

高压静电场下发酵牛肉风味品质及微生物群落特性研究

沙 坤¹ 李思源^{2,3} 张松山⁴ 张泽俊² 刘海杰²

(1. 中国农业大学烟台研究院, 烟台 264670; 2. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083;
3. 河北旅游职业学院, 承德 067000; 4. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 北京 100193)

摘要: 为明确高压静电场 (High-voltage electrostatic field, HVEF) 对发酵牛肉品质影响规律, 采用 2.0 kV HVEF 和 3.0 kV HVEF 辅助制作发酵牛肉, 与对照组比较, 分析不同处理条件对发酵牛肉理化指标、风味品质、微生物群落的影响。结果表明: HVEF 辅助处理会显著降低发酵牛肉的含水率 ($P < 0.05$), 且电压越高, 效果越显著, 对 pH 值、 L^* 和 b^* 值无显著影响, 但 2.0 kV HVEF 处理会显著降低 a^* 值、增加 ΔE 值 ($P < 0.05$)。电子鼻分析表明, 不同处理组发酵牛肉样品之间风味差异较大, 可以通过主成分分析进行较好区分。电子舌分析表明, HVEF 辅助处理会增加鲜味、咸味和苦味传感器响应值。通过气相离子迁移谱 (Gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS) 分析, 共鉴别出 43 种挥发性风味物质, 包括醇类 12 种、酮类 10 种、醛类 9 种、烯类 8 种、其他 4 种, 3.0 kV HVEF 处理对这些风味物质的含量影响较大。高通量测序结果表明, 发酵牛肉中的真菌优势菌为 *Penicillium* (青霉菌属) 和 *Debaryomyces* (德巴利酵母属), HVEF 能够降低 *Penicillium* 所占比例, 增加 *Debaryomyces* 所占比例; 发酵牛肉中的细菌优势菌为 *Staphylococcus* (葡萄球菌属) 和 *Lactobacillus* (乳杆菌属), HVEF 能够增加 *Staphylococcus* 所占比例, 降低 *Lactobacillus* 所占比例。各指标综合分析表明, 3.0 kV HVEF 处理对发酵牛肉品质提升有较好促进作用。

关键词: 发酵牛肉; 风味品质; 高压静电场; 气相-离子迁移谱; 微生物群落

中图分类号: TS251.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)10-0371-10 OSID: 

Effect of High Voltage Electrostatic Field on Flavor Quality and Microbial Community of Fermented Beef

SHA Kun¹ LI Siyuan^{2,3} ZHANG Songshan⁴ ZHANG Zejun² LIU Haijie²

(1. Yantai Institute, China Agricultural University, Yantai 264670, China
2. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. Hebei Tourism Vocational College, Chengde 067000, China
4. Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: The purpose was to investigate the quality characteristics of fermented beef under high-voltage electrostatic field (HVEF) conditions. The physicochemical parameters, volatile compounds and microbial community of fermented beef samples treated with HVEF (2.0 kV, 3.0 kV) were compared with those under common fermentation conditions (control group). The results showed that compared with control group, HVEF could significantly reduce the moisture content of fermented beef ($P < 0.05$), and the higher the voltage was, the more significant the effect was. It had no significant effect on pH value, L^* and b^* , but 2.0 kV HVEF treatment could significantly reduce a^* and increase ΔE value ($P < 0.05$). The electronic nose analysis showed that the volatile compounds of fermented beef samples with different groups was quite different, which could be well distinguished by principal component analysis. The electronic tongue analysis showed that HVEF could increase the response value of the umami, saltiness and bitterness taste sensors. Through the analysis of gas chromatography-ion mobility spectroscopy (GC-IMS), totally 43 volatile flavor substances were identified, including 12 alcohols, 10 ketones, 9 aldehydes, 8 alkenes, and 4 others. 3.0 kV HVEF had a great impact on the content of these

flavor substances. The results of high-throughput sequencing showed that *Penicillium* and *Debaryomyces* were the dominant fungi in fermented beef. HVEF could reduce the proportion of *Penicillium* and increase the proportion of *Debaryomyces*. The dominant bacteria in fermented beef were *Staphylococcus* and *Lactobacillus*. HVEF can increase the proportion of *Staphylococcus* and reduce the proportion of *Lactobacillus*. The comprehensive analysis of various indicators showed that the 3.0 kV HVEF treatment had a good promoting effect on improving the quality of fermented beef.

Key words: fermented beef; flavour quality; HVEF; GC-IMS; microbial community

0 引言

发酵牛肉是一种具有高附加值的便捷特色牛肉产品,符合消费者日益改变的生活方式及消费需求,对牛肉产业发展具有重要意义^[1]。发酵过程是发酵牛肉品质形成的重要工艺环节,发酵过程中,肉中的自由水转化为结合水形成了其特殊的质地,蛋白质、脂肪等氧化降解形成了其独特的风味^[2-3]。

高压静电场(High-voltage electrostatic field, HVEF)是一种人工综合效应场,发生装置通常由直流电源、高压发生器、处理室 3 个核心装置组成,直流电源先产生一个较低的电压,再通过高压发生器将电压升高,最终作用于处理室的电极形成静电场^[4-5],根据电极形状不同可形成均匀或非均匀电场,通常平板电极间的电场被默认为匀强电场,针板、线板等非平板电极间的电场为非匀强电场^[6]。

HVEF 作为一种新型非热加工技术,节能高效,能够最大限度地保持食品的营养物质,在肉类冷冻解冻、食品保鲜等方面已有广泛研究^[7-9]。目前,已有学者研究将 HVEF 用于发酵食品的生产过程。文献[10]研究 HVEF 对食醋成分变化的影响,结果表明,经 HVEF 处理后,食醋中乙醛、乙醇、异丁醇等具有刺激性气味成分的含量降低,总酸和具有芳香气味的酯类含量升高,这对提高食醋等级非常有利。文献[6]通过 HVEF 辅助发酵余甘子酵素,将发酵时间由 49 d 缩短至 8 d,与无 HVEF 辅助发酵制备的余甘子酵素比,HVEF 辅助发酵的样品必需氨基酸质量浓度由 0.674 mg/mL 提高至 1.214 mg/mL,酯类中乙酸乙酯和水杨酸甲酯所占比例显著提高。文献[11]研究 HVEF 对干腌牛肉冷藏期间品质及挥发性有机物的影响,结果表明,HVEF 处理可以延缓冷藏期间干腌牛肉 pH 值及含水率的降低速率,提高颜色的稳定性能,可以提高苯甲醛、三甲基吡嗪及麦芽酚等特征性风味成分的含量,HVEF 可以应用于干腌肉类的贮存。文献[12]采用 HVEF 辅助腌制牛肉,结果表明,HVEF 处理可以提高腌制完成后产品的产率,促进水分和 NaCl 在肉样中的扩散。但还鲜有研究将 HVEF 用于发酵肉制品的生产过程。

气相-离子迁移谱(Gas chromatography-ion mobility spectrometry,GC-IMS)是一种新兴的挥发性化合物检测手段,具有操作简单、响应迅速等优点,已广泛应用于食品风味分析领域^[13-14]。目前采用 GC-IMS 技术对肉品风味研究主要集中在不同种类肉品的风味鉴别、掺伪鉴别、新鲜度检验等,也有研究开始用于比较不同加工方式(如干燥、炖煮、发酵、老化、干腌等)对肉品风味特性的影响^[15]。文献[16]采用 GC-IMS 技术在混菌发酵香肠中共鉴定出 33 种挥发性物质,可以直观地看出添加不同种类发酵剂及发酵过程中风味物质种类和含量的变化。高通量测序技术可以对物种基因组进行全面分析,特异性强、灵敏度高,可以全面、客观地了解某一微生态系统中微生物群落结构^[17]。文献[18]采用高通量测序技术对不同来源的传统发酵腊肉中细菌多样性进行了解析,结果显示不同来源腊肉样品在细菌组成方面相似性较高。文献[19]采用通量测序技术评价腊肠发酵过程中细菌多样性,发现乳酸菌对腊肠的发酵成熟和风味品质的形成有重要影响。

