

近红外光谱技术结合化学计量学用于畜禽肉制品品质分析的研究进展

柴迎慧, 俞 玥, 宋嘉慧, 李占明*

(江苏科技大学粮食学院, 镇江 212100)

摘 要: 肉类作为人体摄入蛋白质的主要来源, 随着人们生活水平的提高和对营养健康的追求, 其需求量不断增大。与此同时, 肉制品新鲜度、掺杂掺假等肉制品品质领域的质量问题较为多发。为改善传统肉类检测方法耗时费力的现状, 肉品质量的检测方法也逐渐趋于多样化。近红外光谱技术目前已广泛应用于包括生物、医药、食品在内的诸多领域。近红外光谱技术与化学计量法结合可对样品进行定性和定量分析, 具有快速、无损、高效的优势, 适用于肉品及肉制品现场实时监测。在前期研究的基础上, 本文综述了近年来近红外光谱技术在畜禽肉制品新鲜度、品种鉴别与掺假分析、产地溯源等方面的研究进展, 以期对肉制品品质分析及质量控制提供理论指导。

关键词: 近红外光谱; 肉制品; 无损检测; 掺假; 溯源

Research progress on the application of near-infrared spectroscopy combined with chemometrics to quality analysis of livestock and poultry meat products

CHAI Ying-Hui, YU Yue, SONG Jia-Hui, LI Zhan-Ming*

(School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

ABSTRACT: Meat is the main source of human intake of protein, with the improvement of people's living standard and the pursuit of nutrition and health, its demand is increasing. Meanwhile, there are many problems in the field of meat products quality such as freshness and adulteration of meat products. In order to improve the time-consuming and laborious properties of traditional meat detection methods, the detection methods of meat quality are gradually becoming more diversified. Near-infrared spectroscopy has been widely applied in many fields including biology, medicine, and food industry. The combination of near-infrared spectroscopy and chemometrics can be used for qualitative and quantitative analysis of samples, which presented the advantages of fast, non-destructive and high-efficiency, and was suitable for on-site real-time monitoring of meat and meat products. On the basis of previous research, this paper summarized the research progress of near-infrared spectroscopy in recent years in freshness, variety identification and adulteration analysis, origin traceability of livestock and poultry meat products, in order to provide theoretical guidance for meat product quality analysis and quality control.

基金项目: 国家自然科学基金项目(31902204)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31902204)

***通信作者:** 李占明, 讲师, 主要研究方向为农产品品质分析及调控。E-mail: lizhanming@just.edu.cn

***Corresponding author:** LI Zhan-Ming, Lecturer, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China. E-mail: lizhanming@just.edu.cn

KEY WORDS: near-infrared spectroscopy; meat products; non-destructive testing; adulteration; traceability

0 引言

近年来, 市场上频发“瘦肉精”“僵尸肉”“抗生素肉”肉品掺杂掺假、添加剂的超量超范围使用、兽药残留等问题, 增加了肉类食品的食用安全风险^[1]。因此, 肉类产品安全品质的快速高效检测方法成为了近年来研究热点^[2]。目前广泛采用的肉质检测方法包括感官评价方法、理化分析和微生物检测法等^[3-4], 这些方法大多操作复杂、耗时久、成本高, 不能满足快速检测的需求, 无法实现实时在线监管^[5-6]。近年来, 以液相色谱法^[7-9]、核磁共振法^[10-11]、电子鼻^[1,12-13]、电子舌^[14-16]等为代表的肉类品质的检测方法取得了一些进展。但这些方法前处理烦琐、需要大型仪器设备等, 限制了其广泛应用及现场实时监测。

近红外光谱技术是光学信息检测技术中应用最广泛的检测方法, 与化学计量法结合可对样品进行定性和定量分析, 具有无需预处理、无损、快速等优势^[17], 适用于肉制品的现场实时监测^[18]。国内外学者利用近红外光谱技术对肉品新鲜度、风味等进行了研究, 证实相关研究有助于实现肉品新鲜度的实时分析, 以及肉制品质量风味的快速准确评估^[19-20], 由于近红外光谱技术获取的数据量大并且复杂, 因此可以利用相应的化学计量学方法提取相关指标的特征信息, 并对肉品进行定性鉴别及成分的定量分析。化学计量学常见的方法有偏最小二乘法(partial least squares, PLS)、主成分分析(principal component analysis, PCA)、支持向量机(support vector machine, SVM)等^[21], 这些方法常用于食品质量、掺杂掺假和产地溯源等方面的测定, 以监控食品的质量与安全^[22-23]。研究证实近红外光谱与化学计量学结合可以有效地提升模型的判别精度^[24]。

本文总结概括了近红外光谱技术及其与化学计量学结合在肉制品新鲜度、掺假判别、产地溯源分析等方面的研究进展, 并进行了应用前景展望, 以期对肉制品品质控制方面的后续研究提供一定的理论指导。

