

不同热杀菌条件下潮汕牛肉丸质构和挥发性风味化合物的变化

张德润¹, 李汴生^{1,2*}, 阮征^{1,2}, 杨晓¹, 李丹丹¹, 陈家文³, 陈海山³, 周海燕³

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (2. 广东省天然产物绿色加工与产品安全重点实验室, 广东广州 510640) (3. 广州卓诚食品科技有限公司, 广东广州 511447)

摘要: 该研究探讨了在相同冷点 F_0 值前提下, 不同杀菌工艺温度-时间组合对潮汕牛肉丸口感及风味变化的影响。牛肉丸样品采用直接蒸汽杀菌并无菌封装的形式, 控制杀菌值 F_0 相近 (约为 4.0 min), 不同杀菌温度-时间组合 (110 °C 36 min, 115 °C 13.26 min, 120 °C 6.5 min, 125 °C 4.5 min, 130 °C 3.33 min) 的杀菌条件对牛肉丸质构和风味的影响。结果显示, 在 F_0 值相近时, 不同热杀菌条件对牛肉丸的质构和风味均有显著影响, 120 °C 6.5 min 杀菌可以得到最令人接受的气味并减少 40.65% 的刺激性气味物质含量, 125 °C 4.5 min 杀菌可以得到最佳的口感并达到原料 98.84% 的硬度, 同时气味感官得分较高, 二烯丙基二硫醚等刺激性气味物质含量较少。硫醚类物质在肉丸的挥发性物质中占比 55.18%~68.76%, 但通过多元统计分析, 区分各处理条件下的牛肉丸气味的主要物质为 2-戊基呋喃、己醛和壬醛, 120 °C 6.5 min 和 125 °C 4.5 min 工艺得到的这三种物质总含量最低, SOAV 也最小。综合来看, 直接蒸汽杀菌-无菌封装的杀菌工艺可以实现固体食品精确的高温短时杀菌, 得到 $F_0=4$ min 的商业无菌潮汕牛肉丸产品, 120~125 °C 为适宜的杀菌温度范围。该研究为直接蒸汽杀菌-无菌封装工艺的实际应用和低 F_0 值商业无菌牛肉丸的制备提供了理论参考。

关键词: 潮汕牛肉丸; 直接蒸汽杀菌; 杀菌强度; 质构分析; 风味化合物

文章编号: 1673-9078(2025)06-263-275

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0155

Changes in the Texture and Volatile Flavor Compounds of Chaoshan Beef Balls under Different Thermal Sterilization Conditions

ZHANG Derun¹, LI Biansheng^{1,2*}, RUAN Zheng^{1,2}, YANG Xiao¹, LI Dandan¹,
CHEN Jiawen³, CHEN Haishan³, ZHOU Haiyan³

(1. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)
(2. Guangdong Province Key Laboratory for Green Processing of Natural Products and Product Safety, Company, Guangzhou 510640, China) (3. Guangzhou Jorson Food Technology Co. Ltd., Guangzhou 511447, China)

Abstract: In this study, the effects of different temperature-time combinations of sterilization processes on the texture and volatile flavor compounds of Chaoshan beef balls were investigated. Beef balls were sterilized by direct steam sterilization and aseptically sealed, controlling the sterilization value F_0 to be close (approximately 4.0 min). Different sterilization temperature-time combinations (110 °C 36 min, 115 °C 13.26 min, 120 °C 6.5 min, 125 °C 4.5 min, 130 °C 3.33 min) were used to study the effects on the texture and flavor of the beef balls. The results showed that under similar F_0 values, different thermal sterilization conditions significantly affected the texture and flavor of the beef balls. Sterilization at 120 °C for 6.5 min resulted in the most acceptable flavor and a 40.65% reduction in刺激性气味物质 (stimulatory odor substances) content, while sterilization at 125 °C for 4.5 min resulted in the best texture and reached 98.84% of the raw material hardness. At the same time, the sensory score for odor was higher, and the content of刺激性气味物质 (stimulatory odor substances) such as diallyl disulfide was lower. Sulfur compounds accounted for 55.18%~68.76% of the volatile substances in the beef balls, but through multivariate statistical analysis, the main substances responsible for the odor difference under different treatment conditions were 2-pentylfuran, hexanal, and nonanal. The total content of these three substances was lowest in the samples treated at 120 °C for 6.5 min and 125 °C for 4.5 min, and the SOAV was also the lowest. Overall, the direct steam sterilization-aseptic sealing process can achieve precise high-temperature short-time sterilization of solid foods, producing aseptically sealed Chaoshan beef balls with $F_0=4$ min, and 120~125 °C is a suitable sterilization temperature range. This study provides theoretical reference for the actual application of direct steam sterilization-aseptic sealing process and the preparation of aseptically sealed beef balls with low F_0 value.

引文格式: 张德润,李汴生,阮征,等.不同热杀菌条件下潮汕牛肉丸质构和挥发性风味化合物的变化[J].现代食品科技,2025,41(6):263-275.

ZHANG Derun, LI Biansheng, RUAN Zheng, et al. Changes in the texture and volatile flavor compounds of chaoshan beef balls under different thermal sterilization conditions [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 263-275.

收稿日期: 2024-02-02

基金项目: 广东省重点领域研发项目 (2019B020219002)

作者简介: 张德润 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与保藏, E-mail: derun_zhang1997@163.com

通讯作者: 李汴生 (1962-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工与保藏, E-mail: febsli@scut.edu.cn

and flavor of Chaoshan beef meatballs under the same cold point F_0 value were investigated. The samples of beef meatballs were sterilized by direct steam and packaged aseptically. The effects of different sterilization temperature-time combinations (110 °C , 36 min; 115 °C , 13.26 min; 120 °C , 6.5 min; 125 °C , 4.5 min; 130 °C , 3.33 min) with a similar controlled sterilization F_0 value (about 4.0 min) on the texture and flavor of beef balls were examined. The results showed that when the F_0 value was similar, different thermal sterilization conditions had significant effects on the texture and flavor of beef meatballs, the most acceptable odor being obtained by the sterilization at 120 °C for 6.5 min, causing the reduction of the content of irritating odor substances by 40.65%. The sterilization at 125 °C for 4.5 min led to the best mouthfeel, 98.84% of the hardness of raw materials, higher odor sensory score, and lower content of irritating odor substances such as diallyl disulfide. Sulfides accounted for 55.18%~68.76% of the volatile substances in meatballs. Through multivariate statistical analysis, 2-pentyl-furan, hexanal and nonanal were the three major substances that distinguished the odors of the beef meatballs subjected to different treatment conditions. The total content and the SOAV of these three substances were the lowest in the meatballs obtained by the sterilization at 120 °C for 6.5 min and at 125 °C for 4.5 min. In summary, accurate high temperature-short time (HTST) sterilization of solid foods could be achieved by the sterilization process involving direct steam sterilization and aseptic packaging, resulting in commercial aseptic Chaoshan beef ball products with $F_0 = 4$ min, and 120~125 °C is the appropriate sterilization temperature range. This research provides a theoretical reference for the practical application of the direct steam sterilization-aseptic packaging process and the preparation of commercial aseptic beef balls with low F_0 value is provided.

Key words: Chaoshan beef balls; direct steam sterilization; sterilization intensity; texture profile analysis; volatile compounds

商业无菌食品的杀菌效果直接关系食品品质和安全。随着技术的发展,更多类型的技术逐步被应用到了食品的杀菌中,如辐照、超声、超高压等方法,但由于这些技术大多对于深处食品内部芽孢的杀灭效果不足,在商业无菌食品中,热杀菌目前仍是主流杀菌手段。热杀菌主要通过调整杀菌温度和杀菌时间来控制杀菌效果,根据热杀菌 F_0 值理论^[1],更高杀菌温度可让食品在更短时间内达到相同杀菌效果,但不同热历程下的食品品质却并不相同,如固定 $F_0=8$ min 时的金枪鱼罐头,提高杀菌温度可降低挥发性盐基氮、增大鱼肉硬度、得到更优品质^[2]。由于食品的营养、质地等品质对热杀菌温度变化的敏感性与待杀灭的微生物不同,提高杀菌温度、缩短杀菌时间的方法一般可以更好保留食品还原程度。

