

## 牛肉品质无损检测技术研究进展

阳晓婷, 刘浩, 刘楠, 孙丽荣, 李亚兰, 郝梦洁, 赵珊珊, 白璐, 赵燕

### Research Progress of Non-destructive Testing Technology in Beef Quality

YANG Xiaoting, LIU Hao, LIU Nan, SUN Lirong, LI Yalan, QIE Mengjie, ZHAO Shanshan, BAI Lu, and ZHAO Yan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070265>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 芒果品质无损检测技术研究进展

Progress of Non-destructive Testing Technology in Mango Quality

食品工业科技. 2021, 42(22): 413-422 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090195>

#### 无损检测技术在水果品质评价中应用的研究进展

Research Progress of Non-destructive Detection Technique in Fruit Quality Evaluation

食品工业科技. 2020, 41(24): 354-359 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019110103>

#### 水果品质光学无损检测技术研究进展

Research Progress of Optical Nondestructive Testing Technology for Fruit Quality

食品工业科技. 2021, 42(23): 427-437 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020110235>

#### 过热蒸汽预处理对牛肉品质的影响

Effect of Superheated Steam Pretreatment on the Quality of Beef

食品工业科技. 2020, 41(13): 79-84 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.13.013>

#### 肌肉嫩度的影响因素及pH调节牛肉嫩化技术研究进展

Research Progress on the Influence Factors of the Tenderness of the Muscle and the Technology of Adjusting the Tenderization of the Beef

食品工业科技. 2019, 40(24): 349-354 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.24.058>

#### 多指标综合评价风干牛肉品质的研究

Study on the comprehensive evaluation of air dried beef quality with multiple variables

食品工业科技. 2017(14): 6-10 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.14.002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

阳晓婷, 刘浩, 刘楠, 等. 牛肉品质无损检测技术研究进展 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 37–46. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070265

YANG Xiaoting, LIU Hao, LIU Nan, et al. Research Progress of Non-destructive Testing Technology in Beef Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 37–46. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070265

· 未来食品 ·

# 牛肉品质无损检测技术研究进展

阳晓婷<sup>1</sup>, 刘浩<sup>2</sup>, 刘楠<sup>2</sup>, 孙丽荣<sup>2</sup>, 李亚兰<sup>1</sup>, 郝梦洁<sup>1</sup>, 赵姗姗<sup>1</sup>, 白璐<sup>1</sup>, 赵燕<sup>1,\*</sup>

(1. 中国农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 农产品质量安全重点实验室, 北京 100089;

2. 通辽市农畜产品质量安全中心, 内蒙古通辽 028000)

**摘要:**牛肉营养物质丰富, 是受消费者青睐的肉类之一。牛肉品质的优劣影响市场价格、消费者的购买意愿与满意度, 因此牛肉品质的检测工作十分重要。目前传统的牛肉品质检测方法存在耗时、样品损坏以及操作复杂等问题。近年来, 无损检测技术凭借其快速、高效、无损、绿色无污染的优势被广泛应用于牛肉品质检测。本文对无损检测技术在牛肉的品质分析(感官品质、营养品质和其他品质)进展进行了总结, 系统阐述了近红外光谱、拉曼光谱、高光谱成像、电子舌和电子鼻等无损检测技术的原理, 详细论述了近 5 年内无损检测技术在牛肉品质分析的进展, 提出了无损检测技术在牛肉品质分析中存在的问题, 并对未来的应用前景进行了展望, 以期对牛肉品质无损检测技术的研究与应用提供参考。

**关键词:**牛肉, 品质, 无损检测, 近红外光谱, 拉曼光谱, 高光谱成像, 电子舌, 电子鼻

中图分类号: TS251.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)11-0037-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070265



本文网刊:

## Research Progress of Non-destructive Testing Technology in Beef Quality

YANG Xiaoting<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>2</sup>, LIU Nan<sup>2</sup>, SUN Lirong<sup>2</sup>, LI Yalan<sup>1</sup>, QIE Mengjie<sup>1</sup>,  
ZHAO Shanshan<sup>1</sup>, BAI Lu<sup>1</sup>, ZHAO Yan<sup>1,\*</sup>

(1. Institute of Quality Standard & Testing Technology for Agro-products, Key Laboratory of Agro-product Quality and Safety, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100089, China;

2. Tongliao Agricultural and Livestock Product Quality and Safety Center, Tongliao 028000, China)

**Abstract:** Beef is rich in nutrients and is one of the favored meats among consumers. Market price, consumer willingness to buy and satisfaction are affected by the quality of beef, so it is important to test the quality of beef. At present, traditional beef quality testing methods have the problems of time-consuming, sample damage and complex operation. Recently, non-destructive testing technology has been widely used in beef quality testing because of its advantages of rapidity, high efficiency, non-destructive and environment-friendly. This paper summarises the progress of non-destructive testing technology in beef quality analysis (sensory quality, nutritional quality and other quality), and systematically describes the principles of non-destructive testing techniques such as near-infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, hyperspectral imaging, E-tongue and E-nose. The progress of non-destructive testing techniques in beef quality analysis within the last five years is discussed in detail. The existing problems of non-destructive testing technology in beef quality analysis are put forward, and the future application prospect is prospected. It hopes to provide a reference for the research and application of non-destructive testing technology for beef quality.