1 新鲜度分析

1.1 畜肉新鲜度

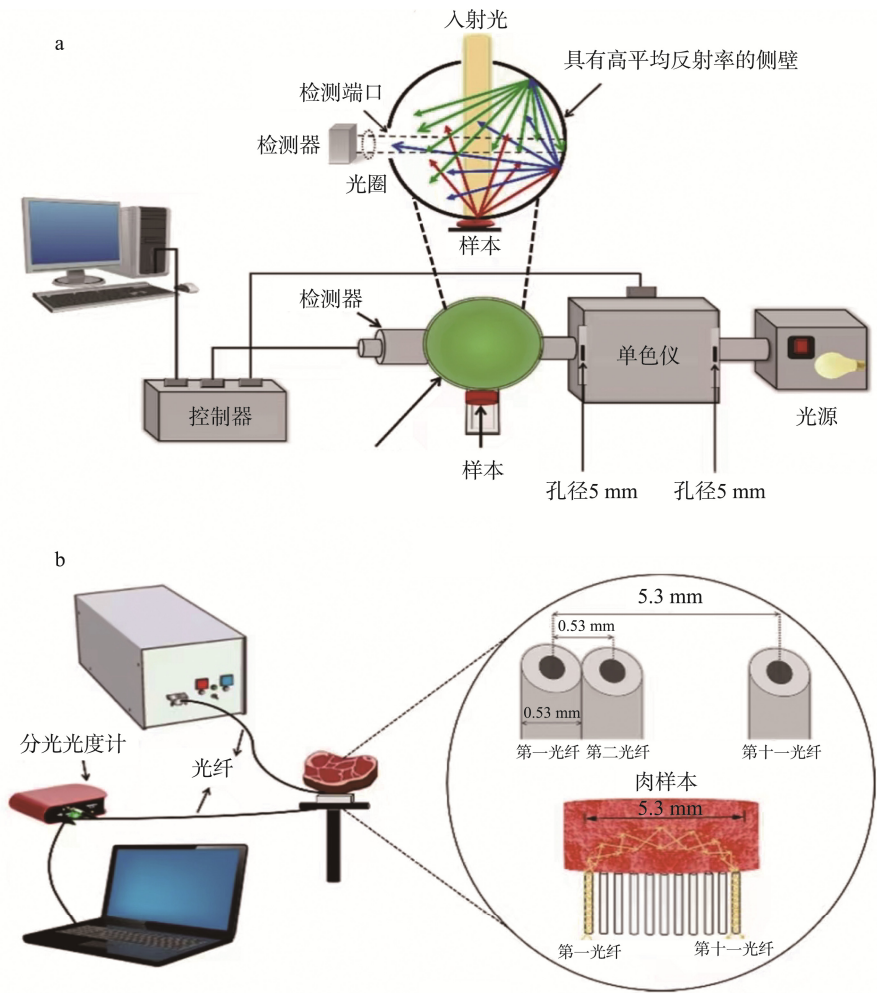
肉品的含水量、挥发性盐基氮(total volatile base nitrogen, TVB-N)、pH、嫩度、颜色以及微生物指标均可用于对肉品新鲜度的预测, 实现肉品新鲜度的实时分析。QU 等^[25]采用近红外光谱与多传感器信息融合(multi-sensor

information fusion, MSIF)技术构建猪肉新鲜度的预测模型, 结果显示 TVB-N 含量的预测相关系数为 0.8618, pH 的预测集相关系数为 0.9379, 可实现猪肉新鲜度的快速无损检测。相似地, 利用 MSIF 将近红外光谱、pH、色差的数据信息进行融合预测猪肉泥中 TVB-N 的含量, 结果显示该模型对猪肉新鲜度的预测准确率较高^[26]。此外, 熊来怡^[27]、熊来怡等^[28]使用近红外光谱结合 PLS 建立两种储存温度下的猪肉 TVB-N 含量、pH 和细菌菌落总数的定量分析模型, 新鲜度判别准确率均为 90%以上, 可较准确地对储藏期间猪肉的新鲜度进行实时监测。除此之外, 偏最小二乘回归(partial least squares regression, PLSR)^[29]和支持向量回归(support vector regression, SVR)^[30], 以及随机森林回归(random forest regression, RFR)算法^[6], 用于肉制品新鲜度分析的研究亦有报道, 预测效果良好。张珏^[6]采集不同新鲜度羊肉的近红外光谱信息, 探究羊肉 TVB-N 的图像和光谱特征, 并与关键新鲜度指标融合特征建立新鲜度预测模型, 准确率高达 100%。LENG 等^[29]应用 PLSR 首次建立了近红外漫反射光谱定量模型, 来预测牛肉和猪肉 TVB-N 含量, 结果表明, 基于原始光谱的 PLSR 模型具有良好的预测性能, 相关系数值为 0.9366, 均方根误差较低。

