯醛、(*E*)-2-丁烯醛、(*E*)-2-戊烯醛、(*E*)-2-己烯醛、(*E*)-2-庚烯醛、(*E*)-2-癸烯醛、(*E,E*)-2,4-壬二烯醛、(*E*)-2-十一醛、2,4-癸二烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛等不饱和醛只在植物肉样品中检出, 而牛肉中未检出, 因此牛肉中只检测出 12 种醛类化合物, 远低于植物肉样品 I (21 种) 和样品 O (20 种)。有研究表明, 烯醛、二烯醛等不饱和醛是某些动物脂肪加热过程中产生的特征香气化合物^[20], 其可以进一步氧化形成呋喃类、醇类以及碳酰化合物^[21], 提升牛肉的整体香气。不同植物肉样品之间的醛类化合物差异也十分明显, 样品 I 和样品 B 中的醛类化合物尤其是不饱和醛的种类和含量相对较高, 因此植物肉样品 I 和 B 的脂肪香气更浓。

2.1.3 杂环化合物 如表 2 所示, 植物肉样品 I、B、O、C 以及牛肉中杂环类化合物的含量分别为

285.96、1577.71、349.33、1619.96、302.41 ng/g, 种类分别为 11、9、14、15、6 种, 植物肉样品 B 和 C 中杂环化合物的含量和种类均显著高于其他样品 ($P<0.05$)。5 种样品中检测出来的杂环化合物主要包括呋喃、吡嗪、噻唑等, 这些化合物是烤肉制品中十分关键的香气成分, 主要通过糖和氨基酸之间的美拉德反应, 硫胺素和氨基酸的降解等反应产生, 大多数的杂环类化合物具有典型的烤肉香^[22]。通过表 1 可以看出, 样品 C 中吡嗪、甲基吡嗪、乙基吡嗪、5-甲基-2-乙基-吡嗪、2, 5-二甲基-3-乙基吡嗪的含量分别为 56.01、106.28、32.72、63.65、115.86 ng/g, 均显著高于其他样品 ($P<0.05$), 吡嗪类化合物是美拉德反应的衍生产物, 其来自于氨基酸、二羰基化合物的 Strecker 降解以及氨基羰基化合物的缩合, 具有典型的肉香、烘烤香、坚果香^[23], 广泛存在于烤土豆、烤花生等烘烤食品中^[24]。样品 B 中的 2-呋喃甲醇、呋喃酮的含量分别为 61.88、24.55 ng/g, 为 5 种样品中含量最高, 呋喃类化合物具有典型的肉香、烘烤香、焦香^[25], 并且阈值一般较低, 对牛肉的整体香气贡献较大。本研究所选取的 5 种肉样中未检出噻唑类化合物, 这可能是噻唑类化合物含量低于仪器的检测限导致的。

2.1.4 含硫化合物 如表 2 所示,植物肉样品 I、B、O、C 中的含硫化合物含量分别为 92.32、6.30、4.59、55.83 ng/g,种类分别为 4、1、2、1 种,而牛肉样品中未检测到含硫化合物。含硫化合物是影响牛肉风味的主要化合物,这类化合物的阈值较低且具有肉香味,对肉制品的整体风味十分重要^[26]。5 种肉样中仅检测到二甲基二硫醚、二烯丙基硫醚、烯丙基甲基二硫醚、3-甲硫基丙醛、二烯丙基二硫醚、己二烯二硫醚这 6 种含硫化合物,4 种硫醚类化合物均在植物肉样品 I 中被检测到。植物肉样品 C 中虽然仅检测到 3-甲硫基丙醛这一种含硫化合物,但是其浓度较高,为 55.83 ng/g,3-甲硫基丙醛主要由半胱氨酸等含硫氨基酸的热降解产生,阈值极低(水中阈值为 1.4–4.5 ng/g)^[27],具有洋葱、硫磺和肉香,可以使肉感厚实,提升整体风味^[28]。