本文以牛肉为原料,通过 HVEF 结合自然发酵方法制备发酵牛肉,通过电子鼻、电子舌及 GC-IMS 分析技术研究发酵和 HVEF 处理对牛肉风味品质的影响,同时,采用高通量测序技术测定不同处理组发酵牛肉中的微生物群落结构,以期揭示高压静电场对发酵牛肉品质的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

牛肉(小黄瓜条),购买于河北燕城食品有限公司;腌制用中性大粒盐、蔗糖、胡椒粉、辣椒、香叶等,食品级,购于北京物美超市。

1.2 仪器与设备

BS 200S-WEI 型电子天平,北京赛多利斯天平有限公司;HI99163 型 pH 计,美国 HANNA 仪器有限公司;CR-400 型色差仪,日本柯尼卡-美能达公司;BMT-JD020(2.0 kV)型、BMT-JD010(3.0 kV)型静电场发生装置,山东博美特厨业有限公司;

PEN3 型电子鼻、SA402B 型电子舌,北京盈盛恒泰科技有限责任公司;FlavourSpec 型风味分析仪,山东海能仪器股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 发酵牛肉制备

腌制剂组成:腌制剂使用按腌制剂与原料肉质量比添加,食盐 3%,蔗糖 0.15%,亚硝酸钠 0.02%,胡椒粉 1%,辣椒 0.3%,香叶 0.5%,腌制前混合均匀。

腌制:将原料牛肉在 0~4℃ 冰箱内解冻,修整外形,将腌制剂均匀地涂抹在原料肉表面,在 4℃ 下腌制 10 d,期间每 2 d 翻整 1 次。

发酵:腌制完成后,洗去肉表面腌制剂,装入尼龙网袋。进行编号,实验设计对照、2.0 kV 处理组、3.0 kV 处理组,对照组样品吊挂在发酵间(温度 15~20℃、相对湿度 60%~65%)发酵 42 d,2.0 kV 组和 3.0 kV 组分别将 2.0、3.0 kV 静电场发生装置接至吊挂发酵牛肉的铁架上,其他条件与对照组一致。

取样:3 组处理分别取发酵第 0、42 天的肉样用于指标的测定。

1.3.2 含水率

参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》,采用直接干燥法测定。

1.3.3 pH 值

参照 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》。

1.3.4 肉色

使用色差计测定样品的 L^* 、 a^* 和 b^* 值。肉样切开后,于室温(20℃)氧合 40 min 后测定,每个样品测定 3 次,结果取平均值。

1.3.5 电子鼻

称取 1 g 样品于 10 mL 顶空瓶中,将顶空瓶密封,室温平衡 20 min,60℃ 水浴 30 min,室温平衡 30 min,平衡结束后使用 PEN3 型电子鼻进行检测分析。进样流量 600 mL/min,洗脱时间 300 s,检测时间 300 s。选用 296~300 s 响应值进行数据分析。使用的电子鼻传感器类型及性能如下:WIC,对芳香成分敏感;W5S,对氮氧化物敏感;W3C,对氨、芳香类化合物敏感;W6S,对氢化物有选择性;W5C,对烷烃、芳香化合物敏感;W1S,对甲烷敏感;W1W,对无机硫化物敏感;W2S,对醇类及部分芳香化合物敏感;W2W,对芳香成分、有机硫化物敏感;W3S,对长链烷烃敏感。

1.3.6 电子舌

称取 5 g 样品于离心管中,加入 20 mL 预热至

38℃ 的超纯水,涡旋仪处理 30 min,再加入 20 mL 预热至 38℃ 的超纯水,37℃ 超声 30 min,室温 8 000 r/min、离心 10 min,取上清液用砂芯漏斗抽滤,滤液稀释 2 倍,通过 SA402B 型味觉分析系统检测分析。选择 Sample_Measurement(2steps_washing)测试方法:第 1 次清洗溶剂 90 s,第 2 次清洗溶剂 60 s,第 3 次清洗溶剂 60 s,调解溶剂 30 s、样品液 30 s,第 4 次清洗溶剂 3 s、第 5 次清洗溶剂 3 s、标准清洗溶剂 30 s。使用的电子舌传感器为:AEE(鲜味)、CA0(酸味)、CT0(咸味)、C00(苦味)、AE1(涩味)。

1.3.7 挥发性风味物质

称取 2 g 样品于 20 mL 顶空瓶中,60℃ 孵育 20 min 后进样。

自动进样单元:进样体积 500 μ L,孵育时间 20 min,孵育温度 60℃,进样针温度 85℃,孵化转速 500 r/min。

气相-离子迁移谱单元:FS-SE-54-CB-1 型色谱柱(15 m $\times$ 0.53 mm),色谱柱温度为 60℃,载气为 N₂,IMS 温度 45℃,分析时间 25 min。应用 VOCal 软件内置的 NIST 数据库和 IMS 数据库对物质进行定性分析。

1.3.8 微生物群落

使用 FastDNA Spin Kit for Soil 试剂盒提取样品 DNA,1% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 完整性,NanoDrop2000 型核酸蛋白测定仪检测 DNA 纯度和浓度。

真菌 DNA 聚合酶链式反应 PCR 扩增引物分别为 ITS1F 和 ITS2R,序列分别为 5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3' 和 5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3'。ITS1F-ITS2R 引物 PCR 反应体系包括:10 ng 模板 DNA,2 μ L 10 $\times$ Buffer,2 μ L 2.5 mmol/L dNTPS,0.8 μ L 5 μ mol/L 各引物,0.2 μ L rTaq Polymerase 聚合酶,0.2 μ L BSA(牛血清白蛋白),补二次蒸馏水至 20 μ L。

细菌 DNA 聚合酶链式反应 PCR 扩增引物分别为 338F 和 806R,序列分别为 5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3' 和 5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'。338F_806R 引物 PCR 反应体系包括:10 ng 模板 DNA、4 μ L 5 $\times$ FastPfu Buffer、2 μ L 2.5 mmol/L dNTPS、0.8 μ L 5 μ mol/L 各引物、0.4 μ L FastPfu Polymerase 聚合酶、0.2 μ L BSA、补二次蒸馏水至 20 μ L。PCR 反应参数为:1 $\times$ (95℃,3 min)、27 $\times$ (95℃,30 s;55℃,30 s;72℃,45 s)、1 $\times$ (72℃,10 min)。

2% 琼脂糖凝胶电泳检测 PCR 产物,检测合格后通过上海美吉生物医药科技有限公司高通量测序

平台进行检测,并通过美吉生信云平台进行数据分析。

1.4 数据分析

试验数据用 IBM SPSS Statistics 26 进行方差分析,用 Origin 2018 制图。

2 结果与分析

2.1 理化指标的分析

不同处理组牛肉发酵后的理化指标如表 1 所示(表中 ΔE 表示色差)。

表 1 不同处理组发酵牛肉的理化指标
Tab. 1 Physicochemical indexes of fermented beef in different treatment groups

