

气相色谱-离子迁移谱在果蔬制品 分析中的应用：综述

孔天宇, 闫新焕, 李根, 赵晓丹, 马寅斐, 和法涛, 吴茂玉, 师恩娟, 赵岩, 初乐*

(中华全国供销合作总社济南果品研究所, 山东济南 250014)

摘要: 近年来, 果蔬加工行业对加工过程中果蔬品质控制的需求不断提高。气相-离子迁移谱 (Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS) 作为一种快速、实用、可视化的分析工具, 具备稳定的在线测定和精准的分析性能, 逐渐成为果蔬分析领域对挥发性有机化合物检测常用的分析方法。近年来, 人们对 GC-IMS 的应用进行了许多尝试和研究。基于此, 本文首先简要概述了 GC-IMS 的技术原理、运行流程及分析方法。随后, 重点介绍了 GC-IMS 在不同果蔬制品风味在线动态分析的具体应用, 着重强调其突破性和适用性。此外, 该技术还广泛应用于果蔬掺假鉴别、产地溯源以及贮藏过程中品质变化等。最后, 本文还探讨了气相离子迁移谱技术存在的挑战、未来的发展方向和机遇。

关键词: 果蔬制品; 气相离子迁移谱; 挥发性有机化合物; 果蔬加工; 产地溯源

文章编号: 1673-9078(2025)08-326-337

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.8.0775

Application of Gas Chromatography-ion Mobility Spectrometry in the Analysis of Fruit and Vegetable Products: A Review

KONG Tianyu, YAN Xinhuan, LI Gen, ZHAO Xiaodan, MA Yinfei, HE Fatao,

WU Maoyu, SHI Enjuan, ZHAO Yan, CHU Le*

(Jinan Fruit Research Institute, China Supply and Marketing Cooperatives, Ji'nan 250014, China)

Abstract: In recent years, the demand for quality control in the fruit and vegetable processing industry has been increasing. Gas chromatography-ion mobility spectrometry, as a fast, practical, and visual analytical tool with stable on-line determination and accurate performance has gradually gained prominence for the detection of volatile organic compounds in the field of fruit and vegetable analysis. In recent years, the application of gas chromatography-ion mobility spectrometry has been widely utilized and studied. On this basis, this paper first briefly summarizes the technical principle, operation process, and analytical method of gas chromatography-ion mobility spectrometry. Thereafter, its specific application in the on-line, dynamic flavor analysis of different fruit and vegetable products is introduced, with emphasis on breakthroughs and the applicability of this technique. This technique is also widely used in identifying the adulteration of fruit and vegetable products, origin traceability, and assessing quality changes during storage. Finally, the challenges, future directions, and

引文格式:

孔天宇, 闫新焕, 李根, 等. 气相色谱-离子迁移谱在果蔬制品分析中的应用: 综述[J]. 现代食品科技, 2025, 41(8): 326-337.

KONG Tianyu, YAN Xinhuan, LI Gen, et al. Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry in the analysis of fruit and vegetable products: a review [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 326-337.

收稿日期: 2024-06-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD2100802-1); 海右计划产业领军人才本土类 (创新团队) 创新项目

作者简介: 孔天宇 (1998-), 男, 硕士, 初级研究员, 研究方向: 农产品深加工, E-mail: kty980804@163.com

通讯作者: 初乐 (1987-), 女, 硕士, 副研究员, 研究方向: 农产品深加工, E-mail: 785536270@qq.com

opportunities for gas-phase ion mobility spectrometry are discussed.

Key words: fruits and vegetables; gas chromatography-ion mobility spectrum; volatile organic compounds; fruit and vegetable processing; origin traceability

果蔬是人们日常饮食环节中的重要组成部分,主要包括水果、蔬菜、籽果、坚果等,可作为机体摄取电解质、维生素、膳食纤维、矿物质、碳水化合物及多酚等生物活性化合物的重要膳食来源^[1-4],这些化合物对降血压、改善心肺功能、促进伤口愈合、维持人体健康^[5-8]有着积极作用。中国的果蔬资源丰富、种类多样,在提高人体健康效益和社会经济效益上展现出巨大潜力。上世纪九十年代以来,为进一步提高我国果蔬产品附加值,果蔬加工业得到迅猛发展,果蔬产品的加工、贮藏、运输水平明显提高^[9]。广义上讲,果蔬加工是指通过干制脱水、贮藏保鲜、打浆提取等加工方式^[10]。但在贮藏、加工过程中,果蔬感官品质(如色泽、质地等)、香气风味、生物活性化合物含量都会发生一系列动态变化,这对于果蔬产品的价值有较大影响。然而,在更高利润的驱使下,果蔬产品欺诈现象也时有发生,常见方式包括掺假(如果汁稀释、粘贴虚假标签等)、假冒产地、添加违禁物质等,往往会造成安全事故和经济损失^[11]。上述问题都严重制约着我国果蔬加工业的进一步发展,因此,研发一种可以直观反映果蔬加工、贮藏过程中活性化合物、挥发性成分变化,并能够精准鉴定果蔬产品产地、真伪的分析方法,对于我国果蔬加工业的发展意义重大。

目前对果蔬制品风味成分变化、真实性鉴定的检测分析仍以红外光谱(Infrared Spectroscopy, IR)、电子鼻(Electronic Nose, E-Nose)、气相色谱-质谱联用^[12](Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS)、气相色谱-嗅觉-质谱法(Gas Chromatography-Olfactometry-Mass Spectrometry, GC-O-MS)、离子迁移谱(Ion Mobility Spectrometry, IMS)等^[13]技术为主。其中,GC-MS因其定性分析准确、灵敏度较高等优点,成为对挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)检测分析的首选方法^[14,15],但存在样品的预处理复杂和检测分析时间较长等问题,无法满足对样品快速检测分析的工业要求^[16]。GC-O-MS可以精确筛选食品中的芳香族化合物,但重复工作多、检测时间长,不适用于大规模的工业应用^[17]。E-Nose分析技术虽然简单便捷、无需对样品进行预处理,但受到不成熟

的数据处理的限制,无法广泛应用^[18]。IMS是一种根据电场中气相离子迁移速率差异来检测微量气体和表征化学离子成分的分析手段^[19,20]。与上述分析方法相比,IMS技术优势明显,如检测限度低、操作简单、能分离同分异构体等,但在对复杂基质分析时容易发生离子集聚^[21],因此仅使用IMS一种检测技术对样品进行全面分析是较为困难的。基于此,在上世纪70年代,GC与IMS技术开始联合使用,一种兼备高分离(GC)和快速响应能力^[22,23](IMS)的新型分离检测技术应运而生——气相-离子迁移谱(Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS)技术。除响应速度快,GC-IMS的优势还体现在:(1)检测过程无需添加有机试剂,对环境友好无污染;(2)数据结果稳定且直观可视;(3)设备便于携带,可用于室外分析;(4)常压条件下即可使用,使用成本低。凭借诸多优势,GC-IMS逐渐成为果蔬制品风味分析的热点技术。本文主要分为两个部分。第一部分对GC-IMS技术的基本原理、运行流程及分析方法进行概述。第二部分重点介绍GC-IMS技术在果蔬制品分析中的最新应用,包括对不同果蔬加工制品的风味变化、果蔬制品掺假检测、果蔬产地溯源分析以及果蔬在贮藏保鲜过程的品质把控。最后,阐述了GC-IMS技术在果蔬分析领域中面临的挑战、未来发展方向和机遇。本文论证了GC-IMS技术作为VOCs和风味分析手段的重要性,为该技术在相关领域的应用提供一定参考。