需要注意的是, 光谱预处理方式和建模方法的选择是提高模型预测准确度的关键。近红外光谱与 PCA 的结合应用在评估肉质新鲜度方面具有巨大的潜力(图 1)^[31]。OUYANG 等^[32]比较了各种预处理和变量选择算法, 结果显示, 二阶导数作为预处理技术和随机蛙跳偏最小二乘法(algorithm random frog partial least squares, PF-PLS)对冷冻猪肉样品中 TVB-N 含量的预测模型效果较优, 预测集独立样品的相关系数为 0.9669。通过目前研究结果发现, 在快速识别肉质新鲜度方面近红外光谱技术具有相当大的优势(表 1)。

1.2 禽肉新鲜度

禽肉新鲜度的预测指标也多集中于 TVB-N、pH 和硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)。QIAO 等^[33]将光谱数据与实测 TVB-N 含量采用 PLSR 构建定量校准模型, 并对最佳模型波段和光谱预处理方法进行了研究, 证实全光谱的预测模型可用于对鸭肉新鲜度的评价。相似地, 杨勇等^[34]采用 PLSR 建立鹅肉新鲜度的定量预测数学模型。QIAO 等^[35]采集 450~950 nm 波长范围内的光谱数据采用标定维护法改进模型, RMSEP 为 0.930, 该方法对不同品种样品预测模型的修正提供了参考依据。



注: a 为带有积分球的实验装置示意图, 以及积分球和光纤阵列中发生的多重反射效应的近距离视图; b 显示与肉样品接触的近距离视图, 以及由第 1 根光纤发射并由第 11 根光纤收集的光子的香蕉形轨迹和光纤距离示意图。

图 1 猪肉新鲜度检测的实验流程^[31]

Fig.1 Experimental procedures for the detection of pork freshness^[31]

表 1 近红外光谱技术对畜肉新鲜度的检测
Table 1 Detection of meat freshness by near-infrared spectroscopy

肉品	指标	光谱范围/nm	建模方法	预测精度	参考文献
猪肉	TVB-N	1000~2500	PLS	$R^2p=0.8618$, RMSEP=3.910	[25]
	pH			$R^2p=0.9379$, RMSEP=0.1046	
猪肉	TVB-N	833~2500	RBF	100%	[27~28]
	pH	833~2500	MLP	100%	
羊肉	TVB-N	935~2539	PLSR	100%	[6]
牛肉	TVB-N	1852~2500	PLS	$R^2c=0.9366$, RMSEP=3.15	[29]
猪肉					
猪肉	TVB-N	899~1725	PF-PLS	$R^2c=0.9669$	[32]

注: 径向基函数人工神经网络(radial basis function algorithms, RBF); 多层感知器人工神经网络(multilayer perceptrons algorithms, MLP); 预测集决定系数(correlation coefficients of prediction, Rp); 校正集决定系数(correlation coefficients of calibration, Rc); 交叉验证决定系数(correlation coefficient of cross-validation, Rcv); 预测均方根误差(root mean square error of prediction, RMSEP)。

近红外光谱技术检测肉品脂肪的氧化程度也可用于鉴别禽肉的新鲜度(表 2)。王魏^[36]选取不同储藏时间(0~4 ℃、0~7 d)的鸡肉样品采取在 900~1700 nm 光谱范围内鸡肉 TBA 的光谱图像,运用回归系数法(regression coefficient, RC)筛选最优波长,预处理方法采用高斯滤波平滑(gaussian filter smoothing, GFS),并采用 PLSR 建立鸡肉新鲜度预测模型,预测集相关系数为 0.945,预测效果较好。同时,对于不同品种的肉品需要不断维护改善近红外光谱模型,以提高该模型的适用性和精度。

综上,近红外光谱技术结合化学计量法可快速准确评估肉品的新鲜度。对于肉品新鲜度预测模型的建立,预处理方法和建模方法的选择也对预测结果的准确率有着至关重要的影响,在针对不同肉品以及使用不同的算法构建模型时,应予以优化后使用。

2 肉制品掺假鉴别

市场上频发的以次充好、以较为廉价的鸡肉、鸭肉以及非肉成分冒充价格昂贵的牛、羊肉,甚至市场上储存期远超货架期的“僵尸肉”的出现,使得肉品的质量安全问题备受关注^[37]。如何实现快速的肉质鉴别及掺假分析成为当前的研究热点。近红外光谱技术以其仪器小型化、无损、快速等优点,在肉制品种类鉴别及掺假分析中得到较多应用。

2.1 畜肉掺假判别

近年来,利用近红外光谱技术对畜肉的掺杂掺假判别的相关研究较多。王昱陆^[38]对 235 个不同品种的羊肉样品采集其近红外光谱,采用线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)建立猪、羊肉混合样品的判别模型,其判别准确率可达到 100%。相似地,YANG 等^[39]的研究证实偏最小二乘判别分析(partial least squares discrimination analysis, PLS-DA)可作为一种有效的方法来识别猪肉、牛肉和羊肉样品。REIS^[40]采用 PLS-DA 和双重交叉验证法(double cross-validation, DCV)分别分析光谱数据,可区分猪肉、牛肉、羊肉和山羊肉的不同储存状态(冷藏、冷冻和解冻后),准确率均达到了 93%。ZHAO 等^[41]利用近红外光谱成像技术探究新鲜碎牛肉中变质牛肉掺假物的分布,入

