姜蕾, 王月丽, 宋晶晶, 等. 烟熏材料对新疆熏马肉香肠风味、多环芳烃及感官品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 66−74. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040145
JIANG Lei, WANG Yueli, SONG Jingjing, et al. Effect of Smoking Materials on the Flavor, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and Sensory Property of Smoked Horsemeat Sausage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 66−74. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040145

·研究与探讨·

烟熏材料对新疆熏马肉香肠风味、多环芳烃及感官品质的影响

姜　蕾*, 王月丽, 宋晶晶, 张亚南, 丁真真, 候吉超, 龚梦馨
（喀什大学生命与地理科学学院, 新疆喀什 844000）

摘　要: 为研究苹果木、梨木、桃木及樱桃木对新疆传统熏马肠挥发性风味成分、多环芳烃和感官品质的影响。利用气相色谱质谱联用（Gas Chromatography-Mass Spectrometry，GC-MS）等技术对熏马肠挥发性风味成分、颜色、多环芳烃含量等指标进行了定性、定量分析。结果表明，与对照样品相比，熏制样品 pH、L^*值均降低，a^*值和 b^*值均提高（P<0.05），樱桃木熏制样品颜色更加红亮，样品之间的水分含量无显著差异（P>0.05）。烟熏会增加多环芳烃含量，其中菲和芴含量增加最为显著（P<0.05）。在不同熏马肠样品中共鉴定出 75 种挥发性香气成分，主要以酚类、萜烯类、醛类和醚类化合物为主。通过偏最小二乘判别分析（Partial Least Squares Discriminant Analysis，PLS-DA）和变量重要性投影值（Variable Importance in Projection，VIP）分析，不同熏马肠挥发性香气成分差异明显，其中 VIP 值大于 1 的化合物有 19 种，主要有愈创木酚、4-甲基愈创木酚、苯乙酮和 5-甲基糠醛等，被鉴定为差异挥发性香气成分（VIP>1，P<0.05），其中苹果木熏制的样品苯乙酮和 4-甲基愈创木酚含量最高，赋予样品独特的木质香和烟熏香。在感官评价中，苹果木和樱桃木烟熏的样品表现出更好的感官品质和总体可接受度。综上所述，苹果木更适合作为马肉香肠的烟熏材料，但后续仍需改良加工工艺以降低多环芳烃含量。研究为提高熏马肠品质提供了理论基础。

关键词: 熏马肠, 风味, 多环芳烃, 感官特性, 烟熏材料
中图分类号: TS251.55　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0066−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040145
本文网刊:

Effect of Smoking Materials on the Flavor, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, and Sensory Property of Smoked Horsemeat Sausage

JIANG Lei*, WANG Yueli, SONG Jingjing, ZHANG Yanan, DING Zhenzhen, HOU Jichao, GONG Mengxin
（College of Life and Geographic Sciences, Kashi University, Kashi 844000, China）

Abstract: To assess the impact of apple wood, pear wood, peach wood, and cherry wood on the volatile flavor compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and sensory attributes of traditional Xinjiang smoked horsemeat sausages, a comprehensive analysis was conducted using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) to quantify indicators such as volatile flavor compounds, color, and PAHs content. The findings revealed that smoked samples exhibited decreased pH and L^* values, along with increased a^* and b^* values, compared to the control samples (P<0.05), the color of smoked cherry wood samples was redder and brighter, and there was no significant difference in water content among samples (P>0.05). Smoking elevated PAHs content, notably phenanthrene and fluorene (P<0.05). The analysis identified 75 volatile aromatic components in various smoked horse sausage samples, predominantly phenols, terpenes, aldehydes, and ethers. Partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) and variable importance in projection (VIP) highlighted substantial differences in

收稿日期: 2025−04−14
基金项目: 新疆维吾尔自治区高校基本科研业务费项目（XJEDU2022P085）。
作者简介/通信作者*: 姜蕾（1993−）, 男, 硕士, 实验师, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: Leijiang0729@ksu.edu.cn。

volatile aroma components among smoked horsemeat sausages. Specifically, 19 compounds with VIP values exceeding 1, notably guaiacol, 4-methylguaiacol, acetophenone, and 5-methylfurfural, were identified as distinct volatile aroma components (VIP>1, P<0.05), acetophenone and 4-methylguaiacol contents of apple wood smoked samples were the highest, giving samples unique woody aroma and smoke fragrance. Sensory evaluation favored the PG and YT samples for superior sensory quality and acceptability. In summary, apple wood has emerged as a more favorable smoking material for horsemeat sausages, although enhancements in processing techniques are warranted to mitigate the PAHs content. This study lays a foundation for enhancing the caliber of smoked horsemeat sausages.

Key words: smoked horsemeat sausage; flavor; polycyclic aromatic hydrocarbons; sensory properties; smoking materials

在肉制品中，烟熏的加工方式被广泛应用，不仅可以增加产品的风味，影响肉制品的品质，同时可以延长其制品贮藏时间[1]。烟熏马肠是新疆的特色肉制品之一，与中国其他地区的传统发酵香肠相比，熏马肠使用马肉代替猪肉，马肉的脂肪和胆固醇含量比猪肉低约 20%，更有益于人体健康[2]。通常熏马肠的制作先将马肉切成条状，再与盐、大蒜、糖与香辛料混合后塞入马肠衣中，并用果木进行熏制后进行风干和自然发酵，通过烟熏和发酵使马肉香肠形成独特的香味和口感[3]。

烟熏肉制品独特的烟熏味是影响消费者接受度和购买意向的关键因素，决定其感官特征[4]，这主要因为烟熏材料中的木质素在加热过程中分解产生的挥发性物质赋予了肉制品独特的风味[5]。根据 Jiang 等[6] 的研究，在烟熏马肠中检测到的主要挥发性化合物有醇、醛、酸、酯、酮等，且不同地区生产的熏马肠挥发性风味成分存在显著差异，这可能是加工工艺及烟熏材料的不同造成的。与此同时，熏制过程赋予肉制品独特风味的同时也会产生多环芳烃（polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs）和杂环芳香胺（heterocyclic aromatic amines, HAAs）等有害致癌物质[7]。其中，PAHs 的产生由于烟熏材料在不完全燃烧过程中形成两个或多个缩合芳香碳环，被认为对人体有潜在遗传毒性和致癌性[8]。HAAs 是以氢和氮为基础的热诱导化合物，可在肉制品表面通过美拉德反应生成，从膳食中摄入 HAAs 与结肠癌、乳腺癌、胃癌和胰腺癌的发病率有关[9]。

目前已有研究表征了熏马肠过程中形成的挥发性化合物变化[10]、烟熏条件对感官品质的影响[11]。尽管熏马肠的感官特性以及挥发性香气成分、HAAs 和 PAHs 的形成主要与熏制材料的类型和化学成分有关，但熏制材料对熏马肠感官特性、风味和 PAHs 形成的影响尚不明确。目前，木材是肉制品烟熏的常用材料，例如苹果木、云杉、山毛榉木、榛树和梨木等，有研究表明苹果树/赤杨熏制的肉样品中总 PAHs 含量最低，能够有效降低烟熏后制品中的 PAHs 含量[9,12]。因此，本研究利用苹果木、梨木、桃木及樱桃木熏制马肉香肠，利用 GC-MS 技术分析不同烟熏材料制备的马肉香肠挥发性香气成分，通过 PLS-DA 和 VIP 分析确定特征风味化合物并筛选差异化合物。探讨不同烟熏材料对熏马肠风味、PHAs 和感官特性的影响，为改善熏马肠的风味、安全性和感官质量提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

