

快速蒸发电离质谱法在食品质量安全快速检测中的应用

肖 斌, 张 娟, 陈爱亮*

(中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 北京 100081)

摘 要: 快速蒸发电离质谱技术(rapid evaporation ionization mass spectrometry, REIMS)是环境电离-质谱技术迅速发展的最新成果,也是近几年质谱检测领域的热点。通过电离切割组织或其他生物样品产生的含丰富特定区域生物特征的气溶胶,借助高分辨率质谱对其进行原位、在线、实时、快速分析。随后进行计算机数据建模与可视化,实现目标物质的快速检测。本文综述了 REIMS 技术的发展概况、主要结构组成、检测原理、采用的常规数据处理方法及其在食品检测领域中的具体应用,包括肉品掺假鉴别、风味物质检测、品种鉴别、干果真实性评估、果汁风味物质鉴别等。主要通过对当前快速蒸发电离质谱技术在不同食品检测领域的应用研究进展进行综述,以期为食品安全快速检测等相关研究领域科研工作者提供一定的思路与参考。

关键词: 快速蒸发电离质谱法; 仪器构成; 检测原理; 数据处理; 应用

Application of rapid evaporation ionization mass spectrometry in rapid detection of food quality and safety

XIAO Bin, ZHANG Juan, CHEN Ai-Liang *

(Institute of Quality Standard & Testing Technology for Agro-products, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: Rapid evaporation ionization mass spectrometry (REIMS) is the latest achievement of the rapid development of environmental ionization mass spectrometry technology, and it is also a hot spot in the field of mass spectrometry detection in recent years. Aerosols produced by ionizing and cutting tissues or other biological samples with rich biological characteristics in specific areas are analyzed in situ, online, real-time and quickly with the help of high-resolution mass spectrometry. Then computer data modeling and visualization are carried out to realize the rapid detection of target substances. This paper summarized the development, main structure, detection principle, conventional data processing methods and their specific applications in the field of food detection, including meat adulteration identification, flavor substance detection, variety identification, dried fruit authenticity evaluation, fruit juice flavor substance identification, etc.. This paper mainly summarized the current research progress of the application of rapid evaporative ionization mass spectrometry in different food detection fields, in order to provide some ideas and references for scientific researchers in food safety rapid detection and other related research fields.

KEY WORDS: rapid evaporation ionization mass spectrometry; instrument composition; principle; data processing;

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1604700)

Fund: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFC1604700)

*通信作者: 陈爱亮, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品安全快速检测技术。E-mail: ailiang.chen@gmail.com

*Corresponding author: CHEN Ai-Liang, Ph.D, Professor, Institute of Quality Standard and Testing Technology for Agro-products of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China. E-mail: ailiang.chen@gmail.com

application

0 引言

随着社会经济和相关学科的发展,传统质谱分析不断面临新的挑战。其体积大、精度高、不便携,而且样品分析所需的提取、分离、浓缩、净化前处理过程烦琐,降低和制约了此法在肉类掺假、营养物质分析、药物残留等领域的分析效率,不适合用于现场快速检测^[1]。无需复杂前处理的原位电离(ambient ionization, AI)技术逐渐成为质谱分析领域的研究热点,快速蒸发电离质谱法(rapid evaporative ionization mass spectrometry, REIMS)最初由英国 ZOLTAN 教授团队提出,在解析电喷雾电离质谱(desorption electrospray ionization mass spectrometry, DESI)^[2]和实时直接分析质谱(direct analysis in real time mass spectrometry, DART-MS)^[3]等原位电离技术基础上发展而来^[4]。如图 1 为 DESI、DART 和 REIMS 的采样流程,其中 REIMS 主要采用一种创新性手持式采样技术,无需载气和复杂样品制备过程,通过电离切割组织样本释放气溶胶,经导管将气溶胶直接吸入质谱仪检测。在几秒内实现样品中标志性差异成分的鉴定。

REIMS 技术最初应用于医疗领域,如乳房癌变组织检测^[7]、宫颈癌筛查^[8]、囊性纤维化患者铜绿假单胞菌的代谢表型和菌株鉴定^[9]、法医病例中死者肌肉样本的分析^[10]、动脉瘤和主动脉的区分等领域^[11-13]。正因为 REIMS 技术取样简单等诸多优点,近些年此技术在食品安全快速检测方面也得到了广泛应用。如畜产品(猪肉^[14]、牛肉^[15]、羊肉^[16])、水产品(鲑鱼、乌龟^[17])掺假鉴别与风味检测,其他领域如果汁乳品风味物质检测^[18-20]、干果真实性评估^[21]等方面^[22-27]。本文对 REIMS 技术的检测原理、

常用的数据处理方式以及其在食品质量安全快速检测领域的研究进展进行了汇总与讨论,旨在更好地了解此技术的发展概况,以期 REIMS 技术在食品领域的后续应用提供参考。

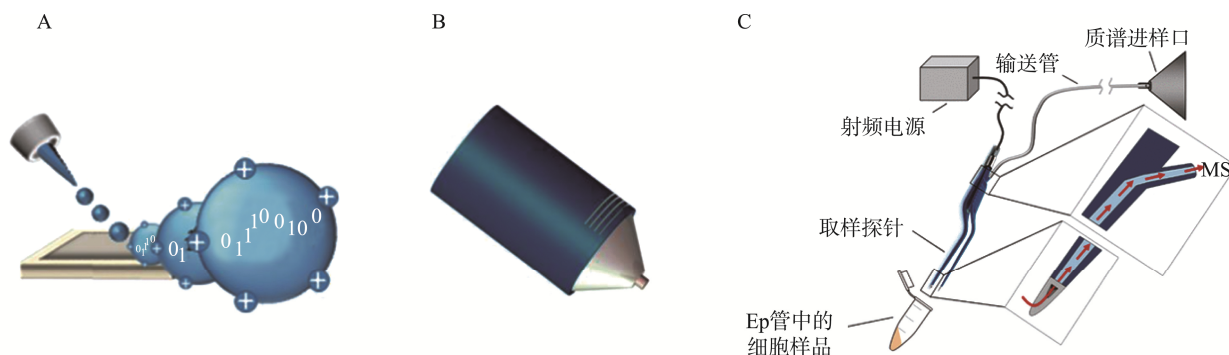
1 检测原理与数据分析方法

1.1 REIMS 工作流程

REIMS 技术主要包括 3 个大的方面:(1)基于手持智能手术刀、智能钳、智能探针、超声刀^[28]接触切割组织样本释放气溶胶;(2)经文丘里装置、空气泵吸入聚四氟乙烯(poly tetra fluoroethylene, PTFE)管或加热的毛细管与质谱仪组合;(3)标志性差异成分鉴定,实时收集大量质谱数据。REIMS 使用的质谱为四极杆高分辨率质谱(quadrupole high-resolution mass spectrometry, Q-TOF-MS),包括四极杆、碰撞单元、飞行杆和探测器 4 个关键部分^[29]。

