

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240903002

引用格式: 庞钊靖, 刘振平, 张学健, 等. 气相色谱-离子迁移谱技术在动植物源食品产地溯源中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 1–7.

PANG KJ, LIU ZP, ZHANG XJ, *et al.* Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry technology in the origin traceability of animal and plant-derived foods [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(1): 1–7. (in Chinese with English abstract).

气相色谱-离子迁移谱技术在动植物源食品产地溯源中的应用

庞钊靖¹, 刘振平^{1*}, 张学健², 甘芳媛¹, 姜 容¹, 龙道崎¹

(1. 重庆安全技术职业学院, 重庆 404000; 2. 重庆市万州区疾病预防控制中心, 重庆 404000)

摘 要: 食品产地溯源技术对于有效开展食品原产地追溯、保护地方品牌和特色产品具有重要的意义。我国已建立了包括“中国农产品地理标志”在内的多个食品安全标准体系。随着时间的推移, 国内外对食品产地判别的需求日益增加, 挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)特征与食品产地密切相关, 可用于表征不同产品同种食品间的差异。气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)技术是近年来发展起来的用于 VOCs 测定的新技术, 具有分离效果好、检测速度快、灵敏度高优点, 有潜力成为有效的产地溯源技术手段。本文介绍了 GC-IMS 技术的工作原理和特点, 总结了近年来 GC-IMS 技术在动植物源食品产地溯源中的应用进展, 探讨了 GC-IMS 技术未来的发展方向, 以期 GC-IMS 技术在食品产地溯源中应用的持续拓展提供技术参考。

关键词: 气相色谱-离子迁移谱技术; 动植物源食品; 产地溯源

Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry technology in the origin traceability of animal and plant-derived foods

PANG Ke-Jing¹, LIU Zhen-Ping^{1*}, ZHANG Xue-Jian², GAN Fang-Yuan¹,
JIANG Rong¹, LONG Dao-Qi¹

(1. Chongqing Vocational Institute of Safety & Technology, Chongqing 404000, China;
2. Chongqing Wanzhou Center for Disease Control and Prevention, Chongqing 404000, China)

ABSTRACT: Food origin traceability technology is an important technical means for the effective implementation of food origin traceability and the protection of regional brands and specialty products. China has established a number of food safety standard systems, including “geographical indications of Chinese agricultural products”. There is an increasing demand for food origin discrimination at home and abroad, and the characteristics of volatile organic compounds (VOCs) are closely related to food origin, which can be used to characterize the differences between

收稿日期: 2024-09-03

基金项目: 重庆市万州区博士“直通车”科研项目(wzstc-20220131); 重庆市万州区科研项目(wzstc-20230216)

第一作者: 庞钊靖(1985—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为食品安全检测与质量控制。E-mail: pq0917@126.com

*通信作者: 刘振平(1986—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为食品质量安全控制与功能性食品。E-mail: nping305@126.com

different products of the same kind of food. Gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) technology is a new technology developed in recent years for the determination of VOCs, which has the advantages of good separation effect, fast detection speed and high sensitivity, and has the potential to become an effective technical means for origin tracing. This paper introduced the working principle and characteristics of GC-IMS technology, summarized the progress of the application of GC-IMS technology in the origin traceability of animal and plant-derived foods in recent years, and discussed the future development direction of GC-IMS technology, in order to provide technical reference for the continuous expansion of the application of GC-IMS technology in the origin traceability of food.

KEY WORDS: gas chromatography-ion mobility spectrometry; animal and plant-derived foods; origin traceability

0 引言

动植物源食品是人们日常食物的重要组成部分,也是营养成分的主要来源。随着人民生活水平地不断提高,对于优质动植物源农产品的需求越来越大,然而,动植物源食品的质量安全问题也随之越来越凸显,成为影响人们生活的一个严重的社会问题。产地区域是影响食品品质的重要因素,例如,汉源红花椒作为汉源县地理标志产品,其品质明显优于其他产地同一品种的红花椒^[1];不同产地的油菜花蜂蜜也具有差异化的风味,准确的产地信息可为消费者的偏好提供指引^[2]。一些不法商家为了盲目追求经济利益,用非优势地区产品冒充优势地区产品,以次充好。因此,建立有效的动植物源食品产地溯源技术,不仅有利于保护优势产地标识和品牌,而且有助于特殊情况下产品的及时召回,有效维护消费者权益^[3-4]。

