

# 肉制品挥发性风味物质研究进展

胡子璇<sup>1,2</sup>, 徐乐<sup>3</sup>, 梁小慧<sup>3</sup>, 甄宗圆<sup>1,3,\*</sup>

(1. 安徽科技学院 食品工程学院, 安徽 滁州 233100; 2. 南京农业大学 食品科技学院, 江苏 南京 210095;  
3. 枣庄学院 食品科学与制药工程学院, 山东 枣庄 277160)

**摘要:**肉制品的挥发性风味物质是影响其风味的重要因素, 研究肉制品中的挥发性化合物的组成和含量对评价肉制品质量、指导肉制品生产和改善加工工艺尤为重要。简述肉制品风味的形成途径、肉制品挥发性风味物质的提取方法和检测技术以及几种肉制品挥发性风味物质的研究进展, 为研究肉制品挥发性风味物质提供参考。

**关键词:**肉制品; 挥发性风味物质; 形成途径; 提取方法; 检测技术

## Progress on Volatile Flavor Compounds of Meat Products

HU Zi-xuan<sup>1,2</sup>, XU Le<sup>3</sup>, LIANG Xiao-hui<sup>3</sup>, ZHEN Zong-yuan<sup>1,3,\*</sup>

(1. College of Food Engineering, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, Anhui, China;  
2. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, Jiangsu, China;  
3. College of Food Science and Pharmaceutical Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang 277160, Shandong, China)

**Abstract:** The volatile flavor substances are important factors affecting meat products' flavor profile. Studying the composition and content of volatile compounds is particularly important for meat products to evaluate its quality, guide its production and improve its processing technology. This review briefly described the formation pathways, extraction methods and detection techniques of meat volatile flavors, as well as the research progress of volatile flavors in several meat products, providing reference for the research of meat volatile flavors.

**Key words:** meat products; volatile flavors; formation pathways; extraction methods; detection techniques

引文格式:

胡子璇, 徐乐, 梁小慧, 等. 肉制品挥发性风味物质研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(19): 219-224

HU Zixuan, XU Le, LIANG Xiaohui, et al. Progress on Volatile Flavor Compounds of Meat Products [J]. Food Research and Development, 2020, 41(19): 219-224

19世纪50年代开始研究食品风味, 随后约100年才开始研究肉制品风味。随着现代科技的发展, 肉制品风味的研究逐渐从鉴定非挥发性风味物质到挥发性风味物质<sup>[1]</sup>。肉制品的风味是评价其整体品质的一个重要感官指标。它受多方面因素的影响, 研究及评价过程涉及物理、化学、生物等多个领域<sup>[2]</sup>。对肉制品的特征风味贡献最大的是挥发性风味物质, 它决定了肉制品的香气特性<sup>[3]</sup>。肉制品的风味物质检测技术包括提取肉制品中的挥发性组分; 选择合适的检测技

术对关键风味物质进行鉴定; 研究不同类型肉制品的挥发性风味组分并进行归纳分类。风味物质研究对指导产品生产、提高产品质量意义重大。

## 1 肉制品中风味物质的来源

生肉几乎不产生风味物质, 只略带些铁腥味, 加工后的肉制品则产生了特征性风味物质。因此, 肉制品产生风味物质经历了一个较为复杂的过程<sup>[1-3]</sup>, 涉及多种风味前体物质、中间产物以及它们之间相互作用的产物。产生风味物质的基本反应包括美拉德反应、脂肪氧化、蛋白质降解、油脂降解、硫胺素降解等<sup>[2-4]</sup>, 通过基本反应产生的一些初级产物一部分构成肉制品的风味物质, 另外一部分还可继续反应, 相互作用产生许多次级产物, 这些次级产物也参与形成肉制品

基金项目: 安徽省重大科技专项(18030701212); 枣庄市科学技术发展计划项目(2019NS09)

作者简介: 胡子璇(1996—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程。

\*通信作者: 甄宗圆(1978—), 男, 讲师, 博士, 研究方向: 肉品科学。

的风味<sup>[4]</sup>。

### 1.1 前体物质降解

风味前体物质可分为:水溶性和脂溶性前体物质。它们自身不产生风味,但在特定条件下会转化为风味化合物<sup>[1]</sup>。肉制品的部分风味来自前体物质的降解,包括蛋白质的降解、糖类降解、脂肪降解及硫胺素的降解<sup>[5-10]</sup>。

