DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251201001
引用格式: 陈思颖, 张馨予, 张淼. 卤制时间对牛肉品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 152–160.
CHEN SY, ZHANG XY, ZHANG M. Study on influences of braising time on the quality of beef [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 152–160. (in Chinese with English abstract).

卤制时间对牛肉品质的影响

陈思颖, 张馨予, 张　淼*

(四川旅游学院烹饪与食品科学工程学院, 成都　610100)

摘　要: 目的　研究不同卤制时间对牛肉品质的影响。**方法**　本研究将牛肉进行卤制时间 30、40、50、60 min, 分别对各卤制时间下所得的牛肉进行色差(L^*、a^*、b^*)、蒸煮损失、质构、感官、挥发性风味物质指标分析。**结果**　L^*、a^*和 b^*随着卤制时间的增加均呈现先增加后减小的变化规律。弹性、硬度、咀嚼性这 3 个质构特征随着卤制时间的增加也出现先增加后减小的变化规律。卤牛肉的蒸煮损失率随时间的延长整体呈现先减小后增大的变化规律。随着时间的增加, 卤牛肉色泽、香气的感官评价得分均先大幅度增加后趋于平缓, 卤牛肉滋味、口感的感官评价得分则随着时间的增加先大幅度增加后略有减少。卤制 50 min 所得牛肉感官评价结果最佳。醇类、醛类、醚类在 4 种卤制时间制得的牛肉中含量均较高, 其中占比最高的是醚类物质, 它是卤牛肉的主要风味物质。**结论**　随着卤制时间的增加, 卤牛肉的色差、质构、蒸煮损失率、感官评价、挥发性风味物质指标都有不同的变化规律。这为建立不同卤制时间下所得牛肉品质识别模型提供前期基础, 为卤制牛肉的加工工艺选择以及条件优化提供完整科学的分析方法与理论依据, 也有助于餐饮行业以及消费者做出更美味且健康的卤制牛肉产品。

关键词: 卤牛肉; 蒸煮损失率; 感官评价; 质构分析; 挥发性风味成分

Study on influences of braising time on the quality of beef

CHEN Si-Ying, ZHANG Xin-Yu, ZHANG Miao*

(*Culinary and Food Science Engineering Department*, *Sichuan Tourism College*, *Chengdu* 610100, *China*)

ABSTRACT: Objective　To investigate the effects of different braising times on the quality of beef. **Methods**　In this study, beef was marinated for 30, 40, 50 and 60 minutes. The beef obtained at each braising time was analyzed for color difference (L^*, a^*, b^*), cooking loss, texture, sensory evaluation and volatile flavor compounds. **Results**　The L^*, a^*, b^* all increased first and then decreased with the increase of braising time. The texture characteristics of elasticity, hardness and chewiness also showed an initial increase followed by a decrease as the braising time increased. The cooking loss rate of braised beef decreased first and then increased with the extension of time. With the increase of time, the sensory evaluation scores for the color and aroma of braised beef increased sharply at first and then leveled off. The sensory evaluation scores for the taste and texture of braised beef increased sharply at first and then slightly

收稿日期: 2025-12-01
基金项目: 肉类加工四川省重点实验室开放基金项目(24-R-07); 四川旅游学院大学生创新训练项目(202311552102)
第一作者: 陈思颖(2003—), 女, 主要研究方向为食品加工技术。E-mail: 1489323925@qq.com
***通信作者:** 张淼(1984—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为食品加工与检测技术。E-mail: 414137715@qq.com

decreased. Overall, the sensory evaluation results were the best for beef marinated for 50 minutes. The detection of volatile flavor compounds revealed that alcohols, aldehydes and ethers were present in high amounts in beef marinated for all 4 kinds of times. Among them, ethers had the highest proportion and were the main flavor compounds of braised beef. **Conclusion** With the increase of braising time, the color difference, texture, cooking loss rate, sensory evaluation and volatile flavor substance indicators of braised beef all show different changing patterns. This provides a preliminary foundation for establishing a quality identification model of beef obtained under different braising times, offers a complete and scientific analysis method and theoretical basis for the selection of processing techniques and condition optimization of braised beef, and also helps the catering industry and consumers to produce more delicious and healthy braised beef products.

KEY WORDS: braised beef; boiling loss rate; sensory evaluation; texture analysis; volatile flavor compounds

0　引　言

牛肉因其被营养学家称为“肉中之王”, 且含有较多人体所需的关键微量元素, 具有低脂肪、高蛋白、高营养价值等特点, 以及可防止缺铁性贫血、减肥增肌、增强免疫力、调理脾胃、强健骨骼等特性倍受到国人青睐[1−2]。由于卤牛肉具有细腻的口感、醇厚的香气, 且相较于其他产品可以极大程度地保留牛肉的营养价值, 因此受到很多消费者关注, 其具有广阔的消费市场, 且成为了消费市场的主流产品[3−4]。

目前国内不同工艺条件或加工方式对卤牛肉品质的影响的相关研究较多。如冯美琴等[5]基于美拉德反应分析加工过程中酱牛肉风味物质变化, 时振华等[6]研究了超声波/超高压结合低温真空烹饪对卤牛肉品质的影响, 蔡华珍等[7]分析了多频复合超声真空煮制对卤牛肉肌纤维结构及保水性的影响, 陈龙[8] 研究了酱卤牛肉加工新工艺及其杀菌保藏品质研究, 李素等[9]探究了加工工艺对酱牛肉蛋白质结构和水分分布的影响, 这些研究中牛肉大多是在香辛料未粉碎的基础上进行卤制的。卤制时间在牛肉卤制过程是非常重要的参数, 直接影响卤牛肉的品质, 目前对于卤制时间对牛肉品质造成的变化及其规律方面的研究较少。

本研究在前期香辛料粉碎目数的研究基础上, 选择效果最好的 5 目香辛料作为卤制辅料, 选取牛腱肉作为原料, 分别卤制 30、40、50、60 min 得到样品。分别测定 4 组样品的色差(L^*、a^*、b^*)、质构特性、蒸煮损失率、感官评分以及风味物质, 探究卤牛肉各指标随着卤制时间增加的变化规律。为建立不同卤制时间下所得牛肉品质识别模型提供前期基础, 为卤制牛肉的加工工艺选择以及条件优化提供完整科学的分析方法与理论依据, 也有助于餐饮行业以及消费者做出更美味且健康的卤制牛肉产品。

