

郭慧, 张宝雪, 孔玲, 等. 超声波辅助定量卤制对茶香味卤煮牛肉品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 107–115. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080330

GUO Hui, ZHANG Baoxue, KONG Ling, et al. Effect of Ultrasonic-assisted Quantitative Cooking on the Quality of Tea-flavored Stewed Beef[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 107–115. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080330

· 研究与探讨 ·

超声波辅助定量卤制对茶香味卤煮牛肉品质的影响

郭 慧¹, 张宝雪^{2,*}, 孔 玲², 熊国远^{2,3,*}, 蒲顺昌^{1,*}

(1.亳州学院生物与食品工程系, 安徽亳州 236800;

2.安徽农业大学茶与食品科技学院, 农业农村部江淮农产品精深加工与资源利用

重点实验室, 安徽省农产品加工实验室, 安徽合肥 230036;

3.安徽科技学院食品工程学院, 安徽滁州 233100)

摘 要: 为探究超声波辅助定量卤制对茶香味配方的牛肉品质的影响, 本文设置不同超声功率 (0、600、800、1000、1200 W) 辅助定量煮制方法卤制茶香味牛肉, 测定了牛肉的出品率、肉色、质构、电子鼻、游离氨基酸以及呈味核苷酸等。结果表明, 超声波辅助定量卤制可以提高茶香味卤制牛肉的出品率, 其中 800 W 的超声功率处理的牛肉出品率达到 80.77%, 且改善了卤制牛肉的质构特性, 对卤牛肉的 a^* 值和 b^* 值无显著影响 ($P>0.05$)。当超声功率大于 800 W 时会使卤牛肉的 a^* 值和 L^* 值显著减少, b^* 值显著增加 ($P<0.05$)。此外, 电子鼻的主成分分析表明超声处理和未经超声处理之间的香气风味存在差异, 不同功率处理组的茶香味卤煮牛肉风味也各有特色。不同超声功率处理卤牛肉中甘氨酸含量随超声功率的增加整体上呈先降低后增加趋势, 精氨酸随超声功率的增加呈先上升后下降的趋势, 且在 1000 W 时达到最大值。超声处理对茶香味卤煮牛肉的呈味核苷酸含量存在显著影响 ($P<0.05$), 尤其是肌苷含量在 800 W 时达到了最大值。另外, 800 W 超声处理组的感官评价得分也高于其他组别。综上, 在超声波功率 800 W 时, 定量卤制的茶香味卤牛肉具有最好的品质。

关键词: 超声波, 茶香味牛肉, 定量卤制, 滋味, 品质

中图分类号: TS251.55

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)15-0107-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080330



本文网刊:

Effect of Ultrasonic-assisted Quantitative Cooking on the Quality of Tea-flavored Stewed Beef

GUO Hui¹, ZHANG Baoxue^{2,*}, KONG Ling², XIONG Guoyuan^{2,3,*}, PU Shunchang^{1,*}

(1. Department of Biology and Food Engineering, Bozhou University, Bozhou 236800, China;

2. College of Tea & Food Science and Technology, Anhui Agricultural University, Key Laboratory of Agricultural Product

Fine Processing and Resource Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Anhui Engineering

Laboratory for Agro-products Processing, Hefei 230036, China;

3. College of Food Engineering, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, China)

Abstract: The effects of different ultrasonic powers (0, 600, 800, 1000 and 1200 W) assisted quantitative cooking on the quality of tea-flavored beef were investigated by monitoring the yield, color, texture, electronic nose, free amino acids and

收稿日期: 2023-09-04 +并列第一作者

基金项目: 安徽省亳州市“揭榜挂帅”重大科技专项 (bzdd2021009); 安徽省高校科学研究重大项目 (2022AH040118); 安徽省高校自然科学研究重点项目 (2022AH052418)。

作者简介: 郭慧 (1987-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: guohui@bzuu.edu.cn。

张宝雪 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 肉品加工与质量安全控制, E-mail: bxzhang409@163.com。

* 通信作者: 熊国远 (1975-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 肉品加工与质量安全控制, E-mail: guoyuanx66@163.com。

蒲顺昌 (1980-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 药食同源功能食品加工及发酵工业资源微生物研究, E-mail: pcc922800@163.com。

flavoring nucleotides. The results showed that ultrasound-assisted quantitative cooking could improve the yield of tea-flavored beef. The yield reached 80.77% and the textural characteristics also improved when treated with 800 W ultrasound power, but the a^* value and b^* value were not significantly affected ($P>0.05$). When the ultrasonic power was greater than 800 W, the a^* value and L^* value of stewed beef were significantly reduced, and the b^* value was significantly increased ($P<0.05$). In addition, the principal component analysis of the electronic nose showed differences in aroma flavour between ultrasonically treated and non-ultrasonically treated, and also had their own characteristics since among different ultrasonic power treatment groups. The content of glycine decreased first and then increased, and the content of arginine firstly increased and then decreased with the increase of ultrasonic power and had the maximum value at 1000 W. Ultrasonic treatment had a significant effect on the flavored nucleotide content of tea-flavored stewed beef ($P<0.05$), especially the inosine content reached a maximum at 800 W. Moreover, the sensory evaluation scores of the 800 W ultrasound-treated group were higher than those of the other groups. In summary, the favorable quality of the tea-flavored stewed beef was obtained at the ultrasonic power of 800 W.

Key words: ultrasound; tea-flavored beef; quantitative cooking; taste; quality

酱卤肉制品在我国具有几千年的历史,其中酱卤牛肉因其风味独特、口感好、营养丰富等特点深受消费者喜爱。但传统卤制方式普遍采用长时间高温(99~100℃)卤煮,卤料配方一般靠传承经验,这种方法易造成卤煮环境恶劣,原料和能耗损失高,卤煮温度分布不均匀,水分和营养流失较多,香味逸散严重,并产生有毒有害物质等问题^[1]。定量卤制作为一种西式工艺在中式肉制品中的应用,与传统的卤制工艺相比,有效改进了肉品加工工业化生产上的局限性。定量卤制工艺是根据酱卤肉制品风味、口感与色泽等品质要求,在真空滚揉机内通过物料与复合液态调味料(卤制液)的精确配比滚揉,而后放入蒸煮锅中蒸煮而成的卤制品新型加工技术^[2]。定量卤制需要的时间短,往往只需几十分钟到一个小时不等,相较于传统卤制工艺,大大提高了生产效率;定量卤制采用固定比例的配料,可以解决传统卤制工艺中味道不稳定的问题;定量卤制是通过滚揉腌制后进行密封卤煮,可以保持良好的风味品质,减少香味逸散流失等而逐步在中式酱卤肉制品加工中得到应用。如孙圳等^[3]发现与传统工艺相比,定量卤制工艺对卤制鸡肉的挥发性物质成分具有积极影响,物质呈现更加浓厚。董学文^[4]通过分析比较发现定量卤制酱牛肉中的杂环胺含量显著低于传统工艺卤制的酱牛肉,且出品率、色泽和质构特性表现更优。李聪^[5]采用定量卤制工艺制作盐水鸭,发现定量卤制工艺制得的肉品脂质氧化显著降低,产品出品率高,品质特性好。

