

拉曼光谱技术在肉类掺假检测方面的应用研究进展

韩爱云¹, 张振冉², 解立斌¹, 史君坡^{1,*}, 剧慧栋¹, 左晓磊^{3,*}

(1. 石家庄学院化工学院, 河北 石家庄 050035; 2. 石家庄市农产品质量检测中心, 河北 石家庄 050021;

3. 石家庄市农业农村局, 河北 石家庄 050000)

摘要: 随着人们对高品质肉要求的提高, 对快速、可靠的肉类掺假鉴别需求也不断增加。拉曼光谱技术是基于非弹性散射原理建立起来的分子结构表征技术, 该技术能检测出官能团分子的化学结构, 经过几十年的发展已广泛应用于食品检测, 具有快速、无损、无污染、简单、可重复等优点, 在肉品掺假检测方面取得了较好研究结果, 应用潜力巨大。本文对近年来拉曼光谱技术在肉类掺假检测方面的研究进展和最新研究成果进行综述, 并讨论其存在的问题及发展前景。

关键词: 拉曼光谱; 肉类掺假; 无损检测; 食品安全

Progress on the Application of Raman Spectroscopy in Meat Adulteration Detection

HAN Aiyun¹, ZHANG Zhenran², XIE Libin¹, SHI Junpo^{1,*}, JU Huidong¹, ZUO Xiaolei^{3,*}

(1. College of Chemical Engineering, Shijiazhuang University, Shijiazhuang 050035, China;

2. Shijiazhuang Agricultural Product Quality Testing Center, Shijiazhuang 050021, China;

3. Shijiazhuang Agricultural and Rural Bureau, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: With the growing consumer interest in high quality meat, the demand for fast and reliable techniques for the detection of meat adulteration is growing. Raman spectroscopy is a molecular structure characterization technology based on the principle of inelastic scattering, which can detect the chemical structure of functional group molecules. Raman spectroscopy has been widely used in food detection since it was developed decades ago. It is fast, non-destructive, non-polluting, simple and repeatable, and has been applied in the detection of meat adulteration with good results, showing a great potential for application. This review assembles the latest advances in the application of Raman spectroscopy in meat adulteration detection, and discusses problems existing in this field and future prospects.

Keywords: Raman spectroscopy; meat adulteration; non-destructive detection; food safety

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210316-073

中图分类号: TS251.7

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2021) 07-0050-05

引文格式:

韩爱云, 张振冉, 解立斌, 等. 拉曼光谱技术在肉类掺假检测方面的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(7): 50-54.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210316-073. <http://www.rlyj.net.cn>

HAN Aiyun, ZHANG Zhenran, XIE Libin, et al. Progress on the application of Raman spectroscopy in meat adulteration detection[J]. Meat Research, 2021, 35(7): 50-54. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210316-073. <http://www.rlyj.net.cn>

随着经济发展, 肉及肉制品的产量持续增加, 2017年全球肉类产量达3.3亿t, 我国对于高品质肉类(如牛肉、羊肉)的消费量与日俱增, 目前已排名世界第三^[1]。

高品质肉的价格一直居高不下, 很多商人受利益驱使, 使用低价位品种肉进行掺假等现象屡见不鲜, 不仅对市场秩序产生干扰, 而且对消费者生活方式、健康及宗教

收稿日期: 2021-03-16

基金项目: 河北省引进留学人员资助项目(C20200362); 石家庄市第二批高层次人才支持计划项目(石字[2018]27号)

第一作者简介: 韩爱云(1981—)(ORCID: 0000-0002-0862-9634), 女, 副教授, 博士, 研究方向为食品营养与安全。

E-mail: 42242680@qq.com

*通信作者简介: 史君坡(1978—)(ORCID: 0000-0002-4992-8817), 男, 讲师, 硕士, 研究方向为计算机建模。

E-mail: jiaowu087@qq.com

左晓磊(1978—)(ORCID: 0000-0002-3767-9235), 男, 研究员, 硕士, 研究方向为畜产品安全。

E-mail: zuoxil@163.com



信仰都造成严重影响,存在较大的安全隐患^[2-3]。消费者对于所食用的肉及标签真假非常关心,因此快捷的掺假鉴别技术是肉品行业健康发展的有力保障。本文针对目前肉类行业存在的掺假问题,对近年来拉曼光谱技术在肉类掺假检测方面的研究进展进行综述。