商业无菌食品理论与技术一直在发展进步,UHT 应用、软包装普及等都在拓宽其深度和广度。现经研发,固态食品无菌封装系统逐步投入生产,该系统通过对杀菌设备内未包装食品物料直接喷射食品级高压蒸汽杀菌,再在无菌气氛环境下用覆膜马口铁罐对食品物料进行热封装,实现了固态食品先杀菌后无菌封装的商业无菌食品制造工艺。以往研究表明,直接使用高温高压蒸汽来喷射待杀菌物料,可明显缩短传热时间^[3,4]。该杀菌工艺和装备的

运用,使更加精准控制固态食品物料的受热程度得以实现, F_0 值安全系数进一步缩小,可逼近理论中 3~3.6 min。

潮汕牛肉丸是一种历史悠久的地方风味小吃,坚韧是其独特的口感^[5],这种口感经高安全系数的热杀菌后损失明显,故宜作为低杀菌程度杀菌的研究对象。对于肉制品,香气风味是重要评判指标,牛肉及其制品加热处理前后风味改变明显,挥发性组分存在显著区别^[6],同时牛肉丸制品的挥发性风味化合物在常压煮制前后变化明显,煮制后的肉丸制品香气更佳^[7],所以潮汕牛肉丸的挥发性风味物质在杀菌后的变化也是本文着重研究内容。传统罐头杀菌工艺需要较高的安全系数,杀菌时间长,杀菌程度高,对食品的质地、风味、营养价值都有显著破坏^[8],而基于无菌条件进行先杀菌再包装的商业无菌技术刚刚起步,其热杀菌强度的选取和工艺流程都与既往的商业无菌固态食品有所不同,因此该领域的研究还有着较大的空白。

论文选取潮汕牛肉丸作为研究对象,在 $z=10$ °C 的前提下,探究牛肉丸的冷点在杀菌强度为 $F_0=4.0$ min ($F_0=3\sim3.6$ min 并加少量安全系数)时,不同的杀菌温度-杀菌时间组合对牛肉丸口感品质及香气特征的影响,探究新的杀菌封装工艺带来的较低 F_0 值食品在各个可行热杀菌工艺中的表现。

表 1 冷点杀菌强度为 $F_0=4$ min的潮汕牛肉丸制备

Table 1 Theoretical time required at a sterilization intensity as $F_0=4$ min of each temperature

	A 组	B 组	C 组	D 组	E 组
杀菌温度/℃	110	115	120	125	130
理论杀菌时间/min	50.36	15.92	5.04	1.59	0.50
理论杀菌强度/min	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
实际杀菌时间/min	36.00	13.25	6.50	4.50	3.33
实际杀菌强度/min	3.57 ± 0.02	4.05 ± 0.09	4.05 ± 0.10	5.15 ± 0.61	7.33 ± 0.93

1 材料与方法

1.1 材料

原料：同批次冷冻特级牛肉丸（未经杀菌），古心食品（广东）有限公司出品，使用前置于 4℃冰箱中放置 4 h 解冻。包装罐：无菌封装包装罐 D170×H40。试剂：维生素 A 标准品，TM standard；2-辛醇，HPLC 级，麦克林；甲醇，HPLC 级，麦克林；C7~C40 正构烷烃，HPLC 级，o2si；正己烷，GC 级，麦克林。盐酸、石油醚等其他所用试剂均为分析纯级别。

1.2 仪器

JSF300 固态食品无菌封装系统，卓诚食品科技有限公司；TA-XT Plus 物性测试仪，英国 Stable Micro Systems 公司；8890GC-7000D MS 气质联用设备，安捷伦科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 相同冷点杀菌强度牛肉丸的制备

根据牛肉丸的传热特性，使用经解冻的单体牛肉丸，选取 110、115、120、125、130℃五个杀菌温度梯度实验，按照 A、B、C、D、E 组设计不同的杀菌温度-杀菌时间组合，使牛肉丸成品的冷点杀菌强度均处于 $F_0=4$ min 附近。杀菌过程以热蒸汽作为杀菌介质直接喷射杀菌，杀菌后对牛肉丸进行无菌封装，于 4℃冰箱内存储备用。其制备方法如表 1 所示。

可以看出，E 组的实际 F_0 偏离设计值较大，这是因为较高的杀菌温度下， F_0 的累积对杀菌时间很敏感。实验中为使冷点达到要求的杀菌温度，杀菌时间略长，使得 F_0 偏大。

1.3.2 感官分析

参考《GB/T 22210-2008 肉与肉制品感官评定规范》，将整颗的杀菌后牛肉丸预先在 40℃的水浴中保温，然后随机分发至相同的白色瓷盘内，供经

过培训的 8 人感官评定小组对香气、色泽、组织状态、口感、味道五项指标进行评分，评分标准见表 2。

表 2 杀菌牛肉丸感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation standard for sterilized beef balls

指标	评分标准	分值
香气	有牛肉丸应有的香气	15~20
	香气淡薄，稍有令人不快的味道	6~14
	味道令人不快，不想闻	0~5
色泽	肉色自然均匀	15~20
	肉色泛白或泛黄，稍有不均匀	6~14
	肉色异常，或均匀性差	0~5
组织状态	切面光滑致密，均匀无气孔	15~20
	水润感尚可，气孔较小，稍显不均匀	6~14
	无光泽，气孔大，致密差	0~5
口感	口感较好，爽口劲道	15~20
	口感一般，难嚼或过于软烂	6~14
	口感很差，很难嚼或很软烂	0~5
味道	鲜甜适口，咸淡合适，无异味怪味	15~20
	鲜味淡，或稍咸稍淡，无异味怪味	6~14
	无鲜味，咸淡完全不合适，有异味怪味	0~5

1.3.3 质构分析（TPA）

使用手术刀，以 1 mm 分度值钢尺测量，将肉丸切成 2 cm×2 cm×2 cm 的立方体。测前样品置于 40℃水浴锅烧杯中保温 20 min，使用 TA-XT plus 物性测试仪进行质构分析，探头选择 P/36R，测前速度 5 mm/s，测试速度 1 mm/s，测后速度 5 mm/s，压缩比 50%，触发力为 5 g，两次压缩间有 5 s 的停留时间。每组样品 15 次平行测试，得到硬度、弹性、内聚性、胶着性、咀嚼性、回复性六项指标。

1.3.4 挥发性风味物质测定

冰浴条件下，对牛肉丸样品破碎 30 s 成直径 1~2 mm 的肉碎，并加入 1×10^{-3} mol/L 的 2-辛醇作为内标^[9]。样品瓶置于搅拌器中，以 250 r/min 的角速度 5 s 打开 2 s 关闭下在 45℃平衡 15 min。使用老

化后的聚二甲基硅氧烷/二乙烯基苯(DVB/PDMS, 50/30 μm, 2 cm)萃取头通过硅胶隔垫插入样品瓶, 40 ℃下吸附 30 min, 完成后立即将萃取头插入气相色谱进样口, 进样口温度 250 ℃, 解吸 5 min, 5:1 分流进样。每一处理组进行三次平行实验。

气相色谱使用 HP-5MS 色谱柱, 载气为氦气, 流量 1.0 mL/min。质谱使用电子轰击电离源(EI)进行电离, 电子能量 70 eV, 离子源温度 230 ℃, 接口温度 230 ℃, 质量扫描范围 m/z 为 35~500。

使用相同的气质联用条件, 测量 C7~C40 的正构烷烃混标, 结合牛肉丸样品及正构烷烃标准品的保留时间以及质谱结果, 对挥发性组分进行分析, 并利用各组分相对于内标 2-辛醇的峰面积进行半定量分析, 根据半定量分析的结果计算对应组分的香气活性值(Odor Activity Value, OAV), 见公式(1)。

$$B = \frac{c}{T}$$

(1)

式中:

B ——香气活性值(OAV);

c ——化合物浓度;

T ——由文献查询得到的化合物在水中的阈值。

1.3.5 数据分析

使用 SPSS 17.0 进行数据分析统计, 计算显著性区别, 置信度均取 95%。气象色谱-质谱数据于软件 Agilent MassHunter Qualitative B 08.00 中进行处理。半定量结果的多元统计分析在 SIMCA 14.0 中进行。

2 结果与讨论

2.1 不同杀菌条件下牛肉丸的感官特性变化

五项感官分析指标的结果如图 1 所示。其中, C 组在香气指标上取得了最高分 13.63 分, D 组在香气上的评分位居第二为 12.88 分。D 组在色泽和口感两项指标上取得了最高分, 分别为 15.13 分和 13.70 分。组织状态上观感最佳的是杀菌温度最低的 A 组, 得到了 15.00 分。味道上最吸引人的则有 A 组和 E 组两个组别, 均为 13.1 分。将五项评价指标加和, 总得分最高的为 D 组的 66.95 分, 最低的为 B 组的 63.05 分。