**Key words:** beef; quality; non-destructive testing; near-infrared spectroscopy; Raman spectroscopy; hyperspectral imaging; E-tongue; E-nose

收稿日期: 2023-08-01

基金项目: 通辽市科技计划项目 (TLCXYD202101)。

作者简介: 阳晓婷 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品质量与安全, E-mail: yangxt6777@163.com。

\* 通信作者: 赵燕 (1982-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品质量安全, E-mail: zhaoyan01@caas.cn。

牛肉富含多种营养物质,如蛋白质、B 族维生素、铁、锌和亚油酸等<sup>[1]</sup>。随着生活水平的不断提高,人们的消费观念逐渐发生转变,消费者更加注重饮食健康和产品质量,对高品质的牛肉需求日益增加。牛肉品质可以分为感官品质、营养品质和其他品质。感官品质包括质构、色泽、滋味与风味,其中质构又包括硬度、嫩度、脆性、咀嚼性、回复性和剪切力等。营养品质包括水分、脂肪、蛋白质、矿物质、氨基酸和脂肪酸等。总菌落数(total viable counts, TVC)、挥发性盐基氮(total volatile basic-nitrogen, TVB-N)值、pH、真实性也是影响牛肉品质的因素,因此本文将 TVC、TVB-N 值、pH、真实性归类为其他品质。这些品质都是影响牛肉市场价格和消费者购买欲望的重要因素,因此牛肉品质的分析对于高质量牛肉产业的持续发展非常重要。

传统的牛肉品质检测方法包括质地剖面分析、高效液相色谱法、气相色谱-质谱法等。这些传统方法存在操作繁琐、检测时间长等问题。因此,快速、简单、不损害待测样品的无损检测技术在牛肉品质的分析方面越来越受到重视。目前用于牛肉品质的无损检测技术有光谱技术(近红外光谱、拉曼光谱、高光谱成像等)、仿生技术(电子鼻、电子舌)、生物电抗阻、超声波成像技术等,这些技术在牛肉品质分析中得到广泛的应用,但是相关研究进展的报道较少。本文全面综述了近五年无损检测技术在牛肉感官品质、营养品质、其他品质分析方面的研究进展,总结了这些技术现存的问题,并展望未来的发展方向,以期将来牛肉品质无损检测技术的研究与应用提供参考。

## 1 近红外光谱技术

近红外光是指介于可见光和中红外光之间的电磁波,光谱范围为 780~2526 nm。当近红外光照射物质时,有机分子和一些无机分子中的 C-H、N-H、

O-H 等各种含氢基团被激发发生共振,含氢基团振动基频在光谱段上被倍频与合频吸收,每条光谱都完整保留了能反映试样中有机物组分和含量的信息。通过借助多种化学计量学方法对采集的光谱信息建立模型,使样品中有机物的组成和含量可以通过各个光谱反映出来。利用近红外光谱(near-infrared spectroscopy, NIRS)技术可以检测牛肉的感官品质(颜色、咸味和硬度)、营养品质(水分、粗脂肪、粗蛋白、灰分、脂肪酸和矿物质)、其他品质(pH、TVB-N 值和真实性),表 1 总结了近五年来 NIRS 在牛肉品质检测中的应用。

### 1.1 感官品质检测中的应用

NIRS 技术在牛肉感官指标分析方面具有一定的应用潜力。Arianna 等<sup>[3]</sup>利用 NIRS 技术建立预测牛肉颜色和嫩度的 PLSR 模型,该模型的决定系数(coefficient of determination,  $R^2$ )都在 0.66 以上,结果表明,NIRS 技术能够较好地预测牛肉的颜色和嫩度。Revilla 等<sup>[2]</sup>利用 NIRS 技术对干腌牛肉的多个感官指标进行分析,通过采集的光谱数据结合 ANN 统计方法对 24 个感官参数(外观、质地、味道等)建立了预测模型,外部检验相关系数都大于 0.89(气味强度除外),预测均方误差都在 0.013~0.293 范围内,结果表明,NIRS 技术可以准确预测 23 个感官参数。

### 1.2 营养品质检测中的应用

NIRS 技术可用于检测牛肉营养品质中的水分、粗脂肪、粗蛋白、灰分、脂肪酸和矿物元素等参数,并且 NIRS 技术可以实现多指标同时检测。亏开兴等<sup>[6]</sup>利用 NIRS 技术对牛背最长肌第 6~7 肋间上脑肉样进行水分、粗脂肪、粗蛋白和灰分含量测定,采用 PLS 方法建立预测模型,结果表明,预测模型对各参数的校正集决定系数(validation coefficient determinations,  $R^2_{cv}$ )分别为 0.866、0.883、0.668 和 0.812,都达到应用的水平。Maduro 等<sup>[7]</sup>也利用 NIRS 技术

