张俊科, 潘道东, 夏强, 等. 超声功率对香糟牛肉特征风味形成的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 280−290. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060373

ZHANG Junke, PAN Daodong, XIA Qiang, et al. Effect of Ultrasound Power on the Formation of Characteristic Flavors in Vinasse-cured Beef[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 280−290. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060373

· 分析检测 ·

超声功率对香糟牛肉特征风味形成的影响

张俊科[1], 潘道东[1], 夏　强[1], 孙杨赢[1], 曹锦轩[2], 周昌瑜[1,*]

（1.宁波大学食品科学与工程学院, 浙江宁波 315832;
2.北京工商大学食品与健康学院, 北京 102488）

摘　要: 本研究以牛肉为新鲜原料，研究了 200 W（UC200）、300 W（UC300）、400 W（UC400）超声辅助糟制对香糟牛肉特征风味形成的影响，通过考察香糟牛肉的感官品质、肌原纤维蛋白结构及形貌、挥发性风味物质指纹图谱及气味活度值揭示不同功率超声辅助糟制对香糟牛肉肌原纤维蛋白构象及特征风味的改变，并借助相关性分析挖掘香糟牛肉肌原纤维蛋白构象变化与特征风味形成之间的关联。结果表明，200、300 和 400 W 超声辅助糟制均能提高香糟牛肉的感官品质，且 UC200、UC300 和 UC400 组的酯香评分分别由未超声未糟制处理组（CK）的 0.50 和未超声糟制处理组（NUC）的 6.25 增加至 7.23、8.00 和 7.02（P<0.05），且 UC300 组评分高于 UC200 和 UC400 组。构象分析表明，与其他组相比，UC300 组肌原纤维蛋白的内源性荧光强度和表面疏水性最高分别为 2293.55 和 22.54 μg，而 α-螺旋相对含量、平均粒径和表面粗糙度最低分别为 24.91%、1.64 μm 和 0.43 nm。SPME-GC-MS 结果显示，香糟牛肉共鉴定出 43 种挥发性风味物质，酯类、醛类和醇类占总风味物质含量的 75.96%，UC300 组酯类化合物含量由 NUC 组的 50.18 mg/kg 增加至 58.53 mg/kg（P<0.05）。偏最小二乘回归分析和气味活度值结果表明，辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸苯乙酯、苯乙醛、壬醛、戊酸乙酯、丁酸乙酯、苯甲酸乙酯、壬酸乙酯和苯乙酸乙酯是引起 UC300 组特征风味增加的关键气味活性物质。Spearman 相关性分析表明，戊酸乙酯和苯甲酸乙酯等关键气味活性化合物与肌原纤维蛋白 α-螺旋显著负相关，与酯香和醇香评分显著正相关。因此，本研究为超声在糟肉制品香气质量提升的应用上提供了重要参考。

关键词: 香糟牛肉, 超声功率, 肌原纤维蛋白, 蛋白构象, 风味品质

中图分类号: TS251.5+2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0280−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060373

本文网刊:

Effect of Ultrasound Power on the Formation of Characteristic Flavors in Vinasse-cured Beef

ZHANG Junke[1], PAN Daodong[1], XIA Qiang[1], SUN Yangying[1], CAO Jinxuan[2], ZHOU Changyu[1,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315832, China;
2.School of Food and Health, Beijing Technology and Business University, Beijing 102488, China）

Abstract: The effects of 200 W (UC200), 300 W (UC300) and 400 W (UC400) ultrasound assisted vinasse-curing on the formation of characteristic flavor in vinasse-cured beef were studied using beef as the fresh raw materials. The sensory quality, structure and morphology of myofibrillar proteins, fingerprint and odor-active values of volatile compounds were investigated to reveal the changes of ultrasound assisted vinasse-curing on the conformation of myofibrillar proteins and characteristic flavor in vinasse-cured beef. The correlation analysis was further employed to identify the correlation between the changes of myofibrillar proteins and the formation of characteristic flavor in vinasse-cured beef. The results demonstrated that 200 W (UC200), 300 W (UC300) and 400 W (UC400) ultrasound assisted vinasse-curing were able to improve flavor quality of vinasse-cured beef. Specifically, the ester aroma scores in the UC200, UC300, and UC400 groups

收稿日期: 2025−06−29

基金项目: 浙江省自然科学基金（LR25C200003）。

作者简介: 张俊科（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 畜产品加工与质量控制, E-mail: junke213@163.com。

*** 通信作者:** 周昌瑜（1990−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 畜产品加工与质量控制, E-mail: zhouchangyu@nbu.edu.cn。

increased from 0.50 in the control group (CK) and 6.25 in the non-ultrasonic fermentation group (NUC) to 7.23, 8.00, and 7.02, respectively (P<0.05), with the UC300 group showing a higher score than the UC200 and UC400 groups. Conformation analysis revealed that, the UC300 group exhibited the highest intrinsic fluorescence intensity and surface hydrophobicity of myofibrillar proteins compared to other groups, reaching 2293.55 and 22.54 μg, respectively. Meanwhile, its α-helix content, average particle size, and surface roughness were the lowest, at 24.91%, 1.64 μm, and 0.43 nm, respectively. SPME-GC-MS results showed that a total of 43 volatile compounds were identified in the vinasse-cured beef. Esters, aldehydes, and alcohols accounted for 75.96% of the total flavor compound content. The ester compounds content of UC300 group increased from 50.18 mg/kg of NUC group to 58.53 mg/kg (P<0.05). Partial least squares regression analysis and odor-active values indicated that ethyl caprylate, ethyl decanoate, phenethyl acetate, phenylacetaldehyde, nonanal, ethyl valerate, ethyl butyrate, ethyl benzoate, ethyl nonanoate, and ethyl phenylacetate were the key odor-active substances responsible for the increased characteristic flavor in the UC300 group. Spearman correlation analysis indicated that key odor-active compounds such as ethyl valerate and ethyl benzoate were negatively correlated with the α-helix of myofibrillar proteins, and positively correlated with the ester and alcohol aroma. Therefore, this research can provide critical references for the application of ultrasound in improving the aroma quality of vinasse-cured meat products.

Key words: vinasse-cured beef; ultrasonic power; myofibrillar proteins; protein conformation; flavor quality

香糟牛肉是中国传统糟肉制品的典型代表，因其独特的风味而广受消费者喜爱。香糟牛肉的主要加工工序包含腌制、煮制和糟制[1]。糟制是形成香糟肉特征风味的关键过程，糟制中酒糟的挥发性风味物质与肉样结合，经过吸附与释放动态平衡后形成糟肉制品独特的醇香、酯香风味[1]。干糟和湿糟是两种常见的糟制方法。相较于湿糟法，干糟法能更有效地提升糟肉制品的醇香、酯香与肉香，因此糟肉制品的糟制过程通常采用干糟法。然而，干糟法耗时较长，通常需要数天至数周才能使糟肉制品获得浓郁的风味，且终产品风味品质不稳定、不均一等问题时有发生[2]，这严重威胁到糟肉制品产业的发展。目前已有研究探究糟制过程糟制温度、糟制时间以及酒糟和肉的比例对糟肉制品风味特征和风味稳定性的影响[3−4]，但鲜有研究关注外源预处理技术对香糟肉风味形成及特征风味物质的影响。

超声波作为一种经济、高效的物理加工和预处理技术，因其空化和机械效应在肉制品风味提升中的应用而备受关注[5−6]。超声波通过改变蛋白质构象调控风味物质的吸附与保留[7−8]，其具体效果主要取决于超声参数与蛋白种类[9]。超声功率是超声波的重要参数之一，通过改变超声强度影响空化效应调控产品风味。研究表明，超声波通过提高壬醛、庚醛等风味物质含量提高了未烟熏培根的风味特征，相比于 750 W 超声辅助腌制和未超声腌制处理，250 W 超声辅助腌制处理的未烟熏培根风味品质最高[10]。然而，超声波对糟制效率及糟肉制品香气品质提升的影响鲜有报道。同时，超声处理实际改善糟肉制品愉悦感和香气稳定性的气味活性物质尚未被充分识别和讨论。因此，探究超声功率对糟肉制品香气品质的改善，对糟肉制品的风味质量控制至关重要。

本研究以不同功率超声辅助糟制的香糟牛肉为研究对象，系统分析香糟牛肉风味品质及其肌原纤维蛋白构象和形貌变化，并通过多元相关分析评估超声诱导的肌原纤维蛋白结构变化与香糟牛肉特征风味形成的关联性，旨在揭示超声预处理增强香糟牛肉香气品质的机制。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

