

肉类风味物质检测技术研究进展

杜春林^{1,2}, 赵春萍^{1,2}, 谭 娅^{1,2,*}

(1.贵州省畜牧兽医研究所, 贵州 贵阳 550005; 2.贵州省地方猪保护与繁育工程研究中心, 贵州 贵阳 550005)

摘 要: 肉类的风味是一个重要的感官参数, 主要决定肉的感官特性。肉类风味是影响肉类滋味和消费者接受度的重要因素。过去, 风味物质的检测常使用嗅觉分析人员, 近年来, 肉类风味物质的检测技术研究取得了显著进展。一种常用的检测技术是化学分析, 包括高效液相色谱法和气相色谱法, 这些技术可以精确地测定肉类中风味物质的种类和含量。此外, 质谱技术的发展也为肉类风味物质的分析提供了新的方法和工具, 目前常将2种方法结合运用。另一种常用的方法是核磁共振, 其在检测风味物质中具有非破坏性、高分辨率、多参数分析等优点。总之, 色谱-质谱联用技术和核磁共振技术是目前常用的肉类风味物质检测技术, 本文总结了它们的原理和优缺点, 旨在为肉类风味物质的研究提供一定的理论依据。

关键词: 风味物质; 感官评价; 核磁共振; 色谱-质谱联用; 电子鼻

Research Progress on Analytical Techniques for Detection of Meat Flavor Substances

DU Chunlin^{1,2}, ZHAO Chunping^{1,2}, TAN Ya^{1,2,*}

(1.Guizhou Institute of Animal Husbandry and Veterinary, Guiyang 550005, China;

2.Guizhou Local Pig Protection and Breeding Engineering Research Center, Guiyang 550005, China)

Abstract: Meat flavor is an important sensory parameter which mainly determines the sensory characteristics of meat, and also an important factor affecting meat taste and consumer acceptance. In the past, flavor substances were often detected by olfactory analysts. In recent years, significant progress has been made in developing analytical techniques for the detection of meat flavor substances. The commonly used techniques are chemical analysis, including high performance liquid chromatography and gas chromatography, which can accurately determine the types and contents of flavor substances in meat. In addition, the development of mass spectrometry provides new methods and tools for the analysis of meat flavor substances. At present, the two methods are often combined for use. Another commonly used method is nuclear magnetic resonance, which has the advantages of non-destructive, high resolution, and multi-parameter analysis in the detection of flavor substances. In summary, chromatography-mass spectrometry and nuclear magnetic resonance are commonly used techniques for meat flavor detection. This paper summarizes their principles, advantages and disadvantages in order to provides a theoretical basis for the study of meat flavor substances.

Keywords: flavor compounds; sensory evaluation; nuclear magnetic resonance; chromatography-mass spectrometry; electronic nose

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230517-047

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2023) 08-0046-06

引文格式:

杜春林, 赵春萍, 谭娅. 肉类风味物质检测技术研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(8): 46-51. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230517-047. <http://www.rlyj.net.cn>

DU Chunlin, ZHAO Chunping, TAN Ya. Research progress on analytical techniques for detection of meat flavor substances[J]. Meat Research, 2023, 37(8): 46-51. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20230517-047. <http://www.rlyj.net.cn>

收稿日期: 2023-05-17

基金项目: 黔农科青年基金[2023]03号项目

第一作者简介: 杜春林 (1987—) (ORCID: 0000-0002-3807-6508), 男, 硕士研究生, 研究方向为生猪健康养殖。

E-mail: 1096806813@qq.com

*通信作者简介: 谭娅 (1989—) (ORCID: 0000-0003-2128-2396), 女, 副研究员, 博士, 研究方向为猪肉品质性状分子育种。

E-mail: Tanya_Lee@126.com

风味是动物产品非常重要的感官特性。随着生活水平的提高,人们对动物产品的要求不断提高。表面颜色、触感及风味等是人们在选择动物产品时可通过感官获得的第一信息,在食品质量评价中占据重要地位^[1]。其中,风味是动物产品非常重要的感官特性,主要包括香味和味道,香味的产生主要源于食物中的挥发性风味物质(如挥发性脂肪酸等),脂质反应和美拉德反应是其产生的主要途径^[2-3];味道源于食物中多种有机物质(如氨基酸和核糖等物质)^[4-5]。食品感官评价最初是通过人口、鼻、舌等器官完成,如通过培训较为专业感官接触的小组评定食物间的细微差异或者直接通过消费者群体对肉类进行评定,多次重复后以获得科学的结果。随着食品加工业和科技的发展,感官评价逐渐趋于专业化^[6],出现了更为灵敏和客观的检测方式,如色谱-质谱联用、核磁共振及电子鼻等技术,这些技术在肉类风味物质检测中的优缺点如表1所示。本文综述目前检测肉类风味的主要技术,相较于之前发表的此类综述,本文聚焦于色谱-质谱联用技术、核磁共振技术及电子鼻技术,总结其最新研究进展及应用,为肉类风味物质的研究提供一定的理论依据。

