

石泽雨, 孙志刚, 曹传爱, 等. 关键工艺点对四喜丸子软罐头高温蒸煮异味形成的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 62-72. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080284

SHI Zeyu, SUN Zhigang, CAO Chuanai, et al. Effects of Key Process Points on the Formation of Volatile Components in Soft Canned Braised Pork Balls in Gravy[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 62-72. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080284

· 研究与探讨 ·

关键工艺点对四喜丸子软罐头高温蒸煮 异味形成的影响

石泽雨¹, 孙志刚², 曹传爱¹, 孔保华¹, 夏秀芳¹, 陈倩¹, 刘骞^{1,*}

(1. 东北农业大学食品学院, 黑龙江哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学大型仪器设备共享平台, 黑龙江哈尔滨 150030)

摘要:本研究利用电子鼻和顶空固相萃取结合气质联用技术, 探究四喜丸子软罐头加工关键工艺点的挥发性风味特征及变化规律, 以确定其高温蒸煮异味 (Warmed-over flavor, WOF) 的形成机制。结果表明, 高压蒸汽灭菌后的样品与其他组的风味轮廓存在显著性差异 ($P<0.05$); 蒸制后的四喜丸子风味较好, 而高压蒸汽灭菌后的样品产生显著的 WOF 异味 (以亚麻籽油味和罐头味为主) ($P<0.05$)。此外, 气味活度值分析结果表明, WOF 关键异味分子为正己醛和庚醛; 热加工过程中, 这两种物质含量显著上升 ($P<0.05$), POV 值显著下降 ($P<0.05$), TBARS 值显著升高 ($P<0.05$), 热处理促进四喜丸子中脂质的氧化降解。因此, 本研究为四喜丸子软罐头工业化产品的异味形成和品质提升提供理论依据和技术支持。

关键词: 四喜丸子软罐头, 关键工艺点, 高温蒸煮异味, 挥发性化合物

中图分类号: TS251.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)12-0062-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022080284



本文网刊:

Effects of Key Process Points on the Formation of Volatile Components in Soft Canned Braised Pork Balls in Gravy

SHI Zeyu¹, SUN Zhigang², CAO Chuanai¹, KONG Baohua¹, XIA Xiufang¹, CHEN Qian¹, LIU Qian^{1,*}

(1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Large-scale Equipment Sharing Platform, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The present study was aimed to investigate the volatile flavor characteristics and changes on volatile flavors of key process points in the processing of soft canned braised pork balls in gravy, as well as verify the formation mechanism of Warmed-over flavor (WOF). There was a significant difference in the flavor profile between the samples after high-pressure steam sterilization and other groups ($P<0.05$). The steamed braised pork balls in gravy had better flavor, while the high-pressure steam sterilization treatment group produced significant WOF odor (mainly flaxseed oil and canned flavor) ($P<0.05$). And the principle odorous molecules of WOF were hexanal and heptanal based on their odor activity value (OAV). During the thermal processing, the content of hexanal and heptanal obviously increased ($P<0.05$), the POV value notably decreased ($P<0.05$) and the TBARS value markedly increased ($P<0.05$), which meant that heat treatment promoted the oxidative degradation of lipids in soft canned braised pork balls in gravy. This study would provide a theoretical basis and technical support for the off-flavor formation and quality improvement of the industrial products of soft canned braised pork balls in gravy.

Key words: soft canned braised pork balls in gravy; key process points; warmed-over flavor; volatile compounds

收稿日期: 2022-08-30

基金项目: 黑龙江省“百千万”工程科技重大专项课题 (2020ZX07B02)。

作者简介: 石泽雨 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工工程, E-mail: zeyushi10@163.com。

* 通信作者: 刘骞 (1981-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 畜产品加工工程, E-mail: liuqian@neau.edu.cn。

四喜丸子(Braised pork balls in gravy)是中国经典的传统名菜之一。因地域差异,菜品的口感、风味特色等各有不同,但是制作出来的菜肴多数是即食的。近些年随着食品工业的持续发展,肉类菜肴制品不断更新迭代,虽提升了菜肴制作的便捷性,但它们大多需要冷冻贮存,少数可在常温或冷藏条件下保存,这大大增加了运输成本,同时缩短了销售半径^[1-3]。另外需要冷藏或冷冻的中式肉类预制菜肴在运输时由于环境温度波动会出现一定程度的品质劣变,可能影响食品安全^[4-5]。因此,可常温贮存的软罐头方便菜肴的发展势在必行。

软罐头的加工原理及工艺方法类似刚性罐头,由于包装容器是柔软的,故称为“软罐头”,它是继金属罐和玻璃罐的一种较新型的罐头包装。软罐头食品是将各种食品原料加工后,装入热熔封口的蒸煮袋内,热杀菌后成为常温下可以长期贮存的方便食品,具有稳定性好、所占空间小、重量低等优势,同时具备罐头食品的清洁卫生、便于携带、运输和储藏等特点,常用于包装各种肉类、水果和蔬菜产品^[6-7]。工业化生产中,为保证中式肉类菜肴具有较长的货架期,大多数食品企业采用高压蒸汽灭菌工艺(121 °C, 20~30 min),以使产品达到商业无菌状态,此工艺能够较好地保证产品的食用安全,在工业化生产中被广泛使用。虽然该措施可以优化产品的贮运条件,但会对其食用品质(如香气、滋味、质构特性等)造成一定负面影响,使产品产生强烈的高温蒸煮异味(Warmed-over flavor, WOF),即人们常说的“罐头味”,也被称为“过温味”、“过熟味”,可能是由于罐头食品高温杀菌工艺导致脂质发生剧烈氧化导致的,商品拆开包装后这种异味会首先被消费者感知,降低消费者的购买欲望^[8-10]。

WOF 异味最初常与冷藏的熟肉联系在一起,指的是熟肉制品在冷藏后再加热产生的一种异味,随着食品科学的发展,此术语描述的范围被逐渐扩大,包括生肉、保温的熟肉制品、冷冻储存的肉和高温处理的肉制品等^[8-9]。大量研究表明,这种异味的产生主要由于脂质氧化,一些不饱和脂肪酸如亚油酸、亚麻酸等,氧化产生戊醛、己醛等低分子醛类物质^[9-12],它们的阈值较低,低浓度时仍易被感知。经热处理的肉制品极易产生明显的 WOF 异味,热处理会加速氧化过程,使产品产生脂质氧化的异味,同时失去了原来的肉香味^[8,10]。随着对 WOF 异味产生过程的探究,

研究人员发现不同的处理方法对肉制品 WOF 异味形成的影响程度差异显著,高温下长时间保存会促进异味的形成^[8],复热后的肉制品 WOF 异味明显增加^[10],相比之下,关键工艺点对 WOF 异味形成影响的研究稍少。

本研究以四喜丸子软罐头为例,利用电子鼻和顶空固相微萃取结合气质联用技术探究四喜丸子软罐头加工关键工艺点对其风味轮廓和挥发性气味物质的种类及含量的影响,确定其高温蒸煮异味的形成机制及关键工艺点,以期为四喜丸子软罐头工业化产品的异味形成和品质提升的研究提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

猪后臀肉、猪背脂、食盐、白糖、马铃薯淀粉、异抗坏血酸钠、香辛料、料酒、酱油、生姜、大葱、鸡蛋均购于哈尔滨比优特超市;成品分提棕榈液油嘉里特种油脂有限公司;亚硝酸钠、复合磷酸盐(食品级)河南糖柜食品有限公司;硫代巴比妥酸(Thiobarbituric acid, TBA)北京博奥拓达科技有限公司。

FALCON 2-70 真空包装机 荷兰 HENKELM AN 公司;商用双缸电炸炉 佛山炫虎电器科技有限公司;手提式高压灭菌锅 上海力辰仪器科技有限公司;GL-21M 高速冷冻离心机 湖南湘仪实验仪器开发有限公司;PEN3 便携式电子鼻气味分析仪 德国 AIRSENSE 公司;Agilent GCMS-6890N 5975B 气质联用仪 美国安捷伦公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品的制备 根据传统四喜丸子制作方法,并做出适当调整以贴近工业化生产,基本配方如表 1。

整体工艺流程:原料肉的选择与预处理→制馅→油炸→蒸制→冷却包装→灭菌。

原料肉的选择与预处理:选择经兽医卫生检验合格的猪肉作为原料,剔除可见筋膜,修整后进行清洗,洗去血污等杂质;用刀盘孔径为 3 mm 的绞肉机分别将瘦猪肉和脂肪绞碎。制馅:将 50% 重量的猪瘦肉、食盐、复合磷酸盐、亚硝酸盐以及 50% 重量的碎冰共同放入斩拌机中,高速斩拌 3 min;加入猪背脂和剩余的碎冰,继续高速斩拌 5 min;将乳化后的肉糜与剩余的猪瘦肉用和面机混匀;加入香辛料、白

