



食品与发酵工业
Food and Fermentation Industries
ISSN 0253-990X, CN 11-1802/TS

《食品与发酵工业》网络首发论文

题目：气相色谱-离子迁移谱（GC-IMS）在畜禽产品风味分析中的应用
作者：杨露，谭会泽，温志芬，张祥斌，彭运智，刘松柏，陈丹，王小明，邹轶
DOI：10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028288
收稿日期：2021-06-07
网络首发日期：2021-09-10
引用格式：杨露，谭会泽，温志芬，张祥斌，彭运智，刘松柏，陈丹，王小明，邹轶. 气相色谱-离子迁移谱（GC-IMS）在畜禽产品风味分析中的应用. 食品与发酵工业. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028288>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS) 在畜禽产品风味分析中的应用

杨露, 谭会泽[✉], 温志芬, 张祥斌, 彭运智, 刘松柏, 陈丹, 王晓明, 邹轶

(温氏食品集团股份有限公司, 广东 云浮, 527400)

*通信作者 (谭会泽高级畜牧师为通讯作者, E-mail: tanhuize5@163.com.)

摘要 气相-离子迁移谱 (gas chromatography-ion mobility spectroscopy, GC-IMS) 是一种用于分析样品中挥发性化合物的近几年兴起的检测技术, 具有检测速度快、操作方便等优点。该文首先简述了 GC-IMS 的应用原理, 再次综述了其在畜禽产品品种区分、畜禽产品的掺伪鉴别以及不同因素对畜禽产品风味特性的影响 3 个方面的应用, 最后分析了 GC-IMS 技术目前存在的问题以及其未来的发展方向, 以期研究者研究分析畜禽产品风味、开发新的畜禽产品提供理论依据和技术支持。

关键词 气相色谱-离子迁移谱; 畜禽产品; 风味; 分析; 应用

DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028288

Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) in flavor analysis of livestock and poultry products

YANG Lu, TAN Huize^{*}, WEN Zhifen, ZHANG Xiangbin, PENG Yunzhi, LIU Songbai, CHEN Dan, WANG Xiaoming, ZOU Yi

(Wens Foodstuffs Group Co., Ltd., Key Laboratory of Animal Nutrition and Feed Science of the Ministry of Agriculture, Yunfu 527400, China)

Abstract Gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) which has the advantages of fast detection speed and convenient operation is a new method for the analysis of volatile compounds in samples. Firstly, the application principle of GC-IMS was briefly introduced in this paper, then the usage of GC-IMS technology in variety differentiation and adulteration identification of livestock and poultry products and the influence of different factors on flavor characteristics of them were reviewed. Finally, the existing problems and future development direction of GC-IMS technology were analyzed. It provides a theoretical basis and technical support for researchers to study and analyze the flavor of products and develop new livestock and poultry products.

Key words GC-IMS; livestock and poultry products; flavor; analysis; application

1. 气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS) 简介

1.1 离子迁移谱 (IMS)

离子迁移谱 (ion mobility spectrometry, IMS) 也被称为气体电泳, 即是根据物质的迁移时间进行定性, 根据峰高或峰面积进行定量, 最早在 1970 年以等离子体色谱 (plasma chromatography) 的形式出现。IMS 在常压条件下工作, 其装置结构简单、灵敏度高, 检出限达 ng 甚至 pg 级, 适用于一些痕量挥发性有机化合物 (如醇类、醛类、芳香族、胺类、酯类和酮类等) 的检测。它的电离源大多数为放射性电离源, 包括 ^{63}Ni 源 (β 源)、 ^3H 源和 ^{241}Am 源等, 其中 ^3H 源比 ^{63}Ni 源发射的 β 粒子能量低, 对外界的辐射损伤小^[1]。近些年来, 非放射电离源越来越受到关注。

IMS 按照分离原理的差异可分为漂移时间谱、空间分离谱和场离子谱。图 1 为传统漂移时间 IMS 的结构及检测原理示意图, 包括进样单元、电离区、迁移区、离子收集区和信号处理单元。样品从入

收稿日期: 2021-06-07

基金项目: 广东省饲料产业技术体系创新团队建设项目 (2020KJ115)