蒙古肉牛　年龄为 3 岁左右的健康公牛于浙江宁波屠宰场宰杀 1 h 之内取样，将臀肉均匀分割成形状统一的肉块，在 0~4 ℃ 排酸处理 24 h，待肉样成熟后，在 48 h 内冷链运输至实验室后放置−80 ℃ 冰箱备用；酒糟　采购于浙江绍兴当地一家食品商店；味精、盐、八角、花椒、小茴香等香辛料　购自浙江宁波当地一家超市；二硫苏糖醇（DTT）、5,5'-二硫代双（2-硝基苯甲酸）（DTNB）、溴酚蓝（BPB）　购自北京索莱宝科技有限公司；2-甲基-3-庚酮　纯度 96.62%，购于 Sigma-Aldrich 公司；BCA 蛋白定量试剂盒　购自上海碧云天生物技术有限公司；苯甲酸乙酯（纯度 99.50%）、戊酸乙酯（纯度 99.50%）、3-甲基戊酸乙酯（纯度 98.00%）、苯甲醛（纯度 98.50%）、糠醛（99.50%）、壬醛（96.00%）、乙醇（纯度 99.80%）、苯乙醇（纯度 98.00%）、3-甲基-1-丁醇（纯度 98.50%）、茴香脑（98.00%）　购自上海麦克林生化科技有限公司；其他试剂均为分析纯；实验用水均为超纯水。

SB-400DTY 扫频超声波清洗机　宁波新芝生物科技有限公司；PEN3 电子鼻　德国 AIRSENSE 公司；PowerPac Basic 伯乐电泳仪　美国 Bio-Rad 公司；8900 气相色谱-单四极杆质谱联用仪　安捷伦科技有限公司；Infinite® M200 Pro 多功能酶标仪　瑞士 Tecan 有限公司；F-4700 荧光光谱仪　日本 Hitachi 公司；Nano-ZS90 粒度分析仪　英国马尔文公司；FX40 原子力显微镜（AFM）　德国 Burker 公司；SCIENTZ-70FY 冷冻干燥机　宁波新芝冻干设备股份有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　香糟牛肉制备　将牛臀肉剔除结缔组织和脂肪，切成 150~200 g 的方块，用盐、料酒和白酒腌制

1 h。随后加入 1.5 倍鲜肉质量的纯净水预煮 30 min，再转入 1.5 倍鲜肉质量的卤水中（卤水含味精、盐、八角、花椒、小茴香等香辛料），于 100 ℃ 炖煮 2 h。炖煮后待牛肉冷却至室温，切成 3~5 mm 厚的薄片。将牛肉片平均分为 5 等份，分别命名为 CK 组（未超声未糟制），NUC 组（未超声糟制），UC200、UC300 和 UC400 组（超声糟制）。CK 组：切片牛肉真空包装，于 4 ℃ 静置 48 h，然后取样，将样品置于−80 ℃ 储藏备用。NUC 组：切片牛肉与酒糟按质量比 1∶2 混合，置于陶罐密封，4 ℃ 糟制 48 h，糟制结束后取样，置于−80 ℃ 储藏备用。UC200、UC300 和 UC400 组：切片牛肉与酒糟按质量比 1∶2 混合后密封于聚乙烯袋，放入超声波发生器中以水作为介质，分别以 200、300 和 400 W 功率超声处理 30 min（频率固定为 40 kHz），随后于 4 ℃ 糟制 48 h，糟制结束取样，置于−80 ℃ 储存备用。

1.2.2 感官评价和电子鼻测定 参照 Zhang 等[11] 的方法，20 名感官评价员（10 男，10 女，年龄 23~28 岁）接受了 2 周的培训，每天 30 min，以描述标准品的香气特征并区分它们之间的差异，这些标准品进行了梯度稀释。最终，他们能准确地描述感官性状和评估风味强度。培训用标准品：3-甲基戊酸乙酯、戊酸乙酯、苯甲酸乙酯、苯甲醛、糠醛、壬醛、乙醇、苯乙醇、3-甲基-1-丁醇、茴香脑。小组成员参考相关文献进行初步实验讨论，选择了 5 种香气属性，包括酯香（乙酸乙酯）、醇香（3-甲基-1-丁醇）、肉香（壬醛）和香料香（茴香脑）、总体可接受度。在感官评价过程中，将样品切成 3 cm×3 cm×0.3 cm 的薄片，随机编号后，评价员进行 1~9 分评分制（1 分=无，9 分=强烈）评价，每个样品评估三次，每次嗅闻间隔≥2 s。

采用配备 10 个金属氧化物传感器（MOS）的 PEN3 型电子鼻检测。传感器的性能描述：W1C 的特征香气为芳香成分及苯类化合物；W5S 的特征香气为氮氧化合物；W3C 的特征香气为芳香成分及氨类化合物；W6S 的特征香气为氢气；W5C 的特征香气为烷烃芳香成分；W1S 的特征香气为甲烷等短链烷烃；W1W 的特征香气为无机硫化物；W2S 的特征香气为醇、醚、醛、酮类物质；W2W 的特征香气为芳香成分及有机硫化物；W3S 的特征香气为长链烷烃类。称取 2 g 样品置于顶空瓶，室温平衡 1 h 后，通过直接顶空抽吸法进样。测试条件：采样间隔 1 次/组，传感器自清洁 100 s，归零 10 s，样品制备 5 s，进样流速 400 mL/min。

1.2.3 肌原纤维蛋白提取 参考 Li 等[12] 的方法提取香糟牛肉的肌原纤维蛋白并稍加修改。将样品与 4 倍体积的 20 mmol/L PBS（pH7.5，含 1 mmol/L EDTA）混合，冰浴条件以 10000 r/min 匀浆 3 次（每次 5 s），4 ℃、8000 r/min 离心 20 min，收集沉淀。沉淀用 4 倍体积的 20 mmol/L PBS（pH7.0，含 0.1 mol/L KCl、2 mmol/L $MgCl_2$ 和 1 mmol/L EGTA）重悬，重复匀浆、离心（条件同上）3 次。向沉淀中加入 4 倍体积的 20 mmol/L PBS-TritonX-100 混合液（体积比 99∶1），冰浴匀浆 3 次（每次 5 s），离心。沉淀加入 4 倍体积 0.1 mol/L KCl 溶液，匀浆后用四层纱布过滤，取滤液离心收集沉淀。沉淀依次用 0.1 mol/L NaCl 溶液和去离子水离心，最终所得沉淀为肌原纤维蛋白，使用 20 mmol/L PBS（pH7.0）缓冲液溶解得到肌原纤维蛋白溶液，BCA 蛋白定量试剂盒调节浓度，4 ℃ 储存备用。

1.2.4 聚丙烯酰胺凝胶电泳（SDS-PAGE）测定 参照 Li 等[12] 的方法，将蛋白溶液调整为 5 mg/mL，添加含 DTT 和不含 DTT 的上样缓冲液，经 100 ℃ 变性后离心取上清作为样品，取 10 μL 样品上样，先以 90 V 电泳 30 min，再以 120 V 电泳 90 min。染色液（甲醇∶冰醋酸∶蒸馏水=4∶1∶5，v/v）含 0.1% 考马斯亮蓝 R-250，煮沸染色 5 min 后摇床染色 30 min，脱色液（甲醇∶冰醋酸∶蒸馏水=1∶1∶8，v/v）加热脱色至背景清晰，凝胶成像系统拍照并与标准蛋白分子量对比。

1.2.5 傅里叶变换红外光谱（FTIR）表征 使用冷冻干燥机对肌原纤维蛋白沉淀进行 48 h 程序冻干，粉碎后获得肌原纤维蛋白冻干粉末。根据 Luo 等[13] 的方法，取 5 mg 肌原纤维蛋白冻干粉末与 500 mg 溴化钾（KBr）混合压片，以纯 KBr 为背景，扫描范围 400~4000 cm^{-1}，分辨率 4 cm^{-1}，累加 32 次扫描。通过 Peakfit 4.12 软件分析酰胺Ⅰ带（1600~1700 cm^{-1}）的二级结构变化。

1.2.6 巯基含量测定 总巯基和活性巯基含量采用 Ellman 法测定[14]。总巯基反应体系含 0.5 mL MP 溶液（5 mg/mL）和 4.5 mL 含 8 mol/L 尿素的缓冲液（pH8.0，含 0.09 mol/L 甘氨酸、0.086 mol/L Tris 和 4 mmol/L EDTA）；活性巯基使用上述反应体系不添加尿素。加入 50 μL Ellman 试剂（0.01 mol/L DTNB 溶于上述缓冲液），室温避光反应 30 min，9700 r/min 离心 15 min，以缓冲液为空白，于 412 nm 测定吸光度。巯基含量计算如下：

$$\text{巯基含量}(\text{nmol/mg}) = \frac{A_{样品} - A_{空白}}{\varepsilon} \times \frac{D}{C} \times 10^6$$

式中：A 为吸光度；ε 为消光系数（13600 $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$）；D 为稀释因子；C 为蛋白质浓度（mg/mL）；10^6 为单位换算系数。

