

关海宁, 赵士发, 刘登勇, 等. 基于分子感官科学的肉制品风味研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 352-361. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040114

GUAN Haining, ZHAO Shifa, LIU Dengyong, et al. Research Progress of Meat Product Flavor Based on Molecular Sensory Science[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(6): 352-361. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040114

· 专题综述 ·

# 基于分子感官科学的肉制品风味研究进展

关海宁<sup>1,2</sup>, 赵士发<sup>1</sup>, 刘登勇<sup>1,\*</sup>, 刁小琴<sup>1,\*</sup>, 闵爽<sup>1</sup>

(1.渤海大学食品科学与工程学院, 辽宁省食品安全重点实验室, 生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术  
国家地方联合工程研究中心, 辽宁锦州 121013;

2.烹饪科学四川省高等学校重点实验室, 四川旅游学院, 四川成都 610100)

**摘要:** 肉制品中含有大量的风味化合物(主要为香气与滋味化合物), 然而只有极少部分影响着产品的最终风味。如何从大量的风味化合物中分离并鉴定出关键的香气或滋味化合物, 是肉制品风味及其品质研究的热点问题。分子感官科学是分析化学、食品感官评价科学等多学科交叉的一门系统科学, 其研究方法可以很好地解决上述问题。本文概述了分子感官科学在肉制品中的应用, 并对分子感官科学不同分析技术的优缺点进行了归纳总结, 同时对分子感官科学的评价方法进行了阐述, 突出了重组与缺失实验对于进一步确认关键风味组分的重要性, 为肉制品风味领域的研究、感官技术创新提供了一定的实践借鉴与理论依据。

**关键词:** 分子感官科学, 肉制品, 关键风味化合物, 气相色谱-质谱法, 气相色谱-嗅闻法, 液相色谱-质谱法

中图分类号: TS251.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)06-0352-10

本文网刊:

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023040114



## Research Progress of Meat Product Flavor Based on Molecular Sensory Science

GUAN Haining<sup>1,2</sup>, ZHAO Shifa<sup>1</sup>, LIU Dengyong<sup>1,\*</sup>, DIAO Xiaoqin<sup>1,\*</sup>, MIN Shuang<sup>1</sup>

(1.College of Food Science and Technology, Bohai University, Food Safety Key Lab of Liaoning Province, National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Jinzhou 121013, China;

2.Cuisine Science Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

**Abstract:** Meat products contain a large number of flavor compounds (mainly aroma and taste compounds), but only a few of them affect the final flavor of the product. How to isolate and identify the key aroma or taste compounds from a large number of flavor compounds is a hot issue in the research on the flavor and quality of meat products. Molecular sensory science is a systematic science that integrates analytical chemistry, food sensory evaluation and other disciplines. Its research methods can solve the above problems well. In this paper, the application of molecular sensory science in meat products and the advantages and disadvantages of different analytical techniques are summarized. Meanwhile, the evaluation methods of molecular sensory science are expounded, and the importance of recombination and deletion experiments to further confirm the key flavor components are highlighted. This review provides a certain practical reference and theoretical basis for the research in the field of meat flavor and sensory technology innovation.

**Key words:** molecular sensory science; meat product; key flavor compounds; gas chromatography-mass spectrometry (GC-

收稿日期: 2023-04-16

基金项目: 烹饪科学四川省高等学校重点实验室 2022 年度资助项目 (PRKX2022Z10); 辽宁省“揭榜挂帅”科技计划项目 (2022JH1/10900011, 2021JH1/10400033); 沈阳市关键技术攻关“揭榜挂帅”专项 (2022210706000280); 渤海大学博士科研启动基金项目 (05013/0520bs007)。

作者简介: 关海宁 (1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品功能性成分分析及肉制品加工技术, E-mail: hai.ning2001@163.com。

\* 通信作者: 刘登勇 (1979-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 肉品加工与质量安全控制、食品风味与感知科学, E-mail: jz\_dyliu@126.com。

刁小琴 (1979-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 肉品加工与质量安全控制, E-mail: diaoxiaoqing172@163.com。

MS); gas chromatography-olfactometry (GC-O); liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS)

风味是肉制品的一种基本感官特性,影响消费者的可接受性<sup>[1-2]</sup>,优良的风味可以刺激消费者的感觉和心理,进而提升消费者的购买欲望。风味包括滋味与气味,滋味物质是指水溶性的、相对分子质量较低的非挥发性化合物。例如游离氨基酸,其本身是一种重要的滋味物质,具有鲜、甜、苦等味道<sup>[3]</sup>。此外,大部分滋味物质还是挥发性风味物质的前体,参与美拉德等反应产生重要的香气物质,对食品的特征风味起到了重要作用<sup>[4]</sup>。迄今为止,已在肉制品中鉴定出大量的挥发性化合物,其中大部分是非贡献或者低贡献的香气化合物,只有少部分挥发性化合物影响肉制品的整体香味,称之为关键香气化合物<sup>[5]</sup>。

分子感官科学由 Peter Schieberle 教授于 2007 年提出,是分析化学、食品感官评价科学等多学科交叉的一门系统科学,它的核心是在分子水平上定性、定量描述,筛选出关键风味物质,并精确构建食品的风味重组物,以进一步验证食品中的关键风味化合物<sup>[6]</sup>。分子感官科学主要包括仪器检测分析技术以及感官评价两部分,通常是以气相色谱-质谱(Gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、气相色谱-嗅闻(Gas chromatography-olfactometry, GC-O)以及液相色谱-质谱(Liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)等仪器为基础,结合香气活性值(Odor-active value, OAV)或滋味活性值(Taste activity value, TAV)、风味重组与缺失实验以及感官评价,以确定食品中的关键风味成分。经过多年的发展,分子感官科学已成为肉制品风味分析中比较先进的系统应用技术,为识别肉制品的关键香气活性与滋味活性化合物提供了更好的方法。

本文详尽地综述了分子感官科学在肉制品风味分析中的研究与应用,总结了分子感官科学常用的仪器分析技术在肉制品风味研究中的应用及其优缺点,概括了分子感官科学的评价方法与基本步骤,为肉制品风味领域的研究、感官技术创新提供了一定的理论依据,为指导肉制品的加工,提高产品的品质提供了实践借鉴。

## 1 分子感官科学在肉制品中的应用概况

随着研究人员对肉制品风味不断地解析与探究,越来越多的分子感官科学新技术应用到各种肉制品风味的鉴别中,尤其是在发酵、酱卤、熏烤、腌腊等肉制品关键风味物质的鉴定中应用较为广泛。

在酱卤肉制品中, Song 等<sup>[7]</sup>利用 GC-MS 研究了两种红烧肉在感官和香气化合物方面的差异,发现有 17 种挥发性化合物的 OAV>1,其中戊醛、壬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、苯乙醛、十二醛和芳樟醇的 OAV 最高(>200),被认为是关键的风味物质。Yang 等<sup>[8]</sup>利用核磁共振对炖煮过程中酱猪肘的味道进行研究,最终发现炖煮 90 min 时感官评分值最高,氨基