作者简介: 杨露: 硕士研究生

网络首发时间: 2021-09-10 15:48:25 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1802.TS.20210910.0850.001.html>

口被载气引入电离区后被电离，样品离子在电场作用下进入迁移区，经不同漂移时间先后到达收集区（法拉第盘）产生电信号，电信号经后续的放大电路处理得到 IMS 谱图。

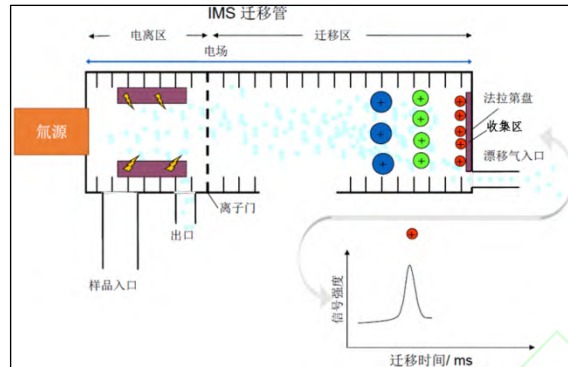


图 1 IMS 基本结构及检测原理示意图
Fig 1 Basic structure and detection principle of IMS

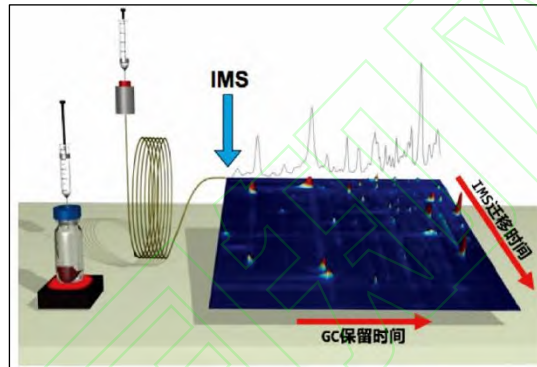


图 2 GC 与 IMS 构成的二维分离系统
Fig 2 Two-dimensional separation system of GC and IMS

以 ^{63}Ni 源为例阐述 IMS 中的离子生成过程。 ^{63}Ni 源发射的高能热电子与 N_2 分子碰撞后，激发 N_2 带正电荷 (N_2^+) 并产生次生电子， N_2^+ 进一步与载气中的 N_2 分子发生碰撞形成 N_4^+ 。经一系列电荷转移反应，载气中痕量 H_2O 上带上质子，形成 H_3O^+ 、 $\text{H}^+(\text{H}_2\text{O})_n$ 等反应离子峰 (RIP)。样品中质子亲和力大于水分子的 (此处用 A 表示)，则与反应离子峰 (RIP) 发生质子转移反应夺取 RIP 的质子，最后形成正电荷离子 (如 AH^+)。带正电物质 (如 AH^+) 在载气的作用下进入迁移区。如图 1 示，在载气、电场和逆向的大流量迁移气作用下，带电物质在迁移管中迁移。带电物质因分子量、空间结构不同，在迁移管中的迁移率不同，从而不同物质到达检测器的时间 (即迁移时间) 不同被检测，最后被记录并给出图谱。在同一电场强度和特定的迁移管中，一般分子量小、空间结构小的物质，迁移时间短，先到达检测器；分子量大、空间结构大的物质，迁移时间长，后到达检测器^[1]。样品中未被离子化的物质在逆向的大流量迁移气作用下，由出口排除系统。

1.2 气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS)

气相色谱-离子迁移谱是将气相色谱的高效分离与离子迁移谱的痕量快速检测优势相结合，使含有复杂基质的样品先经过气相色谱逐步分离，再进入离子迁移管进行二次分离及检测，从而可获得含有保留时间、漂移时间、信号强度的三维谱图。图 2 显示的是由 GC 与 IMS 两部分构成的二维分离系统。GC-IMS 根据气相色谱的保留指数 (RI)、IMS 的迁移时间 (Dt) 进行二维定性，依据峰体积大小 (当为三维图) 进行定量。与气相色谱-质谱联用 (GC-MS) 相比，GC-IMS 在食品香味分析方面的优势如下：(1) 检测限更低，灵敏度高，非常适于痕量组分分析；(2) 在大气压条件下工作，无须真空系统；(3) 样品无须复杂的浓缩富集即可进样检测，有利于保持风味物质的稳定性；(4) 体积小，重量轻，功耗低，检测速度快 (ms 级别)，可用于现场快速检测。