研究发现,鹅肉中含氮含硫化合物部分来自氨基酸和硫胺素降解,对香气贡献较大<sup>[5]</sup>。腌干带鱼中的甲苯和邻二甲苯可能来自苯丙氨酸的降解<sup>[6]</sup>。快速干燥形成的腊肠主要通过非微生物因素引起的蛋白质、糖类和脂肪的降解产生特殊风味<sup>[7]</sup>。另外,李俊丽等<sup>[8]</sup>从经过复合保鲜剂处理过的清真雪花牛肉中检测到7种醛类,占总体的22.52%,其中部分醛类物质可能来自脂肪、蛋白质和糖类降解。潘晓倩等<sup>[9]</sup>在检测新鲜牛肉冷藏过程中挥发性物质变化时,第8天检测到的乙醇胺和甲氧苯丙胺主要源于肉在腐败过程中蛋白质、氨基酸等含氮化合物的分解作用。张音等<sup>[10]</sup>研究鸭汤挥发性成分中的含硫化合物百分含量较低,主要是胱氨酸、蛋氨酸等的降解产物。

### 1.2 美拉德反应

美拉德反应不仅能赋予肉类良好的色泽,而且是形成肉类香气成分的重要途径。周恒量等<sup>[5]</sup>检测风味泡椒鹅肉中的含硫、含氮杂环化合物主要来自美拉德反应。朱建军等<sup>[7]</sup>研究黔氏腊肉在加工过程中挥发性风味物质变化时,鉴定出的甲基环戊烯酮、乙基环戊烯酮、胡椒酮等酮类物质是美拉德反应和脂质氧化的产物。白雪等<sup>[11]</sup>分析经过微生物脂肪酶处理的猪肉风味时,检测的含氮含硫化合物主要源自美拉德反应、氨基酸和硫胺素的热降解,是肉中重要的呈味物质。另外,与美拉德反应相关的另一重要反应—Strecker降解产生的各种醛类是构成肉制品风味的重要物质<sup>[4]</sup>。研究表明,由固相微萃取—气相色谱—质谱(solid phase microextraction—gas chromatography—mass spectrometry, SPME—GC—MS)技术检测干腌带鱼得到具有杏仁味的苯甲醛主要由Strecker反应产生<sup>[6]</sup>。

### 1.3 脂质氧化

脂肪氧化一方面是肉类酸败的途径,另一方面也是形成肉制品特殊风味的重要来源。研究证明,发酵肉制品的挥发性风味物质约有60%来自脂肪的水解氧化<sup>[12]</sup>。羊肉<sup>[13]</sup>、牛肉<sup>[8]</sup>、鹅肉<sup>[5]</sup>中的醛、酮、醇类化合物主要由脂肪氧化产生。何立超等<sup>[14]</sup>研究表明,经过辐射处理的猪肉火腿肠风味和色泽的劣变与脂质氧化有紧密的关联。肖群飞等<sup>[15]</sup>鉴定五花肉肉汤中的脂肪醇

和脂肪醛主要来源于脂肪氧化作用。吴燕燕等<sup>[16]</sup>研究表明阈值较低的醛类物质对腌干带鱼的整体风味贡献较大,主要是不饱和脂肪酸的氧化产物。此外,乳酸菌发酵可有效抑制发酵腌干带鱼中亚油酸和花生四烯酸的氧化降解产生(E, E)-2,4-癸二烯醛。

## 2 挥发性风味物质的提取技术

在检测和分析食品中挥发性气体之前,提取方法也尤为重要,直接对后续工作产生影响。常见的提取气体的方法主要有:固相微萃取法(solid phase microextraction, SPME)<sup>[5,16-21]</sup>、同时蒸馏萃取法(simultaneous distillation extraction, SDE)<sup>[22-25]</sup>、静态顶空萃取法(static headspace extraction, SHS)<sup>[19,26-29]</sup>、动态顶空萃取法<sup>[30-35]</sup>、热脱附法<sup>[33-34]</sup>、超临界流体萃取法<sup>[36-40]</sup>、固相萃取法<sup>[3]</sup>、溶剂辅助蒸发法<sup>[41]</sup>等。

### 2.1 固相微萃取技术

萃取技术有两种:直接固相微萃取和顶空固相微萃取(headspace solid phase microextraction, HS-SPME)。该技术集采样、萃取、浓缩、进样于一体,大大提高了检测和分析效率<sup>[11]</sup>。