现阶段,可以用于食品产地溯源的相关检测技术包括:稳定同位素分析^[5-7]、矿物元素指纹分析^[8]、有机成分指纹图谱技术等^[9-11]。然而,这些方法需要耗费大量人力和时间,前处理会损坏样品,无法满足快速检测的需求^[11]。相比之下,气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)技术是近年来发展起来的一种新型风味分析方法,它结合了 GC 与 IMS 的技术优势,样品无需预处理,能在短时间内分析样品中的风味物质,并可根据食品的特征风味判别食品产地。其原理是 GC 通过毛细管束快速加压分离样品,而 IMS 则利用电离源将挥发性成分电离成产物离子,这些离子在常压弱电场中漂移,根据其结构、质量、电荷和体积的差异实现分离和检测^[12]。GC-IMS 不仅具有高灵敏度和高分辨率^[13-16],还能获取保留时间、离子迁移时间和离子强度等多维度信息,为样品识别提供多元依据。目前,国内外对采用 GC-IMS 技术在单一食品风味物质分析方面的研究报道较多,但是利用 GC-IMS 技术鉴别食品产地的综合性论述较少,因此,本文在收集大量文献和开展 GC-IMS 应用实践的基础上,综述了近年来 GC-IMS 技术在食品产地溯源中的应用进展,并对 GC-IMS 技术未来的发展方向进行展望,以期相关的食品溯源及质量监控提供理论指导。

1 GC-IMS 技术在动物源食品产地溯源中的应用

目前,关于动物源食品的产地溯源应用研究相对较少,这可能是由于动物源食品的脂肪和蛋白质含量不仅与产地有关,还取决于动物饲料的成分和动物喂养方式,给原产地溯源分析带来干扰和困难^[17-18]。GC-IMS 技术在风味组学分析方面具有独特的优势,该技术在水产品、畜禽肉和乳制品等农产品产地溯源的研究正逐步深入,具体研究成果见表 1。

1.1 水产品

水产品因其丰富的营养成分备受人们青睐,尤其是其中的必需氨基酸和必需脂肪酸,对人体健康至关重要。然而,随着市场需求的增加,劣质产品冒充当地知名品牌的情况屡见不鲜,不同地区养殖的水产品具有各自独特的风味和质量,因此建立一种能够识别水产品来源的高效溯源技术显得尤为重要。

近年来,GC-IMS 技术在水产品真伪鉴别方面的应用取得了显著进展。通过该技术构建不同地区水产品挥发性香气物质的指纹图谱,从而为产地溯源奠定基础。目前,已有研究人员利用该技术建立了表征不同地区盐渍海参挥发性香气物质的指纹图谱,从中鉴别出 83 种挥发性物质,并发现醇、酮类为长岛盐渍海参所特有的风味物质,而威海和东营的盐渍海参则主要含有酯类化合物,呈现出截然不同的风味特征。这种方法为我国不同盐渍海参产地鉴别提供了新的参考^[19]。此外,崔保威等^[20]也利用 GC-IMS 技术分析了江苏太湖、安徽巢湖和内蒙古呼伦湖 3 个产地的秀丽白虾干挥发性风味物质,其 PCA 结果表明不同产地白虾干中的挥发性有机物差异较大。江津津等^[21]进一步利用该技术构建了汕头、东莞、福建、泰国、越南 5 个不同产地的传统鱼露挥发性化合物指纹图谱,研究发现汕头鱼露的挥发性风味物质最为丰富多样,而东莞鱼露的挥发性风味物质相对较少,说明 GC-IMS 技术能较好地识别不同产地样品间挥发性风味差异,这为深入了解不同产地鱼露的风味特征提供了重要的参考,对于鱼露生产和品质改进具有一定的指导意义。综上,GC-IMS 技术在水产品产地溯源中的应用前景广阔,不仅能够提供准确的溯源信息,还能在水产品的加工和品质控制提供科学依据。

表 1 GC-IMS 技术在动物源食品溯源中的应用
Table 1 Application of GC-IMS technology in traceability of animal-derived food

分析对象	分析目的	化学计量学方法	可鉴定的挥发性有机化合物数量	挥发性有机物种类名称	文献
海参	产地溯源	-	83	醛类、酮类、醇类、酯类、烯炔类、酸类、吡嗪类、呋喃类、硫醚类	[19]
白虾	产地溯源	PCA	18	醛类、酮类、醇类、吡嗪类、呋喃类	[20]
鱼露	产地溯源	-	37	醛类、含硫化合物、酯类、醇类、苯、酮类、酸类	[21]
虾酱	产地溯源	-	55	醇类、酯类、醛类、酸类、酮类、吡嗪类、含硫化合物	[22]
奶	产地溯源	-	53	醇类、酯类、醛类、酮类、含硫化合物	[23]
驴乳粉	产地溯源	PCA	53	醇类、醛类、酮类、酸类、酯类、萜烯类、呋喃类、含硫化合物	[24]
羊肉	产地溯源	PCA	36	酮类、醇类、醛类、酯类、吡嗪类、呋喃类、含硫化合物	[13]
火腿	产地溯源	PCA、MFA	45	醛类、酮类、醇类、酸类、酯类、酚类、杂环化合物、含氮化合物	[25]
烟熏鸡	产地溯源	PCA、PLS-DA、OPLS-DA	34	醛类、醇类、酮类、碳氢化合物、杂环化合物、酯类、醚类、酚类。	[26]