1 气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)技术

1.1 GC-IMS技术原理概述

气相-离子迁移谱(Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS)技术融合了气相色谱与离子迁移谱各自的优势,是一种可以对微量VOCs进行定性定量分析的实用分析工具,在识别同分异构体分子,特别是环异构体化合物方面具有实质性优势^[24]。由图1可知,GC-IMS系统主要由5部分组成,分别是样品进出口、气相预分离、电场中的电离和离子迁移分离区域、检测区域,其

中电场区域是 GC-IMS 的核心区域^[25]。在进入 IMS 系统前,通过采样器将果蔬样品注入毛细管柱内,毛细管柱通过将复杂基质进行分离,减少电离竞争^[26],进而实现对 VOCs 浓度的定量分析。果蔬样品进入气相预分离入口后,基于各分子在 GC 内极性差异,致使产生的分子移动速度不同,所以保留时间不同。经过气化后,果蔬样品进入 IMS 中,并在电场的离子化区域被电离为离子,其中大部分正离子经离子门进入迁移分离区域并向检测器附近聚集^[27],此过程中,正离子与惰性气体发生撞击,在撞击减速和电场加速的相互作用下以平稳的速率抵达检测器,最终产生离子迁移率^[25]。结合实际操作,直接进样和顶空进样(Headspace Injection, HS)是 GC-IMS 的两种基本进样方式^[28],其中顶空离子迁移谱分析(Headspace Injection-Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, HS-GC-IMS)因其可以免除繁琐的样品前处理过程、避免有机溶剂等杂质对分析造成干扰及减少样品对色谱柱及进样口的污染等优势,在果蔬 VOCs 检测中应用广泛。

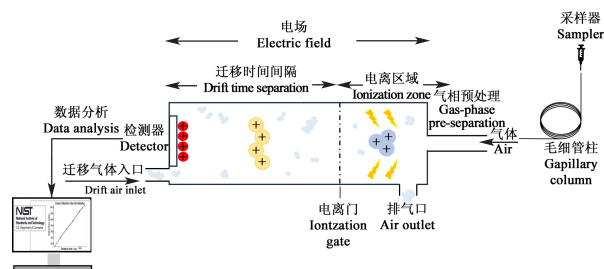


图 1 GC-IMS 技术原理流程图

Fig.1 Principle flow chart of GC-IMS technology

1.2 GC-IMS 技术分析方法

1.2.1 GC-IMS 数据组成

通过上述分析过程后,可以得到由保留时间(Retention Time)、迁移时间(Drift Time)以及信号强度(Signal Intensity)组成的 3D-地形图,如图 2a 所示。在图 2a 中,横向代表离子迁移时间;纵向代表保留时间;凸起的峰高代表待测物中不同物质的信号强度。其中,信号强度变化可以表示在贮藏、加工过程中果蔬制品 VOCs 的变化,如信号强度降低,表明该物质含量减少;信号强度提高,则表明在某种条件下促成该物质的含量的提高。对 3D-地形图初步分析后,GC-IMS 数据可以转化成更加直观可视的 VOCs 指纹图谱^[29],如图 2b。在指纹图谱中,每一个圆点表明一种 VOCs;颜色深度表明该 VOCs 的多少(颜色越深则含量越高);每一

行表明样品中检测出的 VOCs;每一列表明 VOCs 在样品中的含量值。此外,当被测样品间差异区域较少、变化不显著时,可以对降维处理后的数据依次减去对照样品组数据,形成便于观察和比较的二维差异图谱^[30]。但获得的二维图谱只能在整体上对样品的风味变化进行分析,对具体成分的变化无法准确表达,因此需要通过结合化学计量法对图谱信息进行进一步分析^[31]。

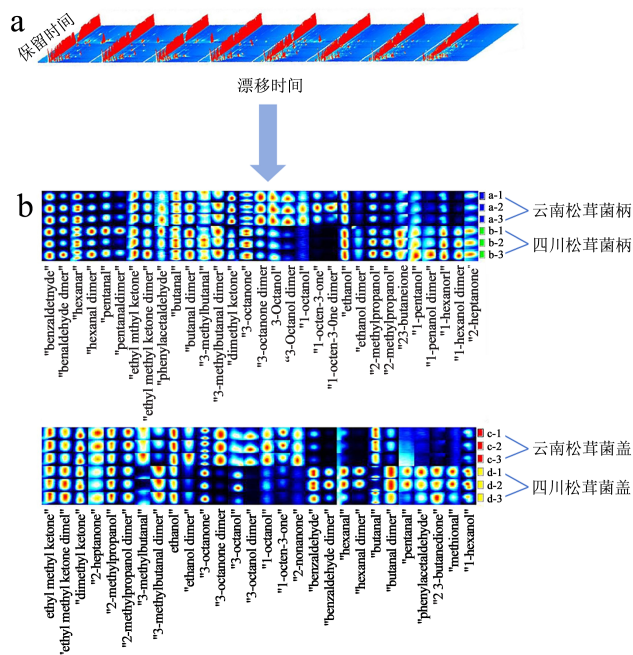


图 2 3D-地形图 (a) 和特征指纹图谱 (b)

Fig.2 3D-topographic (a) and characteristic fingerprint (b)

需要注意的是,采集到的数据中通常包含不相关的信息,如样品的颗粒散射、光谱噪声和基线漂移等,因此需要对得到的光谱数据进行预处理^[32]。通常使用 Savitzky-Golay (SG) 平滑、标准正态变量(Standard Normal Variate, SNV)变换等技术来提高原始数据的准确性;使用乘法散射校正(Multiplication Scattering Correction, MSC)技术可以减轻环境造成的光谱差异,增强光谱与数据之间的相关性。

1.2.2 化学计量法

虽然 GC 与 IMS 相互耦合使用大幅提高了对复杂样品的分析能力,但是也大大增加了对待测样本分析的信息量(冗余数据),这些信息会干扰对样本自身真实信息的辨别,进而影响分析精度和设备运行稳定性。因此,有必要借助化学计量法从采集的数据中提取最有用的特征信息,并与相应的理化数值(如风味物质含量)相结合,建立相关分析模