1 拉曼光谱技术介绍

拉曼光谱技术是基于非弹性散射原理建立起来的分子结构表征光学测量技术^[4]。拉曼光谱对物质的分子键和分子结构非常敏感,可以被用来表征化学物质的分子结构,鉴定其功能性分子基团,进而对分子或样品实现指纹识别。拉曼光谱包括色散拉曼光谱(dispersive Raman spectroscopy, DRS)、傅里叶变换拉曼光谱(Fourier transform Raman spectroscopy, FT-RS)、空间偏移拉曼光谱、微型共焦拉曼光谱^[5]、共振拉曼光谱^[6]和表面增强拉曼光谱(surface-enhanced Raman spectroscopy, SERS)^[7]。由于只有0.001%的入射光产生非弹性拉曼信号,拉曼效应很弱,难以分辨。随着拉曼光谱的发展,将滤波器、激光光阑等仪器结合使用,可减少光线的散射,从而获得高强度拉曼光谱,使得拉曼光谱成为食品行业强有力的检测工具^[8]。例如, SERS是利用微量分子吸附于Cu、Ag、Au等纳米金属颗粒或具有纳米级粗糙度的电极表面,使其拉曼光谱信号增强 10^{10} 倍^[9],可以在分子水平研究材料分子的结构信息,使微量以至于痕量物质检测成为可能,与其他检测方法相比具有快速、无损、无污染、简单、可重复等优点^[10-11]。

自20世纪60年代起将激光引入到拉曼光谱仪作为光源以来,拉曼光谱技术得到了迅速发展。目前拉曼光谱已经广泛应用于食品领域,如食品成分分析(包括油脂、蛋白质、低聚糖等的分析^[12])、食品安全检测(如化学污染物、微生物污染、农药残留、真菌毒素及抗生素等的检测^[13-14])、肉品质量评定(测定牛肉、羊肉的感官品质^[15],通过测定鲜肉中肌红蛋白、血红蛋白的含量来确定肉色的变化^[16])、肌肉品质测定^[17](准确测定猪肉、羊肉中各种脂肪酸的含量^[18-19]、肉的持水能力^[20]、检测肉类和鱼类的蛋白质含量^[21]、肉品新鲜度评价^[22])等。拉曼光谱技术能检测出以碳键为基础的官能团分子结构,进而对肉品进行鉴别。

2 肉及肉制品的掺假鉴别

肉及肉制品的掺假鉴别包括四方面:一是肉类来源(如品种、饲喂方式、屠宰年龄等)鉴别,二是肉类替代品(如肉、脂肪或蛋白质等)鉴别,三是肉类加工处理方式(如贮藏方式、烹调方式)鉴别,四是非肉成分

(如水和添加剂等)鉴别^[23](表1)。不同肉品的口感、营养成分及安全性等方面不同,其价格也有所差别。

表1 肉类掺假鉴别问题分类
Table 1 Potential meat adulteration problems

掺假鉴别	分类	举例或说明
肉类来源	性别(公母)	不同性别动物的肉质不同
	切割部位	动物的不同部位肉价格不同
	饲喂方式	散养鸡/笼养鸡,草饲牛/粮饲牛
	品种	商品肉鸡/地方土鸡,绵羊肉/山羊肉
	屠宰年龄	乳猪肉/成年猪肉,羔羊肉/成年羊肉
	野生/家养	野生猪/家养猪,野生鱼/养殖鱼
肉类替代品	绿色养殖/传统养殖	无农药残留肉/农药残留超标肉
	产地或地域	低价普通肉冒充地方肉,如普通猪肉/滇南小耳猪肉
	肉	廉价肉掺入高价肉,如鸭肉掺入牛肉中
	脂肪	内脏组织掺入肉类中 植物油替代动物油脂
	蛋白质	低价动物油替代高价动物油 廉价的大豆蛋白掺入动物蛋白中
	水或其他	廉价动物蛋白(如肉骨粉)掺入高价动物蛋白中 有机合成蛋白(三聚氰胺或尿素)掺入动物蛋白中
肉类加工处理方式	贮藏方式	冷鲜肉/解冻肉,常规保鲜肉/辐照肉
	烹调方式	烧烤、炖煮、油炸等
非肉类成分添加	水或其他	注水肉、注胶肉
	添加剂	着色剂、芳香剂、调味剂、防腐剂等

