

白猪肉与黑猪肉热反应香精中香气物质分析鉴定

赵梦瑶, 赵 健, 谢建春*, 肖群飞, 范梦蝶, 王天泽, 杜文斌, 王 蒙, 郭夏云
(北京食品营养与人类健康高精尖创新中心, 食品质量与安全北京实验室, 北京市食品添加剂与配料工程中心,
北京工商大学, 北京 100048)

摘 要: 以黑猪肉和白猪肉酶解物及氧化脂肪为原料, 经热反应制备肉味香精。溶剂辅助蒸发结合气相色谱-质谱联机分析挥发性风味物质, 基于保留指数、质谱共鉴定出123种挥发性化合物, 包括含硫化物、含氮杂环、含氧杂环、醛类、酮类、醇类、酸类、酯类、烃类等。相比之下, 白猪肉香精中烷基呋喃、脂肪族醛和酸的相对含量较高, 黑猪肉香精中含硫化物、含氮杂环、酯类化合物的相对含量较高, 而醇类、酮类化合物的相对含量二者相差不大。采用气相色谱-嗅闻分析, 基于质谱、保留指数、气味特征、标准品共鉴定出31种气味活性化合物, 28种为2种肉味香精所共有, 尤其二甲基三硫、糠硫醇、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、3-甲硫基丙醛、2-乙基噻吩、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛、(*E*)-2-癸烯醛、(*E*)-2-壬烯醛、1-辛烯-3-醇、3-羟基-2-丁酮等在两香精中均具有较高稀释因子。但黑猪肉香精中具有高稀释因子的化合物种类多于白猪肉香精, 且采用雷达图对强势气味活性化合物比较显示其肉香、脂香化合物的轮廓线大于白猪肉香精, 这可能是造成黑猪肉香精香气较浓的原因。

关键词: 黑猪肉; 肉味香精; 蛋白酶解物; 氧化脂肪; 香气活性化合物; 肉香味

Characterization of Aroma Compounds in Two Meat Flavorings Prepared from Thermal Reaction of Enzymatic Hydrolysates of Black Pig and Common White Pig Meat Proteinss with Oxidized Lard

ZHAO Mengyao, ZHAO Jian, XIE Jianchun*, XIAO Qunfei, FAN Mengdie, WANG Tianze,
DU Wenbin, WANG Meng, GUO Xiaoyun

(Beijing Advanced Innovation Center for Food Nutrition and Human Health, Beijing Laboratory for Food Quality and Safety,
Beijing Higher Institution Engineering Research Center of Food Additives and Ingredients,
Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: Meat flavorings were prepared by thermal reactions of enzymatic hydrolysates of black pig and common white pig (large white) meat proteins with oxidized lard. The volatile compounds of the two meat flavorings were analyzed by solvent assistant flavor distillation (SAFE) combined with gas chromatography and mass spectrometry (GC-MS). Based on retention indices and mass spectra, a total of 123 volatile compounds, including sulfur-containing compounds, nitrogen-containing heterocycles, oxygen-containing heterocycles, aldehydes, ketones, alcohols, acids, esters and hydrocarbons, were identified. In comparison, the white pig meat-derived flavoring had a greater percentage (relative to the total peak area) of alkyl furanes, aliphatic aldehydes and acids while the black pig meat-derived flavoring had a greater percentage of sulfur-containing compounds, nitrogen-containing heterocycles, and esters. However, their relative contents of ketones and alcohols were similar. Furthermore, by gas chromatography-olfactometry (GC-O), a total of 31 odor-active compounds were identified through comparison of their retention indices and odor characteristics with those of authentic standards. Among them, 28 compounds were common to two meat flavorings, and in particular dimethyltrisulfide, furfuryl mercaptan, 3-ethyl-2,5-dimethylpyrazine, 3-(methylthio)propanal, 2-ethylthiophene, (*E,E*)-2,4-decadienal, (*E*)-2-decenal, (*E*)-2-nonenal, 1-octen-3-ol and 3-hydroxy-2-butanone had high flavor dilution (FD) factors. However, the number of compounds with high FD values was greater in the black pig meat-derived flavoring than in the white pig meat-derived flavoring. Additionally, the spider-web plots for the potent odor-active compounds revealed that the black pig meat-derived flavoring had higher scores for meaty and fatty odors than the black pig meat-derived flavoring, which could explain why the black pig meat-derived flavoring had stronger meaty aroma than the black pig meat-derived flavoring.

收稿日期: 2017-01-03

基金项目: 科技部重点研发计划项目(2017YFD0400106); 国家自然科学基金面上项目(31371838; 31671895);
北京市自然科学基金面上项目(6172004)

作者简介: 赵梦瑶(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品风味化学。E-mail: 1105975248@qq.com

*通信作者: 谢建春(1967—), 女, 教授, 博士, 研究方向为食品风味化学、热反应肉味香精制备。E-mail: xjchun@th.btbu.edu.cn

Key words: black-pig; meat flavoring; enzymatic hydrolysate; oxidized lard; odor-active compounds; meaty aroma

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201720007

中图分类号: TQ651

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2017) 20-0040-08

引文格式:

赵梦瑶, 赵健, 谢建春, 等. 白猪肉与黑猪肉热反应香精中香气物质分析鉴定[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 40-47.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201720007. <http://www.spkx.net.cn>

ZHAO Mengyao, ZHAO Jian, XIE Jianchun, et al. Characterization of aroma compounds in two meat flavorings prepared from thermal reaction of enzymatic hydrolysates of black pig and common white pig meat proteinss with oxidized lard[J]. Food Science, 2017, 38(20): 40-47. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201720007. <http://www.spkx.net.cn>

热反应肉味香精是基于肉香味形成原理而制造的自然食品添加剂, 广泛用于方便面、火腿肠、方便米粉、速冻食品等方便食品, 以及复合调味品和食品加工配料中^[1]。高档肉味香精以动物精瘦肉和脂肪为原料, 通过生物酶解和热反应制备。动物肉经酶解, 会产生更多的游离氨基酸及小分子多肽, 这些游离氨基酸和多肽为美拉德反应提供了更为丰富的前体物^[2-3]。以调控氧化脂肪代替脂肪制备的肉味香精具有香气浓郁、不同种类动物肉特征香气突出的特点^[4]。近年, 与市场上大宗肉相比, 一些地方鸡、土猪肉等特色品种肉因其良好的风味品质而深受消费者喜爱。但与用大宗肉源制备的肉味香精相比, 采用这些特色品种肉制备成的肉味香精的香气品质有何优点和异同, 尚需进一步研究。

