

热反应肉味香精风味检测方法研究进展

蔡施平¹, 张微漾², 易云昕², 赵海锋^{2*}

(1. 广东雅道生物科技有限公司, 肇庆 526238; 2. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广州 510640)

摘要: 热反应肉味香精对改善食品风味与质量至关重要, 是一种安全稳定且接受度高的食用香精, 但其成分复杂, 需要通过精确、无损、快速的检测方法进行提取与检测。本文概述了热反应肉味香精风味物质检测方法的基本原理及研究进展, 包括风味物质前处理方法及分离鉴定技术, 同时阐述了不同方法的优缺点与应用范围。热反应肉味香精风味物质的提取方法主要有顶空法、同时蒸馏萃取法、固相微萃取法、溶剂辅助风味蒸发法。对于风味物质的检测方法, 气相色谱-质谱法的应用最为广泛, 是热反应肉味香精检测方法发展的基础, 通过结合电子鼻、离子迁移谱等技术, 使热反应肉味香精检测的完整度与准确度进一步提高。此外, 随着选择离子流动管质谱法和生物传感等技术的发展, 实现了热反应肉味香精的痕量与定向监测。本综述为热反应肉味香精的风味检测提供了新的参考依据与技术支持, 拓宽了其在食品调味领域中的应用场景。

关键词: 热反应肉味香精; 分离提取; 风味检测; 质谱; 生物传感

Research progress of thermal process meat flavorings detection methods

CAI Shi-Ping¹, ZHANG Wei-Yang², YI Yun-Xin², ZHAO Hai-Feng^{2*}

(1. *Guangdong Yadao Biotechnology Co., Ltd., Zhaoqing 526238, China*; 2. *School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China*)

ABSTRACT: Thermal process meat flavorings are safe, stable and highly acceptable edible flavors, which are essential to improve the quality of food products. The utilization of precise, nondestructive and rapid extraction and detection methods are required due to the complex composition of thermal process meat flavorings. This review summarized the basic principle and research progress of the detection methods for thermal process meat flavorings, including flavor substance pretreatment methods and the technology of isolation and identification. Meanwhile, described the characteristic and application of different methods. Head space, simultaneous distillation, solid-phase micro-extraction and solvent assisted flavor evaporation were the main extraction methods of thermal process meat flavorings. For the detection methods of thermal process meat flavorings, gas chromatograph-mass spectrometer was the most widely used method, which was the basis for the development of thermal reactive flavor detection methods. The combination of gas chromatography-mass spectrometry with electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry could improve the completeness and accuracy of the detection for thermal process meat flavorings. In addition, trace and directional monitoring of thermal process meat flavorings have become a reality with the development of selected ion flow tube mass spectrometry and biosensors. This review provided a new reference and technical support for the flavor detection of thermal process meat flavorings, broadening its application

基金项目: 广州市科技计划项目(201903010056)

Fund: Supported by the Science and Technology Project of Guangzhou (201903010056)

*通信作者: 赵海锋, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品生物技术。E-mail: hfzhao@scut.edu.cn

*Corresponding author: ZHAO Hai-Feng, Ph.D, Professor, School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, No.381 Wushan Road, Tianhe District, Guangzhou 510640, China. E-mail: hfzhao@scut.edu.cn

scenarios in the field of food flavor.

KEY WORDS: thermal process meat flavorings; separation and extraction; flavor detection; mass spectrometry; biosensors

0 引言

热反应型香精是一种由食品原料和(或)允许在食品或反应香精中添加的原料加热制备的产物,具有较高的安全性^[1]。热反应香精的风味更接近于天然食物,且稳定性好,人们的接受度更高,但是以植物资源为原料制备的热反应香精特征香味不明显^[2],因此目前研究主要集中在以畜禽副产品为原料制备热反应肉味香精,特别是牛肉、猪肉、鸡肉等肉味香精^[3-5]。肉味香精主要用于增强肉制品的香味,掩蔽生产过程中产生的不良气味^[6]。此外,其还可用于植物基肉制品的调味,不仅可以降低生产成本,而且保证产品的风味、香味不减。

热反应肉味香精的风味物质较多,且常常具有含量少、易挥发等特点^[7],因此,常规提取、分析方法不能获取完整的风味物质信息,不利于热反应肉味香精的风味评价和呈味机制研究,灵敏而准确的检测方法对热反应肉味香精的风味物质分析尤为重要。热反应肉味香精风味成分的提取分析方法有顶空法^[8-10]、同时蒸馏萃取法^[11]、固相微萃取法^[12]、溶剂辅助风味蒸发法^[13]、气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)^[14]、电子鼻^[15]、气相-离子迁移谱法(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)^[16]、气相色谱-嗅闻-质谱法(gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, GC-O-MS)^[17]、全二维气相色谱-质谱法^[18-19]、选择离子流动管质谱法^[20]、生物传感法等^[21],这些方法单独使用时往往存在局限性,在检测热反应肉味香精风味物质时应根据被测样品的性质进行合理选择。

本文首先介绍了热反应肉味香精中的风味物质组成,随后,对风味物质的提取方法进行了概述,最后,综合比较了传统与新兴检测方法的优缺点和适用范围,以期热反应肉味香精的研发及其品质调控提供理论依据,实现热反应肉味香精风味的痕量与实时检测。

1 热反应肉味香精的风味物质

香精按照生产方式可以分为调配型、热反应型、调理型。调配型香精是采用天然或化学原料勾兑的香精,香气冲鼻、体香不饱满、回香差^[22]。热反应肉味香精主要通过还原糖与氨基酸之间的美拉德反应产生风味物质,此外还有脂肪的氧化、硫胺素的降解、氨基酸和肽的热降解、糖的焦糖化反应^[23]。因此,热反应香精的化学成分复杂,涵盖了醇类、醛类、酮类、酯类、酸类、呋喃、吡啶、吡嗪等将近

20 多种化合物,以肉类香精为例,热处理过程中就能产生 30 多种肉类风味物质,如表 1 所示^[24]。调理型香精是对热反应香精再进行调配,但是其留香时间短、热稳定性差^[22]。相比之下,热反应肉味香精热稳定性好、留香时间长且香味更接近天然物质,具有更广阔的工业应用前景。

表 1 反应中产生的肉类风味物质^[24]
Table 1 Meat flavor compounds in the reactions^[24]

反应过程	风味物质
美拉德反应	酮、醛、醇、呋喃、吡嗪、吡咯、噻吩、噻唑、咪唑、吡啶、恶唑、硫化物
脂肪氧化	脂肪族的烃、醛、酮、呋喃、醇、羧酸、内酯
硫胺素的降解	呋喃、呋喃硫醇、噻吩、噻唑和脂肪族含硫化物
氨基酸的降解	烃类、醛类、醇类、胺类、硫化氢、苯型化合物、噻吩、噻唑
肽的降解	氨基酸、吡嗪
糖的焦糖化	糠醛、呋喃衍生物、醇类、脂肪烃和芳香烃类

2 热反应肉味香精风味物质提取

热反应肉味香精的工艺及底物具有高度可选择性,制备过程中会发生许多呈味反应,因此热反应肉味香精的基质成分复杂,选择合适的样品前处理方法才能保障后续检测结果的准确度。本节将详细介绍 4 种提取方法的原理及其优缺点,包括顶空法、同时蒸馏萃取法、固相微萃取、溶剂辅助风味蒸发法。

2.1 顶空法

顶空法(headspace, HS)分为动态顶空取样(dynamic headspace, DHS)和静态顶空取样(static headspace, SHS)。SHS 是将待测物质放入密闭容器中,待挥发性成分从基质中释放进容器顶空后,取一定量的顶空气体注入气相色谱中分析。DHS 则利用惰性气体流从热的恒温样品表面进行吹扫,将基质的挥发性风味物质连续排出,当收集柱上聚集一定量的香气化合物,再将收集柱加热使香气化合物挥发出来,进行成分分析^[8-11]。

