

肉及其加工制品的掺假鉴别技术研究进展

施姿鹤, Josef VOGLMEIR, 刘 丽*

(南京农业大学食品科学技术学院, 江苏 南京 210095)

摘 要: 肉因其较高的营养价值和独特的风味而成为广大消费者饮食中最重要的组成成分之一。在高额利益的驱动下, 肉及肉制品的加工生产中掺假问题频繁发生。因此开发出能够对肉及肉制品的掺假进行有效鉴别的技术与方法对保障消费者的利益具有重要意义。产品和消费方式的不同决定了对掺假鉴别的侧重点不同, 因而对相应掺假鉴别技术的要求也不同。本文阐述了目前用于肉及肉制品掺假检测的常见方法的基本原理及其研究进展, 包括基于蛋白质组学的免疫和质谱技术, 基于DNA的聚合酶链式反应技术以及基于无损检测的传感器和光谱技术。同时也对目前已知方法所存在的鉴别盲区和新的掺假鉴别技术的开发提出了建议, 以期肉类及其加工制品掺假鉴别提供一定的理论依据。

关键词: 肉类; 掺假; 鉴别; 蛋白质组学; DNA; 无损检测

Recent Progress in Techniques for Adulteration Identification of Meat and Meat Products

SHI Zihe, Josef VOGLMEIR, LIU Li*

(College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Meat is one of the most important parts of the diet due to its high nutritious value and unique flavor. Driven by high profits, the problem of adulteration of meat and meat products occurs frequently in the meat processing industry and market. Therefore, the development of efficient techniques and methods for the identification of adulterated meat and meat products is of great significance for ensuring the rights of consumers. The requirements for adulteration identification techniques vary with the type of product and consumption pattern. This review describes the basic principles and applications of the methods currently available for meat adulteration detection, including proteomics-based immunoassay and mass spectrometry, DNA-based polymerase chain reaction and non-invasive sensor and spectroscopic technologies. Additionally, the disadvantages of these methods and some suggestions on the development of new adulteration identification techniques are proposed. We expect that this review will provide a theoretical basis for adulteration identification of meat and meat products.

Keywords: meat; adulteration; identification; proteomics; DNA; non-invasive detection

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181229-354

中图分类号: TS251.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2019) 23-0319-08

引文格式:

施姿鹤, VOGLMEIR J, 刘丽. 肉及其加工制品的掺假鉴别技术研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 319-326.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181229-354. <http://www.spkx.net.cn>

SHI Zihe, VOGLMEIR J, LIU Li. Recent progress in techniques for adulteration identification of meat and meat products[J]. Food Science, 2019, 40(23): 319-326. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181229-354. <http://www.spkx.net.cn>

肉是人类饮食的重要组成部分, 因其富含蛋白质、脂肪、铁、锌及VB₆等人体正常生命活动所必需的物质, 而广受消费者喜爱^[1]。近年来, 随着肉类消费量的快速增长, 掺假问题时有发生。肉制品掺假是指用一些价格低廉大量可用的原料来替代实际成分, 如鸭肉、鸡肉和鼠

肉等低价肉替代高价的牛肉和羊肉; 加工肉制品掺入动物内脏、组织; 或在某些情况下添加亚硝酸盐、色素、防腐剂等食品添加剂使掺假肉制品在感官上更受欢迎^[2-4]。加工肉制品的原料肉在经过切碎、混合、加热以及杀菌等一系列复杂处理过程后, 原有的形态特征已经改变, 无

收稿日期: 2018-12-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (31871793)

第一作者简介: 施姿鹤 (1995—) (ORCID: 0000-0002-7503-5668), 女, 硕士, 研究方向为食品营养与糖组学。

E-mail: 2017108032@njau.edu.cn

*通信作者简介: 刘丽 (1972—) (ORCID: 0000-0002-2178-9237), 女, 研究员, 博士, 研究方向为食品营养与糖组学。

E-mail: lichen.liu@njau.edu.cn

法轻易鉴定^[5-6]。肉及其加工制品掺假不仅损害消费者的利益、破坏市场秩序,还可能危害消费者的身体健康如过敏问题、掺假物有毒,甚至在一定程度上引起宗教问题^[7]。因而,采取准确、高效、灵敏的鉴别技术鉴定掺假肉品具有重大意义。掺假肉品的鉴别主要包括以下3个方面:1)肉类来源的鉴定(如野生与养殖肉类、有机与传统肉类、地理来源);2)肉类替代鉴定(肉类成分由其他动物物种、组织、脂肪或蛋白替代);3)鉴定非肉类成分添加剂(如水、添加剂)。随着现代仪器及分子生物学技术的快速发展,肉品掺假的定性定量鉴别方法也更为多样化。本文就国内外肉及其加工制品掺假鉴别技术的研究进展、各自存在的问题以及开发新方法的展望进行了综合论述,以期肉类食品安全监控和市场管理提供指导。

1 肉类产品掺假鉴别方法

传统的掺假鉴别方法如感官和形态学判别已经无法满足当下肉及其加工制品的安全控制需求,目前常用的方法有基于蛋白质组学的免疫和质谱(mass spectrometry, MS)技术,基于DNA的聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)鉴别手段,以及光谱、传感器等无损检测技术。表1就应用于肉品掺假鉴别方面的方法进行了总结。

表 1 肉及其加工制品掺假鉴别主要方法
Table 1 Major methods for adulteration identification of meat and meat products