超声波是一种新兴技术,能够在不对食品质量造成任何污染或损害的情况下提高食品加工的有效性。超声波是由振动频率高于人类可听极限(20 kHz)的波产生的一种能量形式。在超声系统中,电能转化为振动能,从而引起空化,然后空化能量产生化学、物理或生物效应^[6]。许多研究表明,超声波可以在不损害食品质量的情况下加速加工。在食品加工中,超声波可以改善酶活性和代谢,并促进美拉德反应、氧化、酯化和蛋白质水解,使食品的质地、颜色、风味和味道得到改善^[7]。超声波可以改善肉制品的嫩度,缩短干燥时间^[8]。Ojha等^[9]发现,随着超声频率的增

加,牛肉干中的牛磺酸含量增加,质地改善。Xu等^[10]还发现,超声波可以通过增强挥发性化合物与肌肉蛋白之间的相互作用过程,来改变肉制品的风味特征。这些研究表明超声波在肉类加工中具有巨大的潜力。

茶作为中国传统的健康饮品,被广泛应用到各种食品中。茶叶中富含茶多酚、茶多糖、茶色素(叶绿素、 β -胡萝卜素等),具有抗氧化(消除氧自由基)、抗炎、降血脂、延缓衰老以及美容、降血糖等作用^[11]。将茶叶加入到食品中不仅可以赋予食品天然的颜色和茶叶风味,还兼具提升食品营养价值和保健功能,调节食品质感和储藏期等效果^[12]。Yang等^[13]研究发现丙酸钙与茶多酚的结合可以延长炖牛肉块的保质期,显著阻碍微生物腐败生长以及脂质氧化,延缓贮藏期间 pH、TVB-N 值的升高以及感官品质的劣变。

因此,本研究以茶叶为主要配料,用超声波辅助定量卤制技术研发优质新型的茶香味卤煮牛肉产品,并探究超声波辅助定量卤制对于茶香味卤煮牛肉风味品质的影响,为肉制品新产品的研发提供新思路和创新方向。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

牛肉、水、绿茶、食盐、冰糖、生抽、老抽、鸡精、味精、料酒、桂皮、大小茴香、丁香、老姜、大葱、真空袋、保鲜袋 大润发有限公司合肥国购店;磺基水杨酸 上海麦克林生物试剂有限公司;核苷酸标准品 上海源叶生物科技有限公司;高氯酸、氢氧化钠、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠 国药集团化学试剂有限公司;所用试剂均为分析纯。

HH-S 恒温水浴锅 江苏国胜实验仪器厂;JA503 分析电子天平 常州幸运电子设备有限公司;PHS-3C pH 计 上海仪电科学仪器有限公司;KQ3200DE 型数控超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司;THC-1000SF 型超声波蒸煮锅 济宁天华超声电子仪器有限公司;DQW360/2B 外抽式真空充气包装机 展新迪斯艾机械(上海)有限公司;RGR-30VT

真空滚揉机 浙江瑞邦智能装备股份有限公司; TA.XT Plus 质构仪 北京微讯超技仪器技术有限公司; CR-400 全自动手持色差计 上海沪粤明科学仪器有限公司; L-8900 全自动氨基酸分析仪 日立高新技术公司; PEN3 电子鼻 德国 Airsensesense 公司; Waters 2695 高效液相色谱仪 美国 WATERS 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 茶香味卤煮牛肉的工艺流程 原料肉修整→卤水的配制→注射→滚揉→腌制→超声波煮制→真空包装→杀菌→成品。

1.2.2 操作要点

1.2.2.1 原料肉的修整 将新鲜牛肉剔除脂肪和结缔组织,然后把牛肉切成大小 3 cm×3 cm×3 cm 的方块,每块牛肉 50 g 左右。每组三个平行。

1.2.2.2 卤液配制及腌制过程 卤水的配制:将 30 g 龙井茶、3 g 桂皮、3 g 茴香、30 g 老姜和 3 粒丁香放入粉碎机里进行粉碎,粉碎完毕后,粉末放入纱布进行包裹,制成料包;随后称取 2 kg 水烧开,向沸水中加入食盐 30 g、冰糖 20 g、生抽 40 g、老抽 25 g、鸡精 25 g、味精 30 g、料酒 50 g、大葱 30 g 以及准备好的料包,滚锅后再小火熬制 1.5 h,制成卤水。卤水熬制过程中蒸煮锅上加盖盖子呈封闭状态。

注射卤水:用注射器吸取肉重 12% 的卤水均匀注射于肉块中,然后将同组 3 块肉块放入同一保鲜袋中,扎紧袋口。

滚揉、腌制:将包好的牛肉置于滚揉机中,滚揉机转速设置 18.66 m/s,控制机筒环境温度为 4 ℃,连续滚揉 4 h,再放入 4 ℃ 冷藏库中静态腌制 48 h,直至腌制液全部被肉块吸收。

1.2.2.3 超声波蒸煮 将超声波蒸煮锅的温度设定为 100 ℃,将牛肉放入真空包装袋中密封,在超声蒸煮锅中进行蒸煮,时间设置为 40 min,超声波频率为 20 kHz,五组超声功率分别为 0、600、800、1000、1200 W,蒸煮完成后直接室温下流水冷却至室温。

1.2.2.4 包装、杀菌 冷却后的牛肉取出沥干,放入真空袋中抽真空并封口,真空包装完成后进行 40 min 的沸水浴杀菌。

1.2.3 出品率测定 先将实验前处理后的肉块进行称量,记录数据 m_1 ;将不同功率超声波煮好的肉块,用滤纸吸去肉块表面水分,称量并记录数据 m_2 ,每组进行三次平行实验,出品率计算公式如下^[14]:

$$\text{出品率}(\%) = \frac{m_2}{m_1} \times 100$$

式 (1)