目前, GC-IMS 技术已经广泛用于绿茶、酒类、水产品、粮食、水果等的指纹图谱、分级、溯源和质量控制等方面, 在畜禽产品风味方面的应用也越来越多。

2. GC-IMS 技术在畜禽产品风味分析中的应用

目前, GC-IMS 技术在畜禽产品品种的鉴别、肉类掺伪鉴定以及鸡蛋新鲜度的鉴定等方面的应用均有诸多报导。

2.1 品种区分

GC-IMS 技术可通过分析检测牛肉、羊肉、鸡肉和鸭肉等肉中的挥发性成分, 结合化学计量学方法, 运用相关统计学原理, 建立分析鉴别肉的种类识别模型。陈通等利用 GC-IMS 技术和主成分分析化学计量学方法判别牛肉、羊肉和鸡肉, 使用两个主成分得分达到了 98.3% 的分类准确率^[2]。Siyang Deng 等研究利用 GC-IMS 及统计学方法分析用白猪和黑猪分别制作培根的挥发性香味物质的差异, 研究指出白猪肉做成的培根中挥发性香味物质的种类和含量比用黑猪肉做成的培根更丰富, 且在白猪肉做成的培根中酚类和酸类物质浓度较高, 而在黑猪肉做成的培根中醇类、酮类和含氮类物质较高^[3]。由此可见, 利用气相色谱-离子迁移谱和相关的化学计量学方法可以方便快速的区分不同的肉类, 并可建立相关的鉴别模型。

2.2 掺伪鉴别和新鲜度鉴定

随着经济的发展和社会的进步, 人们开始追求高品质的生活。在利益的驱动下, 一些不法商家利用人们的心理在商品中掺假, 以次充好, 导致市面上出现掺假的牛羊驴肉、伪燕窝、伪鱼翅等产品。现在有诸多研究表明, GC-IMS 技术可对畜禽产品进行掺假及新鲜度的鉴定与判别。

2.2.1 掺伪鉴别

孟新涛以纯羊肉、纯猪肉和纯鸡肉作为对照样品, 在羊肉中分别掺入不同比例的猪肉和鸡肉, 利用 GC-IMS 对所有样品进行挥发性风味测定, 检测数据利用 PCA 主成分进行分析。实验发现, 利用 GC-IMS 技术发现不同样本含有的挥发性风味物质含量有显著差异, PCA 主成分分析可明显区分羊肉中掺入的不同比例的猪肉和鸡肉样本, 且发现不同掺入比例的猪鸡肉都有其明显的归属区域^[4]。杜文博利用 GC-IMS 技术对羊奶粉中添加不同比例的牛奶粉进行掺假分析, 检测数据利用二维图谱对比法、指纹图谱法对比和主成分分析法三种不同的方法进行鉴别区分发现, 羊奶粉中挥发性物质种类要多于牛奶粉, 且随着羊奶粉中牛奶粉比例的增加, 样品中挥发性物质组成逐渐由羊奶粉的向牛奶粉的转变^[5]。杜文博也利用 GC-IMS 对掺入马肉或猪肉的驴肉进行挥发性风味物质鉴别分析, 得出了相同的结论^[5]。潘柯伊等利用 GC-IMS 技术对市售燕盏样品及常用掺假物猪皮进行检测, 结果表明燕盏含醇类、醛类、酮类、脂类和其他类物质共五大类 29 种风味物质。与正品燕盏相比, 猪皮的相似度仅有 52%, 燕盏中苯甲醛含量较高为 10.54%, 2-丁酮含量较低为 0.05%, 而猪皮中苯甲醛的含量仅为正品燕盏的 1/70, 2-丁酮的含量为正品燕盏的 4.6 倍^[6]。Natalia Arroyo-Manzanares 等利用 GC-IMS 来判别以伊比利亚猪肉为原材料的火腿的真实价值。饲喂橡子和草的自由放养的伊比利亚猪的品质要优于饲喂普通饲料的圈养的伊比利亚猪, 利用 GC-IMS 技术可快速便捷得区分两种不同的火腿, 避免火腿标签的欺诈行为^[7]。此外, 还有诸多研究利用 GC-IMS 技术分析鉴别鸡蛋^[8]、腊肠^[9]等掺假行为, 方法快速准确。这为 GC-IMS 技术在畜禽产品打假领域的应用提供了基础。