型，从而揭示预测目标与相关变量之间化学行为结构的动态变化关系^[33]。

为了将采集到的 GC-IMS 数据转换为可利用的信息，需要进一步的处理。可以应用线性技术，如偏最小二乘回归（Partial Least Squares Regression, PLSR）和主成分分析（Principal Component Analysis, PCA）等^[34]。但在 GC-IMS 数据采集过程中，样本复杂的理化性质会引入干扰信息，使得 PLSR 等单变量校准方法不再适用。为了解决这个问题，有必要引入其它校准方法，其中标准多元线性回归（Standard Multiple Linear Regression, SMLR）是由 PLSR 推导得到的，已被作为一种简单的多元逆校正方法使用。然而，数据分析中多个变量的存在使 SMLR 计算更加复杂，在增加变量不可预测性的同时降低其精度，限制了其应用。除此之外，逐步回归（Stepwise Regression, SR）和主成分回归（Principal Component Regression, PCR）等变量压缩技术也被广泛使用^[35]。SR 涉及变量的引入或删除，每个步骤都要进行验证 *F* 检验，以确保在引入新变量之前回归方程中只包括重要变量。虽然 SR 精度较高，但它对样本量提出了严格的要求，当样本量小于 200 时，参数估计可能会有偏差，从而限制了其在实验室中的应用。PCR 将 PCA 与 PLS 相结合，对选定的主成分（Principal Component, PC）和相应的参考值进行回归分析。与 PLS 相比，PCR 是一种改进的统计分析方法^[36]，它解决了由输入变量之间的共线引起的多元线性回归（Multiple Linear Regression, MLR）中的计算误差问题。然而，就运行速度而言，PCR 慢于 MLR。PCA 采用“降维”的方式将多个指标转换为几个主要成分，这些成分能够捕捉分析问题的本质，同时可以最大限度地减少信息损失并优化系统结构。PLSR 结合了 PCA 和 MLR 的优点，它不仅可以处理样本数量小于变量数量的情况，而且利用 PCA 提取反映数据变化的最大信息。尽管 PCA 只考虑单个自变量矩阵^[37]，但 PLSR 结合了“响应”矩阵，从而提高了预测性能^[38]。

尽管上述线性校准技术适用于大多数数据处理场景，但在特殊情况下，需要非线性方法来获得更准确的校准模型。非线性回归分析涉及具有未知回归系数的非线性结构回归函数，当收集的数据中存在固有的非线性问题时，通常采用非线性回归方法来解决这些问题，包括人工神经网络（Artificial

Neural Network, ANN）、支持向量机（Support Vector Machine, SVM），多项式回归（Polynomial Regression, PR）、随机森林回归（Random Forest Regression, RFR）等。在校准过程中，需要将所有样本划分为校准集和未用于校准的独立验证集来评估预测性能，如果没有这种数据分离，预测结果的可信度将受到损害。

2 GC-IMS在果蔬制品分析中的应用

表 1 不同分析技术的比较

Table 1 Comparison of different analytical techniques

分析技术	优点	缺点	参考文献
IR	非破坏性、快速简便、使用范围广	灵敏度低、限制条件多、数据解析繁琐	[11,33]
GC-MS	分辨率高、灵敏度高、使用范围广	使用成本高、数据解析繁琐、对复杂基质灵敏度较低	[11,13]
GC-O-MS	可筛选芳香性化合物	处理繁琐、检测时间长	[13,15,17]
E-Nose	操作简便、可动态监测	成本较高、易受外部干扰、数据分析误差大	[12-14,18]
IMS	检测限度低、高分离性、可分离同分异构体	对复杂基质易发生集聚、数据模型建立困难	[14,19,22]
GC-IMS	处理便捷、灵敏度高、数据可靠、检测时间快	仪器成本高、数据库不完善、定量分析误差较大	[13,14,21]

风味是食品具有的独特感官特征，也是衡量食品新鲜程度和营养价值的重要因素^[38]。其中，VOCs 浓度是监测果蔬制品风味的重要指标^[39]。目前，仪器分析和感官评价是对果蔬中 VOCs 检测的两种主要途径。感官评价是通过感官评价员对食物气味进行感知，结果虽相对客观，但存在成本高、实验周期长等局限，且不能在分子水平上进行深入探究^[26]。为此，仪器分析技术得到迅速发展，成为鉴定果蔬中挥发性物质的“主力军”。当前，检测果蔬中 VOCs 的常用仪器方法包括液相色谱-质谱法（Liquid Chromatography Mass Spectrometry, LC-MS）、GC-MS、GC-O-MS 及 GC-IMS 等^[40-42]。其中，GC-MS 是现阶段对果蔬制品中 VOCs 检测分析的首选方法^[15,43]。与上述技术相比，GC-IMS 具备绿色环保、检测时间快、无需预处理、结果稳定可靠等优点，不同分析技术比较如表 1 所示。GC-IMS 将

GC 的强分离能力与 IMS 的快速检测分析相结合,在果蔬及制品风味分析方面得到广泛应用^[26],表 2 和表 3 对此进行了总结。

2.1 GC-IMS 在不同果蔬制品加工过程中的应用

随着生活水平的日益提高,人们对健康饮食也愈发重视。食物中的营养价值与风味特性之间的平衡变得至关重要^[44]。如今,在消费者高要求、高期待的时代背景下,我国果蔬加工技术迅猛发展,形形色色的果蔬加工技术层出不穷。为进一步迎合市场需要,一些绿色且营养的制品进入人们的视线,如非浓缩(Not From Concentrate, NFC)果蔬汁和脱水果蔬等加工制品^[45]。然而,果蔬因其易腐性的特点,在加工过程中水分和营养素流失以及挤压碰撞导致的外观破坏现象频发,严重时甚至会诱发霉变,产生较大的社会和经济价值损失。因此,需要在果蔬加工过程中对不同果蔬制品进行实时质量品质监测,从而确保果蔬制品的安全、营养及高附加值。表 2 总结了 GC-IMS 技术在液态、发酵、干燥等不同果蔬制品中的具体应用。

2.1.1 液态制品

果蔬液态制品主要可以分为果蔬原汁/浆和果蔬饮料两类^[46],二者因营养成分丰富且口味清爽芬芳受到消费者的青睐。在加工过程中,无论是热加工还是非热加工技术都会对其营养成分产生一定影响,从而降低果蔬液态制品的风味和附加值^[47],而 GC-IMS 技术可以在该加工过程中为风味物质的变化提供可靠的理论与数据支持。

Yang 等^[48]为确认西瓜汁的香气特征,使用 HS-GC-IMS 对鲜西瓜汁和热处理西瓜汁中 VOCs 进行分析。在检测出的 23 种化合物中,甲基硫烯丙基、乙托因和戊醛在热处理西瓜汁中首次测出,而 2,6-二甲基-5-庚烯醛首次被确认为鲜西瓜汁中的特征风味化合物。在西瓜汁的香气分析中,HS-GC-IMS 展现出可快速分析样品,检出限度低,无需预处理等优势。罗百然等^[49]使用 GC-IMS 结合 PCA 对由高压均质技术制得的椰浆风味物质进行了研究。通过 GC-IMS 技术构建的指纹图谱显示,在检出的 33 种香气成分中,包括壬醛在内的 26 种成分没有发生变化,但高压均质处理前后的苦味数值存在显著差异。这表明 GC-IMS 技术可应用于探索椰浆风味的变化,并为椰浆原有风味保留的

同时,减少苦涩、提高品质提供了新思路^[49]。王亚男^[50]通过复配处理研发出新型桑葚-山葡萄复合饮料,并应用 GC-IMS 技术对其中风味物质进行测定,检测出十六酸乙酯、二烯酸乙酯和十二酸乙酯等呈现花香、奶油和玫瑰风味的 VOCs。近期,张卜升等^[51]应用 GC-IMS 技术对酿制过程中石榴酒 VOCs 的变化规律进行了研究,并通过结合 PCA 成功构建风味指纹图谱。结果表明,共有 36 种成分被检测定性,其中乙酯类成分含量升高,乙酸异戊酯及乙酸(异)丁酯类成分含量降低^[51],该研究为改进果酒加工过程中风味控制提供借鉴。通过上述研究可以看出,GC-IMS 技术可以对果蔬液态制品中 VOCs 含量进行精确分析,充分证明其可以应用于果蔬液态制品加工过程风味物质的变化分析当中。