1 色谱-质谱联用技术在肉类检测中的应用

色谱-质谱联用技术常被用于研究小分子代谢物以及外部刺激、病理生理变化和生物遗传突变引起的上述物质的组成和数量变化^[7]。色谱-质谱联用技术可通过分析生物液和组织确定系统生化图谱和整个生物体的功能调节^[8]。当前,色谱-质谱联用技术被广泛应用于对风味前体物质的检测。

1.1 超高效液相色谱-质谱

超高效液相色谱-质谱是21世纪初发展起来的分析技术,它是结合了液相色谱的高效分离能力和质谱的高灵

敏度的分离检测技术,具有应用广泛、分离能力强、灵敏度高、分析速度快和自动化程度高等特点,也存在仪器复杂性高、样品处理复杂、数据处理复杂及重复性较低等不足,其主要原理可分为4部分:样品制备、超高效液相色谱分离、质谱检测 and 数据分析。与其他检测方法不同之处主要表现在超高效液相色谱分离,其色谱柱内填充有高效液相固定相^[9-10]。在肉类风味前体物质的检测中,超高效液相色谱-质谱常用于对游离氨基酸和挥发性脂肪酸的检测。在牛肉风干过程中,不同的风干方式可造成风味相关物质的不同。利用超高效液相色谱-质谱,有学者发现常规成熟方法挥发性物质含量较高^[11]。同样是利用超高效液相色谱-质谱的方法研究牛肉,Setyabrata等^[12]还发现成熟牛肉中含有更多的短链多肽,但多不饱和脂肪酸和游离脂肪酸较少。通过超高效液相色谱-质谱技术对烤制肉类及腌制肉类进行检测^[13],发现其中杂环胺物质主要通过肌酸、氨基酸和糖混合加热产生,具有多种危害^[14],同时杂环胺常影响肉制品的风味。据此,Hsu等^[15]研究得出,在烘烤过程加入迷迭香香料可显著抑制杂环胺的形成。

1.2 顶空微萃取-气相色谱-质谱

顶空微萃取-气相色谱-质谱法是分析风味物质的常用方法之一,其原理是采用顶空的进样方式,通过加热使风味挥发性物质从样品中分裂,具有样品制备简单、灵敏度高等优点,但也存在样品处理复杂、分辨率低、仪器成本高、样品存在损失及非常规样品难处理等不足。顶空微萃取-气相色谱-质谱法可分为顶空液相微萃取和顶空固相微萃取2种^[16-19]。在肉类风味物质的检测中,顶空微萃取-气相色谱-质谱法运用广泛。Zhen Zongyuan等^[20]采集鸭肉中3种不同部位(胸部、腿部和翅膀),利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法提取了挥发性风味物质并进行测定,共检出81种挥发性物质,包括15种碳氢化合物、10种醇、7种酸、12种醛、4种酯、19种含硫和

表1 不同挥发性物质检测方法的原理及其优缺点

Table 1 Principles, advantages and disadvantages of different methods for detecting volatile substances

名称	出现年份	优点	缺点	原理
色谱技术	1950	高灵敏度、高选择性、高分辨率、快速分析	设备昂贵、样品准备复杂、操作复杂	基于物质在固定相(如填充柱或固定液相)和流动相中的分配行为
质谱技术	1950	高灵敏度、高选择性、提供结构信息、多组分分析	设备昂贵、样品准备复杂、操作难度大	基于将样品中的分子或离子离子化并加速,然后将它们按 m/z 分离并检测
核磁共振	1940	非破坏性、高分辨率、提供结构信息、定量分析	设备成本高、样品制备复杂、操作复杂、检测时间较长	基于原子核在外加磁场中的共振现象,通过对核自旋状态的探测和分析来获取样品信息
电子鼻技术	1980	快速分析、多组分分析、便携性、可重复性	选择性相对较低、进一步分析有限、易受环境干扰、对模型训练依赖性	由气体传感器、数据处理单元和模式识别算法组成,通过将化学信号转化为物理信号,进而使用电脑处理
红外光谱	1920	非破坏性、高效快速、多功能、非选择性	灵敏性低、数据重复性低、易受环境干扰	利用傅里叶变换将样品的红外光信号转化为频谱图,并通过对比标准库中的光谱图鉴定样品中的物质成分
荧光光谱	1910	高灵敏度、快速便捷、选择性、非破坏性	易受干扰、标准库建立复杂、仪器和操作复杂	通过测量样品在不同激发波长下发出的荧光强度和峰位,推断样品的成分和特性
电化学分析技术	1910	高灵敏度、高选择性、实时监测	仪器复杂、探测电极的选择复杂、干扰物难以处理	基于物质在电场或电流下的电化学反应进行分析
表面增强拉曼光谱	1970	高灵敏度、高选择性、快速便捷、非破坏性	表面增强剂的选择和制备、信号干扰、校准和标准库建立复杂	拉曼散射原理,通过在纳米金属表面或其他表面增强剂上定向吸附或吸附肉类风味物质来增强其拉曼散射信号