2.2.2 新鲜度鉴定

有诸多研究利用 GC-IMS 技术对鸡蛋、畜禽肉等进行新鲜度鉴别。Daniele Cavanna 等通过对鸡蛋进行不同条件处理并分批次测定, 得到不同蛋制品的挥发性风味物质指纹图谱。同时也通过固相微萃取-气相色谱-质谱联用实验, 得出乙酸丁酯、庚醛、二甲基二硫化物、二甲基三硫化物和 1-丁醇为鸡蛋陈化过程中的标志化合物^[10]。这表明利用 GC-IMS 可快速、灵敏、准确得研究鸡蛋新鲜度问题。童灿浩等采用 GC-IMS 技术对鸽子肉储藏期间的挥发性风味成分进行了测定。结果发现: 在不同的冰鲜储藏天数中, 第 1 天的风味物质种类最多; 第 3 天的乙酸、丙醇等物质含量最高; 第 5 天的大部分醛类含量最高; 而 2-丁酮含量先减少后增加, 在第 1 天和第 7 天中含量最高^[11]。这表明可通过利用 GC-

IMS 技术检测挥发性风味成分及含量的变化判断鸽子肉产品所处的冰鲜储藏期, 进而推断其新鲜度。王辉等利用 GC-IMS 技术分离冷冻猪肉中极性相近的挥发性化合物, 依次提取数据构建的聚类判别模型。模型可将冷冻猪肉检验样品根据贮藏时间的不同归类到对应的时间簇^[12]。

2.3 影响肉品风味的因素

目前, 还有研究利用 GC-IMS 技术比较分析不同的加工工艺、饲养方式以及添加不同的营养调控物质等处理对畜禽肉蛋类制品风味带来的差异。

2.3.1 生长速度对畜禽产品风味特性的影响

巨晓军等利用 GC-IMS 技术研究不同生长速度肉鸡肌肉中挥发性有机物的差异, 试验结果为慢速型鸡(狼山鸡)的鸡肉中醛类和醇类含量显著高于其他类型的三个品种, 主要特征物质包括反-2-辛烯醛、戊醛、壬醛、己醛、1-丁醇、乙醇、1-戊醇、1-辛烯-3-醇; 中速型鸡 3A 和花山麻鸡的鸡肉特征物质相似, 3-羟基-2-丁酮、乙酸乙酯含量极高; 快速型鸡罗斯 308 的鸡肉中大部分物质含量较低, 主要特征物质为 3-戊酮^[13]。该试验表明 GC-IMS 可直观且快速看出不同生长速度鸡品种挥发性有机物的特异性及其含量差异和相似度, 也可明显区分不同生长速度鸡品种。Fang Wang 等使用 GC-IMS 技术对 2 月龄、6 月龄和 12 月龄三个年龄阶段的靖远羔羊进行挥发性香味物质分析并建立了三个年龄段靖远羔羊样品的风味指纹图谱。结果显示, 在羊肉样品中具有较高强度峰的化合物为醇类、酮类、醛类、酯类(苯甲酸甲酯)、呋喃(2-戊基呋喃)和噻唑(三甲基噻唑)^[14]。该试验表明, 采用气相色谱-质谱联用(GC-IMS)和主成分分析(PCA)方法可用于快速并全面得分析处于不同生长阶段的羊肉中的挥发性成分。