自然干燥的梨木、桃木、苹果木、樱桃木　新疆喀什市果园；新鲜马后腿肉、马肠　市售；二氯甲烷、正己烷、2-甲基-3-庚酮、PAHs 标准品　色谱纯，麦克林生化科技股份有限公司；大蒜、茴香、胡椒粉、小豆蔻、丁香　市售；所有实验用水均为去离子水；其余有机溶剂均为国产分析纯。

QP2020NX 气相色谱质谱联用仪　日本岛津公司；BYXX-50 烟熏炉　嘉兴艾博实业有限公司；LN-150 液压灌肠机　诸城市雷诺机械有限公司；SM40SP 恒温恒湿发酵箱　新麦机械（中国）有限公司；TTL-DCII 氮吹仪　北京同泰科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　不同烟熏材料特性　梨木、桃木、苹果木、樱桃木均采样于新疆喀什果园，树龄相近。木材经粉碎后在 105 ℃ 下采用直接干燥法检测水分含量；木材中性洗涤纤维（Neutral Detergent Fiber, NDF）、酸性洗涤纤维（Acid Detergent Fiber, ADF）和酸性洗涤木质素（Acid Detergent Lignin, ADL）的含量（%）按照 Van Soest 系统的方法测定[13]，按照下列公式计算纤维素、半纤维素和木质素含量（%）：纤维素=ADF−ADL；半纤维素=NDF-ADF；木质素=ADL。

1.2.2　熏马肠的制备　采用传统的熏马肠制作方法。首先，取新鲜马瘦肉和背部脂肪切成条状，加入 2.5% 盐、1.5% 糖、大蒜 0.5%、味精 0.1% 以及 0.2% 由茴香、胡椒粉、小豆蔻和丁香组成的混合香料，马肉与调味料充分混合后灌入马肠衣中，然后采用传统烟熏方式，分别用梨木、桃木、苹果木、樱桃木在半开放的烟熏房中烟熏 18 h，然后于 24 ℃、75% 相对湿度发酵箱中发酵 48 h，随后在晾干房中自然风干 30 d，获得的熏马肠样本分别以 LM、TM、PG 和 YT 表示。每个样品独立制作 3 批，以未经烟熏直接发酵的熏马肠作为空白对照，以 KB 表示。

1.2.3　熏马肠基础理化指标测定　使用经白板校正的便携式手持测色仪测定熏马肠表皮颜色，以 L^*（亮度）、a^*（红绿度）和 b^*（黄蓝度）表示；使用直接干燥法测定水分含量，熏马肠样品在 105 ℃ 下干燥。样品

表 1 熏马肠感官评定标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for smoked horsemeat sausage

表皮颜色	烟熏气味	口感	风味	总体接受度	分值(分)
瘦肉呈红色, 色泽分明, 外表光泽	烟熏味浓郁	口感稍粗糙, 咀嚼性能较好, 咸度适中	鲜香适中, 无腥味	高	16~20
瘦肉呈紫红色, 色泽较分明, 外表有光泽	烟熏味较淡	口感稍粗糙, 咀嚼性能一般, 稍咸或淡	鲜香一般, 稍有腥味	中	10~15
瘦肉呈暗紫色, 无香肠特征颜色	无烟熏味或烟熏味刺鼻	口感粗糙, 咀嚼性能差, 味咸或淡	无鲜味或有异味	低	0~9

1∶10 与蒸馏水破碎匀浆后使用电子 pH 计测量 pH。

1.2.4 多环芳烃含量的测定 熏马肠中多环芳烃含量测定参照国标 GB 5009.265-2021《食品安全国家标准 食品中多环芳烃的测定》中的气相色谱-质谱法执行[14]。

1.2.5 挥发性香气成分的测定

1.2.5.1 样品处理及固相微萃取 参考张文玉等[15]的方法测定熏马肠的挥发性化合物: 首先将 3.0 g 样品破碎置于 20 mL 顶空样品瓶中, 加入 5 μL 2-甲基-3-庚酮作为内标, 使用聚四氟乙烯(PTFE)盖密封顶空瓶, 在 45 ℃ 下平衡 20 min, 然后使用固相微萃取(SPME)于 45 ℃ 下顶空萃取 35 min, 萃取完成后在 250 ℃ 下进样 5 min。

1.2.5.2 GC 条件 色谱柱: DB-5MS 石英毛细柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 升温程序: 40 ℃ 下保持 2 min, 然后以 3 ℃/min 的速度升温至 90 ℃, 保持 5 min, 然后以 3 ℃/min 的速度升温至 200 ℃, 再以 15 ℃/min 的速度升温至 230 ℃, 保持 15 min; 载气为氦气(He), 纯度 99.999%, 流速 1.0 mL/min, 不分流进样模式。

1.2.5.3 MS 条件 质谱条件: EI 电子轰击离子源; 电子能量 70 eV; 传输线温度 280 ℃; 离子源温度 230 ℃; 质量扫描范围 m/z 45~500。

1.2.5.4 定性定量分析 目标化合物通过与 NIST 17.0 质谱库比较, 选择相似度大于 80% 且 3 次均检出的化合物作为定性结果; 使用 2-甲基-3-庚酮(0.0775 μg/μL)直接内标法进行半定量分析, 计算公式如下:

$$p_i(\mu g\cdot kg^{-1}) = \frac{p_{is}\times V_0\times A_j}{A_{js}\times M}$$

式中: p_i 为目标化合物质量浓度, μg/kg; p_{is} 内标物质量浓度, μg/μL; A_j 目标化合物峰面积; V_0 为内标物体积, μL; A_{js} 内标物峰面积; M 为样品质量, kg。

1.2.6 感官评价 参考国标 GB/T 23493-2022《中式香肠质量通则》[16] 与赵立等[17] 的中式传统感官评价方法, 略作修改。评定小组由受过食品感官培训的 11 人组成, 根据评分细则对熏马肠的表皮颜色、烟熏气味、口感、滋味、总体接受度进行多维度评价, 每个项目赋予 20 分分值, 评分细则如表 1 所示。感官评定时先对熏马肠表皮进行颜色和烟熏味的评价, 然后将熏马肠切成 1 cm^3 的小块后再食用。

1.3 数据处理

所有测试均执行 3 次, 结果以平均值±标准偏差表示; 使用 IBM SPSS Statistic 29 对数据进行显著性分析, Ducan 检验(P<0.05); 通过 Origin 2021 Pro 绘图; 使用 SIMCA 14.1 进行 PLS-DA 和 VIP 分析。