在肉类行业,受利益驱使,很多掺假现象出现在加工肉制品(如肉糜、肉丸、肉馅、汉堡等)中,因为加工处理过程中肌肉和肉块的外观形态被破坏,尤其是加工成肉糜后,肉眼很难识别。近年来,肉类掺假、欺诈、错贴标签已成为全球消费者日益关注的问题^[2-3]。国内外肉类掺假事件层出不穷,如日本发现有食品企业在其牛肉产品中添加廉价的猪肉脂肪^[24],巴西出现汉堡中掺入未标明的大豆蛋白^[25],墨西哥出现汉堡和香肠中掺入不明动物肉^[26],美国和土耳其分别发现有各种肉类产品中掺假的报道^[27],瑞士也曾出现冷冻之后又解冻的肉充当鲜肉的事件^[28],欧盟曾发现马肉掺假事件以及将廉价的牛内脏掺入牛肉中的情况^[29]。国内也有商人受利益驱使,使用鸭肉、猪肉等低价位品种肉进行掺假等现象^[30]。这些肉类掺假的泛滥不仅干扰了市场秩序,对消费者造成严重利益损失,也构成严重食品安全隐患。因此,肉类掺假鉴别技术发展是打击“掺假肉”问题的有力保障。

目前肉品掺假鉴别方法众多,已从传统感官鉴别法发展到仪器分析法,包括电泳分析法、免疫分析法、色谱分析法、DNA分子杂交技术、质谱检测法、电子鼻与电子舌法。传统的感官鉴别法方便快捷,但是需要一定的经验,其准确性与鉴别人员的经验相关性较大^[31];目前,采用电子鼻与电子舌技术鉴别样品时,因掺假比例不同,难以对样品中各组分进行准确定量^[32]。基于DNA

的分子技术包括聚合酶链式反应^[33]、DNA条形码^[34]等,虽然在肉类掺假鉴别中的准确性较高,但是费时、成本高,且对检测人员要求较高^[35]。基于蛋白质和脂肪的技术,包括电泳^[36]、液相色谱-质谱^[37]、气相色谱^[38]等,虽然具有高特异性、高灵敏度等优点,但是也存在很大的局限性,如对样品结构要求高、重复性低、假阳性率高等。近红外光谱^[39]、荧光光谱^[40]、高光谱成像^[41]和拉曼光谱^[3]都是近年来应用在肉品质检测(包括品种鉴别、产地溯源及生产体系溯源)方面常用的光谱学方法,虽然上述方法都取得了有效的成果,但是拉曼光谱法在测定以碳键为基础的化学指纹图谱方面敏感性更强,且检测结果不受样品或测定环境中水分含量的影响,因此,在肉类掺假检测方面较其他方法更具优势^[12,42]。