1　试验与方法

1.1　材料与试剂

牛腱肉, 香叶、八角、桂皮、小茴香、花椒、干辣椒、黄豆酱、老抽、生抽、冰糖、料酒、小葱、大葱、姜片、大蒜购买于成都市龙泉驿区永辉超市万达广场店。

1.2　仪器与设备

GCMS-QP2010Ultra 气相色谱质谱联用仪、SH-Rtx-Wax 毛细管柱(30 m×0.32 mm, 0.25 μm)(日本岛津公司); 57328-U 固相微萃取头[50/30 μmDVB/CAR/PDMS StableFlex/SS(1 CM)Gray](美国 Supelco 公司); TMS-PRO 型电子天平(精度 0.1 mg, 深圳市林涛仪器有限公司); TMS-PRO 型质构仪(美国 FTC 公司); DC-P3 新型全自动测色色差计(北京兴光测色仪器有限公司)。

1.3　试验方法

加工工艺: 原料验收→牛肉预处理→香辛料预处理→原料、辅料的准备→牛肉焯水→配制卤汁→牛肉卤制→成品。操作要点: 卤汁配方。香叶 1.5 g、桂皮 4.5 g、八角 5.5 g, 上述香辛料的克重均为打碎后经过 5 目筛子筛出的克重, 小茴香 2 g、花椒 2 g、干辣椒 5 g、大蒜 25 g、生抽 45 g、老抽 25 g、黄豆酱 25 g、冰糖 15 g、清水 2500 g 调配卤水; 选取无异味无腐败的牛腱肉于常温解冻, 剔除表面多余的筋膜, 用清水洗去表面血水, 分割成 4 份, 每份约 100 g[10]; 生姜 8 g、小葱 10 g、料酒 20 g 焯水处理 10 min; 香叶、小茴香、桂皮、花椒、八角、干辣椒需放入香料袋中; 卤水配制好了需等其烧开后再加入焯水后的牛肉; 以卤制时间 30 min 为基础, 逐级递增卤制时间, 每个 10 min 取一次样, 共取 3 次, 得到卤制 30、40、50、60 min 的卤牛肉成品。

1.4　检测方法

1.4.1　色泽测定

根据 HUMADA 等[11]的研究方法稍作修改, 首先对仪器白板较准, 准备工作做好后进入测试。取长宽各 2.0 cm 高 1.5 cm 的卤牛肉, 放在自然光线充足的平面, 镜头垂直于牛肉切面且紧贴牛肉, 每个时间点的卤牛肉选用不同区域测 3 次, 记录每次测得的 L^*、a^*、b^*[12]。其中 L^*表示明度指数; a^*表示红绿色度指标; b^*表示黄蓝色度指标。

1.4.2 质构测定

根据刘丹丹等[13]的研究方法稍作修改，将卤牛肉样品分割成 2.0 cm×2.0 cm×1.5 cm 的形状放于仪器置物台，选取 P/36(圆柱型平底探头)的探头型号，设置距离 25 mm，起始力 0.38 N，测定时间间隔 5 s，压缩比 50%，测前速度 60 mm/min，测试速度 30 mm/min，测后速度 60 mm/min，测定样品的硬度、黏附性、内聚性、弹性、胶黏性和咀嚼性，每个样品均进行 3 次平行测定。

1.4.3 蒸煮损失率测定

参考 LI 等[14]的实验方法稍作修改，每个时间组选取 3 份质量相近约 100 g 的牛肉样品，称得的质量记作 m_1 (g)，卤制完毕将卤牛肉晾凉至室温，吸去表面水分，称取的样品质量记作 m_2 (g)，每个样品重复测定 3 次取平均值。蒸煮损失率公式(1)如下。

$$蒸煮损失率/\%=(m_1-m_2)/m_1\times100\% \quad (1)$$

1.4.4 感官评价

参考莫桐桐等[15]的方法稍作修改，制定出感官评价标准。将卤制好的牛肉切分成 2.0 cm×2.0 cm×1.5 cm 的块状，邀请 20 名食品质量与安全专业的学生进行感官评价，其中男女各一半。感官评价标准见表 1。

表 1 感官评价标准表

Table 1 Table of sensory evaluation criteria

项目	评分标准	评分/分
色泽 (20 分)	色泽均匀，呈红棕色，有光泽	15~20
	色泽较均匀，颜色较浅，少量光泽	7~14
	色泽不均匀，无光泽	1~6
香味 (20 分)	香味浓郁，无牛肉腥味	15~20
	香味略微浓郁，有较淡的牛肉腥味	7~14
	有较淡香味，牛肉腥味较重	1~6
滋味 (30 分)	肉味卤味醇厚、咸淡适中，回味无穷	21~30
	肉味卤味较轻，无异味	11~20
	肉味卤味不足，咸味过淡或过重	1~10
口感 (30 分)	软硬适中，有嚼劲	21~30
	口感较硬或较软，咀嚼性一般	11~20
	口感过硬或过软，无嚼劲	1~10

1.4.5 气相色谱-质谱法测定

运用顶空固体微萃取气质联用法分析 4 种卤牛肉样品的香气成分，相关条件可参照文献[16]。

(1)萃取条件

卤牛肉样品粉碎后称取 3.00 g 于采样瓶中，旋紧瓶盖，插入萃取头，在 60 ℃顶空萃取 55 min 取出，快速移出萃取头并立即插入进样口(温度 280 ℃)中，热解吸 5 min。

(2)色谱条件

色谱柱: HP-INNOWAX (30 m×0.25 mm, 0.25 μm)，柱箱初温 45 ℃，进样温度 240 ℃，在压力 51.6 kPa 下进样，柱流量为 1.00 mL/min，分流比为–1.0；柱温箱升温的程序为 45 ℃维持 3 min 后，以 3 ℃/min 的速度升温至 180 ℃维持 3 min 后,再以 12 ℃/min 的速度升温到 220 ℃维持 3 min。

(3)质谱条件

电子电离源，离子源的温度为 200 ℃，接口的温度为 240 ℃；溶剂延迟时间为 3.00 min; MS 开始时间为 3.50 min，结束时间为 57.00 min，间隔 0.30 sec；质量扫描范围为 m/z 35~500。