表 1 NIRS 技术在牛肉品质检测中的应用

Table 1 Application of near-infrared spectroscopy technology in beef quality detection

品质检测指标	波长范围(nm)	光谱预处理方法	模型、判别方法	参考文献
感官品质	颜色、咸味、硬度等	MSC、SNV、DT	ANN	[2]
	颜色、嫩度	SNV、DT	PLS	[3]
	脂肪酸	SG平滑	PLS	[4]
营养品质	矿物质	SNV、MC、DT	PLSR	[5]
	水分、粗脂肪、粗蛋白、灰分	MSC、SNV	PLS	[6]
	水分、粗脂肪、粗蛋白	1st Der、2nd Der、SNV、MSC	PLS	[7]
	pH	MSC、1st Der、2nd Der、MC、	PLS	[8]
	TVB-N	1st Der、Norris平滑	PLS	[9]
其他品质	1100~2300	MC、MSC、SNV、DT	PLS-DA	[10]
	真实性	MSC	SVM	[11]
	800~1851	SNV、MSC、SG平滑	DA、PCR	[12]

注: MSC(mutiple scattering correction, 多元散射校正); SNV(standard normal variate, 标准正态变换); DT(detrend, 去趋势); 1st Der(first derivative, 一阶求导); 2nd Der(second derivative, 二阶求导); SG平滑(Savitzky-Golay, SG平滑); Norris平滑(Norris smoothing, Norris平滑); MC(mean-centering, 均值中心化变换); ANN(artificial neural network, 人工神经网络); PLS(partial least squares, 偏最小二乘法); PLSR(partial least squares regression, 偏最小二乘回归); PLS-DA(partial least squares discriminant analysis, 偏最小二乘法判别分析); SVM(support vector machines, 支持向量机); DA(discriminant analysis, 判别分析); PCR(principle component regression, 主成分回归); 表2、表3同。

建立牛肉不同部位(肋骨、肩胛、胸脯、颈部和胫部等)的脂肪、粗蛋白、水分含量的 PLS 预测模型,  $R^2_{cv}$  值分别为 0.93、0.89、0.72。因此, 利用 NIRS 技术对水分、粗脂肪和粗蛋白含量进行快速定量分析是可行的, 未来需要对样品的代表性(品种、年龄、部位等)进行更加全面的研究, 以满足实际应用中的需求。NIRS 可以对牛肉中脂肪酸进行分析, Piao 等<sup>[4]</sup>开发出了一种手持式 NIRS 仪用来预测市售牛肉中单不饱和脂肪酸、油酸和饱和脂肪酸的组成, 利用该仪器的预测准确度大于 0.6。NIRS 还可以分析牛肉矿物元素含量, Patel 等<sup>[5]</sup>利用三种不同的便携式 NIRS 仪预测牛肉中 20 种矿物元素的含量, 采用 MC、SNV、DT 等方法对光谱数据进行预处理, 建立 PLSR 模型, 结果表明, Fe、P 在三种不同仪器中的模型预测准确度最高, 校准决定系数都达到了 0.8 以上。目前, NIRS 技术已经运用于《GB/T 41366-2022 畜禽肉品质检测 水分、蛋白质、脂肪含量的测定 近红外法》等国家标准中<sup>[13]</sup>。因此, NIRS 技术在营养品质分析方面具有广阔的应用潜力。

1.3 其他品质检测中的应用

TVB-N 值是肉类新鲜度的重要指标之一, TVB-N 值会随着肉的变质而增加<sup>[14]</sup>。郭丽丽等<sup>[9]</sup>利用 NIRS 技术对生鲜牛肉中的 TVB-N 值进行分析, 采用 1st Der 和 Norris 平滑方法对光谱数据预处理后, 所构建的 PLS 模型预测集相关系数(predicted correlation coefficient,  $R_p$ )为 0.9587, 表明该模型具有良好的预测精度, 但利用该模型对实际肉样进行分析时, 少数样品的预测值与国标测定值的相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)值大于 10%, 说明还需要对该模型影响因素及相关参数进一步研究。

随着消费者对农产品真实性和可追溯性的日益重视, 农产品溯源和掺假鉴别成为品质检测领域的热点之一。NIRS 技术在牛肉真实性方面的研究广泛, 这些研究主要集中于鉴别外源肉的物种掺假及注水肉鉴别。López-Maestresalas 等<sup>[10]</sup>研究发现 NIRS 可以鉴别牛肉糜中掺入不同比例(1%、2%、5%、10%)的鸡肉和马肉, 准确率在 78.95%~100% 之间。此外, NIRS 可以鉴别牛肉是否注水, 唐鸣等<sup>[11]</sup>利用

NIRS 对正常肉与注水肉进行分析, 采用小波变换和聚类分析的方法对光谱特征值进行提取, 结果发现 1818~1842 nm 波段的光谱体现了正常肉和注水肉差异, 基于该波段建立的模型对二者的总体识别率达到 90.48%。因此, NIRS 技术在识别牛肉掺假方面具有广阔的应用潜力。