侵杂草优化算法(invasive weed optimization, IWO)结合最小二乘支持向量机(least squares support vector machine, LS-SVM)建立预测模型,预测集决定系数达到 0.97。而且,近红外光谱技术除了可准确检测出是否存在肉品掺假,还可以对掺假的含量进行准确评估,MABOOD 等^[42]构建了 PLSR 模型来对其他肉类中混入的猪肉含量进行定量分析,结果显示相关系数为 0.9774,证明了近红外光谱技术结合多变量分析预测肉类掺杂的应用潜力。

近红外光谱技术除鉴别以次充好的掺假肉外,还可检测添加在肉品中的非肉成分,如水、卡拉胶、亚硝酸盐等。RADY 等^[43]评估了在碎牛肉和猪肉中潜在的基于植物和动物的掺杂物,结果显示纯样品或掺假样品的判别率高达 100%。JIANG 等^[44]选取 4 种大豆蛋白产品: ArconTU-172 浓缩大豆蛋白、烘烤大豆粉、Pro-FamH200 水解大豆蛋白和 TVP U-218 纹理植物蛋白,与碎牛肉(含量为 0%~100%)混合来制备样品,研究结果表明近红外光谱技术可用于预测碎牛肉产品中添加的不同大豆产品的含量。

近红外光谱技术对于畜肉品种的鉴别也有不少相关的研究(表 3)。有研究利用主成分判别分析(principal component analysis discrimination analysis, PCA-DA)建立鉴别模型的判别准确率达到 93.6%^[46]。ORTIZ 等^[45]采集了 12 个欧洲本地猪品种的胸腰长肌样品的光谱数据,采用 PCA 和 PLSR 建立校正模型,对其脂肪含量进行了定量测定,最高的测定系数为 0.89,最低的外测均方根误差为 0.62。

2.2 禽肉种类判别

应用近红外光谱技术对禽肉类进行种类判别方面的研究,主要集中在品种的分析鉴别上。沈啸^[47]采用 SIMCA 进行 PCA 并构建了不同品种鸡肉鉴别模型实现定性鉴别,对品种判别模型预测准确率为 78.87%~87.32%。PARASTAR 等^[48]开发了随机子空间判别集成(random subspace discriminant ensemble, RSDE)分类方法,并利用近红外光谱检测鸡肉的真实性,准确率可达 95%以上。相似地,龚艳^[49]也研究了近红外光谱技术结合化学计量法对不同品种肉鸡的定性判别,对不同品种鸡胸肉的判别准确率可达到 90%以上。

表 2 近红外光谱技术对禽肉新鲜度的检测
Table 2 Detection of freshness of poultry meat by near-infrared spectroscopy

肉品	指标	光谱范围/nm	建模方法	预测精度	参考文献
鸭肉	TVB-N	450~950	PLSR	R ² _p =0.859, RMSEP=1.060	[33]
	TVB-N			R ² _c =0.727, R ² _p =0.976, RMSECV=3.666	
鹅肉	pH	950~1650	PLS	R ² _c =0.991, R ² _p =0.705, RMSECV=0.028	[34]
鸡肉	TBA	900~1700	PLSR	R ² _c =0.945, RMSEP=0.053	[36]

注: 交叉验证均方根误差(root mean square error of cross-validation, RMSECV)。

表 3 近红外光谱技术检测肉品掺杂掺假
Table 3 Meat adulteration analysis using near-infrared spectroscopy

肉品掺假指标	光谱范围/nm	建模方法	预测精度	参考文献
猪、羊混合样本	400~430	LDA	100%	[38]
猪、牛、羊肉	—	PLS-DA	$R^2c=0.99$, RMSEP=0.08	[39]
		SVM	$R^2c=0.97$, RMSEP=0.24	
猪、牛、羊肉和山羊肉	350~2500	PLS-DA	93%	[40]
		DCV	93%	
掺同源变质牛肉	496~1000	LS-SVM	$R^2c=0.97$ $R^2p=0.95$, RMSEC=4.74%, RMSEP=5.67%	[41]
其他肉中掺猪肉	1000~2500	PLSR	$R^2p=0.9774$, RMSECV=1.08%, RMSEP=1.84%	[42]
猪、牛肉掺动植物的蛋白 质掺杂物	400~1000、 900~1700	PLSR	60%~100%, $R^2p=0.78\sim0.86$, RPD=1.19~1.98	[43]
牛肉中掺大豆蛋白产品	1000~2500	PLSR 和 LOOCV	83.33% $R^2cv>0.98$	[44]
不同猪品种(脂肪含量)	1000~2500	PLSR	$R^2cv=0.89$, RMSECV=0.62	[45]

