

刘杨, 黄佳, 贾洪锋, 等. 不同烹饪方法对牛肉挥发性风味物质的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 305–313. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080198

LIU Yang, HUANG Jia, JIA Hongfeng, et al. Effects of Different Cooking Methods on Volatile Flavor Compounds in Beef[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 305–313. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080198

· 分析检测 ·

不同烹饪方法对牛肉挥发性风味物质的影响

刘 杨, 黄 佳, 贾洪锋*, 方小微, 龙沮屹, 兰 宁
(四川旅游学院食品学院, 四川成都 610100)

摘 要: 为了研究不同烹饪方法 (炸制、蒸制和煮制) 对牛肉挥发性风味物质的影响, 利用固相微萃取 (solid phase microextraction, SPME) 结合气相色谱-质谱 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 联用技术对不同烹饪方法处理牛肉样品中挥发性风味物质进行分离鉴定。研究表明: 不同烹饪方法处理的牛肉样品中共分离鉴定出 114 种挥发性风味物质; 不同烹饪方法对牛肉挥发性化合物有显著影响, 其中炸制影响最大, 其次是蒸制, 影响最小的是煮制。生牛肉共检测出化合物 61 种, 蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中检测出的化合物分别为: 59、33 和 60 种。生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉共有的挥发性风味物质为 14 种, 分别是: 2-羟基戊酸甲酯、己酸、二甲基硅烷二醇、1-辛烯-3-醇、1-戊醇、壬醛、癸醛、己醛、十四烷醛、辛醛、丙酮、2,3-辛二酮、3,7,11,15-四甲基己二烯-2-烯、甲氧基苯基-肟。生牛肉中的挥发性风味物质含量较高的是: 己酸乙酯和己酸 (相对含量分别为 16.15% 和 11.17%)。煮牛肉中的挥发性风味物质含量较高的是: 壬醛和 2,3-辛二酮 (相对含量分别为 13.44% 和 11.94%)。蒸牛肉中的挥发性风味物质含量较高的是: 己醛 (相对含量为 44.89%)。炸牛肉中的挥发性风味物质含量较高的是: 甲醛、壬醛和己醛 (相对含量分别为 19.49%、17.66% 和 9.58%)。主成分分析 (principal component analysis, PCA) 结果表明, 酯类、烃类、酸类和醛类可能是导致不同烹饪方法处理后牛肉挥发性风味物质差异化的主要影响因素。本研究可为牛肉的加工提供一定的参考。

关键词: 气相色谱-质谱法, 烹饪方式, 牛肉, 挥发性风味物质, 主成分分析

中图分类号: TS207.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)10-0305-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080198

本文网刊:



Effects of Different Cooking Methods on Volatile Flavor Compounds in Beef

LIU Yang, HUANG Jia, JIA Hongfeng*, FANG Xiaowei, LONG Juyi, LAN Ning

(College of Food Science and Technology, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

Abstract: In order to study the effects of different cooking methods (frying, steaming and boiling) on the volatile flavor compounds in beef, solid phase microextraction (SPME) combined with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was used to analyze the volatile flavor compounds of beef. GC-MS method was used to isolate and identify volatile flavor compounds in beef samples treated with different cooking methods. The results showed that 114 volatile flavor compounds were isolated and identified from beef samples treated by different cooking methods. The ways of cooking had significant effects on the volatile flavor compounds of beef, among which frying had the strongest effect, followed by steaming, and boiling had the slightest effect. A total of 61 compounds were detected in raw beef, while 59, 33 and 60 compounds were detected in steamed beef, fried beef and boiled beef, respectively. There were 14 volatile flavor compounds in common in raw beef, steamed beef, fried beef and boiled beef, which were listed in the following: 2-hydroxy-pentanoic acid methyl ester, hexanoic acid, dimethyl-silanediol, 1-octene-3-ol, 1-pentanol, nonanal, decanal, hexanal, tetradecanal, octanal, acetone, 2,3-octanedione, 3,7,11,15-tetramethylhexadiene-2-ene, methoxy-phenyl-oxime. The main volatile flavor com-

收稿日期: 2021-08-19

基金项目: 四川省科技计划项目 (2019YJ0343); 四川旅游学院科研创新团队项目 (19SCTUTY04); 四川旅游学院高水平科研项目培育专项 (2022PY02)。

作者简介: 刘杨 (1998-), 女, 本科, 研究方向: 食品加工与检测, E-mail: 2207739297@qq.com。

* 通信作者: 贾洪锋 (1981-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 食品加工与检测, E-mail: jiahongfeng_cq@163.com。

pounds in raw beef were hexanoic acid ethyl ester and hexanoic acid (the relative contents were 16.15% and 11.17%, respectively). The main volatile flavor compounds in boiled beef were nonanal and 2, 3-octanedione (13.44% and 11.94%, respectively). The main volatile flavor compounds in steamed beef was hexanal (relative content was 44.89%). The main volatile flavor compounds in fried beef were formaldehyde, nonanal and hexanal (19.49%, 17.66% and 9.58%, respectively). The results of principal component analysis (PCA) showed that esters, hydrocarbons, acids and aldehydes might be the main factors affecting the differentiation of volatile flavor compounds in different samples. The results from this study would provide a technical reference for beef processing.

Key words: gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); cooking method; beef; volatile flavor compounds; principal component analysis (PCA)

肉是人类食物的重要组成部分, 为人类提供了必需的蛋白质、脂肪和维生素。肉类风味是评价肉类品质的重要指标^[1]。肉类的风味主要是加工过程中产生的, 当对生肉加热时, 肉类的风味前体物发生化学反应, 产生挥发性风味物质, 形成肉的独特风味^[2]。肉类从未加工到加工经历了一系列的变化: 色泽变深、香味渐浓、味道增厚、质地改变^[3]。