1.2 采样方式

样本释放气溶胶的主要加热方式有焦耳加热、接触加热和辐射加热。焦耳加热主要依靠电热手术刀进行,射频交流电通过刀片状电极展开,在电流密度效应下对样品进行热烧蚀产生大量气溶胶。辐射加热包括红外激光剥蚀和激光解吸电离,使用激光手术刀照射生物组织细胞时,细胞内部分子吸收激光能量,产生大量的组织源性气态离子。CAMERON 等^[30]对比电热手术刀和二氧化碳激光手术刀对不同的动物中获得的新鲜肉类样本信号采集结果发现,激光手术刀重复性更高、光谱信号质量更优。因为激光系统的机械臂自动化程度高,采样误差较小,而电热刀需由手工操作,重复性低、误差大^[31]。对于不导电或低导电性的样品如蜂蜜,单级手术刀加热获得



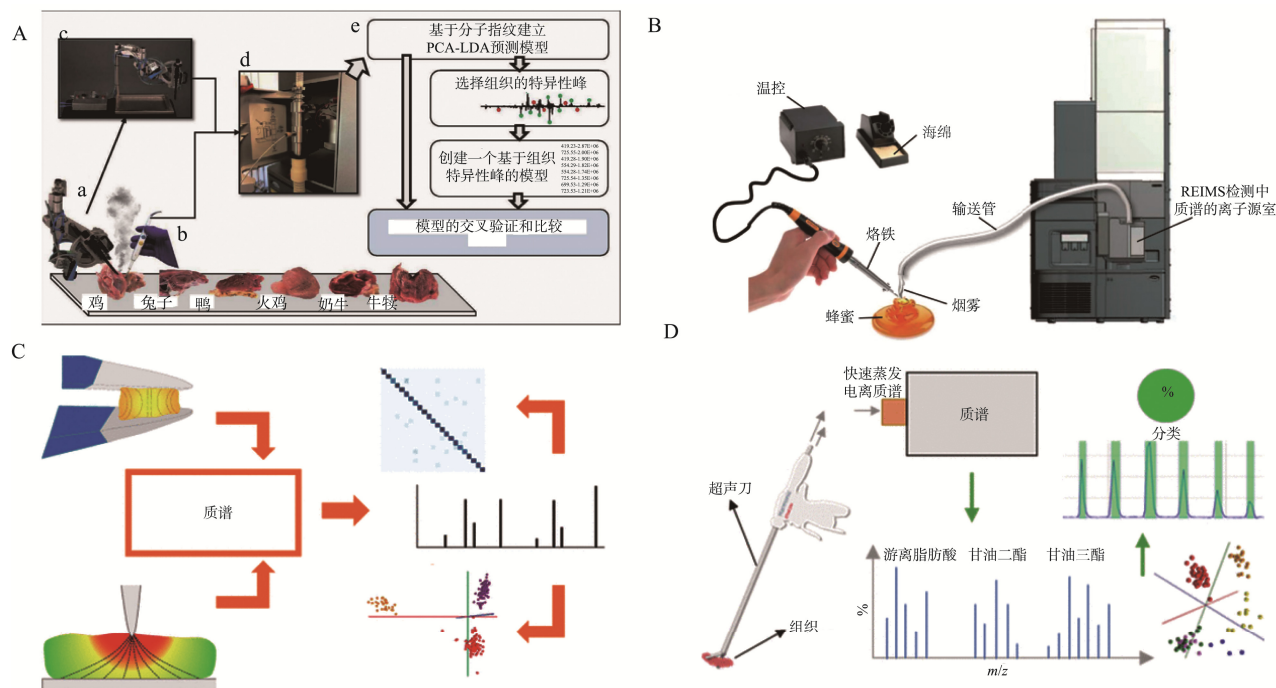
注: A 为 DESI 质谱采样装置^[5]; B 为 DART 质谱采样装置^[6]; C 为 REIMS 质谱采样装置。

图 1 几种原位电离质谱的采样装置

Fig.1 Sampling apparatus for several in situ ionization mass spectrometry

的有效蒸汽较少。此时加热方式通常为接触加热, 借助于电烙铁进行^[32]。除了采用单极外科手术刀、二氧化碳激光手术刀(图 2A)^[31]、电烙铁(图 2B)^[32]采样外, 手持式双极探针(图 2C)^[33-34]、超声刀(图 2D)^[28]也可作为采样装置用于相关检测。超声刀主要借助热和机械振动的共同作用使得结构蛋白发生热变性(60~100℃), 改变组织的机械性能^[35-36]。图 2 为文献中报道的几种获得气溶胶的方式。超声刀与单

极手术刀、二氧化碳激光手术刀雾化液滴的机制不同。所以三者在 m/z 600~1000 的磷脂区域采集的光谱也不相同。在超声刀捕获的 REIMS 光谱中, 多为高强度的甘油二酯和甘油三酯谱, 单极电外科手术刀和激光器捕获的信号显示出较高的甘油磷脂谱。此外, 超声刀观察到总离子数比传统电热装置高 3 倍, 采集信息丰富, 但其采样时间更长(超声刀 8~10 s 与电极外科手术刀处理 3~4 s)。



注: A 为 CO₂ 激光手术刀^[31]; B 为电烙铁^[32]; C 为手持式双极探针^[34]; D 为超声刀^[28]。

图 2 4 种种获得气溶胶的方式

Fig.2 Four kinds of ways of obtaining the aerosols

此外, JONES 等^[36]将纯溶剂(例如异丙醇)的气雾剂与快速蒸发样品产生的气雾剂混合, 不仅使得 REIMS 采集的信号强度增加超过 2 个数量级(图 3), 还可防止 REIMS 源结垢。

电热手术刀、电烙铁等的切割速度、切割长度、切割次数、输出功率、内标流速都会影响信号分子的收集和检测。如过高的切割速度可能导致较低的热传递, 降低捕获的离子信号强度。这些参数的主要优化依据为切割过程中的信号回应、总离子流图中各个数据峰强度、电离效率和重现性等。

1.3 数据分析

数据分析常用的分析软件包括 SPSS、Live ID、SIMCA-P 14.1^[34,37]。SPSS 计算显著性水平, 显著性分析的

置信区间为 95% ($P < 0.05$), Live ID 构建 PCA-LDA 模型,

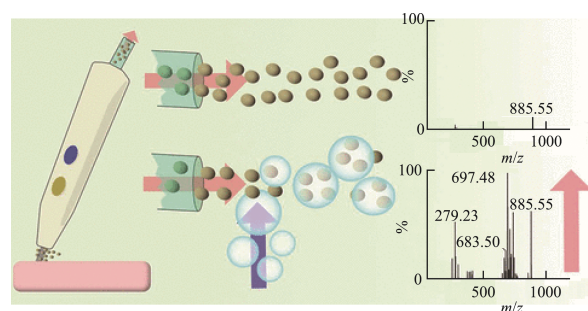


图 3 纯溶剂与样品气雾剂结合示意图^[36]