2 拉曼光谱技术

入射光照射物质分子时会产生非弹性碰撞, 即光的频率发生改变, 在非弹性碰撞过程中, 部分散射光会与分子发生能量交换, 不同分子会有不同的能量变化, 此时光子的频率发生改变, 所获得的光谱就是拉曼光谱(Raman spectroscopy, RS)。RS 技术可以对牛肉中脂质、蛋白质和水分等官能团振动进行检测, 结合化学计量学方法, 能够对牛肉的感官品质(颜色、质构)、营养品质(蛋白质、脂肪)、其他品质(TVC、真实性)进行分析, 表 2 总结了近五年来 RS 技术在牛肉品质检测中的应用。

2.1 感官品质检测中的应用

牛肉的颜色是影响消费者购买欲望的最直观因素, 与 MetMb、MRA 值和肌红蛋白(Myoglobin, Mb)的氧化程度有关<sup>[23]</sup>。Zhang 等<sup>[15]</sup>利用 RS 技术预测新鲜牛肉中 MetMb 和 MRA 值, 采用 PLSR 方法建立的模型  $R^2$  在 0.80~0.85 范围中。RS 技术还可以研究微观层次上 Mb 结构的变化, 张同刚等<sup>[24]</sup>利用 RS 技术研究贮藏时间对 Mb 结构的影响, 结果表明, 随着贮藏时间的延长, Mb 二级结构发生改变, 导致牛肉颜色稳定性下降并发生劣变。上述研究表明, RS 技术既可以测定蛋白质的含量, 又可以研究蛋白质的结构变化。RS 技术还可以对牛肉的质构进行分析, Chen 等<sup>[16]</sup>利用 RS 技术对生鲜牛肉的质构指标进行了研究, 研究表明柔软度、咀嚼性、坚实度、硬度的模型  $R^2_{cv}$  均大于 0.80。因此, 通过 RS 技术分析牛肉中蛋白质官能团的振动, 可以对牛肉的感官品质进行分析。

2.2 营养品质检测中的应用

蛋白质氧化会引起蛋白质结构与性质的改变, 降低蛋白质的消化率, 破坏蛋白质营养价值<sup>[25]</sup>。RS

表 2 拉曼光谱在牛肉品质检测中的应用  
Table 2 Application of Raman spectroscopy in beef quality detection

品质检测指标		实验目的	频率范围( $\text{cm}^{-1}$ )	模型、判别方法	参考文献
感官品质	颜色	预测新鲜牛肉MetMb和MRA值	400~1700	PLSR	[15]
	质构(咀嚼性、硬度等)	预测反复冻融处理下的牛肉质构	100~3300	PCA、PLS-DA	[16]
营养品质	蛋白质结构	研究反复冻融过程中蛋白结构的变化	500~3300	—	[17]
	脂质	研究脂质降解指标与冷鲜贮藏时间的关系	500~3000	PLSR	[18]
其他品质	TVC	预测不同类型包装中的牛肉变质	500~1800	PLSR	[19]
	真实性	区分牛肉、鹿肉和羊肉	313~1895	PCA、PLS-DA、SVM	[20]
		区分草和谷物饲喂方式中差异	600~1900	PCA	[21]
		区别不同饲喂方式下牛肉的差异	400~2300	PLS-DA	[22]

注: —表示文章中未提及; MetMb(metmyoglobin, 高铁肌红蛋白); MRA(metmyoglobin-reducing activity, 高铁肌红蛋白还原酶活性); PCA(principal component analysis, 主成分分析)。



技术可用于分析不同贮藏、加工(捶打、发酵、风干、腌制)过程中蛋白质结构的变化,因此RS技术可以开展蛋白质氧化等特性的研究。Chen等<sup>[17]</sup>利用RS技术研究反复冻融条件下牛肉的蛋白质氧化与构象变化,结果表明,随着冻融循环次数的增加,蛋白质的二级结构发生变化,蛋白质中巯基含量和总巯基含量等理化性质发生改变,证实了反复冻融过程中蛋白质氧化的发生。

利用RS技术分析肉类脂肪含量已经得到了广泛认可<sup>[26]</sup>,最近该技术被用于预测牛肉脂质降解和贮藏时间的关系。Cama-Moncunill等<sup>[27]</sup>通过RS技术分析牛肉的肌肉脂肪(intramuscular fat, IMF)含量,基于SNV、基线校正(baseline correction, BL)方法对光谱数据预处理后,所构建的最优PLSR模型 $R^2_{cv}$ 为0.64,具有一定的应用潜力。Bai等<sup>[18]</sup>通过RS技术开展脂质降解研究,利用RS技术研究冷鲜牛肉的三种脂质降解指标(酸值、过氧化值和硫代巴比妥酸反应物质)与贮藏时间的关系,通过PLSR方法成功建立预测模型,该模型的 $R^2$ 在0.87~0.95范围内。因此,若能实现对产品的在线检测,便能检测样品贮藏时的品质变化、确定关键控制点、制定监控程序。