式中: m_1 , 前处理后样品质量, g; m_2 , 超声波辅助卤煮后肉品质量, g。

1.2.4 颜色测定 用手持色差计测定肉块表面的 L^* (亮度)、 a^* (+, 红色; -, 绿色)和 b^* (+, 黄色; -, 蓝色)。使用标准白板 ($L_0^*=92.91$ 、 $a_0^*=-0.51$ 、 $b_0^*=5.52$)进行校准,并在测定过程中使用标准白板作为

测定背景。随机选取牛肉块上的三个不同位置进行测定,取平均值为该肉块的颜色,每组重复三次。

1.2.5 质构分析 参考 Wang 等^[15]的方法并稍加修改,将熟制的牛肉块自然冷却至室温,将各组肉样顺肌纤维方向修整为 2 cm×2 cm×2 cm 的块状,采用 TA-XT plus 质构分析仪在室温条件下测定样品的质构特性(TPA)。使用 P/36R 探头,参数设定为:测前速度 2 mm/s,测中速度 2 mm/s,测后速度 5 mm/s,两次按压时间间隔为 5.0 s,压缩比率为 40%,触发力为 5.0 g,触发类型为自动。每个样品的硬度(N)、弹性、咀嚼性、黏聚性、胶粘性由 TPA 曲线确定,垂直纤维方向测定,每个样品测定 3 次。

1.2.6 电子鼻分析 参考 Zhang 等^[16]的方法并略作修改,将 2 g 牛肉样品在顶空瓶(10 mL)中于 45 ℃ 进行顶空平衡 2 min。接下来加入顶空气体(900 μL) 1 s,并在 120 s 后收集传感器信号。应用主成分分析(PCA)来分析所得的电子鼻数据,表 1 为电子鼻相关参数。

表 1 电子鼻传感器性能描述

Table 1 Electronic nose sensor performance description

阵列序号	传感器名称	性能描述	参考物质及检测限
S1	W1C	芳香成分苯类	Toluence, 10 ppm
S2	W5S	灵敏度大,对氮氧化合物和灵敏	NO ₂ , 1 ppm
S3	W3C	氨类,对芳香成分灵敏	Propane, 1 ppm
S4	W6S	主要对氢化物有选择性	H ₂ , 100 ppb
S5	W5C	短链烷烃芳香成分	Propane, 1 ppm
S6	W1S	对甲基类灵敏	CH ₃ , 100 ppm
S7	W1W	对无机硫化物灵敏	H ₂ S, 1 ppm
S8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏	CO, 100 ppm
S9	W2W	芳香成分,对有机硫化物灵敏	H ₂ S, 1 ppm
S10	W3S	对长链烷烃灵敏	CH ₃ , 100 ppm

1.2.7 游离氨基酸测定 使用氨基酸自动分析仪,参考 Bao 等^[17]的方法稍加修改,将 1.0 g 切碎的牛肉与 10 mL 5-磺基水杨酸(30 g/L)在离心管中充分混合。随后在黑暗中孵育 1 h,然后在高速冷冻离心机中在 4 ℃ 下以 10000 r/min 的速度离心 15 min。离心后取上清液 1 mL,于 0.22 μm 针式过滤器过滤后,装入上样瓶做好标记用氨基酸自动分析仪进行氨基酸分析测定。

1.2.8 呈味核苷酸测定 制备样品溶液:准确称量 4 g 肉样切碎,加入 20 mL 5% 高氯酸溶液,在冰浴条件下以 10000 r/min 的速度匀浆三次,每次 10 s。将匀浆液置于 10000 r/min 离心 10 min 后取上清液,用 NaOH 溶液调 pH 至 4.5,再次以 10000 r/min、10 min 离心后,取上清液并用一级水定容至 100 mL,使用 0.45 μm 水相滤膜过滤后,取 20 μL 过滤液于进样瓶,用高效液相色谱仪进行检测。

高效液相色谱主要参数为:检测器:二极管阵列

检测器; 色谱柱: X Bridge C₁₈(4.6 mm×250 mm, 5 μm); 柱温: 25 ℃; 流动相 A: 0.05 mol/L 磷酸二氢钾缓冲液(pH 为 4.5), 流动相 B: 色谱级甲醇。梯度洗脱程序: 95% 洗脱液 A 保持 15 min, 第 16 min 时降至 90% 保持 4 min, 第 21 min 时再升至 95% 并且保持 10 min; 流速为 1 mL/min。

1.2.9 感官评定 样品由 10 名经过感官培训的实验室成员组成的感官小组(5 男 5 女, 年龄在 22~26 岁之间)进行感官评估, 对牛肉样品的色泽、风味、质地、滋味以及总体可接受性进行评价, 每个感官属性的评分范围为 0 分到 10 分, 评分细则如表 2。

表 2 茶香味卤煮牛肉感官评分细则
Table 2 Rules of tea-flavor stewed beef sensory scoring

评分指标	评分标准	分值
色泽 (10分)	红棕色, 色泽均匀, 有光泽	7~10
	暗红色, 色泽良好, 少亮光澤	4~6
	黑红色, 色泽不均, 无光泽	0~3
风味 (10分)	肉香味浓郁, 酱香味、香辛料味适中	7~10
	肉香味较淡, 酱香味、香辛料味过浓	4~6
	肉香味不明显, 有异味	0~3
质地 (10分)	表面规则平整, 软硬适中, 咀嚼性良好	7~10
	表面较为平整, 口感略硬, 咀嚼性一般	4~6
	表面粗糙, 肉质过硬, 难以咀嚼	0~3
滋味 (10分)	咸淡适中, 味道醇厚滋味良好	7~10
	咸淡可接受, 滋味一般	4~6
	咸淡过分失衡, 滋味差	0~3
总体可接受性(10分)	整体接受性非常好	7~10
	整体可接受性良好	4~6
	整体可接受性一般	0~3

1.3 数据处理

实验数据用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行统计分析, 单因素方差分析(ANOVA)进行差异显著性分析, 多重比较采用 LSD 法, $P<0.05$ 表示差异显著。所有数据均为至少 3 次重复的平均值、标准差, 实验数据用平均值±标准偏差 (Mean±SD) 来表示。采用 Origin 2022 对实验数据进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同超声功率对定量卤制茶香味卤煮牛肉出品率以及颜色的影响