SHS 是一次萃取,挥发性成分能够有效保留,但存在萃取不完全的情况;DHS 是连续萃取,可以将挥发性成分完全萃取、浓缩,但在吸附和解吸的过程中可能造成样品组分的丢失。二者都适用于香精中高挥发、高含量与低沸点成分地提取,但 DHS 还可用于分析较高沸点的组分^[25]。郑旭等^[26]比较了固相萃取、吹扫捕集、DHS、SHS 共 4 种

顶空进样方式的萃取效率和能力, 相较于其他 3 种萃取方式, DHS 不仅能有效减少食品基质的影响, 还可以提高香精风味化合物的萃取效率。总体来说, 低成本的静态顶空取样更适用热反应肉味香精快速与粗略的提取, 而高成本的动态顶空取样灵敏度更高, 适用范围更广, 对复杂样品的萃取效果更佳。

2.2 同时蒸馏萃取法

同时蒸馏萃取法(simultaneous distillation extraction, SDE)的原理是同时对样品和溶剂加热处理, 风味成分挥发后和溶剂蒸汽一起冷凝, 香气成分被萃取后在 U 型管中分层, 两相回流烧瓶^[11]。吴昊等^[27]对自制牛肉香精的香气成分进行提取与浓缩时发现, SDE 更多地得到中、高沸点化合物。陈冠清等^[28]结合 SDE 和 DHS 两种前处理方法提取热反应猪肉香精的香味成分, 比单独使用 SDE 多检测到 10 种风味物质, 二者结合能够提高挥发物浓缩的浓度, 同时能够减少 SDE 浓缩过程中高挥发性化合物的损失。SONG 等^[29]用 SDE 和 DHS 提取热反应牛肉风味香精的风味物质, 通过气相-嗅闻法分析, 牛肉香精的关键香味成分都得到了完全萃取。因此, 在未来的实际应用中, 可以采取 SDE 和顶空法结合的方式进行热反应肉味香精的前处理, 弥补顶空法存在萃取过程中组分丢失的缺点, 更全面地获取风味活性物质。

2.3 固相微萃取法

固相微萃取法(solid-phase micro-extraction, SPME)是将附着萃取相的固体载体放置于液相或气相中提取挥发性物质^[12]。SPME 的萃取形式有很多, 如探针式、磁吸式、搅拌式等, 其中最经典的是探针式萃取。探针的固体载体上具有能吸收风味物质的涂层, 其可以和样品接触萃取, 也可以和顶空取样结合进行非接触式萃取, 取样后的探针可以直接进行后续风味物质检测。常规 SPME 纤维材质为石英, 耐久性差、使用寿命短^[30], 一定程度上限制了其应用。箭形 SPME 是将传统石英材质的 SPME 纤维改为金属材质, 机械强度高, 箭头形的尖端更容易刺穿样品的隔膜, 不仅延长了

吸附材料的寿命, 而且降低了检测限, 提高了回收率和重现性^[31], 在食品风味分析领域有广泛的应用^[32-34]。张宁等^[35]和曾世通等^[36]分别采用 SPME 和 SDE 两种方法进行风味分析的前处理, 检测效果证明了 SPME 对挥发性高、阈值低的化合物萃取效果较好, 且两种方法一起使用可以达到更好的分析效果。SPME 的萃取效果和探针结构与材质存在密切联系, 因此, 探针形状的改进与新型材料的应用可以大幅提高 SPME 的萃取效率和使用寿命。

2.4 溶剂辅助风味蒸发法

溶剂辅助风味蒸发法(solvent assisted flavour evaporation, SAFE), 在高真空条件下, 利用水或其他有机溶剂辅助挥发性风味物质的快速蒸发, 从而分离复杂基质中难挥发、非挥发的组分^[13], 是一种相对温和的提取方式, 且低温与高真空的分离环境能减少热敏挥发性成分的损失, 使得萃取物具有原有样品的自然风味^[37-38], 适用于感官分析^[39]。然而, SAFE 在提取风味物质时需要样品较多, 提取过程长且对人力需求较高。在 SAFE 提取过程中, 操作人员需要时刻关注装置情况, 手动控制开关阀门并监测冷阱中的液氮液位, 导致重现性差。目前已有学者进行 SAFE 装置自动化改进^[39], 但整体自动化程度仍然较低, 还需继续改进。此外, SAFE 提取时间较长, 无法高效快速的处理样品是制约其推广的另一重要因素, 因此, 设备自动化改进与提高效率是 SAFE 未来的优化方向, 同时也能推动难挥发物质提取技术的发展。

2.5 前处理方法对比

如表 2 所示, 顶空法设备简单、操作方便, 适用高挥发、高含量香味物质的提取, 在分析热反应肉味香精中主要呈味物质方面具有经济高效的优势, 但是顶空法对热反应肉味香精中微量物质的提取不完全, 易造成样品组分丢失^[24], 无法进一步分析微量的关键呈味物质。固相微萃取法可高效提取热反应肉味香精中的高挥发性、低阈值成分, 此法集采样、分离、富集、进样于一体, 不需要有机溶剂, 但分析结果极易受萃取相和基质影响^[26,29], 不同香精风味物

表 2 热反应肉味香精风味检测前处理方法比较

Table 2 Comparison of pretreatment methods for flavor detection of thermal process meat flavorings

提取方式	优点	缺点	适用范围	参考文献
顶空法	静态顶空	操作简单、挥发性成分不易丢失	高挥发、高含量成分的提取	[24-25]
	动态顶空	灵敏度高、挥发性成分萃取完全		
同时蒸馏法	少量溶剂就可萃取大量样品、环境友好	制备时间长、去除溶剂时会损失易挥发成分	中、高沸点成分的提取	[11,40]
固相微萃取法	集采样、分离、富集、进样于一体, 不需要有机溶剂	分析结果受萃取相和基质影响较大	高挥发性、低阈值成分的提取	[12,25,29]
溶剂辅助风味蒸发	分离条件温和	提取过程长、无法自动化、重现性差	低沸点、热敏性挥发成分的提取	[13,37-39]

质的分析需要建立不同的萃取工艺,导致工作量增加。对于热反应肉味香精中低挥发、高沸点成分的提取,主要采用同时蒸馏法,此方法兼备蒸馏与萃取功能,只需要少量溶剂就可萃取大量样品,是一种环境友好的绿色提取方式,然而提取过程温度高、时间长、易损失高挥发成分^[40]。溶剂辅助风味蒸发法可以在低温、高真空的温和条件下提取低沸点、热敏性挥发成分,得到的萃取物接近原始风味,但整个提取过程长、人力需求高、重现性差,需要继续优化装置^[13,37-39]。4种前处理方法适用的香精呈味成分存在重叠与互补,往往需要根据提取对象的性质和检测目的选择合适的处理方式,如针对具有不同沸点的样品分析,可结合同时蒸馏法与溶剂辅助风味蒸发法全面提取出风味物质,对于痕量风味物质的提取,应该首选固相微萃取法。