注：—：文献未提及；校正均方根误差(root mean square error of calibration, RMSEC)。

2.3 畜禽肉相互掺假的判别分析

近红外光谱技术对于畜肉和禽肉相互掺杂判别方面的研究也有较多报道。近红外光谱技术可有效鉴别不同种类的肉品，用于快速评估肉类真伪。ZHENG 等^[50]采用参考光谱的多重平均值和预测的相对空间分布系数来降低光谱的噪声，实现了羊肉糜中的肉类掺假鉴别。SILVA 等^[51]探究了肉类样品在二元混合物(鸡肉/牛肉；牛肉/猪肉；猪肉/鸡肉)和三元混合物(牛肉/鸡肉/猪肉)中掺杂 0~100%的范围，便携式近红外光谱仪在牛肉定量方面性能良好。由以上研究可知，通过近红外光谱技术结合化学计量法建立肉品种类定性判别及掺杂量定量分析模型，可以在检测肉类掺杂掺假领域发挥重要作用。

3 产地溯源分析

产地溯源是食品安全溯源体系的重要组成部分。近年来，人为故意更改肉品的产地信息、以次充好的现象频繁出现，严重扰乱了市场秩序。近红外光谱技术因其快速、无损和操作简单的优点逐渐应用于各种肉品产地溯源方面的研究之中。

目前，应用近红外光谱技术进行产地溯源判别的研究主要集中于牛、羊肉等畜肉产品。黄珏等^[16]以澳大利亚、新西兰和加拿大进口安格斯牛肉为研究对象，利用 PCA 和典则判别分析(canonical discriminant analysis, CDA)建立进口牛肉产地溯源的定性判别模型，判别正确率均为 100%。刘晓晔^[52]在 1000~1799 nm 波长范围对来自内蒙古和新疆的普通公牛肉和淘汰母牛肉肉糜进行扫描，测定其脂肪、蛋白质、水分、剪切力的光谱图像，结合 PLS-DA 建立定性鉴别分析模型，结果显示其预测准确率均为 100%。杨旭宁等^[53]采集 120 个源于 3 个不同产地的羊肉样品在 900~1700 nm 光谱范围内的光谱数据，建立最佳判别模型，判别准确率为 85%。

史岩等^[54]在 780~2500 nm 波长范围内，对源于 5 个不同产地的 100 个鸡肉样本进行扫描采集近红外光谱数据，并进行 PCA 和聚类分析(cluster analysis, CA)构建鸡肉产地的定性判别模型，判别准确率为 100%。相似地，孙潇等^[55]采集来自不同产地的经相同处理后的独立鸡肉样本的近红外光谱进行 PCA 和 CA 研究，对鸡肉产地模型进行验证，识别正确率可达 90%~95%。由表 4 的研究结果证实，近红外光谱技术对加工鸡肉制品的产地溯源分析具有可行性。

表 4 近红外光谱技术用于肉品产地溯源分析
Table 4 Near-infrared spectroscopy for traceability analysis of meat products

肉品	光谱范围/nm	建模方法	预测精度/%	参考文献
不同产地牛肉(澳大利亚、新西兰和加拿大进口安格斯牛肉)	833~2500	PCA	100	[16]
		CDA		
不同产地牛肉(新疆和内蒙的普通公牛肉和淘汰母牛肉)	1000~1799	PLS-DA	100	[52]

表 4(续)

肉品	光谱范围/nm	建模方法	预测精度/%	参考文献
不同产地羊肉	900~1700	KNN	85	[53]
		PLS-DA		
不同产地鸡肉(辽宁大连、河北遵化、潍坊坊子、潍坊昌邑、潍坊诸城)	780~2500	PCA	100	[54]
		CA	100	
不同产地鸡肉(昌邑新昌、牟平仙坛、莱阳春雪、亚太中慧)	1429~2500	PCA	90~95	[55]
		CA	90~95	

注: K 最近邻分类算法(K-nearest neighbor, KNN)。

4 结束语

利用近红外光谱技术结合化学计量法, 建立肉品中关键成分含量的定量或定性分析模型, 可对肉品的新鲜度、品种掺假鉴别及溯源分析等进行快速精确的评价, 但目前有关研究面临着建模难度较大、配套设施缺乏完善等问题, 尤其是数据预处理和建模方法的选取仍需深入研究。针对目前的研究结果, 还存在几个有待完善的地方:

(1)选取恰当的建模指标是构建有效模型的前提条件。不同的肉品在检测指标上存在特征差异, 需要大量的代表性样品数据, 扩大样品的采集范围, 来提高模型的预测准确度和通用性;

(2)需要深入探究选择最适特征光谱和最佳数据预处理方法以及化学计量法的应用, 并不断优化改善预测模型, 提高预测模型的准确率;

