

烤制羊肉加工工艺及挥发性风味物质的研究进展

胡燕燕¹, 刘成江^{2*}, 李宇辉², 卢士玲¹

(1.石河子大学食品学院, 新疆 石河子 832000; 2.新疆农垦科学院农产品加工研究所, 新疆 石河子 832000)

摘要: 烤制羊肉是我国一种特色的传统肉制品, 因其风味独特而深受消费者喜爱。但当前我国烤制羊肉生产多以手工作坊为主, 质量不统一且存在食品安全问题, 很大程度上限制了烤制羊肉的发展。加工工艺会影响产品的风味, 风味极大程度决定了消费者对于食品的接受程度, 目前已有研究主要从原料肉的选择、加工工艺的优化及风味物质等方面进行研究。本文就烤制羊肉目前工艺现状, 对烤制羊肉的挥发性风味物质来源及电子鼻、气相色谱-质谱联用、气相色谱-离子迁移谱等检测方法进行概述, 以期为我国烤制羊肉产业的发展提供一定的参考。

关键词: 烤制羊肉; 工艺; 挥发性风味物质; 挥发性风味物质来源; 检测方法

Research Progress on Processing Technology and Volatile Flavor Substances of Roasted Mutton

HU Yanyan¹, LIU Chengjiang^{2*}, LI Yuhui², LU Shiling¹

(1.School of Food Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2.Institute of Agro-Products Processing Science and Technology, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China)

Abstract: Roasted mutton is a traditional Chinese meat product which is loved by consumers because of its unique flavor. However, in China, roasted mutton is currently mostly produced in manual workshops, unified quality standards are lacking and there are many food safety problems with roasted mutton, which largely limit the development of the roasted mutton industry. The processing technology affects the flavor of the product, which in turn greatly determines the consumers' acceptance. Current research on roasted mutton focuses on the selection of raw meat, the optimization of processing technology, and flavor substances. Based on the current research status of the processing technology of roasted mutton, the sources of volatile flavor substances of roasted mutton and the applications of electronic nose, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and GC-ion mobility spectrometry (GC-IMS) in the detection of volatile flavor substances of roasted mutton are summarized, in order to provide useful information for the development of China's roasted mutton industry.

Keywords: roasted mutton; process; volatile flavor substances; sources of volatile flavor substances; detection methods

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220919-124

中图分类号: TS251.53

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2023) 04-0054-07

引文格式:

胡燕燕, 刘成江, 李宇辉, 等. 烤制羊肉加工工艺及挥发性风味物质的研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(4): 54-60.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220919-124. <http://www.rlyj.net.cn>

HU Yanyan, LIU Chengjiang, LI Yuhui, et al. Research progress on processing technology and volatile flavor substances of roasted mutton[J]. Meat Research, 2023, 37(4): 54-60. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20220919-124. <http://www.rlyj.net.cn>

羊肉性温、益气补虚, 具有较好的滋补效果, 深受人们的喜爱。非洲猪瘟爆发以来, 羊肉因具备蛋白质含量高且脂肪和胆固醇含量低等优点而作为猪肉的替代

品, 使得羊肉需求持续增长, 2020年我国人均羊肉年消费量为3.31 kg, 是世界人均羊肉消费量的1.88倍^[1]。常见的羊肉加工方式有涮制、炖制、烤制等, 其中烤制羊

收稿日期: 2022-09-19

基金项目: 兵团重点领域科技攻关项目 (2022AB001)

第一作者简介: 胡燕燕 (1997—) (ORCID: 0000-0001-5696-9484), 女, 硕士研究生, 研究方向为畜产品加工与安全控制。

E-mail: 1641263725@qq.com

*通信作者简介: 刘成江 (1978—) (ORCID: 0000-0001-7413-9273), 男, 研究员, 硕士, 研究方向为畜产品加工。

E-mail: lcj_5@sohu.com

肉色泽焦黄、肉质鲜嫩,深受消费者的青睐。烤制羊肉的营养丰富,含有VB、铁、钙、铜、锌、锰等微量元素^[2]。早在两汉时期人们就开始食用烤制羊肉,直至今日,烤制羊肉仍是广受欢迎的食物。

基于庞大的消费市场需求,烤制羊肉的相关研究迫在眉睫,但由于烤羊肉产品的质量不稳定,相关参数不统一,难以进行现代化工业生产。烤制羊肉的品质受多方面因素的影响,如羊的月龄、性别、部位、加工工艺等都会影响烤制羊肉的食用品质。风味是烤制羊肉适口性的重要特征之一,会影响消费者对羊肉及其产品的接受和喜爱程度,挥发性化合物的存在及其组成决定了烤制羊肉的特定香气和所得产品的风味^[3]。因此,对烤制羊肉风味进行全面、准确的分析可以为烤制羊肉风味研究的持续探索提供见解。本文将从加工工艺与挥发性风味物质两方面对目前烤制羊肉现状进行概述,为烤制羊肉的工艺改进、参数优化及风味物质的形成提供借鉴,以期对我国烤制羊肉工业化及相关应用提供参考。