注: -表示无此项; 主成分分析(partial least squares discriminant analysis, PCA); 多元因子分析(multiple factor analysis, MFA); 偏最小二乘判别分析(partial least squares-discriminate analysis, PLS-DA); 正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)。

1.2 乳制品

牛乳因其丰富的营养成分被誉为最接近完美的食品。随着我国奶业的迅速发展, 国产乳制品已成为国人生活中必不可少的一部分。尽管如此, 对于国内生产的乳及乳制品的安全问题, 人们依然持有疑虑, 因此, 寻找一种强有力的有效的溯源方法变得尤为重要。

为了解决这一问题, CHI 等^[23]使用 GC-IMS 技术分析了来自中国不同地区的 24 种原料奶样品的挥发性风味物质。通过构建指纹图谱, 发现南方和北方牧场的原料奶在挥发性风味上存在显著差异, 其中己醛是区分南北方原料奶的重要标志。此方法对南方和北方牧场的原料奶鉴别效果较好, 但对内蒙古和东北牧场的原料奶鉴别效果有限。韩亚平等^[24]采用相同的技术对山东、新疆不同地区的 5 种驴乳粉进行了挥发性风味物质的检测与分析, 结果显示共鉴定出 53 种挥发性风味物质, 其中辛酸乙酯、2-甲基丙酸、3-甲基-1-丁醇、1-戊醇二聚体、1-辛醛二聚体、丙酸丁酯、丁酸丁酯和 γ -萜品烯被认为是各地区驴乳粉的标志性成分, 这一发现为不同地区驴乳粉风味品质评价和产地鉴别提供技术支持。尽管 GC-IMS 技术为乳制品的溯源提供了一种有效的手段, 但该技术在某些地区的原料奶鉴别上仍然存在局限性, 这可能与原料奶的化学组成复杂性以及不同地

区饲养条件和饲料的差异有关。因此, 未来的研究需要进一步探索和优化 GC-IMS 技术, 以提高其在乳制品溯源中的准确性和可靠性, 推动我国乳制品行业的健康发展。

1.3 畜禽肉

畜禽肉作为另一种重要的动物源食品, 其风味和品质同样受到产地的影响。不同种类和产地的肉类样品中的挥发性风味成分存在差异, 通过分析这些挥发性风味成分的差异, 可以创建出基于特定风味化合物的指纹图谱, 进而用于追溯其产地, 实现产地鉴别^[27-30]。

张蓝月等^[13]以青海茶卡、青海玉树、青海祁连、四川、内蒙古、宁夏等 6 个地区为研究对象, 采用 GC-IMS 技术, 对其挥发性香气成分进行检测, 共定性出 36 种挥发性化合物, 这些化合物是羊肉风味的主要贡献者, 其种类和含量对于不同地区羊肉的风味特性具有重要影响, 研究结果表明, 6 个产地羊肉风味存在一定差异, 其中青海祁连羊肉风味最为丰富, 该项研究为羊肉风味分析、产地识别提供了新的方法。孟新涛等^[31]将 GC-IMS 与 PCA 法相结合, 对新疆各主要地区 71 份羊肉样品的特征风味物质进行测定, 建立了风味指纹图谱, 发现在新疆 6 个产区所采集的羊肉样本具有各自独特的特征风味物质, 从而快速评估羊肉样品的质量等级, 明确其产地来源, 并判断其是否存在掺假

情况。LI 等^[25]研究了冕宁、诺邓、撒坝、三川、皖花和宣恩 6 种中国干腌火腿的挥发性有机化合物, 共鉴定出 45 种挥发性成分, 结果表明, GC-IMS 技术是区分不同地区干腌火腿的良好选择。

YAO 等^[26]则聚焦于中国 5 种烟熏鸡的特色风味化合物, 通过 GC-IMS 技术共鉴定出 34 种风味物质, 其中有 20 种具有较高变量重要性投影 (variable importance in projection, VIP) 值的化学物质是造成风味差异的关键因素。由于中国不同地区的原料、配料、制作方法和文化差异, 导致 5 种中国传统烟熏鸡挥发性成分存在明显异同。多变量数据分析表明, 基于 OPLS-DA 模型, 能够清晰地区