2.3.2 产地对畜禽产品风味特性的影响

Wensheng Yao 等利用 GC-IMS 技术研究五个不同地区的中国传统熏鸡的挥发性香味物质特征, 结果显示: 正壬醛、庚醛、正壬醛、庚醛、糠醛和己醛是中国五种熏鸡中 35 种主要常见风味化合物。此外, 不同地区的熏鸡因使用不同的加工配料导致其风味存在差异^[15]^[12]。孟新涛等利用 GC-IMS 技术对新疆阿勒泰羊、巴什拜羊、巴音布鲁克羊、多浪羊、和田羊及哈萨克羊等新疆六个产区 71 份羊肉样本的特征风味进行测定与分析, 并构建不同产区羊肉特征风味离子迁移色谱指纹谱。试验结果表明, 不同产区的羊肉样本风味物质都具有一定的差异^[16]。利用该技术可以对新疆不同产区的羊肉进行肉质评价、产地追溯和掺假鉴别。此外, Meijuan Yu^[17], Wenqian Li^[18]分别研究了中国湘西不同地区香肠和中国不同地区干腌火腿中的挥发性香味物质, 他们都一致认为 GC-IMS 技术是一种快速、灵敏、高效准确得判别不同产地的畜禽产品的方式。

2.3.3 畜禽产品不同加工处理方式对畜禽产品风味特性的影响研究

此外, 不同加工方式(如热泵干燥、炖煮、发酵、老化、卤制、干腌等)是否影响畜禽产品的风味特性也是诸多科研人员研究的方向, 详情见表 1。通过测定对比分析发现, 畜禽产品加工后的香味物质主要有醇类化合物、醛类化合物、酮类化合物、酯类、芳香族化合物、呋喃类和噻唑类等。不同的加工条件, 可产生不同种类或数量的风味化合物。利用 GC-IMS 技术可以为畜禽产品的质量评价、加工条件提供理论支持和技术指导。

表1 不同加工条件的畜禽产品风味特性
Table 1 Flavor characteristics of livestock and poultry products under different processing conditions

编号	品类	加工方式	挥发性风味物质特征	参考文献
1	鸭蛋	热处理	己醛, 1-辛烯-3-醇和 2-正戊基呋喃是蛋腥味的关键成分。	[19]
2	鸡肉	反复炖煮	共鉴定主要有醇类、酮类、醛类、酯类、杂环类及烃类。	[20]
3	广式腊肠	热泵干燥	醇类、醛类、酮类、酯类、呋喃类共 24 种物质。	[21]
4	金华火腿	老化	辛醇、2-甲基丁醇、2-丁酮、2-己酮、2-庚酮、乙酮、-丁内酯、丁醛, 3-甲基丁醛、乙酸丙酯和 3-甲基丁酸是金华火腿样品中的主要挥发性化合物。	[22]
5	乳鸽	红烧	醛、酮、醇、脂、烃、酸和其他化合物共 30 种。	[23]
6	香肠	混菌发酵	酯、醛、醇和酮共 33 种化合物。	[24]
7	羊肉串	烤	己醛、壬醛、庚醛、异戊醛、苯甲醛、3-羟基-2-丁酮可能为羊肉串烤制后本身的特征风味物质。	[25]
8	肉脯	加工阶段	醇、醛、酸、酮、杂环化合物、芳香烃及酯类等。	[26]
9	鸡腿肉	熏	用不同的材料熏制鸡腿得到的挥发性香味物质差异大。	[27]
10	武定鸡	卤煮、油炸	卤煮后的武定鸡风味更佳, 营养价值也有所提高。	[28]
11	五花肉	干腌	己醛被认为是具有小气味阈值的食品的风味恶化指标。	[29]

2.3.4 营养调控物质对畜禽产品风味特性的影响研究

现在人们对畜禽产品的风味需求趋于多元化, 这使得越来越多的科研工作者和食品加工者开始专注于畜禽产品风味的研究。Ruth Alonso 等利用 GC-IMS 技术研究饲喂牧草和橡子的散养猪和饲喂商业饲料的圈养猪在肉品风味物质方面的差异, 试验表明该技术可鉴定不同饲养条件下的猪样品之间具有差异的特定挥发性化合物^[30]。吴晨燕等将不同的发酵剂分别接种于牛骨肉酶解液中发酵 12h 和 16h 制作发酵牛肉调味基料, 同时设置不发酵的对照组, 采用电子鼻、电子舌、气相色谱-离子迁移谱和气相色谱-质谱联用分析不同组别发酵牛肉调味基料的风味差异和挥发性化合物组成。结果发现不同组成的发酵剂对关键风味化合物的影响也存在差异^[31]。姚文生等用不同材料熏制鸡腿肉, 从熏制鸡腿肉中共检测鉴定出 46 种挥发性物质, 包括一些物质的二聚体。利用 GC-IMS 指纹图谱分析发现, 不同材料熏制的鸡腿肉样品的特征风味物质既有差异又相互联系^[32]。张玉梅等在以猪后腿肉为原料的低脂乳化肠中添加不同浓度的菊粉, 利用 GC-IMS 技术评价其风味物质的改善情况。结果发现, 当菊粉添加量为 5% 时醛类和醇类物质最多, 提高了其风味特性^[33]。此外, 还有诸多研究者利用 GC-IMS 技术研究在腊肉中添加如葵花盘粉^[34]、银杏叶提取物^[35]等不同物质对腊肉风味物质的影响, 结果都表明 GC-IMS 技术可以灵敏得分析不同的添加物对畜禽产品风味特性造成的影响。