酸、糖、有机酸等滋味活性物质在炖煮过程中发生变化,对酱猪肘的味道贡献较大;在熏烤肉制品中, Gasior 等<sup>[9]</sup>采用 GC-MS 技术测定了烤鹅肉的关键香气化合物,最初确定了 30 种香气化合物,并计算了这些化合物的 OAV,最终通过重组与缺失实验和感官评价,在 30 种香气化合物中确定出 9 种关键香气化合物,主要是醇、酮以及醛类化合物,认为对烤鹅肉的香气特征有显著贡献。Pu 等<sup>[10]</sup>对烟熏猪腿的关键挥发性成分进行分析,并结合 OAV、香气重组与缺失实验加以验证,最终确定了(E)-2-壬烯醛、2-甲氧基-4-乙炔基苯酚、愈创木酚等物质是其关键芳香化合物,并证实了 2-乙酰基-1-吡咯啉有助于产生烘烤香味,首次被描述为烟熏猪腿的关键气味物质。在油炸肉制品中, Qian 等<sup>[11]</sup>利用分子感官技术,评价了红烧乳鸽加工过程中腌制和油炸环节对乳鸽风味的影响,不仅准确地鉴定出原料、腌制品以及油炸肉中风味物质的种类,同时鉴定出苯甲醛、苯乙醛、辛醛等为主要挥发性香气成分,而庚醛、D-柠檬烯、苯乙烯为红烧鸽子特有的挥发性成分。此外,在发酵<sup>[12]</sup>以及腌腊肉制品<sup>[13]</sup>中也有较多的应用,并鉴定出了其关键的香气化合物。

综上所述,随着分子感官科学的发展,在分子层面上对肉制品风味有了更清楚的认识,可以鉴定出在肉制品中存在多种风味物质,并通过一定的感官评价手段,进一步对这些风味物质的重要性进行分析,为肉制品中关键风味物质的鉴别提供了科学方法。图 1 为研究人员利用分子感官科学技术鉴定出的不同肉制品的特征风味物质,由此可见,分子感官科学技术在甄辨肉制品关键风味的贡献,指导高品质肉制品的加工,以及探索其特征性滋气味的形成过程与机制,有着绝对的优势与作用。

## 2 分子感官科学的分析技术手段

分子感官科学是在分子水平上利用多学科交叉技术手段揭示复杂体系下食品气味与滋味产生的本质。在肉制品挥发性风味化合物研究中,仪器分析技术以 GC-MS 与 GC-O 的应用相对普遍,逐渐发展出综合二维气相色谱-质谱(Two-dimensional gas chromatography-mass spectrometry, GC×GC-MS)、综合二维气相色谱飞行时间质谱(Comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry, GC×GC-TOF/MS)、气相色谱-嗅觉-质谱(Gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, GC-O-MS)等仪器检测技术。在肉制品滋味物质研究中,以高效液相色谱法(High performance liquid chromatography, HPLC)、LC-MS、核磁共振技术(Nuclear magnetic resonance technology, NMR)普遍,随后液相色谱-串联质谱(Liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)、亲



图1 利用分子感官科学技术鉴定出肉制品的特征风味物质

Fig.1 Characteristic flavor substances identified in meat products using molecular sensory science and technology

注: 绘图软件为 Office 2016 中的 Excel 和 PowerPoint。

水相互作用液相色谱-质谱(Hydrophilic interaction liquid chromatography-mass spectrometry, HILIC-MS)等检测技术手段也成为表征肉制品滋味物质的有效途径, 分类形式与技术关联路径如图2所示。

### 2.1 风味物质的提取与分离技术

肉制品是一个复杂的食品体系, 想要精准分析其关键风味化合物, 必须采用精细的风味物质提取与分离技术。最常用香气物质的提取与分离技术主要有顶空固相微萃取(Headspace solid-phase micro-extraction, SPME)、溶剂辅助风味蒸发法(Solvent-assisted flavour evaporation, SAFE)、超临界流体萃取技术(Supercritical fluid extraction, SFE)以及同时蒸馏萃取(Simultaneous distillation extraction, SDE)。在肉制品挥发性风味物质的研究中, SPME是比较常用的提取方法, 它的优势是操作简单、提取方便、灵敏度高。Zang等<sup>[14]</sup>利用SPME结合GC-O-MS技术比较了七种五香牛肉的挥发性风味化合物, 最终鉴定出3-甲基-1-丁醇、芳樟醇、二甲基吡嗪和3-巯基噻吩等为七种五香牛肉的关键香气化合物。Yan等<sup>[15]</sup>使用SFE技术从道口烧鸡香料混合物中提取挥发油, 共提取出65种化合物, 相较于水法、乙醇法等传统方法, 其提取效率更高, 提取的挥发性风味物质更多。而对于SDE与SAFE技术而言, 由于其涉

及溶剂的使用, 往往需要消耗大量的时间和精力。尽管如此, Yeo等<sup>[16]</sup>在比较牛肉与鸡肉汤的香气物质时, 采用SDE技术提取了挥发性风味物质, 因为SDE技术能够很好的通过样品的原位加热来捕获烹饪过程中的香气中间体, 从而模仿肉类在高汤和炖菜中的烹饪, 最终发现大多数挥发性化合物是含硫化合物。而SAFE技术利用有机溶剂辅助挥发性风味物质快速蒸发, 从而可以分离难挥发、非挥发的组分, 是一种相对温和的挥发性风味物质提取方式。Du等<sup>[17]</sup>在研究烤羊肉串的关键风味物质的过程中, 采用SAFE技术结合GC-MS、GC-O技术以及香气重组与缺失实验鉴定出3-(甲硫基)丙醛、2-甲基-3-呋喃硫醇、2-乙酰基噻唑、2-糠基硫醇等关键香气物质。

关于滋味物质的提取, 不同的滋味物质采用不同的提取方法, 如氨基酸、核苷酸以及风味肽等都有其提取技术。例如Dang等<sup>[18]</sup>对金华火腿和巴马帕尔马火腿鲜味肽比较的研究中, 使用的凝胶色谱法对呈味肽进行分离纯化。