含氮化合物以及14种其他化合物。Zhang Xue等^[21]利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术探究不同饲养方式对藏羊肌肉代谢的影响,研究表明,畜舍饲养组的肉营养品质(包括蛋白质和脂肪含量)和食用品质(包括嫩度、持水力、口感和风味)均优于传统放牧组。在畜舍饲养组中,上调的代谢物和代谢途径以必需氨基酸和氨基酸代谢为主,下调的代谢物和代谢途径以多不饱和脂肪酸和脂质代谢为主。王珺等^[22]对兔4个部位的风味物质进行定性和半定量分析,发现兔肉主体风味物质为醛类、酮类、醇类及烃类化合物。同时,顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术还用于揭示板鸭微生物和风味物质的联系^[23]。除此之外,该技术还可用于检测由土豆素和2-甲基异龙脑等所引起的鱼肉中的异味以及评估不同温度对冷冻牛肉代谢物的影响^[24]。

1.3 全二维气相色谱-飞行时间质谱联用

全二维气相色谱是20世纪90年代发展起来的技术,相较于传统气相色谱技术,其具有更高的灵敏度、选择性和峰容量,同时它的另一个优势是同系物系列(如直链烷烃、脂肪酸甲酯等)的有序洗脱模式^[25],但是同样存在仪器复杂、成本高、样品处理要求严格和数据分析难度大等缺点。全二维气相色谱-飞行时间质谱联用技术是2根不同性质的气相色谱柱由两级环形调制器串联的,样品经过一维柱分离后,再以周期脉冲方式进样至二维柱对样品进行再次分离^[26-29]。全二维气相色谱依靠飞行时间质谱适合分析复杂的物质,其具有全范围质谱学的高采集率^[30]。

基于全二维气相色谱-飞行时间质谱联用技术的众多优势,其也被用于肉类风味前体物质的检测。氨基酸和还原性碳水化合物之间的美拉德反应是导致肉类产生各种气味和味觉的重要反应之一,其有助于肉类在烹调过程被赋予更多的风味和味道。采用气相色谱-飞行时间质谱和感官评价相结合的非目标分析方法以及结合最小二乘回归分析, Lee等^[31]发现,2-甲基呋喃-3-硫醇、3-磺基戊烷-2-酮等可能对牛肉中美拉德反应产生的风味有关键贡献。Li Wenqian等^[32]基于全二维气相色谱-飞行时间质谱联用技术对生、熟驴肉的风味物质进行检测,鉴定出 γ -氨基丁酸和丁烷-1,2,3,4-四醇等9种潜在物质可区分生驴肉和熟驴肉。除此之外,全二维气相色谱-飞行时间质谱联用技术还可用于分析不同组织部位风味优劣和分割与否对肉风味的影响。同时,基于此技术还可对肉类加工产品,如干腌火腿等的风味物质进行分析,以发现不同地区间火腿的差异^[33-34]。

1.4 气相色谱-离子迁移谱

气相色谱-离子迁移谱技术在19世纪中叶发现和创新,20世纪90年代得到了蓬勃发展^[35],其根据物质迁移时间进行定性,根据所形成的峰值和峰面积对物

质定量,具有检测时间短、结果可靠及灵敏度高等优点,同时具有设备成本高、操作困难和样品需要预处理等缺点^[36]。其基本原理是:样品经过气相色谱色谱柱分离出单个组分并进入离子迁移谱反应区,通过电离反应,并且在电场力的作用下,离子进入漂移区,在不断的碰撞过程中,由于不同离子在电场中的迁移速率不同,使得不同离子间分离,其到达电极的时间不同而分别得以检测。气相色谱-离子迁移谱技术广泛应用于药物检测、疾病监控和环境保护等领域,近年来也被用于对风味物质的检测^[37]。

对羊肉挥发性风味物质研究中,有学者利用气相色谱-离子迁移谱分析不同地区羊肉的挥发性风味物质发现,不同地区的羊肉以及不同品种羊肉存在差异。如青海玉树羊肉特征风味物质为2,3-丁二酮、苯甲醛、丁醇、丙酮、2-丁酮、辛醛和1-辛烯-3-醇等,而2-戊酮和2-己醇等是四川羊肉的特征风味物质^[38]。乌珠穆沁羊肉与苏尼特羊肉差异风味物质有7种,分别为乙酸乙酯、丙酮、乙醇、2-丁酮、丁醛、壬醛和苯甲醛^[39]。Zhang Xue等^[40]研究日粮能量水平对绵羊肉质风味的影响,利用气相色谱-离子迁移谱发现高能饲料饲喂显著增加了挥发性风味物质。在禽肉风味的研究中,姚文生等^[41]基于气相色谱-离子迁移谱发现生鲜鸡肉货架期不超过4 d,超过4 d会产生二甲基三硫醚、二甲基二硫醚和3-甲基丁酸等主要挥发性物质。巨晓军等^[42]通过分析不同生长速度肉鸡鸡肉中的挥发性物质发现,慢速型鸡肉中醛类和醇类含量显著高于快速和中速型鸡肉,主要包括反-2-辛烯醛、戊醛、壬醛、己醛、1-丁醇、乙醇、1-戊醇和1-辛烯-3-醇。利用气相色谱-离子迁移谱技术检测烧鸡和炖煮鸡肉中的风味物质,发现己醛(二聚体)、3-羟基-2-丁酮(二聚体)、1-辛烯-3-醇、甲硫醚是静宁烧鸡中的关键挥发性风味物质,随着炖煮次数的增加(到达15次时),鸡肉中风味物质趋于稳定^[43-44]。