鉴别方法	分析技术	优点	缺点	文献来源
蛋白质组学	ELISA	灵敏、检测成本低	易出现假阳性、交叉反应	Djurdievic ^[10] 、Mandli ^[11] 等
	MS	准确度和精确度高	检测成本高、耗费时间长	古淑青 ^[15] 、Watson ^[16] 等
	多重PCR	检测速度快,可同时分析多个样品	对样品DNA纯度要求高	Tafvizi ^[25] 、Prusakova ^[26] 等
DNA法	PCR-RFLP	特异性强、准确度高	操作复杂、实验结果重复性较低	Kumar ^[28] 、Ali ^[29] 等
	qPCR	可实现定量检测	需内标基因、需专业人员操作	Lubis ^[32] 、朱扬 ^[33] 等
	数字PCR	检测限低、定量准确	所需仪器昂贵、试剂要求高	Floren ^[36] 、任君安 ^[37] 等
传感器法	电子鼻	操作简单、结果呈现快	准确度低、重复性低	李芳 ^[39] 、Zhang Xinzhuang ^[40] 等
	电子舌			
光谱法	红外光谱	检测速度快、不破坏样品	应用于加工肉制品困难	Alamprese ^[43] 、白京 ^[46] 等
	拉曼光谱	准确率高	检测限高、需一定的样品前处理	Zhao Ming ^[50] 、Boyaci ^[51] 等
	HSI	样品内部外部信息均呈现、精确度高	数据量大、冗余信息多	Xiong Zhenjie ^[56] 、Kamruzzaman ^[57] 等
	LIBS	特异性强、检测速度快	检测限高、灵敏度差	Chu Yanwu ^[59] 、Bilge ^[61] 等

注: ELISA.酶联免疫吸附测定法(enzyme-linked immunosorbent assay); RFLP.限制性片段长度多态性(restriction fragment length polymorphism); qPCR.实时荧光定量PCR(quantitative real-time PCR); HSI.高光谱成像(hyperspectral imaging); LIBS.激光诱导击穿光谱(laser-induced breakdown spectroscopy)。

1.1 蛋白质组学分析法

蛋白质组意为一个基因组表达的所有蛋白质,包括不同亚型的蛋白和蛋白质翻译后修饰。肉类富含蛋白质,同种生物间蛋白组具有相对保守性,不同生物间蛋白组在含量、结构上存在一定差异,因而蛋白质可作为生物标记物鉴别肉品掺假^[8]。常见的基于蛋白质组学分析肉及其制品掺假的方法有免疫分析法、电泳分析法和MS分析法。

1.1.1 免疫法

免疫法中最常用的是ELISA,ELISA是将抗原抗体反应的高度特异性与酶促反应的高效性相结合的一种免疫学分析技术,自20世纪70年代初发展起来后广泛应用于肉类及其加工制品掺假检测^[9]。ELISA的基本原理是:抗原或抗体吸附在固相载体表面,酶结合抗原或抗体后仍保持其酶活性与免疫活性,通过加入相应的抗原或抗体,根据反应后底物颜色的变化来判断免疫反应的进行与否。Djurdievic等^[10]开发了一种基于单克隆抗体5D2 ELISA定量检测熟红肉中(猪肉、牛肉、羊肉、鹿肉、马肉)添加熟禽肉(鸡肉和火鸡肉)的量。单克隆抗体5D2对鸡和火鸡的熟骨骼肌可溶性蛋白有很高的特异性,基于该方法理论上能检测到红肉中质量分数1%的熟禽,且ELISA信号与火鸡肉和鸡肉浓度的相关性强($r>0.994$)。Mandli等^[11]采用辣根过氧化物酶结合抗猪免疫球蛋白G多克隆抗体ELISA检测牛肉中猪肉掺假情况,在直接ELISA和竞争性ELISA基础上,研发出免疫传感器。通过竞争性免疫传感器能在20 min内检测到牛肉中0.01%的猪肉掺假量。酶联免疫技术在鉴别肉类掺假方面具有快速、灵敏、重现性好以及检测成本低等优势,但存在对一些物种有交叉反应,试剂选择性高,不能同时分析多种成分等问题,并且加工肉制品中抗原易溶解,实验结果容易出现假阳性。

1.1.2 MS技术

MS分析是蛋白质组学技术中确定和精确定量复杂生物样品(如肉类和肉制品)蛋白质和多肽的基本工具。MS法是一种测量离子质荷比(质量-电荷比)的分析方法,在蛋白质组学中,通过将分离技术与MS技术相结合可实现不同动物来源蛋白或多肽的鉴别。

1.1.2.1 凝胶电泳结合MS技术

采用经典的一维(one-dimensional, 1D)和二维(one-dimensional, 2D)凝胶电泳技术可以分离定量蛋白质,凝胶电泳结合MS技术可实现高分辨率蛋白地分离和准确定量。Kim等^[12]用双向凝胶电泳(two-dimensional gel electrophoresis, 2DE)结合MS从鲜肉和冻融肉的渗出物中检测到了450种蛋白质,鲜肉中有15种蛋白质表达量较高($P<0.05$),其中有22种蛋白质可用于区分鲜肉和冻融肉。Montowska等^[13]分析了16种混合肉糜(由

猪肉、牛肉、鸡肉、鸭肉、鹅肉和火鸡肉混合而成)及上述6种肉为原料的15种法兰克福香肠中肌球蛋白轻链亚型结构的不同,结果表明混合肉糜中10%的其他物种添加量能够被检测到。Naveena等^[14]比较了2DE和非胶分级分离电泳(OFFGEL electrophoresis, OGE)分别结合MS技术检测不同比例混合的山羊肉、绵羊肉和水牛肉。以从肌球蛋白轻链(myosin light chain, MLC)1和MLC2中获得的特异肽为生物标志物,2DE结合MS能检测到水牛肉中添加质量分数1%山羊肉和绵羊肉,而OGE结合MS技术能检测到0.1%的山羊肉和绵羊肉掺假量。凝胶电泳结合MS技术鉴别肉品掺假具有一定的局限性,其中凝胶电泳较难分离分子质量过大或过小的蛋白,并且特异性标记蛋白或肽不易找到。