关于烹饪加工对肉类影响的研究主要有传统中式高温烹饪工艺对牛肉食用品质的影响^[4], 蒸制、煮制、炖制及干制对牛肉中有害物质(多环芳烃(PAHs)、反式油酸(C18:1 trans-9)及亚硝酸盐)的影响^[5], 烤、炸和煎对牛肉理化指标的影响^[6], 炖煮对牛肉中挥发性物质的影响^[7-10], 以及牛肉煎制过程中色泽的变化及动力学模型的建立^[11]等。牛肉适合采用多种烹饪加工方法从而制成不同的食品, 不同烹饪方法的加热温度和加热时间等要素各有不同, 从而导致最终产品会呈现出不同的食用品质。就目前的研究而言, 关于不同烹饪方法处理的牛肉中挥发性风味物质的比较还未见报道。因此, 本论文采用 GC-MS 分析牛肉在不同烹饪方法(蒸、炸、煮)下挥发性风味物质的变化, 为牛肉食用深加工、产品开发以及风味改良提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冷鲜牛里脊肉(4℃贮藏备用) 成都市龙泉驿区万达永辉超市; 金龙鱼菜籽油 金龙鱼粮油食品股份有限公司。

50/30 μmDVB/CAR/PDMS 固相微萃取头 美国 Supelco 公司; 安捷伦-7890B-气相色谱-三重四极杆串联质谱仪、HP-INNOWAX 中极性柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm) 美国安捷伦公司; 万分之一分析天平 上海西塘生物科技有限公司; 220 V/2100 W 电磁炉(可调节功率) 九阳股份有限公司; TP101 电子数显食品温度计 广东东莞万创电子制品有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备 依据前期预实验结果, 将牛里脊切成 10 cm×5 cm×2 cm 的块状备用, 在使用电磁炉过程中, 蒸、炸和煮三种烹饪方法的功率均为 600 W, 蒸、煮时间均为 30 min, 水加热并保持沸腾后放入牛

里脊肉进行蒸制和煮制; 炸制时间为 15 min, 500 g 菜籽油加热 150 s 后, 油温达到 170℃, 放入肉进行炸制。

1.2.2 固相微萃取条件 根据文献[12]做了一定改进, 将经过不同烹饪方法加工处理的牛肉样品在室温下切碎混匀后准确称取 3.00 g 装入 10 mL 顶空瓶中, 旋紧瓶盖。样品瓶放入 60℃ 水浴锅中平衡 5 min 后将 SPME 萃取头插入瓶中, 萃取头处于顶空状态吸附挥发性风味化合物 55 min 后取出, 插入 GC 进样口中, 热解吸 5 min。

1.2.3 色谱条件 色谱柱: HP-INNOWAX 中极性柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 升温程序: 初始温度 45℃, 保持 3 min, 然后以 3℃/min 的速率升温至 180℃, 再继续以 12℃/min 升到 220℃, 保持 3 min; 进样口温度 240℃; 载气为 99.999% 高纯度氦气; 流速 0.8 mL/min。不分流进样。

1.2.4 质谱条件 根据文献[13]做了一定改进, 电离方式 EI; 离子源温度 220℃; 接口温度 240℃; 电子能量 70 eV; 扫描方式为全扫描; 质量扫描范围 m/z 35~500 amu, 峰面积归一化法进行定量。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 软件对数据进行汇总和分析; SPSS Statistics 26 软件进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 牛肉样品中挥发性风味物质检测结果

采用 SPME 结合 GC-MS 检测不同烹饪方法处理的牛肉样品挥发性风味物质。从表 1 可知, 牛肉中共检测出 114 种化合物, 分别是 20 种酯类物质、14 种酸类物质、24 种醇类物质、16 种醛类物质、13 种酮类物质、11 种烃类物质、3 种酚类物质和 13 种其他类物质。生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉共有的挥发性风味物质有 14 种, 分别是: 2-羟基戊酸甲酯、己酸、二甲基硅烷二醇、1-辛烯-3-醇、1-戊醇、壬醛、癸醛、己醛、十四烷醛、辛醛、丙酮、2,3-辛二酮、3,7,11,15-四甲基己二烯-2-烯、甲氧基苯基-肟。不同的烹饪方法对牛肉中挥发性风味物质的影响不同。表 2 统计出了不同烹饪方法处理的牛肉样品中检测出的不同化合物的种类与数量。从统计结果可以看出, 生肉中共有 61 种挥发性风味物质, 主要是酸类

表 1 不同烹饪方法处理的牛肉样品中挥发性风味物质相对含量

Table 1 Relative contents of volatile flavor compounds in beef samples treated with different cooking methods