2.1.2 发酵制品

发酵果蔬制品是以一或多种果蔬为原料,通过接种有益菌进行发酵得到的具有极高营养价值的功能性制品^[52,53]。发酵果蔬作为一种健康保健制品,得到广大消费者青睐,并展现出巨大的市场潜力。经过有益微生物发酵,果蔬制品的营养及感官特性一定程度上可以提高^[38],多项研究对此进行了证实。因此,通过引入 GC-IMS 技术可为发酵过程中果蔬制品风味改进提供理论参考^[53]。

Wu 等^[54]使用 GC-IMS 结合 PCA 的方法对沙棘汁在发酵过程中 33 种挥发性风味成分变化进行评估。研究发现,通过建立沙棘汁在不同发酵阶段的指纹图谱,可以直观地识别在不同发酵阶段沙棘汁中特征挥发分子种类的差异,并证实发酵处理可以增加沙棘汁的甜味和苦味口感。Tang 等^[55]采用 HS-GC-IMS 对荔枝酒发酵过程中特征香气物质释放演变进行追踪。结果表明,发酵初期是荔枝酒特征香气散失的主要阶段,减少约三倍以上。除此之外,该研究发现了可以调节和改善荔枝酒风味的挥发性单体成分,为荔枝酒发酵过程中香气的变化提供重要信息。温锦丽等^[56]采用 HS-GC-IMS 技术对经不同酵母发酵后软枣猕猴桃果酒中有机酸及 VOCs 进行了研究。结果表明,不同酵母发酵果酒中的有机酸和 VOCs 含量存在差异,但 VOCs 组成成分较为相似。在该研究中,共检测出 51 中挥发性成分,并从中筛选出己酸乙酯、乙酸异丁酯、己酸甲酯等 7 种主要香气物质,为果酒产品的风味物质研究拓展了新思路。Li 等^[57]在研究中比较了酿酒酵母和 *Torulaspora delbrueckii* 菌联合使用(顺序接种、共

发酵、自发酵和单次接种酿酒酵母 4 种模式), 对覆盆子葡萄酒的各项特性进行分析。通过 HS-GC-IMS 结合 PLS 分析显示出各种加工模式对香气的影响和联系。结果表明, 顺序接种的加工方式在覆盆子葡萄酒的生产中具有更大的潜力, 这将为未来加工出更符合理想特性的葡萄酒奠定理论基础。除此之外, Chen 等^[58]为探究低温低盐发酵对大头菜中 VOCs 的影响机理, 对传统高盐发酵大头菜和低温低盐发酵大头菜的理化和质地特性进行分析。通过 HS-GC-IMS 技术结合 PCA 和正交偏最小二乘判别分析 (Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis, OPLS-DA) 等多元统计分析后可知, 低温低盐发酵后大头菜中蛋白质和还原糖含量显著提高 ($P<0.05$), 总酸含量显著降低 ($P<0.05$)。此外, 通过低温低盐发酵可以有效抑制 3-甲基丁酸生成的难闻气味。该研究为开发大头菜绿色加工技术和低盐新产品提供了支持。在上述研究中, GC-IMS 展现出对发酵过程中果蔬风味变化的强大分析和监测能力, 并可以为发酵技术的改进提供理论支持, 表明该技术在果蔬发酵的风味分析领域具有广阔的应用前景。

2.1.3 干燥制品

新鲜果蔬中过高的水分含量为微生物提供了理想的繁殖条件^[59], 使其不耐贮藏、并对果蔬制品产生品质损害。干燥加工可以有效降低新鲜果蔬中水分含量, 延长贮藏期限。干燥加工处理在改变醇、醛等成分含量的同时, 也会促进新的 VOCs 的产生, 进而影响果蔬的风味^[60]。

Hu 等^[61]探究了两种加工方式 (常压和真空糖渗透) 以及不同干燥时间对金桔蜜饯中 VOCs 的影响。研究中, 利用 HS-GC-IMS 建立特征 VOCs 指纹图谱, 共确认出 22 个化合物和 40 个信号峰, 其中戊醛酮和二甲基酮分别是常压和真空糖渗透加工的特征变化标志物 ($P<0.05$), 通过 PCA 和热图分析均可很好区分不同加工方式对金桔蜜饯 VOCs 的影响, 这证实了基于 HS-GC-IMS 法对评价具有不同挥发性特征的加工金桔的潜力。Li 等^[62]采用 HS-GC-IMS 指纹图谱结合 PCA 对干燥前后松茸中的 VOCs 进行了分析 (如图 2)^[62]。随着干燥处理的进行, 在识别出的 25 种典型靶化合物中, 甲醇和 1-戊醇的浓度升高、3-辛酮、3-辛醇等 C8 化合物的浓度降低。Ge 等^[63]借助 HS-GC-IMS 对热空气干燥处理 (不同温度) 过程中辣椒中 VOCs 变化进行了研究, 研究

中共检测出 45 种化合物。结果表明, VOCs 含量的变化与热风干燥温度有着紧密联系, 在 60 °C 的干燥条件下辣椒中 VOCs 损失率最小, 总的来说 GC-IMS 技术是一种可应用于辣椒干燥过程风味分析的可靠方法。为进一步提高干制黄冠梨制品的品质, 宋娟等^[64]对 3 种干燥方法 (真空冷冻、热风及太阳能) 处理下黄冠梨风味指标的变化进行比较分析, 借助 GC-IMS 技术共鉴别出脂类、萜烯类在内的 72 种 VOCs。分析结果表明, 真空冷冻干燥处理后的黄冠梨更富有果香风味, 其中醛、醇等风味成分显著增加, 因此 GC-IMS 技术可为黄冠梨干燥过程中品质控制提供新方式。Wang 等^[65]借助 HS-GC-IMS 技术证明猕猴桃采后的干燥处理可以显著降低因成熟度不同引起的 VOCs 差异, 为猕猴桃采后成熟过程中有效干燥提供了实际意义。这些研究表明, 通过 GC-IMS 技术对果蔬干燥制品加工过程中风味变化进行分析, 不仅可以更好的保证果蔬干燥制品的风味品质并且有利于最佳干燥终点的判定。

2.2 GC-IMS在果蔬制品掺伪检测中的应用

随着 GC-IMS 技术的日益成熟, 它不仅在定量分析中得到了广泛应用, 而且在定性分析中也展现出巨大的应用潜力, 如食品掺假的鉴别。如今, 果蔬制品的产销过程中普遍存在欺诈和掺假现象, 因此开发一种快速准确的检测分析工具十分重要。传统上, 确定掺假的方法主要是由受过培训的专业人员进行评估。然而, 这种方法容易受到评估者主观偏见的影响^[66]。此外, 检测食品掺假还可以通过紫外-可见光谱法 (UV-Visible Spectroscopy, UV-Vis) 和 GC-MS 的结合^[67]。但这种方法耗时、昂贵且使用有毒试剂, 不适合快速检测是否掺假。在这种情况下, GC-IMS 分析在鉴别果蔬制品掺假方面引起了人们的关注, 其在果蔬掺伪检测中的具体应用如表 3 所示。