3. 存在问题及未来应用

气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)技术作为新兴起的一项技术已越来越多的被用于食品风味研究与鉴定领域, 如食品掺假及产地的鉴别、新鲜度和贮存条件的判定、质量评价和优化、食品成分分析等。它有效的解决了其他方式分析速度慢和因前处理导致风味物质损失等问题, 具有快速、准确、灵敏度高等优点。但是目前该技术也存在不足之处, 即没有完善的挥发性物质数据库系统, 这导致检测出的物质不能被进行充分定性分析。为了扩大 GC-IMS 技术的利用价值与应有范围, 有必要结合气相色谱-质谱联用 (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) 等多种分析手段, 进一步完善 GC-IMS 的数据库信息, 这可为以后畜禽产品的加工储藏鉴别提供理论依据, 也为未来研究更健康更具有风味特性的产品提供技术支持。

参 考 文 献

- [1] 谢建春. 香味分析原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020: 64-65.
XIE J C. Principle and technology of aroma analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2020: 64-65.
- [2] 陈通, 吴志远, 王正云, 等. 基于气相离子迁移谱和化学计量学方法判别肉的种类[J]. 中国食品学报, 2019, 19(7): 221-226.
CHEN T, WU Z Y, WANG Z Y, et al. Identification of Meat Species by Gas Chromatography - Ion Mobility Spectrometry and Chemometrics[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(7): 221-226.
- [3] SIYANG D, YUNHE L, FENG H, et al. Evaluation volatile flavor compounds during storage time in bacon made by different pig breeds[J]. Food Chemistry, 2021, 357, 129765.
- [4] 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.
MENG X T, ZHANG T, XU M Q, et al. Detection of Authenticity of Mutton with Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry (GC-