1.2.7 表面疏水性测定 参照 Chelh 等[15] 的方法并稍作修改，将肌原纤维蛋白溶液浓度调整为 1 mg/mL，取 2 mL 与 50 μL 溴酚蓝（BPB，1 mg/mL）混合振荡 10 min，4 ℃、8000 r/min 离心 10 min，以缓冲液为空白，取上清液在 595 nm 测定吸光度。BPB 结合量计算如下：

$$\text{BPB}(\mu\text{g}) = \frac{A_{空白} - A_{样品}}{A_{空白}} \times 50$$

式中：A 为吸光度；50 为单位换算系数。

1.2.8　内源荧光光谱表征　参照 Han 等[16] 的方法并稍作修改，将 MP 溶液浓度调整为 0.25 mg/mL，使用荧光光谱仪测定，激发波长 285 nm，发射波长范围 290~390 nm，狭缝宽度 5 nm，重复 3 次。

1.2.9　电位和粒径测定　测定香糟牛肉 MP 溶液的 ζ-电位和平均粒径。将 MP 溶液浓度调整为 1 mg/mL，用粒径分析仪测定 ζ-电位和平均粒径（d50）。每组实验分别执行 3 个重复试样分析。

1.2.10　原子力显微镜（AFM）表征　根据 Liu 等[17] 方法测定蛋白表面形貌并稍作修改，取 5.0 μL 肌原纤维蛋白溶液（5 mg/mL）滴涂于云母片，20 ℃ 自然风干后，采用轻敲模式扫描（5.0 μm×5.0 μm，频率 1.0 Hz），通过 Nano Scope Analysis 1.7 软件计算表面粗糙度（Rq）。

1.2.11　SPME-GC-MS 测定　参照 Xia 等[2] 的方法并稍作修改，测定样品挥发性风味化合物。取 2.0 g 样品置于 20 mL 顶空瓶，25 ℃ 平衡 2 h。平衡后萃取前加入 10 μL 2-甲基-3-庚酮（50 ppm）作为内标物质进行定量分析。使用 50/30 μm DVB/Carboxen/PDMS 萃取纤维对样品进行 50 ℃，30 min 萃取。然后将萃取针取出冷却后插入气相色谱-单四极杆质谱联用仪进样口（250 ℃）解吸 5 min。色谱条件：HP-5MS 毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），初始温度 35 ℃ 保持 5 min，以 4 ℃/min 升至 180 ℃（保持 2 min），再以 15 ℃/min 升至 230 ℃（保持 2 min）。质谱条件：EI 源（0.9 kV），扫描范围 m/z 45~600，检测器温度 200 ℃。挥发性物质通过保留时间和 NIST 数据库匹配定性（匹配度≥80），内标法定量，重复 3 次。

$$C_{样品}(mg/kg)=\frac{A_{样品}\times V_{内标}\times C_{内标}}{A_{内标}\times m}\times 10^{-3}$$

式中：$A_{样品}$为实验样品峰面积；$A_{内标}$为内标物质峰面积；$V_{内标}$为内标物质体积（μL）；$C_{内标}$为内标物质浓度（μg/mL）；m 为实验样品质量（g）；10^{-3} 为单位换算系数。

1.3　数据处理

采用 SAS 软件进行方差分析（ANOVA），组间差异通过 Duncan 检验（P<0.05），数据以“平均值±标准差（n=3）”表示。Origin 2024 软件进行绘图和主成分分析（PCA），SIMCA 14.1 软件进行偏最小二乘回归（PLSR）分析，TBtools 绘制热图，IBM SPSS Statistics 26 进行 Spearman 相关分析。

2　结果与分析

2.1　感官评价和电子鼻分析

香糟牛肉的感官评价结果如图 1a 所示，UC200、UC300 和 UC400 组总体可接受度、酯香和醇香评分值高于 CK 和 NUC 组，UC200、UC300 和 UC400 组的酯香评分值分别由 CK 组的 0.5 和 NUC 组的 6.25 增加至 7.23、8.00 和 7.02（P<0.05），且 UC300 组高于 UC200 和 UC400 组。香糟牛肉的肉香和香料味在各组间无统计学差异。这些结果表明，300 W 超声辅助糟制处理显著提高了香糟牛肉的酯香味。电子鼻是识别风味类型的重要工具。本研究中，W5S 的特征香气为氮氧化合物，W2S 的特征香气为醇、醚、醛、酮类物质。图 1b 显示，UC300 组 W5S 和 W2S 传感器响应值显著高于其他处理组（P<0.05），表明 UC300 组香糟牛肉的醇类、醚类和醛类化合物的浓度高于其他组别。这些化合物具有果香、花香和酒香味，进一步验证了超声处理组中酯香和醇香的变化。

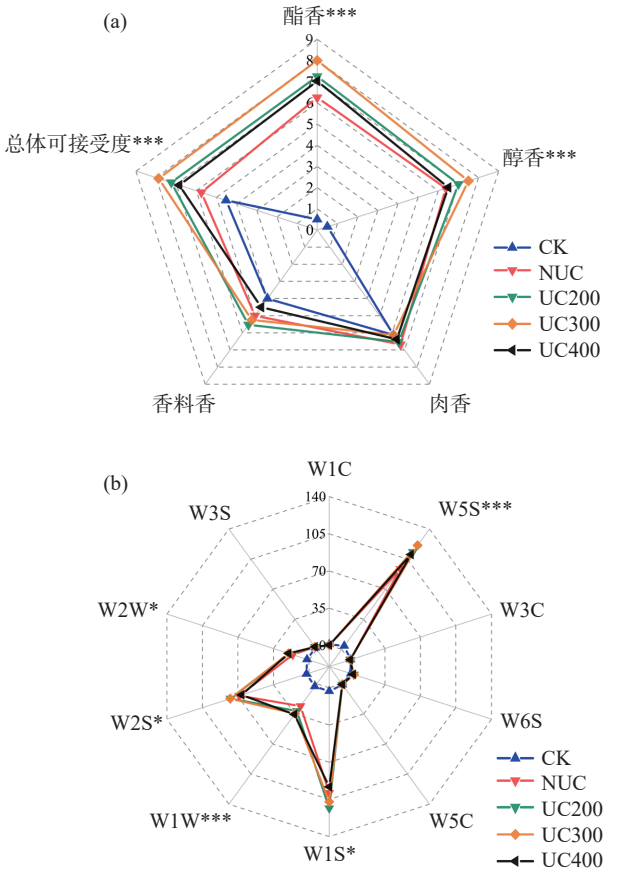


图 1　香糟牛肉的感官评价（a）和电子鼻（b）

Fig.1　Sensory evaluation (a) and E-nose (b) of vinasse-cured beef

注：*、**、***分别表示各组间显著性差异水平 P<0.05、P<0.01、P<0.001。

2.2　SDS-PAGE 分析

SDS-PAGE 常用于分析蛋白质聚集和降解状态。如图 2 所示，所有香糟牛肉肌原纤维蛋白的主要条带为：220 kDa（肌球蛋白重链/MHC）、43 kDa（肌动蛋白/Actin）、16 kDa（肌球轻链 3/MLC-3）以及 63~100 kDa。与 NUC 和 CK 组相比，超声处理组的肌原纤维蛋白条带未发生明显变化。这与 Liu 等[17] 的研究结果不一致，他们发现超声处理可诱导肌球蛋白重链交联形成可溶性寡聚体，增加肌原纤维蛋白的聚集程度。然而，在本研究中，超声处理未引起香糟牛肉肌原纤维蛋白条带改变可能与超声处理

强度较低有关。陆今明等[18] 发现超声处理未引起蛋白明显降解或聚集，而蛋白空间结构的改变提高了蛋白的乳化性。因此，本研究进一步从肌原纤维蛋白的空间结构变化探究超声辅助糟制对香糟牛肉肌原纤维蛋白构象的影响。

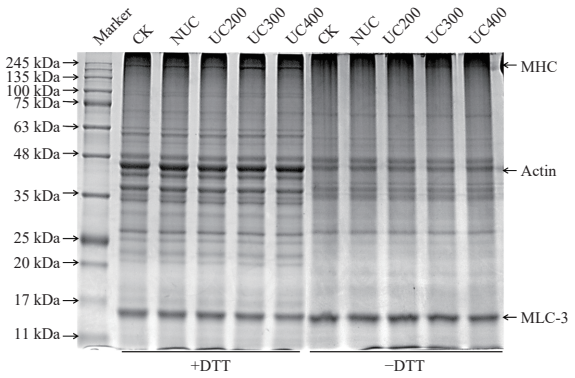


图 2 香糟牛肉的肌原纤维蛋白电泳

Fig.2 Electrophoresis of MPs from vinasse-cured beef

2.3 FTIR 分析

FTIR 常用于解析蛋白质二级结构信息，酰胺Ⅰ带（1600~1700 cm^{-1}）对应 C=O 伸缩振动，酰胺Ⅱ带（1500~1600 cm^{-1}）对应 C=N 伸缩振动与 N-H 弯曲振动耦合[19]。图 3a 显示，超声处理后酰胺Ⅰ带吸收峰红移且强度减弱，表明超声处理诱导肌原纤维蛋白二级构象发生改变。图 3b 显示，与 NUC 和 CK 组相比，UC300 组无规则卷曲相对含量显著增加至 15.69%（P<0.05），α-螺旋相对含量显著减少至 24.91%（P<0.05）。超声诱导的分子内氢键断裂可能是 α-螺旋相对含量减少的主要原因[20]。本研究中与 NUC 组相比，UC300 组 β-折叠相对含量相对减少，而 UC400 组 β-折叠含量相对增加，这可能归因于 UC400 组肌原纤维蛋白分子间氢键的形成，导致 β-折叠相对含量增加[21]。FTIR 结果表明，300 W 超声辅助糟制处理促进香糟牛肉肌原纤维蛋白解螺旋并增加肌原纤维蛋白结构舒展，而 400 W 超声导致肌原纤维蛋白通过分子间形成氢键重新聚集。