表 1 四喜丸子软罐头基本配方(4.0 kg 肉的质量计)

Table 1 Basic formulation of braised pork balls in gravy (4.0 kg meat quality meter)

主料	重量(g)	配料	重量(g)	配料	重量(g)	配料	重量(g)
猪后腿肉	2800	葱	120	白糖	40	异抗坏血酸钠	5.72
背膘	1200	生姜	120	花椒粉	40	亚硝酸盐	0.14
冰水混合物	1720	酱油	120	复合磷酸盐	16		
马铃薯淀粉	458	料酒	80	桂皮粉	12		
全蛋液	400	食盐	40	八角粉	12		

糖继续搅拌;搅拌均匀后加入液体调料、蛋液,低速拌匀;加入淀粉,继续用和面机搅拌,在制馅流程结束前30 s加入异抗坏血酸钠(此时馅料温度为12~14℃)。油炸:取100 g左右肉馅,团成圆形放入油锅中,180℃油温炸制5 min。蒸制:将电磁炉功率设定为1400 W,加热蒸锅,待水沸腾后放入炸好的肉丸,开始计时,时间40 min。冷却包装:丸子从蒸锅中取出,冷却至室温,随后进行真空包装。灭菌:包装后的样品放入灭菌锅中,待温度升至121℃即灭菌程序开始时计时30 min,待灭菌锅压力降至大气压强时去除样品并冷却至室温,即可得到四喜丸子软罐头。

为探究四喜丸子软罐头生产过程中风味的变化,本实验将上述工艺流程分为四个关键工艺点,分别是制馅、油炸、蒸制和高压蒸汽灭菌,并在四个关键工艺结束且样品恢复至室温后取样。取样操作和样品命名:生肉馅搅拌结束后取样,置于4℃环境中冷藏备用(Forcemeat, FM);油炸工艺结束并恢复至室温后取样并切碎,置于4℃环境中冷藏备用(Fried meatballs, FMB);蒸制工艺结束并恢复至室温后取样并切碎,置于4℃环境中冷藏备用(Steamed meatballs, SMB);高压蒸汽灭菌工艺结束并恢复至室温后取样并切碎,置于4℃环境中冷藏备用(High-pressure steam sterilized meatballs, HSSMB)。

1.2.2 气味评价分析 选取18名经过感官训练的成员作为一个评定小组进行气味评价。评分实验前,根据相关的研究^[8-9,13]整理出的四喜丸子软罐头气味描述词,通过感官预实验从中筛选出5个重要气味感官词:高温蒸煮味(罐头味)、亚麻籽油味(略带鱼腥的氧化油味)、脂肪香味(脂肪的油味)、肉香味(熟猪肉香气)、炸香味(炸肉的焦香味),作为评价标准。评价前,将样品在30℃条件下恒温放置30 min。小组成员分别对加工各阶段样品进行嗅闻,并对上述指标的气味强度打分(5分制),分值越高,代表气味越浓。取气味评分均值绘制风味剖面图。

1.2.3 挥发性化合物的测定 参照Wen等^[14]和张哲奇等^[10]的方法并稍作改动,挥发性化合物测定采用顶空固相微萃取结合气质联用技术,具体方法如下。准确称取3.00 g样品并装入顶空样品瓶中,旋紧瓶盖。

1.2.3.1 顶空固相微萃取条件 使用微量进样针向顶空瓶中加入2 μL内标(1,2-二氯苯标准品,400 mg/L)后,将顶空瓶放入45℃水浴中平衡25 min,随后将固相微萃取(Solid-phase microextraction, SPME)进样手柄的针头插入瓶中,推出纤维头(50/30 μm DVB/PDMS/CAR纤维),使其处于顶空状态继续在45℃条件下吸附样品的挥发性风味化合物30 min后取出。然后将纤维头置于气质联用仪的进样口,热解析15 min,并通过该仪器对挥发性物质进行分离鉴定。

1.2.3.2 色谱条件 色谱柱:TRACE TR-Wax MS气相柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)。载气:He;流速:1.0 mL/min,采用不分流模式,保持1 min。升温程序:进样口温度250℃,起始柱温40℃,保持3 min,以5℃/min速率升温到200℃,保持1 min,再以8℃/min升温到220℃,保持3 min。

1.2.3.3 质谱条件 传输线温度230℃,溶剂延迟时间1 min,质量扫描范围设定为40~600 m/z,采用全扫描模式。

1.2.3.4 定性和定量分析 定性:对化合物进行分析时,将得到的数据在仪器的NIST08.L谱库中进行检索和匹配,选择匹配度高于80的化合物定性为该物质。

定量:以1,2-二氯苯作为内标进行定量分析,根据公式计算各物质的绝对含量。

$$C_x = \frac{S_x}{S_{\text{内标}}} \times \frac{m_{\text{内标}}}{m_x}$$

式中: C_x 为各挥发性化合物含量(μg/kg); S_x 为挥发性化合物的峰面积; $S_{\text{内标}}$ 为内标物的峰面积; $m_{\text{内标}}$ 为内标物质量(μg),本实验内标物的质量为0.2 μg; m_x 为样品质量(kg)。

1.2.4 气味活度值(Odor activity value, OAV)计算

$$\text{OAV} = \frac{C_x}{T_x}$$

式中: C_x 为挥发性化合物含量(μg/kg); T_x 为该化合物在水中的嗅觉阈值(μg/kg)。

1.2.5 电子鼻测定 参考Wu等^[15]的方法。将3.00 g样品放入20 mL顶空瓶中,样品在室温下(25℃)平衡1 h。使用PEN3电子鼻(Airsense Analytics GmbH, Schwerin, Germany)评估电子鼻分析。PEN3系统包含10个金属氧化物气体传感器,分别被命名为W1C(对芳香族化合物敏感)、W5S(对氮氧化物敏感)、W3C(对香气和氨气敏感)、W6S(对氢化物敏感)、W5C(对短链烷烃芳香组分敏感)、W1S(对甲基敏感)、W1W(对硫化物敏感)、W2S(对醇、醛、酮类化合物敏感)、W2W(对有机硫化物敏感)和W3S(对长链烷烃敏感)。

1.2.6 硫代巴比妥酸反应物值(Thiobarbituric acid value, TBARS值)测定 参考Wang等^[16]的方法并做适当改动。具体方法如下:取一个50 mL离心管,称取样品2.00 g,加入3 mL 1% TBA溶液(5.00 g TBA与1.50 g氢氧化钠,蒸馏水定容至500 mL)和17 mL 2.5%三氯乙酸-盐酸溶液(12.50 g三氯乙酸与3 mL 0.6 mol/L盐酸,蒸馏水定容至500 mL),涡旋混匀后,沸水浴加热30 min,取出并迅速冷却至室温。吸取4 mL冷却后的上清液,加入4 mL三氯甲烷摇匀后,3000 r/min离心10 min,取上清液,于532 nm处测吸光值。4 mL蒸馏水与4 mL三氯甲烷混匀,3000 r/min离心10 min,得到的上清液为零样品。

TBARS 值计算公式如下:

$$\text{TBARS值(mg/kg)} = \frac{\text{OD}_{532\text{ nm}}}{m} \times 9.48$$

式中: $\text{OD}_{532\text{ nm}}$ 为样品在波长为 532 nm 的吸光度; m 为样品质量, g。

1.2.7 过氧化物值(Peroxide value, POV)测定 根据 Huang 等^[17]的方法略作修改。取 2.00 g 样品置于 50 mL 离心管,加入 15 mL 三氯甲烷:甲醇(2:1, v/v)混合液,高速均质(11000 r/min, 30 s)后,加入 3 mL 0.5% NaCl 溶液 3000 r/min 离心 10 min, 样品分成两相。取下面液相 5 mL 加入 5 mL 上述三氯甲烷:甲醇(2:1, v/v)混合液使最终体积达到 10 mL, 加入 25 μL 硫氰酸铵溶液(30%, w/v), 漩涡混合 3 s, 加入 25 μL Fe^{2+} 溶液(氯化亚铁溶液, 0.40 g BaCl_2 和 0.50 g FeSO_4 分别溶解在 50 mL 水中, 混合, 2000 r/min 离心 5 min)混合 3 s, 室温下反应 5 min, 然后在 500 nm 下测吸光度, 以还原铁粉做标准曲线, $y=0.2516x+0.0166$ ($R^2=0.9998$, $y=\text{OD}_{500\text{ nm}}$, $x=\text{POV}$ 值), POV 值计算公式如下, 结果表示为毫克当量每千克(meq/kg)。

$$\text{POV值(meq/kg)} = \frac{\text{OD}_{500\text{ nm}} - 0.0166}{0.2516}$$

式中: $\text{OD}_{500\text{ nm}}$ 为样品在波长为 500 nm 的吸光度。

1.3 数据处理

所有实验均重复三次, 实验数据以平均值 \pm 标准差表示, 采用 SPSS 25 软件对实验数据进行统计分析。电子鼻数据进行主成分分析, 其他数据采用单因素方差分析, 其中, 多重比较方法采用 LSD 法, $P<0.05$ 表示统计学显著差异, 绘图 Origin 2019b (Origin