2 核磁共振在肉类检测中的应用

核磁共振技术源于20世纪40年代,直到20世纪80年代末才开始被应用于食品领域^[45]。其基本原理是:具有活性自旋的原子核在静态磁场存在的情况下,具有能量的吸收,能量吸收主要通过适当的射频脉冲获得;在脉冲之后,被激发的原子核松弛,其发射的能量被检测为与时间关联的信号强度,该信号将产生与构成核磁共振信号的激发核,并与激发核的数量成正比;同时每个原子核在频谱显示特定位置,由此产生的谱线可测量的参数就可用于解释分子结构、构象及分子运动等,其具有非破坏性、高分辨率、无毒性及可定量等优点,也存在仪器复杂、分析时间长及样品准备时间长等缺点^[46-47]。

根据磁场强度大小,核磁共振可分为3类:高场、中场、低场。由于核磁共振技术所产生的数据较为庞大、繁杂,所以需要对数据进行处理和分析,现有的核磁共振数据分析方法有主成分分析、偏最小二乘法判别分析和正交偏最小二乘法判别分析等^[48]。

低场和高场核磁共振在食品领域被广泛应用,低场核磁共振常用于分析食品掺假^[49]、食品含有水分类型、水分分布及水分移动等^[50]。朱莹莹等^[51]利用低场核磁共振鉴别不同干燥方式牛肉干产品,发现不同干燥加工方式牛肉干的 T_2 弛豫特性存在显著差异,且主成分分析有明显分离。季美泉等^[52]基于低场核磁共振技术结合化学计量学方法实现了对冻融肉的快速鉴别。相较于低场核磁共振,高场核磁共振实现了对多种化合物的快速鉴定和定量检测,因此其也更多地被应用于对肉类及肉制品风味和品质的研究^[53-54]。许多研究表明,在肉类烹调过程中,水溶性低分子化合物是形成肉类风味的重要因素,Xiao Zhichao等^[55]利用高场核磁共振比较中国地方鸡(武定鸡和盐津乌骨鸡)和商品肉鸡生肉和鸡汤中的水溶性低分子化合物含量,发现中国地方鸡胸肉和腿肉中的主要风味物质含量显著高于普通商品肉鸡,同时鸡汤中风味物质含量也显著高于普通肉鸡。在对不同品种鸡肉风味物质差异的研究中, Kim等^[56]利用核磁共振技术对韩国土鸡、KNC-D鸡和商业KNC肉鸡的鸡胸肉和鸡腿肉中的风味活性物质和生物活性物质进行定量研究,发现KNC-D鸡胸部组织中的丝氨酸、肌酸、肌肽和肌苷酸含量高于商业KNC和韩国土鸡品种。

利用核磁共振技术可揭示肉类制品风味形成的原因。Zhang Jian等^[57]利用高场核磁共振技术研究无骨干腌火腿加工过程中代谢产物的变化,共鉴定出28种代谢物,包括氨基酸、多肽、有机酸、核酸及其衍生物、糖等,发现氨基酸(异亮氨酸、缬氨酸、丙氨酸、谷氨酸和组氨酸)、有机酸(乳酸、醋酸盐、琥珀酸、柠檬酸和甲酸盐)和核苷酸衍生物(次黄嘌呤)是影响最终产品滋味的主要因素。Huang Ling等^[58]采用核磁共振氢谱和多元数据分析方法,研究不添加亚硝酸盐的腊肉在加工过程中口感品质的变化。结果表明:加工过程中含有21种代谢产物,包括氨基酸、糖类、有机酸、核酸及其衍生物、生物碱等,异亮氨酸、亮氨酸、缬氨酸、丙氨酸、醋酸盐、谷氨酸、琥珀酸、甘氨酸、蔗糖、酪氨酸和苯丙氨酸的含量在整个过程中不断增加;烘烤后乳酸、肌酸、肌氨酸、甜菜碱、牛磺酸、次黄嘌呤和腺苷含量均显著升高;肌苷含量发酵后先显著升高后降低;组胺含量风干后显著升高后降低;组氨酸含量降低;各加工处理均能促进不添加亚硝酸盐腊肉(未熏)的风味形成,尤其是烘焙。