### 2.2 肉制品香气物质仪器检测分析技术

2.2.1 GC-MS GC-MS技术因其具备分离效率高、识别能力强、灵敏度高等特点<sup>[19]</sup>, 一直以来是肉制品挥发性化合物定性、定量分析的主要手段<sup>[4]</sup>。该技术

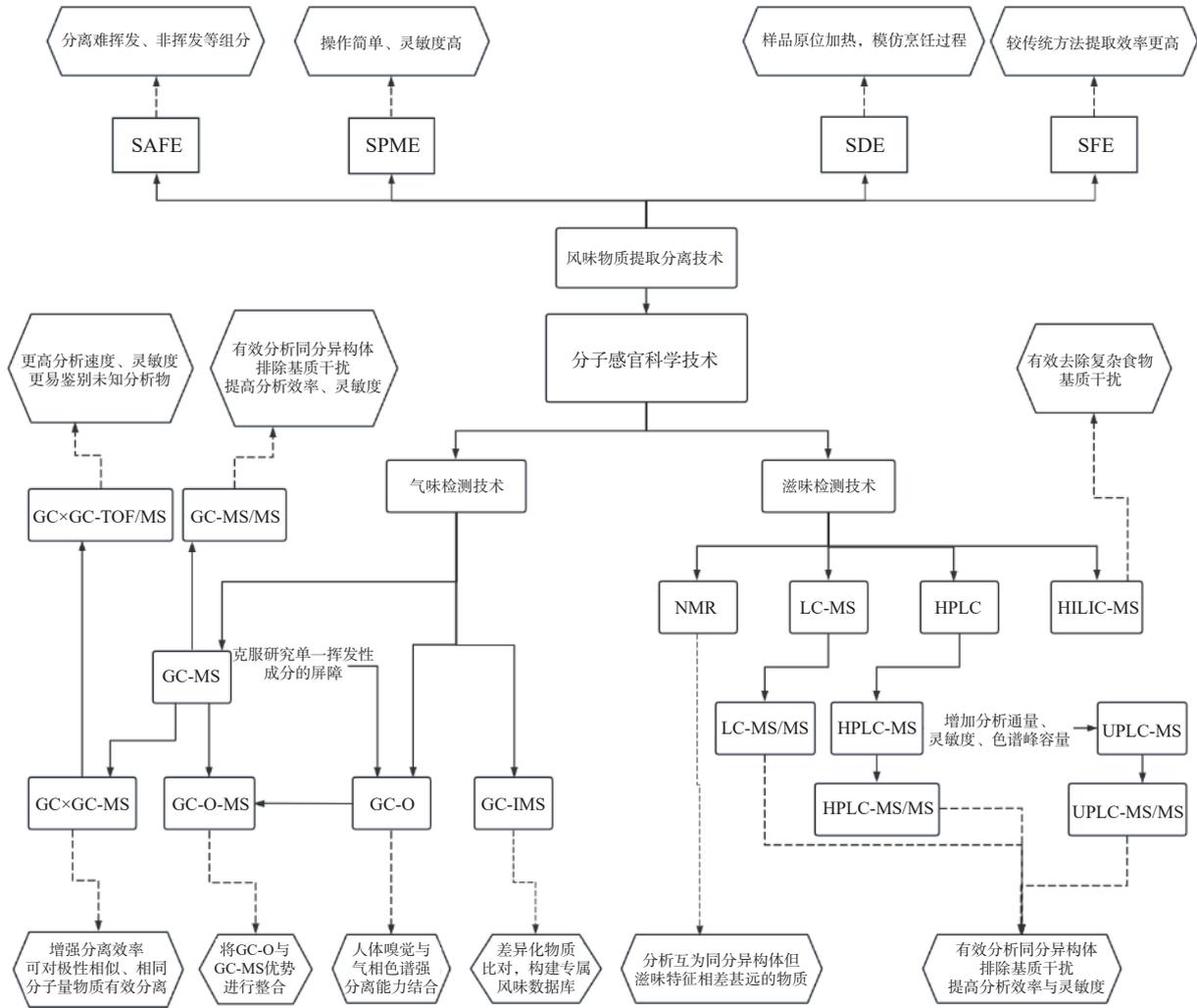


图 2 分子感官科学的仪器分析技术分类形式与技术关联路径

Fig.2 Classification form and technical correlation path of molecular sensory science

注: 绘图网站: www.processon.com; 气相色谱-串联质谱(Gas chromatography-tandem mass spectrometry, GC-MS/MS); 高效液相色谱-质谱(High performance liquid chromatography-mass spectrometry, HPLC-MS); 超高效液相色谱-质谱(Ultra-high performance liquid chromatography-mass spectrometry, UPLC-MS); 高效液相色谱-串联质谱(High performance liquid chromatography tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS); 超高效液相色谱串联质谱(Ultra high performance liquid chromatography tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)。

能有效鉴定组份生成、质量控制以及风味特征等诸多气味转变与形成的信息。Jiang 等<sup>[20]</sup> 利用顶空固相微萃取法结合 GC-MS 技术研究盐焗鸡关键香气时发现, GC-MS 准确地鉴定出 67 种风味化合物, 进一步结合香气阈值及 OAV 理论分析得出包括醛、醇、杂环、酯、酚等在内的 19 种挥发性成分为关键香气组分。

然而, 进一步的研究发现肉类组分中因其多种关键挥发性成分分子量与极性的相似性或其他原因, 限制了 GC-MS 的分离分析能力。因此研究人员为了解决上述问题, 提出了高分辨、高灵敏度和高峰值容量的综合二维气相色谱(Comprehensive two-dimensional gas chromatography, GC×GC)<sup>[21]</sup>, 同时, 它可以与质谱联用, 即 GC×GC-MS。更有学者将其与飞行时间质谱结合, 形成表征能力更强的 GC×GC-TOF/MS 技术等。Bueno 等<sup>[22]</sup> 为了揭示烧烤过程中释放的不同香气化合物对羊肉风味的影响, 采

用 GC×GC-MS 技术直接分析其香气化合物, 最终发现(E,E)-2,4-癸二烯醛和(E)-2-壬烯醛对烤羊肉的风味贡献较大。Zeng 等<sup>[23]</sup> 利用 GC-MS、GC×GC-TOF/MS 和 GC-IMS 等多种先进技术研究冬虫夏草鸡汤的挥发物, 结果发现, 与 GC-MS 相比较, 采用 GC×GC-TOF/MS 检测到鸡汤中更多的挥发性化合物, 其中在鉴定出的 260 种挥发物中, 醛类化合物比 GC-MS 检测到的多 1 倍。因此 GC×GC-TOF/MS 可以被认为是一种更有效的挥发性风味检测技术。

综合二维气相色谱的出现, 进一步促进了分子感官科学在肉制品挥发性风味物质研究中的应用, 进而能更精准地鉴定出肉制品中的关键香气组分。诸如 GC-MS/MS 依靠其高灵敏度以及强抗干扰能力的优点, 在肉制品中的应用越来越普遍。Zhao 等<sup>[24]</sup> 在黑猪肉汤的风味分析中采用 GC-MS/MS 技术, 借助标准品定量了 19 种气味活性化合物, 得出肉汤中主要挥发物是脂肪醛、脂肪酸、醇和酯类。与

传统的 GC-MS 检测技术不同, GC-MS/MS 在特异性、灵敏度和检测限方面更好。因此, GC-MS 与其相关技术的发展, 能够克服复杂样品分离过程中的多重限制, 甄辨出不同条件下的特征性挥发性化合物, 有效地评析风味产生及其变化规律。

**2.2.2 GC-O** GC-MS 这种间接的测量方法与其相关技术对样品风味揭示的“程序性”成为研究单一挥发性成分对整体风味贡献的屏障<sup>[25]</sup>。然而, GC-O 检测技术恰恰能够将气相色谱的强分离能力与人体灵敏的嗅觉相结合, 有效识别影响整个肉源香气的关键芳香化合物, 并确定其香气强度、香气的持续时间以及香气的类型<sup>[26]</sup>。Fan 等<sup>[27]</sup>采用 SDE 技术提取了北京油鸡和商品肉鸡鸡汤中的挥发性风味物质, 经 GC-O 分析, 在两种肉汤中发现的 71 种挥发性风味物质中, 关键气味主要包括含硫化合物和脂肪族醛, 如 2-甲基-3-呋喃硫醇、3-(甲硫基)丙醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛等。此外, 研究还发现北京油鸡肉汤比商品肉鸡肉汤多 32 种额外的气味, 进一步解释了前者香味更浓郁的产生机制。Du 等<sup>[17]</sup>利用 GC-O 技术对烤羊肉串的关键芳香化合物进行了研究, 共鉴定出 57 种香气物质, 主要有脂肪族醛、含硫化合物以及吡嗪, 对香气物质进行了定量与香气物质重组与缺失实验后, 发现了 (E)-2-辛烯醛、(E,Z)-2,6-壬二烯醛、2,5-二甲基吡嗪等烤羊肉串的关键香气物质。田怀香等<sup>[28]</sup>采用 GC-O 对金华火腿的气味活性化合物进行研究, 得出在长期发酵成熟过程中有 22 种风味化合物对整体风味有重要贡献。

虽然 GC-O 技术被用于分析鉴定食品中的芳香活性化合物, 但对挥发性化合物的定性分析并不有效<sup>[26]</sup>。于是, 研究人员将 GC-MS 与 GC-O 技术的优势相结合, 开发出了 GC-O-MS 技术。