Lab Corp. Ltd)软件和 MetaboAnalyst 5.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 四喜丸子软罐头加工过程中挥发性物质含量的变化

由表 2 可知, 通过顶空固相微萃取结合气质联用技术(Headspace solid-phase microextraction gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME/GC-MS)对四喜丸子软罐头加工过程中的 4 个关键工艺点的挥发性物质进行检测, 4 组样品(FM、FMB、SMB、HSSMB)中共鉴定出 56 种挥发性物质, 其中烃类 28 种、醛类 14 种、酯类 1 种、醇类 5 种、酮类 5 种、杂环化合物 5 种、酚类 1 种、其他物质 1 种, 有 37 种物质在 4 组中均有出现。4 组中挥发性物质种类数分别为 41、56、55、55 种, 总量分别为 1254.53、907.88、626.57 及 503.45 $\mu\text{g/kg}$ 。对比 4 个处理组数据, FMB 组中检测到的风味物质种类最多, 其次是 SMB 组和 HSSMB 组; FM 组中的风味物质总含量最高, 其次是 SMB 组; FMB 组挥发性物质总含量虽然较低, 但是种类数较多。挥发性物质构成上烃类物质在各组中所占比重较大, 其次主要是醇类、醛类等物质。采用变量投影重要性分析(variable importance in projection, VIP)法筛选潜在标记挥发性化合物, 以区分不同样品。VIP 值是根据偏最小二乘回归分析方法得到, 其反映的是每一个表达物对模型的贡献的程度, 当某物质的 $\text{VIP}>1$ 时, 可作为区分不同样品的潜在标记物^[18]。物质的 VIP 值越大, 物质的识别能力越强。变量投影重要性分析筛选的重要挥发性化合物汇总见图 1。其中, 4 种挥发性化合物可作为区分 4 个关键工艺点的标记物, 分别为肉

表 2 四喜丸子软罐头 4 个关键工艺点挥发性风味物质含量

Table 2 Identification and quantification of volatile compounds in four key process points in the processing of soft canned braised pork balls in gravy

化合物	CAS号	气味描述	含量($\mu\text{g/kg}$)			
			FM	FMB	SMB	HSSMB
烃类						
环辛四烯	629-20-9	DNC	n.d.	1.25 \pm 0.03 ^c	2.21 \pm 0.01 ^b	6.53 \pm 0.03 ^a
2-甲基-1-苯基丙烯	768-49-0	DNC	7.10 \pm 0.02 ^a	3.05 \pm 0.01 ^b	1.89 \pm 0.01 ^c	0.95 \pm 0.01 ^d
十三烷	629-50-5	DNC	n.d.	3.85 \pm 0.02 ^a	2.89 \pm 0.03 ^b	1.79 \pm 0.02 ^c
正十九烷	629-92-5	DNC	n.d.	0.93 \pm 0.01 ^b	1.14 \pm 0.01 ^a	0.58 \pm 0.01 ^c
P-伞花烃	99-87-6	DNC	n.d.	4.78 \pm 0.01 ^a	4.32 \pm 0.02 ^b	4.52 \pm 0.02 ^b
(-)- α -萜澄茄油烯	17699-14-8	草香、蜡香	90.15 \pm 0.06 ^a	72.06 \pm 0.05 ^b	59.49 \pm 0.09 ^c	47.20 \pm 0.04 ^d
(+)-苜蓿烯	3650-28-0	DNC	1.52 \pm 0.01 ^b	1.40 \pm 0.01 ^c	2.17 \pm 0.02 ^a	1.44 \pm 0.01 ^{bc}
3-萜烯	13466-78-9	甜的、柠檬、树脂香气	2.32 \pm 0.01 ^a	2.32 \pm 0.01 ^a	1.49 \pm 0.02 ^b	0.67 \pm 0.01 ^c
α -蒎烯	80-56-8	松木香、针叶香	3.31 \pm 0.03 ^a	2.55 \pm 0.02 ^c	2.82 \pm 0.02 ^b	1.98 \pm 0.01 ^d
愈创木烯	88-84-6	DNC	1.12 \pm 0.02 ^b	0.95 \pm 0.01 ^c	1.01 \pm 0.01 ^a	0.60 \pm 0.01 ^c
1-甲基-5-亚甲基-8-(1-甲基乙基)-1,6-环十二烯	37839-63-7	DNC	1.33 \pm 0.01 ^a	0.98 \pm 0.01 ^c	1.03 \pm 0.03 ^b	0.81 \pm 0.02 ^c
β -红没药烯	495-61-4	香油香	4.16 \pm 0.06 ^a	3.85 \pm 0.04 ^b	2.90 \pm 0.04 ^c	1.80 \pm 0.01 ^d
Δ -杜松烯	483-76-1	DNC	13.02 \pm 0.09 ^a	10.50 \pm 0.05 ^b	10.03 \pm 0.07 ^c	6.82 \pm 0.04 ^d
去氢白菖烯	483-77-2	草香	3.10 \pm 0.06 ^a	2.32 \pm 0.01 ^c	2.50 \pm 0.03 ^b	1.59 \pm 0.03 ^d
α -法呢烯	502-61-4	木香	1.44 \pm 0.01 ^a	1.37 \pm 0.01 ^b	0.92 \pm 0.03 ^c	0.56 \pm 0.02 ^d