3 热反应肉味香精风味物质的检测

3.1 电子鼻

电子鼻是风味分析比较特别的一种方法。电子鼻的核心元件气体传感器与待测气体接触后,将气体分子在传感器表面的作用转化为可测的电信号,以此对气体分析^[15]。与普通化学分析仪器(如色谱仪、光谱仪、毛细管电泳仪)不同的是,它得到的不是热反应肉味香精中某种或某几种成分的定性或定量的结果,而是香精中挥发性成分的整体信息,也称“指纹信息”^[41-42]。它不仅可以根据各种不同的气味测到不同的信号,而且可以将这些信号与经训练后建立的数据库中的信号加以比较进行判断识别^[43],在品种鉴别^[44]、品质鉴定^[45]、风味分析^[46]、新鲜度检测^[47]等方面有广泛的应用。李迎楠等^[48]采用电子鼻技术发现了不同温度下香精整体风味的变化。王玉芬等^[49]和田怀香等^[50]均利用电子鼻技术对美拉德反应制备鸡肉香精的工艺进行优化,不仅简单快速,而且对环境友好,是一项绿色健康的检测技术。电子鼻技术虽然可以获取香精整体气味的信号,更接近人的感知,但需要与已知的数据库比对后才能定性判断,因此扩大数据库容量,完善各种气味的电信号是电子鼻技术未来需要重点关注的方向^[41-43],同时,与其他检测技术联用,才能实现热反应肉味香精风味物质定性定量分析。

3.2 色谱质谱法

GC-MS 是风味分析中最常用也是应用最广泛的分析方法。质谱是用来鉴别未知化合物最强有力的技术,分子量测定准确、灵敏度高、可与多种检测器联用。目前,这种方法在风味物质的检测和分析中都有广泛应用。宋焕禄等^[51-52]对制得的热反应鸡肉香精挥发性香味化合物进行 GC-MS 分析,共鉴定到 40 余种化合物,包括 2-甲基-3-呋喃硫醇系列关键性肉味化合物和 10 余种含硫香味化合物,该法适合易挥发物的风味物质的检测,是热反应肉味香精风味分析最常用的方法。辛然等^[53]用固相微萃取法结合 GC-MS 检测海鲜风味热反应香精的挥发性成分,发现了

不同干燥方式下香精的风味差异。

液相色谱-质谱法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)的适用范围与气相色谱互补^[14]。液相色谱的灵敏度和分离效率低于气相色谱,且气相色谱更适于分析气体和易挥发物质。因此 LC-MS 在热反应肉味香精风味检测中的应用不如 GC-MS 广泛。

3.2.1 气相-离子迁移谱法

离子迁移谱的分离原理是将样品在迁移管中加热气化,由载气带入电离区,在 Ni 的作用下发生电离反应和离子-分子反应,形成各种产物离子。具体分离过程如图 1 所示,离子从电场获得能量定向漂移进入迁移区,同时与逆向流动的中性迁移气体分子不断碰撞而损失能量,由于这些产物离子的质量、所带电荷、碰撞截面和空间构型各不相同,故在电场中各自迁移速率不同,使得不同的离子到达探测器上的时间不同而得到分离^[16]。离子迁移谱与气相色谱联用后,样品先在气相色谱中被分离为单独的组分,进入迁移管的时间不同,减少竞争电离。YANG 等^[54]采用 GC-IMS 结合电子鼻技术对兰茂牛肝菌美拉德产物的挥发性风味化合物分析,鉴定了 84 种化合物,其风味主要由醛类、酮类和醇类提供,美拉德反应使苯乙醛、辛醛、苯乙酮、大部分吡嗪类化合物浓度增加。DOU 等^[55]采用顶空法结合 GC-IMS 对比芝麻香精和芝麻油的风味成分,将 2-甲基丁酸、2-糠基硫醇、甲基吡嗪、蛋氨酸和 2,5-二甲基吡嗪定为芝麻香精的关键物质,可用于判断芝麻油的掺假情况。目前,随着香精基质越来越复杂,对离子迁移谱提出了更高的要求,出现了超高分辨离子迁移谱等技术,但离子迁移谱技术仍面临着分析时间长、离子热化效应等影响测量精度的问题,未来发展需要从技术串联方面着手,以克服离子迁移谱技术的自身局限性。

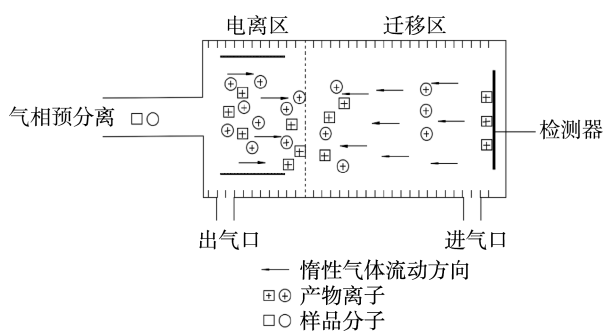


图 1 离子迁移谱示意图

Fig.1 Schematic diagram of the gas chromatography-ion mobility spectrometry

3.2.2 气相色谱-嗅闻-质谱法

气相-嗅闻法是一种从复杂混合物中筛选出香味活性组分非常有效的方法。将待测样品通过气相色谱分离后通入嗅闻仪(或以人鼻作为检测器)来评价样品的香味活性,从而定性分析香味物质^[17]。气相-嗅闻法和气相-质谱分开使用可能会使机器稳定性差,导致实验误差或错误,两部

分分开进行还会增加分析时间和工作量, 因此, GC-O-MS 应运而生, 将样品经气相色谱分离后按 1:1 的比例分别送入质谱和嗅闻检测口或者电子鼻中, 同时进行风味物质的定量检测和关键风味物质的确定。邓海莲等^[56]采用 GC-O-MS 探究酶解对美拉德反应香精风味物质的影响。徐欣如等^[57]采用 GC-O-MS 对热反应香精的挥发性风味物质进行鉴定和溯源。两位作者在试验中均采用毛细管 DB-WAX(极性柱)和 DB-5(非极性柱)进行化合物的分离与验证。为了将低浓度的关键风味物质分离、检测出来, 还会采用二维气相色谱-吸闻-质谱法进行痕量物质的检测^[58]。在通过嗅闻仪来评价样品的香味活性检测时, 结果极易受到环境和检测人员的影响, 主观性强、重复性差。因此, 可以通过联用电子鼻的方法将主观感官评价与客观仪器分析相结合, 更好地解释风味成分与感官体验之间的关系, 从而了解热反应肉味香精风味物质组成与构效关系。

3.2.3 全二维气相色谱-质谱法

全二维气相色谱-质谱法(comprehensive two-dimensional gas chromatography-mass spectrometer, GC×GC-MS)是在分离机制不同而又互相独立的两支色谱柱中间安装调制器, 将三者串联结合。样品在第 1 个色谱柱上分离出的每个馏分首先进入调制器聚焦, 然后脉冲送至第 2 个色谱柱上分离, 最终全部成分由第 2 个色谱柱送至检测器^[18-19]。信号经数据处理系统后, 得到三维色谱图或二维轮廓图。其峰容量是两根色谱柱峰容量的乘积, 分辨率是两色谱柱分辨率平方和的二次方根数^[59], 所以本技术在峰容量、灵敏度及分辨率等方面均有较大的优越性。它对于热反应肉味香精的分离、痕量物质的检测都极其有效^[60]。WANG 等^[61]采用全二维气相色谱-嗅闻-质谱法对热反应牛肉香精进行风味分析, 共鉴定出 231 种挥发性气味化合物, 3-甲基丁醛首次被确定为热反应牛肉香精中的关键气味活性化合物。ZHENG 等^[62]比较全二维气相色谱-飞行时间质谱法和 GC-MS 对风味挥发物的分离鉴定能力, 采用全二维气相色谱-飞行时间质谱法可以鉴定出 130 种风味物质, 比 GC-MS 多 42 种, 全二维气相色谱具有较好的分离效果。张喆等^[2]结合固相微萃取和全二维气相色谱-飞行时间质谱法分析肉味香精挥发性风味成分, 确定肉味的呈味物质主要是醛类、杂环类物质及含硫化合物, 明确了肉类香精的风味组成和特征性风味物质, 为肉味香精的质量控制、安全性评价提供依据。全二维气相色谱较传统气相色谱技术分离能力大幅增加, 同时也增大了分析结果的处理难度, 固态热调制器的出现, 使全二维气相色谱有望实现集成化和小型化, 从而更快地进入常规分析领域。