指标	样品	发酵 0 d	发酵 42 d	HVEF	发酵时间	HVEF × 发酵时间
含水率/%	对照	(71.56 ± 0.80) ^{Ab}	(54.75 ± 1.62) ^{Ca}			
	2.0 kV	(72.86 ± 1.52) ^{Ab}	(45.17 ± 0.57) ^{Ba}	***	***	***
	3.0 kV	(71.42 ± 0.36) ^{Ab}	(40.40 ± 0.54) ^{Aa}			
pH 值	对照	(5.47 ± 0.01) ^{Aa}	(5.73 ± 0.06) ^{Ab}			
	2.0 kV	(5.46 ± 0.01) ^{Aa}	(5.72 ± 0.01) ^{Ab}	NS	***	*
	3.0 kV	(5.43 ± 0.05) ^{Aa}	(5.94 ± 0.12) ^{Bb}			
<i>L</i> [*]	对照	(28.39 ± 2.33) ^{Aa}	(29.39 ± 1.92) ^{Aa}			
	2.0 kV	(29.16 ± 2.67) ^{Aa}	(29.87 ± 2.94) ^{Aa}	NS	NS	NS
	3.0 kV	(30.86 ± 2.85) ^{Aa}	(26.08 ± 1.52) ^{Aa}			
<i>a</i> [*]	对照	(12.38 ± 0.05) ^{Aa}	(12.97 ± 1.29) ^{Ba}			
	2.0 kV	(14.84 ± 0.35) ^{Ba}	(6.01 ± 0.45) ^{Ab}	**	***	***
	3.0 kV	(13.76 ± 1.26) ^{ABa}	(12.18 ± 0.04) ^{Ba}			
<i>b</i> [*]	对照	(6.61 ± 0.15) ^{Aa}	(6.77 ± 0.65) ^{Aa}			
	2.0 kV	(7.49 ± 1.07) ^{Aa}	(5.81 ± 0.22) ^{Aa}	*	NS	NS
	3.0 kV	(7.51 ± 0.30) ^{Aa}	(5.55 ± 1.06) ^{Aa}			
ΔE	对照		(2.25 ± 0.13) ^A			
	2.0 kV		(9.16 ± 0.51) ^C			
	3.0 kV		(4.76 ± 0.06) ^B			

注:相同大写字母代表同一时间内不同处理无显著差异($P>0.05$),相同小写字母代表同一处理在不同腌制时间无显著差异($P>0.05$),*表示差异较显著($P<0.05$),**表示差异显著($P<0.01$),***表示差异极显著($P<0.001$),NS表示处理无显著差异($P>0.05$)。

2.1.1 含水率

由表 1 可知,发酵 42 d,3 组样品含水率均大幅下降,对照组、2.0 kV 组、3.0 kV 组样品含水率分别为 54.75%、45.17%、40.40%,2.0 kV 组和 3.0 kV 组均显著低于对照组($P<0.05$)。结果表明,发酵时间对样品含水率有极显著影响($P<0.001$),HVEF 会极显著促进牛肉的脱水干燥过程($P<0.001$),且电压越高,效果越显著。含水率降低,使水溶性的游离氨基酸和还原糖等物质浓缩,这些物质是美拉德反应的底物,能生成醛、酮、烷烃和酯类等一系列挥发性物质,有利于发酵肉制品风味的形成^[20];而且,水分损失会增高牛肉中的盐浓度,盐一方面可以为发酵牛肉提供咸味,另一方面可以抑菌,有助于发酵牛肉的长期保存^[21]。

2.1.2 pH 值

由表 1 可知,发酵 42 d,3 组样品的 pH 值均显著增加($P<0.05$),且 3.0 kV 组显著高于 2.0 kV 组与对照组($P<0.05$)。发酵过程中,产品 pH 值的上升与蛋白质水降解产生碱性物质有关^[22],较高电压处理可能会使蛋白水解加剧,促进 pH 值增加,但整

体来看 HVEF 对 pH 值没有显著影响($P>0.05$)。

2.1.3 肉色

色泽是发酵牛肉的重要品质指标。 L^* 表示肉的亮度, a^* 表示红度, b^* 表示黄度。由表 1 可知,发酵 42 d,发酵时间和 HVEF 处理对样品的 L^* 值均无显著影响($P>0.05$),HVEF 和发酵时间的交互作用对发酵牛肉的 L^* 和 b^* 值无显著影响($P>0.05$),与文献[11]的研究结果一致。2.0 kV 组样品的 a^* 值发酵后显著降低,且显著低于对照组与 3.0 kV 组($P<0.05$)。发酵 42 d,不同处理组样品的 ΔE 有显著差异($P<0.05$),对照组、2.0 kV 组、3.0 kV 组的 ΔE 值依次为 2.25、9.16、4.76。 a^* 值为预测消费者对牛肉颜色接受程度的指标, a^* 值较高,消费者的接受程度较高, ΔE 值与肉的色泽稳定性有关, ΔE 值越小,说明肉的色泽越稳定^[11]。因此,2.0 kV HVEF 处理可能会对发酵牛肉的色泽稳定性产生不利影响。

2.2 电子鼻结果分析

图 1 为发酵牛肉电子鼻检测传感器数据雷达图,4 组样品的 W1W、W2W、W5S 传感器的响应值

变化显著, W1W 传感器对无机硫化物敏感, W2W 对有机硫化物敏感, W5S 对氮氧化合物敏感。由图 1 可知, 对照组 W1W、W2W、W5S 传感器响应值最低, 其次是发酵 0 d 样品, HVEF 处理的两组样品的响应值显著增大, 且 3.0 kV 组最高。含硫化合物气味阈值很低, 具有熟肉、青草、烧烤等气味, 主要来源于含硫氨基酸和硫胺素的降解^[23-24], 说明 HVEF 处理有利于这类反应的进行。图 2 为 10 个传感器数据经主成分分析转化为 2 个变量 PC1 (59.0%)、PC2 (38.9%), 累计贡献率 97.9%, 能够解释样本总体的变异。从图 2 可以看出, 4 组样品分布在不同区域, 表明各组样品之间挥发性气味成分存在明显差异, 可以通过主成分分析进行较好的区分。

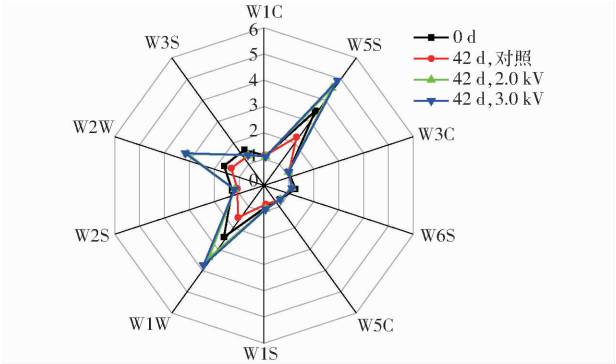


图 1 不同处理组发酵牛肉电子鼻传感器雷达图

Fig. 1 Radar image of electronic nose sensor of fermented beef in different treatment groups

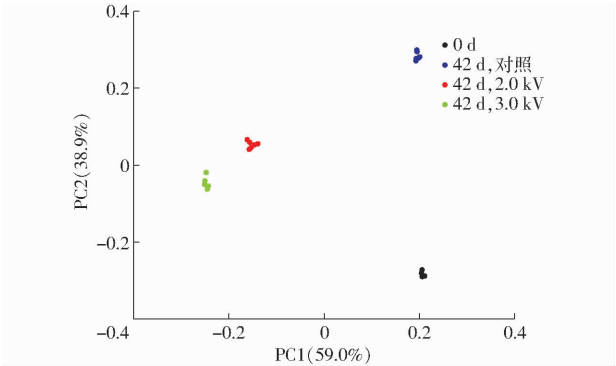


图 2 不同处理组发酵牛肉电子鼻数据主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of electronic nose data of fermented beef in different treatment groups