续表 2

化合物	CAS号	气味描述	含量(μg/kg)			
			FM	FMB	SMB	HSSMB
月桂烯	123-35-3	甜、辛辣味、胡椒味	5.49±0.02 ^a	5.13±0.03 ^b	3.71±0.03 ^d	4.53±0.02 ^c
柠檬烯	138-86-3	柠檬、薄荷	11.34±0.09 ^a	11.23±0.07 ^b	9.49±0.04 ^d	9.96±0.05 ^c
γ-萜品烯	99-85-4	木头、金属	n.d.	1.27±0.02 ^c	2.23±0.02 ^b	3.93±0.05 ^a
姜烯	495-60-3	辛香、清新、刺激	1.80±0.05 ^c	2.33±0.04 ^a	2.18±0.02 ^b	1.68±0.03 ^d
γ-榄香烯	29873-99-2	草药、蜡、清新	2.37±0.03 ^a	1.98±0.01 ^b	n.d.	n.d.
β-石竹烯	87-44-5	辛香、木头	5.07±0.05 ^a	1.98±0.03 ^d	4.84±0.07 ^b	3.25±0.03 ^c
α-律草烯	6753-98-6	木头	n.d.	1.80±0.02 ^a	0.78±0.03 ^b	0.57±0.01 ^c
α-衣兰油烯	10208-80-7	木头	7.95±0.02 ^c	9.43±0.04 ^a	8.07±0.01 ^b	5.83±0.03 ^d
β-倍半水芹烯	20307-83-9	柠檬	2.15±0.03 ^a	1.48±0.01 ^c	1.76±0.03 ^b	1.01±0.02 ^d
α-姜黄烯	644-30-4	草药	n.d.	7.43±0.04 ^b	8.72±0.06 ^a	6.45±0.08 ^c
茴香脑	104-46-1	甜、清凉、茴香气味	269.85±0.02 ^b	335.60±0.01 ^a	227.28±0.03 ^c	195.58±0.01 ^d
萜品油烯	586-62-9	柑橘和柠檬香气	n.d.	n.d.	0.44±0.02 ^a	0.43±0.03 ^b
黄樟素	94-59-7	辛香、甜	0.15±0.01 ^b	0.20±0.01 ^a	0.13±0.01 ^c	0.03±0.01 ^d
醛类						
正己醛	66-25-1	脂肪、青草味	5.11±0.02 ^d	6.90±0.01 ^c	7.82±0.02 ^b	12.73±0.01 ^a
2-甲基-2-戊烯醛	14250-96-5	青草香	6.67±0.02 ^a	1.27±0.03 ^d	1.36±0.03 ^c	1.74±0.01 ^b
庚醛	111-71-7	强烈的油脂气味、酸败味	n.d.	0.76±0.03 ^c	1.06±0.01 ^b	4.19±0.02 ^a
(E,E)-2,4-壬二烯醛	5910-87-2	紫罗兰和黄瓜似香气	n.d.	2.53±0.01 ^a	1.66±0.03 ^b	0.44±0.01 ^c
正辛醛	124-13-0	脂肪、肥皂、柠檬、绿色	10.69±0.04 ^a	6.81±0.03 ^b	6.22±0.01 ^c	5.42±0.04 ^d
(E)-2-庚烯醛	18829-55-5	青草和奶油似香味	n.d.	n.d.	n.d.	1.78±0.03 ^a
壬醛	124-19-6	强烈的脂肪、花香、蜡香、柑橘香气	3.30±0.03 ^d	14.16±0.01 ^a	7.19±0.03 ^b	6.85±0.01 ^c
糠醛	98-01-1	焙烤香、甜味	n.d.	n.d.	2.40±0.03 ^b	6.43±0.04 ^a
苯甲醛	100-52-7	杏仁、果香、粉香、坚果、焦糖香气	123.80±0.02 ^a	64.52±0.03 ^b	28.39±0.01 ^c	14.72±0.02 ^d
苯乙醛	122-78-1	风信子香气、杏仁、樱桃香	4.11±0.03 ^a	3.06±0.04 ^b	0.93±0.01 ^c	n.d.
2-乙烯基-2-丁烯醛	20521-42-0	DNC	2.19±0.01 ^a	1.13±0.03 ^b	1.13±0.04 ^b	0.69±0.05 ^c
(E,E)-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	脂肪、肉香、油炸	n.d.	2.15±0.03 ^a	0.90±0.04 ^b	0.24±0.01 ^c
茴香醛	123-11-5	强烈的茴香香气	20.73±0.01 ^a	13.33±0.03 ^b	10.20±0.02 ^c	6.80±0.02 ^d
肉桂醛	104-55-2	肉桂味	305.12±0.01 ^a	42.81±0.03 ^b	25.85±0.02 ^c	3.67±0.02 ^d
酯类						
己酸甲酯	106-70-7	水果、清新、甜	5.35±0.02 ^a	3.62±0.01 ^b	n.d.	n.d.
醇类						
乙醇	64-17-5	甘甜、酒	150.69±0.02 ^a	120.04±0.03 ^b	68.43±0.01 ^c	49.38±0.03 ^d
桉叶油醇	470-82-6	樟脑样香气、清凉味	44.70±0.03 ^a	34.24±0.04 ^b	19.90±0.01 ^d	21.40±0.03 ^c
芳樟醇	78-70-6	花、橘子、蜡	39.97±0.01 ^a	25.78±0.03 ^b	18.80±0.01 ^c	11.97±0.03 ^d
4-萜烯醇	562-74-3	松节油、肉豆蔻	10.55±0.02 ^a	7.83±0.04 ^b	7.44±0.03 ^c	5.23±0.01 ^d
α-松油醇	10482-56-1	松油、茴香、薄荷	27.59±0.01 ^a	16.51±0.06 ^b	13.13±0.01 ^c	8.72±0.04 ^d
酮类						
6-甲基-5-庚烯-2-酮	110-93-0	辛辣的、水果香	n.d.	2.83±0.04 ^a	2.46±0.07 ^b	2.20±0.04 ^c
表姜烯酮	41702-63-0	DNC	3.57±0.03 ^a	2.62±0.04 ^b	2.46±0.03 ^c	2.02±0.03 ^d
苯乙酮	98-86-2	金合欢甜香、霉味、果香	1.45±0.02 ^a	1.13±0.03 ^c	1.35±0.03 ^b	1.06±0.02 ^d
胡椒酮	89-81-6	薄荷、樟脑气味	11.77±0.02 ^a	6.71±0.01 ^b	5.50±0.01 ^c	3.34±0.03 ^d
香豆素	91-64-5	奶香、豆香	1.21±0.05 ^a	0.62±0.01 ^b	n.d.	n.d.
杂环类						
2-正戊基呋喃	3777-69-3	豆香、果香、蔬菜香	n.d.	0.70±0.03 ^c	1.32±0.03 ^b	7.14±0.01 ^a
2,6-二甲基吡嗪	108-50-9	炒豆香	n.d.	3.22±0.03 ^a	1.63±0.02 ^b	1.18±0.01 ^c
2-乙基-5-甲基吡嗪	13360-64-0	水果、甜味	n.d.	2.13±0.02 ^a	0.71±0.02 ^b	0.47±0.01 ^c
2-乙基-3,6-二甲基吡嗪	13360-65-1	花生、坚果	n.d.	2.95±0.03 ^a	1.67±0.02 ^b	0.89±0.03 ^c
2-乙酰基噻唑	24295-03-2	烤坚果	0.10±0.01 ^d	1.41±0.05 ^b	4.55±0.07 ^a	0.66±0.02 ^c
酚类						
丁香酚	97-53-0	丁香、蜂蜜	17.94±0.02 ^a	9.66±0.03 ^b	6.93±0.02 ^c	4.27±0.03 ^d
其他						
二丙基二硫	629-19-6	洋葱、大蒜辣的刺激气味	23.18±0.01 ^a	14.43±0.03 ^b	8.74±0.02 ^c	6.73±0.03 ^d

注: 气味描述参考文献[32, 37]和数据库: <http://www.flavornet.org> 和 <http://www.odour.org.uk>; 同行中不同小写字母表示样品差异显著($P<0.05$); n.d.: 未检出; DNC: do not certain, 未确定。

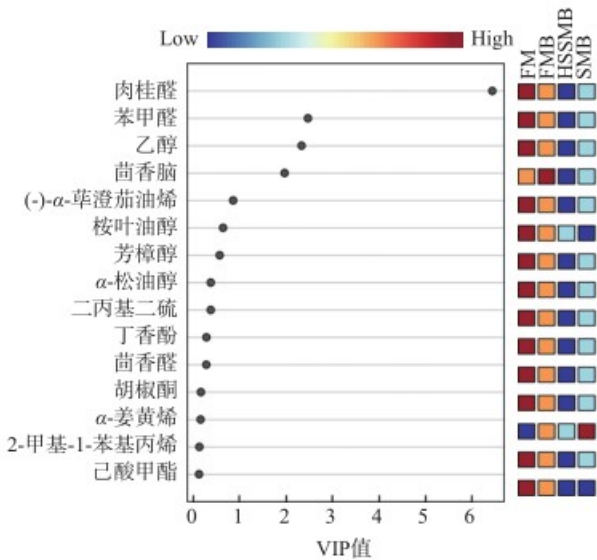


图 1 四喜丸子软罐头的 4 个关键工艺点重要挥发性化合物的变量投影重要性分析

Fig.1 Important volatile compounds in four key process points in the processing of soft canned braised pork balls in gravy identified by variable importance in projection

桂醛、苯甲醛、乙醇、茴香脑,这四种挥发性化合物均来自外源添加的香辛料等物质。

烃类物质在各组样品中均具有较高的含量,它主要来源于脂肪酸烷氧自由基的均裂^[19]。4 个处理组中共检测到 27 种烃类物质,饱和烃类占 2 种,其余均为不饱和烃类,3 个热处理组的烃类物质总含量存在较大差异。由于烃类物质具有较高的阈值,一般认为对四喜丸子的香气无特殊贡献,但有些烃类可能是形成杂环化合物的重要中间体,有助于提高四喜丸子的整体风味质量^[20-21]。除 FM 组外,后 3 组中烃类物质总含量逐渐降低,这可能是由于 FMB 是经过热处理的第一个步骤,油炸带来的高温(180 °C)使脂肪发生了初步的降解,烃类物质含量增加,在 SMB 经过 40 min 的热处理烃类物质含量降低可能是由于高温促进其挥发,最后 HSSMB 组样品经过长时间(30 min)的高温高压蒸汽灭菌处理(121 °C)可能加剧了脂肪的均裂^[22]。

醛类物质多带有坚果味和脂肪味,对肉类食品风味的贡献较大,主要是由于具有较高的含量和较低的嗅觉阈值,具有脂肪香味,是肉品香味的主要构成部分^[20,23-24]。四喜丸子软罐头制作过程中检出醛类物质:正己醛、壬醛、庚醛、糠醛、2-甲基-2-戊烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、正辛醛、(E)-2-庚烯醛、苯甲醛、苯乙醛、2-乙基-2-丁烯醛、对甲氧基苯甲醛、茴香醛、肉桂醛共 14 种,其中辛醛、壬醛主要来自油酸氧化,具有油脂香气,此外姜中也含有较多的辛醛^[25-26];己醛主要来源于 ω-6 不饱和脂肪酸的氧化,低浓度下具有青草香气,高浓度则会产生不良气味^[7]; (E,E)-2,4-壬二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛是亚油酸的氧化裂解产物^[27-28],