3 拉曼光谱技术在肉类鉴别方面的应用

拉曼光谱技术在肉类检测方面的应用起步较晚,肉类掺假鉴别始于2013年欧洲的马肉事件之后,且主要集中在肉类来源方面的鉴别,其他方面少有报道。目前的研究中包括动物物种、品种的鉴定,还包括不同饲养模式的肉类鉴定,这对于肉类分级和定价非常重要^[3]。Beattie等^[43]采用拉曼光谱多变量分析法对4种不同的动物(鸡、牛、羊和猪)脂肪组织进行测定,将102个独立样本建立统计模型,然后再对153个独立样本进行测定,在各种经典的多元方法中,偏最小二乘判别分析(partial least squares discrimination analysis, PLSDA)法分类正确率最佳,为99.6%,主成分线性判别分析(principal component and linear discrimination analysis, PCLDA)法次之,为96.7%。Boyaci等^[44]利用拉曼光谱技术结合主成分分析(principal component analysis, PCA)法,对132个来自不同动物(肉牛、绵羊、猪、山羊、水牛、鱼、鸡和火鸡)的脱脂肉样及其香肠制品进行检测,结果表明,该方法能够在30 s内快速鉴别出肉品来源,与其他方法相比检测时间短,准确度高,无需复杂的方法和人员培训。Robert等^[1]采用一种光纤耦合的拉曼光谱仪快速鉴别牛肉、鹿肉和羊肉,结果表明,线性和非线性支持向量模型的灵敏度分别达到87%和90%以上,特异性在88%以上,PLSDA法在每种肉分析中准确率都在80%以上,说明拉曼光谱是鉴别红肉非常有效的技术。Logan等^[3]采用拉曼光谱法对草饲牛和粮饲牛的皮下脂肪进行检测,并采用偏最小二乘法对牛肉进行分类,结果表明,拉曼光谱法区分长期粮饲、短期粮饲、全草饲和半草饲牛肉的准确度分别为96%、85%、83%、83%,说明拉曼

光谱可以较准确鉴别不同饲喂模式下生产的牛肉。根据上述检测原理及结果,推测拉曼光谱也可以用来识别笼养肉鸡和散养土鸡,以及不同生长周期和饲喂模式的猪肉品质。但相关内容报道还很少,可以从这些方面进行探索和尝试。

2013年欧洲的马肉事件之后,牛肉掺假检测相对较多,Ebrahim等^[45]报道指出,拉曼光谱测定中,使用671 nm微系统二极管发射光源,牛肉和马肉相比,在贮藏阶段马肉的拉曼光谱均显示出明显的高荧光背景,确定此方法可以被用来鉴别牛肉中掺入马肉。Zajac等^[46]提出一种基于FT-RS法测定牛肉中是否掺杂马肉的方法,以马肉和牛肉的背长肌为研究对象,在牛肉中分别掺入25%、50%、75%马肉,结果表明,可以较准确测定出2种肉的准确含量,样品的光谱参数与化学含量有很好的拟合度。Boyaci等^[29]将增强式拉曼光谱用于快速测定牛肉中掺入的马肉,并通过PCA对牛肉和马肉中提取的纯脂肪样品的拉曼数据进行分类,开发新模型系统,证明了拉曼光谱能结合PCA快速区分牛肉和马肉,进而快速区分肉品种类。但其距工业化应用还有一段距离,仍需开发数据处理软件、建立数据库及其模型等。

肉类掺假除了将廉价肉掺入到高价肉中,还有将内脏及组织掺入到肉中的情况^[26]。Zhao Ming等^[47]使用DRS和多变量数据分析牛肉内脏(肾脏、肝脏、心脏、肺)掺假的牛肉汉堡,对46个掺假汉堡和36个未掺假汉堡采用PLSDA和软独立模式分类(soft independent modeling of class analogies, SIMCA)法进行分析,结果表明,PLSDA能正确区分出89%以上的掺假汉堡和90%以上的未掺假汉堡,SIMCA对未掺假汉堡的敏感度在94%以上,为肉糜中复杂成分掺假鉴别探索了新方法。

由于拉曼光谱技术在肉类检测方面的应用起步较晚,目前文献报道多集中在牛肉的掺假检测,其他肉类掺假检测较少,例如,徐记各等^[48]采用广域照射拉曼光谱技术建立鸭、羊、猪3种原料肉及掺假羊肉的定性识别模型,结果表明,拉曼光谱分析技术结合有效的数据前处理方法及化学计量学方法可对鸭、羊、猪原料肉种属及掺假羊肉进行鉴别,且与常规方法相比具有快速、方便且无需样品前处理等优点。在禽肉方面,Ellis等^[49]成功将拉曼光谱与近红外光谱结合,对鸡肉和火鸡肉糜2种相似度很高的家禽品种进行鉴别,并准确区分出腿部肉和胸肌肉,为拉曼光谱在鉴别特定部位肌肉和肉类掺假方面的研究开拓了方向。

