

气味指纹图谱技术在肉类产品中的应用研究进展

Advances in the application of odour fingerprinting techniques in meat products

李月明^{1,2} 韩冰¹ 王军茹¹

LI Yue-ming^{1,2} HAN Bing¹ WANG Jun-ru¹

潘雷¹ 徐旂梦¹ 张根生¹

PAN Lei¹ XU Yi-meng¹ ZHANG Gen-sheng¹

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028;

2. 中国农业科学院农产品加工研究所主食加工技术研究院, 黑龙江 哈尔滨 151900)

(1. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang

150028, China; 2. Institute of Staple Food Processing Technology, Institute of Food

Science and Technology CAAS, Harbin, Heilongjiang 151900, China)

摘要:研究综述了气味指纹图谱技术的概念、特点、构建指纹图谱的主要步骤,以及气味指纹图谱技术在肉类产品溯源与品种鉴定、工艺控制、贮藏期、质量控制领域的应用,并对气味指纹图谱技术在肉类产品应用中的研究方向和发展前景进行了展望。

关键词:气味指纹图谱技术;肉类产品;挥发性物质;溯源与品种鉴定;工艺控制;贮藏期;质量控制

Abstract: This paper mainly reviews the concept and characteristics of odour fingerprinting technology, the main steps of constructing fingerprint profiles, and the application of odour fingerprinting technology in the fields of meat product traceability and variety identification, process control, storage period and quality control, and provides an outlook on the research directions and development prospects of odour fingerprinting technology in the application of meat products.

Keywords: odour fingerprinting; meat products; volatile substances; traceability and species identification; process control; storage period; quality control

肉类食品富含人体所需营养物质且口感极佳,在人们的日常生活中必不可少^[1-2]。气味特征是评判肉类产

品品质的重要指标之一,在实际生产中起到指导作用^[3]。气味特征的描述和判定可以通过感官评价实现,由于个体间的差异对结果影响较大,可以结合气味指纹图谱技术共同表征。气味指纹图谱技术^[4]是指利用现代先进的检测仪器对挥发性物质进行数据检测,得到相应的带有本质属性特征的光谱、色谱以及其他图谱的一门技术。该技术是以挥发性物质分析为基础,通过绘制特征气味指纹图谱达到表征与鉴别的目的。研究检索并总结该技术在肉类产品研究领域的具体应用,如产品溯源与品种鉴定、工艺控制、贮藏期、质量管理等,并对该技术在肉类产品应用中的研究方向和发展前景进行展望,以期为肉类产品研究提供依据。

1 气味指纹图谱的构建流程

构建气味指纹图谱的主要步骤见图1:样品采集^[5]、数据采集^[6]、数据分析与特征信息提取^[7-10]、建立气味指纹图谱。根据检测需要进行样品采样,理论上采样数量越多越好。在肉类产品研究中,通常采用一种或多种方法进行数据采集。依据所提取的特征信息,建立一种可以反映一类或一种样品主要特征的图像或图形^[11]。气味指纹图谱技术应用在挥发性成分检测与评价方面具有不可替代的优势。

2 气味指纹图谱技术在肉类产品中的应用

2.1 在肉类产品溯源与品种鉴定上的应用

肉类产品的可追溯性和真实性研究对于保证肉类品

基金项目:黑龙江省“百千万”工程科技重大专项(编号:2019ZX07B03)

作者简介:李月明,女,哈尔滨商业大学在读博士研究生。

通信作者:张根生(1964—),男,哈尔滨商业大学教授,硕士。

E-mail: zhanggsh@163.com

收稿日期:2022-02-10

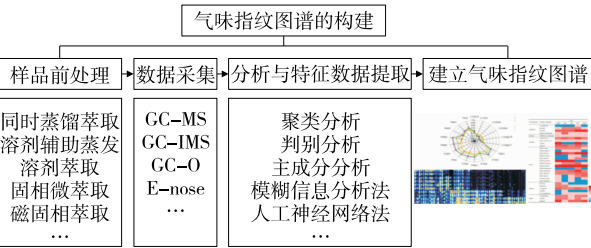


图 1 气味指纹图谱的构建
Figure 1 Construction of odor fingerprint

质及其产品的安全和质量、维护消费者的利益、保护地方特色产品均具有重要意义^[12]。目前针对肉类产品溯源与品种鉴定的方法较多,主要有稳定同位素技术、DNA 技术、光谱技术、矿物元素分析和气味指纹图谱技术等^[13-15],各方法的优势和不足见表 1。在产品溯源与品种鉴定领域,气味指纹图谱技术仍处于发展阶段,相较于 DNA 技术、同位素技术等常规方法,其在溯源、品种鉴定协同风味表征上具有不可替代的优势。