定性：样品中的挥发性成分经计算机检索，根据其保留时间计算其保留指数(retention index，RI)，同时与 NIST 2011 数据库进行匹配，再与文献值相比较定性。

定量：峰面积归一法测算各化学成分的相对含量。

1.5 数据处理

对测定样品的数据，使用 Excel 2016 对实验数据进行处理，在执行统计模型时候，采用单因素方差分析，显著性水平设置为 0.05，结果以平均值±标准偏差的形式表示。用 IBM SPSS Statistics 27.0 软件进行 Pearson 相关性分析，采用 Duncan 法对质构数据和感官数据进行差异性分析。数据使用 Origin 2022 作图。

2 结果与分析

2.1 卤牛肉色差分析

利用色差仪对 4 种卤制时间所得牛肉的色差 L^*、a^* 和 b^*进行测量，平行测定 3 次，得出色差平均数据见表 2。从表 2 可知，不同的卤牛肉样品的 a^*具有显著性差异(P<0.05)。卤制 40 min、60 min 所得牛肉样品的 L^*呈现显著性差异(P<0.05)，而卤制 30 min、50 min 所得牛肉样品的 L^*无显著性差异(P>0.05)。卤制 30 min、40 min 所得牛肉样品的 b^*呈现显著性差异(P<0.05)，而卤制 50 min、60 min 所得牛肉样品的 b^*无显著性差异(P>0.05)。L^*、a^*和 b^*随着卤制时间的增加均呈现先增加后减小的变化规律。其中，卤制 50 min 所得牛肉样品的 a^*高于其他组，表明此卤制时

表 2 不同卤制时间所得牛肉的色差对比分析表

Table 2 Table of comparison of color differences in beef obtained at different braising times

卤制时间/min	L^*	a^*	b^*
30	49.92±0.39^{b}	6.77±0.25^{d}	15.69±0.27^{b}
40	53.36±1.10^{a}	7.25±0.21^{c}	16.77±0.23^{a}
50	49.09±0.48^{b}	9.18±0.16^{a}	14.97±0.17^{c}
60	45.60±0.81^{c}	8.51±0.22^{b}	14.94±0.14^{c}

注：同一列中不同的小写字母标示差异显著(P<0.05)，表 3~5 同。

间下的产品更鲜艳。卤制 40 min 所得牛肉样品的 L^*和 b^*均高于其他组, 表明此卤制时间下的产品亮度和色度更高。这可能是卤制初期色素的渗透作用导致样品中黄色、红色成分增加, 表面色素逐渐均匀, 反射率增加导致明度增加, 而随着卤制时间的增加, 过度的美拉德反应、焦糖化反应以及色素沉淀导致样品颜色变深, 明度降低[17]。

2.2　卤牛肉质构分析

卤牛肉品质以弹性、硬度、咀嚼性等作为反映指标, 弹性反映卤牛肉样品在受到压缩后恢复到原来形状的能力; 硬度反映使卤牛肉样品形变所需要的力; 内聚性反映卤牛肉样品抗损伤和保持表皮完整性的能力; 咀嚼性反映卤牛肉样品抵抗连续咀嚼的能力; 胶黏性反映卤牛肉样品从开始咀嚼到能够吞咽的状态所需的能量。

4 种卤制时间所得牛肉的质构特性见表 3, 从表 3 可看出内聚性、胶黏性在不同卤牛肉样品之间无显著性差异(P>0.05), 卤制 30、40、50 min 所得牛肉弹性、硬度、咀嚼性在不同样品之间无显著性差异(P<0.05), 在卤制 60 min 时具有显著性差异(P<0.05)。弹性、硬度、咀嚼性这 3 个质构特征随着卤制时间的增加均呈先增加后减小的变化规律。这可能是卤制初期, 牛肉中的水分开始流失, 减少了肌肉纤维之间的空隙加强了牛肉的弹性, 蛋白质变性、肌肉纤维收缩导致牛肉质地更加紧实, 增强了牛肉的硬度和咀嚼性, 而随着卤制时间的增加, 蛋白质进一步降解、肌肉纤维结构受到破坏、牛肉中的水分重新分布, 部分水分重新渗透到肌肉纤维中, 使得牛肉质地变得柔软, 其弹性、硬度、咀嚼性也相应降低[18]。

表 3　不同卤制时间所得牛肉的质构特性

Table 3　Texture characteristics of beef with different braising times

卤制时间/min	内聚性/%	弹性/mm	硬度/N	胶黏性/N	咀嚼性/mJ
30	0.52±0.04^{a}	4.70±0.41^{b}	85.19±5.86^{b}	53.27±7.29^{a}	230.37±31.88^{b}
40	0.55±0.03^{a}	4.81±0.21^{b}	96.97±4.57^{ab}	54.08±3.74^{a}	265.52±19.10^{b}
50	0.50±0.02^{a}	5.97±0.21^{a}	110.71±5.80^{a}	53.38±4.40^{a}	358.92±32.14^{a}
60	0.47±0.03^{a}	5.36±0.51^{ab}	88.30±8.89^{b}	41.86±3.54^{a}	224.34±28.55^{b}

2.3　卤牛肉蒸煮损失率分析

蒸煮损失率是反映肌肉保水能力的指标之一, 在肉类的多汁性和加工特性方面有重要影响[19]。不同卤制时间所得牛肉的蒸煮损失率结果见表 4。由表 4 可以看出, 卤制 30 min、60 min 所得牛肉的蒸煮损失率之间无显著差异(P>0.05)。卤制 40 min、50 min 所得牛肉的蒸煮损失率之间无显著差异(P>0.05)。卤牛肉的蒸煮损失率随时间的延长整体呈现先减小后增大的变化规律。可能是卤制初期蛋白质逐渐发生变性使蛋白质结构更加紧密和稳定, 卤水成分渗透到牛肉内部与蛋白质形成氢键增强了蛋白质的保水能力以及肌肉纤维收缩减少了水分的流失导致蒸煮损失率逐渐减小, 而随着卤制时间的增加, 蛋白质进一步变性导致其结构松散, 卤水成分渗透饱和以及肌纤维结构被破坏导致蒸煮损失率增加[20]。