在稍早的研究中, Tian 等^[68]对 GC 和 GC-IMS 是否可以应用于检测花生油与菜籽油掺混进行了评估, 通过 GC-IMS、CA 和 PCA 的结合使用, 取得了令人欣喜的掺假测定结果。在不同油种中都含有各自特征化合物, 并且随着掺假比例的增减, 其特征信号也发生相应的变化。与 GC 相比, GC-IMS 对掺假物质的识别精度更高 (掺假量 $< 1\%$), 显示出更高的分析精确度, 表明其可以应用于物质掺假检测中。香气成分是对果蔬制品质量控制和原产

地可追溯性的关键因素之一，不同种类的花果茶由于香气差异会具有不同的口感。Zhang 等^[69]使用 HS-GC-IMS 结合 PCA 建立了金银花中特征挥发性物质的指纹图谱，并以此为指标，成功鉴别出金银花与假药金银花（山银花）。龙门等^[70]借助 GC-IMS、感官评价、PCA 和聚类分析（Cluster Analysis, CA）对纯油菜花蜜、纯洋槐蜜以及不同比例混合样品的挥发性成分进行指纹图谱分析。结果表明，通过提取 GC-IMS 三维矩阵中的关键信息，可以有效鉴别纯油菜蜜、纯洋槐蜜以及混合样品，并且揭示出掺入不同量的油菜花蜜对洋槐蜜风味的影响趋

势，可为现代果蔬蜜产品的质量把控提供新思路和新方案。Yang 等^[71]采用 GC-IMS 对 7 种果酒中挥发性有机物进行研究。结果表明不同果酒中挥发成分具有显著差异，并且每种果酒中都存在特定的挥发性物质，如苹果啤酒中的乙酸丁酯、桃啤酒中的 2,3-二乙基 5-甲基吡嗪、蓝莓啤酒中的 2-羟基丙酸乙酯。本研究为果酒的挥发性成分分析提供了一种方法，有助于验证果酒中的掺假现象。由此可见，作为一种新兴的分析技术，GC-IMS 符合当下对果蔬制品掺伪检测技术的要求，具有广阔的应用前景。

表 2 GC-IMS在不同果蔬制品分析中的应用
Table 2 Application of GC-IMS in different fruit and vegetable products

果蔬制品 类型	原料 / 对象	分析技术	分析结果	参考 文献
液态制品	西瓜汁	热图、火山图分析	风味标志物: 2,6-二甲基-5-庚烯醛	[48]
	椰浆	PCA	检出 33 种风味物质 椰浆苦味与均值压力呈正比	[49]
	桑葚-山葡萄饮料	PCA	复合饮料中庚醛、丙酮、香茅醇等 含量升高	[50]
	石榴酒	PCA	陈酿葡萄酒中乙酯类含量升高; 丁酯、 异戊酯含量下降	[51]
	沙棘汁	PCA	检出 33 种挥发性成分, 包括 24 种酯类、 4 种醇类、4 种萜烯类和 1 种酮类	[54]
	荔枝酒	PCA	检出 97 种挥发性成分, 主要包括 39 种萜 类、22 种酯类、5 种醇类、烯烃类 7 种	[55]
发酵制品	猕猴桃果酒	PCA+OPLS-DA+CA	检出 51 种挥发性成分, 包括 24 种酯类、 11 种醇类、9 种醛类、4 种酮类、2 种萜烯类、 1 种酸类	[56]
	覆盆子葡萄酒	PLS+PCA	检出 40 种挥发性香气, 主要为酯类, 酮类和萜烯类含量较低	[57]
	大头菜	OPLS-DA+PCA	3-甲基丁酸、己腈、3-甲基-3 丁烯-1-醇 等可作为鉴定不同发酵方法 大头菜的标志物	[58]
干燥制品	金桔蜜饯	PCA+ 热图分析	检出 22 种挥发性成分, 2 种萜类、4 种酯 类、7 种醛类、3 种酮类和 6 种醇类	[61]
	松茸	PCA	干燥后 3-辛酮、3-辛醇、1-辛醇浓度降低, 甲醇和 1-戊醇浓度升高	[62]
	辣椒	PCA	检出 45 种挥发性成分, 11 种酯类、11 种 醛类、9 种醇类、5 种酮类、3 种呋喃类、 2 种吡嗪类和 1 种醚类	[63]
	黄冠梨	PCA	检出 72 种挥发性成分, 冷冻干燥后, 酯 类含量减少, 醛类、酮类和醇类含量增加	[64]
	猕猴桃	PCA	乙醇增加, 戊醛、2,4-辛二烯醛、 2-庚烯醛、庚醛减少	[65]

2.3 GC-IMS在果蔬产地溯源中的应用

食物质量、风味和形状的变化可能是由食物生长区域的差异引起的。这种品质可变性对果蔬的商业价值产生了巨大影响,在商业利益驱动下导致伪劣果蔬来源标签现象的产生。果蔬标签的虚假标注掩盖了其真实的地理来源,极大地损害了消费者的知情权益,并可能对消费者的健康和安全造成潜在危害。GC-IMS 技术的引入可以有效解决果蔬来源不明的问题。目前,GC-IMS 技术已被广泛用于识别和预测果蔬及其制品的产地和分类。

地理标志 (Geographical Indication, GI) 保护对于保护食品农产品的品牌价值及促进行业可持续发展至关重要。水果是中国 GI 产品的一个主要来源。在稍早的研究中,于怀智等^[72]对来自中国 5 个地区的水蜜桃风味指纹图谱开展研究。在研究中,基于 PCA 结合 HS-GC-IMS 技术,对各个地区水蜜桃 VOCs 指纹图谱的差异进行分析。结果表明,不同地区水蜜桃中 VOCs 组成种类大致相同,但具体含量存在差异,均存在特征标志 VOCs,风味水平差异明显,这表明 HS-GC-IMS 技术可以应用于快速鉴别不同地区水蜜桃中 VOCs 差异。葡萄因其独特的风味和营养价值在世界范围内备受关注,其感官质量和消费者接受度与原产地有显著关系^[73]。Feng 等^[74]使用 GC-IMS 结合 PCA 对来自中国宁波、北镇、漳州等地的茉莉香葡萄的挥发性图谱进行了研究。在研究中,不同地区葡萄的挥发性指纹图谱存在较大差异,这表明葡萄香气或许受到产地的影响。通过 PCA 和感官评价可知,不同地区葡萄的特征香气存在显著差异 ($P \leq 0.05$),其中 E-2-辛烯醛、苯乙烯和苯甲醛等风味物质是区分茉莉香葡萄产地的地理标志物。我国枣果资源丰富,拥有众多枣果品种,是世界上最大的枣果产地。研究发现不同产地枣果中 VOCs 存在差异,因此可通过 GC-IMS 的风味成分分析对枣果进行产地溯源。杨智鹏等^[75]在构建枣果风味指纹图谱的基础上,对 31 个地区枣果中特征 VOCs 成分进行分析,从结果中可以清晰看出各地枣果中 VOCs 的主要成分存在明显差异,其中新疆骏枣和灰枣的 VOCs 与枣果原产地差别较大。近期,刘振平等^[76]利用 GC-IMS 结合偏最小二乘判别分析 (Partial Least Squares-Discriminant Analysis, PLS-DA) 的方法,对来自 10 个不同产地的油菜花蜜中 VOCs 进行测定,并成功建立油菜花蜜产地的预测鉴别模型。在该研究中,GC-IMS 展现出对蜂