有研究^[16]表明,可应用气相色谱—质谱联用(GC-

MS)或气相色谱—离子迁移色谱(GC-IMS)等检测设备对挥发性风味物质进行检测,经数据分析如采用主成分分析方法(PCA)、线性判别分析方法(LDA)、偏最小二乘—判别分析(PLS-DA)等方法找到关键化合物,通过绘制指纹图谱来进行肉类产品的品种鉴定。此外,不同地区的肉类产品的品质特征不同,通过气味指纹图谱技术也可以进行产品溯源。表 2 列举了相关气味指纹图谱技术在肉类产品溯源与品种鉴定上的应用。

2.2 在肉类产品工艺控制上的应用

气味指纹图谱技术不仅可以对风味进行表征,还可以评判加工工艺对肉类产品风味的影响。其中,不同的辅料添加与加工过程影响着产品的风味。王宁宁等^[23]应用气相色谱—质谱联用(GC-MS)检测低钠复合盐发酵香肠中挥发性风味物质,得到的指纹图谱数据中低钠复合盐组对发酵香肠的风味无影响。刘萍等^[24]采用气相色谱离子迁移谱(GC-IMS)对肉脯加工过程中产生的原料肉、拌料肉、发酵肉、半成品肉和成品肉的挥发性有机物进行检测和分析,对选取的气相色谱离子迁移谱(GC-IMS)图

表 1 不同溯源与品种鉴定方法的对比

Table 1 Comparison of different traceability and variety identification methods

方法	优点	缺点
稳定同位素技术	利用 H、C、N、O、S 和 Sr 的稳定同位素比值实现不同溯源与品种鉴定	可能受地理和饮食历史的影响,应用成本较高
矿物元素分析	分析速度快,灵敏度高,检出限低	受环境、个体差异及不同加工方式的影响
DNA 技术	具有动物个体或品种固有的特征,能提供准确的信息	要面临分子标记的选择问题
光谱技术	一种客观、快速的肉类种类鉴别和鉴定方法	该方法对高光谱图像不敏感,高光谱图像的数据处理困难
气味指纹图谱技术	如应用电子鼻不需要样品预处理	特征成分需要结合 GC-MS 或 GC-IMS 共同表征

表 2 气味指纹图谱技术在肉类产品溯源与品种鉴定上的应用

Table 2 Application of odor fingerprinting technology in traceability and species identification of meat products

类别	研究内容	检测方法	主要结论	参考文献
品种鉴定	测定牛肉、羊肉和鸡肉的挥发性成分	GC-IMS	该方法可以对肉类品种进行有效区分	[17]
	测定不同来源羔羊的胸腰长肌和腰长肌的化学成分和挥发性化合物	SPME、GC-MS	该方法可对两个品种进行有效辨别	[18]
	测定不同品种、年龄段羊肉脂肪组织中的挥发性成分和瘦肉中的代谢产物	HS-GC-MS、溶剂萃取结合 GC-MS	草味和苦味成分可用于种群划分	[19]
产品溯源	对 12 批 25 份羊肉样品的气味活性化合物进行分析	GC-MS、GC-O	筛选出 14 个主要化学标记物,用于羊肉品质和可追溯性的检测	[20]
	对 6 组中国干腌火腿挥发性有机物进行测定	GC×GC 联合 ToF-MS、GC-IMS	分别鉴定出 265,45 个挥发性有机物;GC-IMS 法是区分不同区域的干腌火腿的较好选择	[21]
	测定 4 个品种猪肉的挥发性风味化合物	SPME、HS-GC-MS	1-辛醛、1-辛烯-3-醇和壬醛是能有效区分 4 个品种猪肉的挥发性风味化合物	[22]

谱特征区域信号进行主成分分析,发现该方法能够有效区分各加工阶段的肉脯样品。姚敏等^[25]应用电子鼻和气相质谱联用(GC-MS)的方法通过对红烧肉加工过程中的关键过程如漂烫、油炸、炖煮及添加调味汁等进行风味物变化分析,发现电子鼻技术结合气相质谱联用(GC-MS)依据风味物质的变化可以较好地反映红烧肉的不同加工阶段。表 3 列举了相关气味指纹图谱技术在肉类产品工艺控制上的应用。