2.4　卤牛肉感官评价分析

无论卤牛肉的食品品质特性的科学基础如何, 最终还是需要食用者来决定, 所以感官评价的采集也是探究卤牛肉品质至关重要的一环。理想状态的卤牛肉应呈现自然的红棕色且表面光泽, 具有浓郁的卤香、肉香, 口感软硬适中, 具有一定的嚼劲。

不同卤制时间下所得牛肉的感官评分结果见表 5, 雷达图见图 1。由表 5 可以看出, 当卤制时间为 30 min、40 min 时, 卤牛肉色泽、香味、滋味的评分具有显著性差异(P<0.05)。当卤制时间为 50 min、60 min 时, 卤牛肉色泽、香味、滋味的评分不具有显著性差异(P>0.05)。而 4 种卤牛

表 4　不同卤制时间所得牛肉的蒸煮损失率表

Table 4　Table of cooking loss rates of beef with different braising times

卤制时间/min	蒸煮损失率/%
30	46.8±0.3^{a}
40	45.8±0.5^{b}
50	45.1±0.4^{b}
60	46.7±0.3^{a}

表 5　卤牛肉感官评价得分表

Table 5　Table of sensory evaluation scores of braised beef

卤制时间/min	指标/分				总分/分
	色泽	香味	滋味	口感	
30	12.85±1.19^{c}	15.45±0.74^{c}	25.20±0.68^{c}	23.95±1.07^{d}	77.45±2.16^{c}
40	13.75±0.99^{b}	16.05±0.74^{b}	27.20±0.75^{b}	25.95±1.24^{c}	82.95±1.75^{b}
50	18.65±0.85^{a}	18.35±0.79^{a}	28.25±0.83^{a}	27.35±0.91^{a}	92.60±1.96^{a}
60	18.80±1.08^{a}	18.70±0.78^{a}	28.00±1.00^{a}	26.65±0.96^{b}	92.15±1.80^{a}

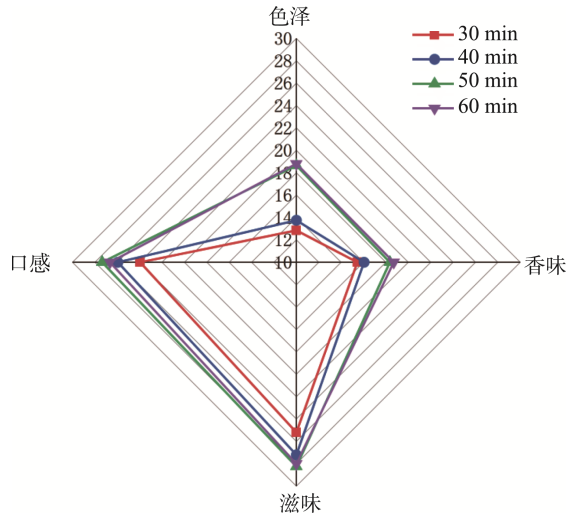


图 1 感官评价结果的雷达图

Fig.1 Radar chart of sensory evaluation results

肉口感的评分均具有显著性差异(P<0.05)。结合图 1 分析，卤制 50 min、60 min 所得牛肉感官结果均优于卤制 30 min、40 min 所得牛肉，随着时间的增加，卤牛肉色泽、香气的感官评价得分均先大幅度增加后趋于平缓。而卤牛肉滋味、口感的感官评价得分随时间的增加先大幅度增加后略有减少。这可能是因为，卤制初期卤水中色素成分、香料成分的快速释放以及美拉德反应的快速启动导致卤牛肉各感官指标快速增加，而随着卤制时间的增加各化学反应、渗透作用的饱和导致各指标趋于平缓或在饱和值上下波动[21]。从总体得分来看，卤制 50 min 所得牛肉为最佳。

2.5 卤牛肉香气物质的 GC-MS 分析

4 种卤制时间制得的卤牛肉挥发性风味物质的种类和相对含量见表 6，挥发性物质的测定结果见表 7。

表 6 卤牛肉中挥发性物质种类及相对含量

Table 6 Types and relative contents of volatile compounds in braised beef

物质种类	卤制 30 min		卤制 40 min		卤制 50 min		卤制 60 min	
	数量	相对含量/%	数量	相对含量/%	数量	相对含量/%	数量	相对含量/%
醛类	9	23.00	11	29.73	8	28.09	10	28.76
醇类	6	13.99	5	12.18	5	10.14	5	8.51
酯类	1	0.52	3	0.87	3	1.12	1	0.77
烯烃类	3	4.13	5	5.17	5	7.07	4	3.88
酮类	6	3.27	3	1.39	4	1.94	2	0.74
酸类	2	1.37	6	4.95	1	3.44	3	0.74
醚类	1	0.22	1	0.15	2	0.39	2	0.37
酚类	2	43.58	2	40.24	2	40.8	2	44.1
其他	3	5.39	4	2.52	4	3.84	7	2.53
合计	33	95.47	40	97.2	34	96.83	36	90.4

表 7 卤牛肉中挥发性物质测定结果

Table 7 Determination results of volatile compounds in braised beef

种类	中文名称	相对含量/%			
		卤制 30 min	卤制 40 min	卤制 50 min	卤制 60 min
醛类	十五烷醛	0.21	0.40	0.36	0.52
	十四烷醛	-	0.24	0.44	0.31
	壬醛	1.42	1.69	0.96	1.06
	己醛	0.20	0.94	0.27	0.44
	苯甲醛	11.41	14.45	15.73	15.77
	苯丙醛	0.68	0.64	0.72	0.61
	4-甲氧基-苯甲醛	3.78	4.19	4.20	4.06
	2-甲氧基-苯甲醛	0.10	0.13	-	0.21
	13-甲基十四烷醛	-	0.48	-	0.65
	(*E*)-肉桂醛	5.14	6.33	5.41	5.13
	(*E*)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	0.06	-	-	-
	辛醛	-	0.24	-	-

表 7(续)