初步看来, 使用 120 ℃和 125 ℃进行杀菌的 C 组和 D 组两组别的肉丸产品在气味接受程度上最好, 这同挥发性风味物质的分析结果有所呼应。同时, D 组最为杀菌温度较高的组别, 其杀菌时间较短, 从实际杀菌程度上看较杀菌温度更高的 A 组更

均匀, 这些因素令 D 组的口感评分表现最佳, 这点在后续的质构分析中得到了进一步的验证。

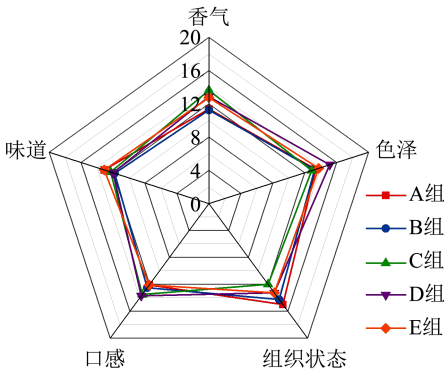


图 1 牛肉丸的感官分析结果

Fig.1 Sensory analysis of beef balls

2.2 不同杀菌条件下牛肉丸的质构特性变化

肉丸质构特性共六项, 分别为硬度、内聚性、胶着性、弹性、回复性和咀嚼性, 其结果如图 2。

由图 2 可知, 原料牛肉丸在硬度、胶着性和咀嚼性三项指标上数值均最高, 经热杀菌的肉丸在这三项上均存在不同程度的损失。125 ℃以下的杀菌工艺处理组别之间, 此三项指标随着杀菌温度上升和杀菌时间缩短而上升, 最高达到了对照组的 98.84%、96.92% 和 97.35%, 且同原料组无显著性区别 ($P<0.05$)。当杀菌温度进一步上升至 130 ℃时, E 组处理牛肉丸的这三项指标较 D 组反下降了对照组的 5.87%、6.84% 和 8.29%, 接近于使用 120 ℃杀菌的 C 组。同以往实验中的铝箔袋装杀菌牛肉对比, 随着杀菌温度上升和杀菌时间的缩短, 袋装牛肉的硬度趋于下降^[10], 本实验得到的质构特性规律有所不同, 这可能同对 F_0 值的把控程度有关, 以往实验中的袋装牛肉在高温组中的过杀菌情况要比低温组严重。对于弹性, 数据显示出一定的随机性, 不同组别间差别不足 2%, 可见热杀菌对该指标无影响。热杀菌后的肉丸内聚性和回复性均有不同程度下降, 但随着杀菌温度上升、杀菌时间缩短并未呈现出明显规律。以往对于牛肉丸的实验中, 通过冷水与热水两种不同方式的复热

潮汕牛肉丸的口感是评价质量的重要标准。好的潮汕牛肉丸, 应该弹牙、坚韧、有嚼劲, 而长时间高温杀菌会造成多肽链降解并破坏其二级结构, 从而瓦解凝胶体系网络结构^[11], 造成肉丸质构特性的损失, 使其变得软烂、不耐嚼, 失去其特色。通过 TPA 测试量化牛肉丸口感特性得知, 相同的中心冷点杀菌强度下, 在 125 ℃进行恒温杀菌的牛肉丸,

质构特性损失最少，产品最接近原始原料的口感。由表 1 中肉丸的制备工艺及制备结果可见，较低杀菌温度会大幅延长杀菌时间，较高杀菌温度会增大各肉丸 F_0 值的方差从而带来更严重不均的过杀菌，结合感官分析结果，这些均不利于口感特性的保持。因此从质构特性角度出发，125 ℃是潮汕牛肉丸应用直接蒸汽杀菌最适宜的杀菌温度。

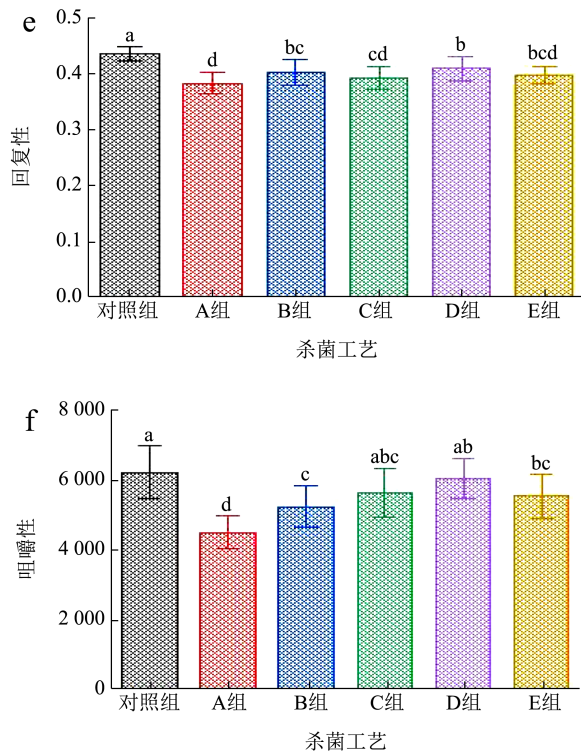
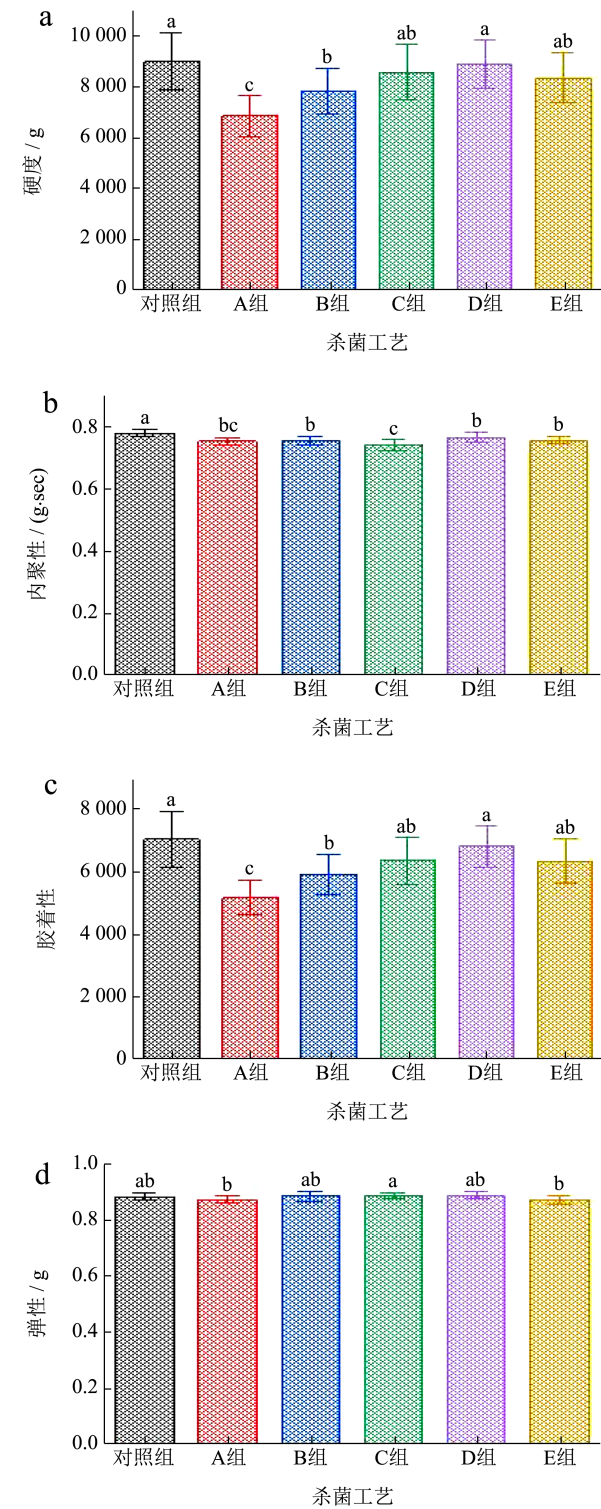


图 2 牛肉丸的全质构分析结果
Fig.2 Texture profile analysis of beef balls
注：图中小写字母表示具有显著差异 ($P < 0.05$)。