溶剂辅助蒸发 (solvent assistant flavor evaporation, SAFE) 是一种温和的风味萃取技术, 芳香萃取物稀释分析 (aroma extract dilution analysis, AEDA) 是气相色谱-嗅闻 (gas chromatography-olfactometry, GC-O) 分析用于筛选关键香气化合物的有效手段^[5-7]。本课题组^[8-9]采用SAFE法及AEDA-GC-O法分析了炖煮鸡胸肉、炖煮猪肉汤的风味物质。猪肉是国人消费的主要肉类品种, 国内市场上白猪 (大约克夏猪) 肉为大宗品种猪肉, 而本土黑猪肉虽销量小, 但以味道鲜美、风味质量上乘而著称。本实验分别以白猪肉、黑猪肉为原料, 采用“脂肪调控氧化-蛋白酶解”工艺制备肉味香精, 通过SAFE提取, 结合气相色谱-质谱 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 联机和AEDA-GC-O对比分析了2种肉味香精的风味物质构成。研究结果可为改进现有工艺, 制备出更佳风味的肉味香精产品提供思路。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

白猪 (大约克猪, 出栏期为5~6个月) 后腿肉、黑猪 (豫南黑猪, 出栏期1a) 后腿肉购于美廉美超市。精炼猪油由安徽牧洋油脂有限公司提供。

二氯甲烷、无水Na₂SO₄、氯化钠、磷酸三钠 (均为

分析纯) 国药集团化学试剂北京有限公司; 香料化合物: 2-甲基-3-呋喃硫醇 (纯度>95%)、3-甲硫基丙醛 (>97%)、糠硫醇 (98%)、二甲基三硫 (98%)、2-噻吩甲醛 (98%)、2-乙酰基噻唑 (98%)、4-甲基-5-噻唑乙醇 (>95%)、2-乙基-3-甲基吡嗪 (>98%)、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪 (>95%)、糠醛 (95%)、4-羟基-2,5-二甲基-3 (2H) -呋喃酮 (>95%)、戊醛 (>95%)、己醛 (>95%)、(E)-2-己烯醛 (95%)、庚醛 (>95%)、(E)-2-庚烯醛 (95%)、辛醛 (>95%)、苯乙醛 (>98%)、壬醛 (>95%)、(E)-2-壬烯醛 (>95%)、(E,E)-2,4-壬二烯醛 (>95%)、(E,E)-2,4-癸二烯醛 (95%)、(E)-2-十一烯醛 (95%)、3-羟基-2-丁酮 (>95%)、1-辛烯-3-醇 (98%) 美国Sigma公司; 复合蛋白酶、风味蛋白酶北京味食源食品科技有限公司。

1.2 仪器与设备

7890A-5975C型GC-MS联用仪、7890A GC仪 美国Agilent公司; 气味测量仪 (GC-O) 美国DATU Inc公司; DF-101S恒温加热磁力搅拌水浴锅 河南省予华仪器科技有限公司; 6530K冷冻离心机 美国Sigma公司。

1.3 方法

1.3.1 热反应香精制备

酶解: 将肉去掉皮、可见脂肪、筋腱, 搅成肉糜, 肉水比1:1 (g/g), 温度55℃, 调节pH 7.0, 先加入0.4%复合蛋白酶, 酶解时间为3h; 再加入0.3%风味酶, 酶解时间为1h, 升温至85℃灭酶10min。

热反应: 酶解液离心去肉渣。取200g加入质量分数1%的氧化猪脂 (过氧化值160mmol/kg, 酸值1.20mg KOH/kg)。氧化猪脂制备参照文献[10]。油浴加热条件下, 耐压玻璃瓶中120℃密闭反应1h, 得热反应香精产品。直接嗅闻, 两香精产品均具有炖煮肉香气, 仅是黑猪肉香精香气浓一些。

1.3.2 SAFE测定

取热反应香精产品200mL, 用二氯甲烷 (重蒸) 萃

取3次(200 mL×3),合并萃取液,Vigreux柱浓缩至200 mL。参照文献[9]采用SAFE装置处理,其中恒温水槽温度及蒸馏头夹层回流水温度均为25℃,液氮冷凝,系统压力10⁻⁵ Pa。收集液用无水硫酸钠干燥,Vigreux柱浓缩至1.5 mL,再氮吹浓缩至0.3 mL,待GC-MS和GC-O分析。平行3份样品,取平均值作为结果。

1.3.3 GC-MS分析

采用DB-WAX(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)和DB-5MS(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)两根色谱柱进行分析。DB-WAX色谱柱条件:起始柱温40℃,以2.5℃/min升至180℃,然后以10℃/min升至230℃,辅助加热线温度230℃,溶剂延迟4 min;DB-5MS色谱柱条件:起始柱温40℃,以2.5℃/min升至150℃,然后以10℃/min升至280℃,辅助加热线温度280℃,溶剂延迟4 min。载气为He,流速1 mL/min。

MS条件:电子电离源;电子能量70 eV;离子源温度230℃;四极杆温度150℃;全扫描模式;质量扫描范围50~450 u;进样口温度250℃;不分流模式;进样2 μL。

C₃~C₂₅正构烷烃在相同GC-MS条件下进样,按下式计算保留指数(retention indices, RI):

$$RI=100\times\left(n+\frac{t_i-t_n}{t_{(n+1)}-t_n}\right)$$

式中: t_n 和 $t_{(n+1)}$ 分别为碳数为 n 、 $n+1$ 的正构烷烃保留时间/min; t_i 是出峰在 n 和 $n+1$ 的正构烷之间的 i 化合物保留时间/min。根据检索质谱库和核对RI鉴定化合物,面积归一化的相对含量做为定量数据。

1.3.4 GC-O分析

由Agilent 7890A GC装置及嗅闻装置组成。GC条件:DB-5MS毛细管柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm);起始柱温40℃,以5℃/min升至230℃;载气为N₂(纯度为99.999%);流速1 mL/min;进样口温度250℃;不分流模式;进样2 μL。

洁净空气加湿后与柱后流出物混合进入人的鼻子。用二氯甲烷按体积比1:2、1:4、1:8、1:16等逐级稀释样品进行GC-O分析,直到嗅闻口检测不到气味时停止。每种香味化合物的最高稀释倍数为稀释因子(flavor dilution, FD)。

GC-O分析由3名评价员完成,气味描述词协商确定,FD为3名评价员嗅闻到的最大稀释倍数的平均值。通过操作软件记录每个气味活性区的线性RI、气味特征。根据线性RI、气味特征、质谱及标准品比对鉴定化合物。

2 结果与分析

2.1 GC-MS联机分析挥发性化合物

表1 2种热反应香精的GC-MS分析结果
Table 1 Results of GC-MS analysis of the two meat flavorings