分出不同区域的烟熏鸡。

从上述研究中可以看出, GC-IMS 技术结合化学计量学分析方法能较好地鉴别不同肉类产品的风味和产地, 这为肉类产品的质量和真实性提供了可靠的科学依据。

2 GC-IMS 技术在植物源食品产地溯源中的应用

植物源食品品质受产地因素影响较大, 其中挥发性有机化合物是衡量植物源农产品品质的重要指标^[32]。近几年, 有关 GC-IMS 技术用于植物源食品产地溯源的研究主要集中在粮油食品、果蔬和茶叶方面, 具体研究成果见表 2。

表 2 GC-IMS 技术在植物源食品溯源中的应用
Table 2 Application of GC-IMS technology in traceability of plant-derived food

分析对象	分析目的	化学计量学方法	可鉴定的挥发性有机化合物数量	挥发性有机物种类名称	文献
香稻米	产地溯源	PCA	38	酮类、醛类、醇类、呋喃、醚类、吡啶类、芳香烃类、单萜类	[33]
小麦粉	产地溯源	PCA	66	醛类、醇类、酮类、酯类、酸类、酚类、呋喃类、烯类	[34]
柑橘	产地溯源	PCA	48	醛类、酸类、酯类、酮类、醇类、酚类烯烃类、吡嗪类、萜类、含硫化化合物	[35]
柚子	产地溯源	PCA	38	酯类、萜类、醇类、酮类、醛类	[36]
梨	产地溯源	PCA	16	酯类、醇类、含硫化化合物、酮类、醛类	[37]
梨	产地溯源	PCA	43	酯类、醇类、醛类、酮类	[38]
枣果	产地溯源	PCA	74	醛类、醇类、酯类、酮类、酸类、酚类、其他化合物	[39]
水蜜桃	产地溯源	PCA	74	酯类、醇类、酮类、醛类、烯烃类	[40]
苹果	产地溯源	PCA	54	酯类、醛类、醇类、酸类、酮类	[41]
芋头	产地溯源	PCA	26	酯类、醛类、烯类、醇类、酮类	[42]
生姜	产地溯源	PCA	60	萜烯类、醛类、醇类、酯类、酮类、酸类、醚类、吡嗪类	[43]
香椿	产地溯源	PCA	76	醇类、酯类、吡嗪类、酮类、萜类化合物、有机硫化物、醛类、酸类、酚类	[44]
茶	产地溯源	PCA	61	醛类、酮类、酯类、醇类、呋喃类、酸类	[45]
茶	产地溯源	PCA、PLS-DA	43	酚类、碳氢化合物、杂氧化合物、吡咯类、酯类、酸类、酮类、醇类、醛类	[46]
茶	产地溯源	PCA	99	醛类、醇类、酯类、杂环类、酮类、烯类、萜烯类、酸类	[47]
茶	产地溯源	PLS-DA	120	醛类、烯烃类、醇类、酮类、酯类、羧酸类、呋喃类、吡嗪类、醚类、苯系物	[48]

2.1 粮油食品

粮油食品安全一直是人们关注的焦点之一,假冒伪劣会给消费者带来误导,也对合法企业的经营造成不公平竞争,因此,产地溯源检测对粮油食品安全监管、消费者权益保障和品牌保护有着重要作用。

卞景阳等^[33]采用 GC-IMS 技术对黑龙江哈尔滨市、大庆市、佳木斯市 3 个不同产地香稻米的挥发性物质进行指纹图谱解析,发现 3 个不同产地香稻米有明显的特征峰区域,通过相似度和 PCA,可准确区分和判别 3 个不同产地的香稻米,为稻米产地追溯、品种识别提供参考。此外,GERHARDT 等^[49]的研究也表明,GC-IMS 技术能够成功地区分西班牙和意大利的初榨橄榄油,即使在每个产地组内个体差异很大的情况下,西班牙橄榄油也能成功地与意大利橄榄油区分开。综上所述,GC-IMS 技术的发展与应用,可以有效地确保粮油食品的真实性和质量,保护消费者的合法权益,促进粮油食品市场的公平竞争。

2.2 果蔬

由于同一种果蔬的挥发性有机化合物含量与它们的产地不同有关,基于此可对果蔬进行产地溯源和质量评价。XU 等^[35]的研究表明,利用 GC-IMS 技术,可以明显区分金华、广东和云南不同产地柑橘的挥发性风味物质。同样,何婉琳等^[50]通过构建秋月梨果实挥发性香气成分指纹图谱,不仅明晰了不同产地秋月梨特征挥发性香气成分,还借助相似度分析揭示了 GC-IMS 技术具有实现秋月梨产地区分和产地溯源的潜在应用前景。胡航伟等^[42]则运用该技术成功地构建了芋头样品产地溯源的可视化指纹图谱,并通过 PCA 实现了样品产地的快速区分,该方法为区分地方特色芋头的地理来源提供了新的维度。此外,郭家刚等^[43]以安徽省铜陵市、舒城县、临泉县 3 个不同产地生姜为研究对象,采用 GC-IMS 技术对其挥发性风味物质进行测定,构建了不同产地生姜挥发性风味指纹图谱,通过相似度和 PCA 实现了生姜的产地鉴别,为生姜的质量评价提供了新思路。