将目前查询到的有关拉曼光谱技术在肉类掺伪鉴别方面的主要技术参数进行归纳总结,如表2所示。



表2 采用拉曼光谱技术检测肉品掺假的部分研究

Table 2 Selected recent studies on detection of meat adulteration by

Raman spectroscopy				
检测目的	扫描光谱范围/cm	分析方法	结果评价	参考文献
鉴别牛肉中掺入的马肉	1 035~1 632	PCA	$R^2=0.99$, 准确度100%	[29]
鉴别牛肉中掺入的马肉	700~1 700	PCA	准确度79%	[45]
检测牛肉糜中掺入的马肉	480~1 003	LDA	$R^2=0.93$	[46]
区分鸡肉、牛肉、羊肉、猪肉脂肪	270~1 900	PCA, PLSDA	$R^2=0.99$	[43]
区分鸡肉、猪肉、火鸡肉、羊肉、牛肉和马肉	500~1 800	PCA, LDA, KNN	平均误差10%~12%	[50]
检测牛肉汉堡中掺入的内脏	900~1 800	PLSDA, SIMCA	$R^2=0.85$, RMSEP=3.8%	[47]
鉴别牛、绵羊、山羊、猪、水牛、鱼、鸡等动物的脂肪及肉制成的香肠	200~2 000	PCA	$R^2=0.97$	[44]
鉴别牛肉、羊肉和鹿肉	313~1 895	PLSDA, SVM	PLSDA模型准确度80%	[1]
区分草饲牛肉和粮饲牛肉	400~2 300	PLS-DA	准确度83%~96%	[3]
定性识别鸭肉、羊肉、猪肉	157~3 645	PCA	准确度100%	[48]
鉴别大西洋鲑鱼中掺入的虹鳟鱼	500~2 000	PLSR	$R^2=0.87$	[51]
鉴别鱼肉品种及新鲜度	200~2 000	PCA	准确度99.29%	[52]

注: LDA. 线性判别分析 (linear discrimination analysis); KNN. k -最近邻算法 (k -nearest neighbor); SVM. 支持向量机 (support vector machine); PLSR. 偏最小二乘回归 (partial least squares regression); R^2 . 线性回归系数; RMSEP. 预测均方根误差 (root mean square error of prediction)。

4 结 语

尽管拉曼光谱技术有许多优点,但仍存在一些问题:1)由于拉曼光谱不具备分离技术,导致它对于一些非常复杂样品的测定存在局限性。检测过程中,由于无需对样品进行预处理,有可能会造成各成分相互作用和干扰,将会导致灵敏度降低。另外,一些食品表面在可见光的激发下会产生较强荧光,会对检测过程造成干扰,影响灵敏度。今后需要进一步对SERS的检测方法和表征方法进行探索,还应考虑与多种技术相结合,如拉曼光谱与近红外、中红外等光谱法相互结合,相互补充,提高检测灵敏度。通过数学算法、提高信噪比、样品预处理等方法提高拉曼光谱检测的灵敏度也是未来研究的重点。2)虽然一些研究也建立了一些模型及数据库,但目前国内很多实验室都依赖进口仪器及对应的数据库,实验所得图谱一般需要具有专业知识的人员通过大量数据分析才能对样品进行有效检测,在易用性、准确性和效率方面都存在严重不足,无法满足实际检测需要。因此,需要针对不同应用场景建立数据库,以实现肉品品质的快速分析预测,实时调控。可针对拉曼光谱复杂数据开发数据集成分析软件、图像处理系统和建模方法,实现肉制品掺假的快速、准确检测。3)目前拉曼光谱仪器仍以高精密度、价格昂贵的实验仪器为主,难以适应肉类行业的发展。今后的研究重点应向便携式、小型化方向发展,还应开发具有针对性且成本较低、与其他分离、检测设备联用的在线检测设备,加快拉曼光谱技术在肉品领域的应用和推广。

参考文献:

- [1] ROBERT C, FRASER-MILLER S J, JESSEP W T, et al. Rapid discrimination of intact beef, venison and lamb meat using Raman spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2021, 343(5): 128441. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128441.
- [2] DOWNEY G. Advances in food authenticity testing[M]. Cambridge: Elsevier Science and Technology, 2016. DOI:10.1016/C2014-0-01962-4.
- [3] LOGAN B G, HOPKINS D L, SCHMIDTKE L M, et al. Authenticating common Australian beef production systems using Raman spectroscopy[J]. Food Control, 2021, 121(9): 107652. DOI:10.1016/j.foodcont.2020.107652.
- [4] BUMBRAH G S, SHARMA R M. Raman spectroscopy: basic principle, instrumentation and selected applications for the characterization of drugs of abuse[J]. Egyptian Journal of Forensic Sciences, 2016, 6(3): 209-215. DOI:10.1016/j.ejfs.2015.06.001.
- [5] PUNCOCHOVA K, VUKOSAVLJEVIC B, HANUS J, et al. Non-invasive insight into the release mechanisms of a poorly soluble drug from amorphous solid dispersions by confocal Raman microscopy[J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2016, 101: 119-125. DOI:10.1016/j.ejpb.2016.02.001.
- [6] WESTLEY C, FISK H, XU Y, et al. Real-time monitoring of enzyme-catalysed reactions using deep UV resonance Raman spectroscopy[J]. Chemistry-A European Journal, 2017, 23(29): 6983-6987. DOI:10.1002/chem.201701388.
- [7] SUN Zhenli, DUAN Fengkui, HE Kebin, et al. Physicochemical analysis of individual atmospheric fine particles based on effective surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 75: 388-395. DOI:10.1016/j.jes.2018.06.006.
- [8] XU Yi, ZHONG Peng, JIANG Aimin, et al. Raman spectroscopy coupled with chemometrics for food authentication: a review[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2020, 131: 116017. DOI:10.1016/j.trac.2020.116017.
- [9] MCNAY G, EUSTACE D, SMITH W E, et al. Surface-enhanced Raman scattering (SERS) and surface-enhanced resonance Raman scattering (SERRS): a review of applications[J]. Applied Spectroscopy, 2011, 65(8): 825-837. DOI:10.1366/11-06365.
- [10] 李可, 闫路辉, 赵颖颖, 等. 拉曼光谱技术在肉品加工与品质控制中的研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 298-304. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181130-358.
- [11] NAFIE L A. Recent advances in linear and nonlinear Raman spectroscopy. Part VIII[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2014, 45(11/12): 1326-1346. DOI:10.1002/jrs.4221.
- [12] YANG Danting, YING Yibin. Applications of Raman spectroscopy in agricultural products and food analysis: a review[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2011, 46(7): 539-560. DOI:10.1080/05704928.2011.593216.
- [13] JIANG Yingfen, SUN Dawen, PU Hongbin, et al. Surface enhanced Raman spectroscopy (SERS): a novel reliable technique for rapid detection of common harmful chemical residues[J]. Trends in Food Science and Technology, 2018, 75: 10-22. DOI:10.1016/j.tifs.2018.02.020.
- [14] PANG S, YANG Tianxi, HE Lili. Review of surface enhanced Raman spectroscopic (SERS) detection of synthetic chemical pesticides[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2016, 85: 73-82. DOI:10.1016/j.trac.2016.06.017.
- [15] 张同刚, 罗瑞明, 李亚蕾, 等. 基于拉曼光谱法测定冷鲜牛肉中肌红蛋白相对含量[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 210-214. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201802033.
- [16] 卢明子. 拉曼光谱应用于高铁血红蛋白检测的探索研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013: 5-15. DOI:10.7666/d.Y2425821.
- [17] HERRERO A M. Raman spectroscopy a promising technique for quality assessment of meat and fish: a review[J]. Food Chemistry, 2008, 107(4): 1642-1651. DOI:10.1016/j.foodchem.2007.10.014.
- [18] BERHE D T, ESKILDSEN C E, LAMETSCH R, et al. Prediction of total fatty acid parameters and individual fatty acids in pork backfat