1 羊肉烤制工艺

评价烤羊肉食用品质的指标主要涉及硬度、弹性、水分含量、氯化钠含量、嫩度、咀嚼性等,其食用品质的影响因素包括原料品种、屠宰和成熟方式、原料新鲜度、腌制条件及加工条件等。

1.1 生羊肉品质

研究发现,品种、喂养方式、月龄、性别、烹饪时间、不同的蛋白质热稳定性和肌肉的蛋白质二级结构等因素会影响烤肉的质量^[4]。6~12月龄羊肉适宜烤制且烤制出的羊肉具有良好的感官品质,能够获得更多消费者的喜爱,外脊、里脊、霖肉与米龙较适宜烤制,但公羊肉在烤制过程中会产生不良气味,风味较差^[5]。屠宰后羊肉会经历僵直、解僵成熟、腐败的过程。处在僵直前期的热鲜羊肉具有良好的保水性、嫩度及色泽,经过烤制后其烘烤损失较低且杂环芳香胺总含量显著降低,解僵成熟后的冷却羊肉具有较好的嫩度,更加适合烧烤^[6]。因此,合理选择原料肉能够有效提高烤羊肉的感官品质和消费者的喜爱程度。

1.2 腌制条件

腌制是一种简单的处理,通过浸泡、注射等方式来改善肉类的品质和感官特性。烤前腌制能够使烤制羊肉的水分含量有不同程度的降低,对于肉的嫩度和亮度值有显著改善作用^[7]。同时,烤前腌制能够显著减少多环芳烃等有害物质的形成^[8]。

腌制液成分很大程度影响烤制羊肉的品质,在腌制过程中添加菠萝汁和碳酸氢钠可提高烤制山羊肉的质量^[9]、添加酸乳中的酸乳清和橙皮苷腌制可提高羊肉的氧化稳定性^[10],添加亚硝酸钠可有效抑制脂质氧化,

添加2%多磷酸盐能够起到抗氧化的作用^[11-12]。为减少亚硝酸钠的使用,Xin Keqi等^[13]发现,火龙果皮提取物和柠檬籽精油被用作亚硝酸钠的部分替代品,可以实现羊肉保鲜,减少腌制过程中亚硝酸盐的使用。

除腌制液外,腌制方式的选择也尤为重要,目前主要的腌制方式包括干腌法、湿腌法、混合腌制法等,但其存在诸如操作复杂、腌制时间过长等缺点。为满足生产需求,新型腌制技术(超高压腌制技术、超声波腌制技术、脉动真空腌制技术等)应运而生。超高压处理(100~400 MPa、25℃)能够有效改善羊腿肌肉纤维结构,200 MPa处理可有效提高腌制羊肉的嫩度^[14]。超声波处理可使羔羊肉的pH值、水分含量及产品得率增加,在超声波频率26 kHz、强度1 W/cm²、盐渍12 h条件下腌制的羊肉品质最佳^[15]。负离子电场中(3 kV),在4℃条件下腌制12 h能够使腌制羊肉色泽鲜亮,并且负离子电场可有效延缓脂肪的氧化程度,延缓羊肉腐败变质^[16]。使用脉动真空腌制能有效提高羊肉腌制效率,其效率较常压腌制提高8%~26%^[17]。

因此,通过不同的腌制料液及腌制技术的联合使用能够在一定程度上提升烤羊肉的食用品质,减少有害物质的形成,具有一定的实际应用价值。

1.3 烤制方式

目前一些传统的烤制方法,如木炭烤制等会造成烤制羊肉中血红素铁和干物质含量的增加,从而影响羊肉的食用质量,如嫩度、多汁性、味道和颜色等^[18-19]。烤制过程中干物质含量的增加,特别是脂肪含量的改变对可食用羊肉的最终成分有很大影响^[20]。研究发现,电加热空气、微波加热和过热蒸汽的烤制方式均在烤制羔羊前腿中产生丰富的风味化合物,对比发现,电加热空气是取代传统木炭烤制的好方法^[21]。潘腾等^[22]通过过热蒸汽联合红外光波烤制羊腿发现,烤制的最佳工艺参数为过热蒸汽烤制条件240℃、50 min,红外光波烤制条件240℃、60 min,过热蒸汽烤制对杂环胺有抑制作用,红外光波烤制对烤制羊腿的综合品质有改善作用。刘琴等^[23]使用微波与光波组合烘烤,烤制羊肉中苯并芘含量仅为炭烤羊肉的5.1%(0.5 μg/kg)。过热蒸汽烤制羊肉的挥发性化合物含量较高,而木炭和其他烤制方法的化合物含量较少,这也说明在加热时可能会致使一些重要的挥发性化合物丢失^[24]。姜三群^[25]经对比认为,传统无烟炭烤制的羊肉串感官品质与远红外电烤的羊肉串感官品质差异较小,均较好,相较而言微波烧烤的羊肉串感官品质较差。李宏燕等^[26]通过红外辐射加热方式,使烤制肉形成“外焦里嫩”的食用品质。Pourkhalili等^[27]研究传统烹饪方法(煮制、烧烤、油炸)对羊肉中铁含量变化的影响发现,烤制羊肉中血红素铁占总铁含量最高可达76.01%。