### 2.3 其他品质检测中的应用

TVC与食品的腐败程度有关,能够反映食品被细菌污染程度<sup>[28]</sup>,利用RS技术可以分析牛肉中的TVC。Yang等<sup>[19]</sup>通过RS技术可以预测不同包装牛肉的TVC,将牛肉置于真空和气调包装中,并在贮藏不同天数(0、3、7、14、21 d)时采集RS数据,利用PLSR方法建立预测模型,结果表明,真空包装贮藏21 d的预测模型交互验证决定系数高达0.99,而气调包装贮藏21 d的预测模型交互验证决定系数达到0.90,气调包装的预测模型稳定性比真空包装差的原因可能是真空包装的牛肉腐烂程度更低,细菌产生的生物膜对RS的影响更低。因此,RS技术在预测牛肉TVC方面具有潜力,接下来可以对贮藏时间、腐败程度、腐败标志物进行研究。

RS技术既可用于鉴别不同物种的红肉,还可以区分不同喂养方式下的牛肉。Robert等<sup>[20]</sup>利用RS技术可以鉴别不同物种的红肉(牛肉、鹿肉和羊肉),采用多种预处理方法对采集数据进行处理,并通过PLS-DA、SVM方法进行分类分析,训练集和测试集的准确判别率都达到了80%。Logan等<sup>[22]</sup>通过RS技术区分长期谷物喂养、短期谷物喂养、草饲和谷物混合喂养、草饲喂养这4种不同饲养方式的牛肉,利用PLS-DA方法对饲养模式进行判别分析,结果表明,这4种不同饲养模式下的正确判别率在83%~96%。因此,RS技术在分析牛肉真实性方面具有广泛的应用前景。

## 3 高光谱成像技术

高光谱成像(hyperspectral imaging, HSI)技术是将光谱和成像技术结合,在不同光谱波段范围内生成

一系列的图像信息,在一个系统中同时获取一维的光谱信息和二维的空间信息,从而构成了三维的数据立方体<sup>[29]</sup>。HSI系统采集具有大量连续波长的图像,通常有几十或数百个图像,这使得高光谱图像中的每个像素在连续波长范围内都有相应的光谱<sup>[30]</sup>。HSI技术在牛肉的感官品质(粘聚性、回复性、嫩度、颜色)、营养品质(水分、脂肪)以及其他品质(TVC、TVB-N值、pH、真实性)研究中应用广泛,如表3所示。

### 3.1 感官品质检测中的应用

HSI技术可以对牛肉感官品质中质构参数(粘聚性、回复性和嫩度)进行检测。方瑶等<sup>[31]</sup>基于HSI技术实现冷鲜牛肉质构品质(粘聚性、回复性)的快速分析,通过4种算法进行光谱数据预处理后,采用SPA方法筛选特征波长,建立PLSR模型,在粘聚性的预测模型中,SNV-SPA-PLSR模型性能最优, $R_p$ 达到0.8798;在回复性的预测模型中,2nd Der-SPA-PLSR模型性能最优, $R_p$ 达到0.8806。Nubiato等<sup>[32]</sup>利用HSI技术实现了屠宰后0、7、14和21 d的牛肉嫩度等级区分,运用并比较了2种数据预处理方法和2个波长范围,采用LDA方法进行分类,结果表明,使用部分波长光谱的一阶导数模型能够对牛肉的嫩度等级进行分类,总体准确率达到了89.8%。

HSI技术可用于牛肉颜色的检测。禹文杰等<sup>[35]</sup>采集400~1000 nm波段的光谱信息来分析牛肉的颜色(亮度、红度、黄度),对原始光谱数据进行预处理后,通过CARS、SPA、UVE方法提取特征光谱,建立PLSR模型,亮度通过Deresolve(降低分辨率)-SPA-PLSR方法构建的模型性能最优, $R^2_p$ 高达0.9705;红度和黄度通过SG-CARS-PLSR构建的模型性能最优, $R^2_p$ 分别达到0.9221、0.9532。与肉眼识别相比,HSI技术的图像数据能够更加快速和客观的获得牛肉的外部特征。未来需要进一步提高HSI技术中探测仪的灵敏度和像素分辨率,获得更加细致和全面的图像信息,对图像信息中的关键部位进行提取,并且后续的数据处理以及建模方法对于检测人员的专业能力要求高,需要建立更加简单的算法对光谱数据进行分析,实现在线检测。

### 3.2 营养品质检测中的应用

HSI技术可用于检测牛肉水分的含量和分布。禹文杰等<sup>[36]</sup>通过HSI技术实现了牛肉水分含量及分布的快速检测,利用HSI系统采集400~1000 nm波段的光谱和图像信息,采用蒙特卡罗无信息变量消除法剔除无关变量,利用7种方法进行光谱预处理,结合SPA、CARS、UVE算法筛选特征波长,建立了基于PLSR方法的预测模型,结果表明,SG-SPA-PLSR方法建立的牛肉水分预测模型效果最好, $R^2_p$ 值达到0.883, RMSEP为0.389,同时利用SG-SPA-PLSR模型可以获得牛肉每个像素点的水分含量,实现了牛肉水分分布的可视化。