3 电子鼻在肉类检测中的应用

仿生嗅觉技术,即电子鼻技术是一种智能仿生系统,最早应用在1982年。其主要是由传感器和模式识别系统组成,基本工作原理是:通过气体采集系统、气敏传感器阵列和模式识别系统等部分,当被测样品中挥发性混合气体和传感器接触时,气体与灵敏材料发生反应并产生可收集信息,再利用模式识别系统对信号进行分析,在特定类型的气味检测和识别系统中,其敏感元件的激发导致特定信号的产生^[59-61]。电子鼻技术目前广泛应用于食品安全、环境监测及临床医学诊断等领域。电子鼻应用于风味物质检测,具有快速、高灵敏度和非破坏性等特点,但也存在易受环境干扰、仪器昂贵和学习能力不足的缺点。在肉类风味和品质评定方面,电子鼻技术常用于对不同品种肉类挥发性气味的检测,其主要通过风味识别、肉质评估、新鲜度识别和风味调控等方面对肉类品质进行调控^[62]。Chen Jingru等^[63]利用电子鼻和顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术分析证实了北京油鸡、鲁花鸡和AA肉鸡之间的显著差异,醛的种类较多和相对含量较高可能是北京油鸡鸡肉风味更浓郁的原因。北京油鸡必需氨基酸、花生四烯酸、肌苷一磷酸含量高于另外2种鸡。Wilson等^[64]通过电子鼻对叉尾鱼鱼片中的气味化合物进行检测,发现其中存在异味气味化合物,同时传感器阵列输出结果表明,风味良好和风味差的鱼片香味特征有显著差异,这都表明电子鼻技术可有效、快速评估肉类质量。需要注意的是,电子鼻在肉类风味和品质评定方面的应用仍然面临一些挑战。例如,不同品种肉类之间的挥发性化合物差异较大,因此需要建立合适的模型和数据库。此外,环境条件和样品处理等因素也可能对电子鼻的检测结果产生影响。因此,在实际应用中需要结合其他分析手段和专业知识进行综合评估和判断^[65-67]。

4 结 语

对肉类风味物质的检测,无论是色谱-质谱联用技术,还是核磁共振波谱技术,都应用较为广泛。色谱-质谱联用技术可以同时分离和定性分析复杂的肉类风味物质,如氨基酸、肽类、脂肪酸和挥发性化合物等,这种技术具有高效、灵敏和可靠的特点,可以提供关于风味物质的结构和含量信息。核磁共振作为一种无损分析技术,可以提供关于食品中化学成分的结构和动态信息。在肉类风味物质检测中,核磁共振技术可以用于鉴定和定量分析肉类中的营养成分、氨基酸和脂类等风味物质,具有高分辨率、非破坏性和多维的特点,可以提供全面的风味物质分析结果。电子鼻技术是一种模拟人类嗅觉系统的传感器装置,可以通过探测和识别气体混合

物的特征模式来辨别不同的风味。在肉类风味物质检测中,电子鼻技术可以用于分析和区分肉类产品中的挥发性风味物质,具有快速、便捷和非破坏性的特点,用于大规模的样品分析和实时的风味检测。

这些检测技术虽然都已较成熟,但对风味物质在体内的分布及代谢机制等研究尚显不足。近年来,由于技术平台的愈加成熟,代谢组学随之兴起,各个组织中的代谢物分布被充分揭示。因此,未来代谢组学的应用将更加深入,主要体现在以下几个方面:1)多组学的融合运用,代谢组学、转录组学及蛋白组学等多组学联合分析,以探究各种风味代谢物质产生的分子机制;2)对代谢物库的扩充,不断增加肉类风味库中所含有的代谢物质,增加可检测范围;3)对样品预处理和后续庞大数据的准确性及可重复性分析;4)随着技术的不断进步,研究人员将利用创新的检测技术应用于肉类风味物质检测。例如,基于人工智能和机器学习的方法可以快速、准确地识别和定量肉类风味物质,从而提高肉类产品的质量控制和食品安全。未来代谢组学将被更加广泛地应用于肉类风味检测及动物育种领域中。

参考文献:

- [1] 林宇山. 感官评价在食品工业中的应用[J]. 食品工业科技, 2006(8): 202-203. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2006.08.062.
- [2] 钱文熙, 阎宏, 崔慰贤. 放牧、舍饲滩羊肌体风味物质研究[J]. 畜牧与兽医, 2007(1): 17-20. DOI:10.3969/j.issn.0529-5130.2007.01.006.
- [3] 赵国芬. 沙葱和油料籽实对绵羊瘤胃发酵、营养物质消化流通及胴体品质影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005: 38-40.
- [4] 武书庚, 齐广海. 肉品风味的形成及其影响因素[J]. 中国畜牧杂志, 2001(3): 53-55. DOI:10.3969/j.issn.0258-7033.2001.03.024.
- [5] 李敬, 杨媛媛, 赵青余, 等. 肉风味前体物质与风味品质的关系研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(11): 1-7. DOI:10.19556/j.0258-7033.20190330-05.
- [6] 张根华, 詹月华, 权英. 食品感官科学的历史与发展[J]. 常熟理工学院学报, 2009, 23(8): 79-82. DOI:10.16101/j.cnki.cn32-1749/z.2009.08.013.
- [7] GOODACRE R, VAIDYANATHAN S, DUNN W B, et al. Metabolomics by numbers: acquiring and understanding global metabolite data[J]. Trends in Biotechnology, 2004, 22(5): 245-252. DOI:10.1016/j.tibtech.2004.03.007.
- [8] NICHOLSON J K, CONNELLY J, LINDON J C, et al. Metabonomics: a platform for studying drug toxicity and gene function[J]. Nature Reviews: Drug Discovery, 2002, 1(2): 153-161. DOI:10.1038/nrd728.
- [9] 黄琳娜. 超高效液相色谱-质谱联用技术在药物分析中的应用研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010: 13-23. DOI:10.7666/d.y1776567.
- [10] 曾银珠, 杨凤琼. 高效液相色谱-质谱联用技术在药物分析中的应用[J]. 生物化工, 2021, 7(1): 160-162; 166.
- [11] SETYABRATA D, COOPER B R, SOBREIRA T J P, et al. Elucidating mechanisms involved in flavor generation of dry-aged beef loins using metabolomics approach[J]. Food Research International, 2021, 139: 109969. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109969.
- [12] SETYABRATA D, VIERCK K, SHEETS T R, et al. Characterizing the flavor precursors and liberation mechanisms of various dry-aging methods in cull beef loins using metabolomics and microbiome approaches[J]. Metabolites, 2022, 12(6): 472. DOI:10.3390/metabo12060472.
- [13] WANG Pen, HONG Yanting, KE Weixin, et al. Formation of heterocyclic amines in Chinese marinated meat: effects of animal species and ingredients (rock candy, soy sauce and rice wine)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(12): 3967-3978. DOI:10.1002/jsfa.8259.
- [14] 陈敬敬, 韩金花, 张永胜, 等. 肉制品中杂环胺的研究进展[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(1): 168-174. DOI:10.13590/j.cjfh.2022.01.032.
- [15] HSU K Y, CHEN B H. Analysis and reduction of heterocyclic amines and cholesterol oxidation products in chicken by controlling flavorings and roasting condition[J]. Food Research International, 2020, 131: 109004. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109004.
- [16] 包陈力根, 关淳博, 辛明航, 等. HS-SPME-GC-MS结合电子鼻分析烘烤对大球盖菇挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(14): 226-233. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220119-183.
- [17] 李启东, 赵金, 孔娜, 等. 顶空固相微萃取结合气质联用方法快速测定地椒挥发性成分[J]. 山东科学, 2022, 35(1): 1-5. DOI:10.3976/j.issn.1002-4026.2022.01.001.
- [18] 廖林, 刘悦, 贺稚非, 等. 基于顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱技术的卤烤兔肉丁加工过程中挥发性风味物质变化分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(14): 235-243. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.029062.
- [19] 张文婷, 孙健, 朱红, 等. 基于顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法测定7种不同品种甘薯全粉挥发性风味物质[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(1): 10-18. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2022.01.025.
- [20] ZHEN Zongyuan, LIU Yilin, WANG Jie, et al. Determination of volatile flavor compounds in raw and treated duck meats of different body parts[J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(6): e13908. DOI:10.1111/jfbc.13908.
- [21] ZHANG Xue, HAN Lijuan, HOU Shengzhen, et al. Effects of different feeding regimes on muscle metabolism and its association with meat quality of Tibetan sheep[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131611. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.131611.
- [22] 王琨, 贺稚非, 李洪军, 等. 顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱法分析兔肉的挥发性风味物质[J]. 食品科学, 2013, 34(14): 212-217. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201314043.
- [23] LI Xiaomin, DENG Jieying, WU Ying, et al. Insight into the correlation between microbial diversity and flavor profiles of traditional dry-cured duck from the metabolomic perspective[J]. Food Research International, 2022, 156: 111349. DOI:10.1016/j.foodres.2022.111349.
- [24] SUN Shuguo, ZHAO Juanhong, LUO Zhang, et al. Systematic evaluation of the physicochemical properties and the volatile flavors of yak meat during chilled and controlled freezing-point storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(4): 1351-1361. DOI:10.1007/s13197-019-04169-8.
- [25] DUGO G, FRANCHINA F A, SCANDINARO M R, et al. Elucidation of the volatile composition of Marsala wines by using comprehensive two-dimensional gas chromatography[J]. Food Chemistry, 2014, 142: 262-268. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.07.061.
- [26] 陈文彬, 匡菁, 史毅, 等. 全二维气相色谱飞行时间质谱在现代分析中的应用进展[J]. 江西中医药, 2019, 50(3): 69-72.
- [27] 兰天宇, 杜海军. 全二维气相色谱技术在环境分析中的应用[J]. 化工技术与开发, 2017, 46(4): 24-26.
- [28] 高震博, 常振阳, 代威, 等. 全二维气相色谱在石油地质样品分析中的应用进展[J]. 色谱, 2014, 32(10): 1058-1065. DOI:10.3724/SP.J.1123.2014.07010.
- [29] 夏丹, 高丽荣, 郑明辉. 全二维气相色谱分析持久性有机污染物的应用进展[J]. 色谱, 2017, 35(1): 91-98. DOI:10.3724/SP.J.1123.2016.08029.
- [30] DUAN Yan, ZHENG Fuping, CHEN Haitao, et al. Analysis of volatiles in Dezhou Braised Chicken by comprehensive two-dimensional gas chromatography/high resolution-time of flight mass