不少学者利用固相微萃取作为样品的前处理方法,并且和气相色谱—质谱仪(gas chromatography—mass spectrometer, GC—MS)结合使用进行风味物质的检测,研究的范围较广。李鑫等<sup>[16]</sup>、Yan等<sup>[17]</sup>、Wei等<sup>[18]</sup>利用SPME或HS-SPME分别从金华火腿、虾酱、河豚肉中提取挥发性组分,并联合GC—MS测定化合物。另外,在酱卤脱脂鸭肉的挥发性风味物质测定<sup>[19]</sup>、猪肉香精分析<sup>[20]</sup>、南京盐水鸭风味检测<sup>[21]</sup>等都有应用。

### 2.2 同时蒸馏萃取法

SDE法是将水蒸汽蒸馏与有机溶剂萃取结合的一种技术,集提取、蒸馏、萃取为一体,适用于提取复杂样品中易挥发性风味物质<sup>[9]</sup>。

同时蒸馏萃取法在食品分析中应用范围较为广泛,对于肉类风味物质分析,徐欢等<sup>[22]</sup>、曾晓房等<sup>[23]</sup>分别将SDE法应用于金华火腿和广式腊肠的风味提取,并结合GC—MS进行定性分析。赵健等<sup>[24]</sup>采用SDE法处理猪肉,基于保留指数和质谱库检索,GC—MS检测到猪肉香气成分中的98种物质,主要是十六碳醛、十八碳醛、壬醛、1-己醇、十七碳醛。Chang等<sup>[25]</sup>采用SDE从鲑鱼肉中提取了24种挥发性化合物,主要为(E)-2-戊烯-1-醇、2-辛醇、丁酸乙酯、甲基甘氨酸甲酯、2-十二烯醛和十五烷醛。

### 2.3 顶空分析技术

顶空取样技术分为静态顶空取样和动态顶空取

样,是将待测样品释放进入容器顶空的挥发性成分进行提取,而后通过分析仪器进行检测的一种方法<sup>[5,19]</sup>。样品的物化性质决定其在顶空的含量多少。

### 2.3.1 静态顶空取样技术

静态顶空采样(SHS)是当处于密闭容器内的样品基质和周围顶空物达到热力学平衡后,取顶空物进样的一种技术<sup>[6]</sup>。

SHS 法仅适用于检测组分含量或挥发度高的样品,但是该法操作简单,无需其他溶剂,对环境无污染,已在一定程度上用于提取肉类食品的风味物质,如鸭肉<sup>[19,21]</sup>、鱼肉<sup>[26]</sup>、羊肉<sup>[27]</sup>、火腿<sup>[16]</sup>、腊肉<sup>[7]</sup>等风味物质的提取分析。此外, Maria 等<sup>[28]</sup>使用微波辅助和静态顶空提取肉制品中的消毒副产物, Zhao 等<sup>[29]</sup>也采用了 SHS 法提取水稻蛋白质的气味。

### 2.3.2 动态顶空取样技术

动态顶空取样也称吹扫捕集技术,此法具有取样量少、富集效率高等优点,但在提取低挥发性组分时效率低下<sup>[2]</sup>。该提取技术用于检测饮用水的挥发性有机物<sup>[30]</sup>的报道较多,针对肉制品,周慧敏等<sup>[31-32]</sup>、刘纯友等<sup>[33]</sup>、贡慧等<sup>[34]</sup>采用吹扫捕集技术分别对鲜猪肉和干腌猪肉、水产品、北京酱牛肉的挥发性风味物质进行有效提取。此外, Kremser 等<sup>[35]</sup>还对静态和动态顶空技术做了系统的比较。

## 2.4 热脱附

热脱附是基于动态顶空原理将挥发性物质通过热解吸实现脱附的一种方法。该法重现性好、灵敏性强、操作便捷,能较为真实全面地反映食品组成<sup>[3]</sup>。在肉制品风味检测研究中多与 GC-MS 联合分析,如在提取猪肉<sup>[32]</sup>、水产品<sup>[33]</sup>、牛肉<sup>[34]</sup>、羊肉<sup>[13]</sup>等挥发性风味物质时都应用了热脱附技术。

## 2.5 超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取

超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取的原理主要是:控制处于高于临界温度和压力状态的超临界流体(CO<sub>2</sub>)从样品中萃取目标物,然后恢复到常温常压,使溶解于 CO<sub>2</sub> 中的目标组分与之分离,完成萃取过程<sup>[3]</sup>。该萃取技术主要特点是:温度较低,可有效保持物质的生物活性;安全性高,对环境无污染;溶解力优良,萃取效果好。