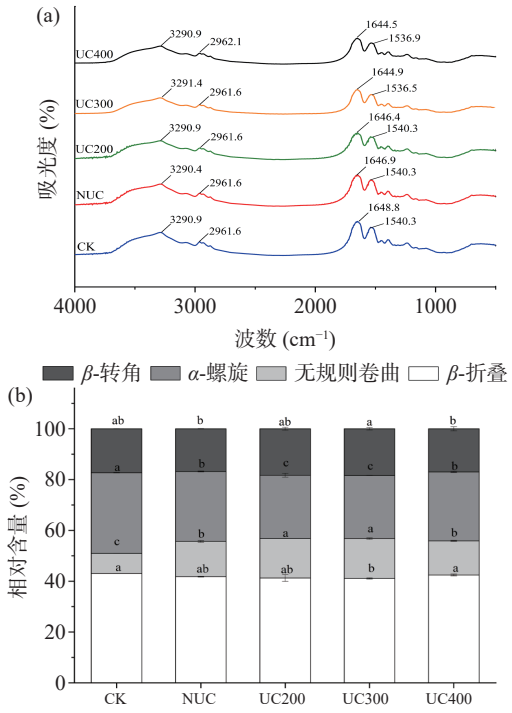


图 3 香糟牛肉肌原纤维蛋白的红外光谱(a)和二级结构相对含量(b)

Fig.3 Infrared spectra (a) and secondary structure relative content (b) of MPs from vinasse-cured beef

注：图中不同小写字母表示差异显著，P<0.05，图 4、图 5 同。

2.4 肌原纤维蛋白表面性质分析

蛋白质多肽链中相邻半胱氨酸的氧化形成分子内或分子间二硫键，这对维持蛋白质空间结构和发挥蛋白质功能具有重要意义[22]。如图 4a 所示，随超声功率增加，香糟牛肉肌原纤维蛋白的总巯基含量逐渐降低，并在 400 W 达到最低值，且 300 W 和 400 W 处理无显著差异。与 NUC 和 CK 组相比，UC300 组总巯基含量显著降低至 59.04 nmol/mg（P<0.05）。与 NUC 和 CK 组相比，UC300 组活性巯基含量显著增加至 30.95 nmol/mg（P<0.05），这可能归因于 300 W 超声处理产生的自由基等产物改变肌原纤维蛋白结构，增加了活性巯基的含量，从而提高了二硫键形成的机会[23−24]。因此，300 W 超声处理改变了香糟牛肉肌原纤维蛋白的空间结构，提高了肌原纤维蛋白表面活性巯基含量。

表面疏水性是衡量蛋白质疏水基团暴露程度的重要指标，其通过疏水相互作用影响风味物质的结合能力[25]。如图 4b 显示，随超声功率增加，香糟牛肉肌原纤维蛋白的 BPB 结合量逐渐增加，在 300 W 超声功率达到最大值。NUC 组 BPB 结合量由 CK 组的 16.18 μg 增加至 19.61 μg。陆今明等[18] 发现，20%~40% 低浓度的乙醇诱导蛋白质构象展开增加蛋白表面基团含量，归因于乙醇溶液的极性。香糟牛肉中乙醇等极性物质可能是 NUC 组肌原纤维蛋白表面疏水性增加的原因。与 NUC 组相比，UC300 组的 BPB 结合量显著增加至 22.54 μg（P<0.05）。有研究显示，超声时间延长至 8 min，肌原纤维蛋白的 BPB 结合量显著增强并趋于稳定，这归因于空化效应诱导的蛋白结构展开使肌原纤维蛋白内部疏水基团暴露，但过度的暴露可能引发分子间疏水相互作用导致自缔合[26]。表面疏水性结果表明，300 W 超声处理展开了肌原纤维蛋白的空间结构，显著提高了肌原纤维蛋白表面疏水基团的含量。

内源荧光光谱常用于反映芳香氨基酸微环境极性变化，以及评估蛋白质三级结构变化[16]。图 4c 显示，随超声功率增加，香糟牛肉肌原纤维蛋白的荧光强度（FImax）逐渐增加，在 300 W 超声功率达到最大值。与 CK 和 NUC 组相比，UC200、UC300 和 UC400 组最大荧光强度分别由 1918.75（CK 组）和 2114.00（NUC 组）增加至 2229.50、2293.55 和 2195.00。同时，与 CK 组相比，UC300 组最大发射波

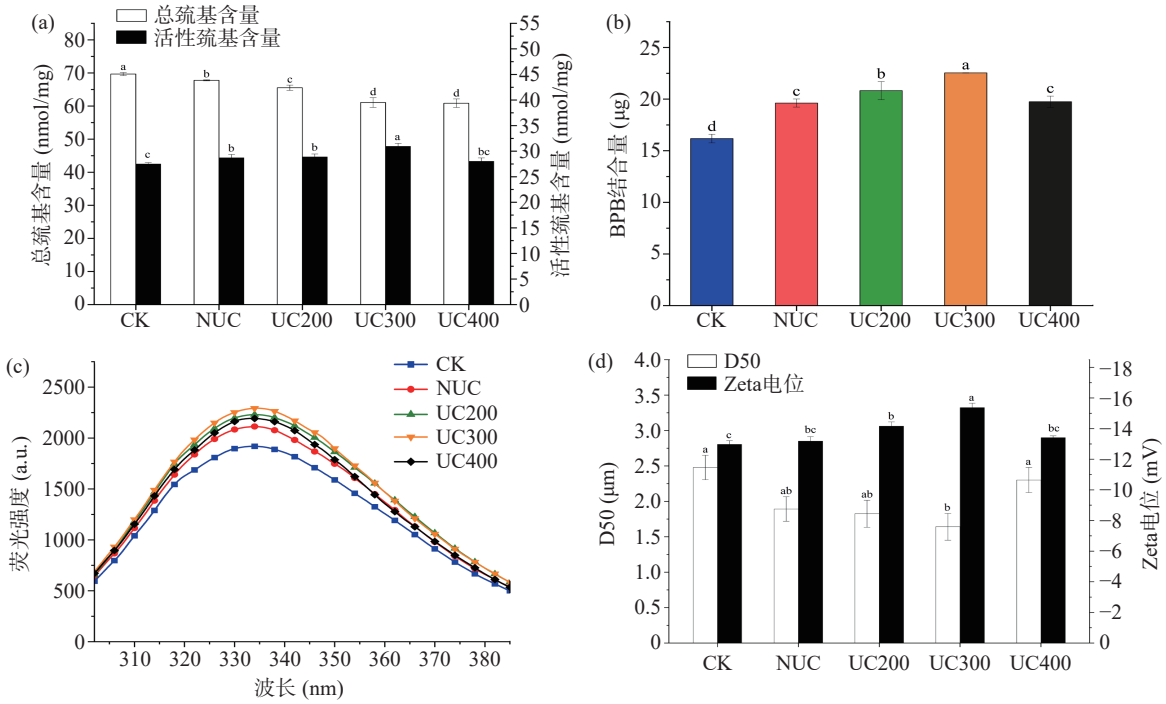


图 4　香糟牛肉肌原纤维蛋白的巯基含量(a)、BPB 结合量(b)、内源荧光光谱(c)和电位、粒径(d)

Fig.4　Sulfhydryl content (a), BPB binding content (b), fluorescence spectrum (c) and potential and size (d) of MPs from vinasse-cured beef

长(λmax)从 CK 组的 332.84 nm 红移至 335.00 nm。研究表明，超声机械力可破坏纤维蛋白的有序丝状结构，增强色氨酸残基周围极性环境[27]。300 W 超声处理香糟牛肉肌原纤维蛋白 λmax 红移和 FImax 增加，表明 300 W 超声处理使肌原纤维蛋白空间结构展开，表面暴露更多色氨酸残基。与 UC300 组相比，UC400 组 FImax 降低至 2195.00，这可能归因于肌原纤维蛋白表面荧光基团的相互作用。