如表 3 所示, 不同功率超声波处理的牛肉出品

率都高于对照组, 而 800、1000 和 1200 W 处理的牛肉出品率则显著高于对照组($P<0.05$), 其中 800 W 功率处理的茶香味牛肉的出品率最高, 达到了 80.77%。而后随着超声功率的增加, 出品率则显著下降($P<0.05$)。可能是因为适度功率的超声波振动产生的空化效应能够有效地破坏肌肉肌原纤维致密结构, 在进行定量卤制时, 使肌纤维间容纳更多的水, 从而提高肉制品保水性, 增加产品出品率^[18]。当超声功率过大时, 会造成肌原纤维破坏严重, 以及肌原纤维蛋白的氧化导致蛋白质表面疏水性和羰基含量增加, 因此, 蛋白质氧化和超声处理空化的机械效应可能是蛋白质表面疏水性增加的原因^[19]。所以, 选择合适的超声功率辅助定量卤制可以有效提高牛肉出品率, 是一种适合卤煮牛肉工业化、标准化生产的加工技术。

颜色是肉品最重要的理化指标之一, 它会影响消费者的接受度和选择性。与对照的定量卤制工艺相比, 超声辅助定量卤制工艺的茶香味卤煮牛肉的 a^* 值和 L^* 值随着超声功率的增加而呈现下降趋势。而超声功率为 600 W 和 800 W 时牛肉的 a^* 值和 b^* 值与对照组相比无显著差异($P>0.05$)。当超声功率大于 800 W 时会使卤牛肉 a^* 值和 L^* 值显著减少, b^* 值显著增加($P<0.05$)。可能是由于机械作用引起肌肉肌原纤维断裂, 使得酱牛肉对光的吸收能力增强, 表现出较低的 L^* 值。 b^* 值随超声功率的增加呈增加趋势, a^* 值则呈现减小的趋势, 这可能与卤汁中加入茶叶后形成的本身的颜色有关, 而超声促进了卤汁进入牛肉中。Sikes 等^[20] 指出, 适当功率的超声波对肉色没有影响, 因为产生的热量不足以使蛋白质和色素变性。Alves 等^[21] 也发现牛肉的颜色没有随着适当超声波功率的增加而变化, 这与本实验采用低于 800 W 超声对牛肉颜色影响较小的结果基本一致。

2.2 不同超声功率对定量卤制茶香味卤煮牛肉质构的影响

如表 4 所示, 茶香味牛肉的硬度、黏聚性、弹性、咀嚼性和胶粘性的变化趋势相似, 超声波处理功率为 800 W 时, 茶香味卤牛肉的硬度、弹性和咀嚼性最低, 并且与对照组存在显著性差异($P<0.05$), 这可能是因为超声波的空化效应导致肌肉纤维之间出现空洞, 空隙增加, 肌肉结构疏松^[22], 从而使牛肉的硬度和弹性下降, 咀嚼性变低。但随着超声功率的增加,

表 3 不同超声功率对茶香味卤煮牛肉出品率以及颜色的影响

Table 3 Effect of different ultrasonic power on the yield and color of tea-flavored stewed beef

功率(W)	出品率(%)	a^*	b^*	L^*
0	73.46±1.62 ^c	5.90±0.23 ^a	10.09±0.17 ^b	54.62±0.62 ^a
600	75.65±1.44 ^{bc}	5.87±0.46 ^a	10.25±0.08 ^b	52.56±0.73 ^{ab}
800	80.77±1.05 ^a	5.41±0.13 ^a	10.27±0.06 ^b	50.01±1.14 ^b
1000	77.35±0.50 ^b	5.28±0.05 ^b	10.54±0.09 ^a	44.89±1.15 ^c
1200	76.08±0.45 ^b	4.76±0.23 ^c	10.72±0.08 ^a	43.36±1.56 ^c

注: 表中数据均为平均值±标准差; 同列数值上标不同字母表示在不同超声功率下存在显著性差异($P<0.05$); 表4同。

表 4 不同超声功率对茶香味卤煮牛肉质地的影响
Table 4 Effect of different ultrasonic powers on the texture of tea-flavored stewed beef

功率(W)	硬度(N)	弹性(mm)	黏聚性(g)	咀嚼性(J)	胶粘性(J)
0	11980.18±273.84 ^a	0.89±0.01 ^a	0.87±0.01 ^a	10277.86±220.54 ^a	9934.30±142.10 ^a
600	9656.81±209.12 ^c	0.87±0.03 ^{ab}	0.84±0.14 ^{ab}	9537.06±99.85 ^b	9723.04±103.85 ^a
800	8206.62±301.26 ^d	0.85±0.03 ^b	0.83±0.02 ^{ab}	8584.63±194.10 ^c	8862.11±221.93 ^b
1000	10701.04±355.48 ^b	0.86±0.01 ^{ab}	0.81±0.03 ^b	8748.36±218.77 ^c	8271.67±241.71 ^c
1200	11439.07±593.59 ^{ab}	0.88±0.01 ^{ab}	0.86±0.03 ^a	8809.24±261.21 ^c	9040.05±158.39 ^b

茶香味卤牛肉硬度、弹性和咀嚼性均存在上升趋势,这是因为超声处理时间长或强度高可能导致蛋白质氧化,蛋白质氧化会形成席夫碱和二硫键等蛋白质交联化合物,这会引起肉类硬度的增大^[23]。超声功率为 1000 W 时,茶香味卤牛肉的黏聚性和胶粘性最低,可能是因为茶香卤牛肉的硬度上升,牛肉内部自由水减少,水-蛋白质相互作用减少,导致肌原纤维之间变得干燥,所以其黏聚性和胶粘性下降^[24]。但黏聚性和胶粘性整体上与前面硬度等结果呈现出相同趋势,这可能是因为超声波产生的机械效应破坏了肌原纤维的结构,导致蛋白质分子间的连接减弱,从而降低黏聚性和胶粘性。但随着超声处理的继续,蛋白质分子可能会重新排列和组合,形成新的相互作用,这可能有助于提高黏聚性和胶粘性^[25-26]。Zhang 等^[27]研究发现,适度的超声处理可以帮助肌原纤维蛋白凝胶形成均匀而致密的网络,从而加强凝胶性质,进而在烹饪过程中形成具有良好结构的蛋白质凝胶,改善牛肉口感。定量卤制酱牛肉较传统卤制酱牛肉口感更好,主要是因为传统卤制加工中,产品中的水分及蛋白质流失较多,造成产品的肌肉纤维收缩,从而导致传统卤制酱牛肉的硬度显著高于定量卤制酱牛肉,而弹性和咀嚼性不足^[28]。而超声波辅助定量卤制茶香牛肉在定量卤制的基础上又通过超声波辅助进行卤制,既可以很好地改善牛肉的口感,又能促进卤制液更多地进入牛肉中,使牛肉茶风味更明显。