超临界 CO<sub>2</sub> 流体萃取技术已广泛应用于化工、医药、食品、环境等领域<sup>[36-40]</sup>。例如,在化工领域用于混合物的分离<sup>[36]</sup>,在医药领域用于提取中草药中的有效成分<sup>[37]</sup>。该技术在食品行业的应用也有较大的发展潜力,可用于提取食品色素<sup>[38]</sup>、有益成分或活性物质<sup>[39]</sup>、检测食品中的有害物质<sup>[36]</sup>,此外,在生物工程<sup>[37]</sup>、组织工程<sup>[40]</sup>等新型领域具有良好的发展前景。

## 3 挥发性风味物质的检测技术

样品经过前处理后,提取和富集的挥发性风味物质进一步检测、鉴定,从而得到样品挥发性化合物的信息。鉴定分析结果直接决定研究的准确性,选取合适的检测技术是鉴定风味物质的关键。常用的检测技术主要有:气相色谱-质谱联用(GC-MS)、电子鼻、高效液相色谱-质谱联用(high performance liquid chromatography-mass spectrometry, HPLC-MS)、气相色谱-质谱-嗅觉测量(gas chromatography-mass spectrometry-olfaction, GC-MS-O)、气相色谱-嗅觉测量法等<sup>[4,33,41-51]</sup>。

### 3.1 GC-MS

气质联用(GC-MS)的检测与分析性能较高,是目前检测食品中的挥发性风味物质较为优良的手段之一,广泛应用于肉制品的风味分析。例如, Zhao 等<sup>[41]</sup>通过溶剂辅助蒸发与 GC-MS 结合测定猪肉肉汤中的挥发性风味组分,确定了 104 种挥发性化合物; Vasiliki 等<sup>[27]</sup>通过 GC-MS 研究日粮组成及食用时间对羊肉挥发性风味化合物的影响。Wu 等<sup>[8]</sup>通过 SDE 和 HS-SPME 分离河豚肉中的挥发性成分,共鉴定出 91 种物质。朱亚珠等<sup>[42]</sup>运用 GC-MS 检测毛皮皮虾在储藏过程中的挥发性成分,研究发现风味物质的种类和含量在不同时期有明显的变化。

### 3.2 电子鼻

电子鼻主要由 3 个部分组成:采样系统、检测系统、数据处理系统<sup>[7]</sup>。气体通过多个气敏传感器阵列,将化学信号转化为电信号得到感应器响应值,实现对挥发性风味或复杂气体的识别、分析和检测。获得的是样品的整体指纹信息,而不是某种或某几种成分定性定量结果<sup>[3]</sup>。

电子鼻作为一种检测快速、灵敏、准确、无损的智能感官仪器,在肉制品的质量控制、过程监测、新鲜度和成熟度检测、掺假识别等方面均有应用<sup>[43-46]</sup>。此外,无线电子鼻系统的使用、电子鼻结合其他分析仪器如 GC-MS、高光谱、电子舌等在肉制品的检测分析中也有所发展<sup>[44-45]</sup>。

### 3.3 GC-MS-O

GC-MS-O 是在 GC 的毛细管柱末端接上分流口,挥发性组分进入气相后,一部分进入质谱进行检测,另一部分流入嗅口,再由人类鼻子分辨气味。该技术结合了 GC 的高效分离性能、MS 的定性能力和人鼻的灵敏性的优势,不仅可实现对挥发性物质的定性定量分析,还能确定挥发性组分对风味的贡献值<sup>[4]</sup>。现已用于水产品<sup>[33]</sup>、风干牛肉<sup>[47]</sup>、植物油<sup>[48]</sup>等食品香气物质的检测。

### 3.4 HPLC-MS

HPLC-MS 技术是利用 HPLC 强大的分离能力和 MS 对物质的定性能力,得到挥发性化合物的分子量及结构信息,从而实现对香气成分的快速分析<sup>[33]</sup>。HPLC 作为分离器的应用远不如 GC 那样广泛,但所具有的巨大优势为其带来良好的发展前景。近几年,国外已有采用 HPLC-MS 技术测定肉制品中植物蛋白<sup>[49]</sup>、海产品中丙烯酰胺和 5-羟甲基糠醛<sup>[50]</sup>、水果和果汁中农药<sup>[51]</sup>的报道。