1.1.2.2 色谱-串联MS技术

色谱法利用蛋白或者多肽在不同相态的选择性分配,以流动相对固定相中的蛋白或者多肽进行洗脱,不同的成分会以不同的速度沿固定相移动,最终达到分离的效果。蛋白酶解产物经色谱-MS联用技术电离分析后,可获得每个肽段的MS图,借助蛋白数据库对肽段比对分析,进而寻找特异性肽标记物。古淑青等^[15]利用超高效液相色谱-四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱(ultra-performance liquid chromatography-quadrupole/electronic orbitrap-high resolution mass spectrometry, UPLC-Q/Extractive HRMS)和高效液相色谱-三重四极杆质谱(UPLC-triple-quadrupole mass spectrometry, UPLC-Triple-QqQ-MS)相结合的方法,鉴定了牛肉、鸭肉、猪肉和鸡肉中20个特征肽段,建立了检出限低于0.5%的羊肉掺假鉴别测定方法。Watson等^[16]建立了一种分析肉中肌红蛋白多肽的LC-MS方法,提取了猪肉、牛肉、羊肉和羊肉中肽段,运用MS的多反应监控(multiple-reaction monitoring, MRM)高效筛选出肽生物标记物,该方法具有检测牛肉中1%马肉添加量、羊肉中1%猪肉添加量和羊肉中1%牛肉添加量的潜力。水煮、油炸和烧烤等常用肉制品加工方式会导致一些蛋白的变性或者肽段降解,因而热稳定肽的鉴定具有重大的应用价值。Wang Guiji等^[17]对猪肉、鸡肉、鸭肉、牛肉和羊肉等五种生肉和熟肉进行全蛋白和多肽分析,以期寻找热稳定肽生物标记物。经超高效液相色谱串联三重四极杆飞行时间质谱法(UPLC-quadrupole-time-of-flight mass spectrometry, UPLC-Q-TOF-MS)结合MRM在5个物种的生肉中鉴别了34种肽生物标记物,其中有20种是热稳定性肽。Li Yingying等^[18]提出一种基于UPLC-MS/MS同时检测猪肉、牛肉、羊肉、鸡肉、鸭肉、大豆、花生、豌豆等8个物种的高通量MS方法,根据多肽的序列长度、覆盖率以

及热稳定性等参数筛选8个物种中的特异性多肽。使用这种方法,有可能检测到8个物种中任何一个的0.5%的掺假量。色谱-MS联用技术基于蛋白质组学原理,掺假鉴别准确率高,但需要繁琐的样品前处理,通常要经过蛋白分离富集或蛋白酶解,时间成本高;对于分析经过乳化、杀菌或加入其他食品添加剂的加工肉制品等复杂样品较为困难;液相色谱、MS等仪器昂贵,并且需要一定的维护保养费用。

1.2 DNA分析法

脱氧核苷酸是核苷酸单元相连接形成多聚核苷酸链,再通过折叠、卷曲形成具有特定空间构型的生命大分子。DNA作为细胞中的主要遗传物质,在物种间具有高度保守性。DNA相较于蛋白质具有更强的耐热性,存在于所有生物体细胞中并不受物质形态的影响,因而被广泛应用于肉类掺假检测^[19-21]。目前DNA分析法的技术主要有DNA杂交和聚合酶链反应。其中DNA杂交方法操作繁琐、灵敏度低,尤其是对于掺假肉等混合样品的检测比较困难,因而PCR是肉类产品掺假检测中的常用方法。

1.2.1 多重PCR

PCR是设计不同物种特定基因片段的引物大量体外扩增DNA,通过得到的PCR产物的大小而鉴别物种的技术。多重PCR是在一个PCR反应体系当中加入多对引物,可快速、准确地同时扩增多个DNA靶点,进而实现对多个肉类及其加工制品高效鉴别^[22-23]。Li等^[24]根据线粒体细胞色素b差异性位点设计了4种禽类(火鸡、鸵鸟、鸡和鸭)的特异性引物,通过多重PCR技术实现4种肉的鉴别。Tafvizi等^[25]使用牛肉、鸡肉和大豆引物进行多重PCR,检测牛肉汉堡中掺假现象。结果表明,该技术能鉴别牛肉汉堡中鸡肉和大豆蛋白的掺假,可应用于其他加工肉制品的检测。Prusakova等^[26]开发了一种优化的多重PCR方法,基于8种肉类线粒体ATPase序列差异设计鉴别引物并构建同时鉴定5种常见肉类(牛肉、羊肉、猪肉、鸡肉和火鸡)和3种常见违禁肉类(猫、狗、老鼠)的多重PCR反应体系,此方法可以在单次PCR中准确鉴别8种肉类,检测灵敏度可达皮克级DNA。多重PCR技术鉴别肉类掺假速度快、准确率高,但对于样品DNA纯度要求高,各鉴别物种在PCR反应中易相互干扰。

1.2.2 PCR-RFLP

CR-RFLP是利用PCR扩增一段保守基因序列,再使用适当的限制性核酸内切酶对PCR产物进行酶切,通过分析酶切后的产物的特异性进而判别不同DNA来源^[27]。Kumar等^[28]以线粒体细胞色素b基因为靶点,采用PCR-RFLP法鉴别了极其相近的几个物种。通过Alu1和Taq1双酶切PCR产物,可有效鉴别黄牛肉、水牛肉、绵羊肉、山羊肉和猪肉。Ali等^[29]

以PCR-RFLP技术,用四对引物分别从兔肉、老鼠肉、松鼠肉扩增出了123、108、243 bp基因片段,并使用指纹图谱技术鉴定了酶切后的特征性基因片段。同时,使用该方法能鉴别出香肠中0.1%的老鼠肉或松鼠肉掺假。Hossain等^[30]选取来自线粒体细胞色素b和ND5的基因靶点,模拟肉制品加工过程,验证所取基因靶点在加热和高压下均稳定。通过双基因靶向多重PCR-RFLP结合指纹图谱鉴别黄牛肉、水牛肉和猪肉,能检测到0.1%的掺假量。此外,对马来西亚20种清真牛肉香肠的检测结果表明:PCR-RFLP有应用于加工肉制品的潜力。PCR-RFLP鉴别掺假特异性强、对PCR和酶切结果的双重验证保证了其准确度高,但限制性核酸内切酶酶切时易受目标基因序列中酶切位点随机突变的影响,易产生不确定的检测结果,重复性较差。