2.3 不同超声功率对定量卤制茶香味卤煮牛肉电子鼻测定的影响

电子鼻因其快速、灵敏且无损而广泛用于食品质量评估。如图 1 所示,其中第一主成分占 68.7%,第二主成分占 22.3%,二者总和高达 91%,Forleo 等^[29]研究指出,第一主成分和第二主成分之和超过 85%即可反映样品的主要特征。从图 1 中可以看出,与对照组相比,不同功率超声波处理对茶香味卤煮牛肉风味均产生影响,且各处理组之间均没有重叠部分。说明在添加固定茶叶卤料的卤水中用不同功率的超声波进行辅助卤制,卤制牛肉的风味具有明显差异。超声波的“空化效应”可以促进溶液水分快速渗透,导致空洞可以容纳更多的水分和小分子营养物质^[30]。所以使用不同超声功率处理可能使卤水进入牛肉的量不同,导致卤肉中卤料风味和茶风味的浸入量不同,产生明显差异。

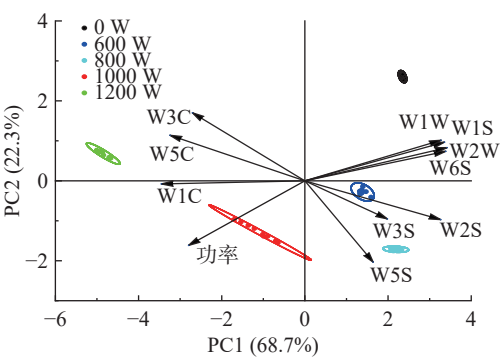


图 1 不同超声功率对茶香味卤煮牛肉风味物质电子鼻数据 PCA 分析

Fig.1 PCA analysis of electronic nose data of flavor substances in tea-flavored stewed beef with different ultrasound powers treatment

2.4 不同超声功率对定量卤制茶香味卤煮牛肉游离氨基酸的影响

游离氨基酸能通过 Strecker 降解和美拉德反应产生挥发性风味化合物。不同氨基酸由于其结构式不同,所呈现的风味口感也不相同。谷氨酸(Glu)和天冬氨酸(Asp)呈鲜味,亮氨酸(Leu)、精氨酸(Arg)、缬氨酸(Val)、色氨酸(Try)、蛋氨酸(Met)和苯丙氨酸(Phe)呈苦味,苏氨酸(Thr)、甘氨酸(Gly)、丝氨酸(Ser)和丙氨酸(Ala)呈甜味,脯氨酸(Pro)和赖氨酸(Lys)呈甜味和苦味^[31]。表 5 中滋味活性值(TAV)为食品基质中某一种呈味物质的浓度与其相应的味道识别阈值之比^[32],TAV 值大于 1 表明该滋味物质对牛肉样品整体滋味具有重要影响,值越大,贡献越大。TAV 值小于 1 的滋味物质对牛肉样品整体滋味有一定的修饰作用。

如表 5 所示,各处理组中非必需氨基酸含量及种类均多于必需氨基酸,超声波功率对超声波辅助定量卤制茶香风味牛肉游离氨基酸含量有影响。谷氨酸的含量最高且滋味活度值(TAV)也远大于 1,牛肉本身的谷氨酸含量比其他氨基酸大,但本实验谷氨酸的含量可能与风味辅料中的味精添加量相关联。超声波处理对于茶香味牛肉氨基酸的含量的影响主要体现在甘氨酸和精氨酸上,甘氨酸的值随超声功率的加强整体上呈先下降后增加趋势,精氨酸的值随超声功率的加强呈先上升后下降的趋势,且在 1000 W 时达到最大值,这可能与绿茶中不同氨基酸含量有关^[33],绿茶本身富含 26 种氨基酸,茶氨酸赋予其独特的茶

表 5 不同超声功率对茶香味卤煮牛肉氨基酸构成的影响
Table 5 Effect of different ultrasound powers on the amino acid composition of tea-flavored stewed beef

指标	氨基酸含量(mg/100 g)					阈值 ^[35-36] (mg/100 g)	TAV				
	0 W	600 W	800 W	1000 W	1200 W		0 W	600 W	800 W	1000 W	1200 W
必需氨基酸											
Thr	21.45±3.46 ^a	22.60±2.51 ^a	21.47±1.77 ^a	21.36±2.11 ^a	22.17±1.09 ^a	260	0.08±0.01 ^a	0.09±0.01 ^a	0.08±<0.01 ^a	0.08±<0.01 ^a	0.08±<0.01 ^a
Leu	23.72±4.51 ^a	25.31±3.25 ^a	25.22±1.09 ^a	23.14±2.40 ^a	26.46±4.46 ^a	190	0.12±0.02 ^a	0.13±0.02 ^a	0.13±0.01 ^a	0.12±0.01 ^a	0.14±0.02 ^a
Phe	22.95±5.29 ^a	25.09±3.35 ^a	25.96±1.14 ^a	22.09±2.03 ^a	23.67±2.09 ^a	90	0.25±0.06 ^a	0.28±0.04 ^a	0.28±0.01 ^a	0.24±0.02 ^a	0.26±0.02 ^a
Lys	30.33±3.05 ^a	30.42±4.38 ^a	28.31±2.14 ^a	29.99±3.39 ^a	31.07±2.69 ^a	50	0.61±0.06 ^a	0.61±0.09 ^a	0.55±0.05 ^a	0.60±0.07 ^a	0.62±0.05 ^a
Val	0.38±0.66 ^a	0.44±0.76 ^a	0.44±0.76 ^a	0.36±0.63 ^a	0	40	0.01±0.01 ^a	0.01±0.02 ^a	0.01±0.02 ^a	0.01±0.01 ^a	0
必需氨基酸总量											
	98.82±16.60 ^a	103.86±12.38 ^a	101.41±6.51 ^a	96.95±8.94 ^a	103.37±9.18 ^a						
非必需氨基酸											
Glu	3460.21±765.70 ^a	3780.73±413.13 ^a	3752.10±104.57 ^a	3143.27±256.69 ^a	3144.16±70.17 ^a	30	115.34±25.52 ^a	126.11±12.11 ^a	122.76±1.67 ^a	104.77±8.56 ^a	104.80±2.34 ^a
Gly	27.89±2.90 ^{ab}	27.68±2.54 ^{ab}	28.09±1.55 ^{ab}	26.33±2.23 ^b	31.26±0.50 ^a	130	0.21±0.02 ^a	0.21±0.02 ^a	0.21±0.01 ^a	0.20±0.01 ^b	0.24±<0.01 ^a
Ala	91.87±9.94 ^a	93.19±10.10 ^a	87.93±6.70 ^a	94.99±12.68 ^a	101.46±4.09 ^a	60	1.53±0.16 ^a	1.55±0.17 ^a	1.44±0.13 ^a	1.58±0.21 ^a	1.69±0.07 ^a
Try	54.24±9.38 ^a	57.23±7.80 ^a	56.48±2.42 ^a	53.61±5.90 ^a	57.77±6.22 ^a						
Arg	23.85±3.04 ^c	24.64±3.07 ^c	24.48±3.97 ^c	56.62±1.00 ^a	37.41±3.51 ^b	50	0.48±0.06 ^c	0.49±0.06 ^c	0.43±0.05 ^c	1.13±0.02 ^a	0.75±0.07 ^b
Ser	34.16±4.91 ^a	35.37±3.94 ^a	34.44±2.07 ^a	33.57±2.96 ^a	35.97±0.90 ^a	150	0.23±0.03 ^a	0.24±0.03 ^a	0.23±0.02 ^a	0.22±0.02 ^a	0.24±<0.01 ^a
Asp	32.17±9.53 ^a	38.94±35.30 ^a	35.34±4.33 ^a	27.81±0.73 ^a	28.17±1.92 ^a	100	0.32±0.09 ^a	0.39±0.86 ^a	0.35±0.46 ^a	0.28±<0.01 ^a	0.28±0.02 ^a
Pro	24.69±2.31 ^a	27.05±3.52 ^a	23.99±1.47 ^a	26.42±1.40 ^a	25.02±1.69 ^a	300	0.08±<0.01 ^a	0.09±0.01 ^a	0.08±<0.01 ^a	0.09±<0.01 ^a	0.08±<0.01 ^a
非必需氨基酸总量											
	3749.07±803.04 ^a	4084.84±449.08 ^a	4042.83±114.69 ^a	3462.62±279.77 ^a	3760.11±461.42 ^a						
氨基酸总量											
	3847.89±818.61 ^a	4188.69±460.97 ^a	4144.24±119.19 ^a	3559.57±288.05 ^a	3564.59±94.46 ^a						