## 4 肉制品中挥发性风味物质的研究

### 4.1 鸭肉制品

鸭肉属于低脂肪、高蛋白的禽肉类食品,其营养成分及比例适宜,富含多种对人体有益的多不饱和脂肪酸、矿物质、维生素及微量元素等。鸭肉的挥发性香气成分是消费者评价其品质优劣的重要指标。魏玲等<sup>[9]</sup>采用 HS-SPME 结合 GC-MS 技术检测酱卤脱脂鸭肉挥发性香味物质的组成成分,共检测出 41 种挥发性香气成分,主要由脂肪氧化、降解产物和香辛料产生。李聪等<sup>[21]</sup>综合运用 SPME-GC-MS、电子鼻和全自动氨基酸分析仪 3 种技术,从宏观和微观角度对不同品牌市售盐水鸭的挥发性风味成分和滋味成分做了全面分析,所测化合物在种类和含量上有显著差异。Liu 等<sup>[52]</sup>通过 HS-SPME 与 GC-MS 技术探索南京盐水鸭在加工过程中挥发性风味化合物的变化,鉴定出 57 种挥发性化合物,主要是脂肪酸的降解产物构成了盐水鸭的典型风味。张音等<sup>[10]</sup>采用 SPME-GC-MS 技术检测 4 种鸭汤(水鸭、北京鸭、洋鸭、麻鸭)的挥发性成分,共得到 159 种化合物,含量最高的醛类是构成鸭汤的特征风味物质。

### 4.2 干腌肉制品

干腌肉制品是一类具有典型风味特色的传统肉制品,主要包括火腿和腊肉。干腌肉制品的风味对其质量监控及预测具有重要意义,尤其是挥发性成分对干腌肉制品的整体风味具有突出贡献。宋雪<sup>[53]</sup>采用电子鼻和电子舌检测和分析金华火腿和宣威火腿的挥发性风味化合物,进一步量化了干腌火腿的风味特性。Nerea 等<sup>[54]</sup>比较了物理化学特性(肌内脂肪、盐浓度、水分活度)和高压处理对伊比利亚火腿挥发性馏分的影响,研究表明高压处理火腿的挥发性物质比物理化学处理的影响大得多。钱焯等<sup>[55]</sup>用 GC-MS 法测定干腌火腿中的胆固醇氧化物含量,结果显示,陈放一年的火腿肌肉组织和脂肪组织中的胆固醇氧化物含量均比新鲜火腿高。

### 4.3 牛肉制品

牛肉品质优良与否与肉的嫩度、多汁性及风味有较大的联系。针对牛肉的风味研究较多。Gong 等<sup>[43]</sup>采用电子鼻、GC-MS 和热解吸系统检测中国炖辣牛肉中的挥发性风物物质,共鉴定出 82 种物质。张迪雅等<sup>[44]</sup>应用电子鼻和 GC-MS 技术比较了不同部位牛肉的挥发性风味物质的组成,电子鼻检测得到不同部位和不同加热温度的指纹图谱,GC-MS 分析了影响不同部位牛肉气味的挥发性物质的组成。潘晓倩等<sup>[9]</sup>利用吹扫/捕集-热脱附-气质联用技术分析牛肉在冷藏过程中风味物质的变化,根据挥发性成分种类和含量的变化来体现牛肉的新鲜度。

### 4.4 水产品

水产品的种类较多,且多数比畜禽肉营养价值高。含有丰富的优质蛋白和多不饱和脂肪酸,有益人体健康。Chang 等<sup>[29]</sup>采用 SPME 和 SDE 两种方法提取鳕鱼中的挥发物,GC-MS 及保留指数和标准化合物来识别挥发物质,鉴定出的 86 种挥发性化合物中醇、醛、酯类物质对鳕鱼的新鲜风味贡献较大。Fan 等<sup>[17]</sup>通过 HS-SPME-GC/MS 和电子鼻技术鉴定和分析了中国传统发酵虾酱的风味物质,共检测了 62 种挥发性化合物、二甲基二硫化物、四甲基二硫化物、二甲基三硫化物、2,3,5-三甲基-6-乙基吡嗪、乙基-2,5-二甲基吡嗪、苯酚和吡啶构成虾酱的典型风味。刘璘等<sup>[26]</sup>采用 HS-SPME-GC-MS 技术研究了庚醛、辛醛、壬醛和 1-辛烯-3-醇 4 种典型呈腥味挥发物与白鲢鱼肌纤维蛋白质、肌球蛋白和肌动蛋白的结合能力。基于热力学模型(Scatchard 方程及其 Klotz 图)发现,肌球蛋白与这几种腥味物质的结合自由能  $\Delta G < 0$ ,是白鲢鱼中典型腥味物质的主要结合受体。