Zeta 电位可表征颗粒表面电荷密度，反映蛋白质颗粒间的静电相互作用。超声功率对香糟牛肉肌原纤维蛋白的 Zeta 电位影响如图 4d 所示，与 NUC 组相比，UC300 组 Zeta 电位绝对值由 13.18 mV 增加至 15.37 mV(P<0.05)。本研究中，UC300 组肌原纤维蛋白表面负电荷含量增加，可能归因于超声诱导的结构展开，使更多负电荷基团暴露，进一步通过静电斥力调节肌原纤维蛋白结构[28]。这与超声处理后肌原纤维蛋白表面疏水性和内源荧光光谱结果相一致。粒径是衡量蛋白质聚集状态的重要指标[29]。如图 4d 显示，CK、NUC、UC200 和 UC400 组间平均粒径无显著差异，而与 CK 组相比，UC300 组粒径由 2.48 μm 显著减小至 1.64 μm(P<0.05)。这可能是 300 W 超声显著破坏了蛋白质聚集体间作用力，而 UC400 组粒径增加则可能源于过度超声引发肌原纤维蛋白的非共价相互作用增强，导致蛋白质重新聚集。

2.5　AFM 分析

通过 AFM 观察肌原纤维蛋白表面形貌，并结合肌原纤维蛋白的二维、三维图像及表面粗糙度(Rq 值)进行分析。如图 5 所示，UC300 组 Rq 值分别从 0.76±0.09 nm(CK 组)和 0.59±0.14 nm(NUC

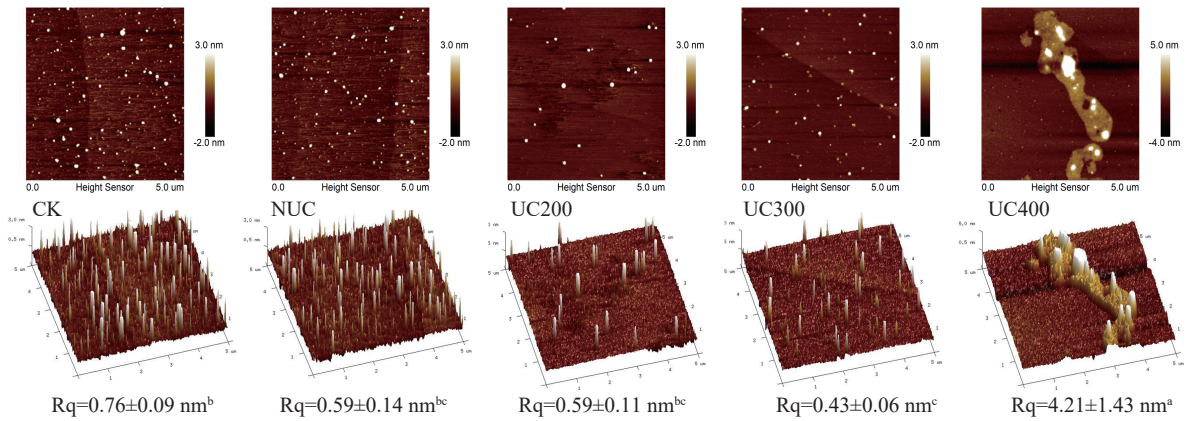


图 5　香糟牛肉肌原纤维蛋白的 AFM 形貌

Fig.5　AFM morphology of MPs from vinasse-cured beef

组)减小至 0.43±0.06 nm, 且肌原纤维蛋白呈现更加均一的形态, 而 UC400 组蛋白则呈现粗糙不均匀的聚集态。Huang 等[30] 研究发现超声处理诱导的蛋白质亚基解离, 并提高蛋白质分子间的相互作用, 进而贡献肌原纤维蛋白均匀分布和减小 Rq 值。因此, UC300 组肌原纤维蛋白分布均匀可能归因于 300 W 超声诱导的肌原纤维蛋白结构展开和埋藏基团的暴露提高了肌原纤维蛋白分子间相互作用。AFM 结果进一步证明 300 W 超声降低了肌原纤维蛋白非共价聚集程度, 而 400 W 超声导致 MPs 非共价聚集程度增加, 这与肌原纤维蛋白的二级结构和粒径结果相一致。

2.6 SPME-GC-MS 分析

如表 1 所示, 香糟牛肉样品共鉴定出 43 种挥发性风味化合物, 包括酯类(21 种)、醛类(8 种)、醇类(4 种)、酮类(3 种)、烯烃类(2 种)和其他类(5 种)。NUC 组检测到 36 种物质, 而 UC200、UC300 和 UC400 组均检测到 38 种物质。在 NUC 组中, 酯类、醛类和醇类挥发性物质含量占总挥发性物质含量的 75.96%, 是香糟牛肉挥发性风味物质的主要成分。与 NUC 组相比, UC300 组酯类、醛类及醇类浓度显著增加了 16.64%、7.89% 和 22.07%; 同时, UC300 组各类风味物质浓度显著高于 CK 组($P<0.05$)。这些结果表明, 300 W 超声处理显著改变了

表 1 香糟牛肉的挥发性化合物浓度和气味描述

Table 1 Concentration of volatile compounds and odor description of vinasse-cured beef

序号	化合物	英文名称	气味描述	挥发性化合物浓度(mg/kg)				
				CK	NUC	UC200	UC300	UC400
1	辛酸乙酯	Ethyl caprylate	果香、酒香	n.d	12.54±0.1^{c}	13.58±0.4^{b}	14.64±0.35^{a}	13.73±0.94^{b}
2	琥珀酸二乙酯	Diethyl succinate	果香	n.d	7.58±0.18^{b}	7.67±0.38^{b}	8.88±0.77^{a}	7.05±0.46^{b}
3	癸酸乙酯	Ethyl caprate	果香	0.02±0^{c}	6.89±0.55^{b}	7.59±0.4^{b}	9.16±0.46^{a}	7.28±0.28^{b}
4	乙酸苯乙酯	Phenethyl acetate	花香、果香	n.d	4.54±0.35^{c}	5.64±0.45^{b}	7.61±0.5^{a}	5.31±0.45^{b}
5	己酸乙酯	Ethyl hexanoate	果香	n.d	3.96±0.27^{a}	4.13±0.75^{a}	3.03±0.2^{b}	4.01±0.37^{a}
6	乳酸乙酯	Ethyl lactate	酒香、果香	n.d	3.60±0.24^{a}	2.74±0.34^{b}	3.16±0.09^{ab}	2.89±0.65^{b}
7	苯甲酸乙酯	Ethyl benzoate	花香	n.d	1.89±0.08^{b}	2.09±0.07^{b}	2.53±0.27^{a}	1.87±0.08^{b}
8	棕榈酸乙酯	Ethyl palmita	蜡香	0.04±0.01^{e}	2.63±0.19^{a}	1.95±0.18^{b}	1.70±0.03^{c}	0.77±0.06^{d}
9	乙酸异戊酯	Isopentyl acetate	果香	n.d	1.52±0.05^{b}	1.43±0.04^{bc}	1.31±0.14^{c}	1.90±0.06^{a}
10	月桂酸乙酯	Ethyl laurate	花香	0.02±0.01^{d}	0.88±0.04^{b}	0.94±0.01^{b}	1.18±0.08^{a}	0.44±0.12^{c}
11	肉豆蔻酸乙酯	Ethyl myristate	蜡香	n.d	0.82±0.04^{a}	0.84±0.05^{a}	0.67±0.08^{b}	0.45±0.05^{c}
12	3-甲硫基丙酸乙酯	Ethyl 3-methylthiopropionate	果香	n.d	0.68±0.04^{c}	0.77±0.02^{bc}	0.92±0.05^{a}	0.84±0.11^{ab}
13	2-羟基-4-甲基戊酸乙酯	Ethyl 2-hydroxy-4-methylvalerate	果香	n.d	0.67±0.04^{b}	0.69±0.04^{b}	0.98±0.09^{a}	0.64±0.06^{b}
14	乙酸-2-甲基丁酯	2-Methylbutyl acetate	果香	n.d	0.76±0.05^{b}	0.75±0.07^{b}	0.87±0.05^{a}	0.67±0.06^{b}
15	苯乙酸乙酯	Ethyl phenylacetate	花香	n.d	0.43±0.02^{c}	0.55±0.01^{b}	0.78±0.01^{a}	0.45±0.03^{c}
16	壬酸乙酯	Ethyl nonylate	果香、酒香	n.d	0.35±0.04^{c}	0.43±0.01^{b}	0.50±0.02^{a}	0.40±0.04^{bc}
17	丁酸乙酯	Ethyl butyrate	果香	n.d	0.10±0.01^{d}	0.12±0^{c}	0.13±0.01^{b}	0.17±0^{a}
18	肉桂酸乙酯	Ethyl cinnamate	果香	0.02±0^{d}	0.17±0.01^{b}	0.20±0.01^{a}	0.19±0^{a}	0.10±0^{c}
19	2-甲基丁酸乙酯	Ethyl 2-methylbutyrate	果香	n.d	0.12±0^{b}	0.11±0^{b}	0.09±0^{b}	0.18±0.06^{a}
20	戊酸乙酯	Ethyl valerate	果香	n.d	0.07±0.01^{c}	0.13±0.01^{b}	0.15±0.01^{a}	0.13±0.02^{b}
21	辛酸异戊酯	Isoamyl caprylate	果香、酒香	n.d	n.d	0.04±0^{a}	0.04±0.01^{a}	0.04±0.01^{a}
	酯类总量			0.1±0.01^{d}	50.18±0.65^{c}	52.41±0.61^{b}	58.53±0.64^{a}	49.31±1.27^{c}
22	苯乙醛	Phenylacetaldehyde	花香	n.d	0.08±0.01^{b}	0.03±0^{c}	0.12±0.01^{a}	0.07±0.01^{b}
23	十二醛	Dodecanal	脂肪香、花香	0.02±0.01^{d}	0.17±0.01^{b}	0.16±0.01^{bc}	0.22±0.02^{a}	0.14±0.01^{c}
24	十五醛	Pentadecanal	苦味	0.02±0^{d}	0.50±0.03^{a}	0.37±0.01^{b}	0.27±0^{c}	0.34±0.01^{b}
25	糠醛	Furfural	焦糖味	n.d	0.74±0.14^{bc}	0.91±0.11^{b}	1.50±0.16^{a}	0.55±0.03^{c}
26	十六醛	Hexadecanal	蜡香	0.26±0.02^{d}	6.22±0.55^{a}	4.95±0.23^{b}	3.28±0.93^{c}	2.55±0.09^{c}
27	对甲氧基苯甲醛	p-Anisaldehyde	山楂香	0.60±0.01^{c}	3.65±0.3^{ab}	4.12±0.06^{a}	3.64±0.5^{ab}	3.18±0.43^{b}
28	壬醛	Nonanal	脂香、果香	0.41±0.04^{c}	1.81±0.24^{b}	2.12±0.07^{ab}	2.23±0.15^{a}	2.35±0.28^{a}
29	苯甲醛	Benzaldehyde	苦杏仁	0.17±0.03^{d}	22.60±1.03^{c}	25.55±0.99^{b}	27.33±0.83^{a}	23.79±0.88^{c}
	醛类总量			1.48±0.06^{d}	35.76±1.53^{b}	38.22±0.83^{a}	38.58±0.82^{a}	32.97±1.2^{c}
30	苯乙醇	Phenylethyl alcohol	玫瑰花香	n.d	5.80±0.33^{b}	5.23±0.24^{bc}	7.08±0.61^{a}	4.73±0.64^{c}
31	桉叶油醇	Eucalyptol	樟脑香	0.14±0.02	n.d	n.d	n.d	n.d
32	芳樟醇	Linalool	花香	0.03±0	n.d	n.d	n.d	n.d
33	松油醇	Terpineol	木质香	0.01±0	n.d	n.d	n.d	n.d
	醇类总量			0.18±0.02^{d}	5.80±0.33^{b}	5.23±0.24^{bc}	7.08±0.61^{a}	4.73±0.64^{c}
34	2,3-庚二酮	2,3-Heptanedione	奶酪香	n.d	n.d	0.01±0^{a}	0.02±0^{a}	0.01±0^{a}