种类	中文名称	相对含量/%			
		卤制 30 min	卤制 40 min	卤制 50 min	卤制 60 min
醇类	芳樟醇	4.39	3.38	2.87	2.85
	桉叶醇	6.77	6.55	5.48	4.13
	α-萜品醇	2.33	1.65	1.41	1.29
	1-辛烯-3-醇	0.26	0.27	0.15	0.10
	1-辛醇	-	0.33	0.23	-
	(1*α*, 2*α*, 5*α*)-2-甲基-5-(1-甲基乙基)二环[3.1.0]己-2-醇	0.18	-	-	-
	2-乙基-1-己醇	0.06	-	-	-
	3-苯基-2-丙烯-1-醇	-	-	-	0.14
酯类	*α*-乙酸松油酯	0.52	0.57	0.62	0.77
	2-羟基戊酸甲酯	-	0.05	0.04	-
	1,2-乙二醇二乙酸酯	-	0.25	-	-
	苯乙酸辛酯	-	-	0.46	-
烯烃类	苯乙烯	2.08	1.38	1.73	1.24
	γ-萜品烯	-	0.32	0.65	0.15
	β-月桂烯	-	0.98	1.31	-
	D-柠檬烯	1.77	2.12	3.17	2.17
	[*R*-[*R**, *R**-(*E*)]]-3,7,11,15-四甲基-2-十六碳烯	0.28	0.37	0.21	-
	3,7,11,15-四甲基十六烷-2-烯	-	-	-	0.32
酮类	葑酮	0.21	0.48	0.18	-
	d-香芹酮	0.68	0.45	0.44	0.41
	6-甲基-5-庚烯-2-酮	1.17	0.46	0.72	0.33
	1-(4-甲氧基苯基)-2-丙酮	0.31	-	-	-
	乙偶姻	0.76	-	0.60	-
	2,6-二叔丁基-4-羟基-4-甲基环己-2,5-二烯-1-酮	0.14	-	-	-
酸类	己酸	-	0.25	-	0.27
	辛酸	-	0.21	-	0.17
	二乙基-乙酸	0.21	0.07	-	-
	山梨酸	-	0.11	-	0.30
	二十碳六烯酸	1.16	4.11	3.44	-
	β-苯丙氨酸	-	0.20	-	-
醚类	茴香脑	34.78	33.05	33.31	35.77
	草蒿脑	8.80	7.19	7.49	8.33
酚类	甲基丁香酚	0.22	0.15	0.15	0.14
	2-甲氧基-3-(2-丙烯基)苯酚	-	-	-	0.23
	丁香酚	-	-	0.24	-
其他	香豆素	0.56	0.78	0.92	1.11
	甲氧基苯基-肟	1.01	0.52	0.61	0.48
	丁基羟基甲苯	3.82	0.75	2.32	0.48
	1-甲基-3-(1-甲基乙基)-苯	-	0.47	-	-
	2-甲基十六烷	-	-	0.09	-
	二氢异苯并呋喃	-	-	-	0.13
	十五烷	-	-	-	0.13
	2,6,10,14-四甲基-十六烷	-	-	-	0.11
	十四烷	-	-	-	0.09

注: -表示无含量。

利用 GC-MS 共检测到 56 种挥发性风味成分, 其中包括 8 种醇类物质, 12 种醛类物质, 6 种烯烃类物质, 4 种酯类物质, 6 种酸类物质, 2 种醚类物质, 3 种酚类物质, 6 种酮类物质, 以及 9 种其他化合物。其中醛类和醇类物质的种类最多, 高达 12 和 8 种, 证明来源于脂质氧化产生的醛类和醇类物质占据了主要地位, 为增加卤牛肉风味的主要物质种类, 贡献了较大的香气值。卤制 30 min 所得卤牛肉样品共检测出 33 种风味物质, 其中主要是相对含量分别为

23.0%、43.58%、13.99%的醛类、醚类、醇类; 卤制 40 min 所得卤牛肉样品共检测出 40 种挥发性风味物质, 其中主要是相对含量分别为 29.73%、40.24%、12.18%的醛类、醚类、醇类; 卤制 50 min 所得卤牛肉样品共检测出 34 种挥发性风味物质, 其中主要是相对含量分别为 28.09%、40.8%、10.14%的醛类、醚类、醇类; 卤制 60 min 所得卤牛肉样品共检测出 36 种挥发性风味物质, 其中主要是相对含量分别为 28.76%、44.1%、8.51%的醛类、醚类、醇类。其中醚类的相对含量最大, 证明醚类是主要的风味贡献物。

2.5.1 醛类物质

醛类化合物主要是由不饱和脂肪酸分解产生, 通常具有较低的阈值和浓郁的香味[22]。由表 7 可知, 苯甲醛在各样品所含醛类物质中占比均较高, 其中在卤制 30 min 的牛肉中相对含量为 11.41%; 在卤制 40 min 的牛肉中相对含量为 14.45%; 在卤制 50 min 的牛肉中相对含量为 15.73%; 在卤制 60 min 的牛肉中相对含量为 15.77%。由此可以看出随着卤制时间的增加, 苯甲醛的含量也在增加。苯甲醛具有特殊的苦杏仁味, 这种气味在低浓度时可以为风味增加复杂性和层次性, 但在高浓度下可能会变得过于刺激[23]。仅次于苯甲醛含量的是(*E*)-肉桂醛也叫反式肉桂醛, 它具有浓郁的肉桂香气, 在低浓度下可以为卤牛肉增添独特的香气[24]。其在 4 种卤制时间制得的牛肉中的含量分别是 5.14%、6.33%、5.41%、5.13%。由此可以看出随着卤制时间的增加, 反式肉桂醛的含量呈现先增加后缓慢减少的变化规律。其余的醛类物质, 如壬醛、己醛等, 均具有令人愉快的香味, 虽然含量较少, 但也能对卤牛肉的风味起到一定的作用。从整体分析, 随着卤制时间的增加, 醛类物质含量走势趋于缓慢上升。这可能是因为随着卤制时间的延长, 牛肉中的蛋白质分解产生氨基酸, 氨基酸参与美拉德反应生成醛类物质[25]。