HSI技术既可以分析牛肉肌肉脂肪含量,又可以

表 3 高光谱成像技术在牛肉品质检测中的应用  
Table 3 Application of hyperspectral imaging technology in beef quality detection

品质检测指标	波长范围 (nm)	光谱分辨率 (nm)	光谱预处理 方法	提取特征 波长方法	特征波长(nm)	模型、判别 方法	模型精确度、 准确率	参考文献
感官品质	粘聚性	1000~2500	—	SNV、2nd Der	SPA	PLSR	$R_p=0.8798$ , RMSEP=0.3966	[31]
	回复性						$R_p=0.8806$ , RMSEP=0.2203	
	嫩度	928~2524	10	1st Der	—	LDA	89.8%	[32]
	颜色 (亮度)	400~1000	—	—	标准化回归系 数	PLSR	$R^2=0.948$ , RMSEP=1.975	[33]
	颜色 (红度)	400~1000	—	SG平滑	$\beta$ 系数法	MLR	$R^2_p=0.890$ , RMSEP=0.7355	[34]
营养品质	颜色 (黄度)	400~1000	2.8	SG平滑	CARS	PLSR	$R^2_p=0.9532$ , RMSEP=0.2405	[35]
	水分	400~1000	2.8	SG平滑	SPA	PLSR	$R^2_p=0.883$ , RMSEP=0.389	[36]
	脂肪	400~1000	—	2nd Der	—	PLS-DA	86.5%	[38]
	pH	400~1000	2.8	NL	CARS	PLSR	$R^2_p=0.7406$ , RMSEP=0.0727	[39]
	TVB-N	320~1100	2.8	—	UVE、SPA	LS-SVM	$R^2_p=0.9579$ , RMSEP=1.5435	[40]
其他品质	TVC	400~1000	—	WT	—	N-PLS	$R^2_p=0.934$ , RMSEP=0.755	[41]
		400~1000	5.0	SNV	PCA	PLSR	$R_p=0.9933$ , RMSEP=1.01	[42]
	真实性	400~1000	2.8	SNV	IRF、SPA	PLS-DA	97.12%	[43]

注:—为该文章未提及;NL(normalization,归一化);WT(wavelet transform,小波变换);SPA(successive projections algorithm,连续投影法);CARS(competitive adapative reweighted sampling,竞争性自适应重加权法);UVE(uninformation variable elimination,无信息变量消除法);IRF(interval random frog,间隔随机蛙跳);LDA(linear discriminant analysis,线性判别分析);MLR(multiple linear regression,多元线性回归);LS-SVM(least square support vector machine,最小二乘支持向量机);N-PLS(multiway partial least squares,多路偏最小二乘); $R^2_p$ (determination coefficient of prediction set,预测集决定系数);RMSEP(root mean square error of prediction,预测均方根误差)。

开展牛肉肌内脂肪分布的评估质量等级研究。Dixit 等<sup>[44]</sup>通过 HSI 技术预测红肉肌内脂肪含量,利用 HSI 技术分析在不同测量条件下不同部位的不同红肉(牛肉、羊肉和鹿肉),采用多种光谱预处理方法后,建立基于深度卷积神经网络模型(deep convolution neural network,DCNN)方法的预测模型效果最好,而且不受物种、采集部位、屠宰季节、测量条件的影响,所建立模型的通用性较好, $R^2_p$ 值达到 0.89, RMSEP 为 0.78,在实际的生产工厂中具有一定的应用潜力。Ahmed 等<sup>[38]</sup>通过 HSI 技术实现了对三种质量等级牛肉的区分,采用 2nd Der 光谱预处理方法所建立的 PLS-DA 模型总体准确度最高(86.5%),实现了牛肉肌内脂肪分布的可视化。

3.3 其他品质检测中的应用

HSI 技术可用于分析牛肉中的 TVB-N 值、pH、TVC 等。Song 等<sup>[40]</sup>通过 HSI 技术实现了牛肉中 TVB-N 值的预测,采集贮藏过程中牛肉在 320~

1100 nm 波长范围内的光谱和图像信息,采用 UVE 和 SPA 方法提取光谱特征,利用离散小波变换(discrete wavelet transform, DCT)提取纹理特征,将光谱特征与纹理特征融合,建立了 PLSR 和 LS-SVM 的预测模型, $R^2_p$ 分别达到 0.9401、0.9579。乔芦等<sup>[39]</sup>利用 HSI 技术对牛肉 pH 进行预测,采用 Kennard-Stone 算法对样本的原始光谱信息进行样本集划分及光谱预处理,通过 3 种方法对特征波长进行提取,结合 PLSR、MLR 和 PCR 方法对全波段及特征波段进行建模分析,CARS-PLSR 模型的预测效果最好, $R^2_p$ 为 0.7406。Yang 等<sup>[41]</sup>利用 HSI 技术结合 WT 和 N-PLS 算法预测五香牛肉贮藏期间的 TVC,最优 N-PLS 模型的  $R^2_p$  达到 0.934,成功建立了 TVC 预测模型。