类别	编号	化学名称	相对含量(%)			
			生牛肉	蒸牛肉	炸牛肉	煮牛肉
酯类	1	己酸乙酯(Hexanoic acid, ethyl ester)	16.15	—	—	—
	2	1,2-苯二甲酸双(2-甲基丙基)酯(1,2-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-methylpropyl ester)	2.75	0.18	3.26	—
	3	十三酸乙酯(Ethyl tridecanoate)	1.48	—	—	—
	4	甲酸辛酯(Formic acid, octyl ester)	1.15	0.61	0.78	—
	5	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯(2,2,4-Trimethyl-1,3-pentandiol diisobutyrate)	1.08	—	—	0.09
	6	(E)-9-十八烯酸乙酯((E)-9-Octadecenoic acid ethyl ester)	0.49	—	—	—
	7	2-羟基戊酸甲酯(Pentanoic acid, 2-hydroxy-, methyl ester)	0.42	0.09	0.64	0.15
	8	亚油酸乙酯(Linoleic acid ethyl ester)	0.41	—	—	—
	9	丙酸2-甲基-3-羟基-2,2,4-三甲基戊基酯(Propanoic acid, 2-methyl-, 3-hydroxy-2,2,4-trimethylpentyl ester)	0.38	—	—	0.09
	10	丁内酯(Butyrolactone)	0.25	0.08	—	0.08
	11	1,5-二甲基-1-乙烯基-4-丁酸己烯基酯(1,5-Dimethyl-1-vinyl-4-hexenyl butyrate)	0.21	—	—	—
	12	辛酸乙酯(Octanoic acid, ethyl ester)	0.09	—	—	—
	13	十六酸甲酯(Hexadecanoic acid, methyl ester)	0.08	—	—	—
	14	庚酸烯丙酯(Allyl heptanoate)	—	0.41	—	1.45
	15	己酸2-丙烯酯(Hexanoic acid, 2-propenyl ester)	—	0.28	—	0.87
	16	乙酸芳樟酯(Linalyl acetate)	—	0.17	—	0.21
	17	甘油1,2-二乙酸酯(Glycerol 1,2-diacetate)	—	0.11	—	0.16
	18	正己酸乙烯基酯(n-Caproic acid vinyl ester)	—	0.04	—	0.07
	19	十六酸乙酯(Hexadecanoic acid, ethyl ester)	—	—	0.81	0.22
	20	反式, 反式-9,12-十八碳二烯酸丙酯(trans,trans-9,12-Octadecadienoic acid, propyl ester)	—	—	—	0.08
酸类		小计	24.94	1.97	5.49	3.47
	21	己酸(Hexanoic acid)	11.17	0.71	2.12	1.37
	22	正十六酸(n-Hexadecanoic acid)	9	—	—	—
	23	十四酸(Tetradecanoic acid)	5.18	0.02	—	—
	24	辛酸(Octanoic acid)	1.58	0.23	—	0.29
	25	丁酸(Butanoic acid)	0.7	0.14	—	0.15
	26	庚酸(Heptanoic acid)	0.69	—	—	—
	27	壬酸(Nonanoic acid)	0.67	0.14	—	—
	28	醋酸(Acetic acid)	0.53	0.08	—	—
	29	油酸(Oleic Acid)	0.3	—	—	—
	30	十二酸(Dodecanoic acid)	0.28	—	—	—
	31	苯甲酸(Benzoic acid)	0.15	—	—	—
	32	十三酸(Tridecanoic acid)	0.03	—	—	—
	33	2,4-壬二酸(2,4-azelaic acid)	—	0.08	—	—
醇类	34	2-乙基己酸(Hexanoic acid, 2-ethyl-)	—	0.07	—	0.22
		小计	30.28	1.47	2.12	2.03
	35	雪松醇(Cedrol)	4.12	—	—	—
	36	芳樟醇(Linalool)	1.79	0.33	—	0.38
	37	二甲基硅烷二醇(Silanediol, dimethyl-)	1.68	1.08	1.67	1.25
	38	1-辛烯-3-醇(1-Octen-3-ol)	1.46	3.61	1.56	5.6
	39	1-十二烷醇(1-Dodecanol)	0.73	0.17	—	0.27
	40	1-己醇(1-Hexanol)	0.69	0.77	—	0.5
	41	1-戊醇(1-Pentanol)	0.3	1.51	0.39	2.05
	42	1-庚醇(1-Heptanol)	0.27	—	—	—
	43	1-壬醇(1-Nonanol)	0.21	—	—	—
	44	2-(2-乙氧基乙氧基)-乙醇(Ethanol, 2-(2-ethoxyethoxy)-)	0.19	0.13	0.66	—
	45	正十六醇(1-Hexadecanol)	0.18	—	—	—
	46	苯甲醇(Benzyl alcohol)	0.17	—	—	—
	47	2,2'-氧双乙醇(Ethanol, 2,2'-oxybis-)	0.14	—	—	—
	48	1-(2-丁氧基乙氧基)-乙醇(Ethanol, 1-(2-butoxyethoxy)-)	0.14	—	—	—
	49	2-辛烯-1-醇(2-Octen-1-ol)	—	0.45	—	0.78

续表 1

类别	编号	化学名称	相对含量(%)			
			生牛肉	蒸牛肉	炸牛肉	煮牛肉
醛类	50	[R-(R*, R*)]-2,3-丁二醇(2,3-Butanediol, [R-(R*, R*)]-)	—	0.17	—	—
	51	2-(十二烷基氧基)乙醇(Ethanol, 2-(dodecyloxy)-)	—	0.12	1.4	—
	52	十四醇(1-Tetradecanol)	—	0.06	—	—
	53	α -松油醇(α -Terpineol)	—	0.04	—	0.06
	54	正丁醇(1-Butanol)	—	0.02	—	—
	55	正十五醇(n-Pentadecanol)	—	—	0.57	—
	56	正辛醇(1-Octanol)	—	—	—	0.9
	57	1,4-丁二醇(1,4-Butanediol)	—	—	—	0.17
	58	2-(2-丁氧基乙氧基)乙醇(Ethanol, 2-(2-butoxyethoxy)-)	—	—	—	0.09
		小计	12.07	8.46	6.25	12.05
	59	苯甲醛(Benzaldehyde)	3.11	4.58	—	6.5
	60	壬醛(Nonanal)	2.27	8.7	17.66	13.44
	61	癸醛(Decanal)	1.64	0.87	0.49	1.66
	62	己醛(Hexanal)	0.88	44.89	9.58	9.15
	63	十四烷醛(Tetradecanal)	0.88	0.63	0.98	0.78
	64	辛醛(Octanal)	0.47	2.7	3.23	7.25
	65	七烷醛(Heptadecanal)	0.35	0.17	—	0.42
	66	(E)-2-辛烯醛(2-Octenal, (E)-)	—	0.77	—	0.85
	67	糠醛(Furfural)	—	0.27	—	1.01
	68	2-异丙烯基-5-甲基十六烷基-4-烯醛(2-Isopropenyl-5-methylhex-4-enal)	—	0.18	—	—
	69	(E, E)-2,4-癸二烯醛(2,4-Decadienal, (E, E)-)	—	0.11	—	0.19
	70	(E, Z)-2,4-癸二烯醛(2,4-Decadienal, (E, Z)-)	—	0.04	—	0.05
	71	甲醛(Formaldehyde)	—	—	19.49	—
	72	柠檬醛(Citral)	—	—	—	0.3
	73	(E)-2-十二烯醛(2-Dodecenal, (E)-)	—	—	—	0.19
	74	十三醛(Tridecanal)	—	—	—	0.13
		小计	9.6	63.91	51.43	41.92
酮类	75	6,10-二甲基-5,9-十一烯-2-酮(5,9-Undecadien-2-one, 6,10-dimethyl-)	1.23	—	—	—
	76	丙酮(Acetone)	0.8	0.62	1.82	0.68
	77	2,3-辛二酮(2,3-Octanedione)	0.46	7.55	0.7	11.94
	78	2,6-二叔丁基-4-羟基-4-甲基环己烷-2,5-二烯-1-酮(2,6-Di-tert-butyl-4-hydroxy-4-methylcyclohexa-2,5-dien-1-one)	0.45	—	—	0.07
	79	6-甲基-5-庚烯-2-酮(5-Hepten-2-one, 6-methyl-)	0.28	—	—	0.1
	80	1-(乙酰氧基)-2-丙酮(2-Propanone, 1-(acetyloxy)-)	—	0.32	1.05	0.58
	81	2-甲基-3-辛酮(3-Octanone, 2-methyl-)	—	0.28	—	—
	82	(Z)-6,10-二甲基-5,9-十一烯-2-酮(5,9-Undecadien-2-one, 6,10-dimethyl-, (Z)-)	—	0.12	—	0.28
	83	3-甲基-6-(1-甲基乙基)-2-环己烯-1-酮(2-Cyclohexen-1-one, 3-methyl-6-(1-methylethyl)-)	—	0.12	—	—
	84	2-庚酮(2-Heptanone)	—	—	0.18	—
	85	2-十三烷酮(2-Tridecanone)	—	—	—	0.09
	86	3-壬烯-2-酮(3-Nonen-2-one)	—	—	—	0.05
	87	2-壬酮(2-Nonanone)	—	—	—	0.04
		小计	3.22	9.01	3.75	13.83
	88	3,7,11,15-四甲基二烯-2-烯(3,7,11,15-Tetramethylhexadiene-2-ene)	0.29	0.21	0.56	0.34
烃类	89	4,11,11-三甲基-8-亚甲基-双环[7.2.0]-4-十一烯(Bicyclo[7.2.0]undec-4-ene, 4,11,11-trimethyl-8-methylene-)	0.26	—	—	—
	90	庚烷(Heptane)	—	3.05	—	—
	91	柠檬烯(D-Limonene)	—	2.79	0.72	4.59
	92	石竹烯(Caryophyllene)	—	0.62	1.13	0.92
	93	3-乙基-2-甲基-1,3-己二烯(1,3-Hexadiene, 3-ethyl-2-methyl-)	—	0.28	—	0.37
	94	[R-[R*, R*-(E)]]-3,7,11,15-四甲基-2-十六烯(2-Hexadecene, 3,7,11,15-tetramethyl-, [R-[R*, R*-(E)]]-)	—	0.17	—	0.31
	95	(E)-2-癸烯((E)-2-decene)	—	0.12	—	0.13
	96	十五烷(Pentadecane)	—	—	1.54	—
	97	1-十一炔(1-Undecyne)	—	—	0.64	—
	98	2,4-二甲基-1-癸烯(1-Decene, 2,4-dimethyl-)	—	—	—	0.16