2.3 牛肉丸的挥发性风味化合物

通过顶空固相微萃取-气质联用 (HS-SPME-GC-MS) 方法检测潮汕牛肉丸中的挥发性风味化合物，最终鉴定到了 26 种可平行性验证的物质，其中热杀菌处理的组别检出 19 种，原料组别检出 18 种，各组的总离子色谱图如图 3 所示。这 26 种物质包括 3 种醛类，1 种酮类，3 种醇类，1 种酚类，7 种硫醚类，2 种萜类，1 种烷烃类，3 种芳香类，3 种杂环类和 2 种氨基酸类，具体结果详见表 3。在以往研究中，市售的各品牌潮汕牛肉丸最多可检出 173 种物质^[12]，不同肉丸的挥发性成分有着较大区别，硫醚类物质和己醛、壬醛等物质在较多品类种都有检出。在两篇对于潮汕牛肉丸煮制前后挥发性风味物质的测定中，物质种类各分别检出了共 42 种和共 28 种^[7,13]，相比之下本实验所得物质种类略少，对比可知较少的物质类别多为烯烃类物质和醛类物质，这可能和本实验所用牛肉丸原料中的香料类别较少，带入的烯烃与醛类风味较少有关，同时本实验中牛肉丸的制备方式为先杀菌再包装，相较于传统包装后杀菌的制备方式，再高温过程中也更容易损失挥发性的物质。

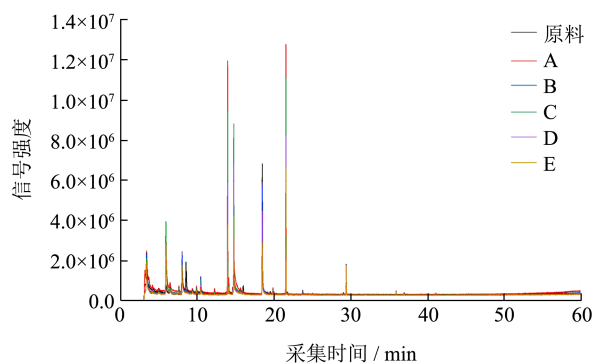


图3 潮汕牛肉丸的总离子流色谱图

Fig.3 Total ion chromatogram of Chaoshan beef balls

由表3可知,原料对照组和各热杀菌组在挥发性风味物质构成上存在明显区别。潮汕牛肉丸中,7种挥发性成分经杀菌后被破坏殆尽或低于检出限,并产生了9种新物质。从半定量结果看,热杀菌后,原料组有8种物质含量存在不同程度下降,另有3种物质含量上升。高温条件下,牛肉丸挥发性物质中含硫化物整体构成,从原料组中基团为烯丙基和烃基的二硫醚占多数,如烯丙基-1-烯基二硫醚、烯丙基丙基二硫醚、二烯丙基二硫醚、烯丙基甲基二硫醚等,趋于向链长更短的单硫醚如二烯丙基硫醚、2,2-二甲基硫醚等含量占比逐渐上升的方向转变,同时还出现了3,4-二甲基噻吩一类的含硫杂环类物质。己醇、辛烷、辛酮、柠檬烯等物质在高温下被氧化或破坏,大量的己醛及4-庚烯醛、壬醛、2-戊基呋喃等香味物质生成,使肉丸杀菌前后的香气成分构成有较大转变。

从物质类别上看,硫醚类的物质种类最多,含量也最大,占据了所检出风味物质的55.18%~68.76%,其化合物构成上以二烯丙基硫醚和二烯丙基二硫醚为主。这些带有大量烯丙基基团的硫醚物质的味道多为葱味和蒜味,少量带有烧烤和坚果的味道^[14]。一些研究认为肉丸中大量的含硫化物主要来自大蒜等香料^[15],这类物质广泛存在于葱属植物中,其中的蒜氨酸及衍生物在蒜氨酸酶的作用下催化分解为大蒜素,再迅速转变为包括二烯丙基硫醚、二烯丙基二硫醚、二烯丙基三硫醚等的含硫化物^[16],这些物质正是刺激性气味的来源。同时,牛肉丸作为一种牛肉制品有较高蛋白质含量,而硫醚类物质也是一种可由高温下的美拉德反应产生的常见小分子活性风味物质^[12]。在一个模型实验中,对甲硫氨酸-半胱氨酸-木糖的三元体系进行高温处理,就可以生成包括二甲基二硫醚、二甲基三硫醚、2-甲基噻吩等一些列的含硫化物^[17],但并未包含富含烯丙基的硫醚类物质。综合来看,潮

汕牛肉丸中的硫醚类物质应为大蒜中物质带入和高温处理过程中美拉德反应生成两种方式共同累计。经热杀菌处理后,硫醚类物质总量在整体上存在一定下降趋势,与生牛肉丸煮制成熟牛肉丸过程中变化类似^[7],含量有所下降的物质均为以烯丙基为基团的二硫醚和三硫醚。这些硫醚物质多来自蒜氨酸分解生成,在高温杀菌的过程中被不同程度的破坏和挥发损失,最终含量有所下降。而2,2-二甲基硫醚这一物质在杀菌前原料中并未检出,在杀菌后的各组牛肉丸中则含量明显,应基本来自于杀菌的高温过程中发生的美拉德反应。从含量上看,调味物质的加入主导了牛肉丸中硫醚类物质的风味,而杀菌工艺则一定程度影响了这类风味,既导致了来自调味品的硫醚物质分解程度的不同,也带来了不同的2,2-二甲基硫醚生成量。以总量计,使用120℃杀菌的C组硫醚类物质总量最低,为3 080.83 μg/kg,其次为使用125℃杀菌的D组有3 701.85 μg/kg,而使用稍低的115℃杀菌的B组则有着最高的硫醚类物质总量6 181.41 μg/kg,杀菌温度的变化对硫醚类物质的总含量有较大的影响。

相对含量第二多的是醛类物质,经热杀菌的牛肉丸挥发性物质中有大量的己醛,加上4-庚烯醛和壬醛,占热处理组牛肉丸风味中的26.17%~35.57%,但同时其在原料牛肉丸中含量仅占0.32%。肉类制品中醛酮类物质主要来自脂质类成分的受热分解和氧化,这些物质高温下更易生成,因此热杀菌的组别中醛类物质总含量远多于原料组,这一结果与生牛肉丸经煮制后醛类物质增多的情况在整体趋势上相同。杀菌后,肉丸中产生了大量己醛和一定量4-庚烯醛,原料组中则并未检测到这两者。食物中的己醛是omega-6脂肪酸氧化程度的主要标志^[18],其大多分解自亚油酸,低浓度下能给人青草、蔬菜类的特征气味,高浓度时则会带来特殊腐臭味。4-庚烯醛是许多鱼类产品的重要风味成分,味道被描述为鱼油、咸鱼、生鱼^[19]。壬醛则有天竺葵、生鱼、塑料、海洋的味道,也有研究将其描述为蜡味^[20]。杀菌时间较长的B组与杀菌温度最高的E组都有更高的己醛和壬醛含量,含量分别为2 158.15、109.32和2 511.11、94.28 μg/kg,而采用120℃和125℃杀菌的C组与D组这二者的含量分别为1 783.81、76.72和1 762.08、75.41 μg/kg,说明适当的杀菌温度与杀菌时间组合可以降低醛类物质的产生。由于己醛和壬醛可反映肉制品的加工或腐败程度,故选取合适的工艺可以降低食品的加工感。