化合物	RI		相对含量/%						定性方式	
			白猪肉			黑猪肉				
	DB-Wax	DB-5MS	DB-Wax	DB-5MS	平均	DB-Wax	DB-5MS	平均		
含硫化合物										
二甲基二硫化物 dimethyldisulfide	1072		—	—	—	0.16	—	0.08	MS、RI	
噻唑 thiazole	1239		0.04	—	0.02	—	—	—	MS、RI	
2-乙酰基噻唑 2-acetylthiazole	1623	1018	1.04	0.14	0.59	1.93	—	0.97	MS、RI	
2-噻吩甲醛 2-thiophenecarboxaldehyde	1666		0.20	—	0.10	—	—	—	MS、RI	
1,2-苯并异噻唑 1,2-benzisothiazole	1917		0.18	—	0.09	—	—	—	MS、RI	
苯并噻唑 benzothiazole	1918	1216	—	—	—	2.52	0.60	1.56	MS、RI	
4-甲基-5-噻唑乙醇	2285	1277	0.12	—	0.06	7.20	0.35	3.77	MS、RI	
4-methyl-5-thiazoleethanol										
小计			1.58	0.14	0.86	11.81	0.94	6.38		
含氮杂环										
甲基吡嗪 methyl-pyrazine	1259		—	—	—	0.50	—	0.25	MS、RI	
2,5-二甲基吡嗪 2,5-dimethyl-pyrazine	1311	909	—	—	—	0.89	1.08	0.98	MS、RI	
3-乙基吡啶 3-ethyl-pyridine	1367		—	—	—	0.09	—	0.04	MS、RI	
2-乙基-3-甲基吡嗪	1389		0.24	—	0.12	—	—	—	MS、RI	
2-ethyl-3-methyl-pyrazine										
三甲基吡嗪 trimethyl-pyrazine	1391	999	—	—	—	0.32	0.57	0.44	MS、RI	
3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	1434		—	—	—	0.46	—	0.23	MS、RI	
3-ethyl-2,5-dimethyl-pyrazine										
2-乙基-6-甲基吡嗪	1473		—	—	—	0.27	—	0.14	MS、RI	
2-ethyl-6-methyl-pyrazine										
小计			0.24	0.00	0.12	2.52	1.64	2.08		
含氧杂环										
糠醛 furfural	838		—	0.01	—	—	—	—	MS、RI	
2-呋喃甲醇 2-furanmethanol	1651	860	—	0.02	0.01	3.06	—	1.53	MS、RI	
2-正丁基呋喃 2-n-butylfuran	1130		0.72	—	0.36	—	—	—	MS、RI	
2-戊基呋喃 2-pentyl-furan	1229	992	26.25	11.61	18.93	2.13	—	1.07	MS、RI	
2-正庚基呋喃 2-n-heptylfuran	1424	1192	0.70	1.38	1.04	0.32	—	0.16	MS、RI	
2-正辛基呋喃 2-n-octylfuran	1525	1291	0.39	0.61	0.50	0.49	—	0.25	MS、RI	
呋喃醇 furanecol	2019		—	—	—	0.04	—	0.02	MS、RI	
小计			28.06	13.62	20.84	6.04	—	3.02		
醛类										
戊醛 pentanal	710		—	0.50	0.25	—	0.12	0.06	MS、RI	
己醛 hexanal	1083	808	7.69	9.16	8.42	—	—	—	MS、RI	
庚醛 heptanal	1180	903	1.87	1.23	1.55	—	0.49	0.25	MS、RI	
(E)-2-己烯醛 (E)-2-hexenal	1211		0.01	—	0.01	—	—	—	MS、RI	
辛醛 octanal	1282	1003	2.75	1.97	2.36	0.50	0.90	0.70	MS、RI	
(E)-2-癸烯醛 (E)-2-decenal	1261		—	0.26	0.13	—	—	—	MS、RI	
壬醛 nonanal	1383	1103	2.71	1.83	2.27	0.65	1.44	1.04	MS、RI	
苯甲醛 benzaldehyde	1497	960	4.20	4.44	4.32	3.57	3.94	3.75	MS、RI	
2-壬烯醛 2-nonenal	1518		—	—	—	0.39	—	0.19	MS、RI	
3,4-二甲基苯甲醛	1777		—	—	—	0.16	—	0.08	MS、RI	
3,4-dimethyl-benzaldehyde										
(E,E)-2,4-癸二烯醛 (E,E)-2,4-decadienal	1785	1313	0.55	0.20	0.37	—	—	—	MS、RI	
α-亚乙基-苯乙醛	1899		—	—	—	0.94	—	0.47	MS、RI	
alpha-ethylidene-benzenecetaldehyde										
2-十一醛 2-undecenal	1363		—	0.12	0.06	—	—	—	MS、RI	
2-丁基-2-辛烯醛 2-butyl-2-octenal	1372		—	0.29	0.15	—	—	—	MS、RI	
4-乙基苯甲醛 4-ethyl-benzaldehyde	1171		—	0.33	0.16	—	—	—	MS、RI	
2-丙基-2-庚烯醛 2-propyl-2-heptenal	1185		—	0.57	0.28	—	—	—	MS、RI	