HSI 技术在牛肉真实性鉴别方面的应用中首先可以鉴别牛肉中外来肉源掺假,包括不同物种肉、不同品种牛肉、变质牛肉掺假等。朱亚东等<sup>[45]</sup>采用

HSI 技术结合线性回归算法可以对鸡肉掺假牛肉进行快速预测,基于 SPA 算法结合 MLR 建模方法预测效果最优,  $R^2_p$  值达到 0.97。王彩霞等<sup>[43]</sup>利用 HSI 技术结合特征波长筛选方法对 3 个品种(安格斯牛、力木赞牛、西门塔尔牛)的牛肉进行鉴别研究,表明在 400~1000 nm 波段内,基于 SNV-IRF-SPA-PLS-DA 方法所建立模型的校正集与预测集准确率都高达 97% 以上。Zhao 等<sup>[46]</sup>通过 HSI 技术开展了变质牛肉的鉴别研究,开发了一种名为入侵杂草优化(invasive weed optimization, IWO)的新方法提取特征波长,比较了 SVM、LS-SVM、极限学习机(extreme learning machine, ELM)预测模型,结果表明, IWO-LS-SVM 模型的预测模型效果最好,  $R^2_p$  为 0.95,其构建的变质牛肉掺假梯度可视化分布图能够观察变质牛肉的掺入水平分布。

HSI 技术还可以鉴别牛肉中的非肉类外源物质(大豆蛋白和小麦麸质等)。Jiang 等<sup>[42]</sup>利用 HSI 技术对掺杂不同含量大豆蛋白粉的牛肉进行鉴别研究,利用 SNV、MSC、1st Der、2nd Der、DT 方法对光谱数据进行预处理,通过 PCA、二维相关光谱(two-dimensional correlation spectroscopy, 2D-COS)和回归系数(regression coefficient, RC)方法提取光谱特征,采用灰度共生矩阵提取纹理特征,建立了 PLSR 的掺假预测模型,结果表明,SNV-DT-PCA-PLSR 模型的预测精度最高,  $R_p$  为 0.9933,制作的彩色空间分布图能够清楚地观察到大豆蛋白粉掺假水平。Rady 等<sup>[47]</sup>利用 HSI 技术结合机器学习方法区分和量化牛肉中的小麦麸质,采用 SVM 方法对牛肉和小麦麸质区分的正确判别率高达 98%,利用 PLSR 方法建立预测牛肉中掺假小麦麸质含量模型的预测精度最高,  $R^2_p$  达到 0.93。

HSI 技术能够快速、高效地分析牛肉感官品质、营养品质以及其他品质。HSI 技术成像结果复杂,不同样品表面的均匀性不一致和样品是否具有代表性等因素会影响入射光所形成的成像数据。因此对 HSI 数据进行分析时,需要对图像数据和光谱数据进行处理,通过不同的预处理方法降低高光谱数据采集过程中基线、其他背景、噪声和杂质的干扰;同时需要开发更加简单快速的光谱特征和纹理特征提取方法,减少冗余数据,降低数据处理难度,推动 HSI 技术在工业生产中的应用。

## 4 仿生分析技术

### 4.1 电子鼻技术

电子鼻(electronic nose, E-nose)技术是模仿生物嗅觉过程,通过气味物质与嗅觉传感器接触,由计算机系统和模式识别系统进行处理,对气味物质进行定性与定量<sup>[48]</sup>。E-nose 主要应用于牛肉感官品质方面的分析。

4.1.1 感官品质检测中的应用 E-nose 在牛肉感官品质方面的应用广泛,主要集中于牛肉加工过程(热

加工、低温真空加工、腌制加工等)的风味物质测定。王伟静等<sup>[49]</sup>利用 E-nose 对不同炖煮温度后的不同生鲜牛肉部位(外脊和大黄瓜条)进行风味物质检测,采用 PCA、LDA、判别因子分析和雷达图分析,结果表明, LDA 和 PCA 方法都能够很好地区分不同炖煮温度下不同部位的牛肉。Utama 等<sup>[50]</sup>利用 E-nose 测定不同胴体质量等级的生鲜牛肉香气特征,结果表明,胴体质量等级越高,牛肉释放的挥发性化合物越少,因此通过牛肉的香气特征可以区分不同胴体质量等级的牛肉。

E-nose 与传统评价风味物质的方法(感官评价、GC-MS)相比更加简单快速,但该技术容易受到外部环境的干扰,导致样品的再现性和灵敏度较低,而且嗅觉过程中形成机理存在一定问题,在响应和气味物质的对应关系上有一定困难<sup>[51-52]</sup>。因此,接下来需要进一步开发新型嗅觉传感器,并选择合适的模式识别分析方法降低环境因素的干扰,同时需要深入研究嗅觉形成过程中的机理。