续表 1

类别	编号	化学名称	相对含量(%)			
			生牛肉	蒸牛肉	炸牛肉	煮牛肉
酚类		小计	0.55	7.24	4.59	6.82
	99	苯酚(Phenol)	0.07	—	—	—
	100	对甲酚(p-Cresol)	0.24	—	—	—
	101	(E)-2-壬基酚(2-Nonenal, (E)-)	0.11	0.38	—	0.45
		小计	0.42	0.38	0	0.45
	102	甲氧基苯基-肟(Oxime-, methoxy-phenyl-)	4.78	0.55	1.2	0.72
	103	1,2,4,5-四甲基-苯(Benzene, 1,2,4,5-tetramethyl-)	0.55	—	—	—
	104	萘(Naphthalene)	0.1	—	—	—
	105	茴香脑(Anethole)	0.09	—	—	—
	106	1,2,3,4-四甲基-苯(Benzene, 1,2,3,4-tetramethyl-)	0.02	—	—	—
其他物质	107	2-戊基-呋喃(Furan, 2-pentyl-)	—	0.61	—	2.1
	108	二烯丙基二硫化物(Diallyl disulphide)	—	0.16	—	0.16
	109	2,5-二甲基吡嗪(Pyrazine, 2,5-dimethyl-)	—	—	2.2	—
	110	3-乙基-2,5-二甲基-吡嗪(Pyrazine, 3-ethyl-2,5-dimethyl-)	—	—	1.28	—
	111	甲基吡嗪(Pyrazine, methyl-)	—	—	0.71	—
	112	2-乙基-6-甲基-吡嗪(Pyrazine, 2-ethyl-6-methyl-)	—	—	0.7	—
	113	2,6-二甲基吡嗪(Pyrazine, 2,6-dimethyl-)	—	—	0.68	—
	114	2-乙基-5-甲基吡嗪(Pyrazine, 2-ethyl-5-methyl-)	—	—	0.57	—
		小计	5.54	1.32	7.34	2.98

注: —表示未检测到该物质。

表 2 不同烹饪方法的牛肉挥发性风味物质分类统计

Table 2 Types of volatile flavor compounds in beef samples treated with different cooking methods

化合物类别	生牛肉	蒸牛肉	炸牛肉	煮牛肉
酯类	13	9	4	11
酸类	12	8	1	4
醇类	14	13	6	11
醛类	7	12	6	14
酮类	5	6	4	9
烃类	2	7	5	7
酚类	3	1	0	1
其他类物质	5	3	7	3
合计	61	59	33	60

物质、酯类物质和醇类物质(相对含量分别为 30.28%、24.94% 和 12.07%);煮牛肉中检测出 60 种挥发性风味物质,主要是醛类物质、酮类物质和醇类物质(相对含量分别为 41.92%、13.83% 和 12.05%);蒸牛肉中检测出 59 种挥发性风味物质,主要是醛类物质(相对含量为 63.91%);但是炸牛肉中仅检测出 33 种挥发性风味物质,主要是醛类物质(相对含量为 51.43%)。结果表明,烹饪加工后的牛肉中最主要的挥发性风味物质是醛类,柏霜等^[14]的研究也指出,醛类是三种滩羊肉制品(炒制、煎制与炸制)主要的挥发性化合物。炸制对牛肉中挥发性风味物质的种类影响最大,这可能与炸制的温度比煮制和蒸制更高有关。柏霜等^[14]的研究也指出,加工工艺与温度的不同是导致挥发性风味化合物不同的主要原因。黄群等^[15]对传统湘西腊肉经蒸煮、油炸和微波 3 种烹饪方式处理后,油炸样品中检出的风味化合物种类

最少。

生牛肉中的挥发性风味物质含量较高的是己酸乙酯和己酸(相对含量分别为 16.15% 和 11.17%);煮牛肉中是壬醛和 2,3-辛二酮(相对含量分别为 13.44% 和 11.94%);蒸牛肉中是己醛(相对含量为 44.89%);炸牛肉中是甲醛、壬醛和己醛(相对含量分别为 19.49%、17.66% 和 9.58%)。饱和醛和不饱和醛具有青草、脂肪和油脂的香气,在所有熟肉香气中起着重要作用。不同加工过程处于持续加热状态,由于美拉德反应、脂质氧化反应和 Strecker 热降解反应,醛类物质与其他类型化合物相比浓度总量都是最高的^[14]。