Fig.3 Schematic diagram of pure solvent and sample aerosol binding^[36]

SIMCA-P 14.1 构建 OPLS-DA 模型^[4]。REIMS 数据分析中多采用主成分分析(principal component analysis, PCA)减少

特征, 线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)建模。PCA-LDA 是将 PCA 与 LDA 结合。偏最小二乘法(partial least squares discriminant analysis, PLSDA)不仅可对自变量进行映射处理, 还对变量 Y 进行逐步残差拟合。其加强算法 OPLS 的区分能力和可视化效果更好。相比于 PCA, PLS/OPLS 还可获得每个变量(特征)的变量投影重要性分析(variable importance in projection, VIP)值^[4]。数据分析过程中常用的方法还包括 K-最近邻法(K-nearest neighbor, Knn)、人工神经网络(artificial neuron network, ANN)算法等、特征选择(feature selection, FS)、支持矢量机(support vector machine, SVM-L)、随机森林(random forest, RF)、惩罚判别分析(penalized discriminant analysis, PDA)、极端梯度提升(extreme gradient boosting, XGBoost)、逻辑提升算法(logistic boosting, LogitBoost)等^[26]。由于数据的复杂多样与不稳定性, 目前 REIMS 数据库建模分析过程会出现不同算法适用于不同模型预测的现象^[37]。因此, 在模型实际应用前, 需在不同采样环境中对模型的准确度进行反复验证。

2 在食品安全快速检测中的应用

2.1 肉及肉制品

2.1.1 品种、来源鉴别

肉类掺假常见的一种情况为低值肉冒充高值肉。BALOG 等^[38]采用 REIMS 技术检测肉饼中的马、牛和鹿肉。当待检测物种的肉含量大于 5%时可被成功检出, 模型对肉品种检测的准确率达 97%。WANG 等^[16]利用 REIMS 建立 DD-SIMCA 模型检测羔羊肉与普通羊肉, 模型特异性为 92%。此外, 部分不法商家会用廉价内脏冒充昂贵加工肉。常规基于 DNA 的方法无法检测此类掺假。BLACK 等^[15]采用 REIMS 检测牛肉汉堡中脑、心、肾、大肠和肝组织的特征标记物。可检出掺假脑组织含量 5%、心脏和大肠含量 1%~10%、肾脏含量 1%~5%、肝脏含量 5%~10%。另有报道显示 REIMS 区分猪的肝脏、肌肉、结肠和小肠诊断准确性可达 100%^[28]。不同的肌肉之间没有遗传差异与同位素差异, 但存在明显的代谢组学差异^[39]。后续研究中, 或可使用 REIMS 技术区分不同肌肉类型^[36]。除了上述检测外, REIMS 技术还可以用于不同产地肉的区分。ROSS 等^[40]采用 REIMS 技术成功对新西兰、英格兰和威尔士 3 个地方产的羔羊肉(每个国家取样量 $n=20$)进行区分。由于未经阉割的公猪在成年后会在脂肪中蓄积形成雄烯酮和粪臭素, 常规感官检测方法不能满足屠宰线(600 头/h)所需的速度和准确度^[41-42]。VERPLANKEN 等^[43]通过 REIMS 技术快速检测猪颈部脂肪中的脂肪酸和磷脂差异判断是否有公猪污染现象, 建

立的 OPLS-DA 模型对母猪和公猪样本或纯公猪样本的鉴定分别为 99%和 100%。

2.1.2 质量检测

肉质量受到宰后老化时间和储存条件的影响。湿法老化可获得具有较长保质期的优质肉类。干法老化可形成肉干的独特鲜味^[44]。“袋内干老化”方法在传统干法老化的基础上借助透气老化袋进行, 可减少由于微生物污染造成的肉品浪费^[45]。ZHANG 等^[46]采用 REIMS 测定袋内干老化羊腿肉和湿老化羊腿肉代谢物图谱的差异, 用于干、湿老化羔羊肉的鉴定。分析结果显示干法老化肉品相比于湿法老化羊肉 pH 较高, 二肽、游离氨基酸和脂质氧化代谢物等风味物质更多。且不同老化方式的牛肉中甘油磷脂和鞘脂、杂环脂肪酸、胺的含量上有显著差异^[47]。除了老化过程产生的风味物质差异外, 肉类运输过程中反复冻融会造成冰晶的连续再结晶, 冰晶之间的溶液在液相中被浓缩或稀释产生的渗透肿胀, 诱发蛋白质变性和胞内细胞器损伤, 最终导致肉的风味与耐储藏性下降^[48-51]。鲜肉耐储存, 风味较好, 在售卖过程中价格相对较高。HE 等^[26]采用 REIMS 对新鲜和反复冻融牛肉肌肉进行脂质组学分析, 并建立 PCA-LDA、OPLS-DA 模型区分新鲜与多次冻融(两次以上)的牛肉, 准确率可达 92%~100%。

2.1.3 肉中添加物的检测

蛋白质基肉类添加剂如卡拉胶、PS80 蛋白粉等被不法商贩作为富氮物质掺入注水肉中, 可避免“总氮”含量的降低。KOSEK 等^[18]借助 REIMS 建立 PLS-DA 模型, 几秒钟即检出碎猪肉、香肠和汉堡产品中的卡拉胶等蛋白质基添加剂(添加剂量超 2.5%)。GUITTON 等^[52]和 CATALANO 等^[53]采用 REIMS 技术检测猪肉中的 β -激动剂准确率大于 95%。

2.2 水产品

2.2.1 品种、来源鉴别

SONG 等^[54]结合 REIMS 对 4 种未经前处理的金枪鱼进行原位和实时鉴定。获得鉴定金枪鱼欺诈行为的潜在生物标志物。OPLS-DA 预测模型对未知样品中金枪鱼的分类型准确率大于等于 96%。BLACK 等^[19]利用 REIMS 技术对 5 种鲑鱼(银鲑鱼、绿青鲑、黑线鲑、青鲑、牙鲑)进行分析分类, 正确率达 98.99%。油鱼外观与鲑鱼相似。部分人进食后, 会发生腹泻、肠胃痉挛。SHEN 等^[23]利用 REIMS 分析油鱼和鲑鱼鱼片, 在最优切割条件下获得油鱼和鲑鱼的 200 个光谱数据。并筛选差异离子进行 OPLS-DA 分析建模, 区分鲑鱼和油鱼的准确率可达 96%~100%。并建立 REIMS 的模型区分自然生长以及人工培养的中国软壳龟(野生和养殖)^[17]。除鲑鱼外, 鲑鱼也是一种重要的经济渔