2.5.2 醇类物质

醇类物质通常具有较高的阈值, 当浓度足够高时可对风味起到重要作用[26]。由表 7 可知, 随着卤制时间的增加, 醇类物质含量呈现逐渐减少的变化规律。这可能是因为醇类物质具有较高的挥发性, 在卤制过程中, 醇类物质容易随着水蒸气逸散到空气中从而导致其含量减少[27]。在这些醇类物质中, 桉叶醇在各样品所含醇类物质中占比均较高, 在卤制 30 min 的牛肉中相对含量为 6.77%; 在卤制 40 min 的牛肉中相对含量为 6.55%; 在卤制 50 min 的牛肉中相对含量为 5.48%; 在卤制 60 min 的牛肉中相对含量为 4.13%。桉叶醇具有樟脑和清凉的中药香气[28], 仅次于桉叶醇的是芳樟醇, 其具有柑橘、萜香、花香、青香以及木香[29], 有助于提升卤牛肉整体的风味层次。其余醇类物质 1-辛醇、*α*-萜品醇等也能为卤牛肉提供特殊风味。

2.5.3 醚类物质

由表 7 可知, 随着卤制时间的增加, 物质种类不变, 相对含量先减小后增加。这可能是因为卤制前期醚类物质具有较高的挥发性会随着水蒸气逸散到空气中, 且醚类物质在高温下会发生热分解转化为其他化合物导致含量减少, 卤制后期由于香辛料中醚类物质的进一步释放以及化学反应的累计, 其含量增加[30]。醚类物质共检测出两种。一是茴香脑, 它具有甘草味和茴香味[24], 二是草蒿脑, 它具有大茴香似香气[31]。它们均能增加牛肉的醇厚感, 使整体风味更加丰富。

2.5.4 酸类物质

酸类物质通常阈值较高, 它们主要来自脂肪的水解与氧化。由表 7 可知, 不同时间制得的卤牛肉酸类物质含量在卤制 40 min 时最大, 卤制 60 min 时含量最小。由此可以得出, 随着卤制时间的增加, 酸类物质含量呈现先增加后减少的变化规律。虽然酸类物质挥发性较低, 但对肉味的形成有着重要作用[32]。酸类物质中含量最高的二十碳六烯酸本身是一种无臭、无味的化合物, 其在未氧化的状态下对风味的直接贡献值较小[33], 但其氧化物醛类、酮类等对卤牛肉的风味有着重要影响。

2.5.5 烯烃类物质

烯烃类物质主要来源于卤料中的香辛料[34]。由表 7 可知, 不同时间制得的卤牛肉烯烃类物质在卤制 50 min 时含量最大, 卤制 60 min 时含量最小。由此可以得出, 随着卤制时间的增加, 烯烃类物质含量呈现先增加后减少的变化规律。这可能是因为卤制初期牛肉中蛋白质分解、脂肪氧化导致其含量增加, 卤制后期烯烃类物质挥发逸散、与其他成分发生反应转化为其他化学物质导致其含量减少[30]。其中含量最高的 *D*-柠檬烯具有柑橘香味、药草香味。仅次于 *D*-柠檬烯的是苯乙烯, 其具有香脂味、松香[28]。其余烯烃类物质 *β*-月桂烯、*γ*-萜品烯等也能增添卤牛肉独特的风味层次。

2.5.6 酚类物质

酚类物质主要源于卤料中的香辛料。由表 7 可知, 随着时间的增加, 酚类物质含量呈现逐渐增加的趋势。这可能是由于香辛料的释放、脂肪氧化、蛋白质分解导致其含量逐渐增加[30]。4 种卤制时间的牛肉样品共测出了 3 种酚类物质, 分别是甲基丁香酚、2-甲氧基-3-(2-丙烯基)苯酚、丁香酚。甲基丁香酚的含量最高, 其具有丁香肉桂香气[35]。丁香酚含量第二, 其具有丁香、辛香[24]。虽然酚类物质的含量低, 但其特殊的气味能够提升卤牛肉的风味复杂性。

2.5.7 酮类、酯类物质

含量较少的酯类物质以及酮类物质, 如 *D*-香芹酮, 具有牛奶香气[36]的乙偶姻, 2-羟基戊酸甲酯, 具有清甜味、似香柠檬、薰衣草气息[37]的 *α*-乙酸松油酯等, 对于卤牛肉的整体风味也有着重要作用。由表 7 可知, 随着时间的增加酮类物质含量的变化趋势是逐渐减少, 而酯类物质呈现的是先增加后减少的变化规律。

2.5.8 其他类物质

含量极少的十五烷、十四烷等烷类物质, 可能来源于

脂肪酸的分解, 烷类物质大多无味, 但含量过高会导致卤牛肉风味变淡, 缺乏层次感[30]。物质中呋喃类化合物、肟类化合物可能来源于香辛料中的前体物质[38]。这些物质随着时间的增加, 呈现逐渐减少的变化趋势。

3　讨论与结论

通过对 4 种卤制时间所得的牛肉的各个指标分析检测发现: L^*、a^*和 b^*随着卤制时间的增加均呈现先增加后减小的变化规律。弹性、硬度、咀嚼性这 3 个质构特征随着卤制时间的增加均呈先增加后减小的变化规律。卤牛肉的蒸煮损失率随时间的延长整体呈现先减小后增大的变化规律。感官评价结果显示, 随着时间的增加, 卤牛肉色泽、香气的感官评价得分均先大幅度增加后趋于平缓。而卤牛肉滋味、口感的感官评价得分随时间的增加先大幅度增加后略有减少。从总体得分来看, 卤制 50 min 所得牛肉感官评价结果最佳。挥发性风味物质检测发现, 4 种卤制时间制得的牛肉共检测出了 56 种挥发性风味物质, 其中醇类、醛类、醚类在 4 种卤制时间制得的牛肉中含量均较高, 其中醚类物质占比最高, 是卤牛肉的主要风味物质。随着卤制时间的增加, 醛类物质含量走势趋于缓慢上升、醇类物质含量呈现逐渐减少的变化规律, 而醚类物质随着卤制时间的增加, 物质种类不变, 相对含量先减小后增加。

本研究得出了随着卤制时间的增加, 卤牛肉的蒸煮损失率、挥发性风味物质、色差、质构、感官评价指标的变化规律。上述结论均从宏观角度分析, 未来可进一步拓展研究范围从微观角度分析, 并探究微观结构与宏观品质特性之间的联系, 为精准控制牛肉品质提供更详细的理论依据。

参考文献

[1] 王美仁, 王柏辉, 杨帆, 等. 不同加工方式对牛肉干产品风味物质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 127–137.
WANG MR, WANG BH, YANG F, *et al*. Effects of different processing methods on flavor substances of beef jerky products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 127–137.