推测油酸和亚油酸作为多不饱和脂肪酸,其氧化对四喜丸子高压蒸汽灭菌过程中 WOF 异味关键气味因子的产生发挥主要作用。另外,肉桂粉是肉桂醛和苯甲醛的主要来源,且苯甲醛、苯乙醛是苯丙氨酸相关代谢的产物^[23];糠醛可能来源于糖类在高温条件下发生焦糖化反应^[29],另外八角粉也是糠醛的来源之一^[30],具有焙烤香、苦杏仁气味,呈黄棕色,可能对四喜丸子的色泽有贡献^[31-32];对甲氧基苯甲醛可能是由于茴香脑氧化产生的。不饱和醛大多具有愉快的香气且阈值较低。随着热处理的进行,样品中醛类总含量逐渐降低,但是正己醛、壬醛、糠醛含量逐渐升高($P < 0.05$),主要是由于热处理促进了脂肪的氧化,促进了四喜丸子整体风味的形成^[33-34]。HSSMB 组产生 WOF 异味,虽然醛类总含量最低,但是正己醛、壬醛、糠醛含量较高,并且经过杀菌之后,己醛的含量显著提高,导致这一现象的原因可能是由于高压蒸汽灭菌这种长时间高温处理加剧了脂肪的氧化,前人研究也有发现,高温煮制过程会导致醛类,尤其是己醛含量的升高^[35-36],醛类浓度过高时会产生异味,据此推断正己醛是呈现 WOF 异味的主要物质^[10,33]。

不饱和脂肪酸氧化裂解过程除产生醛类物质外,还伴随着醇类物质的产生^[10]。醇类物质主要来源于脂肪氧化和 Strecker 降解反应,饱和脂肪醇的阈值较高,对整体风味贡献相对较小,而不饱和醇的阈值较低,对风味有一定贡献^[37-38]。样品中检出的醇类物质主要有乙醇桉叶油醇、芳樟醇、4-萜烯醇、α-松油醇,由于并无文献显示肉类加热能够产生大量乙醇,所以样品中的乙醇应当主要来源于料酒;桉叶油醇和芳樟醇是肉桂、八角等香料中常见的风味物质,对于肉类菜肴风味贡献较大^[39]。

相关研究表明杂环类物质主要来源于美拉德反应,在肉制品中较为常见且贡献明显,主要是提供烤香味^[40]。呋喃类化合物主要来源于美拉德反应以及氨基酸、硫胺素的热降解反应,虽含量较少,但阈值较低,对风味具有较大影响^[41-42]。2-正戊基呋喃是亚油酸的氧化裂解产物,具有豆香、果香、青香及类似蔬菜的香韵^[27,43];高温高压蒸汽灭菌后,产品中呋喃物质略有升高。吡嗪类化合物多是焙烤味、爆米花味或花生酱味^[44]。

酯类物质常具有水果的清甜香气,主要来源于加热过程中猪肉脂质氧化产生的醇与游离脂肪酸的相互作用,为肉带来特征香气^[30,45-46],但由表 3 可知,酯类在样品中种类较少且相对含量低,且因酯类物质的阈值较高,对风味的影响较小^[47],因此对四喜丸子整体风味贡献不突出。

酮类化合物主要来自于脂肪或醇类的氧化降解和美拉德反应,因其阈值远高于醛类,一般认为对风味影响不大,主要对其他风味物质起辅助作用,使肉制品香味更加饱满、更具有层次感^[43,48-50]。6-甲基-5-庚烯-2-酮具有水果香气,香豆素具有奶香、豆香,

表3 四喜丸子软罐头4个关键工艺点挥发性风味物质 OAV

Table 3 OAVs of volatile compounds in four key process points in the processing of soft canned braised pork balls in gravy

化合物	OAV				嗅觉阈值 (μg/kg)
	FM	FMB	SMB	HSSMB	
正己醛	15.97	21.56	24.44	39.78	0.32
庚醛	-	3.04	4.24	16.76	0.25
正辛醛	18.21	11.60	10.60	9.23	0.59
壬醛	3.00	12.87	6.54	6.23	1.10
(E,E)-2,4-癸二烯醛	-	27.92	11.69	3.12	0.08
(E,E)-2,4-壬二烯醛	-	25.30	16.60	4.40	0.10
芳樟醇	6.66	4.30	3.13	2.00	6.00
α-松油醇	6.00	3.59	2.85	1.90	4.60
丁香酚	25.27	13.61	9.76	6.01	0.71

注: 仅列出OAV>1的挥发性风味物质; 嗅觉阈值参考文献[13,51]和数据库: <http://www.odour.org.uk>。

酮类总含量随着加工不断进行逐渐降低^[47]。另外, 大葱可能是二丙基二硫的主要来源^[13]。

2.2 四喜丸子软罐头加工过程中挥发性物质 OAV 分析

OAV 是风味物质浓度与其阈值的比值, 多用来评价挥发性化合物对样品总体风味的贡献^[13]。OAV>1, 说明该物质可能对总体风味有直接影响, 且在一定范围内, OAV 越大, 说明该物质对总体风味贡献越大^[13]。由表3可以看出, FM 组样品中对其风味贡献较大的物质有丁香酚、正辛醛、正己醛, 此时的风味主要来自于原料肉和制馅时添加的香辛料; FMB 组样品中对其风味贡献较大的物质有(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、丁香酚、正己醛、壬醛、正辛醛, 这可能是由于油炸阶段的高温加剧了脂肪和蛋白质氧化进程, 产生一些醛酮类物质; SMB 样品中对风味贡献较大的物质有正己醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛和正辛醛, 可能是由于长时间蒸制, 部分挥发性物质受热分解,

致使产品中风味物质的种类减少^[50]; HSSMB 样品中, 正己醛和庚醛的 OAV 值较高, 基本在 10 以上, 对该组样品的风味贡献较大。庚醛呈现脂肪、酸败味, 正己醛低浓度时呈脂肪、青草味, 而在高浓度时呈现酸败味和辛辣味, 在四喜丸子加工过程中, 这两种物质含量逐步升高, 且在高温高压蒸汽灭菌处理后达到顶点, 推测正己醛和庚醛两种物质高浓度的积累促使 HSSMB 组样品呈现显著的高温蒸煮异味。正己醛在 HSSMB 组中 OAV 最高, 推测其对高压蒸汽灭菌的四喜丸子软罐头异味贡献最大。

对表3中4个关键工艺点取样的处理组 OAV 进行主成分分析, 得到四喜丸子软罐头的4个关键工艺点 WOF 异味主成分载荷图。由图2可知, PC1 和 PC2 方差贡献率分别为 63.5% 和 33.6%, 累计方差贡献率为 97.1%(>85%), 这表明 PC1 和 PC2 反映了样品的大部分总体特征, 在 PC1 和 PC2 构建的平面上区分度较好。可以看出, 样品 FM 分布在 PC1 的正轴, 其余 3 组样品分布在 PC1 的负轴, 这说明分布在正负两轴的样品气味相差较大; HSSMB 组样品远离 FM、FMB 和 SMB 组的样品聚集, 并与负 PC1 轴上的正己醛和庚醛相关, 即两种挥发性化合物丰度最高。这表明高压蒸汽灭菌样品与其他三组风味差异最为显著, 油炸样品与蒸制样品风味最为接近, 该结果与 GC-MS 分析结果一致。

2.3 不同加工过程的四喜丸子软罐头 WOF 气味评价结果分析

如图3所示, 四喜丸子软罐头主要表现为亚麻籽油味和高温蒸煮味, 略带有炸香和肉香。随着热加工的不断进行, 四喜丸子的高温蒸煮味和亚麻籽油味强度提升, 差异显著($P<0.05$); 炸香味在 FMB 样品中最强, 而后逐渐变弱。在三个热加工进程中, 脂肪香味感知度较弱; 肉香味强度逐渐减弱($P<0.05$)。蒸制后的四喜丸子各项得分均衡, 风味较好, 经高压蒸汽灭菌处理的四喜丸子软罐头表现出的异味以高温蒸煮味和亚麻籽油味为主。