业产品,倍受消费者喜爱^[55-56]。值得注意的是,虹鳟鱼与鲑鱼外观类似,无法肉眼区分。虹鳟鱼肉中含有肺吸虫(*Paragonimus westermani*)和华枝睾吸虫(*Clonorchis sinensis*)两种寄生虫,消费者不慎食用虹鳟后易引发肝病和胆管癌^[57]。SONG 等^[20]利用 REIMS 技术建立实时鉴别鲑鱼和虹鳟鱼的脂质组学模型,共鉴定出 12 种脂肪酸和 37 种磷脂分子,以及 3 种差异标志物标志物,并建立了 5 种经济海鲜(鲑鱼、对虾、蓝鳍金枪鱼、带鱼和蝴蝶鱼)中 n-7 磷脂结构表征和定量分析方法^[58]。除了上述几种鱼类外,RIGANO 等^[59]利用 REIMS 技术对 18 种地中海典型海洋物种进行区分,实际样品验证模型准确率为 99%。

2.2.2 质量检测

SONG 等^[27]基于智 iKnife 和 REIMS 检测海参的氧化特性,用于干海参在储存过程中的实时和原位质量评估。磷虾油营养丰富,价格昂贵^[60],不法商贩常用大豆油混入磷虾油进行售卖获利。CUI 等^[61]利用 REIMS 实时检测磷虾磷脂和大豆磷脂,在 PCA 分析的基础上,建立 OPLS-DA 模型检测磷脂类型准确率可达 96.58%。除了营养功能外,磷脂成分还可作为区分生物物种的潜在指标^[62]。张燕平等^[63]采用 REIMS 建立南极磷虾油脂质组学轮廓,方法灵敏度和精密度可满足南极磷虾油中脂肪酸和磷脂的脂质组学轮廓分析测试要求。此外,REIMS 技术在鱼类如南极犬牙鱼的肌肉组织^[64],金枪鱼内脏组织脂质组学轮廓的分析测试中也得到了进一步应用^[65]。空气油炸是一种健康的油炸方式^[66],该团队在前期研究的基础上采用 REIMS 技术进一步探究了空气油炸温度对带鱼^[67]、鲳鱼^[68]、南美对虾^[69]脂质组学轮廓的影响。并发现带鱼加热过程中含量最高的脂肪酸为 DHA,含量最多的磷脂分子形式是 PE 和 PC。鲳鱼油炸过程中,PE、PI、PC 相对含量随油炸温度的升高而降低。不同空气油炸温度处理的南美白对虾样品中检出的代谢物组成主要以脂肪酸与磷脂为主,无反式脂肪酸(trans fatty acid, TFA)^[69]。

2.3 其他食品中的应用

可可脂为巧克力行业中最有价值的原料之一,其真实性对保证巧克力产品的安全和质量至关重要。CHANG 等^[70]利用 REIMS 对可可脂(cocoa butter, CB)和可可脂等同物(cocoa butter equivalent, CBEs)进行实时、高通量测定。采用层次聚类分析(hierarchical clusterin analysis, HCA)获得数据集探究 CB 和 CBEs 之间的异同,并建立 OPLS-DA 模型区分 CB 和 CBEs,准确率为 100%。此外,REIMS 技术用于区分来自西西里勃朗特、希腊、伊朗、加利福尼亚州和土耳其 5 个产地的开心果准确率也为 100%^[21]。除了上述固态样品的区分外,REIMS 技术也可用于液体样品如果汁^[71]、蜂蜜^[32]、发酵牛奶^[72]、啤酒^[73]的品牌、品种、

类型区分,准确率均高于 95%。

综上所述,REIMS 在多种领域中应用广泛。如表 1 所示,检测过程中所用的采样装置,最优的取样条件、建模手段,检测图谱类型以及准确度方面各不相同。在肉类品种、来源鉴别领域,收集到的图谱多为脂质图谱,包括脂肪酸、磷脂、甘油三酯等。在肉类风味物质检测中,还包括肽谱。而在果汁掺假鉴别中,主要是有机酸谱,如苹果酸、酒石酸等。PCA、PLSDA 是最常用的数据分析鉴别方法。模型准确度基本在 90%以上,部分模型准确度可达 100%。采样装置包括电烙铁、电热手术刀 iKnife 和 CO₂ 激光刀。其中 iKnife 的输出功率在 15~60 W 之间,采样次数、切割深度及单次采样时间因样品各异,但总体采样收集信号分子时间不超过 1 min,在未来快速检测领域具极大发展潜力。

3 结束语

REIMS 技术检测速度快、灵敏度高、准确性好,在多个食品领域展现出良好的发展前景。但是,在实际大规模应用中,由于不同环境条件、地理因素、食品中所含杂质影响数据库的普遍适用性,需进一步寻找品种、杂质、环境因素、饮食、年龄对分析结果的影响。并配置重现性好、适合于样品基质的采样装置(电热刀、超声刀、CO₂ 激光装置等)获取特征离子信号,不断优化数据库的建模方式,提高其准确性。此外,目前所用的质谱设备具有较大体积,未来需向小体积、车载快速检测方向发展。

在 REIMS 检测过程中,会出现大量磷脂代谢物的同位素离子峰的重叠,影响鉴别过程,需结合二级碎裂质谱法或离子淌度谱对不同迁移速率的离子进行快速分离改善这一现象。未知化合物的鉴定通常采用搜索相关数据库进行初步确证,进一步通过标椎品进行验证。但某些化合物无法获得标椎品,例如,肉中磷脂类是细胞膜的重要组成部分,难以人为构建空白样品和梯度浓度标准样品体系。在未来随着质谱技术的发展,更多的化合物有望被鉴定出来并用于标准品验证。

目前 REIMS 的应用主要以定性为主,在定量或半定量检测方面鲜见报导,利用 REIMS 技术进行精准定量分析也是未来重点研究的方向之一。其次,可进一步探究 REIMS 在农药残留、添加剂限量、食品溯源、标的物纯度鉴定等领域的应用,并将研究对象扩展至深加工食品以及熟食卤煮。检测过程中得到的标志物并非动物体内最初含有的代谢物,通过蒸发并经过二级碎裂的标志物无法精确推断其产生的机制并探寻抑制过程。需结合 PCR、LC-MS 等检测方法及时验证协同分析。

表 1 REIMS 在食品质量安全检测中的应用
Table 1 Applications of REIMS in the detection of food quality and safety