2.2 酯类挥发性风味物质分析

酯类物质是由肌肉组织中脂质氧化所产生的醇和游离脂肪酸之间的相互作用所产生的^[16]。从表 1 中可以看出,生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中均含有的酯类物质是 2-羟基戊酸甲酯,相对含量分别为 0.42%、0.09%、0.64%、0.15%。生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中酯类物质的相对含量分别为 24.94%、1.97%、5.49%、3.47%。从表 2 中可以看出,生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中酯类物质的种类分别为:13、9、4、11。酯类物质相对含量和种类差异较大。牛肉样品在经过不同烹饪方法(蒸制、炸制、煮制)加工以后,炸牛肉中酯类物质总含量略高于蒸牛肉和煮牛肉,其原因可能是因为虽然炸制温度比蒸制和煮制温度更高,但是蒸制和煮制的时间更长,导致酯类物质含量减少更多。陈丽丽等^[17]的研究也指出,经过蒸制、炸制和煮制后的脆肉鲩鱼肉中酯类物质的种类和含量都明显减少,同时油炸的样品中酯类物质含量高于蒸制和煮制样品,且煮制样品高

于蒸制样品。蒸制牛肉和煮制牛肉中虽然酯类物质种类相对较多,但是长时间加热导致酯类物质相对含量较少。总体而言,生牛肉中的酯类物质在经过蒸、炸和煮之后,其中的酯类物质含量均大幅减少。以生牛肉为参考,主要的酯类物质是己酸乙酯(相对含量为16.15%),经过蒸制、炸制、煮制之后相对含量均降为0。同时也可以看出,在蒸制和煮制过程中产生了一些在生牛肉中没有的酯类物质。酯类物质是由酯化反应和各种产物之间的相互作用产生的,长链脂肪酸与醇类物质生成的酯类物质呈油脂味,短链脂肪酸与醇类物质生成的酯具有果香味。

2.3 酸类挥发性风味物质分析

酸类物质相对含量最高的是生牛肉中的己酸,它也是生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中唯一共有的酸类物质,后三种牛肉样品中己酸的相对含量分别为0.71%、2.12%、1.37%。生牛肉中酸类物质种类较为丰富,共12种,蒸牛肉中含有8种,煮牛肉中含有4种,最少的是炸牛肉,仅含有1种。生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中,酸类物质的相对总含量分别为:30.28%、1.47%、2.12%和2.03%。酸类主要是在高温烹饪过程中由相应醇和醛等氧化生成,相对含量及种类随烹饪方法的不同而有所变化。经过三种不同烹饪方法(蒸制、炸制、煮制)烹制之后,生牛肉中的正十六酸、庚酸、油酸、苯甲酸、十二酸、十三酸在加工后的样品中未检出。蒸制后新检出2,4-壬二酸和2-乙基己酸,煮制后新检出2-乙基己酸。

2.4 醇类挥发性风味物质分析

醇主要来源于脂肪的氧化分解^[18]。生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中共检测出24种醇类物质,其中有14种醇类物质是生牛肉中就含有。所有醇类物质中,共同含有的是:二甲基硅烷二醇、1-辛烯-3-醇和1-戊醇。研究显示1-辛烯-3-醇具有较强的蘑菇香味^[19]。从表1中可以看出,与生牛肉中含有的醇类物质相比,蒸制后,生牛肉中原有的醇类物质消失了一半,炸牛肉和煮牛肉分别剩余4和6种,其余醇类物质是新生成的。生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中,醇类物质的相对总含量分别为:12.07%、8.46%、6.25%和12.05%。生牛肉的醇类物质中相对含量较高的是雪松醇,相对含量为4.12%,蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中雪松醇的相对含量均为0。说明牛肉样品经过不同的烹饪方法加工以后雪松醇不再存在。从相对含量上来看,煮制对醇类物质影响不大,影响最大的是炸制,黄群等^[15]的研究也表明,油炸的腊肉中醇类化合物的含量明显降低。

2.5 醛类挥发性风味物质分析

醛类物质主要也来源于脂肪氧化分解^[20]。醛类物质具有较强的挥发性,浓度高,是熟肉中重要的风味化合物^[21]。生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中,醛类物质的种类分别为7、12、6、14;相对总含量分别为9.6%、63.91%、51.43%、41.92%。其中,共有

的醛类物质有5种:壬醛、癸醛、己醛、十四烷醛、辛醛,是所有挥发性风味物质中共有最多的类别;生牛肉的醛类物质中相对含量最高的是苯甲醛(3.11%),蒸制、炸制、煮制之后,相对含量分别为:4.58%、0%、6.5%。在所有醛类物质中,己醛的相对含量在蒸制样品中高达44.89%;壬醛在炸制和煮制样品中相对含量分别是17.66%和13.44%。在共有的醛类物质中,壬醛具有清香风味,主要是由油酸氧化产生^[22];己醛具有青草风味,主要由亚油酸和花生四烯酸氧化产生^[23]。蒸牛肉和煮牛肉中共同含有苯甲醛、壬醛、癸醛、己醛、十四烷醛、辛醛、七烷醛、(E)-2-辛烯醛、糠醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E,Z)-2,4-癸二烯醛11种醛类物质,说明牛肉在蒸制和煮制过程中产生的醛类物质的种类比较相似。(E)-2-辛烯醛具有清香、果香;而(E,E)-2,4-癸二烯醛具有脂肪味、油味。己醛具有一定的清香和果香。所以,经过不同烹饪方法(蒸制、炸制、煮制)处理之后,牛肉均具有清香、果香、脂肪味和油味,但是程度上有一定的差异。