蜜样品产地的准确鉴别能力 ($R^2=0.987$, 预测能力参数 $Q^2=0.959$)。何婉琳等^[77]对来自 6 个地区的秋月梨品质进行了评估,通过 GC-IMS 建立了秋月梨 VOCs 的指纹图谱,发现不同产地的秋月梨中黄酮、酚类物质含量存在明显差异 ($P < 0.05$)。此外,该研究共检测出 76 种香气成分,其中以酯类物质最为丰富,并且各地秋月梨中存在不同的特殊 VOCs 成分,这为 GC-IMS 应用于秋月梨产地鉴别和溯源提供理论支持。以上研究充分证实,依托 GC-IMS 技术构建的指纹图谱可以很好的展示果蔬风味成分的地区差异,在溯源分析中表现出良好的应用潜力,为果蔬产品的产地追溯提供新思路。

2.4 GC-IMS在果蔬贮藏保鲜中的应用

果蔬采摘后仍会保持着活跃的呼吸和蒸腾等新陈代谢,在一定程度上会导致品质的降低。因此,果蔬采后的保鲜和贮藏是推动果蔬产业进一步发展的关键一环^[78],GC-IMS 技术在其中发挥了重要作用 (表 3),因此,果蔬采后的保鲜和贮藏是推动果蔬产业进一步发展的关键一环,GC-IMS 技术在其中发挥了重要作用 (表 3)。李亚会等^[79]采用 GC-IMS 联合 PCA,对不同贮藏时间内番荔枝枝中 VOCs 变化进行测定,并在建立指纹图谱的基础上得到最佳保鲜方式。通过该研究,证明 GC-IMS 分析在评估果蔬保鲜方式上具备广阔应用前景。Liu 等^[80]为探究牛油果在贮藏过程中不同时期产生的 VOCs 是否存在差异,采用 GC-IMS 结合 PCA 对牛油果贮藏期间 VOCs 的变化趋势进行表征鉴定。结果表明,特征 VOCs 含量随着贮藏时间的延长而持续增加,在第 13 天尤为明显。该研究成功建立牛油果中 VOCs 的指纹图谱,通过识别特征 VOCs 的信号强度对其成熟度进行判断,表现出 GC-IMS 技术在预测水果成熟度方面的潜力。孟祥春等^[81]通过 GC-IMS 技术发现,贮藏时间对黄金百香果 VOCs 影响十分显著,其中大多数 VOCs 含量随着贮藏时间的延长而提高,并在 8~10 d 内保持较高水平。Leng 等^[82]通过 HS-GC-IMS 结合 PCA 构建了不同保鲜方法下蜜桃贮藏期间的指纹图谱,共检测出 32 种化合物及 52 个信号峰,并发现 10 种未知成分。该研究揭示了不同保鲜方法下蜜桃实时贮藏过程中 VOCs 的差异,为未来预测果蔬成熟度和评价保鲜效果差异方面提供新可能。通过上述研究可知,GC-IMS 技术能够实现对贮藏过程中果蔬风味成分及品质变化的实时监测,从而提高果蔬食用安全性。

表 3 GC-IMS在果蔬分析中的其它应用

Table 3 Other application of GC-IMS in fruit and vegetable analysis

应用领域	原料 / 对象	分析技术	分析结果	参考文献
掺假监测	菜籽油	CA+PCA	对花生油与菜籽油掺杂的最低检测值限可至 1%，可精准鉴别	[68]
	金银花	PCA	可准确鉴定金银花是否掺杂，筛选出苯乙烯、3z- 己烯醇、甲基吡嗪等 9 种挥发性成分作为鉴别金银花与山银花的化学标记物	[69]
	油菜花蜜 洋槐蜜	PCA+CA	可准确区分 100% 洋槐蜜、100% 油菜花蜜和不同比例混合的样品	[70]
	果酒	PCA	检出 7 种果酒中各自的特征挥发性成分，对果酒混合可准确鉴别	[71]
产地溯源	水蜜桃	PCA	准确区分不同产地的水蜜桃风味差异，5 类水蜜桃品种与各自产地的匹配值达到 90% 以上	[72]
	茉莉香葡萄	PCA+ 感官分析	检出各自产地茉莉香葡萄的特征挥发性成分，并且各地样品中挥发性成分含量差异明显。	[74]
	枣果	PCA	不同产地枣果中 VOCs 差异明显，通过各自特征风味标志物可准确追溯枣果产地	[75]
	油菜花蜜	PLS-DA+PCA	建立预测模型的预测能力参数和拟合优度参数分别达到 0.959 和 0.987，展现出稳健的溯源能力	[76]
	秋月梨	PCA+ 欧氏距离分析	不同产地秋月梨中可滴定酸、醛、酮等成分含量存在显著差异，可通过各地秋月梨的特征香气成分进行准确鉴别	[77]
加工过程	番荔枝	PCA	保鲜剂处理后，番荔枝内丁二酮、苯甲酸、正丁醛等风味物质含量损失较少	[79]
	牛油果	PCA	成功通过动态监测牛油果中苯酚、丙烯含量减少，丙酮含量增加等变化判断其成熟程度	[80]
	黄金百香果	PCA+ 感官分析	检出 40 种挥发性物质，其中多数物质含量随贮藏时间延长而增加	[81]
	蜜桃	PCA	成功揭示不同保鲜方法处理下蜜桃中 VOCs 含量的变化差异	[82]

3 GC-IMS的挑战和机遇

经过多年的发展和应用，GC-IMS 技术逐渐成为果蔬风味分析的“生力军”。正如上文所讨论的，GC-IMS 技术因其快速高效、可视直观、无损分析等优势，在果蔬制品分析的众多领域发挥着至关重要的作用。

然而，随着对 GC-IMS 技术的进一步研究，其局限性也越发明显。第一，尽管 GC-IMS 技术使用成本较低，但高昂的仪器价格极大地限制了其在实践中的应用。第二，检测过程中环境条件对后续分析性能有较为显著影响，虽然现阶段小规模实验室研究可以确保环境稳定性，但在大规模工业生产中实现这些条件是困难的，这限制了 GC-IMS 技术在果蔬检测行业的广泛应用。第三，由于 IMS 作为一类气相色谱检测器，在定量分析方面不够精确，会产生较大的分析误差^[26]。第四，GC-IMS 技术无法检测到烷烃类成分，这是因为烷烃质子的亲和力小于水，无法抢夺质子，这也是由 IMS 的原理决定的。第五，由于是一种新兴分析技术，GC-IMS

的数据库还不够完整且各大数据库中的数据无法共享，部分 VOCs 还无法通过 GC-IMS 进行识别分析。

尽管存在上述局限，但通过实际需要及科研人员的努力，可用于定量分析的高精度、低价格的 GC-IMS 仪器定会研制成功，这将从根本上改变 GC-IMS 技术在果蔬制品分析领域的地位。同时，具有快速、经济、无损检测能力的小型便携式 GC-IMS 设备将成为未来果蔬制品在线检测的理想工具和新发展方向。第二，需要构建一个全面完整、共享开放的果蔬 VOCs 指纹图谱数据库，让 GC-IMS 的大规模应用成为现实。第三，需进一步开发包括两组迁移时间、保留时间和离子强度信号数据在内的四维分析模式，让分析果蔬制品复杂基质成为可能^[83]。第四，随着 5G、大数据、云计算、人工智能等现代技术的成熟，GC-IMS 在现有模式的基础上与这些技术不断深度融合，不仅可以解决目前的不足，还能够提升其潜在优势。未来，GC-IMS 技术将在果蔬制品的检测分析领域发挥越来越重要的作用，让果蔬安全与营养“看得见”、“摸得着”。