由此可说明,现代加热技术均能够使羊肉在烤制过程中产生丰富的风味化合物,其中过热蒸汽烤制羊肉的挥发性化合物含量较高且能够抑制烤制羊肉中的杂环胺,微波、红外烧烤、欧姆加热等现代技术可以通过减少有害化合物含量、保持营养、微生物抑制和改善感官特性来帮助提高质量,确保肉类的安全性。对此也有研究^[28]认为,用米糠(完全燃烧)明火烤制羊肉能够保障烤制羊肉的食用安全性。因此,选用合适的烤制方式能够提高烤羊肉的食用品质。

2 烤制羊肉中挥发性风味物质

2.1 烤制羊肉中挥发性风味物质来源

使用不同的方法烤制羊肉,有助于赋予羊肉良好的风味、改善营养质量并确保食品安全。然而,传统烤制方法也会引起一些潜在的健康危害,即形成多环芳烃、杂环芳香胺和丙烯酰胺。在羊肉烤制加工过程中,羰基化合物和氨基化合物间发生美拉德反应,许多脂质降解产物都有自己独特的风味,但它们也可以与美拉德反应产物发生反应,从而产生多种风味化合物。相关研究表明,烤制羊肉的风味化合物主要是由美拉德反应、硫胺素热降解、脂质氧化3种反应所产生^[29]。

2.1.1 美拉德反应

美拉德反应能够改变食物的性质(风味、颜色和气味),而且还会增强氨基酸、肽和蛋白质的功能性质(抗氧化性和抑菌性)^[30]。美拉德反应中间阶段所产生的酮、醛等化合物是食品的风味前体和风味物质。美拉德反应中脂质衍生的活性羰基和氨基反应使得吡嗪的水平较高,为食物提供烧烤味,并且脂质降解产生的1-辛烯-3-醇具有蘑菇和烘烤香气^[31],酮、酮醇、酮醛和其他裂解物与氨基化合物反应,进一步形成最终的美拉德反应产物,有助于加工过程中食品的整体风味感知。不同的氨基酸和羰基类型、组成或反应途径,可形成令人愉悦的花香、坚果香、独特肉香、辛辣等风味特征。美拉德反应产物能够与其他脂质氧化产物相互作用,形成吡嗪类、噻唑类物质和噻醇^[30,32],对食品风味和颜色的形成起着关键作用。

2.1.2 硫胺素降解

硫胺素(VB₁)是一种含硫、含氮的双环化合物,也是风味前体物质,硫胺素通过热处理降解产生芳香化合物,主要包括呋喃、噻吩、噻唑和脂肪族硫化物,这些化合物具有非常低的气味阈值,并且对于肉制品的香气非常重要,有助于产生草味、肉味、烤香味等。虽然这些化合物很容易被人的鼻子所察觉,但是很难通过传统的仪器检测技术(如气相色谱-质谱联用

(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS))进行分析^[33]。硫胺素降解所得产物具有香味,同时还能够与其他物质发生反应,产生更多的挥发性风味化合物^[34]。温度、时间、pH值和基质组成等都能够影响肉制品中硫胺素的产生。

2.1.3 脂肪降解和氧化

肉脂可分为甘油三酯和磷脂。脂肪作为基质,可通过热诱导的氧化反应形成气味活性挥发物^[35],如碳氢化合物、醇类、醛类和酮类,有助于香气的形成,并且能够与美拉德反应中的其他挥发物一同被检测到,它们也可能进一步与美拉德产物发生反应^[36]。

羊肉中氧化反应产生大量的挥发性化合物,如醇类、酮类和醛类,虽然它们的结构有助于产生特征风味,但是它们与其他化合物(如呋喃、吡咯、含硫化合物等)相比具有高气味阈值,所以被认为是肉制品香气的次要因素^[37]。同时,脂质氧化会导致肌肉质地及功能劣化,产生不良风味,加速油脂酸败,使得羊肉新鲜度和营养质量降低。另一方面,脂质氧化也是肌红蛋白氧化的促进剂,脂质氧化的醛类产物可以引发肌红蛋白的构象变化,导致血红素褐变增加,从而使得肉色产生缺陷,影响消费者的购买欲^[38]。

2.2 烤制羊肉中挥发性风味物质检测方法

烤制羊肉样品预处理后,可以通过提取和富集方法检测挥发性风味物质,并分析主要挥发性物质的类型、含量和贡献度^[39]。由于风味特征成分的微量和复杂性,只有采用比较完善的综合分析方法,才能够达到风味分析研究的目的和要求^[40]。目前,GC-MS、GC-离子迁移谱(GC-ion mobility spectrometry, GC-IMS)、GC-嗅闻-MS(GC-olfaction-MS, GC-O-MS)和电子鼻是识别食品中挥发性香气化合物最常用的技术。

2.2.1 电子鼻

1998年,Göpel^[41]引入“生物电子鼻(Bio-E-nose)”的概念,自20世纪下半叶,研究人员提出了创建人工嗅觉系统的想法,通常称为电子鼻,以检测和区分结构相似的挥发性有机化合物。电子鼻设备由化学传感单元和模式识别部分组成,电子鼻装置可以模仿人体的嗅觉系统,对许多挥发性化合物进行蒸汽检测。电子鼻技术简单、价格合理而被用于食品行业,是食品工业必不可少的工具之一^[42]。