(3)建模样品的化学指标测定较为烦琐, 且结合化学计量法建立模型时, 对专业知识要求较高, 因此, 探究如何降低近红外光谱的应用难度和提高检测过程的自动化水平是未来研究的重点之一;

(4)尽管许多研究表明, 近红外光谱技术在检测肉制品品质及鉴别肉制品真伪方面具有优势, 但目前近红外光谱分析技术大多局限于实验室研究, 大多数肉类及肉制品企业仍然习惯于采用传统的检测方法, 相关便携式设备的开发未得到足够的重视。

此外, 肉制品的安全检测以国家标准规定的检测方法为准, 而近红外快速检测技术尚未列入相关行业标准, 限制了其应用。随着现代仪器分析技术的发展, 结合化学计量法和各学科领域的相互融合, 通过近红外技术的不断创新完善, 以及检测效率的提高, 近红外光谱分析技术有望在肉质分析中得到更广泛的普及, 从而提高肉制品的质量和安全性。

参考文献

[1] JIA WS, LIANG G, WANG YL, *et al.* Electronic noses as a powerful tool for assessing meat quality: A mini review [J]. *Food Anal Methods*, 2018, 11(10): 2916–2924.

[2] 何鸿举, 朱亚东, 王慧, 等. 近红外光谱技术在生鲜禽肉质量检测中应

用的研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(21): 317–323.

HE HJ, ZHU YD, WANG H, *et al.* Research advance inapplication of near-infrared spectroscopy for quality detection in fresh poultry meat [J]. *Food Sci*, 2019, 40(21): 317–323.

[3] KHALED AY, PARRISH CA, ADEDEJI A, *et al.* Emerging nondestructive approaches for meat quality and safety evaluation-A review [J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2021, 20(4): 3438–3463.

[4] POPHIWA P, WEBB EC, FRYLINCK L. A review of factors affecting goat meat quality and mitigating strategies [J]. *Small Ruminant Res*, 2020, 183: 106035.

[5] KHULAL U, ZHAO J, HU W, *et al.* Intelligent evaluation of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in chicken meat by an improved multiple level data fusion model [J]. *Sensor Actuat B Chem*, 2017, 238: 337–345.

[6] 张珏. 基于光学信息检测技术的羊肉新鲜度快速检测与判别方法研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.

ZHANG J. Study on the rapid detection and discrimination of lamb freshness based on optical information detection technology [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.

[7] STACHNIUK A, SUMARA A, MONTOWSKA M, *et al.* Liquid chromatography-mass spectrometry bottom-up proteomic methods in animal species analysis of processed meat for food authentication and the detection of adulterations [J]. *Mass Spectrom Rev*, 2021, 40(1): 3–30.

[8] FORNAL E, MONTOWSKA M. Species-specific peptide-based liquid chromatography-mass spectrometry monitoring of three poultry species in processed meat products [J]. *Food Chem*, 2019, 283: 489–498.

[9] CAO M, ZHANG J, ZHANG R, *et al.* An untargeted and pseudotargeted metabolomic combination approach to identify differential markers to distinguish live from dead pork meat by liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *J Chromatogr A*, 2020, 1610: 460553.

[10] ANTEQUERA T, CABALLERO D, GRASSI S, *et al.* Evaluation of fresh meat quality by hyperspectral imaging (HSI), nuclear magnetic resonance (NMR) and magnetic resonance imaging (MRI): A review [J]. *Meat Sci*, 2021, 172: 108340.

[11] NAKASHIMA Y. Non-destructive quantification of lipid and water in fresh tuna meat by a single-sided nuclear magnetic resonance scanner [J]. *J Aquat Food Prod Technol*, 2019, 28(2): 241–252.

[12] YIN XY, LV YC, WEN RX, *et al.* Characterization of selected Harbin red sausages on the basis of their flavour profiles using HS-SPME-GC/MS combined with electronic nose and electronic tongue [J]. *Meat Sci*, 2021, 172: 108345.