2.6 酮类挥发性风味物质分析

酮类物质可以通过不饱和脂肪受热氧化后降解^[24],也可以通过美拉德反应产生^[25],常有清香气味,但是对风味的贡献不明显,然而有些酮类物质是形成杂环类化合物的重要中间体,对肉香味的形成有着难以忽视的作用^[25]。由表1可知,生牛肉中含有5种酮类物质,相对总含量为3.22%;蒸制、炸制和煮制之后,酮类物质的种类分别是6、4和9种;相对总含量分别是9.01%、3.75%、13.83%。生牛肉中最主要的酮类物质是6,10-二甲基-5,9-十一烯-2-酮,相对含量为1.23%;蒸牛肉和煮牛肉中最主要的酮类物质是2,3-辛二酮,相对含量分别为7.55%和11.94%;炸牛肉中最主要的酮类物质是丙酮,相对含量为1.82%。由于酮类物质在所有挥发性风味物质中占比不大,因此对牛肉挥发性风味的贡献并不突出。

2.7 烃类挥发性风味物质分析

烯烃类化合物主要来源于脂肪氧化或者氨基酸氧化^[26],对风味的贡献较小^[27]。在生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中,共检出11种烃类物质,但是仅共有一种烃类:3,7,11,15-四甲基己二烯-2-烯。蒸制和煮制之后牛肉均含有7种烃类物质,且种类差异不大,可能是因为蒸和煮这两种烹饪方法较为相近,并且烹饪的时间都是30 min,但是与生牛肉(含有2种烃类物质)相比,差异明显;炸牛肉是经过高温炸制而成,所以与蒸牛肉、煮牛肉和生牛肉均有一定差异性。生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中烃类的相对总含量分别为:0.55%、7.24%、4.59%、6.82%。生牛肉中相对含量最高的烃类物质是3,7,11,15-四甲基己二烯-2-烯,相对含量为0.29%,经过不同烹饪方法(蒸制、炸制、煮制)加工以后,相对含量分别为:0.21%、0.56%、0.34%。

2.8 酚类挥发性风味物质分析

被检出的酚类物质分别是: 苯酚、对甲酚、(E)-2-壬基酚 3 种。其中, 生牛肉、蒸牛肉、煮牛肉三者共有的酚类物质是(E)-2-壬基酚, 炸牛肉中未检测出酚类物质。生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中酚类物质的总相对含量分别为: 0.42%、0.38%、0%、0.45%。样品中检出的酚类物质无论是在种类上还是相对含量上均较少。酚类阈值较低, 对风味的形成有重要贡献, 其中苯酚具有酚香^[28]和甜香^[29]、对甲酚具有芳香味^[28]和苯酚气味^[30]。

2.9 其他类挥发性风味物质分析

其他类物质主要是杂环类化合物, 共检出 13 种。生牛肉、蒸牛肉、炸牛肉和煮牛肉中检出种类分别为 5、3、7、3 种; 相对总含量分别为 5.54%、1.32%、7.34%、2.98%。中共有的化合物是甲氧基苯基-呋。除共有化合物外, 生牛肉中相对含量最高的化合物是 1,2,4,5-四甲基-苯, 相对含量为 0.55%; 蒸牛肉和煮牛肉中相对含量最高的均为 2-戊基-呋喃, 相对含量分别为 0.61% 和 2.1%; 炸牛肉中相对含量最高的是 2,5-二甲基吡嗪, 相对含量为 2.2%。结合表 1 可知, 蒸制和煮制之后, 牛肉样品中被检出的其他类物质基本相同, 但是和炸牛肉相比较差异性很大, 四者相对比, 差异更明显。这可能与不同烹饪方法(蒸制、炸制、煮制)使用的温度和时间有关。

2.10 样品中挥发性风味物质的主成分分析

利用 SPSS Statistics26 对牛肉样品的挥发性风味物质进行主成分分析, 以烹饪方法为变量, 所得散点图如图 1 和图 2。由图 1 和图 2 可知, PC1(54.94%)、PC2(25.33%)和 PC3(13.08%)之和为 93.35%, 说明降维时有效信息得到了很好的保留。由图 1 和图 2 可知, 生牛肉与其它样品具有明显差异, 说明烹饪处理可明显改变牛肉的挥发性风味物质。在图 1 中, 蒸牛肉和煮牛肉的分布较为相近, 炸牛肉与蒸牛肉和煮牛肉区分度更大, 说明不同烹饪方法对牛肉样品的挥发性风味物质具有不同的影响, 其中炸制对牛肉挥发性风味物质的影响比蒸制和煮制更大。

由表 3 可知, 3 个主成分的分差累计贡献率达

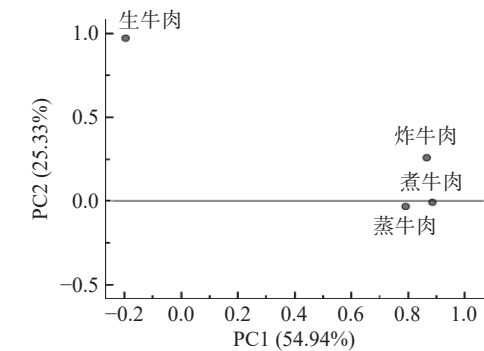


图 1 样品中挥发性风味物质主成分分析图

Fig.1 Principal component analysis of volatile flavor compounds in samples

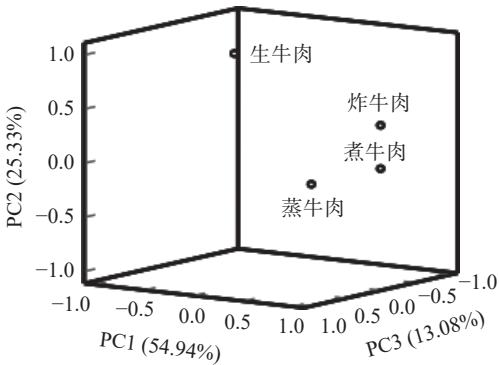


图 2 样品中挥发性风味物质主成分分析三维图

Fig.2 Principal component analysis (3D) of volatile flavor compounds in samples

表 3 样品中 8 类挥发性风味物质主成分的方差贡献值

Table 3 Variance contribution value of the principal components of eight volatile flavor compounds in samples

主成分	特征值	贡献率	累积贡献率(%)
1	4.737	59.209	59.209
2	2.849	35.616	94.825
3	0.414	5.175	100.00

表 4 样品中 8 类挥发性风味物质主成分载荷矩阵

Table 4 Principal component loading matrix of eight volatile flavor compounds in samples

类别	主成分		
	PC1	PC2	PC3
酯类	0.991	0.089	-0.100
烃类	-0.986	0.164	0.030
酸类	0.969	0.183	-0.166
醛类	-0.946	-0.249	-0.207
酚类	0.132	0.980	-0.146
醇类	0.445	0.864	0.237
其他类	0.544	-0.740	0.396
酮类	-0.661	0.681	0.315