2.3 茶叶

随着茶叶市场的升温,消费者越来越热衷于购买来自核心产区的优质茶叶,而不法商贩在劣质产品上乱贴标签扰乱茶叶市场,损害消费者和生产者的权益。近年来,GC-IMS 技术通过分析不同产地茶叶的挥发性风味物质差异来判别茶叶产地,为规范茶叶市场提供了有力的技术支持。

为了实现福建省白茶产地的快速鉴别,罗玉琴等^[14]分析了福建 5 个不同产地白茶的挥发性物质,发现不同产地白茶都有独特的高含量特征挥发性物质,这说明 GC-IMS 技术可以用于建立白茶产地判别模型,为白茶产地鉴别和原产地保护提供重要的参考依据,有助于推动茶叶市场的规范化发展。同样,有研究人员利用 GC-IMS 对 5 个产地“汉中仙毫”的挥发性风味物质进行测定,发现不

同产地“汉中仙毫”的风味物质具有明显的差异,这为“汉中仙毫”的质量控制、产地鉴别、品质评价和品牌保护提供了一种新的思路^[45]。甘爽等^[46]也将 GC-IMS 技术应用于我国 4 个不同产地乌龙茶挥发性风味物质的研究中,结果表明,不同产地乌龙茶样品的挥发性物质含量存在显著差异,这一发现再次验证了 GC-IMS 技术在茶叶产地溯源与品质鉴别中的广泛应用前景。此外,ZHENG 等^[47]采用 GC-IMS 技术对中国 4 省红茶样品中的 99 种挥发性化合物进行了鉴定,其中 55 种化合物的含量存在显著差异,经 PCA,该方法可以很好地区分红茶的 4 个区域,实现产地溯源。综上所述,GC-IMS 技术可以快速、准确地鉴别出茶叶的产地,为消费者提供更为真实、可靠的产品信息。

3 结束语

GC-IMS 技术在食品产地溯源方面发挥着重要的作用,其应用范围十分广泛。利用该技术对样品进行分析检测,从而确定其来源及成分组成,为食品安全提供可靠依据。近几年,随着科技的不断进步,水产品、畜禽肉类、乳类、酒类、粮油制品、果蔬以及茶叶等众多类别的产品都实现了溯源技术的突破^[18]。但该技术在样品的全面表征和准确定量分析方面还存在一定的局限性。(1)不具备完善的 GC-IMS 数据库,导致不能用于全面的定性检索;(2)溯源对象比较不全面,主要集中在部分动植物源食品上,随着研究的深入,会逐步建立完整的 GC-IMS 数据库,以满足挥发性成分定性、定量要求。未来发展的方向之一是结合其他检测技术以扩大溯源和鉴别的范围和效果,比如与质谱仪联用可以提供四维可视化数据:保留时间、离子强度、漂移时间和峰面积,提高挥发性化合物的检测和覆盖率,从而提高了定量的准确性和动态范围。

参考文献

- [1] 刘振平,张丹,黄瑶.电子鼻技术结合化学计量分析对汉源花椒的鉴别[J].食品工业科技,2023,44(16):306-312.
LIU ZP, ZHANG D, HUANG Y. Identification for Hanyuan Zanthoxylum bungeanum by electronic nose technique combined with stoichiometric analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(16): 306-312.
- [2] 刘振平,龙道崎,甘芳媛,等.基于 GC-IMS 技术的油菜花蜂蜜产地溯源模型鉴别[J].中国食品学报,2023,23(8):379-388.
LIU ZP, LONG DQ, GAN FY, et al. Identification model for rape flower honey geographical origin based on GC-IMS technology [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(8): 379-388.
- [3] 余玮玥,黄冬梅,李学辉,等.化学分析技术在动物源性食品产地溯源中的应用[J].农产品质量与安全,2018(1):59-66.
YU WY, HUANG DM, LI XH, et al. Application of chemical analysis technology in origin traceability of animal-derived foods [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2018(1): 59-66.
- [4] 刘美玲,高珂玲,闫鑫磊,等.矿物质指纹技术在动物性食品产地溯源中的应用[J].中国食物与营养,2017,23(5):9-13.
LIU ML, GAO DL, YAN XL, et al. Application of mineral fingerprint in geographical origin tracing of animal-derived foods [J]. Food and