2.3 在肉类产品贮藏期表征上的应用

肉类产品由于化学反应、内源酶反应、细菌活动等因素会出现异味、变色、产气和黏稠现象^[33]。应用气味指纹图谱技术探究肉类产品贮藏期间挥发性成分的变化,结合感官评价和微生物指标检验可以表征其贮藏期。其中,气相色谱—质谱联用(GC-MS)是检测肉中微生物产生的挥发性成分最常用的分析方法^[34]。Papadopoulou 等^[35]为探究腐败微生物对无菌猪肉挥发性化合物在贮藏期间的变化,采用顶空—固相微萃取—气相色谱—质谱(HS-SPME-GC-MS)分析,发现变质样品中挥发性物质主要为醇类、酮类、乙酸丁酯和乙酸乙酯,而新鲜样品中挥发性物质主要为二甲基硫、呋喃、乙酯和乳酸乙酯。通过指纹图谱比对,可判断猪肉处于贮藏期的具体阶段。Li 等^[36]应用气相色谱—质谱联用(GC-MS)法对腊肉冷藏期间挥发性成分进行测定,并应用电子鼻对主成分进行分析。经测定共检出 56 种挥发性有机物,将其绘制成不同贮藏期的气味指纹图谱。使用不同贮藏时间的指纹图谱可以很好地识别和区分贮藏期超过 15 d 的样品。周慧

敏等^[37]采用吹扫捕集—热脱附—气相色谱—嗅闻—质谱联用技术,结合指纹图谱技术研究了黑白胡椒腊肠贮藏期的气味活性化合物的演变规律,并建立了评价货架期风味劣变和货架期预测的方法。Schuster 等^[38]研究了不同瘦肉、脂肪组织和骨骼比例对真空包装羔羊在 2 ℃贮藏 15 d 的挥发性有机化合物(VOC)。应用气味指纹图谱技术,采用质子转移—反应质谱(PTR-MS)和互补固相微萃取—气相色谱—质谱(SPME-GC-MS)对部分样品进行检测,发现微生物数量的增加会导致不同挥发性有机化合物的产生,包括醇、醛、酮、酸和含硫化合物。说明利用气味指纹图谱技术可以表征肉类产品贮藏期。

2.4 在肉类产品质量管理上的应用

中国牛肉、羊肉、马肉等价格要远高于猪肉、鸡肉、鸭肉等,在利益的驱动下,一些不法商家在肉类产品中掺假的现象屡见不鲜,严重侵害了消费者的权益^[39]。应用气味指纹图谱技术可以进行掺假辨别。此外,不同的陈化时间会影响肉类产品的品质,尤其是一些传统发酵制品。随着陈化时间的延长,产品的品质与风味都有较大提升。应用气味指纹图谱技术可以通过挥发性成分的测定来鉴定不同的陈化时间,进而对肉类产品进行品级分类。表 4 列举了相关气味指纹图谱技术在肉类产品质量管理上的应用。

此外,气味指纹图谱技术也可应用于营养代谢与风味协同调控研究中。如辨别与揭示各种类型肉类产品中是否具有致敏潜力的植物蛋白^[45];表征肉类产品贮藏过程中挥发性化合物和代谢途径的特征^[46];探究降低脂肪

表 3 气味指纹图谱技术在肉类产品工艺控制上的应用

Table 3 Application of odor fingerprinting technology in process control of meat products

类别	研究内容	检测方法	主要结论	参考文献
辅料添加	分析评价盐含量对干腌猪肉风味成分的影响	电子舌、HS-GC-IMS	在含盐量为 3%,5% 的干腌猪肉中,化合物含量和口感指标最高	[26]
	探究混合香辛料组和不同添加量花椒组对哈尔滨风干肠中挥发性风味的影响	同时蒸馏萃取法、GC-MS	混合香辛料组能够获得更好的风味	[27]
	分析不同来源鱼香肉丝调味料的挥发性风味物质	E-nose	不同的辅料添加影响产品风味	[28]
加工工艺	分别对熏肉的整体风味特征和挥发性风味成分(VFCs)进行感官评价	E-nose、HS-GC-IMS	超声波是通过提高培根中壬醛、庚醛、辛醛、3-甲基丁醛、乙酸正己酯和乙酸正丙酯含量,改善非烟熏培根的风味特征	[29]
	对二次接种发酵腊肉的挥发性风味成分进行检测分析	SPME-GC-MS 结合 ROAV	接种复合发酵剂能显著增加腊肉挥发性风味物质的种类和含量	[30]
	测定干猪肉片不同加工阶段的挥发性有机物	GC-IMS	可以有效区分产品的不同加工阶段	[31]
	探究冬虫夏草鸡汤中挥发性风味成分	GC-MS、GC × GC 联合 ToF-MS 和 GC-IMS	酶解处理可以有效提高挥发性风味成分	[32]

表 4 气味指纹图谱技术在肉类产品质量管理上的应用

Table 4 Application of odor fingerprinting technology in quality control of meat products