3.2.4 不同气相色谱-质谱方法对比

鉴于风味分析的样品一般为气体, 气相色谱比液相色谱更适用于热反应肉味香精挥发性风味物质的分析。如表 3 所示, 现阶段最常用的热反应肉味香精风味物质鉴定检测方法为 GC-MS, 在各种热反应肉味香精的风味物质检

测中均有应用, 具有分离效率高、分析速度快、分子量测定准确、灵敏度高优点。GC-IMS 在常压下进行工作, 接口简单且方便快捷, 使用成本低, 可以实现设备小型化, 特别适合于热反应肉味香精中挥发性有机化合物的痕量探测。与 GC-MS 相比, GC-IMS 的分离探测效果更好^[68]。在环境监测^[69]、食品鉴定^[70]与掺假^[71]、异味检测^[72]、食品加工过程的监测和食品储藏过程中香气变化的评价^[73]有着更出色的表现。GC-O-MS 是在 GC-MS 的基础上加入嗅闻仪或电子鼻, 可以同时进行风味物质的定量检测和关键风味物质的确定^[41-42,44], 快速地定性分析热反应肉味香精的关键风味物质, 避免气味物质的误检。全二维气相色谱-质谱法更加注重风味物质分离能力, 在峰容量、灵敏度及分辨率等方面均有更大的优势^[59], 对成分复杂的热反应肉味香精可以全面、细致地分离检测, 且检测阈值更低。以 GC-MS 为基础衍生出的风味物质分析方法普遍存在设备价格昂贵、维护成本高、操作复杂、较难实现实时现场检测等不足, 但由于其高效、灵敏、准确度高特点, 仍是热反应肉味香精风味分析的主流方法。因此, 低成本快速检测与高精度的痕量检测技术的研发应并行而行, 基于关键风味成分的定向分析是快速检测的突破方向, 提高热反应肉味香精风味物质的分离度并降低检测器的感应阈值是痕量检测技术的关键, 两种方向的研究进展将满足不同需求的样品检测, 进而推动热反应肉味香精真伪辨别、风味变化与呈味机制的研究。

3.3 新兴香精风味物质检测技术

3.3.1 选择离子流动管质谱法

选择离子流动管质谱法(selected ion flow tube-mass spectrometry, SIFT-MS)是一种灵敏度高(检出限为 10^{-12} g 级)、可以实时在线检测气体中痕量物质成分及其绝对浓度的仪器^[20]。其原理如图 2 所示, 微波放电离子源产生的正离子流经四极杆过滤获得给定质量电荷比的初始离子, 一般为 H_3O^+ 、 NO^+ 、 O_2^+ , 初始离子与载气碰撞去除多余的能量, 产生具有一致热能的试剂离子。样品被试剂离子电离以形成表征良好的产物离子。产物离子和未反应的试剂离子被采样到流动管下游端的第二个四极杆中过滤, 对选择出来的目标反应产物离子进行离子计数, 定量分析^[74]。

SIFT-MS 的取样方式为直接取样或顶空取样, 分析样品时, 无需进行样品富集或浓缩等预处理, 避免样品因预处理、吸附、受热等造成的变化和损失^[75]。SMITH 等^[76]发现, 与 GC-MS 相比, SIFT-MS 的样品通量提高了 4 倍, 作为替代分析工具显示出巨大的前景。因此, 该方法特别适用于测定难分离、热稳定性差的挥发物质^[77], 如生物体呼出气体^[78]、环境中气体^[79]等。相较于 GC-MS 等分析方法, SIFT-MS 可以跳过富集过程, 不仅避免风味物质损失, 而且能做到实时检测。热反应肉味香精由于其工艺的特殊性, 在制备过程中会损失一些热敏性关键风味物质, 通过 SIFT-MS 实时检测, 有助于确定香精制备过程中风味物质的变化, 为香精的呈味机制研究和品质调控提供科学依据。

表 3 基于不同检测方法的热反应肉味香精中挥发性风味物质的检出量

Table 3 Detected quantity of volatile flavor compounds in thermal process meat flavorings based on different detection methods

检测方法	优点	缺点	适用范围	香精种类	挥发性气 味化合物	化合物种类	参考 文献
GC-MS	分离效率高、分析速度快、灵敏度高	对于难挥发和热稳定的物质难以分析,无法识别关键挥发性化合物	用于气体和易挥发成分的分 离与检测	烟用美拉德 反应香精	27	杂环类、酯类、酮类、醇类、 有机酸	[63]
				热反应猪肉 香精	31	含硫化合物、含氮杂环、含氧 杂环、醛类、酮类、醇类	[64]
				热反应鸡肉 香精	56	醇类、醛类、酮类、酯类、芳 香族、呋喃、噻唑、吡嗪、吡 咯、其他化合物	[1]
				热反应牛肉 香精	57	醛类、醇类、酮类、酸类、呋 喃类、吡嗪类、吡咯类、吡啶 类、酚类、噻吩类、硫醚类、 其他化合物	[65]
GC-IMS	接口简单且方便快 捷、使用成本低	分析时间长、离子热 化效应影响测量精度	用于挥发性有 机化合物的痕 量探测	热反应虾味 香精	28	吡嗪、酮类、醛类、酸类、醇 类、胺类、其他化合物	[66]
				菇类美拉德 反应香精	84	醛类、醇类、酮类、酯类、吡 嗪类、酸类、呋喃类和其他化 合物	[54]
GC-O-MS	对关键气味物质的分 析更准确快速、避免 气味物质的误检	检测结果易受环境和 检测人员影响	同时进行风味 物质的定量检 测和关键风味 物质的确定	牛骨素热反 应香精	64	醛类、醇类、酮类、芳香族化 合物、酸类、烯类、呋喃类、 噻吩类、噻唑类、硫醇类、吡 嗪类、其他化合物	[57]
				热反应清炖 牛肉香精	42	烃类、醛类、醇类、酯类、酮 类、酸类、醚类、杂环类化合 物、其他化合物	[67]
GC×GC-MS	分离效果好、得到的 峰容量大、分辨率高	数据分析复杂、附属 设备较多、操作维护 复杂、运营费用高昂	用于复杂成分 的分离和痕量 物质的检测	鸡骨素美拉 德反应香精	70	醛类、醇类、酯类、酮类、含 氮硫杂环类、酸类、呋喃类、 酚类、其他化合物	[56]
				热反应牛肉 香精	231	醛类、酮类、醇类、酯类、呋 喃、吡嗪、含硫化合物、噻吩 类、噻唑类、其他化合物	[62]