- IMS[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2019, 56(10): 1939-1947.
- [5] 杜文博. 气相离子迁移谱法在羊奶粉和驴肉鉴别中的应用[D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
DU W B. Application of Gas Phase Ion Mobility Spectrometry in the Identification of Goat Milk Powder and Donkey Meat[J]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2019.
- [6] 潘柯伊, 杜方敏, 陈述文, 等. 气相离子迁移谱分析市售燕盏挥发性物质成分[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(12): 251-255.
PAN K Y, DU F M, CHEN S W, et al. Analysis of Volatile Substances in Bird's Nest by GC-IMS Technique[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2020, 41(12): 251-255.
- [7] NATA A M, ANDRES M G, NATIVIDAD J C, et al. Target vs spectral fingerprint data analysis of Iberian ham samples for avoiding labelling fraud using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Food Chemistry*, 2018(246): 65-73.
- [8] 韩敏义, 石金明, 邓绍林, 等. 一种鸡蛋种类的鉴别方法: 中国, CN111624265A[P]. 2020-09-04.
HAN M Y, SHI J M, DENG S L, et al. A method for identification of egg species: China, CN111624265A[P]. 2020-09-04.
- [9] 李海霞, 曾晓房, 董浩, 等. 热泵干燥过程中广式腊肠品质与风味的变化[J]. *食品科技*, 2020, 45(04): 114-120.
LI H X, ZENG X F, DONG H, et al. Changes of quality and flavor of Cantonese Sausage during heat pump drying process[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(04):114-120.
- [10] DANIELE C, SANDRO Z, MICHELE S, et al. Ion mobility spectrometry coupled to gas chromatography: A rapid tool to assess eggs freshness[J]. *Food Chemistry*, 2019, 271: 691-696.
- [11] 童灿浩, 吴杰翰, 曾晓房, 等. 冰鲜储藏对鸽子肉新鲜度与风味的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(01): 186-191.
TONG C H, WU J H, ZENG X F, et al. Effect of Chilled Fresh Storage on Freshness and Flavor of Pigeon Meat[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(01): 186-191.
- [12] 王辉, 田寒友, 李文采, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱技术的冷冻猪肉贮藏时间快速判别方法[J]. *食品科学*, 2019, 40(02): 269-274.
WANG H, TIAN H Y, LI W C, et al. Fast Discrimination of Frozen Pork Stored for Different Periods Using Headspace-Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy (HS-GC-IMS) [J]. *Food Science*, 2019, 40(02): 269-274.
- [13] 巨晓军, 单艳菊, 刘一帆, 等. 基于 GC-IMS 技术分析不同生长速度肉鸡肌肉中挥发性有机物的差异[J/OL]. *食品与发酵工业*: 1-8[2020-08-28]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025140>.
JU X J, SHAN Y J, LIU Y F, et al. Analysis of differences of volatile organic compounds in broiler muscles with different growth rates based on GC-IMS technology[J/OL]. *Food and Fermentation Industries*, 1-8[2020-08-28]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025140>.
- [14] FANG W, YAQIN G, HONGBO W, et al. Analysis of volatile compounds and flavor fingerprint in Jingyuan lamb of different ages using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. *Meat Science*, 2021, 175: 108449.
- [15] WENSHEGN Y, YINGXUAN C, DENG YONG L, et al. Comparative analysis of characteristic volatile compounds in Chinese traditional smoked chicken (specialty poultry product) from different regions by HS-GC-IMS [J]. *Poultry Science* (2020), Doi: <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.09.011>.
- [16] 孟新涛, 乔雪, 潘伊, 等. 新疆不同产区羊肉特征风味离子迁移色谱指纹谱的构建[J/OL]. *食品科学*, [2019-10-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20191010.0915.002.html>. MENG X T, QIAO X, PAN Y, et al. Establishment of Characteristic Flavor Fingerprints of Mutton by GC-IMS in Different Origin of Xinjiang[J/OL]. *Food Science*, [2019-10-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20191010.0915.002.html>.
- [17] MEIJUAN Y, XIAOLE X, HUAN T, et al. Potential correlation between volatiles and microbiome of Xiang xi sausages from four different regions[J]. *Food Research International*, 2021, 139: 109943.
- [18] WENQIAN L, YANPING C, IMRE B, et al. GC × GC-TOF-MS and GC-IMS based volatile profile characterization of the Chinese dry-cured hams from different regions [J]. *Food Research International*, 2021, 142, 110222.
- [19] 马洁. 热处理过程中鸭蛋腥味形成规律的研究及调控[D]. 北京: 北京农学院, 2019.
MA J. Study and regulation of the formation for off-flavor from duck egg during heat treatment[D]. Beijing: Beijing University of Agriculture, 2019.
- [20] 杜超, 戚军, 姚文生, 等. 基于 GC-IMS 分析反复炖煮过程中鸡肉风味物质的变化规律[J/OL]. *食品与发酵工业*, 1-8[2020-02-22], <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022999>.
DU C, QI J, YAO W S, et al. Fingerprint Analysis of Volatile Compounds in Stewed Chicken Broth[J/OL]. *Science and Technology of Food Industry*, 1-8[2020-02-22], <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.022999>.
- [21] 李海霞, 曾晓房, 董浩, 等. 热泵干燥过程中广式腊肠品质与风味的变化[J]. *食品科技*, 2020, 45(04): 114-120.
LI H X, ZENG X F, DONG H, et al. Changes of Quality and Flavor of Cantonese Sausage During Heat Pump Drying Process[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(04):114-120.
- [22] DENG YONG L, LU B, XI F, 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.
- [23] 郑敏怡. 红烧乳鸽加工过程中品质变化的研究[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2019.
ZHENG M Y. Study on quality change of Roasted Squabs during processing[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2019.
- [24] 叶翠. 混菌发酵香肠工艺优化及理化特性变化研究[D]. 石家庄: 河北经贸大学, 2020.
YE C. Study on Technological Optimization and Physical and Chemical Characteristics of Mixed Fermentation Sausage[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Economics and Business, 2020.
- [25] 姚文生, 马双玉, 蔡莹暄, 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/OL]. *食品工业科技*. [2020-10-21], <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060339>.
YAO W S, MA S Y, CAI Y X, et al. Analysis of Volatile Flavor Substances in Mutton Shashlik Based on GC-IMS Technology[J/OL]. *Food Industry Science and Technology*, [2020-10-21], <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060339>.
- [26] 刘萍, 贾欣怡, 祁兴普, 等. 基于风味指纹谱的肉脯加工阶段判别分析[J/OL]. *食品与发酵工业*, [2020-11-12], <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025404>.
LIU P, JIA X Y, QI X P, et al. Discrimination analysis of dried pork slice processing stages based on flavor fingerprints[J/OL]. *Food and Fermentation Industries*, [2020-11-12], <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025404>.