续表 1

序号	化合物	英文名称	气味描述	挥发性化合物浓度(mg/kg)				
				CK	NUC	UC200	UC300	UC400
35	苯乙酮	Acetophenone	花香	n.d	0.20±0.03^{b}	0.19±0.01^{b}	0.27±0.02^{a}	0.21±0.01^{b}
36	小茴香酮	Fenchone	果香、木质香	0.03±0	n.d	n.d	n.d	n.d
	酮类总量			0.03±0^{c}	0.20±0.03^{b}	0.20±0.01^{b}	0.28±0.01^{a}	0.22±0.01^{b}
37	α-萜品烯	3-methyl-6-(1-methylethylidene) cyclohexene	木质香	0.02±0^{c}	0.05±0.01^{b}	0.05±0^{b}	0.07±0^{a}	0.05±0^{b}
38	(S)-(-)-柠檬烯	(S)-(-)-Limonene	松香、胡椒香	n.d	0.28±0.01^{c}	0.57±0.01^{b}	0.58±0.04^{b}	0.83±0.11^{a}
	烯烃类总量			0.02±0^{d}	0.33±0.02^{c}	0.62±0.01^{b}	0.65±0.04^{b}	0.88±0.12^{a}
39	香豆素	Coumarin	香茅香	0.01±0^{d}	0.06±0.01^{a}	0.05±0^{b}	0.05±0.01^{b}	0.03±0^{c}
40	4-甲氧基苯丙酮	4-Methoxyphenylacetone	茴香	0.01±0^{c}	0.08±0.01^{ab}	0.08±0^{ab}	0.10±0.02^{a}	0.08±0.01^{b}
41	2-戊基呋喃	2-Pentylfuran	泥土香	n.d	0.87±0.12^{b}	0.98±0.01^{a}	0.97±0.04^{ab}	0.70±0.01^{c}
42	茴香脑	Anethole	茴香香	3.52±0.15^{c}	27.50±0.88^{b}	33.44±1.28^{a}	32.61±0.84^{a}	31.92±0.18^{a}
43	草蒿脑	Estragole	大茴香香	0.35±0.03	n.d	n.d	n.d	n.d
	其他类总量			3.89±0.14^{d}	28.51±0.96^{c}	34.55±1.27^{a}	33.73±0.86^{ab}	32.73±0.17^{b}
	所有物质总量			5.70±0.09^{d}	120.78±1.33^{c}	131.23±0.92^{b}	138.85±0.65^{a}	120.84±2.14^{c}

注：同行不同字母表示样品组间差异显著，P<0.05；n.d表示未检出；风味化合物气味描述来自https://www.chemicalbook.com/ProductIndex.aspx和https://www.chembk.com/cn。

香糟牛肉挥发性风味化合物的组成，促进了酯类、醛类和醇类物质的积累。

酯类化合物是香糟牛肉主要挥发性物质之一，主要以乙酯形式存在，包括来自酒糟的短链(C4~C6)和中链(C8~C10)脂肪酸乙酯以及芳香乙酯，具有果香、酒香和花香香气。例如，丁酸乙酯、辛酸乙酯和癸酸乙酯具有果香和醇香特征，苯乙酸乙酯和苯甲酸乙酯等芳香酯类贡献了花香和甜味，它们均来自酒发酵过程中微生物代谢和酯化反应[31]。然而，CK 组未检测到这些酯类化合物。此外，与 NUC 组相比，UC300 组中戊酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯和苯甲酸乙酯的浓度分别显著增加了 114.29%、16.75%、32.95% 和 33.86%(P<0.05)，这表明 300 W 超声辅助糟制提高了香糟牛肉这些特征酯类物质的浓度。

醛类化合物是另一类重要风味物质。本研究中，香糟牛肉共鉴定出 8 种醛，包括芳香醛和脂肪醛。苯甲醛、苯乙醛和糠醛等芳香醛类具有杏仁和焦糖香气，能与其他物质协同形成怡人风味[32]；壬醛、十二醛和十五醛源于脂质氧化，贡献脂肪和甜味特征。与 NUC 组相比，UC300 组苯乙醛、糠醛、苯甲醛和壬醛含量分别显著增加了 50.00%、102.70%、20.93% 和 23.20%(P<0.05)，这表明超声辅助糟制技术显著增加了这些醛类物质的浓度。

醇类、酮类、烯烃类和其他物质约占总挥发性化合物的 29.00%，主要来源于香辛料。桉叶油醇、α-萜品烯、和茴香脑等化合物具有香料、松香和樟脑风味，赋予食品香辛料气味。此外，苯乙醇、苯乙酮和 2-戊基呋喃具有玫瑰花香、果香、泥土和青草香气，其中苯乙醇主要来自酒发酵过程中微生物代谢[33]。桉叶油醇、小茴香酮、草蒿脑等风味化合物仅出现在 CK 组，且浓度较低，这可能归因于酒糟风味物质较高的浓度导致这些物质在检测过程中信号被覆盖或抑制。气味感知不仅与化合物浓度相关，还与其组成及嗅觉阈值密切相关。与 NUC 组相比，尽管 UC300 组(S)-(-)-柠檬烯、2-戊基呋喃的浓度显著增加，然而由于其阈值相对较高，因此它们可能对香糟牛肉风味的形成影响较小。

进一步筛选影响香糟牛肉感官品质差异的风味化合物，本研究构建了 PLSR 模型，其中自变量 X 代表挥发性风味化合物矩阵，因变量 Y 代表感官品质矩阵。如图 6a 所示，该模型分别解释了 X 和 Y 变异性的 98.60% 和 92.70%，表明模型具有良好的拟合度和预测能力。PLSR 模型中 PC1 能解释 X 矩阵(挥发性风味化合物)83.20% 的变异，PC2 仅能解释 X 矩阵 7.55% 的变异。通过 PC1 区分糟制组(NUC、UC200、UC300 和 UC400)和未糟制组(CK)，酯香和醇香与苯甲醛、苯甲酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯等风味化合物紧密正相关。