利用电子鼻系统分析炭烤羊肉发现,醇类、醛类、酮类、烷烃、硫化物和芳香族化合物是主要的气味化合物,电烤制与木炭烤制羊肉的风味特征不同,电烤制羊肉具有较高含量的氮氧化物、萜烯、芳烃和有机硫,显著改变了烤羊肉的气味特征,电子鼻可对炭烤、电烤、红外线烤羊肉饼和过热蒸汽烤羊肉饼的挥发性风味物质进行主成分分析,以此区分不同加工方式烤羊肉饼的挥

发性化合物^[43]。通过电子鼻分析,在烤制80 min时,烤羊腿富含无机硫化物、氨氧化物、有机硫化物和醇类等,在烤制100 min与120 min时,烤羊腿富含无机硫化物和有机硫化物,其次是氨氧化物、甲基化合物、醇类、醛类及酮类^[44]。此外,电子鼻与GC-MS可对烤羊肉中掺入的鸭肉成分进行鉴别,鉴定出5种特征挥发性物质,分别为1-辛醇、1-戊醇、己醛、乙酸和十二烷^[45]。

2.2.2 GC-MS

GC-MS是目前最常用的风味物质分析技术,该技术基于固相微萃取、气相分离和MS分析食品中的挥发性化合物。GC-MS定性分析依赖于保留指数的计算,通过将挥发性化合物的MS图与MS库中记录的参考化合物的MS图和保留指数进行匹配来识别挥发性成分^[46]。

通过GC-MS法能够区分羊肉在炒制、煎制、炸制加工过程中挥发性风味化合物形成、变化及差异^[47]。并且GC-MS能够构建指纹图谱,并在此基础上对不同品种的羊肉进行区分^[48]。可以证实纳瓦拉羊的月龄能够影响羊肉的挥发性化合物、气味和风味属性^[49]。在GC-MS与主成分分析的基础上发现,烤制羊肉挥发性有机化合物中的游离芳香族化合物主要属于萘类化合物或其衍生物,它们被分类为醛、酮、醇、醚、酚、酸、酯、萘烯和其他类^[50],但由于食品基质的复杂性,GC-MS法在分析前往往需要进行复杂的预处理,较长的检测时间可能无法满足多组分分析的快速检测要求。

2.2.3 GC-IMS

GC-IMS技术是将样品中的挥发性组分通过色谱柱预先分离,并直接洗脱到IMS电离室进行离子迁移分析,是一种用于分离和灵敏检测挥发性有机化合物的强大技术,利用GC-IMS技术将不可见的风味物质转化为可见的指纹^[51]。具有响应速度快、灵敏度高、操作简单、成本低等特点,在食品新鲜度、食品掺假、食品风味分析等方面得到广泛应用^[52]。

GC-IMS可用于构建不同月龄、不同品种、不同部位羊肉的风味指纹^[53]。GC-IMS技术结合指纹图谱、主成分分析与聚类分析能够对不同地区羊肉的挥发性风味物质进行区分,并且通过特征风味的含量来鉴别羊肉中掺入的猪肉、鸡肉、狐狸肉等,对羊肉掺伪进行快速鉴别^[54-55]。利用GC-IMS可鉴定烤制羊肉中82种挥发性风味化合物,如醛(戊醛、壬醛、辛醛、己醛、庚醛、异戊醛、苯甲醛、3-甲硫基丙醛)、酮(2-庚酮、2-丁酮、甲基庚烯酮、3-羟基-2-丁酮、 γ -丁内酯)、醇(戊醇)和酯(乙酸乙酯)^[56]。但目前有关羊肉风味物质方面的GC-IMS数据库还不完整,随着技术的发展,后续研究将建立完整的羊肉风味GC-IMS数据库,实现快速、灵敏、自动化的表征。

2.2.4 GC-O-MS

GC-O-MS由2个功能强大的工作单元GC-O和GC-MS

组成,将2个设备的特性融合到一个集成的仪器中,能够有效从众多挥发性成分中鉴定或拾取芳香活性化合物。通过与不同技术的结合,GC-O-MS可以鉴定出食品中的关键芳香活性化合物^[57]。目前GC-O-MS已经被广泛用于食物气味/异味和环境(空气、饮用水、土壤等)的挥发性有机化合物测定中。

利用GC-O-MS技术在炭烤羊肉中鉴定出33种芳香族化合物,其中烤制前和烤制后羊肉中分别检测到33、30种化合物,丁酸、戊酸和2,6-二甲基吡嗪仅在未烤制羊肉中发现,GC-O-MS与快速GC-电子鼻(Flash GC-E-nose)组合也可以用来区分烤制羊肉与生羊肉,无论是烤制羊肉还是生羊肉,醛和醇含量均较高,五醛、己醛、七醛和辛醛是主要的醛类,其中己醛含量最高^[58],3-甲基丁醛、戊醛、己醛、七醛、辛醛、壬醛和1-辛烯-3-醇可能是重要的风味化合物,其中己醛和1-辛烯-3-醇是关键风味化合物^[59]。需要注意的是,虽然GC-O-MS可以有效地从复杂的混合物中筛选芳香族化合物,但是耗时耗力,因此不适用于工作量大的场合。