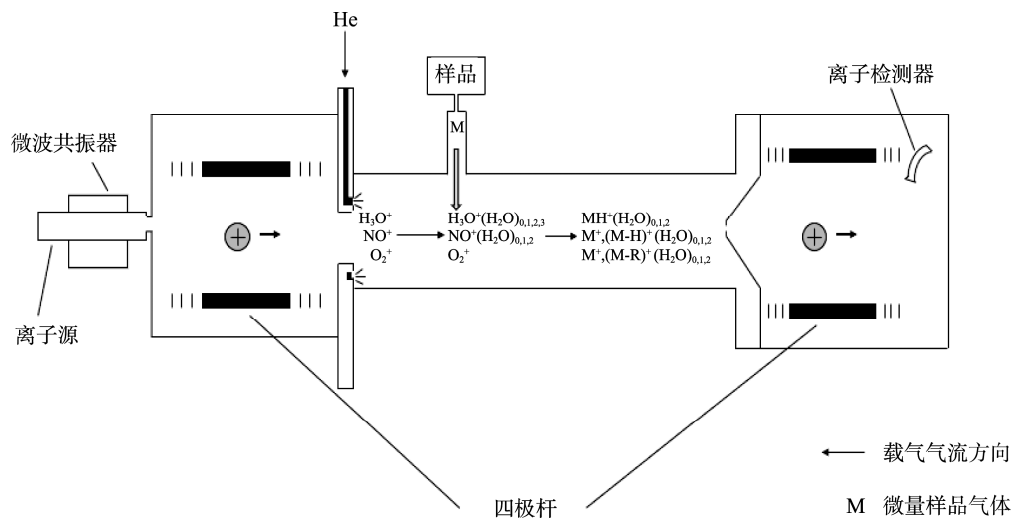


图 2 选择离子流动管质谱法原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the selected ion flow tube mass spectrometry

3.3.2 生物传感器

生物传感器是由生物敏感元件与信号转换器构成的分析装置^[21], 其识别元件是生物物质或者是仿生物物质(图 3)。生物传感器的检测原理是待测物质扩散进入生物活性材料, 经分子识别发生反应, 产生的信息被物理或化学换能器转变成可定量处理的电信号, 以此对被测物定量^[80-81]。生物受体只有与目标物质特异性结合才能生成信号, 因此生物传感器具有特异性强、响应速度快、灵敏度高的特点^[82], 可以用于香精中某类特征风味物质(如酯类^[83])的进一步分析, 基于味觉的感知机制, 选择合适的生物识别元件, 可实现对热反应肉味香精鲜味^[84]、苦味^[85]的定量检测, 且生物传感器易于实现设备小型化, 有望做到热反应香精风味物质的现场快速检测。生物传感器的工作原理决定了其具有高度特异性, 无法像 GC-MS 对多种风味物质做定性检测, 而是更多地用于某类确定物质的定量检测, 选择的生物元件合适与否决定了检测结果的准确度与完整性, 生物活性材料的开发成为制约生物传感器发展的重要因素, 同时也是实现未来热反应肉味香精快速检测的关键技术之一。

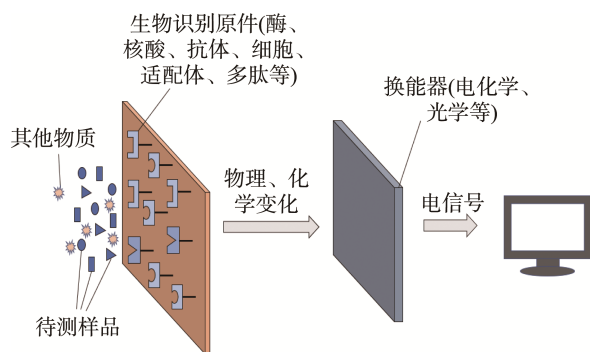


图 3 生物传感器原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of the biosensors

4 总结

热反应肉味香精作为一种食用安全、应用广泛的食物添加剂, 对食品风味调控具有重要作用。各种热反应香精由于制备工艺不同, 其特征性风味物质也不尽相同。因此完整度高、准确性好的提取检测方法对热反应肉味香精的风味物质分析尤为重要。通过 HS、SDE、SPME、SAFE 等方法提取风味物质, 使后续的检测更加高效准确。热反应肉味香精风味分析应用最多的检测方法是 GC-MS, 它可以快速、高效地得到香精中的风味化合物; GC-IMS, GC×GC-MS 等方法是在 GC-MS 的基础上发展而来, 具有优秀的分离能力, 更适合于香精中痕量物质与复杂成分的分析。相比于质谱的分离分析能力, 电子鼻技术侧重于获取热反应肉味香精整体的风味, 以及各香气对香精整体风味的贡献度, 与质谱联用可以更全面获取香精的呈味物质。

此外, 新兴的检测方法进一步推动了香精的定向检测与痕量研究, 生物传感器依靠其高选择性、灵敏、经济的特点, 在香精鲜味、苦味的定量研究方面具有更大优势。SIFT-MS 具备几乎无需样品预处理、高灵敏度、高通量的优点, 能高效获取反应过程中损失的热敏性关键风味物质。然而, 单一的检测方法不能满足热反应肉味香精风味分析的要求, 需要多种方法结合使用实现互补, 并结合统计学手段多维分析结果。未来, 分级检测更适合于香精风味物质的分析, 且随着分析技术的更新进步, 最终会形成一套快速、准确及低成本的检测体系, 不仅能推动热反应肉味香精真伪辨别、配方优化与呈味机制研究, 还为其他风味物质的检测提供参考借鉴。

参考文献

- [1] 孙敬, 杨二刚. 热反应制备天然鸡肉香精配方的改进及其风味成分的研究[J]. 肉类研究, 2009, (1): 40-47.
SUN J, YANG ERG. Improvement of the formula for chicken-like flavor prepared by Maillard reaction and the corresponding flavor compositions [J]. Meat Res, 2009, (1): 40-47.
- [2] 张喆, 钟莺莺, 汤海青, 等. 全二维气相色谱-飞行时间质谱法分析肉味香精挥发性风味成分[J]. 核农学报, 2016, 30(7): 1331-1341.
ZHANG Z, ZHONG YY, TANG HQ, et al. Analysis of volatile compounds of meat flavor essence through two comprehensive dimensional gas chromatography-time of flight mass spectrometry [J]. J Nucl Agric Sci, 2016, 30(7): 1331-1341.
- [3] 王文, 梁振. 平遥酱牛肉中美拉德反应的工艺研究[J]. 肉类工业, 2019, (10): 10-11.
WANG W, LIANG Z. Study on the technology of Maillard reaction in Pingyao spiced beef [J]. Meat Ind, 2019, (10): 10-11.
- [4] 孙梦. 天然牛肉风味香精制备及还原糖-氨基酸反应体系模拟探讨[D]. 成都: 西华大学, 2017.
SUN M. Preparation of natural beef flavor and simulation discussion of reducing sugar-amino acid reaction system [D]. Chengdu: Xihua University, 2017.
- [5] 柳倩. 猪血酶解物热反应制备猪肉香精及其风味改善研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
LIU Q. Study on preparation of pork flavor by porcine blood enzymatic hydrolysates based on thermal reaction and its flavor improvement [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [6] 颜治, 郑诗超, 幸治梅. 肉味香精及其在肉制品中的作用[J]. 肉类工业, 2004, (1): 39-42.
YAN Z, ZHENG SC, XING ZM. Meat flavor essence and its function in meat products [J]. Meat Ind, 2004, (1): 39-42.
- [7] 罗建玲, 罗玉芳, 程秀云. 食品风味分析技术研究进展[J]. 食品安全导刊, 2021, (3): 154, 156.
LUO JL, LUO YF, CHENG XY. Research progress of food flavor analysis technology [J]. Chin Food Saf Magaz, 2021, (3): 154, 156.
- [8] PILLONEL L, BOSSETT JO, TABACCHI R. Rapid preconcentration and enrichment techniques for the analysis of food volatile. A review [J]. LWT-Food Sci Technol, 2002, 35(1): 1-14.
- [9] SORIA AC, GARCIA-SARRIO MJ, SANZ ML. Volatile sampling by headspace techniques [J]. Trac-Trend Anal Chem, 2015, 71: 85-99.
- [10] KREMSER A, JOCHMANN MA, SCHMIDT TC. Systematic comparison of static and dynamic headspace sampling techniques for gas