2 结果与分析

2.1 不同烟熏材料理化指标

4 种烟熏材料的水分、木质素和纤维素与半纤维素含量如表 2 所示。桃木和樱桃木的水分含量显著高于梨木和苹果木(P<0.05), 有研究表明木屑含水量与 PAHs 含量不存在相关性[18]。苹果木的纤维素和木质素含量显著高于其他材料(P<0.05), 分别为 49.45% 和 22.64%, 樱桃木的半纤维素含量最高, 为 29.54%, 木质素受热分解会产生酚类物质, 纤维素的热解会产生酮类化合物和醛类化合物, 这可能使苹果木作为发烟材料燃烧时产生更丰富的风味物质。

表 2 不同烟熏材料中的水、纤维素、半纤维素和木质素含量

Table 2 Water, cellulose, hemicellulose, and lignin contents in different smoking materials

指标	梨木	桃木	苹果木	樱桃木
水分(%)	8.66±0.52^b	10.24±0.43^a	8.87±0.47^b	9.31±0.32^a
纤维素(%)	36.32±1.01^c	39.87±0.67^b	49.45±1.01^a	41.21±1.08^b
半纤维素(%)	21.38±0.89^c	28.71±0.34^a	25.12±1.23^b	29.54±0.67^a
木质素(%)	15.65±1.20^b	11.57±0.74^c	22.64±0.87^a	10.89±0.22^c

注: 同行不同上标字母表示样品间存在显著差异(P<0.05), 表3~表5同。

2.2 熏马肠基础理化指标

表 3 展示了不同烟熏材料熏制的马肉香肠表皮颜色、pH 和水分含量。与对照样品相比, 经烟熏后的马肉香肠 L^*值显著降低(P<0.05), TM 样品 L^*值最低, 这可能是因为烟熏过程中烟雾颗粒附着在肠衣表面造成亮度值降低[9]。所有烟熏样品 a^*值和 b^*值均显著高于对照样品(P<0.05), 红色更加鲜艳。所有样品水分含量均无显著差异(P>0.05), 说明在相同工

表 3 熏马肠表皮颜色、pH 及水分含量

Table 3 Color, pH and water content in smoked horsemeat sausages

样品	KB	LM	PG	TM	YT
水分(%)	16.70±0.24^a	16.34±0.21^a	17.21±0.18^a	16.24±0.31^a	17.05±0.52^a
pH	6.31±0.05^a	6.24±0.10^a	5.98±0.12^b	5.77±0.04^c	6.12±0.11^a
L^*	70.12±0.33^a	64.28±0.47^c	66.71±0.51^b	59.12±0.32^d	67.49±0.49^b
a^*	5.24±0.12^d	21.54±0.71^b	23.17±0.59^a	18.21±0.78^c	24.87±0.44^a
b^*	24.76±0.52^c	33.18±0.47^b	37.15±0.64^b	40.34±0.55^a	39.78±0.71^a

艺条件下烟熏材料不会改变熏马肠水分含量。烟熏样品 pH 均低于对照样品，TM 样品 pH 最低，其次是 PG 样品，经烟熏后样品 pH 降低可能由于烟熏材料中的有机酸通过熏制传递给样品从而降低其 pH[19]。

2.3　不同烟熏材料对熏马肠 PAHs 含量的影响

PAHs 根据苯环的数量分为轻质 PAHs 和重质 PAHs，重质 PAHs 比轻质 PAHs 表现出更强的毒性和致病性，但轻质 PAHs 不稳定，易转化为重质 PAHs[20−21]。由表 4 可知，在熏马肠中共检出 8 种 PAHs，未检出 PAHs 中强致癌物苯并 [a] 芘[22]，表明 4 种烟熏材料发烟不会产生苯并 [a] 芘，符合国家低于 5.0 μg/kg 的标准[23]。在检出的 8 种 PAHs 中包含 6 种为毒性较小的轻质 PAHs，包括萘、菲、芴、蒽、二氢苊、蒽。同时检出苯并(b)荧蒽和苯并(k)荧蒽 2 种重质 PAHs，但含量较低，总含量在 0.24~1.20 μg/kg，烟熏对苯并(b)荧蒽和苯并(k)荧蒽含量的影响较小(P>0.05)。在各样品中，PAH4(苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘、苯并(a)蒽、䓛)的总含量均低于欧盟限量的 12 μg/kg[24]，包括苯并(b)荧蒽和未检出的苯并(a)芘、苯并(a)蒽和䓛。未烟熏的马肉香肠 PAHs 含量显著低于烟熏后的马肉香肠(P<0.05)，这部分 PAHs 可能来源于原料，Hitzel 等[25] 在未烟熏的 Salami 香肠中也同样检出了多种 PAH。在检出的 6 种轻质 PAHs 中，只有 LM 样品中的萘含量低于空白对照，其余烟熏样品的轻质 PAHs 含量均高于未烟熏的样品，表现出显著差异(P<0.05)；PG 样品中菲含量显著高于其他 3 种烟熏材料熏制的样品(P<0.05)，含量为 119.11±4.50 μg/kg；YT 样品、LM 样品和 TM 样品菲含量显著低于 PG 样品(P<0.05)，但仍显著高于空白对照(P<0.05)；YT 样品和 LM 样品芴含量相近，PG 样品芴含量最高，含量为 47.91±1.53 μg/kg。PG 样品中 PAHs 总量最高，达 212.81±8.30 μg/kg，其次是 YT 样品(100.70±7.57 μg/kg)和 LM 样品(99.42±3.08 μg/kg)，TM 样品总 PAHs 含量最低(77.89±3.73 μg/kg)，但均显著高于空白对照(P<0.05)。烟熏过程中材料产生烟雾的 PAHs 含量与其木质素含量成正比，烟熏材料木质素含量越高，所产生烟雾的 PAHs 越高，从而导致烟熏香肠的 PAHs 含量增加[26]，且木质素含量显著高于其他果木(P<0.05)，这可能是导致 PG 样品 PAHs 含量最高的原因。

表 4　不同烟熏材料中的多环芳烃含量(μg/kg)

Table 4　Polycyclic aromatic hydrocarbons content in different smoking materials (μg/kg)

PAHs	KB	LM	PG	TM	YT
萘	2.01±0.05^{c}	0.87±0.08^{d}	2.67±0.09^{b}	3.70±0.05^{a}	2.12±0.07^{c}
苊	2.81±0.06^{e}	5.34±0.18^{c}	11.02±0.66^{a}	3.96±0.28^{d}	6.08±0.08^{b}
二氢苊	7.85±0.14^{c}	8.81±0.45^{b}	10.44±0.26^{a}	7.38±0.18^{c}	9.93±0.58^{a}
芴	11.57±0.62^{d}	33.26±1.32^{b}	47.91±1.53^{a}	22.27±1.33^{c}	31.09±1.37^{b}
菲	26.80±1.21^{d}	45.03±0.28^{b}	119.11±4.50^{a}	36.58±1.32^{c}	45.89±4.14^{b}
蒽	1.16±0.07^{d}	5.40±0.43^{b}	20.47±1.00^{a}	3.77±0.48^{c}	4.81±0.53^{bc}
苯并(b)荧蒽	0.23±0.12^{b}	0.24±0.12^{b}	0.57±0.14^{a}	0.16±0.04^{b}	0.32±0.28^{ab}
苯并(k)荧蒽	0.23±0.05^{ab}	0.48±0.21^{ab}	0.63±0.10^{a}	0.08±0.06^{b}	0.45±0.52^{ab}
PAHs总量	52.67±2.31^{d}	99.42±3.08^{b}	212.81±8.30^{a}	77.89±3.73^{c}	100.70±7.57^{b}