类别	研究内容	检测方法	主要结论	参考文献
掺假辨别	对烤羊肉中掺入不同比例鸭肉的挥发性成分进行测定	E-nose、HS-SPME-GC-MS	1-辛醇、1-戊醇、己醛、乙酸和十二烷是辨别掺入鸭肉比例的特征挥发性物质	[40]
	对羊肉中掺加不同比例的猪肉、鸡肉的挥发性成分进行测定	GC-IMS	该技术可以有效辨别与区分羊肉中掺假样品	[41]
	研究饲喂橡子、草、饲料的伊比利亚猪制得火腿的挥发性成分	GC-IMS	该技术可以被用于伊比利亚火腿的分类,避免火腿标签的欺诈行为	[42]
品级分类	对 1,2,3 年的金华火腿进行挥发性成分测定	GC-IMS	该技术可以有效辨别不同陈化时间的金华火腿	[43]
	对 1,2,3 年的干腌火腿进行挥发性成分测定	GC-IMS	消除无关特征和多重共线性特征后,可以有效辨别不同陈化时间的干腌火腿	[44]

含量^[47]、降低钠盐含量^[48]、以植物基部分替代原料肉^[49-51]等改变肉类产品原料组成所带来的风味变化。

3 气味指纹图谱技术在肉类产品应用中的研究方向

3.1 改进提取肉类产品挥发性物质的方法

采用不同的挥发性物质提取手段会得到不同的试验结果。即使是同一种肉类产品,不同的萃取手段也会影响预处理结果^[52]。如何最大限度地收集并保留检测物质是保证气味指纹分析能够准确检测的前提。因此,继续探索新型提取方法,制定不同肉类产品的前处理标准,是今后气味指纹图谱技术在肉类产品应用中的研究方向。

3.2 健全不同加工工艺处理下的气味指纹数据库

肉类产品在加工过程中的变化因素较多,对挥发性风味物质的变化影响较大,为气味指纹图谱数据库的建立提出了挑战。如发酵处理中微生物的作用、发酵工艺与贮藏时间的改变等,均影响挥发性风味物质的种类与数量。因此,对不同加工工艺处理的肉类产品进行系统划分、制定相关工艺标准以及全面建立指纹数据库,是气味指纹图谱技术在肉类产品风味领域的研究方向。

3.3 采用多种方法共同表征肉类产品溯源与品种鉴定

气味指纹图谱技术可以根据肉类产品中收集到的挥发性成分信息来进行溯源与品种鉴定。但要准确辨别产品品质及其溯源还应结合其他分析手段^[45]。中国气味指纹图谱技术正处于发展初期阶段,得到的结果与真实情况仍会有一定的差异。因此,采用多种方法共同表征肉类产品溯源与品种鉴定,是气味指纹图谱技术在肉类产品溯源、品种鉴定与风味研究相结合的研究方向。

3.4 结合多种数据处理方法对数据进行分析

气味指纹图谱技术应用仪器检测设备得到的数据偏多,如何找到重要信息是关键。数据处理方法较多,如何选择合适的数据分析方法是难点。目前应用于肉类产品

挥发性成分研究中的方法大多是采用主成分分析和聚类分析。仅使用一种方法有时并不能较好地对数据进行分类,还需结合其他数据处理方法如偏最小二乘法、线性辨别分析、模糊信息分析法和人工神经网络法等。因此,探究与改进数据处理与分析方法、结合多种数据处理方法对数据进行分析,也是今后气味指纹图谱技术在肉类产品应用中的研究方向。有关不同数据分析方法在肉类产品中的应用还需要更多专业学者的深入研究。

4 结论与展望

气味指纹图谱技术在肉类产品溯源与品种鉴定、工艺控制、贮藏期表征、质量管理等领域均有应用。与传统通过感官评价来评判风味的方法相比,气味指纹图谱技术具有更科学、更准确等优势。但该技术目前并不成熟,还需要改进与规范在肉类产品挥发性风味物质中的提取方法、健全气味指纹数据库、结合其他方法如矿物元素分析、DNA 技术和红外光谱等技术手段共同表征肉类产品的来源与品质,结合多种数据处理方法对关键挥发性成分进行数据分析,达到在不损坏肉类产品品质的基础上对产品品质进行准确评价。

参考文献

[1] 李月明, 刘飞, 姜雪晶, 等. 生物可降解膜在肉品保鲜中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2017, 31(6): 51-54.
LI Yue-ming, LIU Fei, JIANG Xue-jing, et al. Application of anti-bacterial slow-release biodegradable film in meat preservation: A review[J]. Meat Research, 2017, 31(6): 51-54.
[2] RAHMAN U U, SAHAR A, ISHAQ A, et al. Advanced meat preservation methods: A mini review[J]. Journal of Food Safety, 2018, 38(4): e12467.
[3] 肖智超, 葛长荣, 周光宏, 等. 肉的风味物质及其检测技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(4): 325-330.
XIAO Zhi-chao, GE Chang-rong, ZHOU Guang-hong, et al.