2.3 电子舌结果分析

不同处理组发酵牛肉的电子舌实验结果绘制成雷达图如图 3 所示。电子舌传感器十分灵敏, 可以检测到人的舌头无法辨别的味道, 因此每个传感器都设有无味点^[25-26], 低于无味点的数据认为无法被人的舌头辨别。实验中苦味、鲜味、咸味、丰富度的值在无味点之上, 去除无味点后, 重新绘制雷达图, 如图 4 所示。由图 4 可知, 与发酵 0 d 的样品相比, 发酵 42 d 的 3 组样品的鲜味、咸味和苦味传感器响

应值均增加, 且从小到大依次为 3.0 kV 组、2.0 kV 组、对照组。咸味响应值增高, 一方面可能是因为 HVEF 处理发酵后牛肉失水较多, 导致牛肉中 NaCl 浓度升高^[27], 另一方面, 可能是因为蛋白质水解产生了咸味肽^[28]。鲜味和苦味响应值的增高可能由于发酵过程中蛋白质水解使呈鲜味及苦味的肽和氨基酸含量增加, 也可能与核苷酸含量增加有关^[29-30], 而且氨基酸和核苷酸的协同作用也会增加鲜味^[28]。发酵 42 d 的样品丰富度的响应值高于发酵 0 d 的样品, 但发酵 42 d 的 3 组样品之间无差异。以上结果说明, HVEF 处理会促进牛肉中的蛋白质水解, 产生小分子肽和氨基酸, 从而影响发酵牛肉的滋味。

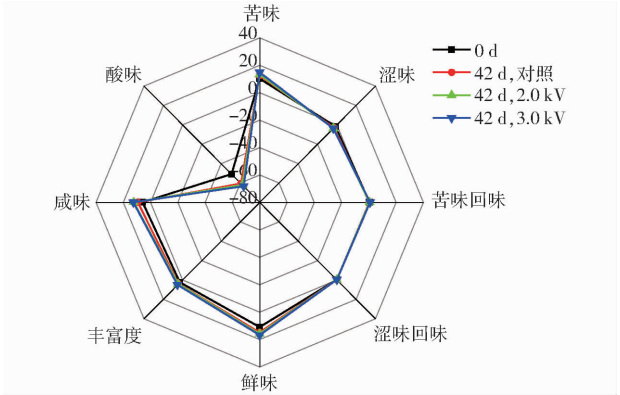


图 3 不同处理组发酵牛肉电子舌雷达图

Fig. 3 Radar image of electronic tongue sensor of fermented beef in different treatment groups

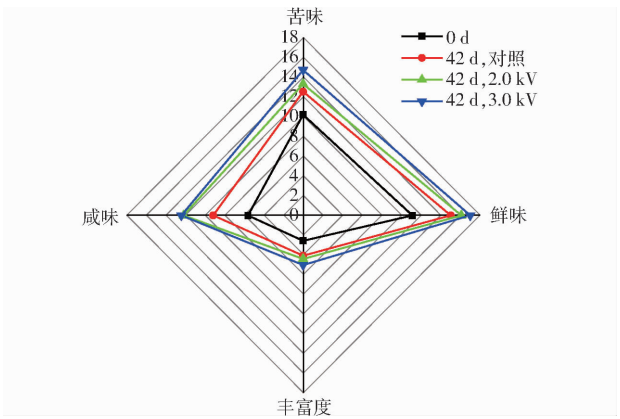


图 4 不同处理组发酵牛肉电子舌雷达图(扣除无味点)

Fig. 4 Radar image of electronic tongue sensor of fermented beef in different treatment groups (removing tasteless point)

2.4 挥发性风味物质

不同处理组发酵牛肉中挥发性成分的二维 GC-IMS 差异对比谱图如图 5 所示。横坐标 1.0 ms 处竖线为反应离子峰 (RIP 峰), RIP 峰两侧的每一个点代表的是一种挥发性成分。采用差异模式进行样品间的差异比较, 以发酵 0 d 的谱图作为参比, 其他样品的谱图扣减参比。扣减后的背景为白色, 则

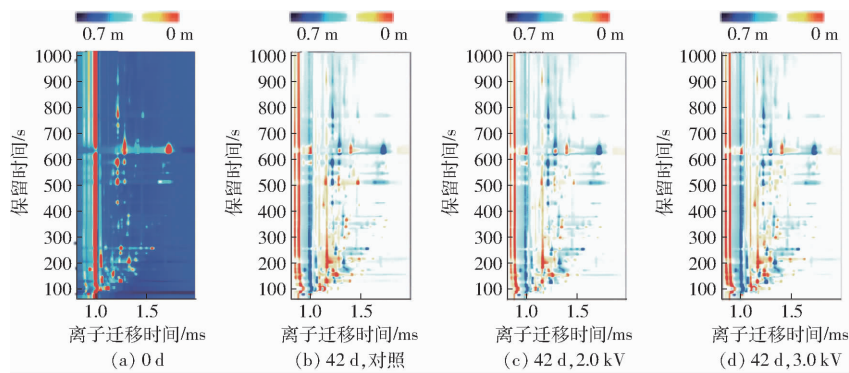


图 5 不同处理组发酵牛肉挥发性成分的 GC-IMS 谱图

Fig. 5 GC-IMS spectrum of volatile components of fermented beef in different treatment groups

挥发性成分一致,红色代表该物质浓度比参比样品高,蓝色代表比参比低。从图 5 可以看出,与发酵 0 d 的样品比较,发酵 42 d 的 3 组牛肉中挥发性风味物质含量表现出比较明显的差异,有不同程度的升高或降低。

经过对比特征性物质的保留时间和离子迁移时间,通过 GC-IMS 数据库检索来对挥发性成分进行定性分析,结果如表 2 所示。从样品中共鉴别出 43 种挥发性成分,包括一些化合物的二聚体和多聚体,其中,醇类 12 种,酮类 10 种,醛类 9 种,烯类 8 种,其他 4 种。

为更好地分析不同处理组样品之间挥发性成分的差异,依据各组样品重复测定 3 次所得 GC-IMS 二维图谱中所有的待分析峰构建指纹图谱,结果如图 6 所示。图中每一行代表一个样品中选取的全部信号峰,每一列代表同一物质在不同样品中的信号峰。从图 6 可以看出,红框中的物质包括 4-萜烯醇、芳樟醇、 α -松油醇、顺-3-己烯-1-醇、己醛、壬醛、辛醛、庚醛、 α -水芹烯、3-戊酮、 α -蒎烯、 β -蒎烯、1-戊醇、1-己醇、3-羟基-2-丁酮、6-甲基-5-庚烯-2-酮、2-戊酮、丁酮、柠檬烯、1,8-桉树脑和乙醇等,在发酵 0 d 的样品中含量较高,发酵 42 d 的 3 组样品中含量出现不同程度的下降,结果表明这些物质在腌制结束后就已经快速生成,它们主要来源于香辛料的添加和脂肪氧化^[24,31],随着发酵过程进行,这些物质易被氧化或相互反应生成酯类物质,所以出现含量下降^[32]。

而橙框中的物质在发酵 0 d 的样品中含量较低,在发酵 42 d 的 3 组样品中含量不同程度上升,这些物质包括苯甲醛、2-乙酰-1-吡咯啉和 3-甲基丁醇等,表明这些物质主要形成于发酵过程,这一结果与文献[33]一致。苯甲醛具有苦杏仁味,3-甲基丁醇呈清香味,这些物质主要来自于氨基酸的 Strecker 降解^[34]。发酵 42 d,HVEF 处理的牛肉中的苯甲醛含量低于对照组,且电压越高含量越低。

绿框中的物质为 2-戊酮,与发酵 0 d 相比,发酵 42 d 后,对照组中的该物质含量升高,而 HVEF 处理组中的该物质含量下降。2-戊酮主要来自于微生物作用下的脂肪不完全 β -氧化,能够赋予肉制品特殊的果香、辛辣等发酵风味^[35-36]。