2.4　不同烟熏材料对熏马肠挥发性香气成分的影响

由表 5 可知，经烟熏后的马肉香肠挥发性香气与对照相比，在组成成分上存在显著差异(P<0.05)，在熏马肠样品中共鉴定出 75 种挥发性香气成分，包括醇类 7 种、醛类 15 种、酯类 6 种、酚类 9 种、酮类 9 种、萜烯类 17 种、醚类化合物 7 种以及 5 种其他化合物。在对照样品中检出 45 种，YT 样品 48 种、LM 样品 24 种、TM 样品 46 种、PG 样品 48 种，除 LM 样品以外，其余烟熏样品与对照相比尽管物质数量较为接近，但其物质构成种类不同。尽管如此，熏马肠的主要挥发性成分仍以酚类、萜烯类、醛类和醚类化合物为主。

木质素受热分解产生酚类物质，是熏制食品特殊烟熏气味的主要来源之一[7]。在熏马肠样本中共检出 9 种酚类化合物，PG 样品酚类化合物含量最高(1482.37±50.24 μg/kg)，LM 样品最低(766.38±70.45 μg/kg)，主要包括愈创木酚、4-甲基愈创木酚、间甲酚、邻甲酚和 2,6-二甲氧基酚，有研究表明愈创木酚、4-甲基愈创木酚和 2,6-二甲氧基酚是烟熏的特征风味物质[27]，表现出木质香和烟熏香味道，赋予肉制品特殊烟熏气味，同时 9 种酚类化合物在空白对照样本中均未检出。羰基化合物是重要的芳香族化合物，包括酮类化合物和醛类化合物，可通过脂质氧化或材料中的半纤维素和纤维素的热解形成，对整个肉类的香味做出贡献[28]，在未经烟熏马肠样本中共检出 11 种醛类化合物，经烟熏处理后的熏马肠样本醛类化合物数量均显著减少(P<0.05)，主要表现在(E)-2-己烯醛、苯甲醛和(E,E)-2,4-庚二烯醛等化合物的损失，这可能是因为烟熏产生的酚类化合物在熏马肠发酵过程中与醛类化合物反应生成了缩合产物[29]；同时由于烟熏过程中纤维素和半纤维素的热解，赋予了熏马肠新的风味化合物，包括糠醛和 LM 与 PG 样本经烟熏产生的 5-甲基糠醛、枯名醛等，其中糠醛是烟熏烟气中的主要挥发性物质[30]，具有甜味、木香、面包香和焦糖香[31]。除 TM 样本外，其余样本烟熏后酮类化合物总含量均有所提高，尤其是 PG 样本最为显著，主要表现在苯乙酮含量的增加以及 3-甲基-2(5H)-呋喃酮和乙基环戊烯醇酮等物质的形成；此外，PG 样品中的苯乙酮含量最高(P<0.05)，其具有咖啡烘焙气味特征[32]。

烯烃类物质通过游离脂肪酸氧化降解产生，在熏马肠中共鉴定出 17 种烯烃类化合物，数量占比最多，这与高蕾等[33] 的研究结果一致，通常脂肪烃因其阈值高被认为对肉制品风味的贡献不大[34]，但芳香烃

表 5 不同熏马肠样品中挥发性香气成分

Table 5 Volatile aroma components in different smoked horsemeat sausage samples

序号	物质名称	化合物质量浓度(μg/kg)				
		KB	YT	LM	TM	PG
A1	正戊醇	110.01±4.79	nd	nd	nd	nd
A2	正己醇	84.50±4.06	nd	nd	nd	nd
A3	正庚醇	40.15±4.15	nd	nd	nd	nd
A4	1-辛烯-3-醇	195.61±13.97	nd	nd	nd	nd
A5	苯乙醇	47.92±1.97	nd	nd	nd	nd
A6	糠醇	nd	303.70±22.78^{a}	264.02±9.45^{b}	207.44±24.30^{c}	349.96±19.39^{a}
A7	2,3-丁二醇	nd	nd	nd	nd	95.42±3.28
	醇类总质量浓度	487.19±28.94^{a}	303.70±22.78^{b}	264.02±9.45^{c}	207.44±24.30^{d}	445.38±22.67^{a}
B1	乙酸芳樟酯	47.42±4.17^{b}	21.38±2.04^{d}	34.55±7.98^{c}	27.84±4.77^{c}	64.31±1.71^{a}
B2	乙酸松油酯	42.44±4.74^{b}	19.49±1.67^{d}	nd	27.90±4.50^{c}	61.46±2.33^{a}
B3	癸酸乙酯	11.42±1.08^{b}	15.12±3.16^{b}	307.94±29.47^{a}	13.34±0.98^{b}	23.85±1.08^{b}
B4	肉桂酸乙酯	1.76±0.13^{b}	2.11±0.47^{b}	42.59±1.78^{a}	2.11±0.30^{b}	nd
B5	乙酸丁香酚酯	nd	15.05±1.60^{b}	54.39±3.26^{a}	10.53±1.96^{b}	13.91±9.22^{b}
B6	乙酸异戊酯	nd	nd	nd	nd	20.27±1.40
	酯类总质量浓度	103.04±10.12^{c}	73.15±8.94^{d}	439.47±42.49^{a}	81.72±12.51^{d}	183.80±15.74^{b}
C1	正己醛	945.03±44.85^{a}	74.33±1.33^{c}	nd	357.65±26.03^{b}	344.16±34.07^{b}
C2	(E)-2-己烯醛	87.96±3.88	nd	nd	nd	nd
C3	正庚醛	85.45±5.27	nd	nd	nd	nd
C4	(E,E)-2,4-己二烯醛	78.95±17.05	nd	nd	nd	nd
C5	(E)-2-庚烯醛	79.50±6.58	nd	nd	nd	nd
C6	苯甲醛	174.57±19.41	nd	nd	nd	nd
C7	(E,E)-2,4-庚二烯醛	162.82±12.60	nd	nd	nd	nd
C8	正辛醛	76.13±5.02^{a}	11.83±0.73^{c}	nd	27.15±5.57^{b}	10.61±0.35^{c}
C9	苯乙醛	18.89±2.29^{c}	nd	nd	11.71±2.62^{b}	34.48±2.58^{a}
C10	(E)-2-辛烯醛	101.91±8.78	nd	nd	nd	nd
C11	壬醛	113.81±9.43^{a}	25.72±7.85^{c}	nd	63.19±11.68^{b}	118.19±5.00^{a}
C12	糠醛	nd	125.61±17.53^{c}	61.94±5.22^{d}	304.77±3.55^{a}	214.68±11.30^{b}
C13	枯茗醛	nd	11.45±1.48^{b}	nd	13.72±2.74^{b}	37.23±1.01^{a}
C14	十五醛	nd	5.60±4.13^{bc}	8.99±0.74^{ab}	7.45±2.11^{bc}	20.08±1.76^{a}
C15	5-甲基糠醛	nd	nd	nd	208.38±2.03^{b}	456.71±17.56^{a}
	醛类总质量浓度	1925.02±135.16^{a}	254.54±33.05^{d}	70.93±5.96^{e}	994.02±56.33^{c}	1236.14±73.63^{b}
D1	邻甲酚	nd	49.88±4.80^{b}	68.91±13.60^{a}	41.81±7.06^{b}	75.22±4.03^{a}
D2	间甲酚	nd	106.34±9.02^{c}	nd	163.58±23.76^{b}	288.12±8.44^{a}
D3	愈创木酚	nd	453.43±34.88^{b}	697.47±56.85^{a}	294.11±36.68^{b}	553.58±16.96^{b}
D4	2,4-二甲基苯酚	nd	9.47±1.18^{b}	nd	nd	22.57±1.32^{a}
D5	2-乙基苯酚	nd	7.14±1.08^{b}	nd	nd	54.48±0.86^{a}
D6	4-甲基愈创木酚	nd	246.54±23.14^{b}	nd	169.36±25.08^{c}	314.52±8.07^{a}
D7	4-乙基愈创木酚	nd	76.65±7.98^{b}	nd	60.82±10.32^{c}	112.17±5.11^{a}
D8	2,6-二甲氧基酚	nd	55.64±8.62^{a}	nd	35.57±6.60^{b}	51.05±4.82^{a}
D9	2-甲氧基-4-乙烯基苯酚	nd	nd	nd	4.13±0.82^{b}	10.66±0.63^{a}
	酚类总质量浓度	nd	1005.09±90.70^{b}	766.38±70.45^{c}	769.38±110.32^{c}	1482.37±50.24^{a}
E1	2,5-二甲基-3-己酮	98.74±6.85^{b}	58.51±7.62^{c}	nd	nd	149.51±22.71^{a}
E2	苯乙酮	4.05±0.08^{d}	nd	31.56±13.48^{b}	16.03±2.68^{c}	235.08±2.97^{a}
E3	胡椒酮	24.81±1.81^{b}	16.73±2.59^{c}	nd	20.26±4.44^{bc}	38.61±2.50^{a}
E4	1-羟基-2-丁酮	nd	29.60±19.79^{a}	nd	nd	42.08±6.24^{a}
E5	3-甲基-2(5H)-呋喃酮	nd	34.56±2.93^{b}	nd	32.05±4.08^{b}	68.78±5.31^{a}
E6	2,3-辛二酮	nd	28.70±5.64	nd	nd	nd
E7	乙基环戊烯醇酮	nd	29.17±4.15^{b}	nd	23.29±3.77^{c}	49.17±3.28^{a}
E8	1-茚酮	nd	8.86±1.10^{b}	29.85±1.22^{a}	9.82±2.74^{b}	15.04±0.89^{b}
E9	4-甲基-2(5H)-呋喃酮	nd	36.14±3.50^{b}	80.43±8.70^{a}	nd	nd
	酮类总质量浓度	127.60±8.74^{c}	242.27±29.32^{b}	141.84±23.40^{c}	101.45±17.71^{d}	598.27±43.90^{a}
F1	α-蒎烯	48.56±6.36	nd	nd	nd	nd