2.3 烤制羊肉主要挥发性风味物质

嫩度、芳香味、烤制羊肉风味及回味是消费者喜爱的属性^[60]。羊肉在烤制过程中产生的挥发性风味物质种类及含量相对较高,其嘌呤含量高于煮制与蒸制羊肉^[61]。目前在烤制羊肉中发现的挥发性成分主要有醛酮类化合物、醇类化合物、酯类化合物及含氮化合物。Watkins等^[62]认为,支链脂肪酸、3-甲基吡啶和4-甲基苯酚会对最终羊肉产品的整体风味有所影响,减少支链脂肪酸和4-乙基辛酸能够提高食用质量和消费者对熟肉产品的接受度。Liu Huan等^[63]采用超高效液相色谱-电喷雾串联四极杆质谱在羊肉烤制过程中共检测出24个亚类的2488个脂质,主要包括甘油三酯、磷脂酰胆碱(phosphatidylcholine, PC)和磷脂酰乙醇胺(phosphatidylethanolamine, PE),并且发现了20个亚类的488个差异脂质,其中的PC和PE可能主要有助于芳香化合物的形成。该研究共鉴定出13种香气化合物作为烤羊肉中的特征风味物质,包括己醛、庚醛和1-辛烯-3-醇等。马建荣等^[64]对传统炭烤羊腿进行特征滋味分析,认为鲜味、咸味是传统炭烤羊腿的主要滋味,谷氨酸是鲜味特征物,外源氯化钠提供咸味。席嘉佩等^[65]发现,1-辛烯-3-醇、庚醛、正戊醛、十二醛、反-4-癸烯醛、6-甲基庚醛、对异丙基苯甲醛、癸醛、壬醛、己醛、苯甲醛、4-甲基辛酸、辛醛、2-甲基-3-甲硫基咪唑、1-十四炔、萘、联二苯为烤制羊肉中关键香气成分。在不同烤制时间烤羊腿中共检测到8类香气成分,主要为杂环类、酸类、酯类、醛类、醇类、酮类、烷烃类和其他类,烤制羊腿中1-辛烯-3-醇、辛醛、壬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、己醛对烤制羊腿的香气贡献程度较高,主要表现为肉

香、油脂香、烤香和烟熏香等。烤制羊肉在120℃炉温条件下,随着烤制时间的延长,检出的挥发性物质总峰面积和种类数明显上升,当烤制时间达到40 min时,检出的挥发性物质种类数保持稳定,醛类、呋喃类等各大类物质成分含量相对稳定^[66]。烤羊肉中挥发性风味物质如表1所示。

表1 烤羊肉中挥发性风味物质
Table 1 Volatile flavor substances in roasted mutton

品种	选用部位	研究结论	参考文献
小尾羊、蒙古羊	外脊	己醛是烤羊肉中最主要的香味物质,醛类、醇类、含硫化物、含氮化合物和呋喃类是典型的芳香化合物	[57-58]
绵羊	腰部肌肉	葡萄糖、葡萄糖-6-磷酸、肌苷、肌苷单磷酸和单磷酸腺苷与甜味、肉味回味、烤羊肉味和回味以及消费者对羊肉的喜爱程度呈正相关	[59]
澳大利亚绵羊	胸腰长肌及羊膜肌	主要香味物质为4-甲基辛醛、4-乙基辛醛、4-甲基壬醛、4-甲基苯酚和3-甲基呋喃	[61]
小尾羊、蒙古羊	外脊	醛类、醇类、含硫化物、含氮化合物和呋喃类是典型的芳香化合物	[62]
新疆哈萨克羊	羊腿	鲜味、咸味为炭烤羊腿肉的重要特征滋味	[63]
新疆绵羊	后腿及羊尾油	烤羊肉中关键香气成分为1-辛烯-3-醇、庚醛、正戊醛、十二醛、反-4-癸烯醛、6-甲基庚醛、对异丙基苯甲醛、癸醛、壬醛、己醛、苯甲醛和4-甲基壬酸等	[64]
新疆哈萨克羊	羊后腿	主要挥发性风味物质为1-辛烯-3-醇、辛醛、壬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、己醛	[44]

3 结 语

烤制羊肉是一种在世界范围内流行的传统食品,随着人们生活水平的提高,在追求口感的同时,对烤制羊肉生产加工及消费安全的要求也随之增加。品种、性别、月龄、屠宰时间等原料自身因素和加工工艺等均会影响烤制羊肉的气味和风味。不同的腌制处理、烤制方式是肉制品加工过程中的重要环节。目前研究发现,使用天然来源的腌制剂(菠萝汁、酸乳的酸乳清、火龙果皮提取物等)、新型腌制方式(超高压腌制技术、超声波腌制技术、脉动真空腌制技术等)和现代加热技术(电加热空气、微波加热、过热蒸汽等)有助于在提升烤制羊肉的食用品质及风味的同时有效减少有害物质的生成,确保家庭和工业规模化生产烤制羊肉的安全性。后续可通对原料(羊肉)、烤制工艺、腌制工艺等方面的选择来确保烤制羊肉能够高效、安全进行工业化生产,加强复合联用技术(GC-MS与GC-IMS联用、GC-MS与电子鼻联用、GC-O-MS与Flash GC-E-nose联用等)在烤制羊肉风味化合物检测中的应用,确保消费者食用健康,满足消费者对烤制羊肉的更高需求,以推动我国烤制羊肉产业的发展。

参考文献:

[1] 袁圣钧. 基于国际视角的中国肉羊产业发展现状分析及肉羊企业发展策略研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020: 1-3. DOI:10.27409/d.cnki.gxbnu.2020.001388.