表 3 潮汕牛肉丸的挥发性风味化合物
Table 3 Volatile compounds of Chaoshan beef balls

风味物质	CAS	保留时 间/min	实际 RI	文献 RI	相对含量 (µg/kg)					原料	鉴定 方法
					A	B	C	D	E		
醛类					1 900.23	2 459.74	1 968.93	1 948.18	2 722.8	26.79	
己醛	66-25-1	5.92	800	806	1 695.75 ± 145.42 ^b	2 158.15 ± 224.78 ^{ab}	1 783.81 ± 229.8 ^{ab}	1 762.08 ± 556.03 ^{ab}	2 511.11 ± 118.36 ^a	—	MS/RI
4-庚烯醛	62238-34-0	7.61	843	913	100.96 ± 20.52 ^b	192.26 ± 20.41 ^a	108.4 ± 16.54 ^b	110.68 ± 33.58 ^b	117.41 ± 3.87 ^b	—	MS
壬醛	124-19-6	19.87	1104	1104	103.51 ± 19.2 ^a	109.32 ± 14.03 ^a	76.72 ± 13.32 ^b	75.41 ± 13.44 ^b	94.28 ± 4.88 ^{ab}	26.79 ± 7.81 ^c	MS/RI
酮类										93.44	
2-辛酮	111-13-7	14.14	989	952	—	—	—	—	—	93.44 ± 1.5	MS
醇类					72.23	78.31	50.72	59.22	104.9	950.9	
1-己醇	111-27-3	8.55	867	860	—	—	—	—	—	918.87 ± 255.87	MS
1-甲基环乙醇	590-67-0	9.37	887	931	59.75 ± 16.79 ^b	72.2 ± 10.29 ^{ab}	43.68 ± 7.54 ^b	55.37 ± 19.04 ^b	99.02 ± 19.6 ^a	—	MS
1-辛烯-3-醇	3391-86-4	13.71	980	969	12.48 ± 5.86 ^b	6.11 ± 2.38 ^b	7.05 ± 1.58 ^b	3.85 ± 6.66 ^b	5.88 ± 6.59 ^b	32.03 ± 11.55 ^a	MS/RI
酚类					25.71	29.36	12.95	31.5	63.96		
2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚	128-37-0	36.95	1499	1668	25.71 ± 7.13 ^b	29.36 ± 5.94 ^b	12.95 ± 2.87 ^b	31.5 ± 13.41 ^b	63.96 ± 14.7 ^a	—	MS
硫醚类					3667.15	6181.41	3080.83	3701.85	4482.23	5649.94	
2,2-二甲基硫醚	3772-13-2	4.19	730	635	47.42 ± 3.38 ^{ab}	62.43 ± 21.61 ^{ab}	37.74 ± 9.6 ^b	67.01 ± 14.63 ^a	49.84 ± 4.97 ^{ab}	—	MS
二烯丙基硫醚	592-88-1	8.02	853	849	972.83 ± 161.83 ^a	1 616.52 ± 277.19 ^b	735.04 ± 124.43 ^b	1 008.34 ± 290.24 ^a	1 521.79 ± 74.83 ^b	914.45 ± 128.2 ^b	MS/RI
烯丙基甲基二硫醚	2179-58-0	10.46	912	911	261.47 ± 61.03 ^b	607.87 ± 93.58 ^a	312.88 ± 58.56 ^b	300.39 ± 82.25 ^b	257.79 ± 38.91 ^b	495.61 ± 117.94 ^a	MS/RI
二烯丙基二硫醚	2179-57-9	18.47	1076	1099	2 339.85 ± 520.96 ^b	3 854.11 ± 377.88 ^a	1 978.93 ± 388.44 ^b	2 310.33 ± 582.37 ^b	2 638.62 ± 329.08 ^{ab}	4 081.48 ± 1052.92 ^a	MS/RI
烯丙基丙基二硫醚	2179-59-1	19.17	1090	1109	15.56 ± 4.03 ^{b,c}	21.31 ± 10.11 ^{ab}	2.42 ± 4.18 ^{c,d}	7.88 ± 1.5 ^{c,d}	11.97 ± 2.36 ^{b,d}	27.57 ± 4.89 ^a	MS
烯丙基-1-烯基二硫醚	122156-02-9	19.51	1096	1117	—	—	—	—	—	62.31 ± 22.65	MS/RI
二烯丙基三硫醚	2050-87-5	29.04	1296	1350	30.01 ± 5.86 ^b	19.17 ± 0.66 ^c	13.83 ± 4.53 ^{c,d}	7.89 ± 8.04 ^{d,e}	2.23 ± 3.86 ^c	68.52 ± 4.58 ^a	MS
萜类					57.3	67.14	37.61	47.36	61.39	352.61	
D-柠檬烯	5989-27-5	15.98	1026	1018	9.34 ± 1.17 ^b	2.67 ± 4.62 ^b	1.02 ± 1.76 ^b	9.39 ± 6.16 ^b	21.56 ± 5.47 ^a	225.76 ± 65.69	MS/RI
3-乙烯基-1,2-二硫-4-环己烯	62488-52-2	23.76	1183	1134	47.96 ± 5.98 ^{b,c}	64.47 ± 2.89 ^b	36.6 ± 7.4 ^c	37.96 ± 14.16 ^c	39.83 ± 7.94 ^c	126.86 ± 17.28 ^a	MS

续表 3

风味物质	CAS	保留时 间/min	实际 RI	文献 RI	相对含量(μg/kg)					鉴定 方法
					A	B	C	D	E	
烷烃类										
辛烷	111-65-9	5.92	800	816	—	—	—	—	—	MS/RI
芳香类					35.86	71.68	72.1	47.51	87.28	
2-苯乙基酸酯	6290-37-5	9.39	888	1657	—	—	—	—	—	MS
苯甲醛	100-52-7	12.64	958	982	5.09 ± 1.43 ^b	13.42 ± 2.42 ^{ab}	9.52 ± 5.97 ^{ab}	10.66 ± 3.17 ^{ab}	16.31 ± 8.28 ^a	MS
甲苯	108-88-3	5.01	764	794	30.77 ± 9.42	58.25 ± 43.75	62.57 ± 5	36.85 ± 9.11	70.96 ± 21.94	MS
杂环类					405.05	511.94	312.43	359.92	600.3	
3,4-二甲基噻吩	632-15-5	9.92	901	884	104.39 ± 20.11 ^b	199.33 ± 18.59 ^a	126.52 ± 27.32 ^b	135.61 ± 53.52 ^b	232.33 ± 56.26 ^a	MS/RI
2-戊基呋喃	3777-69-3	14.11	988	1040	234.07 ± 12.89 ^{ab}	181.48 ± 28.66 ^{bc}	128.02 ± 29.06 ^c	147.42 ± 55.08 ^c	269.28 ± 19.39 ^a	MS
2,3,5-三甲基吡嗪	14667-55-1	14.64	999	1008	66.59 ± 18.51 ^b	131.14 ± 15.73 ^a	57.89 ± 18.45 ^b	76.89 ± 45.29 ^b	98.68 ± 9.27 ^{ab}	MS/RI
氨基酸类										
D-丙氨酸	338-69-2	4.20	730	855	—	—	—	—	—	MS
3-氨基丁酸	541-48-0	4.99	763	855	—	—	—	—	—	MS

注：同行右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)。

杂环类物质也占据一定比重，在热处理的牛肉丸中占 5.45%~7.39%，在原料牛肉丸中占 2.30%。3,4-二甲基噻吩作为含硫杂环物，仅在高温杀菌的肉丸中检出，其具有硫磺、咸味、烤洋葱的味道^[21]。有研究认为，3,4-二甲基噻吩可能来自二烯丙基二硫醚在较高气相色谱进样温度下发生的二硫代-克莱森重排，较低的进样温度会使该物质消失^[22]。但本研究中，二烯丙基二硫醚含量最高的原料组并未检测到 3,4-二甲基噻吩的存在，而二烯丙基二硫醚含量显著下降的各处理组均有明显检出，故该物质更可能来自杀菌过程。2-戊基呋喃有绿豆气味，可在高温美拉德反应期间由还原糖形成^[23]。吡嗪类同样来自美拉德反应，较可能的形成机制是氨基酸与还原糖发生美拉德反应后的产生了 Strecker 降解^[24]。呋喃和吡嗪带来烤制与烘焙的香气，二者生成均需大量能量，且吡嗪所需能量要比呋喃更高^[25]。本研究中，杀菌后的牛肉丸大量产生了 2-戊基呋喃，而 2,3,5-三甲基吡嗪则有不同程度的减少，说明所选取的杀菌温度恰好足以供给呋喃类物质的产生。

除上述三类物质外，对牛肉丸热杀菌前后的挥发性风味化合物检测还有许多其他类型的物质。在未经热杀菌处理的牛肉丸原料中，检测到了较大含量的 1-己醇和一定含量的 1-辛烯-3-醇，经杀菌后，