1.2.3 qPCR

qPCR是在PCR体系中加入染料或者探针等荧光基团,通过荧光信号强度变化实时监控反应中DNA浓度的变化,从而实现对肉类产品进行鉴别并定量^[31]。Lubis等^[32]开发了一种基于ZEM™探针的新型qPCR技术,猪肉DNA最低检出限达1 pg/ μ L,理论上能在羊肉、牛肉中检测到0.001%猪肉掺假。朱扬等^[33]制备了生牛肉和经干、蒸、煮、炖、煎、炸、烤制处理的牛肉制品中掺入不同比例(10%、5%、1%、0.1%)猪肉的二元混合肉,通过普通PCR和qPCR扩增来自线粒体基因Cytb序列,进而实现定性和定量检测。实验结果表明:不同加工方式对肉中DNA含量、纯度和稳定性确实存在显著性影响,但不影响掺假源的检出。该方法对于清真肉类及其加工制品的监控具有广阔的应用前景,为实现加工肉制品质量监控提供了可能。Kang等^[34]采用SYBR Green 荧光定量PCR法检测牛肉汉堡中猪肉的掺假量,通过比较优化两种常用DNA提取法和五种常用DNA量化方法,最终能在牛肉汉堡中检测到0.01%猪肉含量。qPCR实现了肉类产品掺假的定量检测,为对市场进行精确控制提供了可能。

1.2.4 数字PCR

数字PCR是近年来迅速发展的一种核酸精确定量技术,通过将模板大量稀释到单个反应单元进行目标分子的PCR扩增,根据各个反应体系中荧光值结合泊松分布原理确定原始基因模板的绝对拷贝数。这种定量方法无需考虑引物扩增效率,且不依赖内标基因或标准曲线,具有灵敏度高、重复性好等优点^[35]。Floren等^[36]以核基因F2为靶点,定量检测了不同加工肉制品中原料肉的含量,并对牛肉中的掺假猪肉、马肉进行监控。结果表明,运用数字PCR,样品中DNA最低检出限为0.001%,最低定量限为0.01%。任君安等^[37]以单拷贝持家基因DNA复制蛋白A(replication protein A, RPA1)为靶基因,开展了羊肉中掺假猪肉的微滴式数字PCR定量检测研

究。该方法定量限为1%,且在5%~80%范围内绝对误差小于 $\pm 1.30\%$,相对误差小于 $\pm 10\%$,准确度高。Wang Qiang等^[35]基于数字PCR鉴定山羊和绵羊肉,通过模拟肉丸和9种商业肉制品,验证了数字PCR应用于肉制品中羊肉检测的可行性。数字PCR作为一种新型的DNA扩增技术,能实现DNA的绝对定量,在肉制品掺假方面具有广阔的应用前景。但由于目前数字PCR只能绝对定量样品中DNA的量,对于如何将DNA的拷贝数转换成相对质量分数仍处于起步阶段。另一方面,数字PCR检测通量低,且所需仪器昂贵。

1.3 传感器法

传感器技术是能待测物质的特异性成分,通过转化器转化成相应的物理化学信号输出,从而对各种组分进行定性和定量分析的技术。电子鼻和电子舌是常用于肉类产品掺假鉴别的传感器技术。

1.3.1 电子鼻

电子鼻是基于人类对气味的识别机制而设计的,气敏传感器吸附气味分子,所产生的信号进入信号处理系统进行一定的分析,最后由模式识别系统完成对复杂气体的综合分析并呈现结果^[38]。李芳等^[39]建立了一种利用PEN3电子鼻快速鉴别鸭肉、鹅肉和鸡肉的方法,采用线性判别式(linear discriminant analysis, LDA)和判别因子分析(discriminant factor analysis, DFA)方法建立识别模型,对数据进行分析。结果表明,电子鼻能区分3种鲜禽肉以及加热禽肉,准确率达95%以上。张娟等^[40]利用电子鼻结合统计学分析方法对牛肉中掺入猪肉进行分析。采用K均值聚类分析法和平均值法提取特征风味值,通过主成分分析(principal component analysis, PCA)和LDA分析定性检测掺假牛肉。在此基础上,又建立了偏最小二乘(partial least squares, PLS)、多元线性回归(multiple linear regression, MLR)和反向传播神经网络(back propagation neural network, BPNN)等模型预测掺假牛肉中猪肉的含量,所建模型预测相关性系数 R^2 均大于0.978,其中BPNN模型预测效果最佳, $R^2 > 0.999$,均方根误差低于1%。

1.3.2 电子舌

电子舌是根据人物味觉模式所设计的系统,由传感器获得味觉信号,再经过信号处理系统和模式分析系统,即可实现信号处理加工,其基本原理与电子鼻相似。Zhang Xinzhuang等^[41]采用TS-5000Z电子舌区分和牛、安格斯牛和西门塔尔,通过测定不同样品中粗蛋白、脂肪、灰分、胆固醇等化学组分及风味包括酸味、鲜味、咸味、苦味、涩味、苦后味等,结合主成分分析能快速区别这三个品种的牛肉。Haddi等^[42]建立了一种区分牛肉、绵羊肉和山羊肉的电子舌检测方法,通过PCA对所得的电子舌数据进行分析,可以鉴别3种肉,同时可区分不同贮藏时间的肉样。

电子鼻和电子舌在肉类掺假检测方面具有快速、操作简单等优势,但存在一定的缺陷。一方面,实验结果重复性不高、无法定量分析;另一方面加工肉制品中组成成分复杂,仅用电子鼻和电子舌等技术鉴别准确率不高,可与其他技术如气相-MS联用等提高检测准确度。

1.4 光谱分析法

光谱分析法是以肉类及其加工制品中一些基本组成成分如水分、蛋白质、脂肪酸或脂质在不同波长下产生光谱不同为原理。光谱技术因其检测速度快、样品前处理简单甚至无需样品前处理以及不破坏样品原有营养价值等优势,近年来逐渐被应用于食品质量安全控制。目前在肉类掺假检测方面,主要有红外光谱法、拉曼光谱、HSI和LIBS。