为进一步研究发酵时间和 HVEF 处理对发酵牛肉挥发性风味成分的影响,将不同处理组样品中挥发性成分指纹图谱数据进行主成分分析,结果如图 7 所示,PC1 和 PC2 累计方差贡献率达到 88%,能够解释样本总体的变异。从图 7 可以看出,4 组样品分布在 3 个区域,对照组和 2.0 kV 处理组聚集在一起,表明两组样品的挥发性成分比较接近,而 0 d 发酵组及 3.0 kV 处理组分布在相对较远的区域,表明 3 个区域样品之间挥发性成分存在明显差异,可以通过主成分分析进行较好的区分。这一结果与电子鼻结果不完全一致,可能是两种检测方法的差异导致。电子鼻是通过识别样品的整体挥发性风味成分对样品之间进行差异比较,而 GC-IMS 技术是通过鉴定出的挥发性物质进行差异分析,受检测数据库限制,有些物质可能不能通过 GC-IMS 技术检测到,如电子鼻检测结果中含硫化化合物的感应信号较强,但在 GC-IMS 鉴定结果中并未鉴定出含硫化化合物的存在。

2.5 微生物多样性分析

2.5.1 菌群结构

图 8 为基于属水平的发酵牛肉中真菌菌落结构图。发酵 0 d 牛肉中的优势菌为 *Penicillium*、*Debaryomyces* 和曲霉属 (*Aspergillus*),所占百分比分别为 45.73%、19.97%、14.29%。发酵 42 d,不同处理组样品中的优势菌群都为 *Penicillium* 和 *Debaryomyces*,但是所占比例不同,对照组、2.0 kV 组、3.0 kV 组中 *Penicillium* 和 *Debaryomyces* 所占百分比分别为 84.69% 和 15.29%、62.75% 和 36.93%、61.72% 和 37.91%。*Penicillium* 的活性作用与发酵肉制品中脂肪及蛋白质氧化分解产生的

表 2 发酵牛肉中鉴定的挥发性成分

Tab.2 Volatile components identified in fermented beef

编号	化合物名称	CAS 号	分子式	相对分子质量	保留指数	保留时间/s	离子迁移时间/ms
1	4-萜品醇	C562743	C ₁₀ H ₁₈ O	154.3	1 173.0	902.951	1.223 97
2	α-萜品烯醇	C98555	C ₁₀ H ₁₈ O	154.3	1 193.4	943.648	1.292 09
3	沉香醇	C78706	C ₁₀ H ₁₈ O	154.3	1 106.7	770.686	1.223 97
4	壬醛	C124196	C ₉ H ₁₈ O	142.2	1 103.8	764.963	1.471 81
5	1,8-桉树脑	C470826	C ₁₀ H ₁₈ O	154.3	1 036.6	630.949	1.298 53
6	1,8-桉树脑(二聚体)	C470826	C ₁₀ H ₁₈ O	154.3	1 037.3	632.306	1.731 20
7	辛醛	C124130	C ₈ H ₁₆ O	128.2	1 007.5	572.937	1.400 97
8	6-甲基-5-庚烯-2-酮	C110930	C ₈ H ₁₄ O	126.2	993.3	545.330	1.177 58
9	二戊烯	C138863	C ₁₀ H ₁₆	136.2	1 032.5	622.821	1.223 45
10	α-蒎烯	C80568	C ₁₀ H ₁₆	136.2	930.0	434.400	1.222 41
11	α-蒎烯(多聚体)	C80568	C ₁₀ H ₁₆	136.2	929.6	433.660	1.294 42
12	庚醛	C111717	C ₇ H ₁₄ O	114.2	899.8	381.460	1.328 60
13	1-己醇	C111273	C ₆ H ₁₄ O	102.2	879.5	354.064	1.318 83
14	1-己醇(二聚体)	C111273	C ₆ H ₁₄ O	102.2	879.1	353.693	1.641 04
15	叶醇	C928961	C ₆ H ₁₂ O	100.2	866.0	339.255	1.506 79
16	1-戊醇	C71410	C ₅ H ₁₂ O	88.1	770.8	238.717	1.256 18
17	1-戊醇(二聚体)	C71410	C ₅ H ₁₂ O	88.1	770.4	238.420	1.504 81
18	3-戊酮	C96220	C ₅ H ₁₀ O	86.1	696.6	180.084	1.107 38
19	3-甲基丁醛	C590863	C ₅ H ₁₀ O	86.1	652.6	158.285	1.173 49
20	3-甲基丁醛(二聚体)	C590863	C ₅ H ₁₀ O	86.1	648.5	156.538	1.405 34
21	乙基甲基酮	C78933	C ₄ H ₈ O	72.1	591.9	132.296	1.067 83
22	乙基甲基酮(二聚体)	C78933	C ₄ H ₈ O	72.1	589.3	131.204	1.246 86
23	二甲基酮	C67641	C ₃ H ₆ O	58.1	517.5	100.409	1.123 59
24	乙醇	C64175	C ₂ H ₆ O	46.1	504.2	94.731	1.055 11
25	α-水芹烯	C99832	C ₁₀ H ₁₆	136.2	1 008.6	575.053	1.676 99
26	3-羟基-2-丁酮	C513860	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	728.1	204.935	1.333 59
27	3-甲基丁醇	C123513	C ₅ H ₁₂ O	88.1	741.1	215.284	1.485 99
28	2-甲基丙醇	C78831	C ₄ H ₁₀ O	74.1	625.2	146.548	1.173 55
29	2-甲基丙醇(二聚体)	C78831	C ₄ H ₁₀ O	74.1	626.1	146.961	1.362 81
30	2-庚酮	C110430	C ₇ H ₁₄ O	114.2	891.7	367.493	1.269 12
31	2-庚酮(二聚体)	C110430	C ₇ H ₁₄ O	114.2	892.2	368.119	1.641 33
32	己醛	C66251	C ₆ H ₁₂ O	100.2	791.4	257.217	1.257 11
33	己醛(二聚体)	C66251	C ₆ H ₁₂ O	100.2	792.5	258.470	1.567 96
34	2-戊酮	C107879	C ₅ H ₁₀ O	86.1	687.3	173.147	1.124 75
35	2-戊酮(二聚体)	C107879	C ₅ H ₁₀ O	86.1	688.4	173.627	1.378 52
36	苯甲醛	C100527	C ₇ H ₆ O	106.1	971.9	507.788	1.156 71
37	苯甲醛(二聚体)	C100527	C ₇ H ₆ O	106.1	973.5	510.694	1.477 01
38	β-蒎烯	C127913	C ₁₀ H ₁₆	136.2	974.9	513.108	1.222 45
39	β-蒎烯(多聚体)	C127913	C ₁₀ H ₁₆	136.2	975.7	514.451	1.294 37
40	β-蒎烯(多聚体)	C127913	C ₁₀ H ₁₆	136.2	974.3	512.033	1.639 79
41	β-蒎烯(多聚体)	C127913	C ₁₀ H ₁₆	136.2	975.2	513.645	1.728 05
42	2-乙酰基-1-吡咯啉	C85213225	C ₆ H ₉ NO	111.1	926.6	428.380	1.135 92
43	2-乙酰基-1-吡咯啉(二聚体)	C85213225	C ₆ H ₉ NO	111.1	926.1	427.480	1.485 38

酮类、醛类、醇类等风味物质有关, *Debaryomyces* 的活性作用与酯类和酸类风味物质的生成有关^[32,36]。

图 9 为基于属水平的牛肉中细菌菌落结构图, 发酵 0 d 牛肉样品中的优势菌为 *Staphylococcus*, 所占百分比为 54.24%。发酵 42 d, 不同处理组样品中的优势菌群都有 *Staphylococcus*, 但所占比例不同,