- spectrometry[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(2): 1235-1242. DOI:10.1016/j.lwt.2014.09.006.
- [31] LEE S M, KWON G Y, KIM K O, et al. Metabolomic approach for determination of key volatile compounds related to beef flavor in glutathione-Maillard reaction products[J]. Analytica Chimica Acta, 2011, 703(2): 204-211. DOI:10.1016/j.aca.2011.07.028.
- [32] LI Wenqian, CHEN Yanping, 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. DOI:10.1016/j.foodres.2021.110222.
- [33] 马小明. 基于气相色谱-飞行时间质谱联用技术分析滩羊肉风味物质的研究[J]. 肉类工业, 2019(11): 19-24.
- [34] XU Yuan, CHEN Yanping, DENG Shaolin, et al. Application of sensory evaluation, GC-TOF-MS, and E-nose to discriminate the flavor differences among five distinct parts of the Chinese blanched chicken[J]. Food Research International, 2020, 137: 109669. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109669.
- [35] 张瑞廷, 程江辉, 徐佳. 气相离子迁移谱在食品风味研究中的应用[J]. 现代食品, 2020(10): 167-169. DOI:10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2020.10.057.
- [36] 葛文娜. 气相色谱-离子迁移谱在食品风味物质检测中的应用研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2022, 32(19): 2431-2433.
- [37] 陈彦憬, 于建娜, 敬国兴, 等. 气相色谱-离子迁移谱技术在农业领域的应用[J]. 分析试验室, 2020, 39(12): 1480-1488. DOI:10.13595/j.cnki.issn1000-0720.2020.040701.
- [38] 张蓝月, 孙万成, 罗毅皓. 基于气相色谱-离子迁移谱分析不同地区羊肉的挥发性风味化合物[J]. 食品与发酵工业, 2023(10): 265-272. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.032572.
- [39] 刘志红, 赵存, 谢遇春, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱技术鉴定内蒙古地区3个品种羊肉挥发性代谢物[J]. 肉类研究, 2021, 35(11): 24-30. DOI:10.7506/rlyj.1001-8123-20210524-149.
- [40] ZHANG Xue, HAN Lijuan, HOU Shengzhen, et al. Metabolomics approach reveals high energy diet improves the quality and enhances the flavor of black Tibetan sheep meat by altering the composition of rumen microbiota[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 915558. DOI:10.3389/fnut.2022.915558.
- [41] 姚文生, 杨晶, 刘登勇, 等. 基于顶空-气相色谱-离子迁移谱技术判定生鲜鸡肉货架期[J]. 食品与发酵工业, 2023(12): 1-10. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033013.
- [42] 巨晓军, 单艳菊, 刘一帆, 等. 基于气相-离子迁移谱技术分析不同生长速度肉鸡肌肉中挥发性有机物的差异[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(3): 170-175. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025140.
- [43] 杜超, 戚军, 姚文生, 等. 基于气相-离子迁移谱分析反复炖煮过程中鸡肉风味物质的变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(9): 265-271. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022999.
- [44] 师希雄, 田铸, 祁光增, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱分析静宁烧鸡中的挥发性风味成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(15): 4816-4823. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq.11-5956/ts.2022.15.025.
- [45] 毛书灿, 郝梦, 汪兰, 等. NMR在肉制品品质检测中的应用进展[J]. 现代食品科技, 2023(5): 354-366. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.5.0569.
- [46] CONSONNI R, CAGLIANI L R. Nuclear magnetic resonance and chemometrics to assess geographical origin and quality of traditional food products[J]. Advances in Food and Nutrition Research, 2010, 59: 87-165. DOI:10.1016/S1043-4526(10)59004-1.
- [47] 焦宏. 核磁共振技术在代谢组学中的应用[J]. 山西医药杂志(下半月刊), 2011, 40(4): 335-336.
- [48] 孙雨航, 许楚楚, 徐闯, 等. 代谢组学中核磁共振技术的数据分析方法[J]. 中国兽医杂志, 2014, 50(12): 54-55. DOI:10.3969/j.issn.0529-6005.2014.12.018.
- [49] 徐瑞平, 季美泉, 丁涛, 等. 低场核磁共振技术快速鉴别注水猪肉的化学计量学研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(4): 724-729. DOI:10.13590/j.cjfh.2022.04.014.
- [50] BAO Pengqi, CHEN Li, WANG Yu, et al. Quality of frozen porcine *Longissimus lumborum* muscles injected with L-arginine and L-lysine solution[J]. Meat Science, 2021, 179: 108530. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108530.