- Nutrition in China, 2017, 23(5): 9–13.
- [5] 刘庭恺, 胡子康, 龙婉君, 等. 基于近红外和中红外光谱的杜仲产地溯源[J]. 化学试剂, 2022, 44(7): 952–959.
LIU TK, HU ZK, LONG WJ, *et al.* Geographical origin traceability of *Eucommiae cortex* based on near and mid infrared spectroscopy [J]. Chemical Reagents, 2022, 44(7): 952–959.
- [6] 张立欣, 杨翠芳, 陈杰, 等. 基于变量优选和近红外光谱技术的红富士苹果产地溯源[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(20): 36–43.
ZHANG LX, YANG CF, CHEN J, *et al.* Tracing the origin of red Fuji apple based on variable optimization and near-infrared spectroscopy [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(20): 36–43.
- [7] 张蕾蕾, 吴剑荣, 张洪涛, 等. 基于 GC-MS 结合化学计量学方法鉴定四川郫县豆瓣酱[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(13): 268–276.
ZHANG LL, WU JR, ZHANG HT, *et al.* Discrimination of broad bean paste from Pixian Sichuan and other origins using GC-MS combined with chemometrics [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(13): 268–276.
- [8] 李富荣, 刘雯雯, 文典, 等. 基于矿质元素指纹分析的陈皮产地溯源研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 295–302.
LI FR, LIU WW, WEN D, *et al.* Study on origin tracing of dried tangerine peel using mineral element fingerprints [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 295–302.
- [9] 焦俊, 圣阳, 马鑫, 等. 基于近红外和远红外光谱信息融合的核桃品种鉴别方法[J]. 农业工程, 2021, 11(12): 35–41.
JIAO J, SHENG Y, MA X, *et al.* Identification of walnut cultivars based on near-infrared and far-infrared spectral information fusion [J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(12): 35–41.
- [10] 黄珏, 王正亮, 李慕雨, 等. 基于电子舌和近红外光谱技术的进口牛肉产地溯源[J]. 中国食品学报, 2021, 21(12): 254–260.
HUANG Y, WANG ZL, LI MY, *et al.* Origin traceability of imported beef based on electronic tongue and NIR spectra [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(12): 254–260.
- [11] 刘文艳, 闫忠心, 郝力壮, 等. 光谱技术在食品产地溯源中的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 421–430.
LIU WY, YAN ZX, HAO LZ, *et al.* Research progress in the application of spectroscopic technology in the traceability of food origin [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 421–430.
- [12] WANG SQ, CHEN HT, SUN BG. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126158.
- [13] 张蓝月, 孙万成, 罗毅皓. 基于气相色谱-离子迁移谱分析不同地区羊肉的挥发性风味化合物[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(10): 265–272.
ZHANG LY, SUN WC, LUO YH. Analysis of volatile flavor compounds in mutton from different regions based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(10): 265–272.
- [14] 罗玉琴, 韦燕菊, 林琳, 等. 基于 GC-IMS 技术的福建白茶产地判别[J]. 农业工程学报, 2021, 37(6): 264–273.
LUO YQ, WEI YJ, LIN L, *et al.* Origin discrimination of Fujian white tea using gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(6): 264–273.
- [15] 陈鑫郁, 贺金娜, 陈通, 等. 气相色谱离子迁移谱联用技术在食用植物油品质检测中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(2): 396–401.
CHEN XY, HE JN, CHEN T, *et al.* Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry in quality determination of edible vegetable oil [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(2): 396–401.
- [16] DENG SY, LIU YH, HUANG F, *et al.* Evaluation of volatile flavor compounds in bacon made by different pig breeds during storage time [J]. Food Chemistry, 2021, 357: 129765.
- [17] 马冬红, 王锡昌, 刘利平, 等. 近红外光谱技术在食品产地溯源中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(4): 877–881.
- MA DH, WANG XC, LIU LP, *et al.* Current progress in food geographical origin traceability by near infrared spectroscopy technology [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(4): 877–881.
- [18] 彭凯秀, 刘欢, 刘鸽, 等. 稳定同位素技术在动植物源食品溯源中的应用研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 338–345.
PENG KX, LIU H, LIU G, *et al.* Application and research progress of stable isotope technology in animal and plant food traceability [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 338–345.
- [19] 刘芳, 张健, 赵云苹, 等. 基于 GC-IMS 分析盐渍海参挥发性风味物质[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(1): 195–198, 217.
LIU F, ZHANG J, ZHAO YP, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds in salted apostichopus japonicas by GC-IMS [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(1): 195–198, 217.
- [20] 崔保威, 欧阳远鑫, 马杨柳, 等. 不同产地秀丽白虾干风味物质 GC-IMS 指纹图谱分析[J]. 食品工业, 2022, 43(7): 311–315.
CUI BW, OUYANG YX, MA YL, *et al.* Fingerprint analysis of volatile flavor compounds of dried exopalaemon modestus from different habitats based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. The Food Industry, 2022, 43(7): 311–315.
- [21] 江津津, 严静, 郑玉玺, 等. 不同产地传统鱼露风味特征差异分析[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 206–214.
JIANG JJ, YAN J, ZHENG YX, *et al.* Analysis of flavor characteristics of traditional fish sauce from different regions [J]. Food Science, 2021, 42(12): 206–214.
- [22] 江津津, 欧爱芬, 潘光健, 等. 不同产地传统海鲜酱的风味特征[J]. 水产学报, 2021, 45(12): 2072–2082.
JIANG JJ, OU AIF, PAN GJ, *et al.* Flavor characteristics of traditional shrimp sauce from different producing areas [J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(12): 2072–2082.
- [23] CHI XL, ZHANG YD, ZHENG N, *et al.* HS-GC-IMS and HS-SPME/GC-MS coupled with E-nose and E-tongue reveal the flavors of raw milk from different regions of China [J]. Current Research in Food Science, 2024, 8: 100673.
- [24] 韩亚平, 苟永桢, 李芬, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱法的不同地区驴乳粉挥发性风味物质指纹图谱分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(23): 155–162.
HAN YP, GOU YZ, LI F, *et al.* Fingerprint analysis of volatile flavor compounds in donkey milk powder from different regions based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(23): 155–162.
- [25] LI WQ, CHEN YP, BLANK I, *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.
- [26] YAO WS, CAI YX, LIU DY, *et al.* Comparative analysis of characteristic volatile compounds in Chinese traditional smoked chicken (specialty poultry products) from different regions by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Poultry Science, 2020, 99: 7192–7201.
- [27] 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 ZY, WANG ZY, *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.
- [28] ECHEGARAY N, DOMÍNGUEZ R, BODAS R, *et al.* Characterization of volatile profile of Longissimus thoracis et lumborum muscle from Castellana and INRA 401 lambs reared under commercial conditions [J]. Small Ruminant Research, 2021, 200: 106396.
- [29] GRABEŽ V, BJELANOVIĆ M, ROHLOFF J, *et al.* The relationship