[13] CHEN J, GU JH, ZHANG R, *et al.* Freshness evaluation of three kinds of

- meats based on the electronic nose [J]. *Sensors (Basel)*, 2019, 19(3): 605.
- [14] ZAUUU JLZ, GILLAY Z, KOVACS Z. Standardized extraction techniques for meat analysis with the electronic tongue: A case study of poultry and red meat adulteration [J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(2): 481.
- [15] SURANYI J, ZAUUU JLZ, FRIEDRICH L, *et al.* Electronic tongue as a correlative technique for modeling cattle meat quality and classification of breeds [J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2283.
- [16] 黄珏, 王正亮, 李慕雨, 等. 基于电子舌和近红外光谱技术的进口牛肉产地溯源[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(12): 254-260.
HUANG J, WANG ZL, LI MY, *et al.* Origin traceability of imported beef based on electronic tongue and NIR spectra [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(12): 254-260.
- [17] 王建伟, 叶升. 近红外光谱技术在食品成分检测中的研究进展[J]. *中国调味品*, 2021, 46(9): 171-175, 184.
WANG JW, YE S. Research progress on detection of food ingredients by near infrared spectroscopy [J]. *China Cond*, 2021, 46(9): 171-175, 184.
- [18] 莫嘉琪. 近红外光谱技术在食品微生物检测中的应用[J]. *现代食品*, 2021, (13): 140-142.
MO JQ. Application of near infrared spectroscopy technology in food microbial detection [J]. *Mod Food*, 2021, (13): 140-142.
- [19] WANG X. Near-infrared spectroscopy for food quality evaluation [M]. *Evaluat Technol Food Qual*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2019
- [20] SAVOIA S, ALBERA A, BRUGIAPAGLIA A, *et al.* Prediction of meat quality traits in the abattoir using portable and hand-held near-infrared spectrometers [J]. *Meat Sci*, 2020, 161: 108017.
- [21] 孙灵霞, 陈锦屏, 赵改名, 等. 化学计量学在食品分析中的应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(7): 444-448, 452.
SUN LX, CHEN JP, ZHAO GM, *et al.* Research progress in application of chemometrics in food analysis [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2012, 33(7): 444-448, 452.
- [22] ANDRE CM, SOUKOULIS C. Food quality assessed by chemometrics [J]. *Foods*, 2020, 9(7): 897.
- [23] EFENBERGER-SZMECHTYK M, NOWAK A, KREGIEL D. Implementation of chemometrics in quality evaluation of food and beverages [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2018, 58(10): 1747-1766.
- [24] ROHMAN A. The employment of Fourier transform infrared spectroscopy coupled with chemometrics techniques for traceability and authentication of meat and meat products [J]. *Javay*, 2019, 6(1): 9-17.
- [25] QU F, REN D, HE Y, *et al.* Predicting pork freshness using multi-index statistical information fusion method based on near infrared spectroscopy [J]. *Meat Sci*, 2018, 146: 59-67.
- [26] 刘兆丰. 基于近红外光谱技术的猪肉新鲜度快速预测与识别[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2012.
LIU ZF. Detection and Identification of pork freshness based on near infrared spectroscopy [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2012.
- [27] 熊来怡. 近红外光谱技术检测猪肉品质及其安全判别研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012.
XIONG LY. Quality detection and safety discrimination of pork with near-infrared spectroscopy [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2012.
- [28] 熊来怡, 胡耀华, 刘聪, 等. 近红外光谱检测猪肉挥发性盐基氮含量及其品质安全判别研究[C]. 中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 2011.
XIONG LY, HU YH, LIU C, *et al.* Determination of volatile basic nitrogen content in pork by near infrared spectroscopy and its quality safety discrimination [C]. 2011 Annual Conference of Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011.
- [29] LENG T, LI F, CHEN Y, *et al.* Fast quantification of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in beef and pork by near-infrared spectroscopy: Comparison of SVR and PLS model [J]. *Meat Sci*, 2021, 180: 108559.
- [30] 戴小也. 基于近红外光谱分析技术的猪肉品质快速检测方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
DAI XY. Research on rapid analytical method for pork quality assessment using near infrared spectroscopy [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [31] PEYVASTEH M, POPOV A, BYKOV A, *et al.* Meat freshness revealed by visible to near-infrared spectroscopy and principal component analysis [J]. *J Phys Commun*, 2020, 4(9): 095011.
- [32] OUYANG Q, WANG L, ZAREEF M, *et al.* A feasibility of nondestructive rapid detection of total volatile basic nitrogen content in frozen pork based on portable near-infrared spectroscopy [J]. *Microchem J*, 2020, 157: 105020.
- [33] QIAO L, TANG X, DONG J. A feasibility quantification study of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in duck meat for freshness evaluation [J]. *Food Chem*, 2017, 237: 1179-1185.
- [34] 杨勇, 王殿友, 杨庆余, 等. 近红外光谱技术快速测定鹅肉新鲜度[J]. *食品科学*, 2014, 35(24): 239-242.
YANG Y, WANG DY, YANG QY, *et al.* Rapid determination of goose meat freshness using near infrared spectroscopy [J]. *Food Sci*, 2014, 35(24): 239-242.
- [35] QIAO L, LU B, DONG J, *et al.* Total volatile basic nitrogen content in duck meat of different varieties based on calibration maintenance and transfer by use of a near-infrared spectrometric model [J]. *Spectroscop Lett*, 2020, 53(1): 44-54.
- [36] 王魏. 基于高分辨率光谱技术快速识别冷鲜肉品的脂肪氧化程度[D]. 新乡: 河南科技学院, 2020.
WANG W. Rapid identification of lipid oxidation in fresh chilled meat by higher solution spectroscopy [D]. Xinxiang: Henan University of Science and Technology, 2020.
- [37] 石长波, 姚恒喆, 袁惠萍, 等. 近红外光谱技术在肉制品安全性检测中的应用研究进展[J]. *美食研究*, 2021, 38(2): 62-67.
SHI CB, YAO HZ, YUAN HP, *et al.* Advances of near infrared spectroscopy in meat product safety detection [J]. *J Res Diet Sci Cult*, 2021, 38(2): 62-67.
- [38] 王昱陆. 基于可见/近红外光谱的生鲜猪、牛、羊肉识别方法研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015.
WANG YL. An identification method study of pork beef and mutton based on VIS/NIR spectroscopy [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015.
- [39] YANG L, WU T, LIU Y, *et al.* Rapid identification of pork adulterated in the beef and mutton by infrared spectroscopy [J]. *J Spectroscop*, 2018, 2018: 1-10.
- [40] REIS MM. Near infrared spectroscopy (Vis-NIRS) applied to differentiation between chilled and frozen/thawed meat [J]. *NIR News*, 2017, 28(7): 10-15.