1-己醇无法检出，1-辛烯-3-醇则存在不同程度的显著减少。1-己醇有水果、酒精味道，一般来自食品原料中油酸的氧化^[26]。1-辛烯-3-醇有着蘑菇味和生鸡肉味，多为亚油酸和其他不饱和脂肪酸的氧化产物，可带来脂肪风味^[27]。这些脂肪族醇多来自脂质和氨基酸氧化得到醛类物质后发生的还原反应，对肉类风味特性有一定影响^[28]，但在杀菌肉丸制品中含量甚微。甲苯可来自游离酪氨酸热解，也可自脂肪酸氧化分解后衍生出的不饱和烃类物质生成^[29]。苯甲醛有苦杏仁、焦糖、樱桃、麦芽、烤胡椒香，同样可由酪氨酸经 Strecker 降解生成，也是 2,4-癸二烯醛的热解产物，其在食品中含量随着脂质类物质氧化进程而增加^[30]。2-苯乙基己酸酯是有果香味的酯类香精，天然存在于各类酒精饮料中，可通过微生物发酵或生物制剂催化等方式合成^[31]，仅检出于未经杀菌的原料牛肉丸中，应来自于人工添加。属于萜类物质的 D-柠檬烯有着柑橘、薄荷类的香气，该类物质公认富含于各类香料植物中，视饲料喂养结构的不同也可天然在新鲜的动物肉中存在^[32]。

2.4 牛肉丸挥发性组分的香气活性值（OAV）结果

牛肉丸挥发组分的香气活性值（OAV）结果如表 4 所示。

表 4 潮汕牛肉丸的香气活性值结果
Table 4 Odor activity values Chaoshan beef balls

风味物质	气味描述	气味阈值 (mg/kg)	OAV 值					
			原料	A	B	C	D	E
己醛	青草、蔬菜、腐臭	0.061 5	<1	28	35	29	29	41
4-庚烯醛	鱼油、咸鱼、生鱼	0.004 2	<1	24	46	26	26	28
壬醛	天竺葵、生鱼、塑料、海洋	0.001 1	24	94	99	70	69	86
2-辛酮	脂肪、芳香、霉菌	0.050 2	2	<1	<1	<1	<1	<1
1-己醇	水果、酒精、绿色	0.005 6	164	<1	<1	<1	<1	<1
1-辛烯-3-醇	蘑菇、生鸡肉	0.001 5	21	8	4	5	3	4
2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚	烤谷物	1.000 0	<1	<1	<1	<1	<1	<1
二烯丙基硫醚	香薄荷、大蒜	0.100 0	9	10	16	7	10	15
二烯丙基二硫醚	大蒜	0.030 0	136	78	128	66	77	88
二烯丙基三硫醚	香薄荷、硫味	0.192 0	<1	<1	<1	<1	<1	<1
D-柠檬烯	柑橘、薄荷	0.034 0	7	<1	<1	<1	<1	<1
辛烷	无	10.000 0	<1	<1	<1	<1	<1	<1
苯甲醛	苦杏仁、焦糖、樱桃、麦芽、烤胡椒	0.750 9	<1	<1	<1	<1	<1	<1
甲苯	甜味、化学试剂	0.527 0	<1	<1	<1	<1	<1	<1
2-戊基呋喃	黄油、花香、水果、绿豆	0.005 8	<1	40	31	22	25	46
2,3,5-三甲基吡嗪	可可、土地、发酵葡萄汁、土豆	0.350 1	<1	<1	<1	<1	<1	<1

通过文献检索^[14,33], 查找到了气质结果种 16 种物质对应的水溶状态气味感知阈值, 并根据半定量结果换算得到了对应 OAV, 经与未经热杀菌处理的牛肉丸各有 7 种物质 OAV 结果大于等于 1, 即是能明显影响人类香气感知的成分。原料组中, 1-己醇 (OAV:164) 和二甲基二硫醚 (OAV:136) 香气贡献最为明显, 其次是壬醛 (OAV:24) 和辛烯三醇 (OAV:21), 二烯丙基硫醚、D-柠檬烯和 2-辛酮则因 OAV 值较低贡献程度稍弱, 但仍属于可被感知的程度。对于热杀菌过的五个处理组, 二烯丙基二硫醚 (OAV:78~128) 和壬醛 (OAV:69~99) 在整体香味构成中贡献较大; 己醛 (OAV:28~41)、4-庚烯醛 (OAV:24~46)、2-戊基呋喃 (OAV:22~46)、二烯丙基硫醚 (OAV:7~16) 四种也有相当贡献, 对于整体香味影响重要; 1-辛烯-3-醇则由于浓度显著下降在整体风味中变得边缘化。杀菌牛肉丸的香气构成上同既往研究中水煮熟制牛肉丸有一定重合^[7], 二烯丙基二硫醚、壬醛、己醛、二烯丙基硫醚均占有重要地位。整体上看, 经高温热杀菌处理后, 牛肉丸的香气构成存在一定变化, 具体表现为硫醚类物质贡献程度稍有下降, 醛类物质影响程度明显上升, 萜类等来自于香料的物质经高温后影响几乎消失, 可带来焦香风味的 2-戊基呋喃一类美拉德产物开始占据一定地位。

不同的杀菌工艺对于各香气物质影响各不相同。多种物质的 SOAV (Sum of the OAVs) 同其对应气味的浓度有较好的正相关性, 较高的 SOAV 往往对应较浓郁的气味^[34]。整体上看, 采用 110、115 °C 进行低温长时间杀菌的 A 组、B 组以及采用 130 °C 高温短时杀菌的 E 组香气物质更浓烈, 总 SOAV 在 282~360 之间。而用 120 与 125 °C 进行杀菌的 C 组与 D 组香气物质更清淡, 总 SOAV 分别为 225 和 239, 较于 OVA 值大于 1 的物质总浓度较最高的 B 组分别下降了 40.65% 和 33.26%。4-庚烯醛、壬醛、二烯丙基硫醚、二烯丙基二硫醚四种物质 OAV 最高值均在 B 组取得, 己醛、2-戊基呋喃两种物质 OAV 最高值则在 E 组取得。这些物质大多来自高温处理中的热分解反应, 较低的浓度表明 C 组和 D 组热分解程度较轻, 不易产生过于浓烈的气味, 如二烯丙基硫醚、二烯丙基二硫醚等硫醚类物质易带来的臭味等, 有着更高的气味接受程度。

2.5 牛肉丸挥发性组分的多元统计分析结果

主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)

是多元统计分析方法中的一种无监督模式识别方法, 是一种探索性分析。在不对被分析的数据集预设模型下, PCA 可以为聚类 and 识别异常值提供较直观的描述。对来自 5 种热处理方式下牛肉丸样品的 19 种物质含量半定量结果进行 PCA 分析后, 得到的结果可见于图 4。

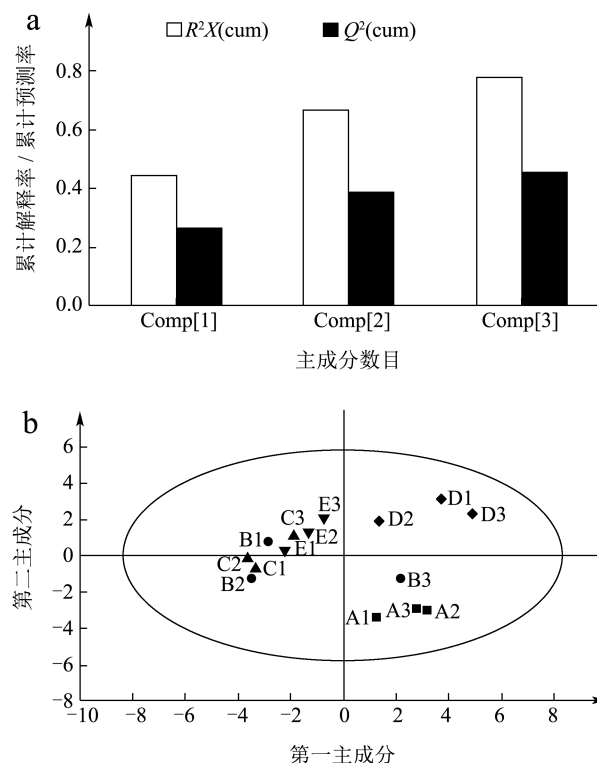


图 4 五种热杀菌工艺下牛肉丸的挥发性风味化合物 PCA 分析结果

Fig.4 PCA of beef balls volatile compounds using five kinds of thermal sterilization process