应用领域	样品	蒸发装置(及参数)	质谱仪器	数据建模手段	准确度	图谱类型	参考文献
肉(品种、来源鉴别)	牛肉(牛腰肉切片)	iKnife(输出功率 40 W, 切割时间 1 s)	Synapt G2-Q-TOF-MS	FS、PCA-FS、SVM-L、SVM-R、SVM-P、RF、LDA、PDA、XGBoost、PLSDA、Knn、LogitBoost	81.5%~99%	脂质图谱	[37]
	马、牛和鹿肉	iKnife(输出功率 40 W)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	PCA-LDA	100%(物种), 97% (品种)	甘油磷脂图谱(磷脂酰乙醇胺、磷脂酰肌醇)	[38]
	鸡、兔、鸭、火鸡、牛肉小牛(肌肉、肝脏、骨骼、骨髓、软骨、皮肤、脂肪)	iKnife(功率 20~30 W, 切 3 s)/CO ₂ 激光刀 (Lumenis GmbH, Germany, 功率 60 W)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	PCA、LDA	/	脂肪酸、甘油磷脂/甘油三酯	[31]
	牛肉(大脑、心脏、肾脏、大肠和肝脏)汉堡	iKnife(输出功率 30 W)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	PCA、LDA、OPLS-DA、VIP	掺假水平>1%可精确检测	磷脂	[15]
	新鲜和反复冻融的牛肉肌肉	iKnife (20 mm 长, 重复切 10~12 次, 深度 3 mm, 切割速度 8 mm/s、功率输出 20 W)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	PCA-LDA、OPLS-DA	92%~100%	脂肪酸和磷脂	[26]
肉(品质)	干湿老化的羔羊腿肌肉	iKnife (2 mm 深, 15 mm 长, 切 3 s, 输出功率为 15 W)	Xevo G2-Q-TOF-MS	OPLS-DA	/	二肽、游离氨基酸和脂质氧化代谢物	[46]
	陈化牛肉	iKnife(输出功率 15 W, 深 2 mm, 长 15 mm, 切 3 s)	Xevo G2-Q-TOF-MS	PCA、OPLS-DA、	/	二肽、氨基酸、甘油磷脂、鞘脂、杂环脂肪酸、胺	[43]
	羊肉胸肌	iKnife PS01-63H(输出功率 30 W, 切 8~12 次, 单次 3~5 s)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	OPLS-DA、VIP、PCA	96%(负离子模式)、90%(正离子模式)。特异性 92%	脂肪酸和磷脂	[47]
	猪肌肉中 β 激动剂	iKnife(输出功率 25 W, 采样时间 3~5 s)	Xevo T-QS	PCA、LDA、OPLS-DA	>95%	磷脂和脂肪酸	[52]
	猪肉、鸡肉(掺假 PS80 蛋白)	iKnife PS01-63H(输出功率 30 W)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	PCA、PLS-DA、OPLS-DA	100%(蛋白掺假量>2.5%)	三酰基甘油和磷脂	[18]
水产品(质量)	南极犬牙鱼肌肉组织切片	iKnife(输出功率 25 W、切割速率 0.50 mm/s、切割长度 1.0 cm)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	/	日内 RSD 为 3.7%~5.6%, 日间 RSD 为 5.9%~7.3%	脂肪酸和磷脂	[64]
	空气油炸鲳鱼	WSD151 iKnife(输出功率 20 W、切割速率 1 mm/s)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	PCA、OPLS	日内和日间 RSD 为 3.10%~7.28% 日内 RSD 为 2.23%~4.06%, 日间 RSD 为 3.04%~6.18%	磷脂	[68]
	空气油炸带鱼	WSD151 iKnife(切 5 次)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	PCA		脂肪酸和磷脂	[67]

表 1(续)

应用领域	样品	蒸发装置(及参数)	质谱仪器	数据建模手段	准确度	图谱类型	参考文献
水产品(质量)	空气油炸南美白对虾	iKnife WSD151 (输出功率 20 W, 切割速度 1 mm/s, 切 1 cm)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	PCA、OPLS-DA、VIP	/	脂肪酸和磷脂	[69]
	金枪鱼内脏	iKnife SJ350B(输出功率 15 W, 速度 1 mm/s)	Xevo G2-XS- Q-TOF-MS	/	日内 RSD 为 3.8%~5.1%, 日间 RSD 为 4.3%~6.3%	磷脂	[65]
	大豆磷脂与磷脂磷脂	WSD151 iKnife (450°C, 3 s)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	PCA、OPLS-DA	≥96.58%, 日内 RSD 为 4.62%~6.52%, 日间 RSD 为 6.04%~7.87%	脂肪酸和磷脂	[61]
	南极磷虾油	加热探头(500°C)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	/	/	脂肪酸和磷脂	[63]
	金枪鱼(BFT、BET、YFT、 AT 4 个品种)掺假 鲑鱼虹鳟掺假鉴别	WSD151 iKnife WSD151 iKnife (25 W)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	PCA、OPLS-DA、VIP、SUS plot PCA、PLS、OPLS、OPLS-DA	≥93% >96.58%	脂肪酸和磷脂 脂肪酸和磷脂	[54] [20]
水产品(品种、 来源鉴别)	18 种海鲜	iKnife(输出功率 20 W, 切 5~10 次, 时间 3~5 s)	Xevo G2-XS Q-TOF-MS	PCA、LDA	>99%	脂肪酸和磷脂	[59]
其他食品	中国软壳龟(野生和养殖)	iKnife SJ350B(输出功率 20 W)	Q-TOF-MS	PCA	>83%, 日内 RSD<5.58%, 日间 RSD<7.78%	脂肪酸和磷脂	[17]
	5 种鲑鱼鉴定	iKnife PS01-63H (30 W, 切 8~12 次, 单次 3~5 s)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	PCA、LDA、OPLS-DA	98.99%	磷脂	[19]
	鲑鱼中油鱼掺假	iKnife SJ350B(输出功率 30 W, 切割速度 5 mm/s, 切 2 cm)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	PCA、OPLS-DA	>95%。日内 RSD 为 4.28%~6.82%	脂肪酸和磷脂	[23]
	果汁掺假	WSD71 iKnife (225°C, 2 s)	XevoG2-XS-Q-TOF- MS	PCA、LDA、PLS-DA、VIP	100%	有机酸(苹果酸、酒石酸)	[71]
	蜂蜜掺假	电烙铁(SBK936b, 400°C, 0.5 s)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	PCA-LDA	99.66%(掺假水平 5%~10%)	(锁定质量范围 130~ 900 m/z)非靶向分析	[32]
其他食品	牛奶发酵菌株鉴定	iKnife (2 s)	Xevo® G2 Q-TOF-MS	PCA、PLS-DA	/	肽谱、脂质和脂肪酸	[72]
	可脂掺假	电烙铁(WD1M and RT2, 单个 样品接触 10 次, 单次 2~5 s)	Xevo GS-XS-Q-TOF-MS	HCA、OPLS-DA	特异性为 95%, 灵敏度 100%	二酰基甘油	[70]
	开心果真实性	iKnife (30 W)	Xevo G2-XS-Q-TOF-MS	ABS、PCA、LDA、MVN、 OPLS-DA、PLS-DA	100%	脂肪酸(油酸)、磷脂谱	[65]