- [41] ZHAO HT, FENG YZ, CHEN W, *et al.* Application of invasive weed optimization and least square support vector machine for prediction of beef adulteration with spoiled beef based on visible near-infrared (Vis-NIR) hyper spectral imaging [J]. *Meat Sci*, 2019, 151: 75–81.
- [42] MABOOD F, BOQUE R, ALKINDI AY, *et al.* Fast detection and quantification of pork meat in other meats by reflectance FT-NIR spectroscopy and multivariate analysis [J]. *Meat Sci*, 2020, 163: 108084.
- [43] RADY A, ADEDEJI A. Assessing different processed meats for adulterants using visible-near-infrared spectroscopy [J]. *Meat Sci*, 2018, 136: 59–67.
- [44] JIANG H, ZHUANG H, SOHN M, *et al.* Measurement of soy contents in ground beef using near-infrared spectroscopy [J]. *Appl Sci*, 2017, 7(1): 97.
- [45] ORTIZ A, PARRINI S, TEJERINA D, *et al.* Potential use of near-infrared spectroscopy to predict fatty acid profile of meat from different European autochthonous pig breeds [J]. *Appl Sci*, 2020, 10(17): 5801.
- [46] 王昱陆, 郭辉, 韩长杰. 基于可见/近红外光谱对不同品种羊肉鉴别方法研究[J]. *食品科技*, 2015, (9): 298–302.
WANG YL, GUO H, HAN CJ. Identification of varieties of mutton by VIS/NIR spectroscopy [J]. *Food Sci Technol*, 2015, (9): 298–302.
- [47] 沈啸. 基于近红外光谱的不同品种鸡肉鉴别及肉品质研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
SHEN X. Identification of different chicken breeds and meat quality research based on near infrared spectroscopy [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [48] PARASTAR H, KOLLENBURG G, WEESEPOEL Y, *et al.* Integration of handheld NIR and machine learning to “Measure & Monitor” chicken meat authenticity [J]. *Food Control*, 2020, 112: 107149.
- [49] 龚艳. 近红外光谱法用于鸡肉定性鉴别及定量分析研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
GONG Y. Qualitative identification and quantitative analysis of chicken meat ear infrared spectroscopy [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [50] ZHENG X, LI Y, WEI W, *et al.* Detection of adulteration with duck meat in minced lamb meat by using visible near-infrared hyperspectral imaging [J]. *Meat Sci*, 2019, 149: 55–62.
- [51] SILVA LCR, FOLLI GS, SANTOS LP, *et al.* Quantification of beef, pork, and chicken in ground meat using a portable NIR spectrometer [J]. *Vib Spectrosc*, 2020, 111: 103158.
- [52] 刘晓晔. 基于近红外光谱技术的牛肉在线分级及分类初探[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
LIU XY. Preliminary study on application of NIR technology to beef grading and classification [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [53] 杨旭宁, 郭中华, 吴忻怡, 等. 基于 Matlab GUI 的羊肉产地鉴别平台设计[J]. *现代电子技术*, 2019, 42(12): 21–24.
YANG XN, GUO ZH, WU XY, *et al.* Design of mutton origin place identification platform based on Matlab GUI [J]. *Mod Electron Technique*, 2019, 42(12): 21–24.
- [54] 史岩, 赵田田, 陈海华, 等. 基于近红外光谱技术的鸡肉产地溯源[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(12): 198–204.
SHI Y, ZHAO TT, CHEN HH, *et al.* Determination of geographic origin of chicken based on near infrared spectroscopy [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2014, 14(12): 198–204.
- [55] 孙潇, 史岩. 近红外光谱技术对加工后鸡肉产地溯源的研究[J]. *现代食品科技*, 2015, 31(6): 315–321.
SUN X, SHI Y. Determining the geographic origin of cooked chicken based on near-infrared spectroscopy [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2015, 31(6): 315–321.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

作者简介



柴迎慧, 硕士研究生, 主要研究方向为农产品品质分析及调控。
E-mail: cyh990517@163.com

李占明, 讲师, 主要研究方向为农产品品质分析及调控。
E-mail: lizhanming@just.edu.cn