2.1.5 醇类化合物 如表 2 所示,植物肉样品 I、B、O、C 以及牛肉中醇类化合物的含量分别为 376.20、486.20、152.28、192.18、1281.31 ng/g,种类分别为 9、14、9、8、14 种,牛肉中的醇类化合物含量远高于植物肉样品。牛肉中较高的醇类化合物含量主要是由 2-甲基-1-丙醇、2-甲基-1-丁醇、3-甲基-1-丁醇、苯乙醇等化合物引起的,它们在牛肉中的含量为 82.17、82.36、360.26、195.86 ng/g,除苯乙醇外,其余化合物在植物肉样品中均未被检出。醇类化合物一般由肌肉组织中的脂肪氧化产生,可以赋予牛肉香甜味,但是它们的阈值一般较高,因此对风味的整体贡献相对较小^[18]。

2.1.6 酮类化合物 如表 2 所示,植物肉样品 I、B、O、C 以及牛肉中酮类化合物的含量分别为 207.08、560.62、140.78、447.26、266.03 ng/g,种类分别为 7、14、10、8、10 种,样品 B 中的酮类化合物含量和种类均高于其他样品。酮类化合物由热降解和美拉德反应产生,具有焦燃味、桉叶味以及脂肪味等特殊香气,对于肉类的血腥味道具有明显的增强作用^[29]。Machiell 等^[30]发现烹饪条件下影响牛肉风味的主要化合物是 2-丁酮、2-辛酮以及 3-羟基-2-丁酮等,这些化合物在本研究中均被检测到,其中 2-丁酮在样品 I 中含量最高,为 33.49 ng/g,2-辛酮和 3-羟基-2-丁酮在样品 B 中含量最高,分别为 55.79 和 61.31 ng/g。

2.1.7 酯类化合物 如表 2 所示,植物肉样品 I、B、O、C 以及牛肉中酮类化合物的含量分别为 19.74、459.55、69.28、29.60、229.29 ng/g,种类分别为 2、4、5、2、5 种,样品 B 中的酯类化合物含量最丰富。通过表 1 可以看出,样品 B 中酯类含量最高是由 1,2-乙二醇二乙酸酯引起的,其含量为 414.29 ng/g,其余样品中均未检出此化合物。酯类化合物也是构成牛肉香气的主要成分之一,主要由醇类和酸类化合物之间的酯化反应生成,一般具有清香、酒香,以及微弱的果香^[18]。根据文献^[31]报道,对牛肉风味贡献较大的酯类化合物主要为乙酸乙酯,乙酸乙酯仅在样品 O 中检出,含量为 4.81 ng/g。

2.2 主成分分析 (principal component analysis, PCA) 结果

以每种肉样中醛类、醇类、酮类、酸类、酯类、杂环类、含硫类、烯烃类、含苯环类、其它类化合物的浓度为自变量,进行主成分分析。结果如图 2 所示。其中,主成分 1 和主成分 2 的贡献率分别为 42.5% 和 36.2%,总贡献率达到了 78.7%(>75%),表明这 2 个主成分能够反映 5 种肉样中所含挥发性组分的实际情况。从载荷图(图 2b)中可以看出,醇类、醛类等化合物含量与主成分 2 正相关,从得分图(图 2a)可以看出,牛肉样品的主成分 2 最大,因此其醇类、醛类化合物的含量较高;杂环类化合物的含量与主成分 1 正相关,与主成分 2 负相关,从得分图(图 2a)中可以看出,样品 B 的主成分 1 最大,样品 C 的主成分 2 最小,因此这两者的杂环类化合物浓度较高。