注:/表示未说明。

参考文献

- [1] 高海燕, 孟宪双, 付珺珺, 等. 快速蒸发电离质谱技术及其应用研究进展[J]. 分析测试学报, 2021, 40(2): 159–170.
- GAO HY, MENG XS, FU JJ, *et al.* Research progress on rapid evaporative ionization mass spectrometry and its applications [J]. J Instrum Anal, 2021, 40(2): 159–170.
- [2] NICHOLAS B, CHEVALLIER O, HRBEK V, *et al.* Ambient mass spectrometry as a tool to determine poultry production system history: A comparison of rapid evaporative ionisation mass spectrometry (REIMS) and direct analysis in real time (DART) ambient mass spectrometry platforms [J]. Chem Commun, 2022, 123: 107740.
- [3] YENER S, VAN V, HEIN JF. Characterisation of triacylglycerols from bovine milk fat fractions with MALDI-TOF-MS fragmentation [J]. Talanta, 2019, 204: 204533–204541.
- [4] SHEN Q, WANG Y, GONG L, *et al.* Shotgun lipidomics strategy for fast analysis of phospholipids in fisheries waste and its potential in species differentiation [J]. J Agric Food Chem, 2012, 60(37): 9384–9393.
- [5] AMALIAN JA, MONDAL T, KONISHCHEVA E, *et al.* Desorption electrospray ionization (DESI) of digital polymers: Direct tandem mass spectrometry decoding and imaging from materials surfaces [J]. ADV Mater Technol-US, 2021, 6(4): 2001088.
- [6] EDWARD S, BURNS A, SCHNEIDER E, *et al.* A template for the validation of DART-MS for qualitative seized drugs analysis [J]. Forensic Chem, 2022, 29: 100415.
- [7] ST JER, BALO J, MCKENZIE JS, *et al.* Rapid evaporative ionisation mass spectrometry of electrosurgical vapours for the identification of breast pathology: Towards an intelligent knife for breast cancer surgery [J]. Breast Cancer Res, 2017, 19(1): 59.
- [8] PARASKEVAIDI M, CAMERON SJS, WHELAN E, *et al.* Laser-assisted rapid evaporative ionisation mass spectrometry (LA-REIMS) as a metabolomics platform in cervical cancer screening [J]. Ebiomedicine, 2020, 60: 103017.
- [9] BARDIN EE, CAMERON SJS, PERDONES MA, *et al.* Metabolic phenotyping and strain characterisation of *Pseudomonas aeruginosa* isolates from cystic fibrosis patients using rapid evaporative ionisation mass spectrometry [J]. Sci Rep-UK, 2018, 8(1): 10952.
- [10] VAN HL, VAYSSE PM, SIEGEL TP, *et al.* Real-time drug detection using a diathermic knife combined to rapid evaporative ionisation mass spectrometry [J]. Talanta, 2021, 221: 121391.
- [11] DAVIES HA, CAAMANO GE, SAREBY J, *et al.* Exploring the potential of rapid evaporative ionization mass spectrometry (Intelligent Knife) for point-of-care testing in aortic surgery [J]. Eur J Cardio-Thorac, 2021, 60(3): 562–568.
- [12] BALOG J, KUMAR S, ALEXANDER J, *et al.* In vivo endoscopic tissue identification by rapid evaporative ionization mass spectrometry (REIMS) [J]. Angewand Chem, 2015, 127(38): 11211–11214.
- [13] DADIDSON NB, KOCH NI, SARSBY J, *et al.* Rapid identification of species, sex and maturity by mass spectrometric analysis of animal faeces [J]. BMC Biol, 2019, 17(1): 66.
- [14] BALOG J, SZANISZLO T, SCHAEFER KC, *et al.* Identification of biological tissues by rapid evaporative ionization mass spectrometry [J]. Anal Chem, 2010, 82(17): 7343–7350.
- [15] BLACK C, CHEVALLIER OP, COOPER KM, *et al.* Rapid detection and specific identification of offals within minced beef samples utilising ambient mass spectrometry [J]. Sci Rep-UK, 2019, 9(1): 6295.
- [16] WANG J, XU L, XU Z, *et al.* Liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry and rapid evaporative ionization mass spectrometry were used to develop a lamb authentication method: A preliminary study [J]. Foods, 2020, 9(12): 1723.
- [17] SHEN Q, WANG J, LI S, *et al.* In situ rapid evaporative ionization mass spectrometry method for real-time discrimination of *Pelodiscus sinensis* in different culturing modes without sample preparation [J]. Food Anal Method, 2019, 12(12): 2699–2708.
- [18] KOSEK V, UTTL L, JÍRŮ M, *et al.* Ambient mass spectrometry based on REIMS for the rapid detection of adulteration of minced meats by the use of a range of additives [J]. Food Control, 2019, 104: 50–56.
- [19] BLACK C, CHEVALLIER OP, HAUGHEY SA, *et al.* A real time metabolomic profiling approach to detecting fish fraud using rapid evaporative ionisation mass spectrometry [J]. Metabolomics, 2017, 13(12): 153.
- [20] SONG G, ZHANG M, ZHANG Y. In Situ method for real-time discriminating salmon and rainbow trout without sample preparation using iknife and rapid evaporative ionization mass spectrometry-based lipidomics [J]. J Agric Food Chem, 2019, 67(16): 4679–4688.
- [21] RIGANO F, STEAD S, MANGRAVITI D, *et al.* Correction to: Use of an “Intelligent Knife” (iknife), based on the rapid evaporative ionization mass spectrometry technology, for authenticity assessment of pistachio samples [J]. Food Anal Method, 2019, 12(2): 569.
- [22] SHEN Q, SONG GS, ZHAO QL, *et al.* Detection of lipidomics characterization of tuna meat during different wet-aging stages using iknife rapid evaporative ionization mass spectrometry [J]. Food Res Int, 2022, 156: 111303.
- [23] SHEN Q, LI LQ, SONG GS, *et al.* Development of an intelligent surgical Knife rapid evaporative ionization mass spectrometry based method for real-time differentiation of cod from oilfish [J]. J Food Comp Anal, 2020, 86: 103355.
- [24] SONG GS, WANG HX, ZHANG MN, *et al.* Real-time monitoring of the oxidation characteristics of antarctic krill oil (*Euphausia superba*) during storage by electric soldering iron ionization mass spectrometry-based lipidomics [J]. J Agric Food Chem, 2020, 68(5): 1457–1467.
- [25] SONG GS, LI LQ, WANG HX, *et al.* Electric soldering iron ionization mass spectrometry based lipidomics for in Situ monitoring fish oil oxidation characteristics during storage [J]. J Agric Food Chem, 2020, 68(7): 2240–2248.
- [26] HE QC, YANG ML, CHEN XF, *et al.* Differentiation between fresh and frozen-thawed meat using rapid evaporative ionization mass spectrometry: The case of beef muscle [J]. J Agric Food Chem, 2021, 69(20): 5709–5724.
- [27] SONG GS, ZHAO QL, GAI KH, *et al.* In Situ quality assessment of dried sea cucumber (*Stichopus japonicus*) oxidation characteristics during storage by iknife rapid evaporative ionization mass spectrometry [J]. J Agric Food Chem, 2021, 69(48): 14699–14712.
- [28] MANOLI E, MASON S, FORD L, *et al.* Validation of ultrasonic harmonic scalpel for real-time tissue identification using rapid evaporative ionization mass spectrometry [J]. Anal Chem, 2021, 93(14): 5906–5916.
- [29] ALLEN DR, MCWHINNEY BC. Quadrupole time-of-flight mass spectrometry: A paradigm shift in toxicology screening applications [J]. Clin Biochem Rev, 2019, 40(3): 135–146.
- [30] CAMERON SJS, PERDONES MA, VAN ML, *et al.* Sample preparation free mass spectrometry using laser-assisted rapid evaporative ionization