1.4.1 红外光谱

红外光谱是指频率在 $0.7\sim 500\ \mu\text{m}$ 之间的电磁波,能引起分子中振动能级和转动能级的跃迁,通过检测红外线被吸收的情况可得到不同物质的红外吸收光谱。目前,国内外学者运用近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIR)和中红外光谱(mid-infrared spectroscopy, MIR)监控肉类掺假研究较多。Alamprese等^[43]通过傅里叶近红外光谱(Fourier transform-near infrared spectroscopy, FT-NIR)和多元分析法分析新鲜的、冻融的和煮熟的肉末,鉴别牛肉末中火鸡掺假问题。同时建立了 $R^2>0.884$ 预测均方差 $<10.8\%$ PLS回归模型,应用偏最小二乘判别分析(partial least squares discrimination analysis, PLS-DA)对牛肉掺假样品进行判别,预测的灵敏度和特异度值均大于0.84和0.76。本研究表明,FT-NIR与适当的化学计量学方法相结合不仅适用于鲜肉产品中,而且在冻融和熟肉样品中也适用。Hu Yaxi等^[44]利用FT-NIR分析了6种类型的牛肉糜中掺假牛肉脏和猪内脏的情况,利用优化的PLSR模型,鉴定掺假牛肉的准确率达99%,精准识别掺假内脏类型且能对五种内脏添加量进行量化($R^2>0.81$),检出限低于10%。Wu Ting等^[45]对挪威鲑鱼和黑龙江鲑鱼进行鉴别,使用FT-NIR并采用标准正态方差、乘性散射校正和归一化等方法优化PLS-DA模型。对于校正和交叉验证样本集,优化的PLS-DA模型的相关系数系数分别为0.99和0.98,均方误差分别为2.3%和4.0%,鉴别鲑鱼掺假准确率达90%。白京等^[46]以含有不同比例肥肉的猪肉掺入解冻羊肉卷为检测对象,利用PLS进行建模分析,所得到的建模集和预测集相关性系数分别为0.969和0.953,填补了纯瘦肉和肥瘦相间肉的掺假检测空白。Rady等^[47]建立了分析肉末中掺假植物源性蛋白的可见NIR法,所建PLSR模型对掺假鉴别准确率达100%,为NIR法检测加工肉制品掺假提供了可能。Abu-Ghoush等^[48]采用MIR结合PLS-Kernel预测模型对牛肉中掺假猪肉进行控制,该方

法能检测到牛肉中1.4%的猪肉掺假量,对于清真食品安全管理具有广阔的应用前景。

1.4.2 拉曼光谱

拉曼光谱是基于拉曼散射效应的分析物质成分及其结构的技术,拉曼谱带与入射光的强度无关,与样品组成物质本身的极化率有关,因此不同肉类特定组成成分所产生的拉曼谱带不同,进而能实现掺假鉴别^[49-50]。Boyaci等^[51]将拉曼光谱和化学计量学相结合,对49份来自羊肉和马肉的脂肪进行鉴定,并建立PCA模型对牛肉中掺假羊肉进行预判,所建模型能在30 s内鉴别牛肉掺假25%~75%马肉。Zhao Ming等^[50]利用分散拉曼光谱检测牛肉汉堡中牛肉掺假内脏,根据 $900\sim 1\ 800\ \text{cm}^{-1}$ 处拉曼峰值生成指纹图谱。同时建立PLS-DA和软独立建模分析(soft independent modeling of class analogy, SIMCA)模型,掺假牛肉判别准确率达90%,所建的PLS-DA模型对于掺假牛肉中脂肪的添加量能得到3.8%的交互验证均方差和0.85的预测相关系数。拉曼光谱作为一种新兴的食品掺假检测技术,目前应用于肉类掺假检测仍存在着背景荧光信号干扰多、仪器昂贵、检测限高等问题,需要海内外学者进一步研究开发。

1.4.3 高光谱成像

HSI是一个强大的分析技术,将光谱技术和成像技术集成到一个系统中,能同时获得样品的物理特征如形状、大小和颜色等外部信息以及化学组成成分等内部信息^[52-54]。HSI又称为超立方体,高光谱图像以 (x, y, λ) 形式储存,其中 (x, y) 代表物体的空间信息, λ 代表样品的光谱信息^[55]。不同的肉类产品化学成分以及组成结构不同,通过收集其空间信息和光谱信息数据信息结合化学计量学方法分析,可实现肉类产品的定性和定量。Xiong Zhenjie等^[56]基于HSI的光谱信息和纹理信息鉴别土鸡和普通肉鸡,采用连续投影算法提取了9个最佳波长,30个纹理特征,并基于数据融合构建PLS-DA模型,土鸡和肉鸡鉴别准确率高达93.33%。Kamruzzaman等^[57]将HSI、多元分析和图像处理结合起来,鉴定猪肉、牛肉和羊肉。基于6个最佳波长建立了PLS-DA模型,总体分类准确率为98.67%。在此基础上,该学者采用HIS可视化牛肉中猪肉的掺假,选取430、605、665、705 nm 4个波长作为最佳波长,构建多元线性回归(multiple linear regression, MLR)模型,可预测牛肉末中2%~50%猪肉掺假率,预测相关系数 R_p 为0.985、预测标准误差为4.172%^[58]。高光谱结合了光谱技术与成像技术,兼具两者优点,同时也存在着一定的缺陷。高光谱技术分析样品获取的数据受光源强度、移动速率、镜头高度以及外界因素等影响较大,且存在较多冗余信息,需要进行复杂的降维处理来提取有用的数据;另外,建立定量预测模型需要有庞大的样本量。

1.4.4 激光诱导击穿光谱

LIBS是一种基于激光的光谱技术,利用激光脉冲激发样品形成等离子体。等离子体在冷却过程中能发射出辐射光,收集辐射光并进行分析,从而实现被测样品中各元素的定性和定量^[59-60]。LIBS可同时测定不同肉类产品中各类元素,基于不同样品元素组成差异能快速、准确地鉴别掺假。Bilge等^[61]采用LIBS分析了牛肉、猪肉、鸡肉中Zn、Mg、Ca、Na和K含量差别,应用PCA对3种肉判别,鉴别准确率达83.37%,并采用PLS分析牛肉中掺假猪肉、牛肉中掺假鸡肉两种混合肉,检出限分别为4.4%和2.0%。Chu Yanwu等^[59]利用LIBS技术建立了一种有效的肉类鉴别方法,采用乘性散射校正(multiplicative scatter correction, MSC)方法对光谱进行预处理,然后利用K-最近邻(K-nearest neighbor, KNN)模型对校正后的光谱进行识别。结果表明:MSC与LIBS相结合鉴别6种肉(扇贝、虾、猪肝、牛肉、鸡肉以及扇贝和虾的混合肉)的准确率高达100%。Velioglu等^[62]基于牛肉及其内脏(肝脏、肾脏、心脏、脾脏和肺)中Na、K、Mg、Ca和Fe组成差异,以LIBS结合PCA能成功鉴别纯牛肉和内脏掺假牛肉,应用PLS定量检测牛肉中内脏掺假量,检出限达3.8%,预测相关系数 R^2 为0.947,为香肠、汉堡等加工肉制品中内脏掺假检测提供了一定的参考依据。LIBS检测肉类及其加工制品掺假速度快、特异性强,但存在灵敏度低、实验结果重复性差等问题。同时样品的表面形状、基体效应、样本分布不均和混合不充分等因素都会影响最终实验结果,因而需要对肉样进行一定的预处理,使样品尽量保持均匀一致的状态。