注:表中数据均为平均值±标准差;同行数值上标不同字母表示在不同超声功率下存在显著性差异($P<0.05$);表6同。

表 6 不同超声功率对茶香味卤煮牛肉核苷酸含量的影响
Table 6 Effect of different ultrasonic powers on the nucleotide content of tea-flavored stewed beef

	核苷酸含量(mg/100 g)					阈值 ^[41] (mg/100 g)	TAV				
	0 W	600 W	800 W	1000 W	1200 W		0 W	600 W	800 W	1000 W	1200 W
鸟苷酸	11.77±0.41 ^d	13.16±0.33 ^c	16.05±0.38 ^b	21.55±0.24 ^a	13.56±0.32 ^c	12.5	0.94±0.03 ^d	1.05±0.03 ^c	1.23±0.03 ^b	1.72±0.02 ^a	1.08±0.03 ^c
肌苷酸	17.66±0.14 ^d	18.56±0.25 ^c	18.90±0.11 ^c	22.24±0.29 ^a	21.47±0.37 ^b	25	0.71±0.01 ^d	0.74±0.01 ^c	0.76±0.01 ^c	0.89±0.01 ^a	0.86±0.01 ^b
次黄嘌呤	2.39±0.11 ^c	3.28±0.06 ^b	3.97±0.05 ^a	3.55±0.03 ^{ab}	3.49±0.02 ^{ab}						
肌苷	8.06±0.04 ^c	10.65±0.01 ^c	14.46±0.05 ^a	13.55±0.03 ^b	8.22±0.03 ^d						

风味,精氨酸和甘氨酸是苦味和甜味的来源,使食物具有苦后回甘的特殊风味。不同功率超声波辅助卤煮可能会促进茶叶中氨基酸进入牛肉中,使牛肉中氨基酸含量增加,因此在卤煮过程中参与美拉德反应的底物(氨基酸)越多,从而使产品具有更佳的风味品质。此外,超声波在液体中产生的空化可以诱导水分子破裂为自由基,这可以提高牛肉煮制过程中蛋白质氧化的水平^[34]。蛋白质氧化产生的氨基酸可能是本研究中不同超声功率处理引起的某些氨基酸含量变化的原因。

2.5 不同超声功率对定量卤制茶香味卤煮牛肉呈味核苷酸的影响

核苷酸及其衍生物作为另一种重要的味觉呈现成分,不仅与氨基酸(Asp 和 Glu)协同作用,大大增加产品的鲜味,还可以与还原糖相互作用以影响气味的形成^[37]。核苷酸是茶叶中核酸和咖啡碱生物合成的重要底物,也是茶汤中重要的鲜味物质之一。如表 6 所示,超声波处理对茶香味卤煮牛肉样品中核苷酸含量影响显著($P<0.05$)。根据 TAV 值可以看出肌苷酸对于茶香味牛肉滋味有很好的贡献,特别是在 1000 W 处达到最大值。一般认为核苷酸物质从肌苷酸到肌苷的降解提供了肉制品独特风味,通常肌苷酸可以在磷酸酯酶的作用下脱去磷酸形成肌苷,肌苷在磷酸酶或腺苷脱氢酶的作用下继续降解生成次黄嘌呤^[38]。在核糖核苷酸的热降解下,超声处理会产生更多的核苷酸^[39]。表 6 中显示,茶香味卤煮牛肉中各种核苷酸含量整体呈先上升后下降趋势,其中次黄嘌呤在 800 W 时达到最大值,随后开始下降,但总体数值变化很小。肌苷含量呈明显先上升后下降趋势,且 800 W 处理组的肌苷含量最高($P<0.05$)。相比传统煮制,超声波辅助煮制可以提高酱卤牛肉煮制过程中样品中心温度上升速度,从而缩短整体煮制时间,然而,随着超声功率的增加,会产生更多的热量,温度过高会加速核苷酸的降解^[40]。过热也可能导致肌肉纤维的破坏,最终导致核苷酸的损失^[30]。这些原因可以解释核苷酸含量随着超声功率的增加呈现的先上升后下降的趋势。