续表1

化合物	RI		相对含量/%						定性方式
			白猪肉			黑猪肉			
	DB-Wax	DB-5MS	DB-Wax	DB-5MS	平均	DB-Wax	DB-5MS	平均	
4-戊基苯甲醛 4-pentyl-benzaldehyde	1976		0.10	—	0.05	—	—	—	MS、RI
小计			19.88	20.90	20.39	6.21	6.89	6.55	
酮类									
3-羟基-2-丁酮 3-hydroxy-2-butanone	724		—	3.63	1.81	—	3.09	1.55	MS、RI
2-庚酮 2-heptanone	1177	893	1.90	1.98	1.94	—	2.29	1.15	MS、RI
4-辛酮 4-octanone	1219		0.01	—	—	—	—	—	MS、RI
6-甲基-2-庚酮 6-methyl-2-heptanone	1237		0.22	—	0.11	—	—	—	MS、RI
2-辛酮 2-octanone	1277		0.42	—	0.21	—	—	—	MS、RI
2-壬酮 2-nonanone	1379	1093	0.42	0.40	0.41	0.43	—	0.22	MS、RI
2-环己烯-1-酮 2-cyclohexen-1-one	1410		—	—	—	0.09	—	0.04	MS、RI
2-癸酮 2-decanone	1482		0.53	—	0.26	0.66	—	0.33	MS、RI
2,5-己二酮 2,5-hexanedione	1484	931	—	—	—	0.23	0.36	0.30	MS、RI
3-甲基-2-环戊烯-1-酮 3-methyl-2-cyclopenten-1-one	1492		—	—	—	0.29	—	0.15	MS、RI
2-十一酮 2-undecanone		1292	—	—	—	—	0.44	0.22	MS、RI
6-十一烷酮 6-undecanone	1515		0.18	—	0.09	—	—	—	MS、RI
3-乙基-2-环戊烯-1-酮 3-ethyl-2-cyclopenten-1-one	1597		0.11	—	0.06	—	—	—	MS、RI
2-十二烷酮 2-dodecanone	1689		—	—	—	0.68	—	0.34	MS、RI
小计			3.79	6.01	4.90	2.39	6.19	4.29	
醇类									
1-戊烯-3-醇 1-penten-3-ol	1159		0.37	—	0.18	—	—	—	MS、RI
1-戊醇 1-pentanol	1254	777	6.21	12.72	9.47	2.84	7.92	5.38	MS、RI
2,3-丁二醇 2,3-butanediol		801	—	—	—	—	11.09	5.54	MS、RI
1-己醇 1-hexanol	1352	874	4.05	2.32	3.19	2.07	—	1.04	MS、RI
1-庚醇 1-heptanol	1455	978	6.42	3.22	4.82	1.09	1.42	1.26	MS、RI
1-辛烯-3-醇 1-octen-3-ol	1450	985	13.18	4.24	8.71	1.64	1.59	1.62	MS、RI
1-辛醇 1-octanol	1556	1078	—	3.89	1.95	0.90	—	0.45	MS、RI
2-乙基-1-己醇 2-ethyl-1-hexanol	1487	1026	—	—	—	0.77	0.05	0.41	MS、RI
(E)-2-辛烯-1-醇 (E)-2-octen-1-ol	1607	1071	0.73	—	0.37	0.55	0.48	0.52	MS、RI
1-壬醇 1-nonanol	1655	1175	0.84	0.34	0.59	—	—	—	MS、RI
苯甲醇 benzylalcohol	1857	1034	0.68	—	0.34	3.09	3.72	3.40	MS、RI
苯乙醇 phenylethylalcohol	1889		0.08	—	0.04	1.40	—	0.70	MS、RI
1-十二醇 1-dodecanol	1966		—	—	—	4.34	—	2.17	MS、RI
小计			32.55	26.73	29.64	18.71	26.27	22.49	
酸类									
丁酸 butanoic acid	1619		—	—	—	1.19	—	0.59	MS、RI
苯甲酸 benzoic acid		1231	—	0.02	0.01	—	—	—	MS、RI
辛酸 octanoic acid	2064	1234	—	0.08	0.04	0.39	—	0.20	MS、RI
十四烷酸 tetradecanoic acid		1767	—	3.69	1.84	—	0.29	0.15	MS、RI
正十六烷酸 n-hexadecanoic acid		1973	—	1.70	0.85	—	—	—	MS、RI
十八烷酸 octadecanoic acid		2164	—	7.05	3.53	—	—	—	MS、RI
己酸 hexanoic acid	1838		2.75	—	1.37	2.85	—	1.42	MS、RI
庚酸 heptanoic acid	1956		0.44	—	0.22	—	—	—	MS、RI
壬酸 nonanoic acid	2176		0.19	—	0.09	—	—	—	MS、RI
小计			3.38	12.54	7.96	4.43	0.29	2.36	
酯类									
γ -戊内酯 γ -pentylactone	1580	955	0.42	—	0.21	0.95	1.19	1.07	MS、RI
丁内酯 butyrolactone	1596	917	0.82	0.86	0.84	1.11	2.37	1.74	MS、RI
γ -己内酯 γ -hexalactone	1670	1055	1.12	—	0.56	2.86	3.96	3.41	MS、RI
γ -巴豆酸内酯 γ -crotonolactone	1719		0.26	—	0.13	1.46	—	0.73	MS、RI
δ -己内酯 δ -hexalactone	1756		—	—	—	0.97	—	0.49	MS、RI
γ -庚内酯 γ -heptalactone	1770	1163	0.31	—	0.15	1.85	0.21	1.03	MS、RI
γ -辛内酯 γ -octalactone	1882	1256	0.26	—	0.13	1.60	0.75	1.18	MS、RI