通过变量投影重要性(VIP)分析(图 6b)，共筛选出 15 种 VIP>1 的关键风味化合物，包括戊酸乙酯、苯乙醛、己酸乙酯、棕榈酸乙酯、4-甲氧基苯丙酮等。与 CK 组相比，NUC、UC200、UC300 和 UC400 组新增戊酸乙酯等关键风味化合物，且各组中戊酸乙酯含量分别为 0.07、0.13、0.15 和 0.13 mg/kg，UC300 组含量最高。因此，以上关键风味化合物可能是引起 UC300 组特征风味增加的统计学差异风味化合物。使用上述关键风味化合物，通过气味活度值(OAV)变化进一步分析这些物质对 UC300 组特征风味的影响。

香糟牛肉中这些关键风味化合物的 OAV 变化见表 2。共筛选出 12 种 OAV>1 的气味活性化合物。其中，UC300 组中辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸苯乙酯、苯乙醛、壬醛、戊酸乙酯、丁酸乙酯、苯甲酸乙酯、壬酸乙酯和苯乙酸乙酯的 OAV 显著高于 NUC

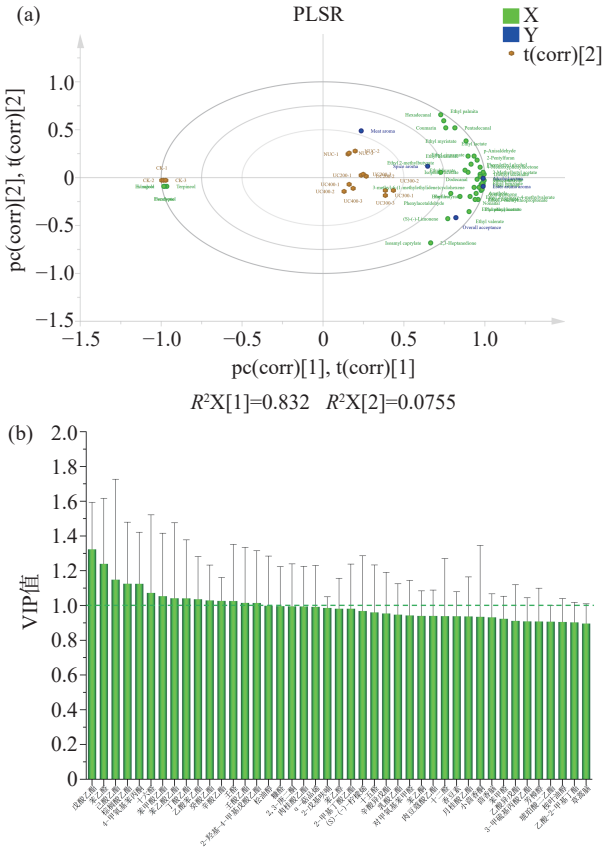


图 6　香糟牛肉风味物质与感官品质的 PLSR(a)和 VIP(b)

Fig.6　Partial least squares regression (a) and variable importance in the projection (b) of flavor compounds and sensory qualities in vinasse-cured beef

表 2　香糟牛肉中关键风味化合物的气味活度值(OAV)

Table 2　Odor-active values of key volatile compounds in vinasse-cured beef

序号	化合物	气味阈值(mg/kg)	OAV				
			CK	NUC	UC200	UC300	UC400
1	辛酸乙酯	0.05[34]	0.00	250.80	271.60	292.80	274.60
2	癸酸乙酯	0.20[34]	0.10	34.45	37.95	45.80	36.40
3	乙酸苯乙酯	0.25[34]	0.00	18.16	22.56	30.44	21.24
4	苯乙醛	0.005[35]	0.00	16.00	6.00	24.00	14.00
5	壬醛	0.122[36]	3.36	14.84	17.38	18.28	19.26
6	戊酸乙酯	0.0058	0.00	12.07	22.41	25.86	22.41
7	丁酸乙酯	0.02[11]	0.00	5.00	6.00	6.50	8.50
8	苯甲酸乙酯	0.58[34]	0.00	3.26	3.60	4.36	3.22
9	己酸乙酯	1.50[34]	0.00	2.64	2.75	2.02	2.67
10	壬酸乙酯	0.20	0.00	1.75	2.15	2.50	2.00
11	棕榈酸乙酯	2.00[37]	0.02	1.32	0.98	0.85	0.39
12	苯乙酸乙酯	0.407[38]	0.00	1.06	1.35	1.92	1.11

注: OAV由风味化合物浓度均值除以阈值得到; 部分化合物阈值来自https://www.vcf-online.nl/VcfHome.cfm。

和 CK 组。如, 与 NUC 组相比, UC300 组戊酸乙酯的 OAV 显著增加了 114.25%, 且分别高于 UC200 和 UC400 组的 22.41。感官结果表明, UC300 组的酯香和醇香评分显著高于 NUC 组, 且高于 UC200 和 UC400 组。在本研究中, 戊酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯等风味化合物具有果香、酒香、花香等酯类和醇类风味品质, 且 OAV>1。因此, 以上 10 种气味活性物质是提高 300 W 超声处理组中酯香和醇香风味的关键气味活性化合物。相反, 与 NUC 组相比, UC300 组中己酸乙酯和棕榈酸乙酯的 OAV 分别减少了 23.48% 和 35.61%, UC200 和 UC400 组变化较小。

2.7　Spearman 相关性分析

使用上述 10 种关键气味活性化合物, 通过 Spearman 相关性分析来进一步评价香糟牛肉风味品质与肌原纤维蛋白构象之间的关系。如图 7 所示, 戊酸乙酯和苯甲酸乙酯分别与酯香(r=0.975、P=0.005, r=0.900、P=0.037)、醇香(r=0.975、P=0.005, r=0.900、P=0.037)和内源荧光(r=0.975、P=0.005, r=0.900、P=0.037)呈显著正相关。而戊酸乙酯和苯甲酸乙酯与 α-螺旋(r=−0.975、P=0.005, r=−0.900、P=0.037)呈显著负相关。癸酸乙酯、乙酸苯乙酯、苯乙酸乙酯和壬酸乙酯与上述的酯化合物结果类似。Zhao 等[39] 研究表明, 500 W 超声处理对猪肉肌原纤维蛋白荧光强度的提高和 α-螺旋含量的降低, 有助于提高猪肉肌原纤维蛋白对糠醛、2-戊基呋喃和 5-甲基糠醛等风味物质的结合量。Han 等[40] 研究表明, 超声波预处理可通过增强 β-乳球蛋白(BLG)杯状结构入口的柔韧性, 诱导 BLG 的 EF 环(Loop EF)区域发生构象重排, 增加香气的结合。因此, 本研究中相关性分析进一步表明, 超声辅助糟制可能通过诱导香糟牛肉肌原纤维蛋白螺旋结构打开, 促进其对酒糟中中链脂肪酸酯和芳香乙酯的保留, 从而提高了香糟牛肉的酯香味与醇香味强度, 提升了香糟牛肉的特征风味品质。

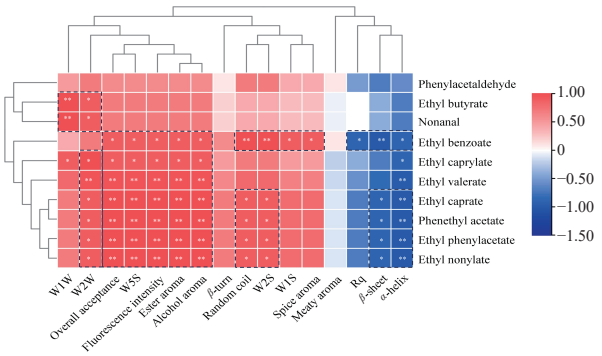


图 7　香糟牛肉风味品质与肌原纤维蛋白构象之间的 Spearman 相关系数热图

Fig.7　Heat map of Spearman correlation coefficients between flavor quality and conformation of myofibrillar proteins of vinasse-cured beef

注: *、**分别表示相关性显著性水平 P<0.05、P<0.01。

3　结论

200、300 和 400 W 超声辅助糟制处理均能改善香糟牛肉的感官品质并提高酯香和醇香的强度, 所有组别中, 300 W 超声辅助糟制处理组的酯香和醇香强度显著高于其他处理组(P<0.05)。与其他组相比,

UC300 组肌原纤维蛋白的 α-螺旋相对含量、平均粒径和表面粗糙度最低，表明 300 W 超声辅助糟制处理显著诱导香糟牛肉肌原纤维蛋白分子内氢键等非共价键断裂和构象改变，而表面疏水性、内源荧光强度和活性巯基含量最高，表明 300W 超声辅助糟制处理显著增加了香糟牛肉肌原纤维蛋白表面荧光基团等活性基团含量。SPME-GC-MS 结果表明，香糟牛肉共鉴定出 43 种挥发性风味化合物，与 CK 和 NUC 组相比，UC200、UC300 和 UC400 组总风味物质含量分别由 5.70 mg/kg（CK 组）和 120.78 mg/kg（NUC 组）增加至 131.23、138.85 和 120.84 mg/kg，且 UC300 组高于 UC200 和 UC400 组。PLSR 和 OAV 结果表明，戊酸乙酯、苯甲酸乙酯、癸酸乙酯等 10 种风味化合物是提高 UC300 组特征风味的关键气味活性化合物。Spearman 相关性分析显示，戊酸乙酯、苯甲酸乙酯等关键气味活性化合物与 α-螺旋显著负相关，与酯香和醇香紧密正相关，表明超声辅助糟制处理可能通过打开香糟牛肉肌原纤维蛋白 α-螺旋，增强香糟牛肉对酯类、醛类风味物质保留，从而提升香糟牛肉特征风味强度。本研究可为超声技术在改善糟肉制品香气品质中的应用提供重要依据。

© The Author(s) 2026. 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] LOU X W, ZHANG Y B, SUN Y Y, et al. The change of volatile compounds of two kinds of vinasse-cured ducks during processing[J]. Poultry Science, 2018, 97(7): 2607−2617.