[2] 李素, 王守伟, 臧明伍, 等. 酱牛肉加工和杀菌过程中脂肪和气味活性成分变化[J]. 中国食品学报, 2024, 24(8): 357–370.
LI S, WANG SW, ZANG MW, *et al*. Changes of lipids and odor active components of sauce beef during processing [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(8): 357–370.

[3] 肖子涵. 卤制工艺的改良对酱卤牛肉品质影响的研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2021.
XIAO ZH. Study on the influence of the improvement of braising technology on the quality of spiced beef [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2021.

[4] 陈立业, 郭兆斌, 刘耀娜, 等. 不同卤制方式对酱牛肉营养品质和质构特性的影响[J]. 粮食科技与经济, 2019, 44(8): 104–107.
CHEN LY, GUO ZB, LIU YN, *et al*. Effect of different braising ways on nutritional quality and texture characteristic of sauce beef [J]. Food Science and Technology and Economy, 2019, 44(8): 104–107.

[5] 冯美琴, 曾晓庆, 孙健. 基于美拉德反应分析加工过程中酱牛肉风味物质变化[J]. 食品科学, 2024, 45(24): 139–149.
FENG MQ, ZENG XQ, SUN J. Changes in flavor substances of sauced beef during processing based on the Maillard reaction [J]. Food Science, 2024, 45(24): 139–149.

[6] 时振华, 唐道邦, 杨怀谷, 等. 超声波/超高压结合低温真空烹饪对卤牛肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 73–84.
SHI ZH, TANG DB, YANG HG, *et al*. Effect of ultrasound/ultra-high pressure combined with sous-vide cooking onthe quality of spiced beef [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 73–84.

[7] 蔡华珍, 戴泓宇, 陈建功, 等. 多频复合超声真空煮制对卤牛肉肌纤维结构及保水性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(4): 264–270.
CAI HZ, DAI HY, CHEN JG, *et al*. Effect of multifrequency ultrasonic-assisted vacuum cooking on the muscle fiber structure and water-holding capacity of stewed marinated beef [J]. Food Science, 2024, 45(4): 264–270.

[8] 陈龙. 酱卤牛肉加工新工艺及其杀菌保藏品质研究[D]. 成都: 成都大学, 2024.
CHEN L. Studies on the new processing technology of marinated beef and its sterilization and preservation quality [D]. Chengdu: Chengdu University, 2024.

[9] 李素, 王守伟, 朱宁, 等. 加工工艺对酱牛肉蛋白质结构和水分分布的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 74–80.
LI S, WANG SW, ZHU N, *et al*. Effect of processing technology on protein structure and water distribution of spiced beef [J]. Food Science, 2022, 43(7): 74–80.

[10] 贡慧, 杨震, 史智佳, 等. 不同熬煮时间对北京酱牛肉挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(10): 183–190.
GONG H, YANG Z, SHI ZJ, *et al*. Effect of different cooking times on volatile flavor components in Beijing spiced beef [J]. Food Science, 2017, 38(10): 183–190.

[11] HUMADA MJ, SAÑUDO C, SERRANO E. Chemical composition, vitamin E content, lipid oxidation, colour and cooking losses in meat from *Tudanca bulls* finished on semi-extensive or intensive systems and slaughtered at 12 or 14 months [J]. Meat Science, 2014, 96(2): 908–915.

[12] 屠明亮, 孟祥忍, 王恒鹏, 等. 循环卤煮过程中牛肉品质变化规律研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(5): 39–42.
TU ML, MENG XR, WANG HP, *et al*. Study on the quality changes of beef during the cyclic stewing [J]. China Condiment, 2022, 47(5): 39–42.

[13] 刘丹丹, 吴子健, 刘忠敏, 等. 滚揉方式对中式传统酱牛肉品质的影响[J]. 肉类研究, 2021, 35(7): 15–20.
LIU DD, WU ZJ, LIU ZM, *et al*. Effects of tumbling methods on quality of traditional Chinese sauced beef [J]. Meat Research, 2021, 35(7): 15–20.

[14] LI C, WANG DY, XU WM, *et al*. Effect of final cooked temperature on tenderness, protein solubility and micro structure of duck breast muscle [J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 51: 266–274.=-8

[15] 莫桐桐, 商海军, 闫晓明. 低盐酱牛肉的制作工艺及其品质研究[J]. 农产品加工, 2023(18): 37–41.
MO TT, SHANG HJ, YAN XM. Study on the preparation technology and quality of sauced beef with low salt [J]. Agricultural Products Processing, 2023(18): 37–41.

[16] 陈丽兰, 易宇文, 吴华昌, 等. GC-MS 结合电子鼻分析不同品牌郫县豆瓣对干煸牛肉品质的影响[J]. 中国调味品, 2022, 47(9): 39–43.
CHEN LL, YI YW, WU HC, *et al*. Analysis on effect of different brands of pixian bean paste on the quality of stir-fried beef by gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose [J]. China Condiment, 2022, 47(9): 39–43.

[17] 丁波, 代安娜, 顾利, 等. 卤制过程中牦牛肉品质的变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9): 171–175.
DING B, DAI ANN, GU L, *et al*. Study on yak meat quality changes in the process of braising [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(9):

171–175.

[18] 庾坤, 赵良忠, 尹世鲜, 等. 卤制工艺对湘味卤牛肉品质和风味的影响[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 217–226.
YU K, ZHAO LZ, YIN SX, *et al*. Effect of marinated process on the quality and flavor of Hunan flavor marinated beef [J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 217–226.

[19] 章海风, 周晓燕, 钤莉妍, 等. 煮制时间对驴肉不同部位食用品质的影响[J]. 美食研究, 2018, 35(4): 37–40.
ZHANG HF, ZHOU XY, QIAN LY, *et al*. Effect of stewing time on quality of donkey meat from different part [J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2018, 35(4): 37–40.

[20] 陈春梅, 周惠健, 沈银涵, 等. 煮制时间对鹅肉蛋白结构的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 6–11.
CHEN CM, ZHOU HJ, SHEN YH, *et al*. Effect of cooking time on the protein structure of goose meat [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 6–11.