## 5 展望

肉制品中挥发性风味物质是形成肉制品香气的重要成分,其研究对指导肉制品加工、探索新工艺都有较大的启发和帮助。

在未来发展中,结合多种提取方法以达到最佳提取效果还需更加深入的研究,辅助提取技术有待进一步发展。为了提高检测的准确性,充分发挥分析仪器的联用作用和不断开发精密分析仪器是重要的研究方向。例如,发展超临界流体色谱与质谱联用检测技术、无线电子鼻等。另外,与更多高新技术如高光谱图像技术结合使用可使肉制品分析更加全面。

随着各检测手段不断应用于快速检测技术并与指纹图谱技术联合,有利于食品的质量控制和品质分

级,在识别掺假、防伪、检验农残和添加剂等领域将有较大的发展空间。

### 参考文献:

- [1] 周芳伊,张泓,黄峰,等.肉制品风味物质研究与分析进展[J].肉类研究,2015,29(7):34-37
- [2] 谢诚,欧昌荣,汤海青,等.食品中挥发性风味成分提取技术研究进展[J].核农学报,2015,29(12):2366-2374
- [3] 丁艳芳,谢海燕,王晓曦,等.食品风味检测技术发展概况[J].现代面粉工业,2013,27(1):22-26
- [4] 唐静,张迎阳,吴海舟,等.传统腌腊肉制品挥发性风味物质的研究进展[J].食品科学,2014,35(15):283-288
- [5] 周恒量,胡玉娇,李诚,等.风味泡鹅肉挥发性风味物质 GC-MS 检测中的 HS-SPME 萃取工艺优化[J].食品与机械,2016,32(3):82-87,112
- [6] 吴燕燕,王悦齐,李来好,等.基于电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 技术分析不同处理方式腌干带鱼挥发性风味成分[J].水产学报,2016,40(12):1931-1940
- [7] 朱建军,王晓宇,胡萍,等.黔式腊肉加工过程中挥发性风味物质的变化[J].食品与机械,2013,29(4):20-23
- [8] 李俊丽,罗瑞明,张同刚,等.清真冷鲜雪花牛肉复合保鲜剂配比优化及挥发性风味物质检测[J].食品工业科技,2016,37(22):290-295
- [9] 潘晓倩,赵燕,张顺亮,等.新鲜牛肉冷藏过程中挥发性成分的变化[J].肉类研究,2016,30(3):15-19
- [10] 张音,夏延斌,罗风莲.固相微萃取-气质联用检测鸭汤中挥发性风味成分[J].食品科学,2012,33(6):225-231
- [11] 白雪,杨爽,孟鑫.电子鼻结合顶空固相微萃取-气质联用法分析微生物脂肪酶对猪肉风味的影响[J].食品工业科技,2017,38(22):246-252
- [12] 吴宝森,孙玥晖,刘姝韵,等.发酵肉制品中脂肪、蛋白质水解氧化与微生物的关系[J].食品安全质量检测学报,2017,8(3):832-837
- [13] 曲超,张顺亮,王守伟,等.吹扫/捕集-热脱附-气质联用仪分析新鲜羊肉在冷藏过程中挥发性物质的变化[J].肉类研究,2016,30(1):25-29
- [14] 何立超,李成梁,马素敏,等.辐照对猪肉火腿肠风味与品质的影响[J].食品科学,2017,38(9):34-39
- [15] 肖群飞,范梦蝶,赵健,等.猪五花肉炖煮肉汤香气物质的分析鉴定[J].食品工业科技,2017,38(22):273-279,295
- [16] 李鑫,刘登勇,李亮,等.SPME-GC-MS 法分析金华火腿风味物质的条件优化[J].食品科学,2014,35(4):122-126
- [17] Yan F, Li'ang Y, Yong X, et al. Analyzing the Flavor Compounds in Chinese Traditional Fermented Shrimp Pastes by HS-SPME-GC/MS and Electronic Nose[J]. Journal of Ocean University of China, 2017, 16(2): 311-318
- [18] Wu W, Wu R, Tao N P. Identification of Volatile Compounds in Cooked Meat of Farmed Obscure Puffer (*Takifugu obscurus*) Using SDE and HS-SPME Combined with GC-MS[J]. Advanced Materials Research, 2013, 706/708: 399-402
- [19] 魏玲,王武,张宏蕊,等.鸭肉脱脂加工工艺研究及挥发性风味物质分析[J].安徽农业科学,2017,45(14):68-72,82
- [20] 崔晓红,马力,刘平.热反应猪肉香精的制备及其挥发性风味物质的分析[J].中国调味品,2017,42(1):47-51,56
- [21] 李聪,徐宝才,李世保,等.市售盐水鸭挥发性风味物质研究分析[J].现代食品科技,2016,32(12):350-358
- [22] 徐欢,励建荣,韩晓祥.同时蒸馏萃取法提取金华火腿风味物质条件优化[J].食品工业科技,2009,30(3):128-131
- [23] 曾晓房,白卫东,陈海光,等.同时蒸馏萃取/气-质联用分析广式腊肠的挥发性成分[J].食品与发酵工业,2010,36(7):139-143
- [24] 赵健,王蒙,谢建春,等.黑猪肉关键香气物质分析鉴定[J].食品科学,2018,39(2):203-209
- [25] Chang Y, Hou H, Li B. Identification of volatile compounds in codfish (*Gadus*) by a combination of two extraction Methods coupled with GC-MS analysis[J]. Journal of Ocean University of China, 2016, 15(3): 509-514
- [26] 刘璘,崇云青,丁玉庭,等.顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱联用法分析白鲢鱼肉蛋白质与特征腥味物结合作用[J].食品科学,2016,37(16):100-105
- [27] Gkarane V, Brunton N P, Allen P, et al. Effect of finishing diet and duration on the sensory quality and volatile profile of lamb meat[J]. Food Research International, 2019, 115: 54-64
- [28] Cardador M J, Gallego M. Simultaneous determination of 14 disinfection by-products in meat products using microwave-assisted extraction and static headspace coupled to gas chromatography - mass spectrometry[J]. Journal of Chromatography A, 2017, 1509: 9-15
- [29] Zhao J, Boatright W L. Static headspace analysis of odorants in commercial rice proteins[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 345-350
- [30] 母翔宇.吹扫捕集-气质联用测定水中 23 种挥发性有机物[J].化工管理,2017(12):23-24
- [31] 周慧敏,张顺亮,成晓瑜,等.食盐用量对风干猪肉挥发性风味物质的影响[J].肉类研究,2017,31(4):23-28
- [32] 周慧敏,张顺亮,赵冰,等.吹扫/捕集-热脱附-气质联用比较分析长白山黑猪和瘦肉型猪肉的挥发性风味物质[J].肉类研究,2017,31(3):45-50
- [33] 刘纯友,李子娟,殷朝敏,等.水产品挥发性风味成分提取与检测方法研究进展[J].广州化工,2017,45(6):30-33
- [34] 贡慧,杨震,史智佳,等.不同熬煮时间对北京酱牛肉挥发性风味成分的影响[J].食品科学,2017,38(10):183-190
- [35] Kremser A, Jochmann M A, Schmidt T C. Systematic comparison of static and dynamic headspace sampling techniques for gas chromatography[J]. Analytical & Bioanalytical Chemistry, 2016, 408(24): 6567-6579
- [36] 伍广.超临界流体萃取技术及其在生产中的应用[J].科技信息,2010(33):167-168
- [37] 丁元清,武秀娟,郝文艳,等.中药有效成分提取技术及分析方法研究进展[J].山东化工,2017,46(3):59-60,62
- [38] 雪热提江·麦提努日.天然色素及红色素的研究进展[J].现代食品,2016(24):93-94
- [39] 伊文峰.超临界萃取油茶中多种活性成分的研究[D].天津:天津大学,2013