[2] ZHANG W, XIAO S, SAMARAWEEERA H, et al. Improving functional value of meat products[J]. Meat Science, 2010, 86(1): 15-31. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.04.018.

[3] RAMALINGAM V, SONG Z, HWANG I. The potential role of secondary metabolites in modulating the flavor and taste of the meat[J]. Food Research International, 2019, 122: 174-182. DOI:10.1016/j.foodres.2019.04.007.

[4] LIU H, WANG Z, SULEMAN R, et al. Effect of protein thermal stability and protein secondary structure on the roasted mutton texture and colour from different cuts[J]. Meat Science, 2019, 156: 52-58. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.05.014.

[5] GKARANE V, ALLEN P, GRAVADOR R S, et al. Effect of castration and age at slaughter on sensory perception of lamb meat[J]. Small Ruminant Research, 2017, 157: 65-74. DOI:10.1016/j.smallrumres.2017.10.011.

[6] 张德权, 侯成立. 热鲜肉与冷却肉品质差异之管见[J]. 肉类研究, 2020, 34(5): 83-90. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200220-041.

[7] TOLENTINO G S, ESTEVINHO L M, PASCOAL A, et al. Microbiological quality and sensory evaluation of new cured products obtained from sheep and goat meat[J]. Animal Production Science, 2016, 57(2): 391-400. DOI:10.1071/an14995.

[8] 李明杨, 牛希跃, 许倩, 等. 新疆传统腌制对烤羊肉食用品质及杂环胺含量的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 115-123. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191130-322.

[9] KAEWTHONG P, WATTANACHANT C, WATTANACHANT S. Improving the quality of barbecued culled-dairy-goat meat by marination with plant juices and sodium bicarbonate[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(1): 333-342. DOI:10.1007/s13197-020-04546-8.

[10] SIMITZIS P, ZIKOU F, PROGOULAKIS D, et al. A note on the effects of yoghurt acid whey marination on the tenderness and oxidative stability of different meat types[J]. Foods, 2021, 10(11): 2557. DOI:10.3390/foods10112557.

[11] 姬晓颖, 马国源, 陈耀祥, 等. 腌制过程中亚硝酸钠对羊肉脂肪酸组成以及脂质氧化的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(5): 195-202. DOI:10.13432/j.cnki.jgsau.2020.05.023.

[12] VLAHOVA-VANGELOVA D B, DRAGOEVS G, BALEV D K, et al. Quality, microstructure, and technological properties of sheepmeat marinated in three different ways[J]. Journal of Food Quality, 2017, 2017: 1-10. DOI:10.1155/2017/5631532.

[13] XIN Keqi, JI Xiaoyin, GUO Zonglin, et al. Pitaya peel extract and lemon seed essential oil as effective sodium nitrite replacement in cured mutton[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 160: 113283. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113283.

[14] XU Hao, ZHANG Xikang, WANG Xu, et al. The effects of high pressure on the myofibrillar structure and meat quality of marinating Tan mutton[J]. Journal of Food Process Engineering, 2019, 42(6): 13138. DOI:10.1111/jfpe.13138.

[15] KRASNIKOVA E S, MORGUNOVA N L, KRASNIKOV A V, et al. Intensification of lamb salting process with low frequency ultrasound[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 845(1): 012075. DOI:10.1088/1755-1315/845/1/012075.

[16] 樊沙娜. 负离子电场中羊肉腌制工艺优化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020: 26-29. DOI:10.27229/d.cnki.gnmnu.2020.000052.

[17] 徐薇薇, 王振宇, 倪娜, 等. 羊肉脉动真空腌制工艺参数优化及腌制模型建立[J]. 食品科学, 2015, 36(14): 29-33. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201514006.

[18] SULEMAN R, WANG Z, AADIL R M, et al. Effect of cooking on the nutritive quality, sensory properties and safety of lamb meat: current challenges and future prospects[J]. Meat Science, 2020, 167: 108172. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108172.