续表 5

序号	物质名称	化合物质量浓度(μg/kg)				
		KB	YT	LM	TM	PG
F2	苎烯	24.73±2.34^{b}	nd	nd	15.99±2.40^{c}	42.81±7.84^{a}
F3	桧烯	155.05±14.87^{b}	56.43±2.35^{d}	149.93±3.25^{b}	90.75±9.06^{c}	208.49±16.35^{a}
F4	β-蒎烯	72.34±6.68	nd	nd	nd	nd
F5	β-月桂烯	808.44±97.90	nd	nd	nd	nd
F6	3-蒈烯	47.88±7.67	nd	nd	nd	nd
F7	柠檬烯	1481.41±142.85^{b}	590.72±9.91^{d}	1187.19±93.34^{c}	1060.55±37.53^{c}	3047.93±156.71^{a}
F8	桉叶油醇	411.32±22.07^{a}	158.16±8.69^{d}	350.97±46.07^{b}	238.81±28.08^{c}	nd
F9	(E)-β-罗勒烯	92.86±14.43^{c}	112.05±4.11^{c}	251.28±26.76^{b}	163.95±20.40^{c}	447.79±26.55^{a}
F10	罗勒烯	56.20±8.60^{c}	19.90±1.35^{d}	196.71±16.07^{a}	100.42±13.12^{b}	112.18±5.54^{b}
F11	(E,Z)-别罗勒烯	24.85±4.53^{d}	35.39±1.37^{c}	nd	57.27±5.92^{b}	157.60±9.03^{a}
F12	(-)-4-萜品醇	69.41±5.39^{a}	3.03±0.56^{b}	65.18±18.69^{a}	3.91±1.04^{b}	7.66±0.40^{c}
F13	α-松油醇	49.29±3.75	nd	nd	nd	nd
F14	环辛四烯	nd	19.17±2.04	nd	nd	nd
F15	α-松油烯	nd	22.20±1.68^{b}	nd	nd	77.13±4.56^{a}
F16	4-萜烯醇	nd	45.17±3.77^{b}	nd	53.37±9.32^{a}	nd
F17	A-古巴烯	nd	2.45±0.33^{c}	nd	3.40±0.43^{b}	7.12±0.70^{a}
	烯烃类总质量浓度	3342.34±337.44^{b}	1064.67±36.16^{e}	2191.26±187.96^{c}	1788.42±127.30^{d}	4108.71±227.68^{a}
G1	二烯丙基硫醚	177.91±31.01^{b}	136.70±13.55^{c}	342.04±30.25^{a}	207.70±11.62^{b}	126.38±12.59^{c}
G2	烯丙基甲基二硫醚	514.54±69.32^{a}	106.22±4.23^{c}	433.36±142.39^{a}	257.62±27.02^{b}	131.60±18.80^{c}
G3	二烯丙基二硫醚	4372.92±330.50^{a}	1343.66±41.00^{d}	3177.99±211.27^{b}	2264.35±44.20^{c}	2424.54±187.95^{c}
G4	二乙二醇二甲醚	19.50±1.30^{b}	14.77±1.71^{b}	nd	19.24±4.28^{b}	68.64±10.89^{a}
G5	甲基烯丙基三硫醚	48.66±5.41	nd	nd	nd	nd
G6	4-烯丙基苯甲醚	30.21±1.69^{b}	11.20±0.57^{b}	62.14±29.60^{a}	14.02±3.61^{b}	33.55±1.54^{b}
G7	二烯丙基三硫醚	18.67±1.54^{a}	4.99±0.54^{c}	nd	5.58±1.11^{c}	12.72±0.69^{b}
	醚类总质量浓度	5182.41±440.77^{a}	1617.54±61.60^{d}	4015.53±413.51^{b}	2768.51±91.84^{c}	2797.43±232.46^{c}
H1	4-异丙基甲苯	314.60±25.58^{a}	nd	176.96±12.46^{b}	167.94±17.55^{b}	351.72±29.26^{a}
H2	正癸酸	7.93±4.11^{a}	3.67±0.84^{b}	nd	4.86±0.98^{ab}	8.31±0.69^{a}
H3	2-乙酰吡咯	nd	23.81±1.74^{a}	nd	1.06±1.73^{b}	nd
H4	正壬酸	nd	16.29±2.53^{b}	nd	43.91±10.37^{a}	nd
H5	2-乙酰基呋喃	nd	nd	168.36±28.29	nd	nd
	其他类总质量浓度	322.53±29.69^{a}	43.77±5.11^{c}	345.32±40.75^{a}	217.77±30.63^{b}	360.03±29.95^{a}