- Research progress on meat flavor substance and detecting technique[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(4): 325-330.
- [4] 刘树萍, 方伟佳. 气味指纹图谱技术在肉制品品质检测中的应用[J]. 中国调味品, 2019, 44(1): 147-149, 153.
- LIU Shu-ping, FANG Wei-jia. Application of odor fingerprint technology in quality detection of meat products[J]. China Condiment, 2019, 44(1): 147-149, 153.
- [5] LIAO Y M, HUANG X J, WANG Z Z, et al. Research progress in the application of magnetic solid phase extraction based on carbon based magnetic materials in food analysis[J]. Chinese Journal of Chromatography, 2021, 39(4): 368.
- [6] 裴正钰, 张香美, 卢涵, 等. 风味分析技术在发酵肉制品中的应用研究进展[J]. 食品科技, 2021, 46(2): 91-96.
- PEI Zheng-yu, ZHANG Xiang-mei, LU Han, et al. Application of flavor analysis technology in fermented meat products[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(2): 91-96.
- [7] 吴昊, 田燕华, 郭平平. 多元统计学在参麦注射液指纹图谱中的应用[J]. 中成药, 2002(1): 5-8.
- WU Hao, TIAN Yan-hua, GUO Ping-ping. Application of multivariate statistics analysis in HPLC fingerprint of shenmai injection[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2002(1): 5-8.
- [8] 姚文生, 马双玉, 蔡莹喧, 等. 基于气相—离子迁移谱技术分析烤羊肉串的挥发性风味成分[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 256-263.
- YAO Wen-sheng, MA Shuang-yu, CAI Ying-xuan, et al. Analysis of volatile flavor substances in mutton shashlik based on GC-IMS technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 256-263.
- [9] MU H, DU P, BAI S, et al. Application of fuzzy mathematics method in sensory evaluation of military ready-to-eat meat sticks[C]// International Conference on Man-Machine-Environment System Engineering. Springer: [s.n.], 2021: 80-87.
- [10] GUO L, WANG T, WU Z, et al. Portable food-freshness prediction platform based on colorimetric barcode combinatorics and deep convolutional neural networks[J]. Advanced Materials, 2020, 32(45): 2004805.
- [11] 刘登勇. 气味指纹技术的建立及其在腌腊肉制品中的应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2008: 41-43.
- LIU Deng-yong. Establishment of odor fingerprint technology and its application in dry-cured meat products[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008: 41-43.
- [12] WANG Q, LIU H, BAI Y, et al. Research progress on mutton origin tracing and authenticity [J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131387.
- [13] LOLLI V, ZANARDI E, MOLONEY A P, et al. An overview on cyclic fatty acids as biomarkers of quality and authenticity in the meat sector[J]. Foods, 2020, 9(12): 1756.
- [14] SAJALI N, WONG S C, BAKAR S A, et al. Analytical approaches of meat authentication in food[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(4): 1 535-1 543.
- [15] BAI Y, LIU H, ZHANG B, et al. Research progress on traceability and authenticity of beef[J]. Food Reviews International, 2021, DOI: 10.1080/87559129.2021.1936000.
- [16] CAPITAIN C, WELLER P. Non-targeted screening approaches for profiling of volatile organic compounds based on gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) and machine learning[J]. Molecules, 2021, 26(18): 5457.
- [17] 陈通, 吴志远, 王正云, 等. 基于气相离子迁移谱和化学计量学方法判别肉的种类[J]. 中国食品学报, 2019, 19(7): 221-226.
- CHEN Tong, WU Zhi-yuan, WANG Zheng-yun, et al. Identification of meat species by gas chromatography-ion mobility spectrometry and chemometrics[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(7): 221-226.
- [18] ECHEGARAY N, DOMÍNGUEZ R, BODAS R, et al. Characterization of volatile profile of longissimus thoracis et lumborum muscle from Castellana and INRA 401 lambs reared under commercial conditions [J]. Small Ruminant Research, 2021, 200: 106396.
- [19] GRABEŽ V, BJELANOVIC M, ROHLOFF J, et al. The relationship between volatile compounds, metabolites and sensory attributes: A case study using lamb and sheep meat[J]. Small Ruminant Research, 2019, 181: 12-20.
- [20] ZHAN P, TIAN H L, SUN B G, et al. Quality control of mutton by using volatile compound fingerprinting techniques and chemometric methods[J]. Journal of Food Quality, 2017, 2: 1-8.
- [21] LI W Q, CHEN Y P, BLANK I, et al. GC×GC-ToF-MS and GC-IMS based volatile profile characterization of the Chinese dry-cured hams from different regions[J]. Food Research International, 2021, 142: 110222.
- [22] YANG J, PAN J, ZHU S, et al. Application of pca and slda methods for the classification and differentiation of cooked pork from chinese indigenous pig breeds and a hybrid pig breed[J]. International Journal of Food Properties, 2014, 17(7): 1 518-1 528.
- [23] 王宁宁, 冯美琴, 孙健. 低钠复合盐对发酵香肠理化特性及风味的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 1-7.
- WANG Ning-ning, FENG Mei-qin, SUN Jian. Effect of low-sodium salt mixture on physicochemical properties and flavor of fermented sausages[J]. Food Science, 2021, 42(16): 1-7.
- [24] 刘萍, 贾欣怡, 祁兴普, 等. 基于风味指纹谱的肉脯加工阶段判别[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(7): 232-237.
- LIU Ping, JIA Xin-yi, QI Xing-pu, et al. Discrimination analysis of dried pork slice processing stages based on flavor fingerprints[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(7): 232-237.
- [25] 姚敏, 谢国芳, 杨蓉, 等. 红烧肉制备过程中关键环节的风味化合物分析[J]. 食品与机械, 2022, 38(1): 15-23, 43.
- YAO Min, XIE Guo-fang, YANG Rong, et al. Analysis of flavor compounds in the process of stewed pork at key stages[J]. Food & Machinery, 2022, 38(1): 15-23, 43.
- [26] TIAN X, LI Z J, CHAO Y Z, et al. Evaluation by electronic tongue and headspace-GC-IMS analyses of the flavor compounds in dry-