[21] 强萌萌, 李磊, 李少觐. 酱卤肉定量卤制工艺研究[J]. 中国调味品, 2021, 46(11): 105–108.
QIANG MM, LI L, LI SJ. Study on quantitative braising technology of marinated meat products [J]. China Condiment, 2021, 46(11): 105–108.

[22] 王可. 不同部位青海高原型牦牛肉加工特性与加工适宜性研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2020.
WANG K. Study on processing characteristics and suitability of Qinghai plateau yak meat from different parts [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2020.

[23] 陈臣, 周洁, 周琦, 等. 杏仁中的香气化合物及其风味品质影响因素研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 320–329.
CHEN C, ZHOU J, ZHOU Q, *et al*. Research progress on aroma compounds in almonds and factors influencing its flavor quality [J]. Food Science, 2023, 44(19): 320–329.

[24] 阳丹, 陈小爱, 杨玉洁, 等. 基于电子鼻、HS-GC-IMS、HS-SPME-GC-MS 技术联用分析不同发酵年份老香黄挥发性成分差异[J]. 现代食品科技, 2022, 38(11): 313–323.
YANG D, CHEN XAI, YANG YJ, *et al*. Using E-nose, HS-GC-IMS, and HS-SPME-GC-MS to differentiate the volatile components of Lao Xianghuang fermented for different years [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(11): 313–323.

[25] 周琪, 张佳敏, 王博, 等. 肉制品风味形成机制及加工方式对风味影响的研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2024, 43(4): 74–84.
ZHOU Q, ZHANG JM, WANG B, *et al*. Research progress on the formation mechanism of meat flavor and the influence of processing methods on it [J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2024, 43(4): 74–84.

[26] 包陈力根, 关淳博, 辛明航, 等. HS-SPME-GC-MS 结合电子鼻分析烘烤对大球盖菇挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(14): 226–233.
BAO CLG, GUAN CB, XIN MH, *et al*. Effect of roasting on volatile flavor compounds of stropharia rugoso-annulata analyzed by headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose [J]. Food Science, 2022, 43(14): 226–233.

[27] 强宇, 姜薇, 刘成江, 等. 风冷与冷藏过程中酱卤牛肉风味逸散行为研究[J]. 中国农业科学, 2022, 55(16): 3224–3241.
QIANG Y, JIANG W, LIU CJ, *et al*. Flavor escape behavior of stewed beef with soy sauce during air-cooling and refrigeration [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(16): 3224–3241.

[28] 刘倩影, 张佳琪, 刘琛, 等. 桉叶油醇和α-松油醇复配对赤拟谷盗的抗虫作用机制研究[J]. 中国粮油学报, 2025, 40(2): 1–8.
LIU QY, ZHANG JQ, LIU C, *et al*. Insecticidal mechanism of eucalyptol and *α*-terpineol complex against *Tribolium castaneum* [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(2): 1–8.

[29] 侯晓慧, 张婷, 张萌, 等. 基于 GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 分析泾阳茯砖茶的特征风味物质[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 245–257.
HOU XH, ZHANG T, ZHANG M, *et al*. Identification of characteristic flavor substances of Jingyang Fu Brick Tea by gas chromatography-ion mobility spectrometry and headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Food Science, 2023, 44(14): 245–257.

[30] 潘晓倩, 周慧敏, 李素, 等. 卤牛肉贮藏过程中气味活性化合物变化及异味分析[J]. 食品科学, 2021, 42(22): 240–248.
PAN XQ, ZHOU HM, LI S, *et al*. Changes in odor-active compounds during storage and analysis of off-flavor substances in stewed marinated beef [J]. Food Science, 2021, 42(22): 240–248.

[31] 强宇. 香辛料对酱卤牛肉香气的赋香效应研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
QIANG Y. The impact of spices on aroma profile of stewed beefwith soy sauce [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural SciencesThesis, 2022.

[32] 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): 260–270.
HOU L, ZHAO J, ZHAO MY, *et al*. Analysis of the flavor compounds from stewed beef [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(9): 260–270.

[33] 刘佳琪, 王悦, 郑云方, 等. 迷迭香提取物中酚类物质对鳕鱼挥发性风味物质组成影响研究[C]. 北京: 中国食品科学技术学会, 2024.
LIU JQ, WANG Y, ZHENG YF, *et al*. Study on the effect of phenolics in rosemary extract on the composition of volatile flavor substances in Skipjack tuna fish [C]. Beijing: The Chinese Society for Food Science and Technology, 2024.

[34] 邓思敬, 杜磊, 谢静莉, 等. 发酵臭豆腐卤液的乳酸菌发酵菌种研究及香气成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(17): 107–113, 118.
DENG SJ, DU L, XIE JL, *et al*. Study of stinky Tofu brine fermented with lactic acid bacteria and the analysis of its aroma components [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(17): 107–113, 118.

[35] 汤酿, 刘静宜, 陈小爱, 等. 基于 GC-MS 和 GC-IMS 联用法分析不同采收期广佛手精油挥发性成分[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 193–202.
TANG N, LIU JY, CHEN XAI, *et al*. Analysis of volatile components in essential oil of fingered citrons *Citrus medica* L. var. sarcodactylis swingle harvested in Guangdong Province at different times by GC-MS and GC-IMS [J]. Food Science, 2021, 42(16): 193–202.

[36] 马宁原, 姚凌云, 孙敏, 等. 基于 GC-IMS 和 GC-MS 分析不同发酵方式对黄桃酒香气成分的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 306–314.
MA NY, YAO LY, SUN M, *et al*. Effect of different fermentation methods on aroma composition of yellow peach wine analyzed by gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food Science, 2023, 44(12): 306–314.

[37] 高夏洁, 高海燕, 赵镭, 等. SPME-GC-MS 结合 OAV 分析不同产区花椒炸花椒油的关键香气物质[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 208–214.
GAO XJ, GAO HY, ZHAO L, *et al*. Analysis of key aroma components in fried zanthoxylum bungeanum oil from different production areas by solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with odor activity value [J]. Food Science, 2022, 43(4): 208–214.

[38] 潘景芝, 朱双杰, 孟庆龙. 药食同源香辛料活性成分及功能特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(19): 499–511.
PAN JZ, ZHU SJ, MENG QL. Advances in active ingredients and functional characteristics frommedicine and food homology spices [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(19): 499–511.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)