2 结 语

MS、PCR、红外光谱、高光谱等技术在肉及其加工制品掺假检测中应用广泛,但均有各自的局限性,因此根据不同的样品情况选择合适的鉴别方法极其重要。总而言之,肉类的掺假鉴定方法可以分为无损检测和无损检测两大类。

无损检测因其检测速度快、不损伤样品、适合自动检测等优势,近年来在肉类产品掺假检测方面得到了越来越多的应用。无损检测中的传感器方法在检测准确度方面差强人意,还有较大的改进空间。光谱技术具有准确度高、检测速度快等优点,但是需要根据不同的样品建立相应的模型,而且通常得到的数据庞大,对数据进行降维,提取有用信息较为麻烦。未来需要改进的方面包括:建立相应的各个产品模型的数据库,便于快速在线分析;开发有效的算法,高效提取特征数据;与其他鉴别手段联用,同时达到鉴别准确率高、速度快、检出限低、无损等优势。

在有损检测技术中,基于蛋白质组学的鉴别方法准确度和精确度高,但所使用的设备昂贵,检测成本较高。基于样品DNA的PCR鉴别法因灵敏度高、检出限低的优点而具有比蛋白质鉴定技术更好的应用空间,然而该技术实验结果重复困难,易受DNA污染降解、复杂基质效应干扰和扩增方法的影响。未来可以开发相应的DNA芯片技术,以简化复杂操作。但是,对于一些DNA含量较少的样品或在加工过程中DNA被污染降解的样品,就必须选择基于蛋白质组学的鉴别手段。蛋白质组学研究中,由于在加工过程中蛋白质的稳定性较差,容易降解变性,不易获得重复性较好的检测结果,因此未来研究方向可以以蛋白质的翻译后修饰如糖基化作为鉴别指标。蛋白质的N-糖基化修饰非常稳定且物种特异性比较高,用于肉与肉制品的掺假鉴定将是一个新的、具有特殊优势的选择。

参考文献:

- [1] VLACHOS A, ARVANITOYANNIS I S, TSERKEZOU P. An updated review of meat authenticity methods and applications[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(7): 1061-1096. DOI: 10.1080/10408398.2012.691573.
- [2] ABBAS O, ZADRAVEC M, BAETEN V, et al. Analytical methods used for the authentication of food of animal origin[J]. Food Chemistry, 2018, 246: 6-17. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.11.007.
- [3] NEŠIĆ K, STOJANOVIĆ D, BALTIĆ Ž M. Authentication of meat and meat products vs. detection of animal species in feed: what is the difference?[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 85: 1-7. DOI:10.1088/1755-1315/85/1/012043.
- [4] KUMAR A, KUMAR R R, SHARMA B D, et al. Identification of species origin of meat and meat products on the DNA basis: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 55(10): 1340-1351. DOI:10.1080/10408398.2012.693978.
- [5] EL SHEIKHA A F, MOKHTAR N F K, AMIE C, et al. Authentication technologies using DNA-based approaches for meats and halal meats determination[J]. Food Biotechnology, 2017, 31(4): 281-315. DOI:10.1080/08905436.2017.1369886.
- [6] KAMRUZZAMAN M, MAKINO Y, OSHITA S. Non-invasive analytical technology for the detection of contamination, adulteration, and authenticity of meat, poultry, and fish: a review[J]. Analytica Chimica Acta, 2015, 853: 19-29. DOI:10.1016/j.aca.2014.08.043.
- [7] CAVIN C, COTTENET G, BLANCPAIN C, et al. Food adulteration: from vulnerability assessment to new analytical solutions[J]. Chimia (Aarau), 2016, 70(5): 329-333. DOI:10.2533/chimia.2016.329.
- [8] VON BARGEN C, BROCKMEYER J, HUMPF H U. Meat authentication: a new HPLC-MS/MS based method for the fast and sensitive detection of horse and pork in highly processed food[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(39): 9428-9435. DOI:10.1021/jf503468t.
- [9] MONTOWSKA M, POSPIECH E. Authenticity determination of meat and meat products on the protein and DNA basis[J]. Food Reviews International, 2010, 27(1): 84-100. DOI:10.1080/87559129.2010.518297.
- [10] DJURDIEVIC N, SHEU S C, HSIEH Y H P. Quantitative detection of poultry in cooked meat products[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(9): C586-C593. DOI:10.1111/j.1365-2621.2005.tb08309.x.