[2] XIA Q, FENG T, LOU X W, et al. Headspace fingerprinting approach to identify the major pathway influencing volatile patterns of vinasse-cured duck processed by high pressure, as well as its impact on physicochemical and sensory attributes[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 55(2): 669−680.

[3] ZHANG X, LI H Y, WU D, et al. Unlocking aroma in three types of vinasse fish by sensomics approach[J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140496.

[4] LOU X W, YE Y F, WANG Y, et al. Effect of high-pressure treatment on taste and metabolite profiles of ducks with two different vinasse-curing processes[J]. Food Research International, 2018, 105: 703−712.

[5] LI B, ZHONG M M, SUN Y F, et al. Recent advancements in the utilization of ultrasonic technology for the curing of processed meat products: A comprehensive review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 103: 106796.

[6] CHEN J H, CHEN X, ZHOU G H, et al. Ultrasound: A reliable method for regulating food component interactions in protein-based food matrices[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 128: 316−330.

[7] BAI H L, LI L H, WU Y Y, et al. Ultrasound improves the low-sodium salt curing of sea bass: Insights into the effects of ultrasound on texture, microstructure, and flavor characteristics[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 100: 106597.

[8] HU Y Y, DONG Z M, WEN R X, et al. Combination of ultrasound treatment and starter culture for improving the quality of beef jerky[J]. Meat Science, 2023, 204: 109240.

[9] GUO L, HONG C, WANG W J, et al. Evaluation of low-temperature ultrasonic marination of pork meat at various frequencies on physicochemical properties, myoglobin levels, and volatile compounds[J]. Meat Science, 2024, 217: 109606.

[10] 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.

[11] ZHANG B, WANG J, JIANG X Y, et al. Comparative study on key odorants of Jiujiang Fenggang Huangjiu and their succession regularities during aging using sensory-directed flavor analysis[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137052.

[12] LI Z M, LI D N, PAN D D, et al. Insights into the mechanism of extracellular proteases from *Penicillium* on myofibrillar protein hydrolysis and volatile compound evolutions[J]. Food Research International, 2024, 175: 113774.

[13] LUO J, NASIRU M M, YAN W J, et al. Effects of dielectric barrier discharge cold plasma treatment on the structure and binding capacity of aroma compounds of myofibrillar proteins from dry-cured bacon[J]. LWT, 2020, 117: 108606.

[14] ZHANG D D, GE X Y, JIAO Y, et al. Quality analysis of steamed beef with black tea and the mechanism of action of main active ingredients of black tea on myofibrillar protein[J]. Food Chemistry, 2024, 441: 137997.

[15] CHELH I, GATELLIER P, SANTÉ-LHOUTELLIER V. Technical note: A simplified procedure for myofibril hydrophobicity determination[J]. Meat Science, 2006, 74(4): 681−683.

[16] HAN G, LI Y X, LIU Q, et al. Improved water solubility of myofibrillar proteins by ultrasound combined with glycation: A study of myosin molecular behavior[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 89: 106140.

[17] LIU H T, ZHANG H, LIU Q, et al. Solubilization and stable dispersion of myofibrillar proteins in water through the destruction and inhibition of the assembly of filaments using high-intensity ultrasound[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105160.

[18] 陆今明, 尚永彪, 侯大军, 等. 超声波联合乙醇改性对猪心蛋白结构和功能的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 30−39.
[LU Jinming, SHANG Yongbiao, HOU Dajun, et al. Effect of ultrasonic combined with ethanol modification on the structural and functional properties of porcine heart protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 30−39.]

[19] LI H J, HU Y F, ZHAO X H, et al. Effects of different ultrasound powers on the structure and stability of protein from sea cucumber gonad[J]. LWT, 2021, 137: 110403.

[20] XU X F, LIU W, LIU C M, et al. Effect of limited enzymatic hydrolysis on structure and emulsifying properties of rice glutelin [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 61: 251−260.

[21] LIN S W, LIANG X, ZHAO Z H, et al. Elucidating the mechanisms of ultrasound treatment combined with κ-carrageenan addition enhancing the gelling properties of heat-induced myofibrillar protein gel[J]. Food Research International, 2024, 182: 114177.

[22] YU Y, FAN C X, QI J, et al. Effect of ultrasound treatment on porcine myofibrillar protein binding furan flavor compounds at different salt concentrations[J]. Food Chemistry, 2024, 443: 138427.

[23] LI N, ZHANG K X, DU J Y, et al. High-intensity ultrasound improved the physicochemical and gelling properties of *Litope-*

naeus vannamei myofibrillar protein[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106217.
[24] DENG X H, NI X X, HAN J H, et al. High-intensity ultrasound modified the functional properties of *Neosalanx taihuensis* myofibrillar protein and improved its emulsion stability[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 97: 106458.
[25] LI K, FU L, ZHAO Y Y, et al. Use of high-intensity ultrasound to improve emulsifying properties of chicken myofibrillar protein and enhance the rheological properties and stability of the emulsion[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105275.
[26] WANG H F, WANG P Y, SHEN Q, et al. Insight into the effect of ultrasound treatment on the rheological properties of myofibrillar proteins based on the changes in their tertiary structure[J]. Food Research International, 2022, 157: 111136.
[27] ZHANG C, WANG Z Y, LIU Q, et al. Solubilization strategy of myofibrillar proteins in low-ionic media (prototype soup): The effect of high-intensity ultrasound combined with non-covalent or covalent modification of polyphenols on myosin molecular assembly[J]. Food Chemistry, 2024, 436: 137701.
[28] ZHANG Z Y, 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.
[29] GÜLSEREN İ, GÜZEY D, BRUCE B D, et al. Structural and functional changes in ultrasonicated bovine serum albumin solutions[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2007, 14(2): 173−183.
[30] HUANG L R, DING X N, DAI C H, et al. Changes in the structure and dissociation of soybean protein isolate induced by ultrasound-assisted acid pretreatment[J]. Food Chemistry, 2017, 232: 727−732.
[31] CHEN S, XU Y. Effect of 'wheat Qu' on the fermentation processes and volatile flavour-active compounds of Chinese rice wine (Huangjiu)[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2013, 119(1−2): 71−77.
[32] XU Y X, WANG R, ZHAO H L, et al. Effect of heat treatment duration on the interaction between fish myosin and selected flavor compounds[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(12): 4457−4463.
[33] YU H Y, GUO W, AI L Z, et al. Unraveling the difference in aroma characteristics of Huangjiu from Shaoxing region fermented with different brewing water, using descriptive sensory analysis, comprehensive two-dimensional gas chromatography–quadrupole mass spectrometry and multivariate data analysis[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131227.
[34] YANG Y J, AI L Z, MU Z Y, et al. Flavor compounds with high odor activity values (OAV>1) dominate the aroma of aged Chinese rice wine (Huangjiu) by molecular association[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132370.
[35] WANG J, YUAN C J, GAO X L, et al. Characterization of key aroma compounds in Huangjiu from northern China by sensory-directed flavor analysis[J]. Food Research International, 2020, 134: 109238.
[36] GAO W J, FAN W L, XU Y. Characterization of the key odorants in light aroma type chinese liquor by gas chromatography-olfactometry, quantitative measurements, aroma recombination, and omission studies[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(25): 5796−5804.
[37] KH A A, MI S, TIAN H S, et al. Evaluation of flavor characteristics in Chinese wheat flour paste using electronic-nose, electronic-tongue, and headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry at different fermentation stages[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 105(4): 2454−2465.
[38] DUAN J W, CHENG W, LÜ S L, et al. Characterization of key aroma compounds in soy sauce flavor Baijiu by molecular sensory science combined with aroma active compounds reverse verification method[J]. Food Chemistry, 2024, 443: 138487.
[39] ZHAO X, QI J, FAN C, et al. Ultrasound treatment enhanced the ability of the porcine myofibrillar protein to bind furan compounds: Investigation of underlying mechanisms[J]. Food Chemistry, 2022, 384: 132472.
[40] HAN C H, ZHENG Y R, HUANG S Q, et al. Exploring the binding mechanisms of thermally and ultrasonically induced molten globule-like β-lactoglobulin with heptanal as revealed by multi-spectroscopic techniques and molecular simulation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 263: 130300.