- [40] 孙文千. 超临界流体制备人工骨组织的应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014
- [41] Zhao J, Wang M, Xie J, et al. Volatile flavor constituents in the pork broth of black-pig[J]. *Food Chemistry*, 2017, 226: 51-60
- [42] 朱亚珠, 李丽, 乐建盛. 气质联用技术分析中国毛虾虾皮贮藏过程中挥发性成分[J]. *水产养殖*, 2017, 38(7): 1-9
- [43] Hui G, Zhen Y, Liu M, et al. Time-dependent categorization of volatile aroma compound formation in stewed Chinese spicy beef using electron nose profile coupled with thermal desorption GC-MS detection[J]. *Food Science & Human Wellness*, 2017, 6(3): 137-146
- [44] 张迪雅, 谢丹婷, 李晔. 应用电子鼻和 GC-MS 比较牛肉不同部位的挥发性物质组成[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(21): 241-246
- [45] 李双艳, 邓力, 汪孝, 等. 基于电子鼻、电子舌比较分析冷藏方式对小香鸡风味的影响[J]. *肉类研究*, 2017, 31(4): 50-55
- [46] 李璐. 电子鼻结合 GC-MS 对羊肉掺假鸭肉快速检测[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
- [47] 陈海涛, 孙杰, 蒲丹丹, 等. OAV 和 GC-MS-O 法鉴定内蒙古风干牛肉风味活性物质[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(15): 304-308, 312
- [48] Amanpour A, Kelebek H, Kesen S, et al. Characterization of Aroma-Active Compounds in Iranian cv. Mari Olive Oil by Aroma Extract Dilution Analysis and GC-MS-Olfactometry[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2016, 93(12): 1595-1603
- [49] Hoffmann B, Münch S, Schwägele F, et al. A sensitive HPLC-MS/MS screening method for the simultaneous detection of lupine, pea, and soy proteins in meat products[J]. *Food Control*, 2017, 71: 200-209
- [50] Qin L, Zhang Y Y, Xu X B, et al. Isotope dilution HPLC-MS/MS for simultaneous quantification of acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural (HMF) in thermally processed seafood [J]. *Food Chemistry*, 2017, 232: 633-638
- [51] Timofeeva I, Shishov A, Kanashina D, et al. On-line in-syringe sugaring-out liquid-liquid extraction coupled with HPLC-MS/MS for the determination of pesticides in fruit and berry juices[J]. *Talanta*, 2017, 167: 761-767
- [52] Liu Y, Xu X I, Ouyang G F, et al. Changes in Volatile Compounds of Traditional Chinese Nanjing Water - boiled Salted Duck During Processing[J]. *Journal of Food Science*, 2006, 71(4): S371-S377
- [53] 宋雪. 金华火腿和宣威火腿风味品级研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015
- [54] Martinez-Onandi N, Rivas-Canedo A, Avila M, et al. Influence of physicochemical characteristics and high pressure processing on the volatile fraction of Iberian dry-cured ham[J]. *Meat Science*, 2017, 131(9): 40-47
- [55] 钱焯, 彭增起, 周光宏. 干腌火腿中胆固醇氧化物含量研究[J]. *食品科技*, 2017, 42(5): 116-119