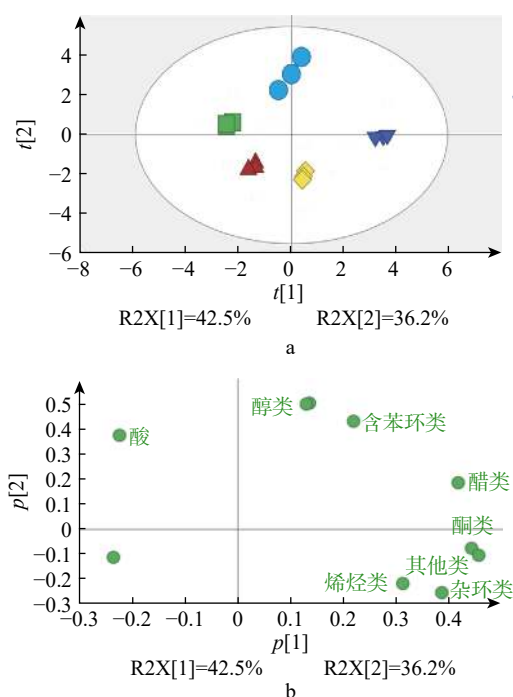


图 2 5 种样品经过 PCA 分析的得分图(a)和载荷图(b)

Fig.2 Score scatter plot (a) and loading scatter plot (b) of 5 samples after PCA analysis

2.3 质构结果分析

本研究从硬度、粘附性、弹性、回复性、胶粘性 and 咀嚼性 6 个方面对 5 种肉样的质构特征进行评价,由表 3 可知,牛肉和各植物肉之间的质构差距显著($P < 0.05$),除粘附性和胶粘性外,牛肉的其它质构指标均高于植物蛋白肉。4 种植物肉样品中,样品 I、O、C 的质构差异不大,要明显好于样品 B。

硬度与蛋白质结构的变化密切相关,蛋白质分子的伸展及聚集,导致蛋白质结构改变,从而在一定程度上影响产品质地^[32],牛肉的硬度为 9.31 N,是植物肉样品(1.76–4.36 N)的 1–5 倍,因为植物蛋白肉主要通过组织化的植物蛋白组成,与肌肉蛋白相比其结构相对松散,因此硬度较低;牛肉的弹性为

表 3 植物蛋白肉和牛肉之间的质构分析

Table 3 Texture analysis between plant-based meat analogues and beef

	样品I	样品B	样品O	样品C	牛肉
硬度(N)	4.36±0.57 ^b	1.76±0.23 ^d	3.43±0.2 ^{bc}	2.91±0.25 ^c	9.31±1.02 ^a
粘附性(N×mm)	0.03±0.01 ^c	0.06±0 ^e	0.04±0 ^b	0.03±0 ^c	0.02±0 ^d
弹性(mm)	2.20±0.25 ^b	1.07±0.29 ^c	2.40±0.17 ^b	2.31±0.12 ^b	3.58±0.15 ^a
回复性(%)	0.18±0.02 ^d	0.15±0.01 ^e	0.27±0 ^c	0.37±0.01 ^a	0.32±0.01 ^b
胶粘性(N)	1.89±0.33 ^b	0.64±0.03 ^c	1.94±0.19 ^b	1.93±0.16 ^b	6.19±0.28 ^a
咀嚼性(mJ)	4.21±1.23 ^b	0.8±0.09 ^c	4.67±0.58 ^b	4.47±0.44 ^b	22.17±1.86 ^a

3.58 mm, 植物肉样品 I、O、C 的弹性接近, 分别为 2.20、2.40、2.31 mm, 显著高于样品 B(1.07 mm), 牛肉的弹性更大是动物蛋白的凝胶性能优于植物蛋白导致的; 牛肉的胶粘性为 6.19 N, 植物肉 I、O、C 的胶粘性差距不大, 在 1.89~1.41 N 之间, 著高于样品 B(0.64 N), 牛肉的胶粘性较高是酶和微生物的共同作用导致的^[33]; 牛肉的咀嚼性为 22.17 mj, 植物肉样品 I、O、C 的弹性相差不大, 在 4.21~4.47 mj 之间, 显著高于样品 B(0.8 mj), 肉制品的咀嚼性与硬度、弹性和胶粘性有关, 硬度、弹性和胶粘性越高, 咀嚼越细腻, 咀嚼性越好^[34]。