**2.2.3 GC-O-MS** GC-O-MS 检测技术是 GC-O 和 GC-MS 优势的集合, 对于从多种挥发性成分中识别各芳香化合物组份的差异性, 辨析其香气浓度对感官的直接响应性具有绝对的优势<sup>[26]</sup>。Liu 等<sup>[29]</sup>研究了传统炭烤羊肉过程中关键香气物质, 利用 GC-O-MS 技术鉴定出炭烤羊肉串的 37 种挥发性风味物质, 再通过香气重组与缺失实验确定了其中 15 种关键的香气物质。Liu 等<sup>[30]</sup>研究了北京烤鸭的关键香气成分, 采用 GC-O-MS 技术、气味活性值和香气重组与缺失实验对北京烤鸭胸皮和胸肌中的主要香气成分进行了分析, 在 42 种香气化合物中, 18 种被鉴定为重要的 OAV 值大于 1 的气味物质。结合香气重组与缺失实验和感官评定, 鉴定出 9 种香气化合物对北京烤鸭的特征香气有显著贡献。谢恬等<sup>[31]</sup>利用 GC-O-MS 分析了五项驴肉风味活性物质, 鉴定出桉叶油醇、丁香酚、2,6-二甲基吡嗪等 21 种关键性风味活性物质。由此可见, GC-O-MS 检测技术搭建了特征性关键风味与感官属性强度之间的必然关联, 形成了物质含量的改变与感官属性变化的相关性, 从

而揭示高相关性物质对于风味的“把舵”以及对感官品质的“靶点”效应制约。

**2.2.4 GC-IMS** GC-IMS 技术是在大气压下分离离子, 利用电场中检测物质的离子迁移率, 得到的保留时间和迁移时间准确表征分析物, 并且可以通过离子迁移谱中离子信号峰的强度对分析物进行定量分析的技术手段<sup>[32]</sup>。Chen 等<sup>[33]</sup>为了解不同加工阶段干猪肉片的挥发性风味物质, 采用 GC-IMS 技术实时监测了五种加工阶段(生肉、混合肉、腌制肉、半成品肉和成品肉)的干猪肉片的挥发性风味物质, 结果表明干猪肉片中的挥发性风味物质主要包括醇、醛、酸、酮、杂环化合物、芳香烃和酯等, 有效区分了不同阶段的风味特性属性。Liu 等<sup>[12]</sup>在研究金华火腿的香气特征化合物时使用 GC-IMS 技术和电子鼻对金华火腿在陈化过程中三个阶段的挥发性成分进行分析, 结果证实随着陈化时间的推移, 醇、酮、醛类等物质含量增加, 有效分析了不同样本间风味物质的差异性。和其它检测技术相比, GC-IMS 的突出优势是快速分析, 携带轻便。除此之外, 能够较好地适应风味的释放和感知, 完成实时风味分析检测的需要与快速无损的表征<sup>[34]</sup>。

## 2.3 肉制品滋味物质仪器检测分析技术

**2.3.1 HPLC** 高效液相色谱法以液体作为流动相, 当待测样品进入流动相时, 流动相携带其通过填充有固定相的色谱柱, 在柱内各成分被分离后, 进入检测器进行检测, 从而实现对试样的分析<sup>[35]</sup>。由于高效液相色谱具有较好的分离效果, 在肉制品的滋味化合物分析中有着较为广泛的应用。Li 等<sup>[36]</sup>运用高效液相色谱法系统地比较了驴、猪、牛和羊颈部肉中鸟苷酸、次黄嘌呤、腺苷酸等几种核苷酸的含量与风味特征。研究发现 5'-肌苷酸(Inosine 5'-mono-phosphate, IMP)和单磷酸腺苷(Adenosine monophosphate, AMP)是驴颈肉味道最重要的核苷酸, 其颈肉的味道比羊和牛的味道更好。通过计算 TAV 值发现, 驴和猪中 IMP 的 TAV  $\geq 1$ , 表明 IMP 可能是驴颈和猪颈鲜味特征的显著贡献者, 而牛和羊颈部肉中的 IMP 具有的 TAV  $< 1$ , 不是主要风味核苷酸。Wang 等<sup>[37]</sup>研究了两种烹饪方法(炖和烤)对三黄鸡和乌骨鸡肉滋味成分的影响, 采用高效液相色谱法分析味觉活性化合物, 结果表明, 炖煮产生的苦味氨基酸含量显著低于烘烤样品, 而烘烤产生的鲜味氨基酸含量显著高于炖煮样品。为了解不同的灭菌方法对糖醋排骨风味成分的影响, Sun 等<sup>[38]</sup>利用高效液相色谱法系统的分析了超高压灭菌和辐照灭菌前后糖醋排骨的氨基酸、核苷酸与有机酸的含量。结果表明, 超高压灭菌可以提高风味氨基酸和无味氨基酸的含量, 降低苦味氨基酸的含量。超高压灭菌相比于辐照灭菌降低了核苷酸的损失, 并降低了有机酸含量, 从而增强了糖醋排骨的口感。

**2.3.2 LC-MS** LC-MS 技术一直以其能分析鉴定难

挥发、强极性及其热稳定性差的化合物而闻名<sup>[39]</sup>。Xiong 等<sup>[40]</sup>采用基于液相色谱-质谱的非靶向脂质组学方法,探讨放牧和畜栏饲养条件下脂质对牦牛肉质及挥发性风味物质的影响,利用 LC-MS 技术检测牦牛背最长肌的脂质谱,结合 GC-MS 鉴定出的挥发性风味物质,发现 TG(18:1/18:1/18:2)、TG(18:0/18:1/18:1)等对挥发性风味物质有着主要的影响,放牧饲养条件的牦牛肌肉中的挥发性风味物质更为多样化。HPLC 技术出现以后,为了适应研究人员更高的需求,衍生出了 UPLC 技术,其可以更快更高效的分离小分子物质<sup>[41]</sup>,通常与质谱技术联用对肉制品风味进行研究。如 Setyabrata 等<sup>[42]</sup>为研究牛肉风味相关化学成分以及在陈化过程风味的变化,对传统陈化、真空湿式陈化以及袋装陈化的牛肉进行 UPLC-MS 代谢组学分析,最终发现,相比于真空湿式陈化,干式陈化有着更高的蛋白质与核苷酸衍生代谢物。

与此同时,LC-MS/MS、HPLC-MS/MS、UPLC-MS/MS 等也成为较为常用的高效鉴定滋味物质组分的技术手段。HPLC-MS/MS、LC-MS/MS、UPLC-MS/MS 等串联质谱仪器检测技术相对于 LC-MS 技术具有更高的分辨率、灵敏度和峰值容量。杂环胺和多环芳烃广泛存在于食品中,Lai 等<sup>[43]</sup>对猪肉干中的杂环胺和多环芳烃提取后,运用 GC-MS/MS 与 UPLC-MS/MS 技术进行分析,研究了调味料和加工温度对多环芳烃和杂环胺生成的影响,最终发现 220 °C 烤制的猪肉干中多环芳烃的含量高于 180 °C 烤制的猪肉肉干,但不影响杂环胺的形成。

此外还有 HILIC-MS 技术,它是一种新兴的液相色谱分离模式,能够有效减小复杂食物基质的干扰,使基质效应减小<sup>[44]</sup>。由此可见,对于滋味性物质分子层面的分析,液质及其相关技术仍然是一种有效精准的分析技术手段。