- mass spectrometry: Applications to microbiology, metabolic biofluid phenotyping, and food authenticity [J]. *J Am Soc Mass Spect*, 2021, 32(6): 1393–1401.
- [31] GENANGELI M, HEEREN RMA, PORTA ST. Tissue classification by rapid evaporative ionization mass spectrometry (REIMS): Comparison between a diathermic knife and CO₂ laser sampling on classification performance [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2019, 411(30): 7943–7955.
- [32] WANG H, CAO X, HAN T, *et al.* A novel methodology for real-time identification of the botanical origins and adulteration of honey by rapid evaporative ionization mass spectrometry [J]. *Food Control*, 2019, 106: 106753.
- [33] STRITTMATTER N, REBEC M, JONES EA, *et al.* Characterization and identification of clinically relevant microorganisms using rapid evaporative ionization mass spectrometry [J]. *Anal Chem*, 2014, 86(13): 6555–6562.
- [34] BOLT F, CAMERON SJ, KARANCSI T, *et al.* Automated high-throughput identification and characterization of clinically important bacteria and fungi using rapid evaporative ionization mass spectrometry [J]. *Anal Chem*, 2016, 88(19): 9419–9426.
- [35] WELD KJ, DRYER S, AMES CD, *et al.* Analysis of surgical smoke produced by various energy-based instruments and effect on laparoscopic visibility [J]. *J Endourol*, 2007, 21(3): 347–351.
- [36] JONES EA, SIMON D, KARANCSI T, *et al.* Matrix assisted rapid evaporative ionization mass spectrometry [J]. *Anal Chem*, 2019, 91(15): 9784–9791.
- [37] GREDELL DA, SCHROEDER AR, BELK KE, *et al.* Comparison of machine learning algorithms for predictive modeling of beef attributes using rapid evaporative ionization mass spectrometry (REIMS) data [J]. *Sci Rep-UK*, 2019, 9(1): 5721.
- [38] BALOG J, PERENYI D, GUALLAR HC, *et al.* Identification of the species of origin for meat products by rapid evaporative ionization mass spectrometry [J]. *J Agric Food Chem*, 2016, 64(23): 4793–4800.
- [39] MUROYA S, OE M, NAKAJIMA I, *et al.* CE-TOF MS-based metabolomic profiling revealed characteristic metabolic pathways in postmortem porcine fast and slow type muscles [J]. *Meat Sci*, 2014, 98(4): 726–735.
- [40] ROSS A, BRUNIUS C, CHEVALLIER O, *et al.* Making complex measurements of meat composition fast: Application of rapid evaporative ionisation mass spectrometry to measuring meat quality and fraud [J]. *Meat Sci*, 2021, 181: 108333.
- [41] SORENSEN KM, ENGELSEN SB. Measurement of boar taint in porcine fat using a high-throughput gas chromatography-mass spectrometry protocol [J]. *J Agric Food Chem*, 2014, 62(39): 9420–9427.
- [42] BEKAERT KM, ALUWE M, VANHAECKE L, *et al.* Evaluation of different heating methods for the detection of boar taint by means of the human nose [J]. *Meat Sci*, 2013, 94(1): 125–132.
- [43] VERPLANKEN K, WAUTERS J, VAN DURME J, *et al.* Rapid method for the simultaneous detection of boar taint compounds by means of solid phase microextraction coupled to gas chromatography/mass spectrometry [J]. *J Chromatogr A*, 2016, 1462: 124–133.
- [44] O'QUINN TG, WOERNER DR, ENGLE TE, *et al.* Identifying consumer preferences for specific beef flavor characteristics in relation to cattle production and postmortem processing parameters [J]. *Meat Sci*, 2016, 112: 90–102.
- [45] KIM YHB, MA D, SETYABRATA D, *et al.* Understanding postmortem biochemical processes and post-harvest aging factors to develop novel smart-aging strategies [J]. *Meat Sci*, 2018, 144: 74–90.
- [46] ZHANG R, ROSS AB, YOO MJY, *et al.* Metabolic fingerprinting of in-bag dry- and wet-aged lamb with rapid evaporative ionisation mass spectroscopy [J]. *Food Chem*, 2021, 347: 128999.
- [47] ZHANG R, ROSS AB, YOO MJY, *et al.* Use of rapid evaporative ionisation mass spectrometry fingerprinting to determine the metabolic changes to dry-aged lean beef due to different ageing regimes [J]. *Meat Sci*, 2021, 181: 108438.
- [48] LEYGONIE C, BRITZ TJ, HOFFMAN LC. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: Review [J]. *Meat Sci*, 2012, 91(2): 93–98.
- [49] RAHMAN MH, HOSSAIN MM, RAHMAN SM, *et al.* Evaluation of physicochemical deterioration and lipid oxidation of beef muscle affected by freeze-thaw cycles [J]. *Korean J Food Sci*, 2015, 35(6): 772–782.
- [50] ZHANG M, LI F, DIAO X, *et al.* Moisture migration, microstructure damage and protein structure changes in porcine longissimus muscle as influenced by multiple freeze-thaw cycles [J]. *Meat Sci*, 2017, 133: 10–18.
- [51] 何启川. 基于质谱和化学计量学的相关体系过程及关联标志物鉴别研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
- HE QC. Integrated mass spectrometry and chemometrics for related system process and marker identification [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2021.
- [52] GUITTON Y, DERVILLY P, JANDOVA R, *et al.* Rapid evaporative ionisation mass spectrometry and chemometrics for high-throughput screening of growth promoters in meat producing animals [J]. *Food Addit Contam A*, 2018, 35(5): 900–910.
- [53] CATALANO D, ODORE R, AMEDEO S, *et al.* Physiopathological changes related to the use of ractopamine in swine: Clinical and pathological investigations [J]. *Livest Sci*, 2012, 144(1–2): 74–81.
- [54] SONG G, CHEN K, WANG H, *et al.* In situ and real-time authentication of *Thunnus* species by iKnife rapid evaporative ionization mass spectrometry based lipidomics without sample pretreatment [J]. *Food Chem*, 2020, 318: 126504.
- [55] WANG YV, WAN AHL, LOCK EJ, *et al.* Know your fish: A novel compound-specific isotope approach for tracing wild and farmed salmon [J]. *Food Chem*, 2018, 256: 380–389.
- [56] KOLANOWSKI W. Salmonids as natural functional food rich in omega-3 PUFA [J]. *Appl Sci*, 2021, 11(5): 2409.
- [57] PETENY TN, ANDREWS RH, SAIJUNTHA W, *et al.* The zoonotic, fish-borne liver flukes *Clonorchis sinensis*, *Opisthorchis felinus* and *Opisthorchis viverrini* [J]. *Int J Parasitol*, 2013, 43(12–13): 1031–1046.
- [58] SONG GS, WANG QC, ZHANG MN, *et al.* Real-time in Situ screening of omega-7 phospholipids in marine biological resources using an iKnife-rapid-evaporative-ionization-mass-spectrometry-based lipidomics phenotype [J]. *J Agric Food Chem*, 2021, 69(32): 9004–9011.
- [59] RIGANO F, MANGRAVITI D, STEAD S, *et al.* Rapid evaporative ionization mass spectrometry coupled with an electrosurgical knife for the rapid identification of mediterranean sea species [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2019, 411(25): 6603–6614.
- [60] SHEN Q, DAI Z, HUANGY W, *et al.* Lipidomic profiling of dried seahorses by hydrophilic interaction chromatography coupled to mass spectrometry [J]. *Food Chem*, 2016, 205: 89–96.
- [61] CUI Y, WANG H, ZHAO Q, *et al.* Real-time detection of authenticity and adulteration of krill phospholipids with soybean phospholipids using rapid evaporative ionization mass spectrometry: Application on commercial