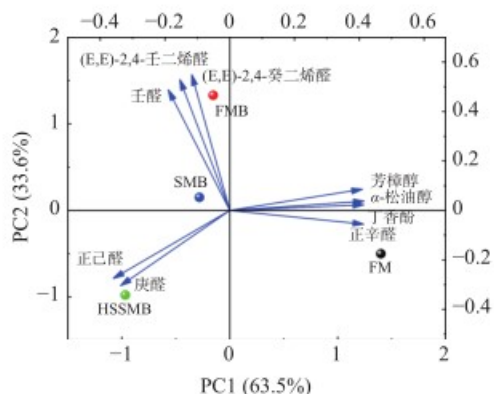


图2 四喜丸子软罐头的4个关键工艺点主要挥发性化合物主成分载荷图

Fig.2 Biplot of principal component analysis (PCA) for the key volatile compound in four key process points in the processing of soft canned braised pork balls in gravy

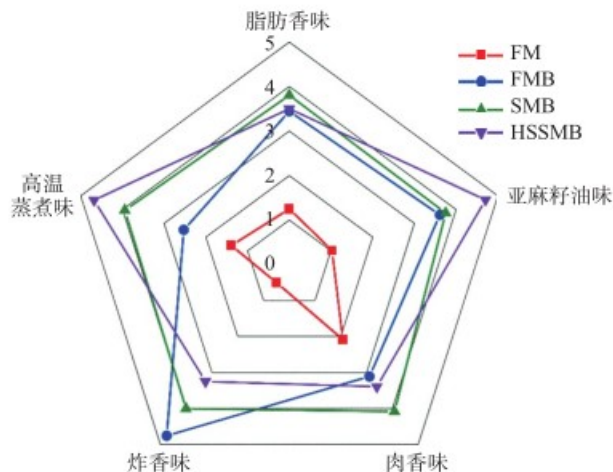


图3 四喜丸子软罐头加工过程中挥发性风味感官剖面图

Fig.3 Sensory profile of volatile flavor in the processing of soft canned braised pork balls in gravy

2.4 四喜丸子软罐头加工过程中气味轮廓的变化

电子鼻是一种仿生的嗅觉分析技术, 主要检测气味物质属性及其变化, 可以快速以及灵敏地实现对样品中挥发性气味信息进行全面评估^[52-54]。由图 4(A)可知, FM 与其他样品距离最远, 这是由于产品后需经过油炸、蒸制、灭菌等加热处理, 产生了各种风味物质; FMB 与 SMB 的 10 个传感器的响应值均无显著性差异 ($P>0.05$), 两组样品风味轮廓接近; HSSMB 与其他样品距离较远, 整体风味这可能是由于高温使一些挥发性风味物质分解, 以及脂质、蛋白质水解产物发生美拉德反应及 Strecker 降解而产生新的风味物质造成的^[12]。由图 4(B)可知, 第一主成分 (PC1) 和第二主成分 (PC2) 方差贡献率分别为 62.5% 和 35.5%, 累计方差贡献率为 98.0% ($>85\%$), 这表明 PC1 和 PC2 能够较好地反映样品的总体特征; 不同加工阶段的四喜丸子软罐头样品在得分图中清楚地分开, FM 组和 HSSMB 组分布在 PC1 的正轴, 两组风味物质相似, 气味轮廓较接近, 其余两个处理组分布在 PC1 的负轴, 这说明分布在正负两轴的样品气味相差较大。

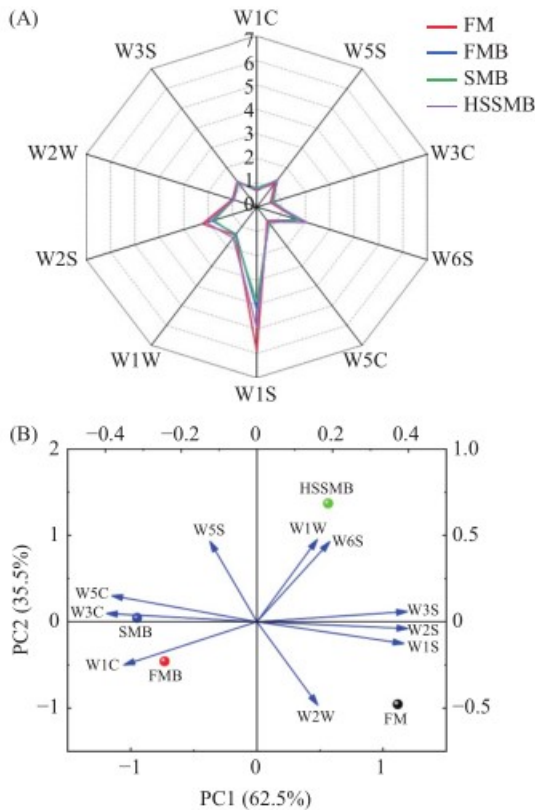


图 4 四喜丸子软罐头的 4 个关键工艺点电子鼻数据的雷达图(A)和主成分分析(B)
Fig.4 Radar chart (A) and principal component analysis (B) of the electronic nose data for four groups of samples key process points in the processing of soft canned braised pork balls in gravy

2.5 四喜丸子软罐头加工过程中 TBARS 值和 POV 值的变化

脂质氧化是降低肉制品整体可接受度的主要因

素之一^[55], WOF 异味的发展是一个主要由氧化事件级联引起的风味变化的动态过程, 本部分以四个关键工艺点作为研究对象, 探究加工进程中挥发性风味物质变化与脂质氧化程度的关系。脂质容易发生氧化而引起食品变质, 同时产生哈味, 对产品品质产生恶劣影响, 其氧化分为三个阶段: 引发阶段、增殖阶段和终止阶段^[56]。过氧化物是油脂氧化酸败的初始产物, 因此, 常以过氧化物在油脂中的产生作为油脂氧化酸败的开始, 其含量通过 POV 值反映。但过氧化物很容易分解, 产生醛、酮等小分子有害化合物^[57]。脂质次级氧化产物大多是一些醛类物质, 其中丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 是脂质次级氧化的主要产物, TBARS 值可以反映脂肪氧化次级产物含量^[55-56]。

如图 5 所示, 随着加工不断进行, 样品的 POV 值逐渐降低, 差异显著 ($P<0.05$), 可能是生成过氧化物的速度小于其分解的速度, 提升了脂质二级氧化速率, 导致 POV 值下降^[57], 过氧化物是由多不饱和脂肪酸与氧之间的自由基链机制形成的, 这种氧化会进一步形成醛类、内酯类、烃类、呋喃类和酮类等产物, 浓度过高时会产生异味^[58], 这样的变化趋势与挥发性风味物质 OAV 分析结果基本一致。而整个加工过程中样品的 TBARS 值变化呈先降低后升高趋势, 在热加工过程中 (FMB、SMB 和 HSSMB), 由于氢过氧化物极不稳定, 且随着过氧化物的分解速度的升高, 容易进一步反应形成次级代谢产物, 次级氧化产物含量不断积累, 致使 TBARS 值逐渐增高 ($P<0.05$)。TBARS 作为衡量脂肪氧化程度的指标, 也被用来判断 WOF 异味的产生程度^[13]。高压蒸汽灭菌处理组较高的 TBARS 值和 WOF 关键异味物质较高的含量、感官评价较高的亚麻籽油味评分相呼应。未经热处理的 FM 组样品的 TBARS 值却比 FMB 和 SMB 组的 TBARS 值高, 这可能是由于生肉馅中存在着大量的铁离子和蔗糖, 蔗糖作为可溶性糖, 可与 TBA 试剂发生反应, 产物在 532 nm 处也有吸收, 有研究表明, 铁离子的存在可显著增加上述反应产物在 532 nm 处的吸光度, 进而使 TBARS 值增加^[59], 导致四喜丸子软罐头在加工过程中 TBARS 值

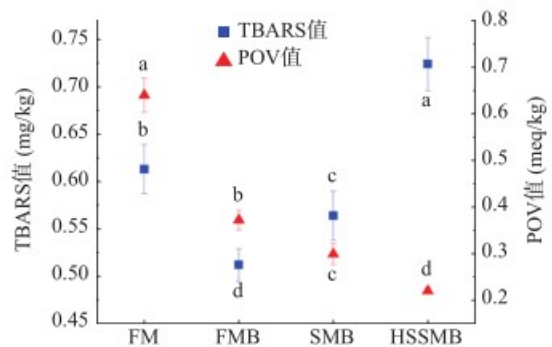


图 5 四喜丸子软罐头 4 个关键工艺点 TBARS 值和 POV 值的变化

Fig.5 TBARS value and POV value of four key process points in the processing of soft canned braised pork balls in gravy

呈现先降低后升高的变化趋势。因此,结合感官评价和电子鼻分析结果、WOF 关键异味物质含量、OAV 与 TBARS 值推测高压蒸汽灭菌促使四喜丸子软罐头产生高温蒸煮异味。