**2.3.3 NMR** 相比于质谱检测技术而言,NMR 技术在分子感官领域可以分析肉制品中互为同分异构体但其滋味特征相差甚远的物质<sup>[45]</sup>。Zhang 等<sup>[46]</sup>在研究 5 种干腌火腿(金华、宣威、乡村、帕尔马和巴马)口味差异性时,用 NMR 技术来鉴定代谢物,共鉴定出 33 种滋味活性化合物,并有效区分出它们独特口味的分子根源。Yang 等<sup>[8]</sup>采用 NMR 波谱和多变量数据分析研究了不同炖煮时间对酱油炖猪肘代谢产物谱变化的影响,通过代谢产物的精准解析,结果显示基于 NMR 的代谢组学有助于更好地了解肉制品在炖煮过程中的变化,从而调整炖煮时间,以提供更好的味道和更高的肉制品品质。

尽管核磁共振与色谱相比具有很大的优势,但其灵敏度相对较低以及常出现光谱重叠,因此,限制了其可以观察到的代谢物种类与数量<sup>[44]</sup>。

### 3 分子感官科学的评价方法

随着分子感官科学的逐渐成熟,仪器检测更加灵敏、精准,与此同时多种感官评价手段与方法的更

新迭代,使得分子感官技术在肉制品关键风味的解析上独树一帜。关于 GC-O 技术的评价方法,根据原理的不同,包含香气提取物稀释分析法(Aroma extract dilution analysis, AEDA)、检测频率分析法(Detection frequency analysis, DFA)等<sup>[47]</sup>。其中 AEDA 法应用最多,但需要的时间比较长,而且需要对感官评价人员进行系统培训;DFA 法相对简单,但测定结果的准确度有待进一步提高。此外,对应于食品中香气化合物的评价方法:AEDA 法和 OAV 法,滋味物质的鉴定有滋味稀释分析法(Taste dilution analysis, TDA)以及 TAV 法。当某种香气或滋味物质的 OAV/TAV>1 时,意味着这种香气或滋味物质可能是一种关键的气味剂,至于是否真正的影响肉制品的整体风味,则需要进行香气物质的重组与缺失实验加以验证。通常情况下,分析肉制品挥发性风味物质的过程中,几种方法的联合应用可以增加实验结果的准确性和可靠度。

#### 3.1 AEDA 法

在 GC-O 分析肉制品风味的过程中,AEDA 法是一种最常见的评价手段,是依据 GC-O 监测每种挥发性化合物最低浓度的溶液对应的稀释倍数,即香气稀释因子(Flavor dilution, FD)<sup>[6]</sup>,FD 值越高,说明对应的稀释倍数越大,该挥发性化合物在肉制品中的浓度越高,对香气特征的贡献就越大<sup>[48]</sup>,因此可以根据各种香气物质的稀释因子对其进行排序,这样有助于精准判定构成香气的关键组分。Gasior 等<sup>[9]</sup>在烤鹅肉的关键香气成分的研究中使用 GC-O 分析与 AEDA 检测手段,通过将每种香气化合物与合适标准品比较,最终确定了 30 种挥发性化合物及其 FD 值。其中 1-辛烯-3-酮、2-乙酰基-1-吡咯啉以及 2-乙酰基-2-噻唑啉表现出最高的 FD 值,为关键香气化合物的鉴定提供了可靠的依据。Song 等<sup>[7]</sup>在对红烧肉的香气模式进行表征的研究中,通过 GC-MS 鉴定了 109 种挥发性风味化合物,随后利用 AEDA 法鉴定出 36 种香气活性化合物。上述研究均表明 AEDA 法对于香气贡献率的评价尤为重要。

然而,香气物质稀释分析法也有缺陷,它需要足够多的感官评价人员执行评估,分析时间长,如果为了节省人力、时间,那么它的准确性就会下降。此外,测试结果取决于挥发性化合物本身的阈值特性,而不是给定样品中分析物气味的实际强度<sup>[49]</sup>。

#### 3.2 DFA 法

DFA 法是一种在 GC-O 监测过程中,以香气物质对鼻子冲击频率(Nasal impact frequency, NIF)的大小来衡量这些物质对香气贡献的一种评价手段,NIF 值越高,意味着对整体香气的贡献越大<sup>[50]</sup>。Jiang 等<sup>[13]</sup>在对比四种中国干腌火腿香气活性成分的研究中采用了 DFA 分析方法,八名感官评价员评估和描述了 GC 设备分离的挥发性化合物,通过计算在分析期间能够感知到某一种气味的评估人员的数量,获得

每种气味的检测频率,求出对应的 NIF 值,结合其他的香气物质分析方法,最终从四种云南干腌火腿中共鉴定出 66 种挥发性化合物,其中醛类和烷烃类物质在所有四种火腿中贡献率最高。

但 DFA 法的局限性在于如果分析物中每一种挥发性化合物的浓度都高于其检测阈值,评估员总是会检测到它们,因此会得到相同的 DF 值,从而造成结果不准确<sup>[51]</sup>。

### 3.3 TDA 法

滋味稀释分析法(Taste dilution analysis, TDA)最初是在鉴定食品苦味物质时使用并沿用至今。Frank 等<sup>[52]</sup>为了表征美拉德反应后产生苦味的关键化合物,开发的一种新颖的滋味物质测定方法。将人的舌头作为检测器,检测出某种滋味物质的滋味阈值,根据计算得出 TAV 值再根据滋味物质重组与缺失实验鉴定关键的滋味物质。Ottinger 等<sup>[53]</sup>使用 HPLC 结合 TDA 法在研究赋予牛肉汤甜味的必需化合物时,发现存在阿拉吡啶的牛肉汤组相比于缺少阿拉吡啶组的甜度与鲜味显著增加,说明阿拉吡啶对牛肉汤的整体味道质量,特别是对甜味和鲜味特性表现出明显的影响。Dang 等<sup>[18]</sup>也利用 TDA 法的分析优势,比较了金华火腿和帕尔马火腿中水溶性鲜味肽的感官特性,结果发现二者的水溶性提取物有着相似的味道。由此可见,TDA 法在肉制品中滋味的差异性分析方面有着绝对的优势,但是值得注意的是,TDA 法仅适用于滋味活性成分的筛选,即定性分析,而不适用于滋味活性成分的定量分析<sup>[54]</sup>。

### 3.4 OAV/TAV

香气活度值是一种广泛而且有效的分析香气物质对食品贡献程度的方法,它是香气物质的浓度与其香气阈值的比值,当  $OAV \geq 1$  时,预示着此种物质对食品的整体香气有一定贡献。Xu 等<sup>[55]</sup>在对金华火腿的关键香气物质研究中,利用 OAV 筛选潜在的关键香气物质,结果在检测出的 56 种成分中甄选出 21 种关键香气挥发物,主要是醛、醇和酸等物质。Qi 等<sup>[56]</sup>在炖羊肉中的关键香气成分的研究中,通过仪器分析分离出 31 种芳香化合物,经定量计算其 OAV,发现 20 种芳香化合物的  $OAV \geq 1$ 。进一步通过香气重组和缺失实验发现壬醛、(E)-2-辛烯醛和 (E,E)-2,4-癸二烯醛对炖羊肉的香气贡献最大,成为炖羊肉关键的芳香化合物。因此,通过 OAV 法可以有效地定位关键挥发性风味物质,缩小关键香气物质的检索范围,也可进一步通过其它方法如香气重组与缺失实验验证 OAV 法定位关键香气物质的准确性,从而找出对食品的香气影响最大的挥发性风味物质。同样地,TAV 法也是如此,Xiang 等<sup>[57]</sup>在探究冷藏速率对生羊肉冷藏过程中挥发性和非挥发性物质演变的影响时,发现天冬氨酸、谷氨酸等滋味物质的  $TAV > 1$ ,被认定为关键的非挥发性化合物。然而,某种风味物质的  $OAV/TAV > 1$  不足以说明此种物质对