- samples [J]. Food Control, 2021, 121: 107680.
- [62] BARLOW RS, FITZGERALD AG, HUGHES JM, *et al.* Rapid evaporative ionization mass spectrometry: A review on its application to the red meat industry with an Australian context [J]. Metabolites, 2021, 11(3): 171.
- [63] 张燕平, 王海星, 陈康, 等. 实时质谱新技术分析南极磷虾油的脂质组学轮廓[J]. 中国食品学报, 2020, 20: 226–231.
- ZHANG YP, WANG HX, CHEN K, *et al.* Novel real-time mass spectrometry for detecting the lipidomics profile of *Euphausia superba* oil [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2020, 20: 226–231.
- [64] 陈康, 王海星, 张燕平, 等. iKnife-REIMS 联用技术对南极犬牙鱼脂质组学轮廓检测[J]. 食品科学, 2019, 40(1002–6630): 259–264.
- CHEN K, WANG HX, ZHANG YP, *et al.* iKnife coupling rapid evaporative ionization mass spectrometry for lipidomic profiling of *Patagonian toothfish* [J]. Food Sci, 2019, 40(1002–6630): 259–264.
- [65] 王海星, 张燕平, 李诗言, 等. 基于 iKnife 智能手术刀质谱技术金枪鱼内脏脂质组学研究[J]. 核农学报, 2020, 34(1): 113–119.
- WANG HX, ZHANG YP, LI SY, *et al.* Development of intelligent monopolar electrode mass spectrometry based method for lipidomics study of *Tuna viscera* [J]. J Nucl Agric Sci, 2020, 34(1): 113–119.
- [66] FIKRY M, KHALIFA I, SAMI R, *et al.* Optimization of the frying temperature and time for preparation of healthy falafel using air frying technology [J]. Foods, 2021, 10(11): 2567.
- [67] 张蒙娜, 宋恭帅, 王海星, 等. iKnife 智能刀-快速蒸发离子质谱实时检测空气油炸带鱼的脂质组学质量特征[J]. 食品科学, 2020, 41(1002–6630): 314–320.
- ZHANG MN, SONG GS, WANG HX, *et al.* Real-time detection of lipidomic characteristics of air-fried *Hairtail* by iKnife rapid evaporative ionization mass spectrometry [J]. Food Sci, 2020, 41(1002–6630): 314–320.
- [68] 张蒙娜, 薛静, 宋恭帅, 等. 基于快速蒸发离子质谱实时检测空气油炸鲳鱼的脂质组学轮廓[J]. 质谱学报, 2020, 41: 502–510.
- ZHANG MN, XUE J, SONG GS, *et al.* Real-time assessing the lipidomics profile of pomfret (*Pampus argenteus*) during air-frying by rapid evaporative ionization mass spectrometry [J]. J Chin Mass Spectr Soc, 2020, 41: 502–510.
- [69] 宋恭帅, 张蒙娜, 俞喜娜, 等. 南美白对虾空气油炸过程中脂质组学快速检测技术研究[J]. 核农学报, 2020, 6: 1237–1247.
- SONG GS, ZHANG MN, YU XN, *et al.* Rapid detection the lipidomics profile of white shrimp (*Penaeus vannamei*) during air frying processing [J]. J Nucl Agric Sci, 2020, 6: 1237–1247.
- [70] CHANG Y, CHAN LY, KONG F, *et al.* An innovative approach for real-time authentication of cocoa butter using a combination of rapid evaporative ionization mass spectrometry and chemometrics [J]. Food Control, 2022, 133: 108617.
- [71] 王慧君, 文汶, 曹学丽, 等. 基于代谢组学技术的快速蒸发电离质谱与智能手术刀联用实时鉴别果汁掺伪方法研究[J]. 分析测试学报, 2021, 40(2): 247–255.
- WANG HJ, WEN W, CAO XL, *et al.* Real-time assessment of fruit juices adulteration by rapid evaporative ionization mass spectrometry with iKnife based on metabolomics [J]. J Instrum Anal, 2021, 40(2): 247–255.
- [72] MURPHY F, GATHERCOLE J, LEE E, *et al.* Discrimination of milk fermented with different starter cultures by MALDI-TOF MS and REIMS fingerprinting [J]. Int Dairy J, 2021, 122: 105143.
- [73] CARDOSO K, CUIHERME V, SABIN P. Rapid evaporative ionization mass spectrometry (REIMS) combined with chemometrics for real-time beer analysis [J]. Anal Methods-UK, 2022, 14(15): 1540–1546.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



肖 斌, 硕士研究生, 主要研究方向为食品科学。
E-mail: xb17330377303@163.com



陈爱亮, 博士, 研究员, 主要研究方向为食品安全快速检测技术。
E-mail: ailiang.chen@gmail.com