2.4 感官评价结果分析

对于 5 种肉样烤制前后的外观如图 3 所示, 烤制后的感官评价结果如表 4 所示。从图 3 中可以看出, 与牛肉相比, 植物蛋白肉在烤制之前呈灰色, 而牛肉颜色偏红; 烤制之后, 样品 I 与牛肉的颜色最为接近, 可能与样品 I 中添加了植物血红素有关。

从表 4 可以看出, 样品 C 在肉香气和肉滋味方面的感官得分与牛肉最为接近, 高于 3 种市售植物肉产品, 这与 2.1 中的 GC-O-MS 鉴定结果相匹配, 样品 C 中的杂环类化合物含量最高, 这类化合物可以提供典型的烘烤香以及肉香, 因此在肉香味和肉滋味方面得分更高。值得注意的是, 牛肉样品的异味得分较高, 甚至超过了某些植物肉样品, 这可能与牛肉的膻味有关, 而植物蛋白肉的异味主要来自于大豆、豌豆等植物蛋白的豆腥味; 植物蛋白肉的嫩度得分要高于牛肉, 这说明植物蛋白肉的肉质过于松散, 咀嚼性较差, 这一点与 2.3 质构分析中牛肉的质构性能显著高于植物肉这一结果相匹配。

在感官方面, 与牛肉相比, 植物肉烹饪前后的颜色变化不明显, 部分产品存在豆腥味, 质构特性较差,

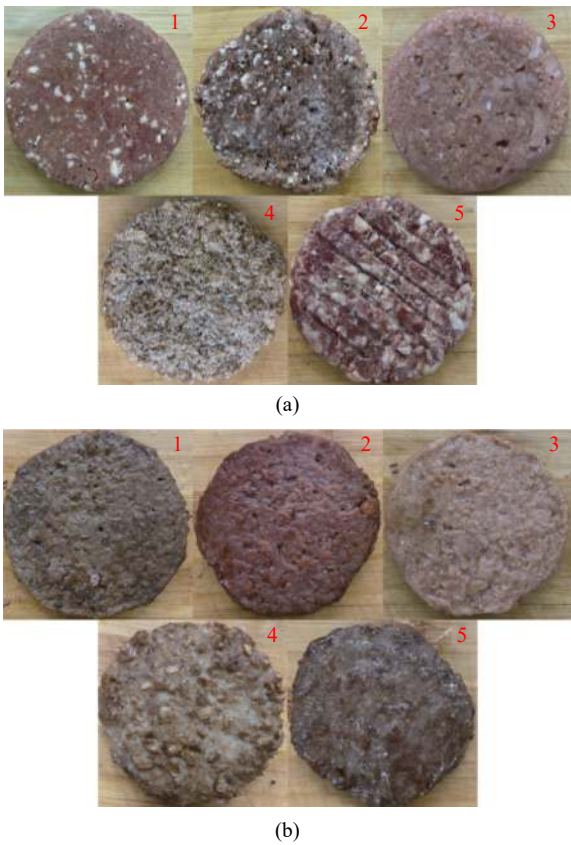


图 3 5 种肉样烤制之前(a)和烤制之后(b)的外观变化

Fig.3 The appearance changes of 5 kinds of meat samples before cooking (a) and after cooking (b)

注: 1: 样品 I; 2: 样品 B; 3: 样品 O; 4: 样品 C; 5: 牛肉。

咀嚼性不好, 这些感官属性需要在今后加工过程中进一步改进。

3 结论

通过 GC-O-MS 分析, 牛肉中共鉴定出 58 种挥

表 4 不同植物肉和牛肉之间的感官评价得分对比

Table 4 Comparison of sensory evaluation scores between different plant-based meat analogues and beef