- cured pork with different salt content[J]. Food Research International, 2020, 137: 109456.
- [27] 张根生, 程健博, 岳晓霞, 等. 花椒对哈尔滨风干肠菌系及其菌系对风味的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(8): 184-190.
ZHANG Gen-sheng, CHENG Jian-bo, YUE Xiao-xia, et al. Chinese prickly ash affects the microflora of Harbin air-dried sausage and therefore its flavor [J]. Food Science, 2017, 38(8): 184-190.
- [28] 袁灿, 何莲, 胡金祥, 等. 基于电子舌和电子鼻结合氨基酸分析鱼香肉丝调料风味的差异[J]. 食品工业科技, 2022, 43(9): 48-55.
YUAN Can, HE Lian, HU Jin-xiang, et al. The flavour difference of yu-shiang shredded pork revealed by electronic nose, electronic tongue and automatic amino acid analyzer[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9): 48-55.
- [29] ZHANG J, ZHANG W, 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.
- [30] 毛永强, 负建民, 赵风云, 等. 二次接种时间对腊肉挥发性风味的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(2): 285-293.
MAO Yong-qiang, YU Jian-min, ZHAO Feng-yun, et al. Effect of twice inoculation time on the volatile flavor of bacon[J]. Food Science, 2022, 43(2): 285-293.
- [31] CHEN M J, CHEN T, QI X P, et al. Analyzing changes of volatile components in dried pork slice by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. CyTA-Journal of Food, 2020, 18(1): 328-335.
- [32] ZENG X F, LIU J L, DONG H, et al. Variations of volatile flavour compounds in Cordyceps militaris chicken soup after enzymolysis pretreatment by SPME combined with GC-MS, GC×GC-TOF MS and GC-IMS[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(2): 509-516.
- [33] XU M M, KAUR M, PILLIDGE C J, et al. Evaluation of the potential of protective cultures to extend the microbial shelf-life of chilled lamb meat[J]. Meat Science, 2021, 181: 108613.
- [34] ARGYRI A A, MALLOUCHOS A, PANAGOUE E Z, et al. The dynamics of the HS/SPME-GC/MS as a tool to assess the spoilage of minced beef stored under different packaging and temperature conditions[J]. International Journal of Food Microbiology, 2015, 193: 51-58.
- [35] PAPADOPOULOU O S, ILIOPOULOS V, MALLOUCHOS A, et al. Spoilage potential of *Pseudomonas* (*P. fragi*, *P. putida*) and *LAB* (*Leuconostoc mesenteroides*, *Lactobacillus sakei*) strains and their volatilome profile during storage of sterile pork meat using GC/MS and data analytics[J]. Foods, 2020, 9(5): 633.
- [36] LI X, ZHU J, LI C, et al. Evolution of volatile compounds and spoilage bacteria in smoked bacon during refrigeration using an E-nose and GC-MS combined with partial least squares regression[J]. Molecules, 2018, 23(12): 3286.
- [37] 周慧敏, 赵冰, 吴倩蓉, 等. 黑白胡椒腊肠贮藏期中气味活性物质演变及异味分析[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 162-171.
ZHOU Hui-min, ZHAO Bing, WU Qian-rong, et al. Changes in odor-active compounds and analysis of off-flavor compounds in chinese sausage added with black and white pepper during storage[J]. Food Science, 2020, 41(24): 162-171.
- [38] SCHUSTER L, FRANKE C, SILCOCK P, et al. Development of a novel sample reuse approach to measure the impact of lean meat, bone and adipose tissue on the development of volatiles in vacuum-packed chilled lamb stored at 2 °C for 15 days[J]. Meat Science, 2018, 145: 31-39.
- [39] 倪雪, 张根生, 谢春丽, 等. 肉糜产品中掺杂低档肉类检验技术研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 211-216.
NI Xue, ZHANG Gen-sheng, XIE Chun-li, et al. Research progress on the inspection technology of low grade meat adulterated in ground meat products [J]. Food & Machinery, 2019, 35(11): 211-216.
- [40] 王永端, 柏霜, 罗瑞明, 等. 基于电子鼻、GC-MS 结合化学计量学方法鉴别烤羊肉掺假[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 291-298.
WANG Yong-rui, BAI Shuang, LUO Rui-ming, et al. Identification of adulteration of roast mutton based on electronic nose, GC-MS combined with chemometric methods[J]. Food Science, 2022, 43(4): 291-298.
- [41] 孟新涛, 张婷, 许铭强, 等. 基于气相离子迁移谱的羊肉掺伪快速鉴别方法[J]. 新疆农业科学, 2019, 56(10): 1 939-1 947.
MENG Xin-tao, ZHANG Ting, XU Ming-qiang, et al. Detection of authenticity of mutton with gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2019, 56(10): 1 939-1 947.
- [42] ARROYO-MANZANARES N, MARTÍN-GÓMEZ A, JURADO-CAMPOS N, et al. Target vs spectral fingerprint data analysis of Iberian ham samples for avoiding labelling fraud using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food Chemistry, 2018, 246: 65-73.
- [43] LIU D Y, BAI L, FENG X, et al. Characterization of Jinhua ham aroma profiles in specific to aging time by gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. Meat Science, 2020, 168: 108178.
- [44] QIAN K, BAO Y, ZHU J, et al. Development of a portable electronic nose based on a hybrid filter-wrapper method for identifying the Chinese dry-cured ham of different grades[J]. Journal of Food Engineering, 2021, 290: 110250.
- [45] VALLETTA M, RAGUCCI S, LANDI N, et al. Mass spectrometry-based protein and peptide profiling for food frauds, traceability and authenticity assessment[J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130456.
- [46] LI H H, GENG W H, HARUNA S A, et al. Identification of characteristic volatiles and metabolomic pathway during pork storage using HS-SPME-GC/MS coupled with multivariate analysis [J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131431.