- chromatography [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2016, 408(24): 6567–6579.
- [11] 安红梅, 尹建军, 张晓磊, 等. 同时蒸馏萃取技术在食品分析中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2011, 32(12): 216–220.
AN HM, YIN JJ, ZHANG XL, *et al.* Application of simultaneous distillation extraction in food analysis [J]. *Food Res Dev*, 2011, 32(12): 216–220.
- [12] BREVARD H, CANTERGIANI E, CACHET T, *et al.* Guidelines for solid-phase micro-extraction (SPME) of volatile flavour compounds for gas-chromatographic analysis, from the Working Group on Methods of Analysis of the International Organization of the Flavor Industry (IOFI) [J]. *Flavour Frag J*, 2010, 25(6): 404–406.
- [13] ENGEL W, BAHR W, SCHIEBERLE P. Solvent assisted flavour evaporation—a new and versatile technique for the careful and direct isolation of aroma compounds from complex food matrices [J]. *Eur Food Res Technol*, 1999, 209(3): 237–241.
- [14] 钱敏, 刘坚真, 白卫东, 等. 食品风味成分仪器分析技术研究进展[J]. *食品与机械*, 2009, 25(4): 177–181.
QIAN M, LIU JZ, BAI WD, *et al.* Research progress of instrumental analysis techniques for flavor substances in food [J]. *Food Mach*, 2009, 25(4): 177–181.
- [15] CHENG L, MENG QH, LILIENTHAL AJ, *et al.* Development of compact electronic noses: A review [J]. *Meas Sci Technol*, 2021, 32(6): 062002.
- [16] WANG SQ, CHEN HT, SUN BG. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. *Food Chem*, 2020, 315: 126158.
- [17] SONG HL, LIU JB. GC-O-MS technique and its applications in food flavor analysis [J]. *Food Res Int*, 2018, 114: 187–198.
- [18] 陈文婷. 全二维气相色谱技术应用研究进展[J]. *化学分析计量*, 2022, 31(8): 82–89.
CHEN WT. Research progress in application of comprehensive two-dimensional gas chromatography [J]. *Chem Anal Meter*, 2022, 31(8): 82–89.
- [19] 许国旺, 叶芬, 孔宏伟, 等. 全二维气相色谱技术及其进展[J]. *色谱*, 2001, (2): 132–136.
XU GW, YE F, KONG HW, *et al.* Technique and advance of comprehensive two-dimensional gas chromatography [J]. *Chin J Chromatogr*, 2001, (2): 132–136.
- [20] 王天舒. 选择离子流动管质谱及其在痕量气体分析中的应用[J]. *分析化学*, 2005, (6): 887–893.
WANG TS. The selected ion flow tube mass spectrometry and its applications to tracegas analysis [J]. *Chin J Anal Chem*, 2005, (6): 887–893.
- [21] 王婷婷. 生物传感器在食品安全检测中的应用[J]. *农业科技与装备*, 2022, (4): 46–47, 51.
WANG TT. Application of biosensor in food safety detection [J]. *Agric Sci Technol Eq*, 2022, (4): 46–47, 51.
- [22] 费英敏, 张根生, 董继生, 等. 肉用香精的分类与应用[J]. *农产品加工*, 2007, (4): 53–54.
FEI YM, ZHANG GS, DONG JS, *et al.* Classification and application of meat flavors [J]. *Farm Prod Process*, 2007, (4): 53–54.
- [23] 廖劲松, 齐军茹. Maillard 反应与食品风味物质(I)热反应肉类香精的研究[J]. *中国食品添加剂*, 2005, (3): 51–54.
LIAO JS, QI JR. Maillard reaction and food flavour materials (I) research of thermal process flavourings [J]. *China Food Addit*, 2005, (3): 51–54.
- [24] 母运龙, 柯欢, 郭添荣, 等. 肉味香精的制备及其风味形成机理的研究进展[J]. *中国调味品*, 2021, 46(10): 188–192.
MU YL, KE H, GUO TR, *et al.* Research progress on preparation and flavor formation mechanism of meat flavor essence [J]. *China Food Addit*, 2021, 46(10): 188–192.
- [25] 任西营. 食品风味分析技术研究进展[J]. *中国食品添加剂*, 2014, (7): 173–178.
REN XY. The research progress of food flavor analysis techniques [J]. *China Food Addit*, 2014, (7): 173–178.
- [26] 郑旭, 黄旭辉, 杜明, 等. 不同挥发性化合物萃取方法结合多同位素内标 GC-MS 定量检测的对比研究[C]. *中国食品科学技术学会*, 2018.
ZHENG X, HUANG XH, DU M, *et al.* Comparative study on extraction methods of different flavor compounds combined with multi-isotope internal standard GC-MS [C]. *Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018.
- [27] 吴昊, 许时婴. 牛肉风味料的香气成分[J]. *无锡轻工大学学报*, 2001, (2): 158–163.
WU H, XU SY. Volatile aroma components in beef flavoring [J]. *J Food Sci Biotechnol*, 2001, (2): 158–163.
- [28] 陈冠清, 宋焕禄, 张振波, 等. 热反应猪肉香精的制备及其气味活性化合物的鉴定[J]. *食品科学*, 2009, 30(8): 221–226.
CHEN GQ, SONG HL, ZHANG ZB, *et al.* Preparation of pork flavor via thermal reaction and identification of its aroma-active compounds [J]. *Food Sci*, 2009, 30(8): 221–226.
- [29] SONG HL, XIA LJ. Aroma extract dilution analysis of a beef flavouring prepared from flavour precursors and enzymatically hydrolysed beef [J]. *Flavour Frag J*, 2008, 23(3): 185–193.
- [30] 马小杰, 李明芳, 左安飞. 顶空-箭形固相微萃取-气相色谱-质谱法测定水中松节油的含量[J]. *理化检验-化学分册*, 2022, 58(7): 848–851.
MA XJ, LI MF, ZUO ANF. Determination of turpentine in water by GC-MS after headspace and solid phase micro-extraction arrow [J]. *Phys Test Chem Anal*, 2022, 58(7): 848–851.
- [31] HERRINGTON JS, GÓMEZ-RÍOS GA, MYERS C, *et al.* Hunting molecules in complex matrices with SPME arrows: A review [J]. *Separations*, 2020, 7(1): 12.
- [32] SONG NE, LEE JY, LEE YY, *et al.* Comparison of headspace-SPME and SPME-Arrow-GC-MS methods for the determination of volatile compounds in Korean salt-fermented fish sauce [J]. *Appl Biol Chem*, 2019, 62: 16.
- [33] TSAO WX, CHEN BH, LIN P, *et al.* Analysis of furan and its derivatives in food matrices using solid phase extraction coupled with gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Molecules*, 2023, 28(4): 1639.
- [34] CHEN MF, LAN HZ, PAN DD, *et al.* Hydrophobic mesoporous silica-coated solid-phase microextraction arrow system for the determination of six biogenic amines in pork and fish [J]. *Foods*, 2023, 12(3): 578.
- [35] 张宁, 陈海涛, 孙宝国, 等. 固相微萃取和同时蒸馏萃取方法比较传统腊牛肉的风味成分[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(6): 247–258.
ZHANG N, CHEN HT, SUN BG, *et al.* A comparison of solid-phase microextraction with simultaneous distillation for the analysis of volatile aroma compositions in traditional preserved beef [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2016, 16(6): 247–258.
- [36] 曾世通, 李鹏, 孙世豪, 等. 烟草酶解液参与制备的热反应香精香气成分分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(10): 4110–4120.
ZENG ST, LI P, SUN SH, *et al.* Aroma compounds in the thermal reaction flavorings of tobacco enzymatic hydrolysate [J]. *J Food Saf Qual*, 2015, 6(10): 4110–4120.
- [37] 莫皓然, 黄名正, 张群, 等. 顶空固相微萃取结合溶剂辅助风味蒸发分析无籽刺梨挥发性成分及其呈香贡献[J/OL]. *食品工业科技*: 1-16.