肉制品特征风味有重要贡献,还需进行香气或滋味物质重组实验加以验证,以提高实验结果的准确性与说服力。

### 3.5 香气/滋味重组与缺失试验

香气重组与缺失试验是建立在  $OAV \geq 1$  的基础上<sup>[28]</sup>,是通过可靠的风味重组与缺失模型进一步确认关键香味物质的分子组成<sup>[58]</sup>,其中省略模型系统与重组模型系统相似。但通常采用省略了一种风味的重组模型,如果二者经评定后,香气表现为显著不同,那么被省略掉的香气物质便是一种关键的香气成分<sup>[59]</sup>。Liu 等<sup>[60]</sup>在用 GC-O-MS 等技术和香气重组实验表征和鉴别烤羊肉前后的关键芳香化合物研究时,发现有 8 种香气物质的  $OAV \geq 1$ ,经香气重组与缺失模型的进一步验证,证实 3-甲基丁醛是烤制前后变化显著的风味物质。Liu 等<sup>[30]</sup>还通过 GC-O-MS、OAV 和芳香重组实验研究了北京烤鸭中的关键芳香化合物,结果表明包括醛类、含硫化合物以及醇类等 18 种  $OAV \geq 1$  的芳香化合物中,只有 9 种为关键香气化合物。此外,滋味物质的鉴定也可以通过重组与缺失试验证实关键滋味化合物。Sonntag 等<sup>[61]</sup>为了研究炖牛肉汤的口感,对牛肉汤中的滋味化合物进行了定量分析并开展了味觉重组实验,最终发现 N-(1-甲基-4-氧代咪唑啉-2-亚基)-R-氨基酸对牛肉汤的味道有显著的影响。

总而言之,香气/滋味重组与缺失试验是对关键风味组分的进一步辨析,能有效评价肉制品个性属性下的风味特性,合理有效的重组与缺失设计能够更加准确的识别肉源样本之间的风味关联以及独特的属性特征,能进一步说明风味形成机制,其分子感官分析的基本策略与流程如图 3 所示。

### 3.6 与其他分析手段的结合

分子感官技术往往只能单纯地鉴定形成肉制品风味的物质,然而,分子对接与分子动力学模拟<sup>[62-63]</sup>、碳水水化合物模块标记<sup>[64]</sup>、化学计量学<sup>[65]</sup>、多重光谱<sup>[66]</sup>、二元气味混合物<sup>[67]</sup>等方法的引入,能够更加精准的解析肉制品中的关键风味物质与其成分之间的作用机制。

Wang 等<sup>[62]</sup>使用 SPME-GC-MS 技术对顶空瓶中的挥发性化合物进行定量,通过分子对接和分子动力学模拟醛类化合物与猪肌原纤维蛋白之间的相互作用,证实了共价键、疏水相互作用、范德华力和氢键对其稳定性有很大的贡献。与此同时,Wang 等<sup>[63]</sup>还以相同的技术手段阐明了肌原纤维蛋白与酯的相互作用机制。此外,Zhao 等<sup>[64]</sup>在探究谷胱甘肽-葡萄糖与脂肪反应形成芳香化合物的机理时,采用碳水化合物模块标记证明了十种烷基链化合物确实是由脂质降解、美拉德反应相互作用产生。由此可见,多维度方法的结合能够有效地揭示肉制品中风味形成历程、香气的控释机理以及滋气味的贡献价值,是分子感官技术提升的重要体现。Wang 等<sup>[65]</sup>采用

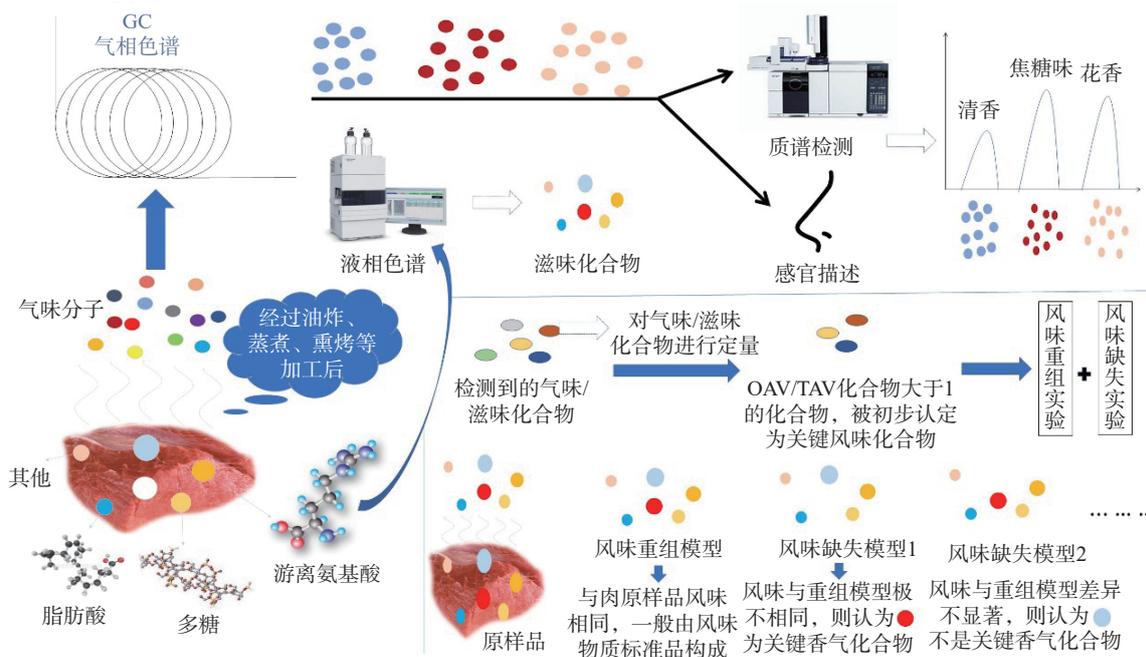


图 3 基于分子感官分析下风味重组与缺失试验的基本策略与流程

Fig.3 Basic strategy and process of flavor recombination and loss test based on molecular sensory analysis

注:绘图软件为 Office2016 中的 PowerPoint。

GC-MS 技术、电子鼻结合化学计量学对羊肉电烤过程中的关键香气成分进行分析鉴定,最后经 OAV 计算,确定了 13 种化合物为关键香气化合物。Wang 等<sup>[66]</sup>在探究猪肌原纤维蛋白与选定的酮类之间的相互作用时,通过多重光谱结合分子对接的方法,研究了肌原纤维蛋白与酮类化合物的结合能、作用力类型与结合位点,揭示了肌原纤维蛋白与酮类化合物相互作用的可能机制。为改善鸭肉的感官品质,促进鸭肉的多元化发展,Pu 等<sup>[67]</sup>采用感官组学方法和二元气味混合物分析法,对鸭肉汤中主要异味物质的识别和抑制进行了比较研究,重组与缺失实验证实反式-4,5-环氧-(E)-2-癸烯醛、(E)-2-辛烯醛、对甲酚、1-辛烯-3-醇和 4-甲基辛酸是鸭肉汤中的关键异味物质。