对照组为 55.31%, 2.0 kV 组为 78.69%, 3.0 kV 组为 93.21%。另外, 对照组还有一优势菌群, 为 *Lactobacillus*, 所占百分比为 27.53%。文献[34]研究发现发酵肉制品中的主要优势微生物为清酒乳杆菌 (*Lactobacillus sakei*)、弯曲乳杆菌 (*Lactobacillus curvatus*) 和 *Staphylococcus*, *Staphylococcus* 普遍具有

Wed Jan 19 16:47:44 CST 2022

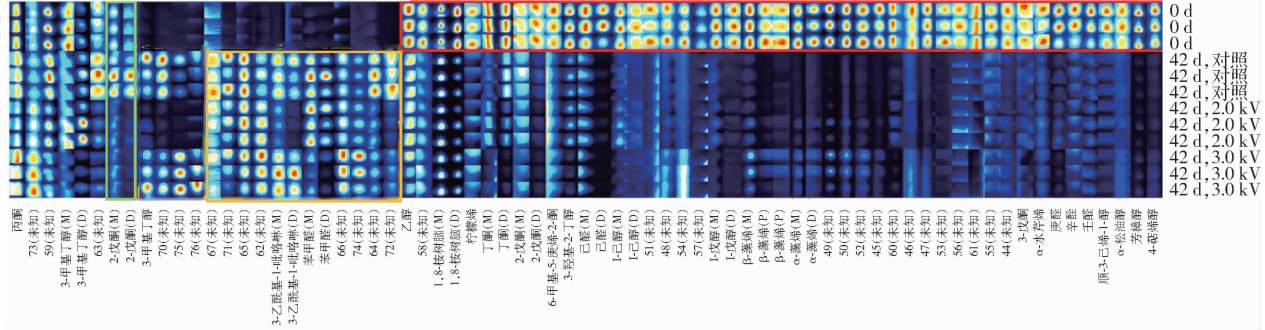


图 6 不同处理组发酵牛肉挥发性成分指纹图谱对比

Fig. 6 Comparison of volatile compounds fingerprints of fermented beef in different treatment groups

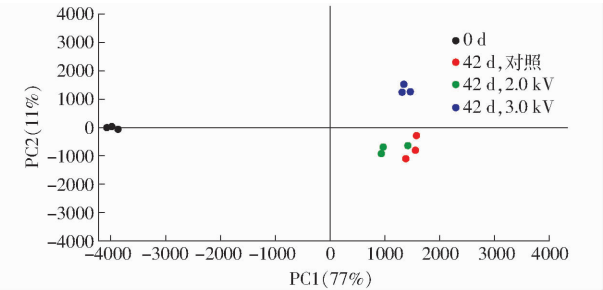


图 7 不同处理组发酵牛肉挥发性成分指纹图谱主成分分析

Fig. 7 Principal component analysis of volatile components fingerprint of fermented beef in different treatment groups

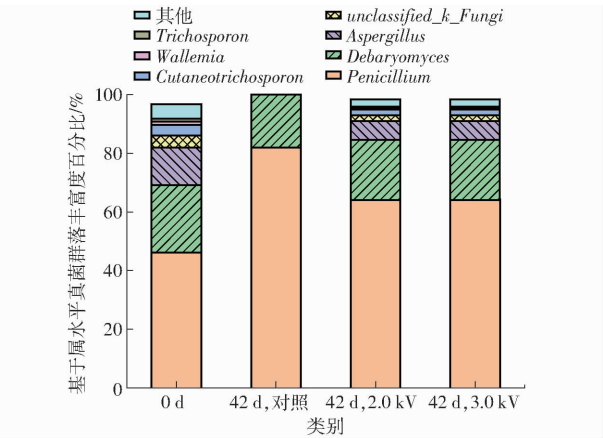


图 8 基于属水平的牛肉中真菌菌落结构

Fig. 8 Fungi community of beef based on genus level

较强的蛋白酶和酯酶活性,能够有效促进风味物质的生成^[23]。

2.5.2 Alpha-多样性分析

基于 OUT 聚类分析结果,Sobs 指数反映实际测量的 OUT 数目,Ace 指数和 Chao 指数均可表征

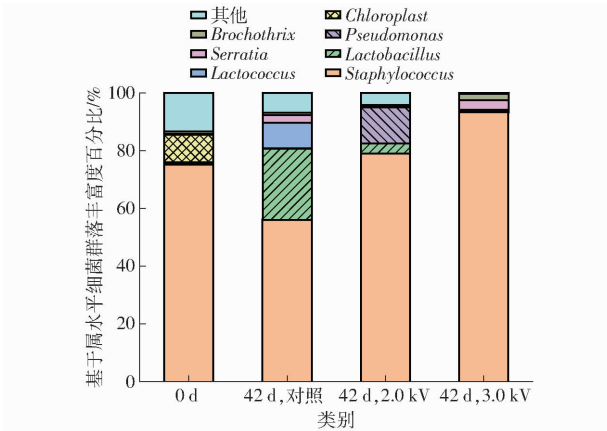


图 9 基于属水平的发酵牛肉中细菌菌落结构

Fig. 9 Bacterial community of beef based on genus level

群落丰富度,Shannon 指数和 Simpson 指数均可表征群落微生物多样性,Coverage 指数代表测序文库覆盖率。由表 3 和表 4 可知,样品的 Coverage 指数均为 0.99,说明样品可代表真实情况。发酵 42 d,样品真菌及细菌的 Sobs 指数均下降。真菌及细菌 Ace 和 Chao 指数均下降,HVEF 处理样品真菌 Ace 指数显著高于对照组 ($P < 0.05$),细菌 Ace 指数显著低于对照组 ($P < 0.05$),说明在发酵过程中真菌和细菌群落丰富度均降低,HVEF 处理会增加真菌丰富度,降低细菌丰富度,不同电压处理组之间差异不显著。Shannon 指数越大则多样性越高,而 Simpson 指数越大则多样性越低,发酵 42 d,真菌及细菌 Shannon 指数均降低,3.0 kV HVEF 处理 Shannon 指数显著高于其他两组 ($P < 0.05$),HVEF 处理 Shannon 指数显著低于对照组 ($P <$

表 3 真菌 Alpha-多样性指数

Tab. 3 Alpha diversity index of fungi

样品类别	Sobs 指数	Ace 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Chao 指数	Coverage 指数
0 d	(72.33 ± 28.71) ^a	(74.84 ± 28.24) ^a	(1.79 ± 0.88) ^a	(0.32 ± 0.16) ^{cd}	(74.53 ± 28.12) ^a	(0.99 ± 0.01) ^a
42 d, 对照	(6.33 ± 1.53) ^d	(8.08 ± 3.40) ^d	(0.40 ± 0.23) ^e	(0.75 ± 0.19) ^a	(7.33 ± 3.21) ^{cd}	(0.99 ± 0.01) ^a
42 d, 2.0 kV	(9.67 ± 0.58) ^{bc}	(14.68 ± 5.83) ^c	(0.58 ± 0.08) ^c	(0.63 ± 0.08) ^{ab}	(10.44 ± 0.51) ^{bc}	(0.99 ± 0.01) ^a
42 d, 3.0 kV	(13.33 ± 4.62) ^b	(22.99 ± 13.5) ^b	(0.69 ± 0.03) ^b	(0.52 ± 0.01) ^c	(17.83 ± 6.33) ^b	(0.99 ± 0.01) ^a