续表1

化合物	RI		相对含量/%						定性方式
			白猪肉			黑猪肉			
	DB-Wax	DB-5MS	DB-Wax	DB-5MS	平均	DB-Wax	DB-5MS	平均	
β -甲基- γ -辛内酯 β -methyl- γ -octalactone	1964		0.11	—	0.05	—	—	—	MS、RI
γ -壬内酯 γ -nonalactone	1997		0.41	—	0.20	—	—	—	MS、RI
γ -癸内酯 γ -decalactone	2144	1465	1.11	0.68	0.89	0.37	—	0.18	MS、RI
十二烷酸乙酯 dodecanoic acid, ethylester		1592	—	—	—	—	0.12	0.06	MS、RI
十四烷酸乙酯 tetradecanoic acid, ethylester		2042	—	—	—	0.16	0.20	0.18	MS、RI
十六烷酸乙酯 hexadecanoic acid, ethylester		2248	—	—	—	4.18	4.85	4.52	MS、RI
十八烷酸乙酯 octadecanoic acid, ethylester		2461	—	—	—	4.58	5.04	4.81	MS、RI
十六烷酸甲酯 hexadecanoic acid, methylester		1923	—	0.66	0.33	—	—	—	MS、RI
油酸乙酯 ethyl oleate	2478	2168	—	—	—	1.11	4.47	2.79	MS、RI
小计			4.82	2.19	3.50	21.21	23.17	22.19	
烃类									
辛烷 octane		797	—	1.43	0.72	—	2.86	1.43	MS、RI
2,3,5-三甲基己烷 2,3,5-trimethyl-hexane		810	—	—	—	—	1.66	0.83	MS、RI
2,4-二甲基-1-庚烯 2,4-dimethyl-1-heptene		841	—	0.01	—	—	2.29	1.15	MS、RI
1,3-二甲基苯 1,3-dimethyl-benzene	1125	866	0.13	0.04	0.08	1.42	1.77	1.60	MS、RI
丁基环戊烷 butyl-cyclopentane		934	—	0.72	0.36	—	—	—	MS、RI
癸烷 decane	1019	998	—	—	—	1.22	0.90	1.06	MS、RI
甲苯 toluene	1041	763	0.11	—	0.06	0.40	5.47	2.93	MS、RI
1-癸烯 1-decene		1000	0.23	1.13	0.68	—	—	—	MS、RI
1-乙基-2,3-二甲基苯 1-ethyl-2,3-dimethyl-benzene		1111	—	—	—	—	0.25	0.13	MS、RI
D-柠檬烯 D-limonene	1192	1027	0.32	0.18	0.25	0.52	0.56	0.54	MS、RI
十一烷 undecane	1103	1099	0.55	0.34	0.44	0.94	—	0.47	MS、RI
4-甲基辛烷 4-methyl-octane		861	—	—	—	—	2.93	1.47	MS、RI
乙苯 ethylbenzene	1124	864	0.48	0.07	0.28	—	—	—	MS、RI
对二甲苯 p-xylene	1133	871	0.06	0.05	0.06	1.43	1.57	1.50	MS、RI
十二烷 dodecane	1200	1201	1.46	2.01	1.73	2.39	3.27	2.83	MS、RI
(E)-3-十二碳烯 (E)-3-dodecene		1204	—	—	—	—	0.68	0.34	MS、RI
2,6-二甲基十一烷 2,6-dimethyl-undecane		1214	—	—	—	—	0.63	0.32	MS、RI
苯乙烯 styrene	1248	888	0.07	—	0.04	1.94	0.50	1.22	MS、RI
十三烷 tridecane	1296	1298	0.91	0.50	0.70	1.28	—	0.64	MS、RI
3,5-二甲基十二烷 3,5-dimethyl-dodecane		1250	—	—	—	—	0.12	0.06	MS、RI
2-甲基萘 2-methyl-naphthalene	1829	1284	0.14	0.03	0.08	1.58	—	0.79	MS、RI
2-甲基十三烷 2-methyl-tridecane		1363	—	—	—	—	0.18	0.09	MS、RI
十四烷 tetradecane		1397	—	0.18	0.09	—	—	—	MS、RI
十五烷 pentadecane	1494	1497	—	0.29	0.14	0.48	0.35	0.42	MS、RI
十六烷 hexadecane	1593	1596	—	—	—	0.57	0.26	0.42	MS、RI
十七烷 heptadecane	1692	1697	—	0.43	0.22	1.46	0.13	0.79	MS、RI
十八烷 octadecane		1796	—	0.59	0.29	—	0.03	0.02	MS、RI
壬基环戊烷 nonyl-cyclopentane		1444	—	0.02	0.01	—	0.29	0.14	MS、RI
正壬基环己烷 n-nonylcyclohexane		1545	—	—	—	—	0.19	0.10	MS、RI
二十一烷 heneicosane		2087	—	0.87	0.43	—	2.71	1.35	MS、RI
二十二烷 docosane	2194	2198	0.32	6.83	3.57	—	—	—	MS、RI
二十三烷 tricosane	2299		—	—	—	0.54	—	0.27	MS、RI
二十四烷 tetracosane	2398	2397	0.92	2.17	1.54	10.51	4.98	7.75	MS、RI
小计			5.69	17.88	11.78	26.68	34.60	30.64	

注：数值为归一化的相对峰面积，两柱分析结果均为3个样品的平均值。MS.质谱鉴定，RI.核对应保留指数鉴定，—.未检测到，下表同。

由表1可知，通过SAFE-GC-MS分析，从2种猪肉的热反应香精中共鉴定出123种化合物，其中白猪肉香精为82种，黑猪肉香精为88种，有49种为2种猪肉香精共有。所鉴定化合物种类包括含硫化合物、含氧杂环、含

氮杂环、醛类、酮类、醇类、酸类、酯类、烃类,其中烃类化合物在2种香精中不仅种类数多,所占相对含量也较大,但由于其一般具有较高的气味阈值,对肉香味贡献不大^[11],故不作讨论。

含硫化合物对肉的基础香味有重要贡献,可来源于含硫氨基酸包括半胱氨酸和甲硫氨酸的美拉德反应,如甲硫氨酸Strecker降解可产生甲硫醇,两分子甲硫醇缩合即可生成二甲基二硫醚^[12-13]。共鉴定出7种含硫化合物,其中白猪肉香精中5种,黑猪肉香精中为4种,前者相对含量最高的为2-乙酰基噻唑(0.59%,按极性和弱极性柱的平均含量,下同);后者相对含量最高的为4-甲基-5-噻唑乙醇(3.77%)。与白猪肉香精相比,黑猪肉香精中含硫化合物的相对含量较高。

含氮杂环化合物一般有烤香香气特征,也主要来源于美拉德反应。在烤肉中常被检测到,Xie Jianchun等^[11]采用同时蒸馏萃取结合GC-MS及GC-O分析小香猪烤肉时检测到了2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪等化合物。Resconi等^[14]从烤牛肉中检测出2-乙基-3,5-二甲基吡嗪、2-乙酰基吡嗪、2,3-二乙基-5-甲基吡嗪等化合物。表1中鉴定出7种含氮杂环化合物,包括1种吡啶和6种吡嗪。与白猪肉香精相比,黑猪肉香精中鉴定出的含氮杂环化合物不仅种类数多且总相对含量高,其中相对含量最高的为2,5-二甲基吡嗪(0.98%)。2,5-二甲基吡嗪具有烤香、壤香,曾在煎培根肉中被检测到^[15]。

鉴定出含氧杂环化合物7种,包括4种烷基呋喃化合物及糠醛、糠醇、呋喃酮。烷基呋喃主要来源于脂质氧化降解反应,如亚油酸氧化降解反应可形成2-戊基呋喃^[16]。糠醛、糠醇、呋喃酮来源于美拉德反应中糖的烯醇化及环化反应^[17-18]。由表1可知,含氧杂环化合物在白猪肉香精中相对含量远高于黑猪肉香精中,这主要由烷基呋喃类化合物的相对含量高造成,尤其2-戊基呋喃在白猪肉香精中相对含量高达18.93%。但2-戊基呋喃通常并不是对肉香味有贡献的重要物质^[4,9,11]。

鉴定出17种醛类化合物,包括12种脂肪醛、5种芳香醛。与白猪肉香精(20.39%)相比,黑猪肉香精中检测到的醛类化合物相对含量较低(6.55%),主要是因为脂肪醛的相对含量较低造成。白猪肉香精中相对含量大于1%的为己醛、苯甲醛、辛醛、壬醛、庚醛,而黑猪肉香精中相对含量大于1%的仅为苯甲醛、壬醛。脂肪醛是构成肉香风味的主要物质^[19-20],一般具有清香、油脂香气特征,对不同种肉的特征风味有贡献,12-甲基十三碳醛对牛肉的特征香气起重要作用^[21],而烯醛和二烯醛是鸡脂加热时的特征香气成分^[22-23]。脂肪醛主要产生于脂质氧化降解反应,如2,4-癸二烯醛可由亚麻酸氧化降解产生^[24]。本实验热反应香精制备中使用了氧化猪脂为原料,检测到的脂肪醛主要在猪脂的调控氧化过程中产生^[25]。值得注意的是,脂质氧化产生的短链饱和醛(如己醛、庚