注：“nd”表示该物质未检出。

和烯烃类化合物对风味具有一定贡献，柠檬烯、桧烯和(E)-β-罗勒烯作为熏马肠中含量最高的 3 种化合物，具备木香和柠檬气味，有助于改善熏马肠整体风味，PG 样品柠檬烯含量显著高于对照样品(P<0.05)，其余烟熏样品柠檬烯含量均低于空白对照样品(P<0.05)。在检出的 7 种醚类物质中，空白对照样品二烯丙基二硫醚含量显著高于烟熏样品(P<0.05)，是大蒜的主要挥发性物质[35]，检出的硫醚类物质主要来自于加工过程中添加的大蒜及香辛料，经过烟熏后二烯丙基二硫醚和烯丙基甲基二硫醚含量显著低于对照样品(P<0.05)，烟熏在赋予马肉香肠独特风味的同时有助于掩盖大蒜刺激性气味。

2.5　不同熏马肠样品挥发性香气成分 PLS-DA 分析

为了进一步了解不同烟熏材料对马肉香肠挥发性化合物的影响，使用 PLS-DA 评估了不同熏马肠样品之间主要挥发性化合物的差异。PLS-DA 得分图如图 1A 所示，R^2X=0.984，R^2Y=0.986，Q^2=0.972，R^2 和 Q^2 值接近 1，表明模型显示出良好的方差解释能力和预测能力[36]。为考察该模型的建模效果，利用置换检验分析进行 200 次交叉验证，由图 1B 可知，R^2=(0.0, 0.0949)，Q^2=(0.0, −0.598)，Q^2 负值说明所建 PLS-DA 模型可靠，无过拟合现象，具有一定的统计学意义，可用于不同熏马肠样品挥发性成分的判别分析[37]。由图 1A 可知，LM、YT 和 TM 样品位于第二象限，且距离较近。PG 样品位于第三象限，空白对照样品位于第四象限，PG 样品与对照样品相距较远且无互相交叉，表明挥发性化合物差异较大。总体来看，尽管 YT、LM 和 TM 样品相距较近，但仍和对照样品位于不同象限且距离较远，充分说明熏制改变了马肉香肠挥发性成分。

2.6　不同熏马肠样品中挥发性化合物 VIP 值分析

为了筛选不同熏马肠中具有贡献的挥发性香气成分，计算了检出的挥发性成分 VIP 值，可表明该挥发性香气物质对于区分组间显著性差异的贡献大小[38]，在分析判别过程中，一般认为 VIP 值>1，表示该挥发性香气物质对总体香气特征有着重要的贡

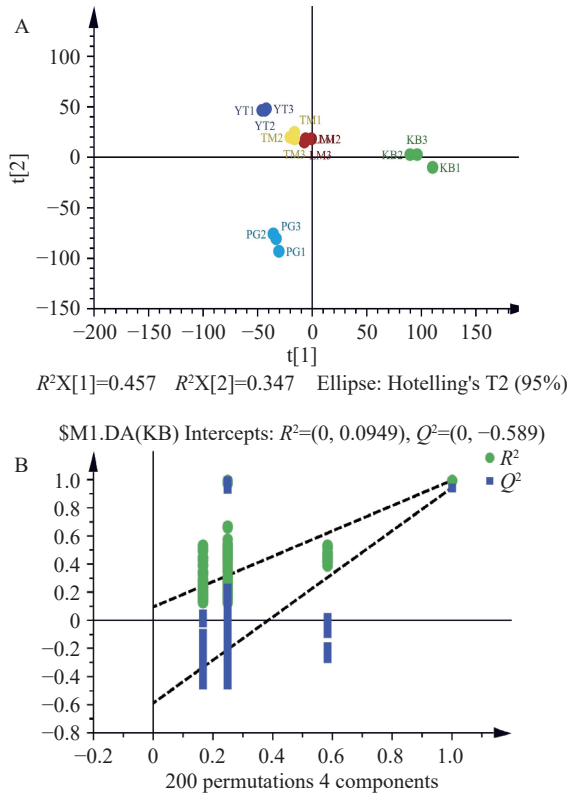


图 1　不同熏马肠样品中挥发性化合物的 PLS-DA 得分图（A）和置换检验图（B）

Fig.1　PLS-DA score (A) and displacement test (B) of volatile compounds in different smoked horsemeat sausage samples

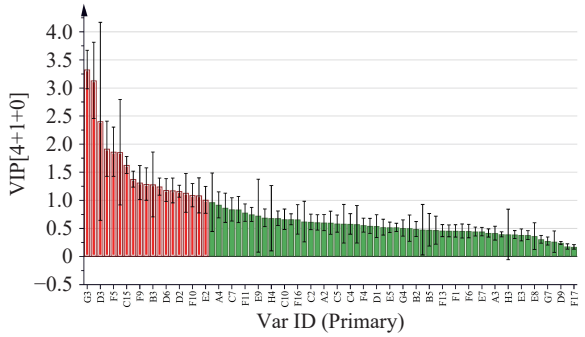


图 2　不同熏马肠样品中挥发性化合物的 VIP 值

Fig.2　VIP score of volatile compounds in different smoked horsemeat sausage samples

献[39]。由图 2 可知，不同熏马肠样品挥发性化合物中共有 19 种物质 VIP 值大于 1，包括愈创木酚、4-甲基愈创木酚、间甲酚、5-甲基糠醛和苯乙酮等。为了更加直观了解烟熏材料对马肉香肠挥发性化合物的影响，对检出的 VIP 值最大的 10 种物质进行聚类热图分析。由图 3 可知，PG 样品中（E）-β-罗勒烯、苯乙酮、间甲酚、5-甲基糠醛和 4-甲基愈创木酚含量最高，其中 4-甲基愈创木酚和间甲酚是烟熏制品中典型的特征风味物质，具有木质香和烟熏香，苯乙酮可以赋予花果香气[40]，（E）-β-罗勒烯具备甜草药气味[41]；愈创木酚、癸酸乙酯和罗勒烯在 LM 样品中最多，愈创木酚是烟熏味道的主要贡献化合物之一[22]。空白对照组样品中 β-月桂烯的含量最高。综上所述，检

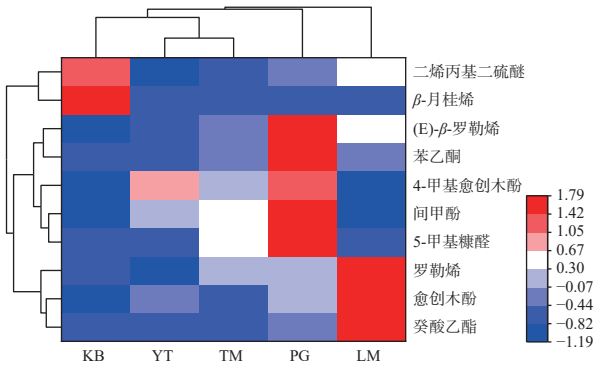


图 3　VIP 值大于 1 挥发性化合物聚类热图

Fig.3　Heatmap for clustering of volatile compounds with VIP values>1

出的 10 种 VIP 值大于 1 的关键挥发性香气成分含量在各样品中差异显著（$P<0.05$），为不同烟熏材料制备的熏马肠差异化合物，可以作为区分烟熏材料的依据。