- [19] JIA Wei, ZHANG Rong, LIU Li, et al. Proteomics analysis to investigate the impact of diversified thermal processing on meat tenderness in Hengshan goat meat[J]. Meat Science, 2022, 183: 108655. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108655.
- [20] CAMPO M M, MUELA E, OLLETA J L, et al. Influence of cooking method on the nutrient composition of Spanish light lamb[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2013, 31(2): 185-190. DOI:10.1016/j.jfca.2013.05.010.
- [21] LIU Huan, MA Jianrong, PAN Teng, et al. Effects of roasting by charcoal, electric, microwave and superheated steam methods on (non) volatile compounds in oyster cuts of roasted lamb[J]. Meat Science, 2021, 172: 108324. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108324.
- [22] 潘腾, 孟婷婷, 马建荣, 等. 烤羊腿过热蒸汽联合红外光波烤制工艺参数优化[J]. 肉类研究, 2018, 32(10): 19-25. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201810004.
- [23] 刘琴, 刘达玉, 唐仁勇, 等. 烤羊肉加工新工艺及其保藏特性的研究[J]. 食品科技, 2013, 38(5): 145-149. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2013.05.058.
- [24] SULEMAN R, HUI T, WANG Z, et al. Semi-quantitative and qualitative distinction of aromatic and flavour compounds in charcoal grilled, electric barbecue grilled, infrared grilled and superheated-steam roasted lamb meat patties using GC/MC, E-nose and E-tongue[J]. Separations, 2022, 9(3): 71. DOI:10.3390/separations9030071.
- [25] 姜三群. 羊肉串烤制中品质和有害物质变化规律及影响因素的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014: 43. DOI:10.7666/d.Y2697518.
- [26] 李宏燕, 何建国, 马莹, 等. 自然对流红外辐射复合加热在羊肉烤制过程中的传热解析[J]. 食品科学, 2017, 38(21): 61-66. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201721010.
- [27] POURKHALILI A, MIRLOHI M, RAHIMI E. Heme iron content in lamb meat is differentially altered upon boiling, grilling, or frying as assessed by four distinct analytical methods[J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 374030. DOI:10.1155/2013/374030.
- [28] 刘忠义, 刘文平, 谭操, 等. 明火熏烤对烤羊肉和驴肉安全性的影响[J]. 钦州学院学报, 2018, 33(8): 36-41. DOI:10.19703/j.bbgu.1673-8314.2018.08.0036.
- [29] JIN Guofeng, ZHANG Jianhao, YU Xiang, et al. Lipolysis and lipid oxidation in bacon during curing and drying-ripening[J]. Food Chemistry, 2010, 123(2): 465-471. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.05.031.
- [30] NOOSHKAM M, VARIDI M, VERMA D K. Functional and biological properties of Maillard conjugates and their potential application in medical and food: a review[J]. Food Research International, 2020, 131: 109003. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109003.
- [31] FAN Mengdie, XIAO Qunfei, XIE Jianchun, et al. Aroma compounds in chicken broths of Beijing Youji and commercial broilers[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66: 10242-10251. DOI:10.1021/acs.jafc.8b03297.
- [32] BASSAM S M, NOLETO-DIAS C, FARAG M A. Dissecting grilled red and white meat flavor: its characteristics, production mechanisms, influencing factors and chemical hazards[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131139. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.131139.
- [33] FLORES M. Understanding the implications of current health trends on the aroma of wet and dry cured meat products[J]. Meat Science, 2018, 144: 53-61. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.04.016.
- [34] 孔园园, 张雪莹, 李发弟, 等. 羊肉主要风味前体物质与羊肉风味的关系及影响因素的研究进展[J]. 农业生物技术学报, 2021, 29(8): 1612-1621. DOI:10.3969/j.issn.1674-7968.2021.08.018.
- [35] ELMORE J S, WARREN H E, MOTTRAM D S, et al. A comparison of the aroma volatiles and fatty acid compositions of grilled beef muscle from Aberdeen Angus and Holstein-Friesian steers fed diets based on silage or concentrates[J]. Meat Science, 2004, 68(1): 27-33. DOI:10.1016/j.meatsci.2004.01.010.
- [36] CHANG Chang, WU Gangcheng, ZHANG Hui, et al. Deep-fried flavor: characteristics, formation mechanisms, and influencing factors[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(9): 1496-1514. DOI:10.1080/10408398.2019.1575792.
- [37] FRANK D, KACZMARSKA K, PATERSON J, et al. Effect of marbling on volatile generation, oral breakdown and in mouth flavor release of grilled beef[J]. Meat Science, 2017, 133: 61-68. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.06.006.
- [38] FAN Naiyun, MA Xiang, LIU Guishan, et al. Rapid determination of TBARS content by hyperspectral imaging for evaluating lipid oxidation in mutton[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 103: 104110. DOI:10.1016/j.jfca.2021.104110.
- [39] 许宇振. 肉品中挥发性与非挥发性风味成分检测技术研究进展[J]. 肉类工业, 2021(9): 40-45. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2021.09.008.
- [40] 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. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.04.054.
- [41] GÖPEL W. Chemical imaging: I. concepts and visions for electronic and bioelectronic noses[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1998, 52(1): 125-142. DOI:10.1016/S0925-4005(98)00267-6.
- [42] JOHN A T, MURUGAPPAN K, NISBET D R, et al. An outlook of recent advances in chemiresistive sensor-based electronic nose systems for food quality and environmental monitoring[J]. Sensors, 2021, 21(7): 2271. DOI:10.3390/s21072271.
- [43] XU Yujun, ZHANG Dequan, CHEN Ruixia, et al. Comprehensive evaluation of flavor in charcoal and electric-roasted tamarix lamb by HS-SPME/GC-MS combined with electronic tongue and electronic nose[J]. Foods, 2021, 10(11): 2676. DOI:10.3390/foods10112676.
- [44] 高爽, 丁丹, 罗瑞明. 基于固相微萃取-气相色谱-质谱和电子鼻法的烤羊腿中可挥发性香气成分分析[J]. 肉类研究, 2020, 34(10): 40-46. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200812-198.
- [45] 王永瑞, 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210307-089.
- [46] GHADER M, SHOKOUFI N, ES-HAGHI A, et al. Headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) combined with GC-MS as a process analytical technology (PAT) tool for monitoring the cultivation of *C. tetani*[J]. Journal of Chromatography B, 2018, 1083: 222-232. DOI:10.1016/j.jchromb.2018.02.003.
- [47] 柏霜, 王永瑞, 罗瑞明, 等. 不同高温烹饪方式加工过程中滩羊肉风味化合物的差异比较[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 166-174. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200808-114.
- [48] 苏馨, 车天宇, 谢遇春, 等. 乌珠穆沁羊、杜泊羊和萨福克羊脂肪酸指纹图谱的建立[J]. 肉类研究, 2021, 35(8): 37-41. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210312-068.
- [49] INSAUSTI K, MURILLO-ARBIZU M T, URRUTIA O, et al. Volatile compounds, odour and flavour attributes of lamb meat from the navarra breed as affected by ageing[J]. Foods, 2021, 10(3): 493. DOI:10.3390/foods10030493.
- [50] XI Jiawei, ZHAN Ping, TIAN Honglei, et al. Effect of spices on the formation of VOCs in roasted mutton based on GC-MS and principal component analysis[J]. Journal of Food Quality, 2019, 2019: 1-11. DOI:10.1155/2019/8568920.
- [51] HE W, REN F, WANG Y, et al. Application of GC-IMS in detection of food flavor substances[J]. IOP Conference Series: Earth and