- [11] MANDLI J, EL FATIMI I, SEDDAOUI N, et al. Enzyme immunoassay (ELISA/immunosensor) for a sensitive detection of pork adulteration in meat[J]. Food Chemistry, 2018, 255: 380-389. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.01.184.
- [12] KIM G D, JEONG T C, YANG H S, et al. Proteomic analysis of meat exudates to discriminate fresh and freeze-thawed porcine longissimus thoracis muscle[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(2): 1235-1238. DOI:10.1016/j.lwt.2015.02.016.
- [13] MONTOWSKA M, POSPIECH E. Myosin light chain isoforms retain their species-specific electrophoretic mobility after processing, which enables differentiation between six species: 2DE analysis of minced meat and meat products made from beef, pork and poultry[J]. Proteomics, 2012, 12(18): 2879-89. DOI:10.1002/pmic.201200043.
- [14] NAVEENA B M, JAGADEESH D S, KAMUNI V, et al. In-gel and OFFGEL-based proteomic approach for authentication of meat species from minced meat and meat products[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2018, 98(3): 1188-1196. DOI:10.1002/jsfa.8572.
- [15] 古淑青, 詹丽娜, 赵超敏, 等. 基于液相色谱-串联质谱法的肉类特征肽段鉴别及掺假测定[J]. 色谱, 2018, 26(12): 1269-1278. DOI:10.3724/SP.J.1123.2018.08005.
- [16] WATSON A D, GUNNING Y, RIGBY N M, et al. Meat authentication via multiple reaction monitoring mass spectrometry of myoglobin peptides[J]. Analytical Chemistry, 2015, 87(20): 10315-10322. DOI:10.1021/acs.analchem.5b02318.
- [17] WANG Guiji, ZHOU Guangyun, REN Haowei, et al. Peptide biomarkers identified by LC-MS in processed meats of five animal species[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2018, 73: 47-54. DOI:10.1016/j.jfca.2018.07.004.
- [18] LI Y, ZHANG Y, LI H, et al. Simultaneous determination of heat stable peptides for eight animal and plant species in meat products using UPLC-MS/MS method[J]. Food Chemistry, 2018, 245: 125-131. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.09.066.
- [19] KUMAR A, KUMAR R R, SHARMA B D, et al. Identification of species origin of meat and meat products on the DNA basis: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(10): 1340-1351. DOI:10.1080/10408398.2012.693978.
- [20] RAHMATI S, JULKAPLI N M, YEHYE W A, et al. Identification of meat origin in food products: a review[J]. Food Control, 2016, 68: 379-390. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.04.013.
- [21] 胡谦, 陈颖, 倪凯, 等. 肉制品异源基因检测技术研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 275-282. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201815040.
- [22] ALI M E, RAZZAK M A, HAMID S B A. Multiplex PCR in species authentication: probability and prospects: a review[J]. Food Analytical Methods, 2014, 7(10): 1933-1949. DOI:10.1007/s12161-014-9844-4.
- [23] ALI M E, RAZZAK M A, HAMID S B, et al. Multiplex PCR assay for the detection of five meat species forbidden in Islamic foods[J]. Food Chemistry, 2015, 177: 214-224. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.12.098.
- [24] LI J, HONG Y, KIM J H, et al. Multiplex PCR for simultaneous identification of turkey, ostrich, chicken, and duck[J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2015, 58(6): 887-893. DOI:10.1007/s13765-015-0118-7.
- [25] TAFVIZI F, HASHEMZADEGAN M. Specific identification of chicken and soybean fraud in premium burgers using multiplex-PCR method[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(1): 816-823. DOI:10.1007/s13197-015-1771-x.
- [26] PRUSAKOVA O V, GLUKHOVA X A, AFANAS'EVA G V, et al. A simple and sensitive two-tube multiplex PCR assay for simultaneous detection of ten meat species[J]. Meat Science, 2018, 137: 34-40. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.10.017.
- [27] RASHID N R, ALI M E, HAMID S B, et al. A suitable method for the detection of a potential fraud of bringing macaque monkey meat into the food chain[J]. Food Additives and Contaminants Part A Chemistry Analysis Control Exposure Risk Assessment, 2015, 32(7): 1013-1022. DOI:10.1080/19440049.2015.1039073.
- [28] KUMAR D, SINGH S P, KARABASANAVAR N S, et al. Authentication of beef, carabeef, chevon, mutton and pork by a PCR-RFLP assay of mitochondrial *cytb* gene[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(11): 3458-3463. DOI:10.1007/s13197-012-0864-z.
- [29] ALI M E, AHAMAD M N U, ASING, et al. Multiplex polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism assay discriminates of rabbit, rat and squirrel meat in frankfurter products[J]. Food Control, 2018, 84: 148-158. DOI:10.1016/j.foodcont.2017.07.030.
- [30] HOSSAIN M A, ALI M E, ABD HAMID S B, et al. Double gene targeting multiplex polymerase chain reaction-restriction fragment length polymorphism assay discriminates beef, buffalo, and pork substitution in frankfurter products[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(32): 6343-6354. DOI:10.1021/acs.jafc.6b02224.
- [31] DRUML B, GRANDITS S, MAYER W, et al. Authenticity control of game meat products: a single method to detect and quantify adulteration of fallow deer (*Dama dama*), red deer (*Cervus elaphus*) and sika deer (*Cervus nippon*) by real-time PCR[J]. Food Chemistry, 2015, 170: 508-517. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.08.048.
- [32] LUBIS H, SALIHAN N T, HOSSAIN M M, et al. Development of fast and sensitive real-time qPCR assay based on a novel probe for detection of porcine DNA in food sample[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 84: 686-692. DOI:10.1016/j.lwt.2017.06.043.
- [33] 朱扬, 刘永峰, 魏燕超, 等. 牛肉及其中式加工品中猪肉成分的定性、定量检测方法研究[J]. 中国农业科学, 2018, 51(22): 4352-4362. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2018.22.013.
- [34] KANG T S, TANAKA T. Comparison of quantitative methods based on SYBR Green real-time qPCR to estimate pork meat adulteration in processed beef products[J]. Food Chemistry, 2018, 269: 549-558. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.06.141.
- [35] WANG Qiang, CAI Yicun, HE Yuping, et al. Droplet digital PCR (ddPCR) method for the detection and quantification of goat and sheep derivatives in commercial meat products[J]. European Food Research and Technology, 2017, 244(4): 767-774. DOI:10.1007/s00217-017-3000-5.
- [36] FLOREN C, WIEDEMANN I, BRENIG B, et al. Species identification and quantification in meat and meat products using droplet digital PCR (ddPCR)[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 1054-1058. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.10.138.
- [37] 任君安, 邓婷婷, 黄文胜, 等. 微滴式数字聚合酶链式反应精准定量检测羊肉中掺杂猪肉[J]. 食品科学, 2017, 38(2): 311-316. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201702049.
- [38] JIA W, LIANG G, WANG Y, et al. Electronic noses as a powerful tool for assessing meat quality: a mini review[J]. Food Analytical Methods, 2018, 11(10): 2916-2924. DOI:10.1007/s12161-018-1283-1.
- [39] 李芳, 孙静, 黄沁怡, 等. 禽肉风味指纹和识别模型的建立[J]. 中国食品学报, 2014, 14(2): 255-260. DOI:10.16429/j.1009-7848.2014.02.050.