- [2023-07-26]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090300
MO HR, HUANG MZ, ZHANG Q, *et al.* Analysis the volatiles and its aroma contribution in *Rosa sterilis* by HS-SPME and LLE-SAFE [J/OL]. *Sci Technol Food Ind*: 1-16. [2023-07-26]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022090300
- [38] SHENG XF, HUANG MZ, LI TT, *et al.* Characterization of aroma compounds in *Rosa roxburghii* Tratt using solvent-assisted flavor evaporation headspace-solid phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-olfactometry [J]. *Food Chem*: X, 2023, 18: 100632.
- [39] SCHLUMBERGER P, STÜBNER CA, STEINHAUS M. Development and evaluation of an automated solvent-assisted flavour evaporation (aSAFE) [J]. *Eur Food Res Technol*, 2022, 248(10): 2591–2602.
- [40] CHAINTREAU A. Simultaneous distillation-extraction: From birth to maturity-review [J]. *Flavour Frag J*, 2001, 16(2): 136–148.
- [41] 王俊, 胡桂仙, 于勇, 等. 电子鼻与电子舌在食品检测中的应用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2004, (2): 292–295.
WANG J, HU GX, YU Y, *et al.* Research and application of electronic nose and electronic tongue in food inspection [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2004, (2): 292–295.
- [42] 吴守一, 邹小波. 电子鼻在食品行业中的应用研究进展[J]. *江苏理工大学学报(自然科学版)*, 2000, (6): 13–17.
WU SY, ZOU XB. Progress in the application research of electronic nose for foods [J]. *J Jiangsu University (Nat Sci Ed)*, 2000, (6): 13–17.
- [43] 王建伟, 叶升. 电子鼻在食品行业的应用进展[J]. *中国调味品*, 2022, 47(10): 198–200, 205.
WANG JW, YE S. Application progress of electronic nose in food industry [J]. *China Cond*, 2022, 47(10): 198–200, 205.
- [44] 黄璜, 王凤玲, 孙超仁, 等. 基于电子鼻和电子舌技术的辣木籽风味分析[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(7): 183–190.
HUANG H, WANG FL, SUN CR, *et al.* Flavor analysis of moringa seeds based on electronic nose and electronic tongue [J]. *Food Res Dev*, 2022, 43(7): 183–190.
- [45] 徐凯杰. 电子鼻技术及其在种子品质检测中的应用概况[J]. *农业装备技术*, 2022, 48(2): 4–6.
XU KJ. An review of electronic nose technology and its application in seed quality inspection [J]. *Agric Eq Technol*, 2022, 48(2): 4–6.
- [46] 林丹, 胡金祥, 何蓓蓓, 等. 电子鼻和电子舌数据融合在鱼香调味汁风味识别中的应用[J]. *中国调味品*, 2021, 46(9): 145–150.
LIN D, HU JX, HE BB, *et al.* Application of data fusion of electronic nose and electronic tongue in flavor recognition of fish-flavor sauce [J]. *China Cond*, 2021, 46(9): 145–150.
- [47] 任紫烟, 程玉豆, 关晔晴, 等. 基于电子鼻检测鸭梨新鲜度及损伤程度[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(9): 2770–2777.
REN ZY, CHENG YD, GUAN YQ, *et al.* Detection of freshness and damage degree of *Pyrus bretschneideri* Rehd based on electronic nose [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(9): 2770–2777.
- [48] 李迎楠, 刘文营, 成晓瑜. GC-MS 结合电子鼻分析温度对肉味香精风味品质的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(14): 104–109.
LI YN, LIU WY, CHENG XY. Effect of temperature on sensory and flavor characteristics of Maillard reaction products derived from bovine bone hydrolsate as analyzed by GC-MS and electronic sensor [J]. *Food Sci*, 2016, 37(14): 104–109.
- [49] 王玉芬, 周晓茹, 刘晓晨, 等. 应用电子鼻技术对鸡肉香精美拉德反应条件的优化[J]. *食品研究与开发*, 2016, 37(8): 220–224.
WANG YF, ZHOU XR, LIU XC, *et al.* Application of electronic tongue on Maillard reaction of chicken flavor [J]. *Food Res Dev*, 2016, 37(8): 220–224.
- [50] 田怀香, 肖作兵, 徐霞, 等. 电子鼻技术结合多元统计方法在鸡肉香精开发中的应用[J]. *中国调味品*, 2011, 36(6): 61–65.
TIAN HX, XIAO ZB, XU X, *et al.* Application of electronic nose technology and multivariate analysis on development of chicken flavoring [J]. *China Cond*, 2011, 36(6): 61–65.
- [51] 宋焕禄, 廖国洪. 鸡肉酶解物/酵母抽提物-Maillard 反应产生肉香味化合物的研究[J]. *食品科学*, 2001, (10): 83–85.
SONG HL, LIAO GH. Study on isolation & identification of meat flavor compounds of enzymatically hydrolyzed chicken in Maillard reaction system [J]. *Food Sci*, 2001, (10): 83–85.
- [52] 宋焕禄. 热反应对鸡肉香味料挥发性成分影响初探[J]. *食品与发酵工业*, 2002, (4): 56–59.
SONG HL. Preliminary study on the influence of heat reaction on the volatiles of chicken flavor [J]. *Food Ferment Ind*, 2002, (4): 56–59.
- [53] 辛然, 马丽鑫, 刘蓉, 等. 贻贝酶解液热反应香精在不同热反应条件和干燥方式下的风味变化分析[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(11): 255–263.
XIN R, MA LX, LIU R, *et al.* Flavor changes in the heat-reacted essence of the enzymatic hydrolysate of mussel under different heating conditions and drying processes [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2022, 38(11): 255–263.
- [54] YANG N, ZHANG SS, ZHOU P, *et al.* Analysis of volatile flavor substances in the enzymatic hydrolysate of *Lanmaoa asiatica* mushroom and its Maillard reaction products based on E-Nose and GC-IMS [J]. *Foods*, 2022, 11(24): 4056.
- [55] DOU XJ, ZHANG LX, YANG RN, *et al.* Adulteration detection of essence in sesame oil based on headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Food Chem*, 2022, 370: 131373.
- [56] 邓海莲, 胡蝶, 邹婷婷, 等. 酶解对鸡骨素美拉德反应挥发性风味成分的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(16): 236–242.
DENG HL, HU D, ZOU TT, *et al.* Effects of enzymatic hydrolysis on the volatile components of Maillard reaction from chicken bone extracts [J]. *J Chromatogr A*, 2018, 39(16): 236–242.
- [57] 徐欣如, 尤梦晨, 宋焕禄, 等. 不同酶对牛骨素热反应香气味及滋味的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(3): 228–238.
XU XR, YOU MC, SONG HL, *et al.* Effect of different enzymes on the flavor and taste of thermal process flavorings made by bovine bone extract [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(3): 228–238.
- [58] OCHIAI N, SASAMOTOK. Selectable one-dimensional or two-dimensional gas chromatography-olfactometry/mass spectrometry with preparative fraction collection for analysis of ultra-trace amounts of odor compounds [J]. *J Chromatogr A*, 2011, 1218(21): 3180–3185.
- [59] YU MG, YANG P, SONG HL, *et al.* Research progress in comprehensive two-dimensional gas chromatography-mass spectrometry and its combination with olfactometry systems in the flavor analysis field [J]. *J Food Compos Anal*, 2022, 114: 104790.
- [60] GÓRECKI T, HARYNUK J, PANIĆ O. The evolution of comprehensive two-dimensional gas chromatography (GC×GC) [J]. *J Sep Sci*, 2004, 27(5–6): 359–379.
- [61] WANG HL, YANG P, LIU C, *et al.* Characterization of key odor-active compounds in thermal reaction beef flavoring by SGC×GC-O-MS, AEDA, DHDA, OAV and quantitative measurements [J]. *J Food Compos Anal*, 2022, 114: 104805.
- [62] ZHENG AR, WEI CK, LIU DH, *et al.* GC-MS and GC×GC-ToF-MS analysis of roasted/broth flavors produced by Maillard reaction system of cysteine-xylose-glutamate [J]. *Curr Res Food Sci*, 2023, 6: 100445.