醛)和不饱和醛((*E*)-2-己烯醛、(*E*)-2-癸烯醛、(*E,E*)-2,4-癸二烯醛)具有较高反应活性,在热反应中可通过羟醛缩合、逆羟醛缩合、环化反应等,生成其他结构更为复杂的化合物^[26-27]。表1中2-丁基-2-辛烯醛、2-丙基-2-庚烯醛可分别由两分子己醛、戊醛发生羟醛缩合反应形成。检测到的5种芳香醛中,苯甲醛、4-乙基苯甲醛、4-戊基苯甲醛、3,4-二甲基苯甲醛,可分别由2,4-庚二烯醛、2,4-壬二烯醛、2,4-十一二烯醛、3,4-二甲基-2,4-庚二烯醛环化反应生成。 α -亚乙基-苯乙醛可由苯乙醛与甲醛缩合反应形成,苯乙醛可产生于美拉德反应中苯丙氨酸的Strecker降解反应^[28-29]。

鉴定出酮类共14种,在白猪肉香精和黑猪肉香精中其总相对含量相近,且相对含量较高的(>1%)均为2-庚酮、3-羟基-2-丁酮。14种酮中除3-羟基-2-丁酮来源于美拉德反应中糖降解反应外,其他13种酮主要来源于脂质氧化降解反应,其中2-环己烯-1-酮、3-甲基-2-环戊烯-1-酮、3-乙基-2-环戊烯-1-酮可分别由2-己酮、2-己酮、2-庚酮分子内缩合环化反应形成。

鉴定出的醇类化合物共13种,包括11种脂肪醇和2种芳香醇。除了苯乙醇与美拉德反应中苯丙氨酸的降解有关外,其他均来自于脂肪氧化降解反应。与其他化合物相比,在2种热反应香精中醇类化合物的相对含量均较高(>20%),且二者之间种类数和总相对含量相近。一般在热反应体系中,受到氨基酸及具有还原性的美拉德反应产物的影响,脂质氧化降解途径会被调控,造成脂肪族醛类化合物的相对含量减少,但醇类和烷基呋喃化合物的相对含量升高。白猪肉香精中相对含量较高的(>3%)为1-戊醇、1-辛烯-3-醇、庚醇、己醇,黑猪肉香精中相对含量较高的(>3%)为1-戊醇、苯甲醇、2,3-丁二醇。其中1-辛烯-3-醇具有蘑菇香气特征,在许多肉及肉制品中被检测到^[30-31]。

鉴定出9种酸类化合物和16种酯类化合物。相比之下,白猪肉香精中酸类化合物相对含量较高(7.96%),而黑猪肉香精中酯类化合物的相对含量较高(22.19%)。长链脂肪酸(如十八酸)和长链脂肪酸酯(如十八烷酸乙酯),挥发度较低,气味阈值高,对风味贡献较小。白猪肉香精中相对含量最高的酸为十八酸(3.53%),其次为十四烷酸(1.84%)、己酸(1.37%)。黑猪肉香精中仅己酸相对含量大于1%,其他物质相对含量都很低。黑猪肉香精中相对含量较高的酯(>4%)为十八烷酸乙酯、十六烷酸乙酯。在2种猪肉香精中还检测到较多的内酯类化合物。内酯类一般具有奶香、甜香香气特征,由脂肪氧化形成的 γ -羟基酸经分子内环化形成。黑猪肉香精中,相对含量较高的内酯(>1%)为丁内酯、 γ -戊内酯、 γ -己内酯、 γ -辛内酯、 γ -庚内酯,而白猪肉香精中检测到的各种酯类化合物的相对含量都较低(<1%)。

总之,除烃类化合物外,从与脂质氧化降解有关的化合物看,鉴定出的烷基呋喃、脂肪族醛和酸的相对含量在白猪肉香精中明显较高,而酯类化合物在黑猪肉香精中明显较高,醇类、酮类化合物二者相差不大。从与美拉德反应有关的化合物看,含硫化物、含氮杂环、糠醇、 α -亚乙基苯乙醛、苯乙醇的相对含量均在黑猪肉香精中显著较高。在食品若干挥发性化合物中,往往仅有小部分气味活性物质对风味有贡献^[4],因此采用GC-O法对挥发性化合物分布上的差异是否即为造成黑猪肉香精的香气品质较佳的主要原因进行测定。

2.2 GC-O分析结果

表 2 2种热反应香精中AEDA-GC-O分析鉴定出的气味活性化合物
Table 2 Odor-active compounds identified in two meat flavorings by AEDA-GC-O analysis

化合物	嗅闻 RI	气味描述	log ₂ FD		鉴定方法
			白猪肉	黑猪肉	
含硫化合物					
甲硫醇	454	臭鸡蛋	2	2	RI、odor
2-乙基噻吩	818	汽油味、肉香	10	13	RI、odor
2-甲基-3-呋喃硫醇	859	芝麻香	10	19	S、RI、odor
3-甲硫基丙醛	904	煮土豆香	14	15	S、RI、odor
糠硫醇	923	芝麻香	17	17	S、RI、odor
二甲基三硫	946	焖菜叶	18	19	S、RI、odor
2-噻吩甲醛	1 000	青草	8	1	MS、S、RI、odor
2-乙酰基噻唑	1 015	芝麻香	3	7	MS、S、RI、odor
4-甲基-5-噻唑乙醇	1 290	煮肉香	7	4	MS、S、RI、odor
含氮杂环					
2-乙基-3-甲基吡嗪	1 015	煮肉香	3	7	MS、S、RI、odor
3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	1 078	烤香、坚果香	16	19	MS、S、RI、odor
含氧杂环					
糠醛	898	焦糖香	4	—	MS、S、RI、odor
糠醇	915	焦糖香	—	5	MS、RI、odor
4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮	1 057	焦糖香	2	5	MS、S、RI、odor
γ -癸内酯	1 466	焦糖、甜	3	3	MS、RI、odor
醛类					
丁醛	583	青草	7	2	RI、odor
戊醛	705	青草	3	5	MS、S、RI、odor
己醛	830	青草	8	5	MS、S、RI、odor
(E)-2-己烯醛	840	青草	6	—	MS、S、RI、odor
庚醛	888	清香、甜香	6	13	MS、S、RI、odor
(E)-2-庚烯醛	967	青草、油脂香	1	4	S、RI、odor
辛醛	999	甜香、清香	6	11	MS、S、RI、odor
苯乙醛	1 040	玫瑰花香	4	11	S、RI、odor
壬醛	1 104	哈密瓜	3	5	MS、S、RI、odor
(E)-2-壬烯醛	1 148	哈密瓜、黄瓜	8	13	S、RI、odor
(E,E)-2,4-壬二烯醛	1 159	油脂香、清香	0	17	S、RI、odor
(E)-2-癸烯醛	1 236	油脂香、清香	10	11	MS、RI、odor
(E,E)-2,4-癸二烯醛	1 311	油脂香	12	11	MS、S、RI、odor
(E)-2-十一烯醛	1 348	油脂香	3	0	MS、S、RI、odor
酮类					
3-羟基-2-丁酮	629	酸奶	7	5	MS、S、RI、odor
醇类					
1-辛烯-3-醇	971	蘑菇香	8	5	MS、S、RI、odor