总之,分子感官科学能够与其他分析方法结合鉴定肉制品关键风味物质与风味物质之间的相互作用机制,然而,肉与肉制品基质复杂,分子感官科学技术在揭示肉制品基质中的某些物质与风味物质之间的相互作用方面仍存在局限性。

#### 4 结论与展望

随着分子感官科学的进一步发展以及鉴定技术的高精化,对于肉制品分子层面的风味研究会越来越多,不论是仪器检测技术还是感官评价方法,都存在其优势与局限性。研究者在分析肉制品的风味时,需要将各种方法科学合理的结合,以提高肉制品关键风味物质鉴定的精确度与可信度,更好地推进肉制品乃至整个食品领域的关键风味的研究,为肉制品加工以及生产实践提供科学有效的理论依据。与此同时,分子感官技术的创新也迫在眉睫,检测设备的提升、分析方法的优化将成为分子感官技术在肉制品风味评

鉴领域不断突破的方向。

#### 参考文献

- [1] AFZAL A, SAEED F, AFZAAL M, et al. The chemistry of flavor formation in meat and meat products in response to different thermal and non-thermal processing techniques: An overview[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(10): 16847.
- [2] FU Y H, CAO S, YANG L, et al. Flavor formation based on lipid in meat and meat products: A review[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2022, 46(12): 14439.
- [3] MENG Q, ZHOU J W, GAO D, et al. Desorption of nutrients and flavor compounds formation during the cooking of bone soup[J]. *Food Control*, 2022, 132: 108408.
- [4] SOHAIL A, AL-DALALI S, WANG J N, et al. Aroma compounds identified in cooked meat: A review[J]. *Food Research International*, 2022, 157(10): 111385.
- [5] WANG Y R, LUO R M, WANG S L. Water distribution and key aroma compounds in the process of beef roasting[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 978622.
- [6] GREGER V, SCHIEBERLE P. Characterization of the key aroma compounds in apricots (*Prunus armeniaca*) by application of the molecular sensory science concept[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(13): 5221-5228.
- [7] SONG S Q, FAN L, XU X D, et al. Aroma patterns characterization of braised pork obtained from a novel ingredient by sensory-guided analysis and gas-chromatography-olfactometry[J]. *Foods*, 2019, 8(3): 87-94.
- [8] YANG Y, PAN D D, SUN Y Y, et al. 1H NMR-based metabolomics profiling and taste of stewed pork-hock in soy sauce[J]. *Food Research International*, 2019, 121: 658-665.
- [9] GASIOR R, WOJTYCZA K, MAJCHER M A, et al. Key aroma compounds in roasted white kohuda goose[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(21): 5986-5996.
- [10] PU D D, ZHANG Y Y, ZHANG H Y, et al. Characterization of the key aroma compounds in traditional hunan smoke-cured pork

- leg (Larou, THSL) by aroma extract dilution analysis (AEDA), odor activity value (OAV), and sensory evaluation experiments[J]. *Foods*, 2020, 9(4): 413.
- [ 11 ] QIAN M, ZHENG M Y, ZHAO W H, et al. Effect of marinating and frying on the flavor of braised pigeon[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2021, 45(3): 15219.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] JIANG S, XIA D, WANG X M, et al. Analysis of aroma-active compounds in four Chinese dry-cured hams based on GC-O combined with AEDA and frequency detection methods[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 153: 112497.
- [ 14 ] ZANG M W, WANG L, ZHANG Z Q, et al. Comparison of volatile flavor compounds from seven types of spiced beef by headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry (HS-SPME-GC-O-MS)[J]. *Food Science and Technology Research*, 2020, 26(1): 25-37.
- [ 15 ] YAN Z L, WANG C L, HOU L H, et al. Extraction of oleoresin from Dao-Kou roasted chicken flavor spice blends using supercritical carbon dioxide[J]. *Food Analytical Methods*, 2017, 10: 900-909.
- [ 16 ] YEO H Q, BALAGIANNIS D P, KOEK J H, et al. Comparison of odorants in beef and chicken broth—focus on thiazoles and thiazolines[J]. *Molecules*, 2022, 27(19): 6712.
- [ 17 ] DU W B, ZHEN D W, WANG Y T, et al. Characterization of the key odorants in grilled mutton shashlik with or without suet brushing during grilling[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2021, 36(1): 111-120.
- [ 18 ] DANG Y L, GAO X C, MA F M, et al. Comparison of umami taste peptides in water-soluble extractions of Jinhua and Parma hams[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(2): 1179-1186.
- [ 19 ] VERMA D K, SRIVASTAV P P. A paradigm of volatile aroma compounds in rice and their product with extraction and identification methods: A comprehensive review[J]. *Food Research International*, 2020, 130: 108924.
- [ 20 ] JIANG H, ZHANG M T, YE J J, et al. HS-SPME-GC-MS and OAV analyses of characteristic volatile flavour compounds in salt-baked drumstick[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 170: 114041.
- [ 21 ] YU M G, YANG P, SONG H L, et al. Research progress in comprehensive two-dimensional gas chromatography-mass spectrometry and its combination with olfactometry systems in the flavor analysis field[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022: 104790.
- [ 22 ] BUENO M, CAMPO M M, CACHO J, et al. A model explaining and predicting lamb flavour from the aroma-active chemical compounds released upon grilling light lamb loins[J]. *Meat Science*, 2014, 98(4): 622-628.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] ZHAO J, WANG M, XIE J C, et al. Volatile flavor constituents in the pork broth of black-pig[J]. *Food Chemistry*, 2017, 226: 51-60.
- [ 25 ] 张青, 王锡昌, 刘源. GC-O 法在食品风味分析中的应用[J]. *食品科学*, 2009, 30(3): 284-287. [ ZHANG Q, WANG X C, LIU Y. Application of GC-O method in food flavor analysis[J]. *Food Science*, 2009, 30(3): 284-287. ]
- [ 26 ] SONG H L, LIU J B. GC-O-MS technique and its applications in food flavor analysis[J]. *Food Research International*, 2018, 114: 187-198.
- [ 27 ] FAN M D, XIAO Q F, XIE J C, et al. Aroma compounds in chicken broths of Beijing Youji and commercial broilers[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(39): 10242-10251.
- [ 28 ] 田怀香, 王璋, 许时婴. GC-O 法鉴别金华火腿中的风味活性物质[J]. *食品与发酵工业*, 2004, 30(12): 117-123. [ TIAN H X, WANG Z, XU S Y. Characterization of odor-active compounds in Jinhua Ham by GC-Olfactometry[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2004, 30(12): 117-123. ]
- [ 29 ] LIU H, HUI T, FANG F, et al. The formation of key aroma compounds in roasted mutton during the traditional charcoal process[J]. *Meat Science*, 2022, 184: 108689.
- [ 30 ] LIU H, WANG Z Y, ZHANG D Q, et al. Characterization of key aroma compounds in Beijing roasted duck by gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, odor-activity values, and aroma-recombination experiments[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(20): 5847-5856.
- [ 31 ] 谢恬, 王丹, 马明娟, 等. OAV 和 GC-O-MS 法分析五香驴肉风味活性物质[J]. *食品科学*, 2018, 39(8): 123-128. [ XIE T, WANG D, MA M J, et al. Identification of flavor-active compounds in spiced donkey meat by odor activity value (OAV) calculation and gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry[J]. *Food Science*, 2018, 39(8): 123-128. ]
- [ 32 ] GARRIDO-DELGADO R, ARCE L, GUAMAN A V, et al. Direct coupling of a gas-liquid separator to an ion mobility spectrometer for the classification of different white wines using chemometrics tools[J]. *Talanta*, 2011, 84(2): 471-479.
- [ 33 ] CHEN M J, CHEN T, QI X P, et al. Analyzing changes of volatile components in dried pork slice by gas chromatography-ion mobility spectroscopy[J]. *CyTA-Journal of Food*, 2020, 18(1): 328-335.
- [ 34 ] WANG S Q, CHEN H T, SUN B G. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)[J]. *Food Chemistry*, 2020, 315: 126158.
- [ 35 ] GALANT A L, KAUFMAN R C, WILSON J D. Glucose: Detection and analysis[J]. *Food Chemistry*, 2015, 188: 149-160.
- [ 36 ] LI X, AMADOU I, ZHOU G Y, et al. Flavor components comparison between the neck meat of donkey, swine, bovine, and sheep[J]. *Food Science of Animal Resources*, 2020, 40(4): 527.
- [ 37 ] WANG L H, QIAO K N, DING Q, et al. Effects of two cooking methods on the taste components of Sanhuang chicken and black - bone silky fowl meat[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(11): 13772.
- [ 38 ] SUN Y, ZHANG L L, ZHANG H, et al. Effects of two sterilization methods on the taste compositions of sweet and sour spare ribs flavor[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 104: 104143.
- [ 39 ] ASZYK J, BYLINSKI H, NAMIENSKI J, et al. Main strategies, analytical trends and challenges in LC-MS and ambient mass spectrometry-based metabolomics[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2018, 108: 278-295.
- [ 40 ] XIONG L, PEI J, WANG X D, et al. Effect of lipids in yak