2.7　不同烟熏材料熏马肠感官特性

不同熏马肠样品感官评价结果如图 4 所示，经过烟熏的样品表皮颜色得分均高于空白对照样品，熏制过程材料发烟有利于增加样品颜色效果，赋予样品有光泽的红色。在烟熏气味的评价中，PG 样品得分最高，LM、TM 和 YT 样品烟熏气味得分相似，对照挥发性香气成分分析结果，PG 样品中酚类与酮类化合物的数量与含量均表现出较高的水平，同时酚类化合物是烟熏的特征风味[7]，因此 PG 样品表现出较为浓郁的烟熏气味。经烟熏后的样品口感和滋味得分差距较小，空白对照样品得分均最低；从总体接受度来看，评定小组成员对 PG 样品赋予了最高的接受度得分，其次是 YT 样品，对照样品总体接受度得分最低，评定小组成员对未经过烟熏缺少烟熏气味的马肉香肠接受度较低。综上所述，苹果木作为烟熏材料有利于提高熏马肠的整体感官和可接受性。

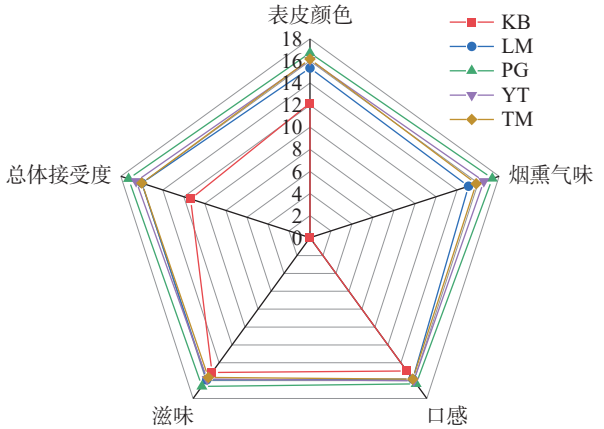


图 4　不同材料熏制的马肉香肠感官特性

Fig.4　Sensory characteristics of horsemeat sausages smoked with different materials

3　结论

研究了 4 种不同烟熏材料对马肉香肠挥发性香

气成分、PAHs 和感官特性的影响。结果表明熏制提高了马肉香肠 a^*值和 b^*值，增加了熏马肠色度，降低了 pH 和 L^*值，但熏制对水分含量无显著影响。在感官评价中，苹果木和樱桃木熏制的样品表现出更好的感官品质和总体可接受度。烟熏会明显增加马肉香肠 PAHs 含量，菲和芴含量的增加最为明显，这与发烟材料的水分、木质素、纤维素和半纤维素含量有关。样品经过烟熏后挥发性化合物组成数量相似，但组成成分具有显著差异，烟熏产生的愈创木酚、4-甲基愈创木酚和 2,6-二甲氧基酚赋予了熏马肠更好的风味品质。综上所述，苹果木作为烟熏材料可以更好地提升熏马肠感官特性和风味品质，但传统烟熏方式增加其制品 PAHs 含量问题难以解决，后续仍需改进加工工艺或制备苹果木烟熏液，以减少使用苹果木作为烟熏材料时的 PAHs 含量。研究为提高熏马肠品质提供了生产理论基础。

© 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］ 封铧, 邓斯予, 韩玥颖, 等. 基于顶空-气相色谱-离子迁移谱法比较 7 种市售烟熏鱼挥发性成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 183−190. ［FENG H, DENG S Y, HAN Y Y, et al. Comparison of volatile components of 7 kinds of commercial smoked fish via headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(5): 183−190.］

［2］ LORENZO J M, SARRIES M V, TATEO A, et al. Carcass characteristics, meat quality and nutritional value of horsemeat: A review[J]. Meat Science, 2014, 96: 1478−1488.

［3］ LU S L, JI H, WANG Q L, et al. The effects of starter cultures and plant extracts on the biogenic amine accumulation in traditional Chinese smoked horsemeat sausages[J]. Food Control, 2015, 50: 869−875.

［4］ 丁浩晗, 田嘉伟, 谢祯奇, 等. 基于热解工艺制备烟熏液对西冷牛排风味特征及消费者接受度的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(18): 190−196. ［DING H H, TIAN J W, XIE Z Q, et al. Effect of liquid smoke prepared by thermal pyrolysis on flavor effect of liquid smoke prepared by thermal pyrolysis on flavor[J]. Food Science, 2024, 45(18): 190−196.］

［5］ 王飞, 乔明武, 黄现青, 等. 烟熏液的形成与应用[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 386−397. ［WANG F, QIAO M W, HUANG X Q, et al. Application and formation of liquid smoke[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(9): 386−397.］

［6］ JIANG L, CHEN Y, WANG B, et al. Bacterial community diversity and its potential contributions to the flavor components of traditional smoked horsemeat sausage in Xinjiang, China[J]. Frontiers in microbiology, 2022, 13: 942932.

［7］ 郭园园, 娄爱华, 沈清武. 烟熏液在食品加工中的应用现状与研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(17): 339−344,351. ［GUO Y Y, LOU A H, SHEN Q W. Application status and research progress of smoke liquid in food processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(17): 339−344,351.］

［8］ SAHIN S, ULUSOY H I, ALEMDAR S, et al. The presence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled beef, chicken and fish by considering dietary exposure and risk assessment[J]. Food Science of Animal Resources, 2020, 40(5): 675.

［9］ ZHANG L, CHEN Q, LIU Q, et al. Effect of different types of smoking materials on the flavor, heterocyclic aromatic amines, and sensory property of smoked chicken drumsticks[J]. Food Chemistry, 2022, 367: 130680.

［10］ YU H H, LI P C, YIN P C, et al. Bacterial community succession and volatile compound changes in Xinjiang smoked horsemeat sausage during fermentation[J]. Food Research International, 2023, 174: 113656.

［11］ 孔令明, 李芳, 苏静, 等. 熏制条件对熏马肠感官和质构的影响及其工艺优化[J]. 食品工业科技, 2013, 34(11): 210−213,217. ［KONG L M, LI F, SU J, et al. Effect of smoked conditions on sensory and texture of smoked horsemeat intestines and its process optimization[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(11): 210−213,217.］

［12］ STUMPE-VĪKSNA I, BARTKEVIČS V, KUKĀRE A, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in meat smoked with different types of wood[J]. Food Chemistry, 2008, 110(3): 794−797.

［13］ AOAC. Official methods of analysis of AOAC international (17th ed.)[M]. Gaithersburg: Maryland, 2000.