- using Raman spectroscopy and chemometrics: understanding the cage of covariance between highly correlated fat parameters[J]. Meat Science, 2016, 111: 18-26. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.08.009.
- [19] FOWLER S M, PONNAMPALAM E N, SCHMIDT H, et al. Prediction of intramuscular fat content and major fatty acid groups of lamb *M. longissimus lumborum* using Raman spectroscopy[J]. Meat Science, 2015, 110: 70-75. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.06.016.
- [20] PEDERSEN D K, MOREL S, ANDERSEN H J, et al. Early prediction of water-holding capacity in meat by multivariate vibrational spectroscopy[J]. Meat Science, 2003, 65: 581-592. DOI:10.1016/S0309-1740(02)00251-6.
- [21] TUMA R. Raman spectroscopy of proteins: from peptides to large assemblies[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2005, 36: 307-319. DOI:10.1002/jrs.1323.
- [22] SOWOINICH K, SCHMIDT H, MAIWALD M, et al. Application of diode-laser Raman spectroscopy for *in situ* investigation of meat spoilage[J]. Food Bioprocess Technology, 2010, 3: 878-882. DOI:10.1007/s11947-010-0360-2.
- [23] ORTEA I, O'CONNOR G T, MAQUET A. Review on proteomics for food authentication[J]. Journal of Proteomics, 2016, 147(9): 212-225. DOI:10.1016/j.jprot.2016.06.033.
- [24] MOTOYAMA M, ANDO M, SASAKI K, et al. Differentiation of animal fats from different origins: use of polymorphic features detected by Raman spectroscopy[J]. Applied Spectroscopy, 2010, 64(11): 1244-1250. DOI:10.1366/000370210793335070.
- [25] MACEDO-SILVA A, SHIMOKOMAKI M, VAZ A J, et al. Textured soy protein quantification in commercial hamburger[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2001, 14: 469-478. DOI:10.1006/jfca.2001.1014.
- [26] FLORES-MUNGUÍA M E, BERMUDEZ-ALMADA M C, VAZQUEZMORENO L. A research note: detection of adulteration in processed traditional meat products[J]. Journal of Muscle Foods, 2000, 11: 319-325. DOI:10.1111/j.1745-4573.2000.tb00435.x.
- [27] AYAZ Y, AYAZ N D, EROL I. Detection of species in meat and meat products using enzyme-linked immunosorbent assay[J]. Muscle Foods, 2006, 17: 214-220. DOI:10.1111/j.1745-4573.2006.00046.x.
- [28] GREMAUD G, KARLEN S, HULLIGER K. Analytical methods for the authentication of meat and meat products: recent developments[J]. Mitteilungen aus Lebensmitteluntersuchung und Hygiene, 2002, 93: 481-502. DOI:10.1007/s11107-006-0029-y.
- [29] BOYACI I 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.
- [30] 何鸿举, 王魏, 马汉军, 等. 近红外光谱技术在肉品掺假检测方面的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 345-350; 356. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.03.057.
- [31] 高敬, 魏迪, 张葵荣, 等. 常见肉类鉴别技术研究进展[J]. 食品科学, 2014, 35(11): 356-360. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201411068.
- [32] 王靖, 李璐, 王佳奕, 等. 电子鼻结合气相色谱-质谱法对宁夏小尾寒羊肉中鸭肉掺假的快速检测[J]. 食品科学, 2017, 38(20): 222-228. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201720032.
- [33] HOU Bo, MENG Xianrong, ZHANG Liyuan, et al. Development of a sensitive and specific multiplex PCR method for the simultaneous detection of chicken, duck and goose DNA in meat products[J]. Meat Science, 2015, 101: 90-94. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.11.007.
- [34] HELLBERG R S, HERNANDEZ B C, HERNANDEZ E L. Identification of meat and poultry species in food products using DNA barcoding[J]. Food Control, 2017, 80: 23-28. DOI:10.1016/j.foodcont.2017.04.025.
- [35] YANG Ling, WU Ting, LIU Yun, et al. Rapid identification of pork adulterated in the beef and mutton by infrared spectroscopy[J]. Journal of Spectroscopy, 2018, 2018: 2413874. DOI:10.1155/2018/2413874.