- between volatile compounds, metabolites and sensory attributes: A case study using lamb and sheep meat [J]. Small Ruminant Research, 2019, 181: 12–20.
- [30] 康帅, 任晓璞, 彭增超. 羊肉的产地溯源和鉴别技术研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(4): 48–53.
- KANG S, REN XP, PENG ZQ. Progress in techniques for mutton traceability and authentication [J]. Meat Research, 2023, 37(4): 48–53.
- [31] 孟新涛, 乔雪, 潘俨, 等. 新疆不同产区羊肉特征风味成分离子迁移色谱指纹谱的构建[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 218–226.
- MENG XT, QIAO X, PAN Y, *et al.* Characteristic flavor compounds fingerprinting of mutton from different producing regions of Xinjiang, China by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food Science, 2020, 41(16): 218–226.
- [32] ROMEO V, ZIINO M, GIUFFRIDA D, *et al.* Flavour profile of capers (*Capparis spinosa* L.) from the Eolian Archipelago by HS-SPME/GC-MS [J]. Food Chemistry, 2007, 101(3): 1272–1278.
- [33] 卞景阳, 孙兴荣, 刘琳琳, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱的不同品种香稻米挥发性有机物指纹图谱分析[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(6): 133–140.
- BIAN JY, SUN XR, LIU LS, *et al.* Analysis of volatile organic compounds fingerprint in different varieties of fragrant rice based on gas chromatography ion-mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(6): 133–140.
- [34] 闫文芝, 杨蕾, 刘静. 内蒙古河套地区小麦粉风味物质 GC-IMS 分析[J]. 中国农学通报, 2022, 38(24): 151–157.
- YAN WZ, YANG L, LIU J. Wheat flour in hetao region of inner mongolia: Analysis of flavor substances by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(24): 151–157.
- [35] XU Y, YAO LY, WANG Y, *et al.* Comparative analysis of the aromatic profiles of citri sarcodactylis fructus from various geographical regions using GC-IMS, GC-MS, and sensory evaluation [J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103752.
- [36] 吕汉清, 况伟, 安逸民, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱法构建不同产地沙田柚挥发性物质指纹图谱[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(21): 6836–6843.
- LV HQ, KUANG W, AN YM, *et al.* Construction of volatile substance fingerprints of *Citrus grandis* Osbeck cv. Shatian from different cultivation regions based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(21): 6836–6843.
- [37] 蒙秋霞, 张丽珍, 李阳, 等. 不同产地‘玉露香’梨品质及香气物质分析[J]. 中国果树, 2020(3): 28–33, 143.
- MENG QX, ZHANG LZ, LI Y, *et al.* Analysis of fruit quality and aroma components of ‘Yuluxiang’ pear from different habitats [J]. China Fruits, 2020(3): 28–33, 143.
- [38] 张文君, 李慧冬, 毛江胜, 等. 不同产地翠冠梨果的 GC-IMS 香气指纹图谱差异性分析[J]. 农产品质量与安全, 2021(5): 23–28.
- ZHANG WJ, LI HD, MAO JS, *et al.* Study on aroma fingerprint of ‘Cuiguan’ pear from geographical origin by gas chromatography-ion mobility spectroscopy [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2021(5): 23–28.
- [39] 杨智鹏, 赵文, 魏喜喜, 等. 基于气相离子迁移谱的不同产地枣果挥发性有机物指纹图谱分析[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 285–291.
- YANG ZP, ZHAO W, WEI XX, *et al.* Fingerprinting of volatile organic compounds in jujubes from different geographical origins by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food Science, 2023, 44(6): 285–291.
- [40] 于怀智, 姜滨, 孙传虎, 等. 顶空气相离子迁移谱技术对不同产地水蜜桃的气味指纹分析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(16): 231–235.