根据软件自适应拟合, 得到三个主成分解样品间区别, 其 $R^2(cum)=0.781$, $Q^2(cum)=0.455$, 说明此三主成分可解释 78.0% 的组间变异, 但对组间变异预测效果只有 45.5%, 不足 50%, 分类方法预测效果不够理想。观察基于前二主成分的得分散点图, 发现图中 A 组 (110 °C 36 min) 和 D 组 (125 °C 4.5 min) 数据较好聚集到了一起。除去较异常的数据点 B3 外, B 组 (115 °C 13.25 min)、C 组 (120 °C 6.5 min) 和 E 组 (130 °C 3.33 min) 聚集较接近, 表示这三处理组的数据在 PCA 分析下较接近。初步来看, 较于通常杀菌所使用的 115~120 °C, 110 °C 的低温长时杀菌和 125 °C 的高温短时杀菌都会使牛肉丸风味物质构成发生变化, 改变牛肉丸香气模式。但进一步提高热杀菌温度至 130 °C 进行更短时杀菌, 可得到香气状态同 120 °C 下极为相近的

潮汕牛肉丸。

通过 PCA 分析, B3 作为异常的数据点, 同 B 组其他数据点投影距离较大, 故剔除该数据, 对余下数据按照热处理方式分组 (A、B、C、D、E 组), 采用有监督的偏最小二乘判别分析 (Partial Least Squares Discrimination Analysis, PLS-DA) 进行进一步分类和预测。同 PCA 方法比, PLS-DA 能更好分离所观察的数据组, 得到更优的分类和预测效果。本次得到的结果由四个预测成分构成, X 轴方向的累积解释率 $R^2X(\text{cum})=0.829$, Y 轴方向上的累积解释率 $R^2Y(\text{cum})=0.875$, 模型的累积预测率 $Q^2(\text{cum})=0.7$ 。 $R^2X(\text{cum})$ 和 $R^2Y(\text{cum})$ 的值越接近 1, 代表分析得到的模型对原始数据的 X 矩阵和 Y 矩阵贴合性更好, $Q^2(\text{cum})$ 的值也是越接近 1 有着越好的预测效果, 0.5 以上即表明预测效果较好。较于 PCA 的结果, 剔除异常数据后的偏最小二乘判别分析得到的模型在对类别的预测效果上有了较大的提升, 其散点得分情况如图 5。

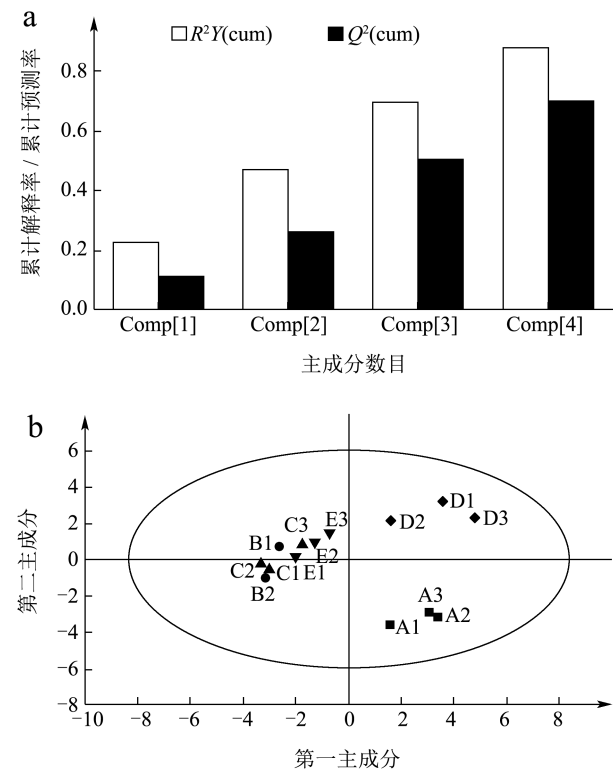


图 5 五种热杀菌工艺下牛肉丸的挥发性风味化合物
PLS-DA 分析结果
Fig.5 PLS-DA of beef balls volatile compounds using five
kinds of thermal sterilization process

对该模型基于 ward 算法进行层次聚类分析 (Hierarchical Cluster Analysis, HCA), 其树状结果见图 6。HCA 中, 越相近的样本越容易被分在同一

树簇下, 五个组别的牛肉丸数据样本在组内都无干扰地在较低合并成本前提下统合到各自树簇, 说明该 PLS-DA 模型效果良好, 能有效区分不同组别。进一步来看, B 组 (115 °C 13.25 min) 和 C 组 (恒温 120 °C 6.5 min) 合并成本较低, 说明其相似度较高。随后, 在低于 A 组 (110 °C 36 min) 和 D 组 (125 °C 4.5 min) 的合并高度下, B 组和 C 组的数据又同 E 组 (130 °C 3.33 min) 并入同一分支, 说明 130 °C 下处理得到的挥发性物质构成同 115 °C 和 120 °C 下的组别更接近, 三者内部相似性更高, 这同散点得分图二维直观结果一致, 也符合 PCA 得到的结论。

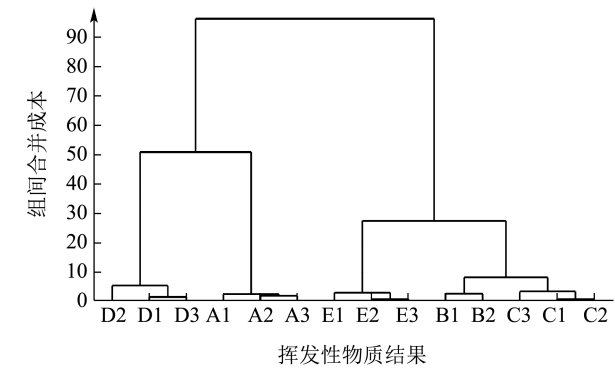


图 6 基于 ward 算法的牛肉丸挥发性风味物质 HCA 结果
Fig.6 HCA of beef balls volatile compounds based on
ward algorithm

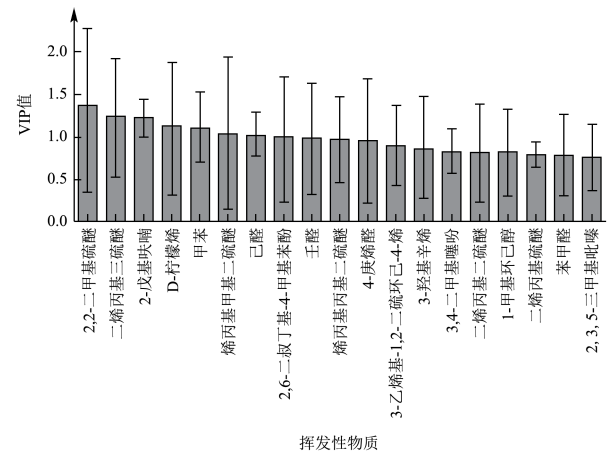


图 7 牛肉丸挥发性风味物质 PLS-DA 模型的
各变量投影重要性结果
Fig.7 VIP of beef balls volatile compounds based on
PLS-DA model

确定模型效果良好后, 进而关注该 PLS-DA 模型各变量投影重要性 (Variable Importance for the Projection, VIP), 以找出区分不同热处理条件牛肉丸的关键挥发性物质成分, VIP 值结果如图 7。

PLS-DA 下的变量投影重要性反应了模型中各个变量对于区分不同组数据间的贡献,一般认为 VIP 值大于 1 的物质对于区分组有着较为重要的作用。共有 8 种物质的 VIP 值大于 1,按从大到小排列,它们分别是 2,2-二甲基硫醚、二烯丙基三硫醚、2-戊基呋喃、D-柠檬烯、甲苯、烯丙基甲基二硫醚、己醛和 2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚。

这些物质中,二烯丙基三硫醚、D-柠檬烯和烯丙基甲基二硫醚三者的含量均在牛肉丸经过热杀菌处理后存在不同程度的下降,余下物质则在未经热杀菌处理的原料牛肉丸中均未检出。结合 OAV 的结果,这 8 种物质中,有 6 种物质查到了对应的气味阈值,其中的 2 种物质计算得到的 OAV 结果大于 1,它们即是 2-戊基呋喃(OAV:22~46)和己醛(OAV:28~41)。同时,排名第 9 的物质壬醛(OAV:69~99),其 VIP 值为 0.996 6,非常接近于 1,也可认为其有着相当的贡献。这三种物质的 OAV 值均较大,对牛肉丸的整体香气有重要影响,令不同的热处理方式下得到的潮汕牛肉丸成品呈现出了不同的嗅觉感官。肉丸挥发性物质中含量最丰富的硫醚类产物有多个物质的 VIP 值大于 1 且排名靠前,但因其 OAV 值未达到感知阈值,故无法通过这些物质区分不同热处理方式得到的肉丸香气。计算 2-戊基呋喃、己醛、壬醛三种物质的 SOAV (Sum of the OAVs),和值从高到低依次为 E 组 173、B 组 166、A 组 162、D 组 123、C 组 121,采用 130 °C 短时杀菌的 E 组和采用较低的 110 和 115 °C 的杀菌温度的 A 组和 B 组三种物质 SOAV 较大、香气感知相对较浓,而使用 120 °C 的 C 组和使用 125 °C 的 D 组香气较为清淡,这同 OAV 的分析结果保持一致。