2.6 不同超声功率对定量卤制茶香味卤煮牛肉感官的影响

熟肉的风味特征来源于热诱导反应,包括氨基酸或肽与还原糖之间的美拉德反应、脂质氧化、美拉

德反应产物与脂质氧化产物之间的相互作用以及烹饪过程中的维生素降解^[6]。由图 2 可以明显地看出,800 W 超声处理组在色泽、风味、质地、滋味和总体可接受性这五项指标中分数都是最高的。色泽方面可能是因为超声促进卤制液浸入牛肉中,使牛肉颜色更深,外观看起来更加诱人。质地的改变是因为超声处理提高了牛肉的保水性并改善了嫩度。风味与滋味可能是因为超声波促进卤制液与牛肉相结合,使牛肉中香料味和茶香味更明显。此外,Zou 等^[40]发现,在烹饪过程中应用超声波对五香牛肉的味道和风味具有积极影响。牛肉的总体可接受性得分与牛肉的其他感官评分表现出相似的趋势,这表明总体可接受度可能主要受色泽、风味、质地和滋味影响。与传统卤制牛肉相比,超声波辅助定量卤制使牛肉在超声波和滚揉的条件下肌纤维发生断裂,肉质变得松散,促进了腌制液的渗入,使其色泽、风味更加明显,总体可接受性更高。

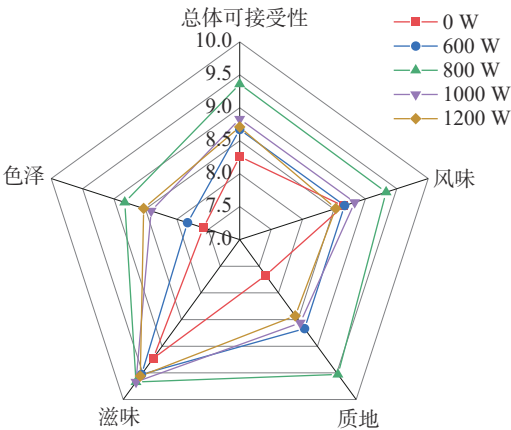


图 2 不同超声功率对茶香味卤煮牛肉感官品质的影响
Fig.2 Effect of different ultrasonic power on the sensory quality of tea-flavored stewed beef

3 结论

采用 600、800、1000 和 1200 W 超声功率结合定量卤制工艺卤煮茶香味牛肉,在 800 W 的超声功率处理条件下,茶香味卤煮牛肉的出品率明显增加,可高达 80.77%,并显著地改善了茶香味卤煮牛肉的质构特征,且对茶香味卤煮牛肉的 a^* 值和 b^* 值影响较小。通过电子鼻的主成分分析,发现超声处理组和未经超声处理组之间的香气风味存在着显著的差异($P<0.05$),在不同功率处理组中,茶香味卤煮牛肉风

味也各具特点。不同超声功率处理卤牛肉中甘氨酸含量随超声功率的增加整体上呈先下降后增加趋势,精氨酸随超声功率的增加呈先上升后下降的趋势,且在 1000 W 时达到最大值。800 W 超声处理时,茶香味卤煮牛肉的肌苷含量达到了最大值 14.46 mg/100 g。感官评定表明,800 W 的超声处理组得分最高。综上,超声功率为 800 W 时,结合定量卤制工艺为茶香味卤煮牛肉卤制的最佳处理条件,可明显提高茶香味卤煮牛肉整体品质。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 高飞,武运,蔡华珍,等.超声波协同真空卤煮牛肉过程中的传质动力学分析[J].现代食品科技,2022,38(10):205-216. [GAO F, WU Y, CAI H Z, et al. Analysis of mass transfer kinetics during braising beef using ultrasonic in synergy with vacuum[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(10): 205-216.]
- [2] 强萌萌,李磊,李少凯.酱卤肉定量卤制工艺研究[J].中国调味品,2021,46(11):105-108. [QIANG M M, LI L, LI S J. Study on quantitative marinating technology of marinated meat products[J]. China Condiment, 2021, 46(11): 105-108.]
- [3] 孙圳,韩东,张春晖,等.定量卤制鸡肉挥发性风味物质剖面分析[J].中国农业科学,2016,49(15):3030-3045. [SUN Z, HAN D, ZHANG C H, et al. Profile analysis of the volatile flavor compounds of quantitative marinated chicken during processing [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(15): 105-108.]
- [4] 董学文.酱牛肉中杂环胺的控制及其品质影响因素研究[D].长春:吉林大学,2020. [DONG X W. Research on control and quality factors of heterocyclic amines in braised sauce beef[D]. Changchun: Jilin University, 2020.]
- [5] 李聪.磷脂分子及加工工艺对盐水鸭特征风味形成影响研究[D].无锡:江南大学,2020. [LI C. Influence of phospholipid molecules and processing technology on characteristic flavor formation of water-boiled salted duck[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]
- [6] PENA-GONZALEZ E, ALARCON-ROJO A D, GARCIA-GALICIA I, et al. Ultrasound as a potential process to tenderize beef: Sensory and technological parameters[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, 53: 134-141.
- [7] YU Z, SU Y, ZHANG Y, et al. Potential use of ultrasound to promote fermentation, maturation, and properties of fermented foods: A review[J]. *Food Chemistry*, 2021, 357: 129805.
- [8] OJHA K S, KERRY J P, TIWARI B K. Investigating the influence of ultrasound pre-treatment on drying kinetics and moisture migration measurement in *Lactobacillus sakei* cultured and uncultured beef jerky[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 81: 42-49.
- [9] OJHA K S, GRANATO D, RAJURIA G, et al. Application of chemometrics to assess the influence of ultrasound frequency, *Lactobacillus sakei* culture and drying on beef jerky manufacture: Impact on amino acid profile, organic acids, texture and colour[J]. *Food Chemistry*, 2018, 239: 544-550.
- [10] XU L, ZHENG Y, ZHOU C, et al. Kinetic response of conformational variation of duck liver globular protein to ultrasonic stimulation and its impact on the binding behavior of n-alkenals[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 150: 111890.
- [11] 林红,曾玲珍,林育钊,等.铁观音乌龙茶的营养成分和保健功效[J].保鲜与加工,2020,20(6):238-242. [LIN H, ZENG L Z, LIN Y Z, et al. Nutritional ingredients and health-promoting effects of Tieguanyin Oolong tea[J]. Storage and Process, 2020, 20(6): 238-242.]
- [12] 徐娇娇,李慧文,徐泽林,等.添加不同种类的茶粉对茶香鱼面品质的影响研究[J].肉类工业,2022,20(6):22-27. [XU J J, LI H W, XU Z L, et al. Study on the effect of different tea powder on the quality of tea-flavored fish noodles[J]. Meat Industry, 2022, 20(6): 22-27.]
- [13] YANG X, ZHANG S, LEI Y, et al. Preservation of stewed beef chunks by using calcium propionate and tea polyphenols[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 176: 114491.
- [14] 王雨薇,郭丹郡,胥伟,等.卤鸭腿中小茴香提取液添加工艺优化及感官品质对比研究[J].中国调味品,2023,48(5):50-56,74. [WANG Y W, GUO D J, XU W, et al. Optimization of addition process and comparison of sensory quality of cumin extract in marinated duck legs[J]. China Condiment, 2023, 48(5): 50-56, 74.]
- [15] WANG H, GAO Z, GUO X, et al. Changes in textural quality and water retention of spiced beef under ultrasound-assisted sous-vide cooking and its possible mechanisms[J]. *Foods*, 2022, 11(15): 2251.
- [16] ZHANG J, ZHANG Y, ZOU Y, et al. Effects of ultrasound-assisted cooking on quality characteristics of spiced beef during cold storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 136: 110359.
- [17] BAO G, NIU J, LI S, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the quality, nutrients and volatile compounds of dry-cured yak meat[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 82: 105864.
- [18] TONG H, CAO C, DU Y, et al. Ultrasonic-assisted phosphate curing: A novel approach to improve curing rate and chicken meat quality[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(5): 2906-2917.
- [19] KANG D C, ZOU Y H, CHENG Y P, et al. Effects of power ultrasound on oxidation and structure of beef proteins during curing processing[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 33: 47-53.
- [20] SIKES A L, MAWSON R, STARK J, et al. Quality properties of pre- and post-rigor beef muscle after interventions with high frequency ultrasound[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, 21(6): 2138-2143.
- [21] ALVES L L, RAMPELOTTO C, SILVA M S, et al. The effect of cold storage on physicochemical and microbiological properties of beef semitendinosus muscle subjected to ultrasonic treatment in different systems (bath or probe)[J]. *International Food Research Journal*, 2018, 25(2): 504-514.
- [22] LUO M, SHAN K, ZHANG M, et al. Application of ultrasound treatment for improving the quality of infant meat puree[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 80: 105831.
- [23] 王兆明,贺雅非,李洪军.脂质和蛋白质氧化对肉品质影响及交互氧化机制研究进展[J].食品科学,2018,39(11):295-301. [WANG Z M, HE Z F, LI H J. A review of the effect of lipid and protein oxidation on meat quality and their interrelationship[J]. Food Science, 2018, 39(11): 295-301.]
- [24] 王颂萍,王雪羽,杨欣悦,等.超声波技术嫩化机理及其在肉制品中应用效果的研究进展[J].食品工业科技,2022,43(9):423-431. [WANG S P, WANG X Y, YANG X Y, et al. Research progress on the mechanism of ultrasound tenderization and application effect in meat products[J]. Science and Technology of Food In-