- YU HZ, JIANG B, SUN CH, *et al.* Analysis of nectarine odor fingerprints based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectroscopy [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(16): 231–235.
- [41] 赵新玉, 杜文瑜, 谭梦男, 等. 基于气相离子迁移谱技术分析延安市不同县区的富士苹果挥发性成分的差异[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(12): 240–250.
- ZHAO XY, DU WY, TAN MN, *et al.* Analysis of differences in volatile components of Fuji apples in different counties and districts of Yan’an based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(12): 240–250.
- [42] 胡航伟, 巩敏, 梁辰, 等. 基于气相离子迁移谱技术的芋头产地鉴别方法[J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 297–303.
- HU HW, GONG M, LIANG C, *et al.* Identification method of taro (*Colocasia esculenta* L.) origin based on gas chromatography-ion mobility spectrometry technology [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 297–303.
- [43] 郭家刚, 杨松, 丁思年, 等. 基于气相离子迁移谱的不同产地生姜挥发性有机物指纹图谱分析[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 236–241.
- GUO JG, YANG S, DING SN, *et al.* Fingerprint analysis of volatile organic compounds in ginger rhizomes from different geographical origins by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food Science, 2021, 42(24): 236–241.
- [44] 张剑辉, 张梦琪, 蔡世佳, 等. 6 个产地香椿主要活性成分及风味特征差异分析[J]. 食品科学, 2023, 44(6): 336–343.
- ZHANG JH, ZHANG MQ, CAI SJ, *et al.* Analysis of the differences in major bioactive components and flavor characteristics of *Toona sinensis* buds from six production areas [J]. Food Science, 2023, 44(6): 336–343.
- [45] 金文刚, 陈小华, 耿敬章, 等. 基于气相-离子迁移谱分析不同产地“汉中仙毫”气味指纹差异[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 231–237.
- JIN WG, CHEN XH, GENG JZ, *et al.* Analysis of “Hanzhong Xianhao” odor fingerprints from different places based on GC-IMS [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(5): 231–237.
- [46] 甘爽, 陈志丹, 商虎, 等. 基于气相离子迁移谱技术的不同产地乌龙茶挥发性物质分析[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(9): 68–77.
- GAN S, CHEN ZD, SHANG H, *et al.* Analysis of volatile substance of oolong tea from different origins based on gas chromatography-ion mobility technique [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(9): 68–77.
- [47] ZHENG FL, GAN SY, ZHAO XY, *et al.* Unraveling the chemosensory attributes of Chinese black teas from different regions using GC-IMS combined with sensory analysis [J]. Food Science and Technology, 2023, 184: 114988.
- [48] 罗洁, 邹雅倩, 田星. 基于 GC-IMS 技术的不同产地青钱柳茶挥发性成分表征及分析[J]. 食品与机械, 2024, 40(5): 161–167, 233.
- LUO J, ZOU YQ, TIAN X. Characterization and analysis of the volatile components of *Cyclocarya paliurus* tea from different origins based on GC-IMS technology [J]. Food & Machinery, 2024, 40(5): 161–167, 233.
- [49] GERHARDT N, BIRKENMEIER M, SANDERS D, *et al.* Resolution-optimized headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) for non-targeted olive oil profiling [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2017, 409(16): 3933–3942.
- [50] 何婉琳, 施露, 林梦桦, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱分析不同产地秋月梨品质差异[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 118–125.
- HE WL, SHI L, LIN MH, *et al.* Quality analysis of ‘Akizuki’ pear fruit (*Pyrus pyrifolia*) from different geographical origins by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food Science, 2024, 45(5): 118–125.

(责任编辑: 安香玉 韩晓红)