注: odor.根据气味特征鉴定; S.与标准品质谱、气味特征、保留指数比对鉴定。

由表2可知,经SAFE法提取, AEDA-GC-O分析,从2种热反应香精中鉴定出的香气活性物质共31种,包括含硫化物9种、含氮杂环2种、含氧杂环4种、醛类14种、酮类1种、醇类1种,香气类型涉及肉香、芝麻香、焦糖香、烤香、清香、脂香、甜香、蘑菇香等。GC-MS联机分析出的脂肪族酸类、酮类、酯类化合物均不具有气味活性,相对含量较高的2-戊基呋喃也不具有气味活性;脂肪醇中仅1-辛烯-3-醇被检测出,这与炖煮肉汤的香气活性物质分析结果相一致^[9,30]。

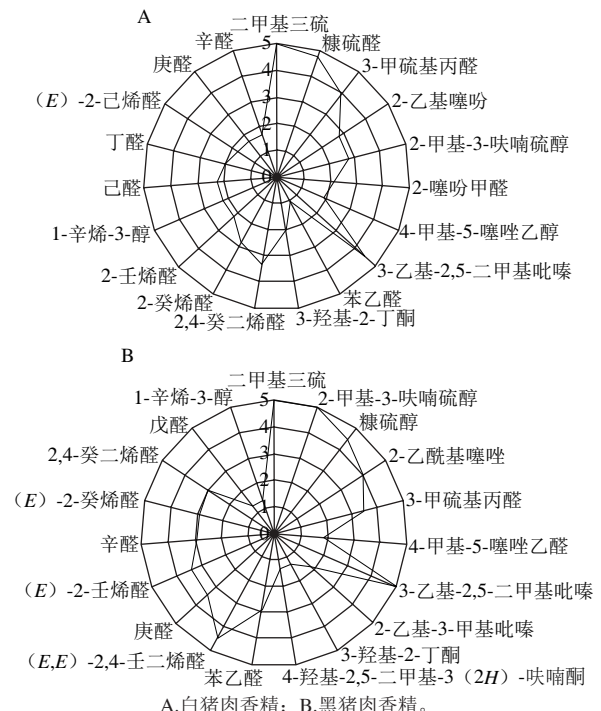


图 1 2种猪肉香精的气味活性化合物雷达图比较

Fig. 1 Spider-web plot for the odorants of two meat flavorings

从白猪肉香精中鉴定出30种,稀释因子高($\log_2 FD \geq 4$)对总体风味贡献较大的化合物包括二甲基三硫、糠硫醇、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、3-甲硫基丙醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、2-乙基噻吩、2-甲基-3-呋喃硫醇、(E)-2-癸烯醛、2-噻吩甲醛、己醛、(E)-2-壬烯醛、1-辛烯-3-醇、4-甲基-5-噻唑乙醇、丁醛、3-羟基-2-丁酮、(E)-2-己烯醛、庚醛、辛醛、糠醛、苯乙醛20种化合物。从黑猪肉香精中鉴定出29种化合物,稀释因子高($\log_2 FD \geq 4$)对总体风味贡献较大的化合物包括2-甲基-3-呋喃硫醇、二甲基三硫、3-乙基-2,5-二甲基吡嗪、糠硫醇、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(E)-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、3-甲硫基丙醛、2-乙基噻吩、庚醛、(E)-2-壬烯醛、辛醛、苯乙醛、2-乙酰基噻吩、2-乙基-3-甲基吡嗪、糠醇、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮、戊醛、己醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、4-甲基-5-噻

啞乙醇、3-羟基-2-丁酮、(E)-2-庚烯醛24种化合物。二者比较,黑猪肉香精中鉴定出的稀释因子高的化合物比白猪肉香精多。

兼顾香气类型从表2中2种猪肉香精中分别挑选19种FD较大化合物,FD最大的化合物得分记为满分5分,其他按比例进行折算,雷达图见图1。

由图1可知,白猪肉香精和黑猪肉香精的主要气味活性化合物均为含硫化合物和脂肪醛,它们代表了煮肉香、油脂香的主体香气特征。另外,还有少量的吡嗪化合物,代表了烤香香韵;而苯乙醛和糠醛、4-羟基-2,5-二甲基-3(2H)-呋喃酮、3-羟基-2-丁酮则代表了花香、甜香香韵。总体上,2种香精的雷达图轮廓相似,但相比之下,无论是肉香还是油脂香,均是黑猪肉香精的轮廓较大,白猪肉香精的较小,表明黑猪肉香精的肉香、油脂香香气较浓。这与直接嗅闻两种肉味香精的结论一致。此外,花香、烤香香韵也是黑猪肉香精稍强,而甜香香韵则白猪肉香精稍强。

3 结论

从白猪肉和黑猪肉热反应肉味香精中,SAFE法提取结合GC-MS联机共鉴定出123种挥发性化合物,49种化合物为2种肉味香精共有。相比之下,白猪肉香精中烷基呋喃、脂肪族醛和酸的相对含量较高,黑猪肉香精中含硫化物、含氮杂环等的相对含量较高。

SAFE法提取结合GC-O分析,2种香精中共鉴定出31种气味活性化合物,主要为含硫化合物和脂肪醛,分别来源于美拉德反应和脂肪氧化反应。相比之下,黑猪肉香精中具有较高FD的化合物种类数多,且通过雷达图显示得分较高,解析了黑猪肉香精香气更浓的原因,这将为构建更佳的热反应肉味香精制备体系提供参考。

参考文献:

- [1] 孙宝国. 中国第三代肉味香精生产技术[J]. 中国食品学报, 2010, 10(5): 1-4. DOI:10.3969/j.issn.1009-7848.2010.05.001.
- [2] SUN H M, WANG J Z, ZHANG C H, et al. Changes of flavor compounds of hydrolyzed chicken bone extracts during Maillard reaction[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(12): C2415-C2426. DOI:10.1111/1750-3841.12689.
- [3] LIU J B, LIU M Y, HE C C, et al. Effect of thermal treatment on the flavor generation from Maillard reaction of xylose and chicken peptide[J]. LWT Food Science and Technology, 2015, 64(1): 316-325. DOI:10.1016/j.lwt.2015.05.061.
- [4] YANG Z, XIE J C, ZHANG L, et al. Aromatic effect of fat and oxidized fat on a meat-like model reaction system of cysteine and glucose[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2015, 30(4): 320-329. DOI:10.1002/ffj.3248.
- [5] LIANG J J, XIE J C, HOU L, et al. Aroma constituents in Shanxi aged vinegar before and after aging[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(40): 7597-7605. DOI:10.1021/acs.jafc.6b03019.
- [6] FENG Y Z, CAI Y, SUN W H, et al. Approaches of aroma extraction dilution analysis (AEDA) for headspace solid phase microextraction and gas chromatography-olfactometry (HS-SPME-GC-O): altering sample amount, diluting the sample or adjusting split ratio?[J]. Food Chemistry, 2015, 187: 44-52. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.03.138.
- [7] BARBARA A Z, DUGO P, DUGO G. Gas chromatography-olfactometry in food flavour analysis[J]. Journal of Chromatography A, 2008, 1186: 123-143. DOI:10.1016/j.chroma.2007.09.006.
- [8] 梁晶晶, 曹长春, 王蒙, 等. 采用SDE结合SAFE分析炖煮鸡胸肉产生的风味物质[J]. 食品工业科技, 2016, 37(4): 57-67. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.04.003.
- [9] 王蒙, 侯莉, 曹长春, 等. 清炖猪肉汤香气物质的分析鉴定[J]. 食品科学, 2015, 36(24): 105-111. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201524018.
- [10] 谢建春, 孙宝国, 马洪亮, 等. 氧化猪脂-热反应制备猪肉香精研究[J]. 中国调味品, 2005(12): 49-53. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2005.12.012.
- [11] 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2007.12.074.
- [12] MUHAMMAD I K, CHEORUN J, MUHAMMAD R T. Meat flavor precursors and factors influencing flavor precursors: a systematic review[J]. Meat Science, 2015, 110: 278-284. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.08.002.
- [13] VAN BOEKEL M A J S. Formation of flavour compounds in the Maillard reaction[J]. Biotechnology Advances, 2006, 24(2): 230-233. DOI:10.1016/j.biotechadv.2005.11.004.
- [14] RESCONI V C, CAMPO M D M, MONTOSI F, et al. Gas chromatographic-olfactometric aroma profile and quantitative analysis of volatile carbonyls of grilled beef from different finishing feed systems[J]. Journal of Food Science, 2012, 77(6): 240-246. DOI:10.1111/j.1750-3841.2012.02720.x.
- [15] HO C T, LEE K N, JIN Q Z. Isolation and identification of volatile flavor compounds in fried bacon[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1983, 31(2): 336-342. DOI:10.1021/jf00116a038.
- [16] ELMORE J S, MOTTRAM D S, ENSER M, et al. Effect of the polyunsaturated fatty acid composition of beef muscle on the profile of aroma volatiles[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(4): 1619-1625. DOI:10.1021/jf980718m.
- [17] YAHYA H, LINFORTH R S T, COOK D J. Flavour generation during commercial barley and malt roasting operations: a time course study[J]. Food Chemistry, 2014, 145(4): 378-387. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.08.046.
- [18] WANG Y, RODOLFO J H, SIMON J E, et al. Amino acid-dependent formation pathways of 2-acetyl-furan and 2,5-dimethyl-4-hydroxy-3[2H]-furanone in the Maillard reaction[J]. Food Chemistry, 2009, 115(1): 233-237. DOI:10.1016/j.foodchem.2008.12.014.
- [19] MOTTRAM D S. Flavour formation in meat and meat products: a review[J]. Food Chemistry, 1998, 62(4): 415-424. DOI:10.1016/S0308-8146(98)00076-4.
- [20] CALKINS C R, HODGEN J M. A fresh look at meat flavor[J]. Meat Science, 2007, 77(1): 63-80. DOI:10.1016/j.meatsci.2007.04.016.
- [21] CHRISTLBAUER M, SCHIEBERLE P. Evaluation of the key aroma compounds in beef and pork vegetable gravies a la chef by stable isotope dilution assays and aroma recombination experiments[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(24): 13122-13130. DOI:10.1021/jf203340a.
- [22] NOLEAU I, TOULEMONDE B. Quantitative study of roast chicken fat[J]. Food Science and Technology, 1987, 20(1): 37-41.

- [23] AYASENA D D, AHN D U, NAM K C, et al. Flavour chemistry of chicken meat: a review[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2013, 26(5): 732-742. DOI:10.5713/ajas.2012.12619.
- [24] NAYAK P K, DASH U, RAYAGURU K, et al. Physio-chemical changes during repeated frying of cooked oil: a review[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2016, 40(3): 371-390. DOI:10.1111/jfbc.12215.
- [25] 靳林溪, 谢建春, 孙宝国. 在线红外检测脂肪控制氧化过程中饱和醛类物质的含量变化[J]. *食品科学*, 2011, 32(12): 224-227.
- [26] ADAMS A, BOUCKAERT C, VAN LANCKER F, et al. Amino acid catalysis of 2-alkylfuran formation from lipid oxidation-derived α,β -unsaturated aldehydes[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(20): 11058-11062. DOI:10.1021/jf202448v.
- [27] ADAMS A, KITRYTE V, VENS KUTONIS R, et al. Model Studies on the pattern of volatiles generated in mixtures of amino acids, lipid-oxidation-derived aldehydes, and glucose[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(4): 1449-1456. DOI:10.1021/jf104091p.
- [28] LOTFY S N, FADEL H H M, EL-GHORAB A H, et al. Stability of encapsulated beef-like flavourings prepared from enzymatically hydrolysed mushroom proteins with other precursors under conventional and microwave heating[J]. *Food Chemistry*, 2015, 187: 7-13. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.04.027.
- [29] MA J, PENG X, CHENG K W, et al. Effects of melamine on the Maillard reaction between lactose and phenylalanine[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(1): 1-6. DOI:10.1016/j.foodchem.2009.07.007.
- [30] 王蒙, 侯莉, 梁晶晶, 等. 采用同时蒸馏萃取方法分析猪肉炖煮过程产生的风味物质[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(9): 184-191. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201609032.
- [31] 赵梦瑶, 赵健, 侯莉, 等. 炖煮羊肉香气物质分析鉴定[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(19): 284-293. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.19.047.