- [63] 唐胜, 沈光林, 饶国华, 等. 利用烟末酶解液制备烟用美拉德反应香精的研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(4): 268–271.
TANG S, SHEN GL, RAO GH, *et al.* Study on preparation of Maillard tobacco flavoring with tobacco powder hydrolysate solutions [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2011, 32(4): 268–271.
- [64] 赵梦瑶, 赵健, 谢建春, 等. 白猪肉与黑猪肉热反应香精中香气物质分析鉴定[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 40–47.
ZHAO MY, ZHAO J, XIE JC, *et al.* Characterization of aroma compounds in two meat flavorings prepared from thermal reaction of enzymatic hydrolysates of black pig and common white pig meat proteins with oxidized lard [J]. *Food Sci*, 2017, 38(20): 40–47.
- [65] 李思思. 基于牛骨蛋白酶解的天然牛肉香精的制备研究[D]. 上海: 上海应用技术学院, 2015.
LI SS. Study on the preparation of natural beef flavor based on beef bone protein enzymolysis [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2015.
- [66] 陈翔宇, 蒋天宁, 邹怡然, 等. 不同反应体系热反应型虾味香料的成分分析[J]. 食品工程, 2018, (1): 59–62.
CHEN XY, JIANG TN, ZOU YR, *et al.* Study on the flavor of the thermal-reactive shrimp flavor spices in different reaction systems [J]. *Food Eng*, 2018, (1): 59–62.
- [67] 袁军, 郝武斌, 杨肖, 等. 牛腩酶解液热反应制备清炖牛肉香精的挥发性成分分析[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(5): 81–86.
YUAN J, HAO WB, YANG X, *et al.* Analysis of volatile compounds in stewed beef essence prepared by thermal reaction of beef brisket enzymatic hydrolysate [J]. *China Food Addit*, 2019, 30(5): 81–86.
- [68] QIAN M, ZHENG MY, ZHAO WH, *et al.* Effect of marinating and frying on the flavor of braised pigeon [J]. *J Food Process Preserv*, 2021, 45(3): e15219.
- [69] 李文鹏, 贾勇, 王丽群, 等. 离子迁移谱技术在水污染物检测中的应用[J]. 中国卫生检验杂志, 2019, 29(4): 508–512.
LI WP, JIA Y, WANG LQ, *et al.* Applications of ion mobility spectrometry in water contaminants [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2019, 29(4): 508–512.
- [70] 顾双, 任芳, 韦真博, 等. 基于气相-离子迁移谱技术快速鉴定黄酒酒龄及品牌[J]. 中国食品学报, 2020, 20(9): 248–255.
GU S, REN F, WEI ZB, *et al.* Rapid identification of age and brand of Chinese rice wine based on gas-ion mobility spectrometry [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 20(9): 248–255.
- [71] 杨旭, 李占明, 周冬仁. 气相色谱-离子迁移谱技术用于食品掺假与溯源的研究进展[J]. 中国果菜, 2021, 41(10): 46–51.
YANG X, LI ZM, ZHOU DR. Recent advance of gas chromatography-ion mobility spectrometry in food adulteration and origin traceability [J]. *China Fruit Veget*, 2021, 41(10): 46–51.
- [72] 何扬波, 李咏富, 钟定江, 等. 电子鼻和气相离子迁移谱技术比较瓮臭味及正常红酸汤的风味差异[J]. 食品工业科技, 2020, 41(14): 216–221, 227.
HE YB, LI YF, ZHONG DJ, *et al.* Analysis on the flavor difference of red sour soup including urn odor and normal flavor samples with electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectroscopy [J]. *J Chromatogr A*, 2020, 41(14): 216–221, 227.
- [73] 曾桥, 吕生华, 段洁, 等. 基于气相离子迁移谱技术分析杜仲叶茯砖茶加工过程中挥发性成分[J]. 食品工业科技, 2021, 42(21): 73–82.
ZENG Q, LV SH, DUAN J, *et al.* Analysis of volatile compounds in the manufacturing process of *Eucommia ulmoides* leaves fu brick tea based on gas chromatography-ion mobility spectrometry method [J]. *J Chromatogr A*, 2021, 42(21): 73–82.
- [74] LANGFORD VS, PADAYACHEE D, MCEWAN MJ, *et al.* Comprehensive odorant analysis for on-line applications using selected ion flow tube mass spectrometry (SIFT-MS) [J]. *Flavour Frag J*, 2019, 34(6): 393–410.
- [75] SMITH D, ŠPANĚL P, DEMARAIS N, *et al.* Recent developments and applications of selected ion flow tube mass spectrometry (SIFT-MS) [J]. *Mass Spectrom Rev*, 2023. DOI: 10.1002/mas.21835
- [76] SMITH D, ŠPANĚL P. Selected ion flow tube mass spectrometry (SIFT-MS) for on-line trace gas analysis [J]. *Mass Spectrom Rev*, 2005, 24(5): 661–700.
- [77] MATHEW TL, POWNRAJ P, ABDULLA S, *et al.* Technologies for clinical diagnosis using expired human breath analysis [J]. *Diagnostics*, 2015, 5(1): 27–60.
- [78] ŠPANĚL P, SMITH D. Quantification of volatile metabolites in exhaled breath by selected ion flow tube mass spectrometry, SIFT-MS [J]. *Clin Mass Spectrom*, 2020, 16: 18–24.
- [79] SMITH D, ŠPANĚL P. Ambient analysis of trace compounds in gaseous media by SIFT-MS [J]. *Analyst*, 2011, 136(10): 2009–2032.
- [80] NARSAIAH K, JHA SN, BHARDWAJ R, *et al.* Optical biosensors for food quality and safety assurance—a review [J]. *J Food Sci Technol*, 2012, 49(4): 383–406.
- [81] YE YL, GUO HY, SUN XL. Recent progress on cell-based biosensors for analysis of food safety and quality control [J]. *Biosens Bioelectron*, 2019, 126: 389–404.
- [82] CURULLI A. Electrochemical biosensors in food safety: Challenges and perspectives [J]. *Molecules*, 2021, 26(10): 2940.
- [83] RADULESCU MC, BUCUR MP, BUCUR B, *et al.* Ester flavorants detection in foods with a bienzymatic biosensor based on a stable Prussian blue-copper electrodeposited on carbon paper electrode [J]. *Talanta*, 2019, 199: 541–546.
- [84] LI JS, WANG WL, LIU J, *et al.* Human-like performance umami electrochemical biosensor by utilizing co-electrodeposition of ligand binding domain T1R1-VFT and Prussian blue [J]. *Biosens Bioelectron*, 2021, 193: 113627.
- [85] TIAN YL, ZHU P, CHEN YT, *et al.* A sperm-cell-based biosensor using a fluorescence probe for responsive signal readout toward bitter flavor detection [J]. *Talanta*, 2020, 211: 120731.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



蔡施平, 主要研究方向为食品调味料。
E-mail: cai_shipping@163.com



赵海峰, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品生物技术。
E-mail: hfzhao@scut.edu.cn