参考文献

- [1] DHANDEVI P, RAJESH J. Fruit and vegetable intake: benefits and progress of nutrition education interventions-narrative review article [J]. Iranian Journal of Public Health, 2015, 44(10): 1309-1321.
- [2] MUHAMMAD I, ABDUL S, AHMAD S, et al. Sulfur application combined with *Planomicrobium* sp. strain MSSA-10 and farmyard manure biochar helps in the management of charcoal rot disease in sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. Sustainability, 2021, 13(15): 8535.
- [3] ABDUL M, AHMED M W, NOMAN M, et al. Iron application improves yield, economic returns and grain-Fe concentration of mungbean [J]. PLoS One, 2020, 15: 0230720.
- [4] ZHAO W, ZHANG Y, SHI Y. Visualizing the spatial distribution of endogenous molecules in wolfberry fruit at different development stages by matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry imaging [J]. Talanta, 2021, 234: 122687.
- [5] ASIF A, FAROOQ U, AKRAM K, et al. Therapeutic potentials of bioactive compounds from mango fruit wastes [J]. Trends Food Science & Technology, 2016, 53: 102-112.
- [6] HENG M Y, KATAYAMA S, MITANI T, et al. Solventless extraction methods for immature fruits: evaluation of their antioxidant and cytoprotective activities [J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1388-1393.
- [7] JAHURUL M H A, ZZAIDUL I S M, GHAFOR K, et al. Mango (*Mangifera indica* L.) by-products and their valuable components: a review [J]. Food Chemistry, 2015, 183: 173-180.
- [8] MORAIS D R, ROTTA E M, SARGI S C, et al. Antioxidant activity, phenolics and UPLC-ESI (-)-MS of extracts from different tropical fruits parts and processed peels [J]. Food Research International, 2015, 77: 392-399.
- [9] 李青. 浅谈我国果蔬加工的现状 & 前景[J]. 农业与技术, 2017, 37(6): 185.
- [10] 胡小松. 果蔬加工业的现状 & 发展态势[J]. 农产品加工, 2005, 4: 12-14.
- [11] HONG E Y, LEE S Y, JEONG J Y, et al. Modern analytical methods for the detection of food fraud and adulteration by food category [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(12): 3877-3896.
- [12] 曾辉, 刘璇, 吴昕烨, 等. 基于电子鼻技术的不同苹果品种香气的表征与识别[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(4): 197-203.
- [13] 许宇振. 肉品中挥发性 & 非挥发性风味成分检测技术研究进展[J]. 肉类工业, 2021, 9: 40-45.
- [14] YU D X, GUO S, WANG J M, et al. Comparison of different drying methods on the volatile components of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) by HS-GC-MS coupled with fast GC E-Nose [J]. Foods, 2022, 11: 1611.
- [15] SONG H, LIU J. GC-O-MS technique and its applications in food flavor analysis [J]. Food Research International, 2018, 114: 187-198.
- [16] 乔红贞, 贾满满. 等离子体电子温度的光谱计算[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2012, 9(3): 39-43.
- [17] GROSCH W. Detection of potent odorants in foods by aroma extract dilution analysis [J]. Trends in Food Science and Technology, 1993, 4(3): 68-73.
- [18] 穆申玲, 沈文锋, 吕大伍, 等. 电子鼻技术 & 其应用研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(14): 56-69.
- [19] SHVARTSBURG A A. Ion mobility spectrometry (IMS) and mass spectrometry (MS) [J]. Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry, 2010, 23(19): 1140-1148.
- [20] 许志颖. 虾酱风味指纹图谱的构建 & 关键香气表征[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2021.
- [21] 葛文娜. 气相色谱-离子迁移谱在食品风味物质检测中的应用研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2022, 32(19): 2431-2433.
- [22] 李雪瑶, 孔志强, 赵浩然, 等. 赤霞珠葡萄感染霜霉病后的果实品质 & 挥发性成分变化研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(15): 5035-5043.
- [23] 林瑞榕, 袁红飞, 钟小清, 等. 不同熬制工艺对“佛跳墙”营养成分 & 风味物质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(4): 240-246.
- [24] ZHU H, ZHU D Z, SUN J M. Application of GC-IMS coupled with chemometric analysis for the classification and authentication of geographical indication agricultural products and food [J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1247695.
- [25] 张碧莹, 隋雨萌, 张鑫, 等. 气相色谱-离子迁移谱技术在食品真实性鉴别中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(1): 227-236.
- [26] WANG S, CHEN H, SUN B. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. Food Chemistry, 2019, 32(7): 120-133.
- [27] 陈彦憬, 于建娜, 敬国兴, 等. 气相色谱-离子迁移谱技术在农业领域的应用[J]. 分析试验室, 2020, 39(12): 1480-1488.
- [28] 王芳, 陈潘, 席斌, 等. 离子迁移谱技术在食品检测中的应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(8): 179-185.
- [29] ARROYO M N, GARCÍA N M, CASTELL A, et al. Untargeted headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry analysis for detection of adulterated honey [J]. Talanta, 2019, 205: 120123.
- [30] 何珊. 气相-离子迁移谱在食品风味检测中的应用[J]. 农产品加工, 2021, 14: 80-90.
- [31] 陈通, 陈鑫郁, 谷航, 等. 气相离子迁移谱对山茶油掺假的检测[J]. 食品科学, 2019, 40(8): 275-279.
- [32] LUO L Y, ZHANG K, WANG H, et al. In situ and real-time monitoring of an ultrasonic-assisted enzymatic hydrolysis process of corn gluten meal by a miniature near infrared