(下转第 225 页)

- [66] 边亮, 陈华国, 周欣. 植物多糖的抗肿瘤活性研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 275-282.
- BIAN Liang, CHEN Hua-guo, ZHOU Xin. Advances in antitumor activity of plant polysaccharides[J]. Food Science, 2020, 41(7): 275-282.
- [67] 车加祥, 邵淑丽, 徐君懿, 等. 仙人掌多糖对人肺癌 A549 细胞形态结构的影响[J]. 高师理科学刊, 2014, 34(5): 68-70.
- CHE Jia-xiang, SHAO Shu-li, XU Jun-yi, et al. Effects of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide on cell morphology and structure of human lung cancer A549 cells[J]. Journal of Science of Normal University, 2014, 34(5): 68-70.
- [68] 孙超, 蔡文泳, 王一伊, 等. 仙人掌多糖对胃癌 SCG-7901 和大肠癌 Lovo 细胞生长抑制作用的研究[J]. 医学研究杂志, 2010, 39(7): 59-60.
- SUN Chao, CAI Wen-yong, WANG Yi-yi, et al. Study on the inhibitory effect of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide on the growth of GASTRIC cancer SCG-7901 and colorectal cancer Lovo cells[J]. Journal of Medical Research, 2010, 39(7): 59-60.
- [69] 李涛, 孙超, 许晶, 等. 墨西哥仙人掌多糖对人乳腺癌 MCF-7 细胞生长抑制作用的研究[J]. 中国医药导报, 2011, 30(8): 15-17.
- LI Tao, SUN Chao, XU Jing, et al. Effects of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide on the growth of human breast cancer MCF-7 cells[J]. China Medical Herald, 2011, 30(8): 15-17.
- [70] 吴迪, 魏斌, 王双, 等. 野生仙人掌多糖对肺鳞癌细胞 SK-MES-1 生长的抑制作用[J]. 现代生物医学进展, 2012, 12(9): 1 651-1 654.
- WU Di, WEI Bin, WANG Shuang, et al. Effects of wild *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide on the growth of lung squamous cell carcinoma SK-Mes-1[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2012, 12(9): 1 651-1 654.
- [71] 袁海娜. 仙人掌及其多糖对几种食品污染菌的抑菌作用[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(8): 10-13.
- YUAN Hai-na. Bacteriostasis of *Opuntia dillenii* Haw. and its polysaccharides against several food-contaminated bacteria[J]. Food Research and Development, 2012, 33(8): 10-13.
- [72] 戴小华, 吕乐, 刘欢欢. 仙人掌多糖抗炎镇痛作用研究[J]. 畜牧与兽医, 2012, 44(S1): 286-287.
- DAI Xiao-hua, LU Le, LIU Huan-huan. Study on anti-inflammatory and analgesic effects of polysaccharide from cacti[J]. Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2012, 44(S1): 286-287.
- [73] WANG Yan, CHEN Qun, WENG Rui, et al. Pharmacological action and research progress of traditional Chinese medicine on liver injury[J]. Medicinal Plant, 2020(4): 85-87.
- [74] 喻宁华. 仙人掌多糖对小鼠急性肝损伤的保护作用[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2007: 14-17.
- YU Ning-hua. Protective effect of cactus polysaccharide on acute liver injury in mice[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007: 14-17.