收稿日期: 2019-04-03

(上接第 218 页)

- [55] 穆莎茉莉, 李洪军, 刘丽娜. 菊粉生理功能研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2006(6):47-48
- [56] ABRAMS S A, GRIFFIN I J, HAWTHORNE K M, et al. A combination of prebiotic short- and long-chain inulin-type fructans enhances calcium absorption and bone mineralization in young adolescents [J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2005, 82 (2):471-476
- [57] LADISLAV R, HANNELORE D. Diet composition and age determine the effects of inulin-type fructans on intestinal calcium absorption in rat[J]. *European Journal of Nutrition*, 2005, 44(6):360-364
- [58] COUDRAY C, FEILLET C C E, MAZUR A, et al. Dietary inulin intake and age can affect intestinal absorption of zinc and copper in rats[J]. *Journal of Nutrition*, 2006, 136(1):117-122
- [59] BATISTA-DUHARTE A, MARTÍNEZ D T, CARLOS I Z. Efficacy and safety of immunological adjuvants. Where is the cut-off? [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2018, 105:616-624
- [60] COOPER P D, PETROVSKY N. Delta inulin: a novel, immunologically active, stable packing structure comprising  $\beta$ -D-[2 $\rightarrow$ 1] poly(fructo-furanosyl)  $\alpha$ -D-glucose polymers[J]. *Glycobiology*, 2011, 21(5):595-606
- [61] COOPER P D, BARCLAY T G, GINIC MARKOVIC M, et al. The polysaccharide inulin is characterized by an extensive series of periodic isoforms with varying biological actions[J]. *Glycobiology*, 2013, 23(10):1164-1174
- [62] STEWART E, TRICCAS J A, PETROVSKY N. Adjuvant Strategies for More Effective Tuberculosis Vaccine Immunity[J]. *Microorganisms*, 2019, 7(8):1-16
- [63] PETROVSKY N, COOPER P D. Advax™, a novel microcrystalline polysaccharide particle engineered from delta inulin, provides robust adjuvant potency together with tolerability and safety [J]. *Vaccine*, 2015, 33(44):5920-5926
- [64] 奚文博, 严昌国, 崔莲花. 益生元-菊粉在动物营养中的研究进展[J]. *饲料研究*, 2017(21):8-12
- [65] SINGH V, YEOH B S, CHASSAING B, et al. Dysregulated Microbial Fermentation of Soluble Fiber Induces Cholestatic Liver Cancer[J]. *Cell*, 2018, 175(3):679-694

收稿日期: 2019-10-14