- spectrometer [J]. Analytical Methods, 2017, 9(25): 3795-3803.
- [33] JUSTYNA G, KRZYSZTOF B, SOPHIA M, et al. Theoretical simulation of near-Infrared spectrum of piperine: insight into band origins and the features of regression models [J]. Applied Spectroscopy, 2021, 75: 1022-1032.
- [34] COZZOLINO D. The sample, the spectra and the maths-the critical pillars in the development of robust and sound vibrational spectroscopy applications [J]. Molecules, 2020, 25: 3674.
- [35] ZIEGEL E R. A user-friendly guide to multivariate calibration and classification [J]. Technometrics, 2004, 46(1): 108-110.
- [36] BLANCO R M, ALCALA B M. Multivariate calibration for quantitative analysis, infrared spectroscopy for food quality analysis and control [D]. Chapter, 2009, 3: 51-82.
- [37] 陈阳.太赫兹时域光谱检测储粮害虫的研究[D].武汉:华中农业大学,2016.
- [38] 胡航伟,程晶晶,谢亚敏,等.气相离子迁移谱技术在谷物食品中的应用研究进展[J].食品安全质量检测学报,2024, 15(5):253-259.
- [39] LINFORTH R. Developments in instrumental techniques for food flavour evaluation: future prospects [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80: 2044-2048.
- [40] ZHANG Z, JI H, ZHANG D, et al. The role of amino acids in the formation of aroma-active compounds during shrimp hot air drying by GC-MS and GC-IMS [J]. Foods, 2022, 11: 3264.
- [41] WU D, CHENG H, CHEN J, et al. Characteristics changes of Chinese bayberry (*Myrica rubra*) during different growth stages [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56: 654-662.
- [42] JIA W, DONG X, SHI L, et al. A strategy for the determination of flavor substances in goat milk by liquid chromatography-high resolution mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography B, 2020, 1152: 122274.
- [43] 万鹏,梁国平,马丽娟,等.19个苹果品种果实香气成分的GC-MS分析[J].食品工业科技,2019,40(14):227-232.
- [44] FRA'S A, GOLEBIEWSKI D, GOLEBIEWSKA K, et al. Triticale-oat bread as a new product rich in bioactive and nutrient components [J]. Journal of Cereal Science, 2018, 82: 146-154.
- [45] 王志伟.果蔬保鲜和加工技术分析[J].南方农业,2020, 14(21):192-193.
- [46] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T 31121-2014 果蔬汁类及其饮料[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [47] 焦文成,陈磊,宋永程,等.超声波对果蔬汁品质的影响研究进展[J].食品工业科技,2022,43(8):471-480.
- [48] YANG F, LIU Y, WANG B, et al. Screening of the volatile compounds in fresh and thermally treated watermelon juice via headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry and comprehensive two-dimensional gas chromatography-olfactory-mass spectrometry analysis [J]. LWT, 2021, 137: 110478.
- [49] 罗百然,罗秋明,刘果,等.高压均质技术对椰浆风味品质的影响作用研究[J].广东化工,2021,48(23):28-30.
- [50] 王亚男.寒地桑葚山葡萄复合饮料的制备及花青素的分离[D].哈尔滨:黑龙江大学,2020.
- [51] 张卜升,高杏,闫昕,等.基于GC-IMS技术分析石榴果酒酿制过程中挥发性风味成分的变化[J].食品与发酵工业, 2022,48(7):252-257.
- [52] 丁楠,何美珊,戈子龙,等.果蔬发酵制品的功效及应用研究进展[J].食品工业科技,2019,40(7):332-336.
- [53] 沈贺彬,张春,荀雯,等.发酵果蔬汁挥发性风味物质影响因素研究[J].中国果菜,2023,43(11):10-24.
- [54] WU D, XIA Q L, CHENG H, et al. Changes of volatile flavor compounds in sea buckthorn juice during fermentation based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Foods, 2022, 11(21): 3471-3471.
- [55] TANG Z S, ZENG X A, BRENNAN A M, et al. Characterization of aroma profile and characteristic aromas during lychee wine fermentation [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(8):1-14.
- [56] 温锦丽,孙怡宁,原鹏强,等.不同商用酿酒酵母对软枣猕猴桃果酒有机酸和挥发性物质的影响[J].食品工业科技,2024,45(20):240-251.
- [57] LI H, JIANG D, LIU W, et al. Comparison of fermentation behaviors and properties of raspberry wines by spontaneous and controlled alcoholic fermentations [J]. Food Research International, 2020, 128: 108801.
- [58] CHEN H F, NIE X, PENG T, et al. Effects of low-temperature and low-salt fermentation on the physicochemical properties and volatile flavor substances of Chinese Kohlrabi using gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Fermentation, 2023, 9(2): 146.
- [59] 阮函钰,宋莎莎,王文亮,等.超声波预处理在果蔬干燥技术中的研究进展[J].食品与发酵工业,2024,50(24):392-400.
- [60] 张莉会,廖李,安可婧,等.干燥方式对果蔬风味物质影响研究进展[J].食品工业科技,2018,39(18):315-319.
- [61] HU X, WANG R, GUO J, et al. Changes in the volatile components of candied kumquats in different processing methodologies with headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Molecules, 2019, 24(17): 3053.
- [62] LI M, YANG R, ZHANG H, et al. Development of a flavor fingerprint by HS-GC-IMS with PCA for volatile compounds of *Tricholoma matsutake* singer [J]. Food Chemistry, 2019, 290: 32-39.
- [63] GE S, CHEN Y Y, DING S H, et al. Changes in volatile flavor compounds of peppers during hot air drying process based

- on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(7): 3087-3098.
- [64] 宋娟,康三江,张海燕,等.干燥处理对黄冠梨生化成分和风味物质的影响[J].黑龙江农业科学,2022,1:60-66.
- [65] WANG H, LI X Y, WANG J, et al. Effects of postharvest ripening on water status and distribution, drying characteristics, volatile profiles, phytochemical contents, antioxidant capacity and microstructure of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. Food Control, 2022, 139: 109062.
- [66] YU X, SUN D, HE Y, et al. Emerging techniques for determining the quality and safety of tea products: a review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(5): 2613-2638.
- [67] YUN J, CUI C, ZHANG S, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea [J]. Food Chemistry, 2021, 360: 130033.
- [68] TIAN L L, ZENG Y Y, ZHENG X Q, et al. Detection of peanut oil adulteration mixed with rapeseed oil using gas chromatography and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food Analytical Methods, 2019, 12(10): 2282-2292.
- [69] ZHANG M M, SUN C L, LI L L, et al. Visual volatile-compound fingerprint based on headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with chemometrics analysis and exploration in the authentic identification of *Lonicerae japonicae* flos [J]. Journal of Chromatographic Science, 2023, 61(4): 303-311.
- [70] 龙门,李旺旺,方志澳,等.基于气相色谱-离子迁移谱法快速别油菜蜜混合洋槐蜜[J].食品安全质量检测学报,2023, 14(21):201-209.
- [71] YANG Q, TU J X, CHEN M, et al. Discrimination of fruit beer based on fingerprints by static headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2022, 80(3): 298-304.
- [72] 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.
- [73] FERRERO D T S, SUÁREZ A, FERREIRA C, et al. Modeling grape taste and mouthfeel from chemical composition [J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131168.
- [74] FENG T, SUN J Q, SONG S Q, et al. Geographical differentiation of Molixiang table grapes grown in China based on volatile compounds analysis by HS-GC-IMS coupled with PCA and sensory evaluation of the grapes [J]. Food Chemistry: X, 2020, 15: 100423.
- [75] 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.
- [76] 刘振平,龙道崎,甘芳瑗,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.
- [77] 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.
- [78] 董建恩,徐勇,赵恒杰.果品蔬菜贮藏保鲜的现状与发展策略分析[J].农业开发与装备,2023,5:239-240.
- [79] 李亚会,龚霄,任芳,等.基于气相离子迁移谱分析不同贮藏条件下番荔枝的风味变化[J].食品工业科技,2019, 40(18):263-272.
- [80] LIU Y J, BU M T, GONG X, et al. Characterization of the volatile organic compounds produced from avocado during ripening by gas chromatography ion mobility spectrometry [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 101(2): 666-672.
- [81] 孟祥春,黄泽鹏,凡超,等.黄金百香果采后贮藏过程品质分析及挥发性风味物质特征鉴定[J].保鲜与加工,2020, 20(6):175-183.
- [82] LENG P, HU H W, CUI A H, et al. HS-GC-IMS with PCA to analyze volatile flavor compounds of honey peach packaged with different preservation methods during storage [J]. LWT, 2021, 149: 111963.
- [83] HE W, WEN H, FANG R, et al. Application of GC-IMS in detection of food flavor substances [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 545(1): 012030.