- [27] 姚文生, 蔡莹暄, 刘登勇, 等. 基于 HS-GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 对熏鸡腿肉挥发性风味成分分析[J/OL]. 食品与发酵工业, [2020-12-09], <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025979>. YAO W S, CAI Y X, LIU D Y, et al. Analysis of volatile flavor compounds in smoked chicken thighs by HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J/OL]. Food and Fermentation Industries, [2020-12-09], <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025979>.
- [28] 俞媛瑞, 王桂瑛, 罗雨婷, 等. 武定鸡加工过程理化指标与特征风味变化研究[J/OL]. 食品工业科技, [2019-10-15], <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20191014.1641.006.html>. YU Y R, WANG G Y, LUO Y T, et al. Changes of Physicochemical Indexes and Characteristic Flavor Substances in Yunnan Wuding Chicken Processing[J/OL]. Food Industry Science and Technology, [2019-10-15], <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20191014.1641.006.html>.
- [29] JOSHUA H. AHETO, XINGYI H, et al. Evaluation of lipid oxidation and volatile compounds of traditional dry-cured pork belly: The hyperspectral imaging and multi-gas-sensory approaches[J]. Food Process Engineering, 2019, DOI: 10.1111/jfpe.13092.
- [30] RUTH A, VECENTE R V, ANA D V, et al. Ion mobility spectrometry of volatile compounds from Iberian pig fat for fast feeding regime authentication[J]. Talanta, 2008, 76: 591-596.
- [31] 吴晨燕, 马俪珍, 周伟, 等. 发酵时间和发酵剂种类对牛肉调味料风味的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(9): 42-47. WU C Y, MA L Z, ZHOU W, et al. Effects of Fermentation Time and Starter Cultures on Flavor of Beef Flavorings[J]. Meat Research, 2019, 33(9): 42-47.
- [32] 姚文生, 蔡莹暄, 刘登勇, 等. 不同材料熏制鸡腿肉挥发性物质 GC-IMS 指纹图谱分析[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(6): 37-45. YAO W S, CAI Y X, LIU D Y, et al. Volatile Compounds Analysis in Chicken Thigh Smoked with Different Materials by GC-IMS Fingerprint[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 37(6): 37-45.
- [33] 张玉梅, 董铭, 邓绍林, 等. 菊粉对低脂乳化肠质构及风味品质的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(12): 2769-2779. ZHANG Y M, DONG M, DENG S L, et al. Effects of Inulin on the Texture and Flavor Quality of Low-Fat Emulsified Sausage[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(12): 2769-2779.
- [34] 农仲文. 葵花盘对广式腊肠品质的改良及活性物质分离[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2020. NONG Z W. Improvement of Cantonese Sausage Quality and Active Substance Separation by Sunflower Powder[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2020.
- [35] 袁琴琴. 气相色谱-离子迁移谱分析漂烫和银杏叶提取物对腊肉挥发性物质成分的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(11): 165-172. YUAN Q Q. The Aromatic Constituents Analysis of Cantonese Bacon Suffer from Blanching and Ginkgo Biloba Extract by GC-IMS[J]. Food Research and Development, 2020, 41(11): 165-172.