到 100.00%, 表示能够解释样品中挥发性风味物质的信息, 因此, 选择这 3 个主成分进行分析。

在表 4 的主成分载荷矩阵中, 各挥发性风味物质的绝对值反映了其对主成分贡献率的大小, 绝对值越大, 则贡献率也越大。根据表 4, 比较第一主成分中各挥发性风味物质的贡献率, 结果为酯类>烃类>酸类>醛类>酮类>其他类>醇类>酚类; 而第二主成分中的 8 种挥发性风味物质的贡献率比较结果为酚类>醇类>其他类>酮类>醛类>酸类>烃类>酯类。

由表 3、表 4 结合图 3 可知, 第一主成分的方差贡献率为 59.21%, 第二主成分的方差贡献率 35.62%, 第三主成分的方差贡献率为 5.17%。由于第一主成分能够概括大部分香气成分信息, 影响其化合物可作为主要风味化合物, 所以推测酯类、烃类、酸类和醛类这 4 类风味物质是导致不同烹饪方法处理后牛肉挥发性风味物质差异化的主要影响因素。

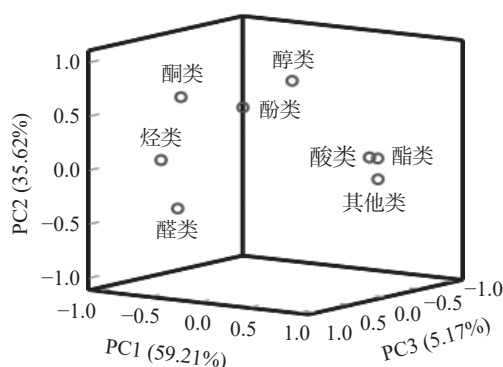


图3 样品中8类挥发性风味物质主成分载荷图

Fig.3 Principal component loading diagram of eight volatile flavor compounds in samples

3 结论

生牛肉中共检出61种挥发性风味物质,主要是酸类物质、酯类物质和醇类物质;煮牛肉中检出60种挥发性风味物质,主要是醛类物质、酮类物质和醇类物质;蒸牛肉中检出59种挥发性风味物质,主要是醛类物质;但是炸牛肉中仅检出33种挥发性风味物质,主要是醛类物质。生牛肉经过蒸、炸和煮之后,其中的酯类物质和酸类物质相对含量均大幅减少;醛类物质和烃类物质相对含量均大幅增加。烹饪加工后的牛肉中最主要的挥发性风味物质是醛类。

生牛肉中的挥发性风味物质含量较高的是己酸乙酯和己酸;煮牛肉中是壬醛和2,3-辛二酮;蒸牛肉中是己醛;炸牛肉中是甲醛、壬醛和己醛。

主成分分析结果表明,生牛肉与其它样品具有明显差异,烹饪处理可明显改变牛肉的挥发性风味物质。炸牛肉与蒸牛肉和煮牛肉区分度更大,炸制对牛肉挥发性风味物质的影响比蒸制和煮制更大。酯类、烃类、酸类和醛类这4类挥发性风味物质可能是导致不同烹饪方法处理后牛肉挥发性风味物质差异化的主要影响因素。

本研究可为牛肉的烹饪加工和产品开发提供一定的参考,但牛肉挥发性风味物质在不同烹饪方法加工过程中的变化规律以及引起挥发性风味物质变化的内在机理有待进一步研究。

参考文献

[1] LORENZO J M. Influence of the type of fiber coating and extraction time on foal dry-cured loin volatile compounds extracted by solid-phase microextraction (SPME)[J]. *Meat Science*, 2014, 96(1): 179-186.

[2] 李少艷. 肉类风味影响因素研究进展[J]. *中国调味品*, 2020, 45(2): 188-191. [LI Shaojin. Research progress of meat flavor influencing factors[J]. *China Condiment*, 2020, 45(2): 188-191.]

[3] 袁凯, 张龙, 谷东陈, 等. 肉品中的蛋白质氧化机制及其影响因素[J]. *食品科学*, 2018, 39(5): 329-335. [YUAN Kai, ZHANG Long, GU Dongchen, et al. A review of mechanisms and factors affecting protein oxidation in meat[J]. *Food Science*, 2018, 39(5): 329-335.]

[4] 张兰, 高天丽, 刘永峰, 等. 3种传统中式高温烹饪工艺对牛肉食用品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2016, 42(11): 126-132. [ZHANG Lan, GAO Tianli, LIU Yongfeng, et al. Effects of three Chinese traditional high temperature cooking on the eating quality of beef[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(11): 126-132.]

[5] 张兰, 高天丽, 刘永峰, 等. 八种中式烹饪工艺对牛肉中多环芳烃、反式脂肪酸和亚硝酸盐的影响[J]. *中国农业学报*, 2017, 50(6): 1126-1138. [ZHANG Lan, GAO Tianli, LIU Yongfeng, et al. Effects of eight Chinese style cuisine methods on polycyclic aromatic hydrocarbons, trans-fatty acids and nitrite of beef[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(6): 1126-1138.]

[6] 张兰, 高天丽, 刘永峰, 等. 传统中式烤、炸、煎工艺对牛肉营养品质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2019, 38(5): 132-139. [ZHANG Lan, GAO Tianli, LIU Yongfeng, et al. Effect of Chinese traditional cooking of broiling, frying, and pan-frying on nutritional quality of beef[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2019, 38(5): 132-139.]

[7] 宋泽, 徐晓东, 许锐, 等. 不同部位牛肉炖煮风味特征分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(4): 206-214. [SONG Ze, XU Xiaodong, XU Rui, et al. Analysis of flavor characteristics of stewed beef from different carcass parts[J]. *Food Science*, 2019, 40(4): 206-214.]

[8] 侯莉, 赵健, 赵梦瑶, 等. 炖煮牛肉的风味物质分析[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(9): 206-270. [HOU Li, ZHAO Jian, ZHAO Mengyao, et al. Analysis of the flavor compounds from stewed beef[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2017, 17(9): 206-270.]

[9] 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. [SONG Ze. The study of boiled beef flavor and the research on formation mechanism of maillard reaction[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2019.]