- [75] 王海涛, 何聪芬, 董银卯, 等. 米邦塔仙人掌多糖对 SDS 致细胞膜和 DNA 损伤的保护作用[J]. 食品科学, 2010, 31(11): 226-230.
- WANG Hai-tao, HE Cong-fen, DONG Yin-mao, et al. Protective effects of cacti mibonta polysaccharide on cell membrane and DNA damage induced by SDS[J]. Food Science, 2010, 31(11): 226-230.
- [76] 杨钧勇, 李祖铭, 余玲, 等. 米帮塔仙人掌多糖对小鼠慢性应激认知功能损伤的改善作用及机制探讨[J]. 神经损伤与功能重建, 2017, 12(5): 385-387.
- YANG Jun-yong, LI Zu-ming, YU Ling, et al. Effects of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide on cognitive impairment in mice under chronic stress and its mechanism [J]. Neural Injury and Functional Reconstruction, 2017, 12(5): 385-387.
- [77] 唐焜, 谢小慧, 陈志达, 等. 仙人掌多糖对大鼠局灶性脑缺血的神经保护作用[J]. 医药导报, 2012, 31(9): 1 109-1 112.
- TANG Kun, XIE Xiao-hui, CHEN Zhi-da, et al. Neuroprotective effects of *Opuntia dillenii* Haw. polysaccharide on focal cerebral ischemia in rats[J]. Chinese Journal of Medicine, 2012, 31(9): 1 109-1 112.
- [78] 陈扬. 米邦塔仙人掌多糖提取鉴定及对缺血性脑损伤的保护作用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012: 53-71.
- CHEN Yang. Extraction and identification of polysaccharide from cacti mibonta and its protective effect on ischemic brain injury[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012: 53-71.

(上接第 215 页)

- [47] TEIXEIRA A, FERREIRA I, PEREIRA E, et al. Physicochemical composition and sensory quality of goat meat burgers effect of fat source[J]. Foods, 2021, 10(8): 1 824.
- [48] RIOS-MERA J D, SALDAÑA E, CRUZADO-BRAVO M L M, et al. Reducing the sodium content without modifying the quality of beef burgers by adding micronized salt[J]. Food Research International, 2019, 121: 288-295.
- [49] KUSTAR A, PATINO-ECHEVERRI D. A review of environmental life cycle assessments of diets: Plant-based solutions are truly sustainable, even in the form of fast foods[J]. Sustainability, 2021, 13(17): 9 926.
- [50] HE J, EVANS N M, LIU H Z, et al. A review of research on plant-based meat alternatives: Driving forces, history, manufacturing, and consumer attitudes [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(5): 2 639-2 656.
- [51] HE J, LIU H Z, BALAMURUGAN S, et al. Fatty acids and volatile flavor compounds in commercial plant-based burgers[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(2): 293-305.
- [52] LOU W S. Recent trends in the chromatographic analysis of volatile flavor and fragrance compounds: Annual review 2020[J]. Analytical Science Advances, 2021, 2(3/4): 157-170.