- Environmental Science, 2020, 545(1): 012030. DOI:10.1088/1755-1315/545/1/012030.
- [52] WANG Shuqi, CHEN Haitao, SUN Baoguo. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)[J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126158. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.126158.
- [53] 孟新涛, 乔雪, 潘俨, 等. 新疆不同产区羊肉特征风味成分离子迁移色谱指纹谱的构建[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 218-226. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190429-383.
- [54] 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): 1939-1947.
- [55] 张宗国, 陈东杰, 孟一, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱与电子鼻技术快速检测宁夏滩羊肉中掺假鸭肉[J]. 肉类研究, 2020, 34(12): 43-48. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201105-258.
- [56] 姚文生, 马双玉, 蔡莹萱, 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. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020060339.
- [57] SONG Huanlu, LIU Jianbin. GC-O-MS technique and its applications in food flavor analysis[J]. Food Research International, 2018, 114: 187-198. DOI:10.1016/j.foodres.2018.07.037.
- [58] LIU Huan, HUI Teng, FANG Fei, et al. The formation of key aroma compounds in roasted mutton during the traditional charcoal process[J]. Meat Science, 2022, 184: 108689. DOI:10.1016/j.meatsci.2021.108689.
- [59] LIU Huan, HUI Teng, FANG Fei, et al. Characterization and discrimination of key aroma compounds in pre- and postgrigor roasted mutton by GC-O-MS, GC E-nose and aroma recombination experiments[J]. Foods, 2021, 10(10): 2387. DOI:10.3390/foods10102387.
- [60] OLTRA O R, FARMER L J, GORDON A W, et al. Identification of sensory attributes, instrumental and chemical measurements important for consumer acceptability of grilled lamb *Longissimus lumborum*[J]. Meat Science, 2015, 100: 97-109. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.09.007.
- [61] 周智雯. 不同烹饪方式对羊肉品质及嘌呤含量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021: 54. DOI:10.27229/d.cnki.gnmnu.2021.000876.
- [62] WATKINS P J, KEARNEY G, ROSE G, et al. Effect of branched-chain fatty acids, 3-methylindole and 4-methylphenol on consumer sensory scores of grilled lamb meat[J]. Meat Science, 2014, 96: 1088-1094. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.08.011.
- [63] LIU Huan, HUI Teng, ZHENG Xiaochun, et al. Characterization of key lipids for binding and generating aroma compounds in roasted mutton by UPLC-ESI-MS/MS and Orbitrap Exploris GC[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131723. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.131723.
- [64] 马建荣, 潘腾, 王振宇, 等. 传统炭烤羊肉特征滋味成分解析[J]. 食品科技, 2019, 44(4): 110-116. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2019.04.021.
- [65] 席嘉佩, 詹萍, 田洪磊, 等. 基于SPME-GC-MS和PCA的不同萃取头对新疆烤羊肉香气成分萃取效果比较[J]. 食品科学, 2018, 39(10): 234-241. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201810036.
- [66] 邱珊莲, 李海明, 张少平, 等. 炉温和平衡时间对HS-GC-MS分析戴云山羊肉挥发性物质的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(17): 166-171. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.17.030.