- [51] 朱莹莹, 张中会, 张丽, 等. 基于LF-NMR技术鉴别不同干燥方式牛肉干产品[J]. 食品工业, 2022, 43(4): 44-47.
- [52] 季美泉, 徐瑞平, 丁涛, 等. 应用低场核磁共振技术快速鉴别冻融肉[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(1): 1-7. DOI:10.13590/j.cjfh.2023.01.001.
- [53] ZHANG Jian, YE Yangfang, SUN Yangying, et al. ¹H NMR and multivariate data analysis of the differences of metabolites in five types of dry-cured hams[J]. Food Research International, 2018, 113: 140-148. DOI:10.1016/j.foodres.2018.07.009.
- [54] XIAO Z, ZHANG W, YANG H, et al. ¹H NMR-based water-soluble lower molecule characterization and fatty acid composition of Chinese native chickens and commercial broiler[J]. Food Research International, 2021, 140: 110008. DOI:10.1016/j.foodres.2020.110008.
- [55] XIAO Zhichao, LUO Yuting, WANG Guiying, et al. ¹H-NMR-based water-soluble low molecular weight compound characterization and fatty acid composition of boiled Wuding chicken during processing[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(1): 429-435. DOI:10.1002/jsfa.9204.
- [56] KIM H C, YIM D G, KIM J W, et al. Nuclear magnetic resonance (NMR)-based quantification on flavor-active and bioactive compounds and application for distinguishment of chicken breeds[J]. Food Science of Animal Resources, 2021, 41(2): 312-323. DOI:10.5851/kosfa.2020.e102.
- [57] ZHANG Jian, YI Yue, PAN Daodong, et al. ¹H NMR-based metabolomics profiling and taste of boneless dry-cured hams during processing[J]. Food Research International, 2019, 122: 114-122. DOI:10.1016/j.foodres.2019.04.005.
- [58] HUANG Ling, ZENG Xiaoqun, YE Yangfang, et al. NMR-based metabolomics profiling of no-added-nitrite Chinese bacon (unsmoked) during processing[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(4): 1027-1036. DOI:10.1111/1750-3841.15022.
- [59] 刘静, 元超凡, 绪扩, 等. 指纹图谱技术在食品质量与安全中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(10): 3189-3197. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq.11-5956/ts.2022.10.014.
- [60] 吴楠京, 贾文坤, 马洁, 等. 仿生嗅觉技术在微生物代谢产物气味检测中的应用研究进展[J]. 分析试验室, 2018, 37(3): 366-372. DOI:10.13595/j.cnki.issn1000-0720.2018.0067.
- [61] WASILEWSKI T, GĘBICKI J, KAMYSZ W. Bioelectronic nose: current status and perspectives[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2017, 87: 480-494. DOI:10.1016/j.bios.2016.08.080.
- [62] 范蓓蕾, 钱建平, 刘寿春, 等. 电子感官评价系统在肉品质量分析中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(8): 2440-2447. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq.11-5956/ts.2014.08.030.
- [63] CHEN Jingru, YAN Wenjie, FU Yu, et al. The use of electronic nose in the quality evaluation and adulteration identification of Beijing-You chicken[J]. Foods, 2022, 11(6): 782. DOI:10.3390/foods11060782.
- [64] WILSON A D, OBERLE C S, OBERLE D F. Detection of off-flavor in catfish using a conducting polymer electronic-nose technology[J]. Sensors, 2013, 13(12): 15968-15984. DOI:10.3390/s131215968.
- [65] BEHERA B, JOSHI R, ANIL VISHNU G K, et al. Electronic nose: a non-invasive technology for breath analysis of diabetes and lung cancer patients[J]. Journal of Breath Research, 2019, 13(2): 024001. DOI:10.1088/1752-7163/aaf77.
- [66] MUNEKATA P E S, FINARDI S, DE SOUZA C K, et al. Applications of electronic nose, electronic eye and electronic tongue in quality, safety and shelf life of meat and meat products: a review[J]. Sensors, 2023, 23(2): 672. DOI:10.3390/s23020672.
- [67] WIJAYA D R, SARNO R, ZULAIKA E, et al. Electronic nose homogeneous data sets for beef quality classification and microbial population prediction[J]. BMC Research Notes, 2022, 15(1): 237. DOI:10.1186/s13104-022-06126-9.