[10] WANG X D, ZHU L T, HAN Y X, et al. Analysis of volatile compounds between raw and cooked beef by HS-SPME-GC-MS[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(2): 1-8.

[11] JARA M, SILVIA L B, ANA F M, et al. Color changes in beef meat during pan cooking: Kinetics, modeling and application to predict turn over time[J]. *European Food Research and Technology*, 2021, 247: 2751-2764.

[12] 张哲奇, 臧明伍, 张凯华, 等. 熟制、高压灭菌和复热对粉蒸肉挥发性风味物质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(10): 187-192. [ZHANG Zheqi, ZANG Mingwu, ZHANG Kaihua, et al. Effect of cooking, autoclaving and reheating on the volatile components of steamed pork with rice flour[J]. *Food Science*, 2019, 40(10): 187-192.]

[13] 徐梓烩, 舒畅, 罗中魏, 等. 响应面法优化 HS-SPME-GC-MS 法检测猪肉中挥发性风味物质[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(6): 252-259. [XU Zihan, SHU Chang, LUO Zhongwei, et al. Optimization of the HS-SPME-GC-MS technique for determination of volatile flavor compounds in pork by response surface methodology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(6): 252-259.]

[14] 柏霜, 王永瑞, 罗瑞明, 等. 不同高温烹饪方式加工过程中滩羊肉风味化合物的差异比较[J]. *食品科学*, 2021, 42(24): 166-

174. [BAI Shuang, WANG Yongrui, LUO Ruiming, et al. Comparison of the formation and change of volatile flavor compounds in the process of Tan sheep meat by different high temperature cooking methods [J]. *Food Science*, 2021, 42(24): 166-174.]
- [15] 黄群, 傅凌韵, 郑宝东, 等. 不同烹饪方式对传统湘西腊肉挥发性成分的影响 [J]. *福建农林大学学报 (自然科学版)*, 2017, 46(4): 474-480. [HUANG Qun, FU Lingyun, ZHENG Baodong, et al. Effect of different cooking methods on volatile components of traditional Xiangxi bacon [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2017, 46(4): 474-480.]
- [16] 朱文政, 严顺阳, 徐艳, 等. 顶空固相微萃取-气质联用分析不同烹制时间红烧肉挥发性风味成分 [J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47 (2) : 247-253. [ZHU Wenzheng, YAN Shunyang, XU Yan, et al. Analysis of volatile flavor components of braised pork with different cooking time by SPME-GC-MS [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(2): 247-253.]
- [17] 陈丽丽, 张树峰, 袁美兰, 等. 不同烹饪方法对脆肉鲩挥发性风味物质的影响 [J]. *中国调味品*, 2019, 44(12): 78-84. [CHEN Lili, ZHANG Shufeng, YUAN Meilan, et al. Effects of different cooking methods on volatile flavor compounds in *Ctenopharyngodon idellus* [J]. *China Condiment*, 2019, 44(12): 78-84.]
- [18] ESTÉVEZ M, MORCUENDE D, VENTANAS S, et al. Analysis of volatiles in meat from Iberian pigs and lean pigs after refrigeration and cooking by using SPME-GC-MS [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(11): 3429-3435.
- [19] FABRIZIO A M D, CORRADO D N, AMICO A D. Self-organizing multisensor systems for odour classification: Internal categorization, adaptation and drift rejection [J]. *Sensors and Actuators B:Chemical*, 1994, 18(1-3): 244-258.
- [20] YANG Y, ZHANG X, WANG Y, et al. Study on the volatile compounds generated from lipid oxidation of Chinese bacon (un-smoked) during processing [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2017, 119(10): 1600512.
- [21] 刘登勇, 赵志南, 吴金城, 等. 基于 SPME-GC-MS 分析熏制材料对熏鸡腿挥发性风味物质的影响 [J]. *食品科学*, 2019, 40(24): 220-227. [LIU Dengyong, ZHAO Zhinan, WU Jincheng, et al. Effects of different smoking materials on volatile flavor compounds in smoked chicken thighs [J]. *Food Science*, 2019, 40(24): 220-227.]
- [22] TANIMOTO S, KITABAYASHI K, FUKUSIMA C, et al. Effect of storage period before reheating on the volatile compound composition and lipid oxidation of steamed meat of yellowtail *Seriola quinqueradiata* [J]. *Fisheries Science*, 2015, 81(6): 1145-1155.
- [23] RUIZ J, GARCIA C, MURIEL E, et al. Influence of sensory characteristics on the acceptability of dry-cured ham [J]. *Meat Science*, 2002, 61(4): 347-354.
- [24] RUIZ J, VENTANAS J, CAVA R. New device for direct extraction of volatiles in solid samples using SPME [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(11): 5115-5121.
- [25] WETTASINGHE M, VASANTHAN T, TEMELLI F, et al. Volatiles from roasted by products of the poultry processing industry [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(8): 3485-3492.
- [26] STAHNKE L H. Dried sausages fermented with *Staphylococcus xylosus* at different temperatures and with different ingredient levels [J]. *Meat Science*, 1995, 41(2): 211-223.
- [27] 孙宝国, 何坚. 香料化学与工艺学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 85-87. [SUN Baoguo, HE Jian. *Spice chemistry and technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 85-87.]
- [28] 毛永强, 负建民, 赵风云, 等. 二次接种时间对腊肉挥发性风味的影响 [J]. *食品科学*, 2022, 43(2): 285-293. [MAO Yongqiang, YUN Jianmin, ZHAO Fengyun, et al. Effect of twice inoculation time on the volatile flavor of bacon [J]. *Food Science*, 2022, 43(2): 285-293.]
- [29] 黄苓, 孙震, 曾小群, 等. 多食材替代亚硝酸盐对腊肉挥发性风味的影响 [J]. *中国食品学报*, 2021, 21(3): 324-333. [HUANG Ling, SUN Zhen, ZENG Xiaoqun, et al. Effects of multi-ingredients for nitrite on the volatile flavor compounds in cured meat [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(3): 324-333.]
- [30] 毛永强, 李彦虎, 负建民, 等. 传统陇西腊肉制作过程中挥发性风味物质变化分析 [J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(4): 144-152. [MAO Yongqiang, LI Yanhu, YUN Jianmin, et al. The analysis of the volatile flavor compounds in traditional Longxi bacon production [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(4): 144-152.]