3 结论

正己醛、庚醛和正辛醛是呈现四喜丸子软罐头 WOF 异味的主要物质,高压蒸汽灭菌后样品中的正己醛和庚醛含量最高($P<0.05$)。蒸制后的四喜丸子整体香气轮廓较好,脂质氧化程度低,高压蒸汽灭菌处理促进脂质的氧化降解,致使产品产生较重异味,香气损失严重,高压蒸汽灭菌处理诱使四喜丸子软罐头产生 WOF 异味。日后若针对高压蒸汽灭菌过程加以优化,在保证杀菌强度的前提下,控制脂质氧化程度,减少产品异味产生,将会大大提高工业化中式菜肴制品在方便食品中的竞争优势。可采取的措施有:添加金属螯合剂(柠檬酸、亚硝酸盐、EDTA 等)抑制金属离子催化脂质氧化、采用栅栏技术(添加复合防腐剂、接入竞争性菌群等措施)降低杀菌温度、添加抗氧化剂(BHA、BHT、TBHQ 等)抑制脂质氧化、加入肉味香精提升产品肉香味以掩盖不良风味等。

参考文献

- [1] 王卫,张佳敏,赵志平,等.川菜肉类菜肴工业化及其关键技术[J].肉类研究,2020,34(5):98-103. [WANG W, ZHANG J M, ZHAO Z P, et al. Recent progress in industrialization of Sichuan-style meat dishes and related key technologies[J]. Meat Research, 2020, 34(5): 98-103.]
- [2] 张韵,李葱葱,周圣弘.食用菌作为预制即热菜肴的应用前景及途径[J].食品安全导刊,2021(34):138-140. [ZHANG Y, LI H H, ZHOU S H. Application prospect and realization of edible fungi as ready-to-heat cuisine[J]. China Food Safety Magazine, 2021(34): 138-140.]
- [3] 蔡悦.浅谈我国餐饮产业链中央厨房中预制菜的发展趋势[J].食品安全导刊,2021(23):187-188. [CAI T. Development trend of prepared vegetables in central kitchen of China's catering industry chain[J]. China Food Safety Magazine, 2021(23): 187-188.]
- [4] 罗霜霜,康建平,张星灿,等.方便米饭品质改良研究进展[J].粮油食品科技,2020,28(3):78-84. [LUO S S, KANG J P, ZHANG X C, et al. Research progress on quality improvement of instant rice[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(3): 78-84.]
- [5] 孙亚男.扬州狮子头菜肴的中央厨房加工机理及品质调控研究[D].无锡:江南大学,2021. [SUN Y N. Study on processing mechanism and quality control of Yangzhou pork meat patties prepared dishes in central kitchen[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]
- [6] 齐慧林.护色剂对调味鱼杀菌及储藏过程中颜色品质的影响研究[D].无锡:江南大学,2020. [QI H L. Study on the effect of color protectant on the color property of seasoned fish during sterilization and storage [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]
- [7] MAJUMDAR R K, ROY D, SAHA A. Textural and sensory characteristics of retort-processed freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*) in curry medium[J]. International Journal of Food Properties, 2016, 20(11): 2487-2498.
- [8] PEGG R B, KERRIHARD A L, SHAHIDI F. Cooking of meat [warmed-over flavor][J]. Encyclopedia of Meat Sciences, 2014, 410-415.
- [9] 何苗,陈洁,曾茂茂,等.高温杀菌对福建风味鸭风味的影响[J].食品与机械,2014,30(3):29-34. [HE M, CHN J, ZENG M M, et al. Effects of high temperature sterilization on volatiles in Fujian flavor duck[J]. Food & Machinery, 2014, 30(3): 29-34.]
- [10] 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 Z Q, ZANG M W, ZHANG K H, 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.]
- [11] 袁先铃,彭先杰,陈崇艳,等.高压蒸汽灭菌时间对冷吃兔风味物质的影响[J].现代食品科技,2022,38(3):257-265. [YUAN X L, PENG X J, CHEN C Y, et al. Effect of the time of high pressure steam sterilization on the changes of flavor substance in cold-eating rabbits[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(3): 257-265.]
- [12] 吴倩蓉,潘晓倩,朱宁,等.杀菌温度对羊蝎子风味物质的影响[J].食品科学,2020,41(20):184-190. [WU Q R, PAN X Q, ZHU N, et al. Effect of sterilization temperature on flavor compounds in spiced lamb spine[J]. Food Science, 2020, 41(20): 184-190.]
- [13] 刘兵,常远,王瑞芳,等.葱属植物中挥发性风味物质研究进展[J].食品科学,2022,43(3):249-257. [LIU B, CHANG Y, WANG R F, et al. Recent progress in research on volatile flavor compounds in Allium[J]. Food Science, 2022, 43(3): 249-257.]
- [14] WEN R X, HU Y Y, ZHANG L, et al. Effect of NaCl substitutes on lipid and protein oxidation and flavor development of Harbin dry sausage[J]. Meat Science, 2019, 156(OCT.): 33-43.
- [15] WU H, YUE T L, XU Z, et al. Sensor array optimization and discrimination of apple juices according to variety by an electronic nose[J]. Analytical Methods, 2017, 9(6): 921-928.
- [16] WANG L L, XIONG Y L. Inhibition of lipid oxidation in cooked beef patties by hydrolyzed potato protein is related to its reducing and radical scavenging ability[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53: 9186-9192.
- [17] HUANG L, XIONG Y L, KONG B H, et al. Influence of storage temperature and duration on lipid and protein oxidation and flavour changes in frozen pork dumpling filler[J]. Meat Science, 2013, 95(2): 295-301.
- [18] LI C, LI X F, HUANG Q L, et al. Changes in the phospholipid molecular species in water-boiled salted duck during processing based on shotgun lipidomics[J]. Food Research International, 2020, 132: 109064.
- [19] FU L, DU L H, SUN Y Y, et al. Effect of lentinan on lipid oxidation and quality change in goose meatballs during cold storage[J]. Foods, 2022, 11(7): 1055.
- [20] 常思鑫,惠腾,刘毅,等.杀菌和复热工艺对黄焖鸡挥发性风味物质的影响[J].肉类研究,2018,32(4):20-26. [CHANG S G, HUI T, LIU Y, et al. Effect of pasteurization and reheating on the volatile compounds of braised chicken product[J]. Meat Research, 2018, 32(4): 20-26.]
- [21] YIN X Y, WEN R X, SUN F D, et al. Collaborative analysis on differences in volatile compounds of Harbin red sausages smoked with different types of woodchips based on gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose[J]. LWT, 2021, 143: 111144.
- [22] 李素,周慧敏,赵冰,等.卤汤牛肉贮藏过程中挥发性风味物