	样品I	样品B	样品O	样品C	牛肉
肉香气	2.7±0.95 ^a	3.0±1.05 ^a	2.0±0.67 ^b	3.2±0.79 ^a	3.3±1.49 ^a
肉滋味	2.6±1.17 ^{bc}	2.6±0.84 ^{bc}	1.9±0.57 ^c	3.4±0.84 ^{ab}	4.0±1.05 ^a
嫩度	2.4±1.07 ^a	2.7±0.95 ^a	2.9±0.99 ^a	2.8±0.79 ^a	2.3±0.95 ^a
多汁性	2.5±0.71 ^a	2.6±0.84 ^a	2.4±0.84 ^a	2.4±1.17 ^a	2.3±0.95 ^a
其它香气	3.1±0.99 ^a	3.0±1.41 ^a	2.6±1.17 ^{ab}	3.1±0.88 ^a	1.9±1.2 ^b
异味(如豆腥味、肉膻味等)	2.2±1.4 ^a	1.9±1.29 ^a	2.3±1.06 ^a	1.8±0.92 ^a	2.0±0.94 ^a
总体可接受度	3.1±0.88 ^{ab}	2.9±0.99 ^{ab}	2.4±1.17 ^b	3.7±0.82 ^a	3.0±1.15 ^{ab}

发性化合物,其浓度为5339.98 ng/g,植物肉样品中鉴定出的挥发性组分与牛肉相似,种类在51~73种之间,含量在1959.23~5966.81 ng/g之间。尤其是自制植物肉样品C,其含有的吡嗪、呋喃等与肉香味高度相关的杂环类化合物种类和含量丰富(15种,1619.96 ng/g),为所有植物肉样品中最高,甚至超过牛肉(6种,302.41 ng/g),感官评价结果也证实了这一点,样品C的肉香气和肉滋味得分为3.2和3.4,显著高于3种市售植物肉($P<0.05$),与牛肉(3.3和4.0)得分相近;牛肉的咀嚼性为22.17 mJ,植物肉咀嚼性在0.8~4.67 mJ之间,与牛肉差距较大,这是硬度、弹性、胶粘性等质构指标相互作用的结果。

目前的植物蛋白肉产品在肉香气和肉滋味等方面与牛肉相似度较高,但是,产品的外观以及质构特性与牛肉相比差距较大,因此,在今后的植物肉生产过程中,需要着重优化植物蛋白组织化处理工艺,寻找合适的植物色素以及粘合剂,进一步提升产品的感官品质。