- [40] 张娟, 张申, 张力, 等. 电子鼻结合统计学分析对牛肉中猪肉掺假的识别[J]. 食品科学, 2018, 39(4): 296-300. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201804044.
- [41] ZHANG Xinzhuang, ZHANG Yawei, MENG Qingxiang, et al. Evaluation of beef by electronic tongue system TS-5000Z: flavor assessment, recognition and chemical compositions according to its correlation with flavor[J]. PLoS ONE, 2015, 10(9): e0137807. DOI:10.1371/journal.pone.0137807.
- [42] HADDI Z, EL BARBRI N, TAHRI K, et al. Instrumental assessment of red meat origins and their storage time using electronic sensing systems[J]. Analytical Methods, 2015, 7(12): 5193-5203. DOI:10.1039/c5ay00572h.
- [43] ALAMPRESE C, AMIGO J M, CASIRAGHI E, et al. Identification and quantification of turkey meat adulteration in fresh, frozen-thawed and cooked minced beef by FT-NIR spectroscopy and chemometrics[J]. Meat Science, 2016, 121: 175-181. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.06.018.
- [44] HU Yaxi, ZOU Liang, HUANG Xiaolin, et al. Detection and quantification of offal content in ground beef meat using vibrational spectroscopic-based chemometric analysis[J]. Scientific Report, 2017, 7(1): 15162. DOI:10.1038/s41598-017-15389-3.
- [45] WU Ting, ZHONG Nan, YANG Ling. Identification of adulterated and non-adulterated norwegian salmon using FTIR and an improved PLS-DA method[J]. Food Analytical Methods, 2017, 11(5): 1501-1509. DOI:10.1007/s12161-017-1135-4.
- [46] 白京, 李家鹏, 邹昊, 等. 近红外特征光谱定量检测羊肉卷中猪肉掺假比例[J]. 食品科学, 2019, 40(2): 287-292. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180531-452.
- [47] RADY A, ADEDEJI A. Assessing different processed meats for adulterants using visible-near-infrared spectroscopy[J]. Meat Science, 2018, 136: 59-67. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.10.014.
- [48] ABU-GHOUSH M, FASFOUS I, AL-DEGS Y, et al. Application of mid-infrared spectroscopy and PLS-Kernel calibration for quick detection of pork in higher value meat mixes[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2016, 11(1): 337-346. DOI:10.1007/s11694-016-9402-4.
- [49] BOYACI İ H, UYSAL R S, TEMİZ T, et al. A rapid method for determination of the origin of meat and meat products based on the extracted fat spectra by using of Raman spectroscopy and chemometric method[J]. European Food Research and Technology, 2014, 238(5): 845-852. DOI:10.1007/s00217-014-2168-1.
- [50] ZHAO Ming, DOWNEY G, O'DONNELL C P. Dispersive Raman spectroscopy and multivariate data analysis to detect offal adulteration of thawed beefburgers[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(5): 1433-1441. DOI:10.1021/jf5041959.
- [51] BOYACI İ H, TEMİZ H T, UYSAL R S, et al. A novel method for discrimination of beef and horsemeat using Raman spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2014, 148: 37-41. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.10.006.
- [52] XIONG Z, XIE A, SUN D W, et al. Applications of hyperspectral imaging in chicken meat safety and quality detection and evaluation: a review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(9): 1287-1301. DOI:10.1080/10408398.2013.834875.
- [53] WANG W, PENG Y, SUN H, et al. Spectral detection techniques for non-destructively monitoring the quality, safety, and classification of fresh red meat[J]. Food Analytical Methods, 2018, 11(10): 2707-2730. DOI:10.1007/s12161-018-1256-4.
- [54] 刘海, 郑福平, 熊振海, 等. 高光谱成像技术在肉品品质评价中的应用[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 276-283. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201811043.
- [55] XIONG Z, SUN D W, ZENG X A, et al. Recent developments of hyperspectral imaging systems and their applications in detecting quality attributes of red meats: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 132(1): 1-13. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2014.02.004.
- [56] XIONG Zhenjie, SUN Dawen, PU Hongbin, et al. Combination of spectra and texture data of hyperspectral imaging for differentiating between free-range and broiler chicken meats[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(2): 649-655. DOI:10.1016/j.lwt.2014.10.021.
- [57] KAMRUZZAMAN M, ELMASRY G, SUN D-W, et al. Non-destructive prediction and visualization of chemical composition in lamb meat using NIR hyperspectral imaging and multivariate regression[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2012, 16: 218-226. DOI:10.1016/j.ifset.2012.06.003.
- [58] KAMRUZZAMAN M, MAKINO Y, OSHITA S. Hyperspectral imaging in tandem with multivariate analysis and image processing for non-invasive detection and visualization of pork adulteration in minced beef[J]. Analytical Methods, 2015, 7(18): 7496-7502. DOI:10.1039/c5ay01617g.
- [59] CHU Yanwu, TANG Shisong, MA Shixiang, et al. Accuracy and stability improvement for meat species identification using multiplicative scatter correction and laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Optics Express, 2018, 26(8): 10119-10127. DOI:10.1364/OE.26.010119.
- [60] CASADO-GAVALDA M P, DIXIT Y, GEULEN D, et al. Quantification of copper content with laser induced breakdown spectroscopy as a potential indicator of offal adulteration in beef[J]. Talanta, 2017, 169: 123-129. DOI:10.1016/j.talanta.2017.03.071.
- [61] BILGE G, VELIOGLU H M, SEZER B, et al. Identification of meat species by using laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Meat Science, 2016, 119: 118-122. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.04.035.
- [62] VELIOGLU H M, SEZER B, BILGE G, et al. Identification of offal adulteration in beef by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS)[J]. Meat Science, 2018, 138: 28-33. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.12.003.