- muscle under different feeding systems on meat quality based on untargeted lipidomics[J]. *Animals*, 2022, 12(20): 2814.
- [ 41 ] GUMUŁKA P, ŻANDAREK J, DĄBROWSKA M, et al. UPLC technique in pharmacy-An important tool of the modern analyst[J]. *Processes*, 2022, 10(12): 2498.
- [ 42 ] 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.
- [ 43 ] LAI Y W, LEE Y T, CAO H, et al. Extraction of heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons from pork jerky and the effect of flavoring on formation and inhibition[J]. *Food Chemistry*, 2023, 402: 134291.
- [ 44 ] TANG D Q, ZOU L, YIN X X, et al. HILIC-MS for metabolomics: An attractive and complementary approach to RPLC-MS[J]. *Mass spectrometry reviews*, 2016, 35(5): 574–600.
- [ 45 ] 张燕红, 尹军峰, 刘政权, 等. 分子感官科学技术在茶叶风味上的应用研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(22): 5922–5929. [ ZHANG Y H, YIN J F, LIU Z Q, et al. Research progress on the application of molecular sensory science and technology in tea flavor[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2018, 9(22): 5922–5929. ]
- [ 46 ] ZHANG J, YE Y F, SUN Y Y, 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.
- [ 47 ] GOU M, BI J F, CHEN Q Q, et al. Advances and perspectives in fruits and vegetables flavor based on molecular sensory science[J]. *Food Reviews International*, 2021: 1–14.
- [ 48 ] XIAO M J, ZHENG F L, XIAO M X, et al. Contribution of aroma - active compounds to the aroma of Lu'an Guapian tea[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2022, 37(2): 83–95.
- [ 49 ] PLUTOWSKA B, WARDENCKI W. Application of gas chromatography-olfactometry (GC-O) in analysis and quality assessment of alcoholic beverages-A review[J]. *Food chemistry*, 2008, 107(1): 449–463.
- [ 50 ] 徐玉霞, 王羽桐, 谢建春. 烤牛肉饼香气成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(11): 259–267. [ XU Y X, WANG Y T, XIE J C. Analysis of aroma compounds in roast beef patty[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(11): 259–267. ]
- [ 51 ] CHENG H, QIN Z H, GUO X F, et al. Geographical origin identification of propolis using GC-MS and electronic nose combined with principal component analysis[J]. *Food Research International*, 2013, 51(2): 813–822.
- [ 52 ] FRANK O, OTTINGER H, HOFMANN T. Characterization of an intense bitter-tasting 1 H, 4 H-quinolizinium-7-olate by application of the taste dilution analysis, a novel bioassay for the screening and identification of taste-active compounds in foods[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(1): 231–238.
- [ 53 ] OTTINGER H, HOFMANN T. Identification of the taste enhancer alapyridaine in beef broth and evaluation of its sensory impact by taste reconstitution experiments[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(23): 6791–6796.
- [ 54 ] NI Z J, WEI C K, ZHENG A R, et al. Analysis of key precursor peptides and flavor components of flaxseed derived Maillard reaction products based on iBAQ mass spectrometry and molecular sensory science[J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 13: 100224.
- [ 55 ] XU Y, SHUI M Z, CHEN D, et al. Optimization of jinhua ham classification method based on volatile flavor substances and determination of key odor biomarkers[J]. *Molecules*, 2022, 27(20): 7087.
- [ 56 ] QI S S, WANG P, ZHAN P, et al. Characterization of key aroma compounds in stewed mutton (goat meat) added with thyme (*Thymus vulgaris* L.) based on the combination of instrumental analysis and sensory verification[J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131111.
- [ 57 ] XIANG C, LI S B, LIU H, et al. Impact of chilling rate on the evolution of volatile and non-volatile compounds in raw lamb meat during refrigeration[J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2792.
- [ 58 ] LI C, AI-DALAL S, WANG Z P, et al. Investigation of volatile flavor compounds and characterization of aroma-active compounds of water-boiled salted duck using GC-MS-O, GC-IMS, and E-nose[J]. *Food Chemistry*, 2022, 386: 132728.
- [ 59 ] CHEN F X, SHEN L W, SHI X J, et al. Characterization of flavor perception and characteristic aroma of traditional dry-cured fish by flavor omics combined with multivariate statistics[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 173: 114240.
- [ 60 ] LIU H, HUI T, FANG F, 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.
- [ 61 ] SONNTAG T, KUNERT C, DUNKEL A, et al. Sensory-guided identification of N-(1-methyl-4-oxoimidazolidin-2-ylidene)- $\alpha$ -amino acids as contributors to the thick-sour and mouth-drying orosensation of stewed beef juice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(10): 6341–6350.
- [ 62 ] WANG H T, ZHU J M, ZHANG H W, et al. Understanding interactions among aldehyde compounds and porcine myofibrillar proteins by spectroscopy and molecular dynamics simulations[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2022, 349: 118190.
- [ 63 ] WANG H T, GUAN H N, ZHANG H W, et al. Elucidation of interaction mechanisms between myofibrillar proteins and ethyl octanoate by SPME-GC-MS, molecular docking and dynamics simulation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 154: 112787.
- [ 64 ] ZHAO J, WANG T Z, XIE J C, et al. Formation mechanism of aroma compounds in a glutathione-glucose reaction with fat or oxidized fat[J]. *Food Chemistry*, 2019, 270: 436–444.
- [ 65 ] WANG Y R, LUO R M, WANG S L. Study on key aroma compounds in the electric roasting process of Tan mutton[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2022, 46(11): 17095.
- [ 66 ] WANG H T, ZHANG H W, LIU Q, et al. Exploration of interaction between porcine myofibrillar proteins and selected ketones by GC-MS, multiple spectroscopy, and molecular docking approaches[J]. *Food Research International*, 2022, 160: 111624.
- [ 67 ] PU D D, SHAN Y M, ZHANG L L, et al. Identification and inhibition of the key off-odorants in duck broth by means of the sensomics approach and binary odor mixture[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(41): 13367–13378.