参考文献

- [1] 周景文, 张国强, 赵鑫锐, 等. 未来食品的发展: 植物蛋白肉与细胞培养肉[J]. *食品与生物技术学报*, 2020, 39(10): 1-8.
- [2] 张斌, 屠康. 传统肉类替代品——人造肉的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(9): 327-333.
- [3] Sadler M J. Meat alternatives-market developments and health benefits[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2004, 15(5): 250-260.
- [4] 李学杰, 李健. 动物蛋白替代品“人造肉”的研究进展[C]//第二届国际食品安全与营养健康高峰论坛. 北京: 国际会议, 2020.
- [5] Guo Z W, Teng F, Huang Z X, et al. Effects of material characteristics on the structural characteristics and flavor substances retention of meat analogs[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105(5-6): 105752.
- [6] 王翀, 刘欣, 张春红, 等. 湿法纺丝组织化大豆分离蛋白影响因素的研究[J]. *农业科技与装备*, 2008(3): 69-70.
- [7] 邱太莉, 李学杰, 李健, 等. 猕猴桃货架期品质及关键风味物质分析[J]. *食品科学技术学报*, 2020, 38(3): 51-59.
- [8] Li X J, Li J. The flavor of plant-based meat analogues[J]. *Cereal Foods World*, 2020, 65(00404).
- [9] 赵鑫锐, 张国强, 李雪良, 等. 人造肉大规模生产的商品化技术[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(11): 248-253.
- [10] Ellen J V L, Vincenzina C, Jayson L L. Consumer preferences for farm-raised meat, lab-grown meat, and plant-based meat alternatives: Does information or brand matter?[J]. *Food Policy*, 2020, 95: 101931.
- [11] Beniwal A S, Singh J, Kaur L, et al. Meat analogs: Protein restructuring during thermomechanical processing[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(2).
- [12] Steven H V C, Silvia J E S, Judith L, et al. Enhancing the water holding capacity of model meat analogues through marinade composition[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 290: 110283.
- [13] Anzani C, Boukid F, Drummond L, et al. Optimising the use of proteins from rich meat co-products and non-meat alternatives: Nutritional, technological and allergenicity challenges[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109575.
- [14] 李娟, 韩东, 米思, 等. 基于HS-SPME-GC-MS法优化酱牛肉中挥发性风味物质萃取条件[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(15): 266-273.
- [15] 杨帆, 陈尔豹, 牛晓媛, 等. GC-O-MS分析热处理前后西瓜汁挥发性风味成分[J]. *食品科学技术学报*, 2020, 38(3): 35-42.
- [16] 刘欢, 张德权, 王振宇, 等. 北京烤鸭腿皮与腿肉关键挥发性风味物质解析[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(2): 308-318.
- [17] 马晓丽, 杨书捷, 张龙涛, 等. 复合替代盐对调理牛肉品质的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(12): 30-36.
- [18] 宋泽. 炖煮牛肉风味研究及其形成机理初探[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2019.
- [19] Utama D T, Lee C W, Park Y S, et al. Comparison of meat quality, fatty acid composition and aroma volatiles of Chikso and Hanwoo beef[J]. *Asian-Australas Journal of Animal Sciences*, 2018, 31(9): 1500-1506.
- [20] Xie J C, Sun B G, Zheng F P, et al. Volatile flavor constituents in roasted pork of Mini-pig[J]. *Food Chemistry*, 2008, 109(3): 506-514.
- [21] Noleau I, Toulemonde B. Volatile components of roasted chicken fat[J]. *Lebensmittel-Wissenschaft und -Technologie*, 1987, 20(1): 37-41.
- [22] 戴水平, 肖作兵, 马双双, 等. 一种烤牛肉的挥发性成分分析及其香气模拟[J]. *香料香精化妆品*, 2010(5): 43-47.
- [23] Aaslyng M D, Meinert L. Meat flavour in pork and beef - From animal to meal[J]. *Meat Science*, 2017, 132: 112-117.
- [24] 姚磊. 花生油特征香气成分和营养物质组成的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016.
- [25] 孙建军, 陈攀铁, 周瑞宝. 牛肉香气成分的研究[J]. *郑州粮食学院学报*, 1995, 1: 7-19.
- [26] 张谦益, 臧勇军, 吴洪华, 等. 牛肉酶解物制备肉味香精的研究[J]. *肉类研究*, 2006, 4: 25-28.
- [27] Van Gemert L J E. Compilation of odor threshold values in air and water[J]. RID, CIVO-TNO, Zeist, The Netherlands, 1977: 1977.
- [28] 朱建才, 肖作兵, 王进, 等. 一款7015烤牛肉香精的香气成分分析[J]. *香料香精化妆品*, 2012(6): 14-16.
- [29] Cao C C, Xie J C, Hou L, et al. Effect of glycine on reaction of cysteine-xylose: Insights on initial Maillard stage intermediates to develop meat flavor[J]. *Food Research International*, 2017, 99(P1): 444-453.
- [30] Machiels D, Ruth S M V, Posthumus M A, et al. Gas chromatography-olfactometry analysis of the volatile compounds of two commercial Irish beef meats[J]. *Talanta*, 2003, 60(4): 755-764.
- [31] 宋焕禄. 食用香料生化生物制备[M]. 北京: 中国物资出版社, 2002: 27.
- [32] Spaziani M, Torre M D, Stecchini M L. Changes of physicochemical, microbiological, and textural properties during ripening of Italian low-acid sausages. Proteolysis, sensory and volatile profiles[J]. *Meat Science*, 2009, 81(1): 77-85.
- [33] 彭聪. 不同成熟时期干腌火腿的品质变化及安全性研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2015.
- [34] 伏慧慧, 马雪莲, 普莉雯, 等. 干腌牛肉加工过程中蛋白质变化对品质影响研究[J/OL]. *食品与发酵工业*: 1-10[2021-05-16]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026063>.