- 质分析[J]. 食品科学, 2020, 41(18): 203-209. [LI S, ZHOU H M, ZHAO B, et al. Analysis of volatile flavor compounds in stewed beef with broth during storage[J]. Food Science, 2020, 41(18): 203-209.]
- [23] 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. [LI J, HAN D, MI S, et al. Optimization of the extraction conditions of volatile flavors in marinated beef based on HS-SPME-GC-MS technique[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(15): 266-273.]
- [24] ZHANG Z Q, ZANG M W, ZHANG K H, et al. Changes in volatile profiles of a refrigerated-reheated xylose-cysteine-lecithin reaction model analyzed by GC×GC-MS and E-nose[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(3): 1069-1081.
- [25] ZHANG K H, LI D, ZANG M W, et al. Comparative characterization of fatty acids, reheating volatile compounds, and warmed-over flavor (WOF) of Chinese indigenous pork and hybrid pork[J]. LWT, 2022, 155: 112981.
- [26] 鹿浩志, 刘敏轩, 田亚亚, 等. 生姜精油的提取及 GC-MS 分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 208-213, 226. [LU H Z, LIU M X, TIAN Y Y, et al. Extraction and GC-MS analysis of ginger essential oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(14): 208-213, 226.]
- [27] KIM S, LI J L, LIM N R, et al. Prediction of warmed-over flavor development in cooked chicken by colorimetric sensor array[J]. Food Chemistry, 2016, 211: 440-447.
- [28] 冯润芳, 孟风华, 安晓雯, 等. 小尾寒羊不同部位挥发性风味物质和脂肪酸分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(21): 285-293. [FENG R F, MENG F H, AN X W, et al. Analysis of volatile flavor substances and fatty acids in different parts of small-tailed han lambs[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(21): 285-293.]
- [29] 贾丽娜, 焦爱权, 赵建伟, 等. 回锅肉加工及冻藏过程中风味物质的变化[J]. 食品与生物技术学报, 2015, 34(12): 1269-1277. [JIA L N, JIAO A Q, ZHAO J W, et al. Study on the changes of volatile flavor components in double-fried pork during the processing and frozen storage[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2015, 34(12): 1269-1277.]
- [30] 尹含靓, 肖何, 邓高文, 等. 基于 GC-IMS 技术分析不同香辛料水煎液的风味物质组成差异[J]. 食品工业科技, 2021, 42(17): 278-284. [YIN H L, XIAO H, DENG G W, et al. Based on GC-IMS technology to analyze the difference in flavor composition of different spice boiling liquids[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(17): 278-284.]
- [31] 史笑娜, 黄峰, 张良, 等. 红烧肉加工过程中脂肪降解、氧化和挥发性风味物质的变化研究[J]. 现代食品科技, 2017, 33(3): 257-265. [SHI X N, HUANG F, ZHANG L, et al. Changes in lipolysis, lipid oxidation, and volatile flavor compounds during the processing of red braised pork[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(3): 257-265.]
- [32] ZHANG J, ZHANG W G, ZHOU L, et al. Study on the influences of ultrasound on the flavor profile of unsmoked bacon and its underlying metabolic mechanism by using HS-GC-IMS[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 80: 105807.
- [33] 张森, 刘国群, 贾洪锋, 等. 不同热加工方式芝麻酱风味物质的差异[J]. 食品工业科技, 2018, 39(10): 262-266, 271. [ZHANG M, LIU G Q, JIA H F, et al. Effect of different processing methods on sesame flavor[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(10): 262-266, 271.]
- [34] CANAN C, KALSCHNE D L, ONGARATTO G C, et al. Antioxidant effect of rice bran purified phytic acid on mechanically deboned chicken meat[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(9): e15716.
- [35] 白婷, 管博文, 汪正熙, 等. 回锅肉不同加工阶段的风味特征分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(8): 244-257. [BAI T, ZAN B W, WANG Z X, et al. Flavor components in different processing stages of twice-cooked pork[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 244-257.]
- [36] 孙承锋, 喻倩倩, 朱亮, 等. 二次热杀菌对烧肉挥发性风味物质的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(11): 105-111. [SUN C F, YU Q Q, ZHU L, et al. Effect of secondary heat sterilization on volatile flavor compounds in stewed pork[J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(11): 105-111.]
- [37] 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 D Y, ZHAO Z N, WU J C, et al. Effects of different smoking materials on volatile flavor compounds in smoked chicken thighs[J]. Food Science, 2019, 40(24): 220-227.]
- [38] ZHANG L, HU Y Y, WANG Y, et al. Evaluation of the flavour properties of cooked chicken drumsticks as affected by sugar smoking times using an electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME/GC-MS[J]. LWT, 2021, 140: 110764.
- [39] 王泽亮, 张敏, 邱道富, 等. 不同产地肉桂的挥发性成分差异分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(4): 201-207. [WANG Z L, ZHANG M, QIU D F, et al. Difference analysis of volatile components in cinnamon from different producing areas[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(4): 201-207.]
- [40] SONG S Q, TANG Q, FAN L, et al. Identification of pork flavour precursors from enzyme treated lard using Maillard model system assessed by GC-MS and partial least squares regression[J]. Meat Science, 2017, 124(124): 15-24.
- [41] XU Y J, ZHANG D Q, CHEN R X, et al. Comprehensive evaluation of flavor in charcoal and electric-roasted tamarix lamb by HS-SPME/GC-MS combined with electronic tongue and electronic nose[J]. Foods, 2021, 10(11): 2676.
- [42] 于跃, 袁玉梅, 彭先杰, 等. 高温肉制品风味物质的形成机理及其影响因素[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(3): 210-216. [YU Y, YUAN Y M, PENG X J, et al. Formation mechanism and influencing factors of flavor substances in high-temperature meat products[J]. Storage and Process, 2020, 20(3): 210-216.]
- [43] 孟凡冰, 刘达玉, 向茂德, 等. 不同卤制方法对白鹅腿肉品质及挥发性风味成分的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(5): 272-279. [MENG F B, LIU D Y, XIANG M D, et al. Effects of different bitter process on volatile flavor compounds of white goose thigh[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(5): 272-279.]
- [44] 刘玉兰, 舒焱, 孙国昊, 等. 花生品种对花生酱风味及综合品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 15-21. [LIU Y L, SHU Y, SUN G H, et al. Effects of different varieties of peanuts on the flavor and quality of peanut butter[J]. Food Science, 2021, 42(9): 15-21.]
- [45] 张哲奇, 臧明伍, 张凯华, 等. 关键工艺对粉蒸肉挥发性特征风味形成的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 222-228. [ZHANG Z Q, ZANG M W, ZHANG K H, et al. Effect of key processing steps on formation of volatile flavor components in steamed pork with rice[J]. Food Science, 2019, 40(4): 222-228.]
- [46] BI J C, LI Y, YANG Z, et al. Effect of different cooking times on the fat flavor compounds of pork belly[J]. Journal of Food

Biochemistry, 2022: e14184.

[47] 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 W Z, YAN S Y, XU Y, 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.]

[48] 陈君玉, 孙渊, 饶雷, 等. 基于不同杀菌方式的红烧肉内脂质和挥发性成分的差异分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 345-353. [CHEN J Y, SUN Y, RAO L, et al. Comparison of lipids and volatile flavor components in Chinese braised pork in brown sauce with different sterilization methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(14): 345-353.]

[49] 张凯华, 臧明伍, 张哲奇, 等. 不同复热方式对猪耳朵制品挥发性风味和脂肪氧化的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(14): 242-248. [ZHANG K H, ZANG M W, ZHANG Z Q, et al. Effect of reheating methods on volatile flavor constituents and lipid oxidation in cooked pig ear[J]. Food Science, 2018, 39(14): 242-248.]

[50] 浦馨源, 周辉, 王兆明, 等. 不同加工阶段对符离集烧鸡风味影响研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 89-98. [PU X Y, ZHOU H, WANG Z M, et al. Research on the effect of different processing stages on the flavor of Fuliji red-cooked chicken[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 89-98.]

[51] 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 原书第二版. 科学出版社, 2015: 242-432. [LEO VAN HEMERT. Compilation of Aroma Threshold for Compounds [M]. The second edition of the original book section. Academic Press, 2015: 242-432.]

[52] 赵宏蕾, 辛莹, 刘美月, 等. 柠檬酸钠协同碳酸氢钠替代磷酸盐对法兰克福香肠品质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 94-103. [ZHAO H L, XIN Y, LIU M Y, et al. Effect of sodium citrate combined with sodium hydrogen carbonate on the quality of phosphate-free frankfurters[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 94-103.]

[53] ESTEVEZ M, KYLLI P, PUOLANNE E, et al. Fluorescence spectroscopy as a novel approach for the assessment of myofibrillar protein oxidation in oil-in-water emulsions[J]. Meat Science, 2008, 80(4): 1290-1296.

[54] 裴正钰, 张香美, 卢涵, 等. 风味分析技术在发酵肉制品中的应用研究进展[J]. 食品科技, 2021, 46(2): 91-96. [PEI Z Y, ZHANG X M, LU H, et al. Application of flavor analysis technology in fermented meat products[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(2): 91-96.]

[55] 鞠健, 胡佳慧, 乔宇, 等. 茶多酚结合真空包装对微冻鲈鱼片品质的影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(1): 104-110. [JU J, HU J H, QIAO Y, et al. Effects of tea polyphenols combined with vacuum packaging on the quality of micro-freezing weever fillets[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(1): 104-110.]

[56] 王耀松, 张唯唯, 马天怡, 等. 丙二醛氧化对核桃分离蛋白结构及乳化性的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(16): 3372-3384. [WANG Y S, ZHANG W W, MA T Y, et al. Influence of oxidative modification by malondialdehyde on structure and emulsifying properties of walnut protein[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(16): 3372-3384.]

[57] 王婵, 贺习耀, 裴亚琼. 外源添加物对贮藏的肉糜制品中TBARS值的影响研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(22): 213-218. [WANG C, HE X Y, PEI Y Q. Effect of exogenous additives on TBARS of stored meat surimi products[J]. Food Research and Development, 2020, 41(22): 213-218.]

[58] CALKINS C R, HODGEN J M. A fresh look at meat flavor[J]. Meat Science, 2007, 77(1): 63-8053.

[59] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994(3): 207-210. [ZHAO S J, XU C C, ZOU Q, et al. Improvements of method for measurement of malondialdehyde in plant tissues[J]. Plant Physiology Journal, 1994(3): 207-210.]