注:相同小写字母代表同一处理在不同腌制时间无显著差异 ($P > 0.05$),下同。

表 4 细菌 Alpha-多样性指数
Tab.4 Alpha diversity index of bacterial

样品类别	Sobs 指数	Ace 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Chao 指数	Coverage 指数
0 d	(250.67 ± 133.61) ^a	(265.45 ± 121.53) ^a	(265.49 ± 121.65) ^a	(2.22 ± 1.09) ^{ab}	(0.28 ± 0.14) ^b	(0.99 ± 0.01) ^a
42 d,对照	(40.00 ± 5.57) ^b	(78.71 ± 28.59) ^b	(58.40 ± 18.71) ^b	(1.82 ± 0.28) ^b	(0.22 ± 0.06) ^b	(0.99 ± 0.01) ^a
42 d,2.0 kV	(16.67 ± 0.58) ^{cd}	(25.95 ± 9.16) ^c	(20.18 ± 2.50) ^{cd}	(1.28 ± 0.42) ^c	(0.41 ± 0.19) ^a	(0.99 ± 0.01) ^a
42 d,3.0 kV	(19.67 ± 6.35) ^c	(19.67 ± 6.35) ^{cd}	(26.57 ± 10.40) ^c	(1.17 ± 0.23) ^c	(0.42 ± 0.05) ^a	(0.99 ± 0.01) ^a

0.05); 发酵 42 d, 真菌的 Simpson 指数增大, 3.0 kV HVEF Simpson 指数处理显著低于其他两组 ($P < 0.05$), 细菌的 Simpson 指数减小, HVEF 处理组显著低于对照组 ($P < 0.05$), 以上结果表明, 3.0 kV HVEF 处理有利于保持样品中真菌及细菌的多样性。

3 结束语

本研究将 HVEF 应用于发酵牛肉的生产, 结果表明, HVEF 处理会极显著促进牛肉的脱水干燥过程 ($P < 0.001$), 对 pH 值、 L^* 和 b^* 值无显著影响, 但 2.0 kV HVEF 处理会显著降低 a^* 值、增加 ΔE 值

($P < 0.05$), 对发酵牛肉的色泽稳定性产生不利影响。电子鼻分析表明, 不同处理组发酵牛肉样品之间风味差异较大, 可以通过主成分分析进行较好区分。电子舌分析表明, HVEF 处理会增加鲜味、咸味和苦味物质的含量。通过 GC-IMS 分析, 共鉴别出 43 种挥发性风味物质, 包括醇类 12 种, 酮类 10 种, 醛类 9 种, 烯类 8 种, 其他 4 种。高通量测序结果表明, HVEF 处理会改变发酵牛肉中真菌和细菌优势菌的比例, 增加具有较强的蛋白酶和酯酶活性的 *Staphylococcus* 比例。综合分析表明, 3.0 kV HVEF 处理对发酵牛肉品质提升有较好促进作用, 在实际生产中具有较好应用前景。

参 考 文 献

[1] HAYES J E, KENNY T A, WARD P, et al. Development of a modified dry curing process for beef[J]. Meat Science, 2007, 77(3): 314-323.

[2] ZHOU C Y, BAI Y, WANG C, et al. 1H NMR-based metabolomics and sensory evaluation characterize taste substances of Jinhua ham with traditional and modern processing procedures[J]. Food Control, 2021, 126(3): 107873.

[3] WANG Y, LI F, CHEN J, et al. High-throughput sequencing-based characterization of the predominant microbial community associated with characteristic flavor formation in Jinhua ham[J]. Food Microbiology, 2021, 94: 103643.

[4] WANG Q, LI Y, SUN D W, et al. Enhancing food processing by pulsed and high voltage electric fields: principles and applications[J]. Crit. Rev. Food. Sci. Nutr., 2018, 58(13): 2285-2298.

[5] 王丽平, 李苑, 余海霞, 等. 高压电场对生鲜食品保鲜机理研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(3): 278-283. WANG Liping, LI Yuan, YU Haixia, et al. Progress in the knowledge of the preservation mechanism of raw fresh foods by high voltage electric field[J]. Food Science, 2017, 38(3): 278-283. (in Chinese)

[6] 苏春雷. 高压静电场辅助发酵余甘子酵素工艺及其酵素特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. SU Chunlei. Study on high-voltage electrostatic field-assisted fermentation of *Phyllanthus emblica* Jiaosu and its characteristics [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)

[7] KAO N, TU Y, SRIDHAR K, et al. Effect of a high voltage electrostatic field (HVEF) on the shelf-life of fresh-cut broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) [J]. LWT—Food Science and Technology, 2019, 116: 108532.

[8] JIA G, HE X, NIRASAWA S, et al. Effects of high-voltage electrostatic field on the freezing behavior and quality of pork tenderloin[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 204: 18-26.

[9] JIA G, LIU H, NIRASAWA S, et al. Effects of high-voltage electrostatic field treatment on the thawing rate and post-thawing quality of frozen rabbit meat[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2017, 41: 348-356.

[10] 蒋耀庭, 孙英, 张强. 高压静电场食醋成分变化实验研究[J]. 中国调味品, 1991, 10(6): 21-24. JIANG Yaoting, SUN Ying, ZHANG Qiang. Experimental study on the changes of vinegar composition in high voltage electrostatic[J]. China Condiment, 1991, 10(6): 21-24. (in Chinese)

[11] XU C C, YU H, XIE P, et al. Influence of electrostatic field on the quality attributes and volatile flavor compounds of dry-cured beef during chill storage[J]. Foods, 2020, 9(4): 478.

[12] 沙坤, 李思源, 张松山, 等. 高压静电场辅助牛肉湿腌过程传质动力学分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12): 421-426, 458. SHA Kun, LI Siyuan, ZHANG Songshan, et al. Mass transfer kinetics analysis of beef wet salted process assisted by high voltage electrostatic field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 421-426, 458. (in Chinese)