dustry, 2022, 43(9): 423–431.]

[25] 周建伟, 孟倩, 高德, 等. 超声加工技术对牛肉及其制品品质影响的研究进展[J]. 现代食品科技, 2020, 36(1): 296–302. [ZHOU J W, MENG Q, GAO D, et al. Research progress on the effects of ultrasonic technology on the quality of beef and its derived products[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(1): 296–302.]

[26] 黄亚军, 周存六. 超声波技术在肉及肉制品中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(5): 91–97. [HUANG Y J, ZHOU C L. Recent progress in application of ultrasound in processing of meat and meat products[J]. Meat Research, 2020, 34(5): 91–97.]

[27] ZHANG Z, REGENSTEIN J M, ZHOU P, et al. Effects of high intensity ultrasound modification on physicochemical property and water in myofibrillar protein gel[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 34: 960–967.

[28] 田欢. 酱牛肉定量卤制工艺优化研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021. [TIAN H. Research on optimization of quantitative marinating process of sauce beef[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.]

[29] FORLEO T, ZAPPI A, GOTTARDI F, et al. Rapid discrimination of Italian Prosecco wines by head-space gas-chromatography basing on the volatile profile as a chemometric fingerprint[J]. European Food Research and Technology, 2020, 246(9): 1805–1816.

[30] ZOU Y, ZHANG W, KANG D, et al. Improvement of tenderness and water holding capacity of spiced beef by the application of ultrasound during cooking[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(3): 828–836.

[31] ZHUANG K, WU N, WANG X, et al. Effects of 3 feeding modes on the volatile and nonvolatile compounds in the edible tissues of female Chinese Mitten Crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(4): 968–981.

[32] 宣晓婷, 王璇, 尚海涛, 等. 超高压辅助中华绒螯蟹脱壳及其品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2023, 54(2): 149–156.

[XUAN X T, WANG Y, SHANG H T, et al. Effects of high pressure processing on the shucking and quality of Chinese Mitten Crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023, 54(2): 149–156.]

[33] DAS P R, KIM Y, HONG S J, et al. Profiling of volatile and non-phenolic metabolites-Amino acids, organic acids, and sugars of green tea extracts obtained by different extraction techniques[J]. Food Chemistry, 2019, 296: 69–77.

[34] KANG D C, GAO X Q, GE Q F, et al. Effects of ultrasound on the beef structure and water distribution during curing through protein degradation and modification[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 317–325.

[35] 赵培静, 冯浩森, 李湘奎, 等. 微波复热对竹笋鸡汤品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(22): 107–115. [ZHAO P J, FENG H S, LI X L, et al. Effects of microwave reheating on the quality of chicken soup with bamboo shoots[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(22): 107–115.]

[36] 于恒和, 马一凡, 韩东, 等. 酱卤鸭脖的特征风味物质剖析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(3): 259–271. [YU H H, MA Y F, HAN D, et al. Profile analysis of the characteristic flavor substances of soy-marinated duck neck[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(3): 259–271.]

[37] YANG P, ZHONG G, YANG J, et al. Metagenomic and metabolomic profiling reveals the correlation between the microbiota and flavor compounds and nutrients in fermented sausages[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131645.

[38] 邹云鹤. 超声波辅助煮制对酱卤牛肉品质的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018. [ZOU Y H. Effects of ultrasound assisted cooking on the quality of spiced beef[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018.]

[39] ALARCON-ROJO A D, JANACUA H, RODRIGUEZ J C, et al. Power ultrasound in meat processing[J]. Meat Science, 2015, 107: 86–93.

[40] ZOU Y, KANG D, LIU R, et al. Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles of taste and flavor of spiced beef[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 46: 36–45.

[41] ZHANG J, FENG M, ZHANG Y, et al. Effect of low-sodium compound salt on the taste and volatile flavor of salt-baked chicken[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2023, 32: 100740.