［14］ 国家卫生健康委员会. GB 5009.265-2021 食品安全国家标准 食品中多环芳烃的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021. ［National Health Commission. GB 5009.265-2021 National food safety standard-Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.］

［15］ 张文玉, 李雅, 马赫, 等. 气相色谱-质谱联用结合化学计量法分析不同干燥方式对芫荽风味物质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(4): 294−301. ［ZHANG W Y, LI Y, MA H, et al. Analysis of effects of different drying methods on flavor substances of coriander using GC-MS combined with stoichiometric method[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(4): 294−301.］

［16］ 国家市场监督管理总局. GB/T 23493-2022 食品安全国家标准 中式香肠质量通则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. ［State Administration for Market Regulation. GB 5009.265-2021 National food safety standard. General rules for the quality of Chinese sausages[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.］

［17］ 赵立, 曹雨欣, 宋子伟, 等. 咸味猪骨肽部分替代 NaCl 对低盐香肠品质和风味的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 70−78. ［ZHAO L, CAO Y X, SONG Z W, et al. Effect of partial replacement of NaCl with salty pig bone peptides on the quality and flavor of Low-NaCl sausages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 70−78.］

［18］ PÖHLMANN M, HITZEL A, SCHWÄGELE F, et al. Contents of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and phenolic substances in Frankfurter-type sausages depending on smoking conditions using glow smoke[J]. Meat Science, 2012, 90(1): 176−184.

［19］ MALARUT J, VANGNAI K. Influence of wood types on quality and carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) of smoked sausages[J]. Food Control, 2018, 85: 98-106.

［20］ LU J N, ZHANG Y K, ZHOU H, et al. A review of hazards in meat products: Multiple pathways, hazards and mitigation of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Food Chemistry, 2024, 445: 138718.

［21］ 颜婷, 葛天嗣, 黄才欢, 等. 多环芳烃的形成、危害及其减控技术研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 257−266. ［YAN T, GE T S, HUANG C H, et al. Research progress on polycyclic aro-

matic hydrocarbons: formation, deleterious effects and control technologies[J]. Food Science, 2024, 45(14): 257−266.]
[22] 田梅兰, 刘杨柳, 马爱进, 等. 三种市售烟熏液特性评价及其在熏泥鳅加工中的应用[J].食品工业科技, 2025, 46(10): 301-310. [TIAN M L, LIU Y L, MA A J, et al. Evaluation of the characteristics of three kinds of commercial liquid smokes and its application in the processing of smoked loach[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 301-310.]
[23] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 2762-2022 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 2762-2022 National food safety standard. Maximum levels of contaminants in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.]
[24] ASSOGBA M F, AHOUANSOU R H, DJOHI N O R, et al. Development of innovative technology reducing the levels of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in grilled meat and smoked fish[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 125: 105773.
[25] HITZEL A, POEHLMANN M, SCHWAEGELE F, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and phenolic substances in meat products smoked with different types of wood and smoking spices[J]. Food Chemistry, 2013, 139(1-4): 955−962.
[26] ALSADAT M M, HADIDI M, HUSEYN E, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon in smoked meat sausages: Effect of smoke generation source, smoking duration, and meat content[J]. Food Science and Technology, 2022, 42: e60921.
[27] 王琼, 李聪, 高磊峰, 等. 不同类型烟熏香精对西式培根风味的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(7): 220−230. [WANG Q, LI C, GAO L F, et al. Impact of different smoke flavorings on the flavor of western bacon[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(7): 220−230.]
[28] ZONG P J, JIANG Y, TIAN Y Y, et al. Pyrolysis behavior and product distributions of biomass six group components: Starch, cellulose, hemicellulose, lignin, protein and oil[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 216: 112777.
[29] RACOVITA R C, SECUIANU C, CIUCA M D, et al. Effects of smoking temperature, smoking time, and type of wood sawdust on polycyclic aromatic hydrocarbon accumulation levels in directly smoked pork sausages[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(35): 9530−9536.
[30] SUNG W C. Volatile constituents detected in smoke condensates from the combination of the smoking ingredients sucrose, black tea leaves, and bread flour[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2013, 21(3): 292−300.
[31] CHANG, H, WANG Y, XIA Q, et al. Characterization of the physicochemical changes and volatile compound fingerprinting during the chicken sugar-smoking process[J]. Poultry Science, 2021, 100(1): 377−387.
[32] PARAVISINI L, PROT A, GOUTTEFANGEAS C, et al. Characterisation of the volatile fraction of aromatic caramel using heart-cutting multidimensional gas chromatography[J]. Food Chemistry, 2015, 167: 281−289.
[33] 高蕾, 陈恺, 周建中, 等. 响应面法优化同时蒸馏法萃取熏马肠中挥发性风味物质的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(6): 52−57. [GAO L, CHEN K, ZHOU J Z, et al. Optimization of SDE extraction conditions for the flavor compounds in smoked horsemeat by response surface analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(6): 52−57.]
[34] 黎明. 复配发酵剂发酵对冕宁火腿品质的影响研究[D]. 成都: 成都大学, 2023: 35. [LI M. Effect of mixed starter fermentation on quality of Mianning Ham[D]. Chengdu: Chengdu University, 2023: 35.]
[35] 奚星林, 周舒瑜, 张嘉俊, 等. SPME-GC-MS 法分析大蒜粉中挥发性风味物质[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(3): 14−20. [XI X L, ZHOU S Y, ZHANG J J, et al. Analysis of volatile flavor compounds in garlic powder by SPME-GC-MS analysis[J]. China Food Additives, 2022, 33(3): 14−20.]
[36] 李想, 邓静, 易宇文, 等. 电子舌和气相色谱-离子迁移谱技术分析炖煮时间对松茸鸡汤风味的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(1): 336−348. [LI X, DENG J, YI Y W, et al. Analysis of the effect of stewed time on the flavor of fresh matsutake chicken soup using El ectronic tongue and gas chromatography-ion mobility spectrometry techniques[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(1): 336−348.]
[37] JIMÉNEZ-CARVELO A M, MARTÍN-TORRES S, ORTEGA-GAVILÁN F, et al. PLS-DA vs sparse PLS-DA in food traceability. A case study: Authentication of avocado samples[J]. Talanta, 2021, 224: 121904.
[38] XU J H, TU Z C, WANG H, et al. Discrimination and characterization of different ultrafine grinding times on the flavor characteristicof fish gelatin using E-nose, HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. Food Chemistry, 2024, 433: 137299.
[39] 郭瑞, 李盼盼, 张晓莉, 等. SPME-GC-MS/MS 结合多元统计分析研究不同储藏年份玉米风味物质差异[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(3): 179−186. [GUO R, LI P P, ZHANG X L, et al. Diversity analysis of volatile flavor compounds of corn with various storage years based on SPME-GC MS/MS and multivariate statistical analysis[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(3): 179−186.]
[40] 常海军, 彭荣, 唐春红. 重庆城口腊肉挥发性风味化合物分析[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 120−126. [CHANG H J, PENG R, TANG C H. Volatile flavor compounds of Chongqing Chengkou bacon[J]. Food Science, 2016, 37(4): 120−126.]
[41] 陈雪玲, 吉莉莉, 王琪, 等. 发酵猪皮微生物群落与挥发性风味物质动态变化与相互作用[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 234−242. [CHEN X L, JI L L, WANG Q, et al. Dynamic changes and interactions between microbial communities and volatile flavor compounds in fermented pigskin[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 234−242.]