[13] 金文刚, 赵萍, 金晶, 等. 基于气相-离子迁移色谱分析大鲢不同可食部位挥发性成分指纹差异[J]. 食品科学, 2022,

- 43(2): 303 – 309.
- JIN Wen'gang, ZHAO Ping, JIN Jing, et al. Volatile component fingerprint analysis of giant salamander (*Andrias davidiauns*) from different edible parts based on gas chromatography – ion mobility spectroscopy[J]. Food Science, 2022, 43(2): 303 – 309. (in Chinese)
- [14] WANG S, CHEN H, SUN B. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography – ion mobility spectrometry (GC – IMS)[J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126151 – 126158.
- [15] 杨露, 谭会泽, 温志芬, 等. 气相色谱-离子迁移谱在畜禽产品风味分析中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(12): 324 – 329.
- YANG Lu, TAN Huize, WEN Zhifen, et al. Application of gas chromatography – ion mobility spectrometry in flavor analysis of livestock and poultry products[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(12): 324 – 329. (in Chinese)
- [16] 叶翠. 混菌发酵香肠工艺优化及理化特性变化研究[D]. 石家庄:河北经贸大学, 2020.
- YE Cui. Study on technological optimization and physical and chemical characteristics of mixed fermentation sausage[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Economics and Trade, 2020. (in Chinese)
- [17] SCHIRMER M, IJAZ U Z, D'AMORE R, et al. Insight into biases and sequencing errors for amplicon sequencing with the Illumina MiSeq platform[J]. Nucleic Acids Research, 2015, 43(6): 37.
- [18] 赵改名, 李珊珊, 崔文明, 等. 不同来源腊肉中细菌菌群结构与风味相关性分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(13): 246 – 253.
- ZHAO Gaiming, LI Shanshan, CUI Wenming, et al. Correlation analysis of bacterial community structure and flavor in different Chinese bacon[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(13): 246 – 253. (in Chinese)
- [19] 郭壮, 王玉荣, 葛东颖, 等. 腊肠发酵过程中细菌多样性评价及其对风味的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(6): 186 – 192.
- GUO Zhuang, WANG Yurong, GE Dongying, et al. Analysis of bacterial diversity and its effect on flavor of Chinese sausage during fermentation[J]. Food Science, 2021, 42(6): 186 – 192. (in Chinese)
- [20] 刘寅初, 高晓光, 张松山, 等. 干法成熟牛肉品质形成与增值途径研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 321 – 328.
- LIU Yinchu, GAO Xiaoguang, ZHANG Songshan, et al. Research progress in the formation of dry-aged beef and approaches for its added value[J]. Food Science, 2023, 44(15): 321 – 328. (in Chinese)
- [21] 钱聪. 不同部位牦牛肉发酵过程中的品质变化及成品质量的评价[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2014.
- QIAN Cong. The qualities change of different meat cuts of yak during fermentation and the evaluation of finished products qualities[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [22] PEDRO D, SALDAÑA E, LORENZO J M, et al. Low-sodium dry-cured rabbit leg: a novel meat product with healthier properties[J]. Meat Science, 2021, 173: 108372.
- [23] MOTTRAM D S. Flavour formation in meat and meat products: a review[J]. Food Chemistry, 1998, 62(4): 415 – 424.
- [24] 刘英丽, 杨梓妍, 万真, 等. 发酵剂对发酵香肠挥发性风味物质形成的作用及影响机制研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 284 – 296.
- LIU Yingli, YANG Ziyang, WAN Zhen, et al. Progress in understanding the effect and mechanism of starter cultures on the formation of volatile flavor compounds in fermented sausage[J]. Food Science, 2021, 42(11): 284 – 296. (in Chinese)
- [25] 浦馨源, 周辉, 王兆明, 等. 不同加工阶段对符离集烧鸡风味影响研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 89 – 98.
- PU Xinyuan, ZHOU Hui, WANG Zhaoming, et al. Research on the effect of different processing stages on the flavor of Fuliji red-cooked chicken[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 89 – 98. (in Chinese)
- [26] BENJAMIN O, GAMRASNI D. Electronic tongue as an objective evaluation method for taste profile of pomegranate juice in comparison with sensory panel and chemical analysis[J]. Food Analytical Methods, 2016, 9(6): 1726 – 1735.
- [27] CHEN Q, HU Y, WEN R, et al. Characterisation of the flavour profile of dry fermented sausages with different NaCl substitutes using HS – SPME – GC – MS combined with electronic nose and electronic tongue[J]. Meat Science, 2021, 172(1): 108338.
- [28] NISHIMURA T, KATO H. Taste of free amino acids and peptides[J]. Food Reviews International, 1988, 4(2): 175 – 194.
- [29] 李娟. 我国不同地区酱卤牛肉风味物质剖面分析[D]. 北京:中国农业科学院, 2018.
- LI Juan. Flavor profiling of marinated beef collected from different regions of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)
- [30] 岳胜楠. 西门塔尔杂交牛和夏南牛的肉品质差异分析[D]. 郑州:河南农业大学, 2022.
- YUE Shengnan. Analysis of meat quality between Simmental Hybrid cattle and Xianan cattle[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [31] 沙坤, 郭江南, 郎玉苗, 等. 牦牛干巴和黄牛干巴挥发性风味特征与差异分析[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 233 – 239.
- SHA Kun, GUO Jiangnan, LANG Yumiao, et al. Characteristics and differences analyses of volatile flavour compounds in dry-cured yak and beef[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 233 – 239. (in Chinese)

IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2018: 4842 – 4849.

[24] YANG J, LIU S, MENG Y, et al. Self-powered tactile sensor for gesture recognition using deep learning algorithms[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(22): 25629 – 25637.

[25] KAKANI V, CUI X, MA M, et al. Vision-based tactile sensor mechanism for the estimation of contact position and force distribution using deep learning[J]. Sensors, 2021, 21(5):1920.

[26] 崔永杰,高宗斌,刘浩洲,等. 基于卷积层特征可视化的猕猴桃树干特征提取[J]. 农业机械学报,2020,51(4):181 – 190.
CUI Yongjie, GAO Zongbin, LIU Haozhou, et al. Feature extraction of kiwi trunk based on convolution layer feature visualization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(4):181 – 190. (in Chinese)

[27] 张宇卓,王德成,方宪法,等. 基于 CNN 的玉米种子内部裂纹图像检测系统[J]. 农业机械学报,2022,53(5):309 – 315.
ZHANG Yuzhuo, WANG Decheng, FANG Xianfa, et al. Image detection system of corn seed internal crack based on CNN [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(5):309 – 315. (in Chinese)

[28] 李善军,胡定一,高淑敏,等. 基于改进 SSD 的柑橘实时分类检测[J]. 农业工程学报,2019,35(24):307 – 313.
LI Shanjun, HU Dingyi, GAO Shumin, et al. Real-time classification and detection of citrus based on improved single short multibox detector[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(24):307 – 313. (in Chinese)

[29] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 770 – 778.

[30] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural computation, 1997, 9(8): 1735 – 1780.

[31] 解毅,张永清,荀兰,等. 基于多源遥感数据融合和 LSTM 算法的作物分类研究[J]. 农业工程学报,2019,35(15):129 – 137.
XIE Yi, ZHANG Yongqing, XUN Lan, et al. Crop classification based on multi-source remote sensing data fusion and LSTM algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(15):129 – 137. (in Chinese)

[32] 李莉,李文军,马德新,等. 基于 LSTM 的温室番茄蒸腾量预测模型研究[J]. 农业机械学报,2021,52(10):369 – 376.
LI Li, LI Wenjun, MA Dexin, et al. Prediction model of transpiration of greenhouse tomato based on LSTM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(10):369 – 376. (in Chinese)

[33] 贺志将,李前,王彦超,等. 基于 VMD – LSTM 的奶牛动态称量算法[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 2):234 – 240.
HE Zhijiang, LI Qian, WANG Yanchao, et al. Cow dynamic weighing algorithm based on VMD – LSTM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(Supp. 2):234 – 240. (in Chinese)

[34] HAN X Y, PAPYAN V, DONOHO D L. Neural collapse under mse loss: proximity to and dynamics on the central path[J]. arXiv preprint arXiv:2106.02073, 2021.

[35] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.

[36] BENELLI A, CEVOLI C, FABBRI A, et al. Ripeness evaluation of kiwifruit by hyperspectral imaging[J]. Biosystems Engineering, 2022, 223: 42 – 52.

(上接第 380 页)

[32] 刘梦,张顺亮,臧明伍,等. 牛肉干法成熟过程挥发性风味物质的变化规律[J]. 食品科学, 2022, 43(16): 279 – 284.
LIU Meng, ZHANG Shunliang, ZANG Mingwu, et al. Dynamic changes of volatile compounds of beef during the dry-aging process[J]. Food Science, 2022, 43(16): 279 – 284. (in Chinese)

[33] 沙坤,钱聪,张泽俊,等. 发酵牦牛肉成熟过程中挥发性香气成分的变化[J]. 食品工业科技, 2015, 36(24): 76 – 81.
SHA Kun, QIAN Cong, ZHANG Zejun, et al. Changes in volatile aroma compounds during ripening of fermented yak meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(24): 76 – 81. (in Chinese)

[34] MARTY E, BUCHS J, EUGSTER-MEIER E, et al. Identification of staphylococci and dominant lactic acid bacteria in spontaneously fermented Swiss meat products using PCR – RFLP[J]. Food Microbiology, 2012, 29(2): 157 – 166.

[35] CHEN Q, KONG B, HAN Q, et al. The role of bacterial fermentation in lipolysis and lipid oxidation in Harbin dry sausages and its flavour development[J]. LWT – Food Science and Technology, 2017, 77: 389 – 396.

[36] BRUNA J M, HIERRO E M, HOZ L D L. The contribution of *Penicillium aurantiogriseum* to the volatile composition and sensory quality of dry fermented sausages[J]. Meat Science, 2001, 59(1): 97 – 107.