- [36] KIM G D, SEO J K, YUM H W, et al. Protein markers for discrimination of meat species in raw beef, pork and poultry and their mixtures[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 163-170. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.08.100.
- [37] MONTOWSKA M, FORMAL E. Label-free quantification of meat proteins for evaluation of species composition of processed meat products[J]. Food Chemistry, 2017, 237: 1092-1100. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.06.059.
- [38] PAVLIDIS D E. A volatilomics approach for off-line discrimination of minced beef and pork meat and their admixture using HS-SPME GC/MS in tandem with multivariate data analysis[J]. Meat Science, 2019, 151: 43-53. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.01.003.
- [39] SIMONE S, ANDREA A, ALBERTO B, et al. Prediction of meat quality traits in the abattoir using portable and hand-held near-infrared spectrometers[J]. Meat Science, 2020, 161: 108017. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.108017.
- [40] AÏT-KADDOUR A, LOUDIYI M, FERLAY A, et al. Performance of fluorescence spectroscopy for beef meat authentication: effect of excitation mode and discriminant algorithms[J]. Meat Science, 2018, 137: 58-66. DOI:10.1016/j.meatsci.2017.11.002.
- [41] ROPODI A I, PANAGOU E Z, NYCHAS GEORGE-JOHN E. Multispectral imaging (MSI): a promising method for the detection of minced beef adulteration with horsemeat[J]. Food Control, 2017, 73: 57-63. DOI:10.1016/j.foodcont.2016.05.048.
- [42] JIN Huaizhou, LU Qipeng, CHEN Xingdan, et al. The use of Raman spectroscopy in food processes: a review[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2015, 51(1): 12-22. DOI:10.1080/05704928.2015.1087404.
- [43] BEATTIE J R, BELL S E J, BORGGAARD C, et al. Classification of adipose tissue species using Raman spectroscopy[J]. Lipids, 2007, 42: 679-685. DOI:10.1007/s11745-007-3059-z.
- [44] BOYACI I 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.
- [45] EBRAHIM H A, SOWOINICH K, KRONFELDT H D. Raman spectroscopic differentiation of beef and horse meat using a 671 nm microsystem diode laser[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2013, 113: 159-163. DOI:10.1007/s00340-013-5677-x.
- [46] ZAJĄC A, HANUZA J, DYMIŃSKA L. Raman spectroscopy in determination of horse meat content in the mixture with other meats[J]. Food Chemistry, 2014, 156: 333-338. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.02.002.
- [47] ZHAO Ming, DOWNEY G, O'DONNELL C P. Dispersive Raman spectroscopy and multivariate data analysis to detect offal adulteration of thawed beef burgers[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63: 1433-1441. DOI:10.1021/jf5041959.
- [48] 徐记各, 韩莹, 忻欣, 等. 广域照射拉曼光谱技术结合簇类独立软模式法快速鉴别原料肉及掺假肉[J]. 肉类研究, 2020, 34(5): 70-75. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191211-303.
- [49] ELLIS D I, BROADHURST D, CLARKE S J, et al. Rapid identification of closely related muscle foods by vibrational spectroscopy and machine learning[J]. Analyst, 2005, 130: 1648-1654. DOI:10.1039/b511484e.
- [50] DE BIASIO M, STAMPFER P, LEITNER R, et al. Micro-Raman spectroscopy for meat type detection[C]//Proceedings Volume 9482, Next-Generation Spectroscopic Technologies VIII, 2015, Baltimore, Maryland, United States. DOI:10.1117/12.2176321.
- [51] CHEN Zeling, WU Ting, XIANG Cheng, et al. Rapid identification of rainbow trout adulteration in atlantic salmon by Raman spectroscopy combined with machine learning[J]. Molecules, 2019, 24: 52851. DOI:10.3390/molecules24152851.
- [52] VELOĞLU H M, TEMİZ H T, BOYACI I H. Differentiation of fresh and frozen thawed fish samples using Raman spectroscopy coupled with chemometric analysis[J]. Food Chemistry, 2015, 172: 283-290. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.09.073.