3 结论

在达到相同冷点 F_0 值的前提下,通过选取不同的热杀菌温度-时间参数,杀菌制备得到的潮汕牛肉丸在口感特性和香气模式上有着显著的差异。使用 125 °C 作为杀菌温度,由于其杀菌温度较高可以有效缩短杀菌时间,且较易控制传热进程,得到的牛肉丸在五个热处理组别中有着最高的硬度、胶着性和咀嚼性,口感最佳。通过对牛肉丸挥发性风味化合物的测定,可以看出经过热杀菌处理的牛肉丸挥发性化合物中,硫醚类物质和醛类物质在其中占据了较大的比重。对挥发性风味化合物进行半定量分析后发现,在香气模式上,各个热杀菌处理组得

到的样品香气模式均有所不同,其中使用 120 °C 杀菌的 C 组和使用 125 °C 杀菌的 D 组较为相似,均较为柔和,更易被消费者接受。在区分各处理组香气模式上,2-戊基呋喃、己醛和壬醛是在感知范围内贡献度最明显的三种物质,三种物质的 SOAV 也在 120~125 °C 内为 121~123,小于其他处理条件下的 162~173。

综合来看,使用 120~125 °C 的范围作为杀菌工艺温度,得到的牛肉丸口感还原度高、香气适宜,是最适合采用直接蒸汽杀菌法制备潮汕牛肉丸产品的工艺。

参考文献

- [1] 陈舒航.罐藏食品热杀菌的模拟仿真及自动纠偏系统的开发[D].杭州:浙江大学,2019.
- [2] 王亮,刘东红.热杀菌条件对金枪鱼罐头品质的影响[J].现代食品科技,2015,31(4):242-247,120.
- [3] HAM T H, YOON W B. Application of direct steam injection system to minimize browning of white radish (*Raphanus sativus*) broth during sterilization [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(6): 210-220.
- [4] ZHAO Z M, WANG L, CHEN H. A novel steam explosion sterilization improving solid-state fermentation performance [J], Bioresource Technology, 2015, 192: 547-555.
- [5] 陈志斌.论非遗之“潮汕手打牛肉丸制作技艺”的传承与产业发展[J].轻工科技,2021,37(5):144-145.
- [6] MIGITA K, IIDUKA T, TSUKAMOTO K, et al. Retort beef aroma that gives preferable properties to canned beef products and its aroma components [J]. Animal Science Journal, 2017, 88(12): 2050-2056.
- [7] 石华治,王娟,刘玉平,等.潮汕牛肉丸煮制前后关键性香气成分对比分析[J].食品科学技术学报,2018,36(5):44-50.
- [8] BARBOSA-CÁNOVAS G V, MEDINA-MEZA I, CANDOĞAN K, et al. Advanced retorting, microwave assisted thermal sterilization (Mats), and pressure assisted thermal sterilization (Pats) to process meat products [J]. Meat Science, 2014, 98(3): 420-434.
- [9] YU D, ZHANG X, GUO S, et al. Headspace GC/MS and fast GC e-nose combined with chemometric analysis to identify the varieties and geographical origins of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) [J], Food Chemistry, 2022, 396: 133672.
- [10] 李彦,梁丽雅,乔芳,等.杀菌方式对红烧卤牛肉品质的影响[J].保鲜与加工,2022,22(3):21-29.
- [11] ZHANG L, LIU Z, TANG J, et al. Gellan gum improves the gel properties and thermal stability of tilapia (*Oreochromis* spp.) skin gelatin sterilized at 121 °C [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(11): 17131.
- [12] 吴丹璇,高子武,吴鹏,等.偏最小二乘回归分析市售牛肉

- 丸感官特性与挥发性风味化合物的关系[J].现代食品科技,2022,38(3):276-285.
- [13] 成军虎,梁哈妮,韩忠,等.牛肉丸制品水煮复热品质变化分析[J].现代食品科技,2021,37(6):150-158.
- [14] YANG P, SONG H, WANG L, et al. Characterization of key aroma-active compounds in black garlic by sensory-directed flavor analysis [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(28): 7926-7934.
- [15] SUN Y, ZHANG Y, SONG H. Variation of aroma components during frozen storage of cooked beef balls by SPME and SAFE coupled with GC-O-MS [J]. Journal of Food Processing and Preservation. 2021, 45: e15036.
- [16] BLOCK E, AHMAD S, JAIN M K, et al. The Chemistry of alkyl thiosulfate esters. 8. (E,Z)-Ajoene: a potent antithrombotic agent from garlic [J]. Journal of the American Chemical Society, 1984, 106(26): 8295-8296.
- [17] ZHANG Z, WANG B, CAO Y. Effect of Maillard reaction products derived from cysteine on the formation of dimethyl disulfide and dimethyl trisulfide during storage [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(35): 13043-13053.
- [18] CHOE E, MIN D B. Mechanisms and factors for edible oil oxidation [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2006, 5(4): 169-186.
- [19] FRANK D, POOLE S, KIRCHHOFF S, et al. Investigation of sensory and volatile characteristics of farmed and wild barramundi (*Lates calcarifer*) using gas chromatography-olfactometry mass spectrometry and descriptive sensory analysis [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(21): 10302-10312.
- [20] CHMIEL M, ROSZKO M, HAC-SZYMANCZUK E, et al. Time evolution of microbiological quality and content of volatile compounds in chicken fillets packed using various techniques and stored under different conditions [J]. Poultry Science, 2020, 99(2): 1107-1116.
- [21] YANG W, CADWALLADER K R, LIU Y, et al. Characterization of typical potent odorants in raw and cooked *Toona sinensis* (A. Juss.) M. Roem. by instrumental-sensory analysis techniques [J]. Food Chemistry, 2019, 282: 153-163.
- [22] BLOCK E, SHU H Z. Onion essential oil chemistry. Cis-and trans-2-mercapto-3,4-dimethyl 2,3-dihydrothiophene from pyrolysis of bis(1-propenyl) disulfide [J]. Tetrahedron Letters, 1990, 31(35): 4999-5002.
- [23] FORS S. Sensory Properties of Volatile Maillard Reaction Products and Related Compounds [M]. American Chemical Society, 1983: 215, 185-286.
- [24] LANCKER F V, ADAMS A, KIMPE N D. Impact of the N-terminal amino acid on the formation of pyrazines from peptides in Maillard model systems [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(18): 4697-4708.
- [25] JOUSSE F, JONGEN T, AGTEROF W, et al. Simplified kinetic scheme of flavor formation by the Maillard reaction [J]. Journal of Food Science, 2002, 67(7): 2534-2542.
- [26] XIE Q, XU B, XU Y, et al. Effects of different thermal treatment temperatures on volatile flavour compounds of water-boiled salted duck after packaging [J]. LWT, 2022, 154: 112625.
- [27] 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.
- [28] CAI Z, RUAN Y, HE J, et al. Effects of microbial fermentation on the flavor of cured duck legs [J]. Poultry Science, 2020, 99(9): 4642-4652.
- [29] MIN D B S, INA K, PETERSON R J, et al. The alkylbenzenes in roast beef [J]. Journal of Food Science, 1977, 42(2): 503-505.
- [30] WATANABE A, KAMADA G, IMANARI M, et al. Effect of aging on volatile compounds in cooked beef [J]. Meat Science, 2015, 107: 12-19.
- [31] VANDAMME E J, SOETAERT W. Bioflavours and fragrances via fermentation and biocatalysis [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2002, 77(12): 1323-1332.
- [32] PRIOLO A, CORNU A, PRACHE S, et al. Fat volatiles tracers of grass feeding in sheep [J]. Meat Science, 2004, 66(2): 475-481.
- [33] GEMERT L J V. Odour Thresholds: Compilations of Odour Threshold Values in Air, Water and Other Media [M]. Oliemans Punter & Partner BV, Utrecht, the Netherlands, 2011.
- [34] WU C, LIU J, ZHAO P, et al. Evaluation of the chemical composition and correlation between the calculated and measured odour concentration of odorous gases from a landfill in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2017, 164: 337-347.