4.1.2 其他品质检测中的应用 E-nose 在牛肉真实性鉴别方面的应用比较广泛,主要针对 E-nose 中传感器阵列的优化<sup>[53]</sup>和模式识别系统的选择进行研究<sup>[54]</sup>,从而建立牛肉真实性鉴别的方法。Sarno 等<sup>[55]</sup>通过 E-nose 分析掺混猪肉的牛肉,利用 PCA 方法优化 E-nose 中的传感器阵列,并且比较了 ANN、LDA、K-最近邻分类、SVM 这 4 种识别模式判别掺假的能力,其中 SVM 的判别准确率最高(98.10%)。Avian 等<sup>[56]</sup>在 Sarno 的研究基础上,提出通过去除特征值提取这一步骤,将优化的深度极限学习机方法与 PCA 方法相结合,对猪肉掺假牛肉的样品进行分类,模型准确率提高至 99.97%,分析时间与 Sarno 相比快了 15 倍左右。

E-nose 具有响应速度快、操作简单的优点,在牛肉的掺假鉴别方面展现出良好的应用价值。随着生物仿生材料、机器学习算法的发展,新型气体传感器材料、特征提取方法、传感器阵列优化、模式识别算法、检测设备便携化等方面需要进一步研究,用来改变 E-nose 在传感器基值稳定性、气体识别、模式识别算法等方面存在的局限性。

### 4.2 电子舌技术

4.2.1 感官品质检测中的应用 电子舌(electronic tongue, E-tongue)和 E-nose 类似,是模仿味觉过程,通过味觉物质与味觉传感器接触,由计算机系统和模式识别系统进行处理,对味觉物质进行定性与定量<sup>[57]</sup>。

E-tongue 可用于分析牛肉加工过程中的滋味,该技术通常和 E-nose、感官分析、高效液相色谱-质谱联用技术、气相色谱-质谱联用技术一起客观评估复杂的感官品质。刘梦等<sup>[58]</sup>利用 E-tongue、E-nose、气相色谱-质谱联用和感官评价等方法分析牛肉干微发酵时的风味,结果表明,谷氨酸是微发酵牛肉干的特征性滋味物质。E-tongue 在测定滋味方面具有无



损、操作简单、速度快、灵敏度高的优势。但味觉传感器容易受到外界条件的影响, 导致再现性和交叉灵敏度较低; 味觉的形成过程难以完全模拟, 不同味觉之间的相互作用过程与机制需要进一步的研究<sup>[59-60]</sup>。

4.2.2 其他品质检测中的应用 E-tongue 在鉴别牛肉中掺假其他肉类方面具有应用潜力。Lu 等<sup>[61]</sup>将 E-tongue 技术结合 ELM 方法对掺入不同比例鸡肉、鸭肉、猪肉的新鲜牛肉样品进行分类, 结果表明, ELM 对掺假牛肉的正确分类率均在 90% 以上, 同时 ELM 模型可以预测牛肉中鸡肉、鸭肉、猪肉掺假含量, 该预测模型的均方根误差都小于 0.4%, 方差系数都大于 0.9。对掺假肉的鉴别主要采用传统的方法(聚合酶链式反应和酶联免疫吸附测定), E-tongue 比传统方法快速, 且成本更低, 操作要求也更低。E-tongue 在传感器灵敏度、模式识别算法等方面仍存在一定的局限性, 在研究优化 E-tongue 设备性能外, 还可以将 E-tongue 与其他技术相结合从而提高掺假判别模型的准确率。

5 其他技术

除上述无损检测技术外, 应用于牛肉品质的无损检测技术还有生物电抗阻、超声波成像、气流-激光、激光诱导击穿光谱技术等, 表 4 总结了近 5 年牛肉品质分析中其他无损检测技术的原理及应用。生物电阻抗技术具有快速、操作简单等优点, 在分析畜禽体成分含量、屠体性能等方面展现出良好的应用潜力<sup>[62-63]</sup>。Afonso 等<sup>[64]</sup>利用生物电阻抗技术预测牛肉的嫩度、颜色、肌内脂肪、pH 等品质指标, 采用 k 折交叉验证逻辑回归算法进行分析, 结果表明, 生

物电阻抗技术参数与牛肉的各个品质指标的相关性为中高水平, 且所有生物电阻抗技术参数的相关性均类似, 因此, 生物电阻抗技术在测定牛肉品质方面具有应用前景。超声成像技术是一种非电离、低成本和便携式的即时成像工具, 在牛肉的胴体质量评估方面具有应用潜力<sup>[65-66]</sup>。孙宗保等<sup>[67]</sup>基于超声成像技术分析冷鲜与解冻牛肉的质构, 利用 LDA 和 SVM 建立冷鲜与解冻牛肉的判别模型, 判别准确率都在 90% 以上, 表明超声成像技术可用于分析牛肉的质构。气流-激光技术具操作简单和快速等优点, 在分析 TVB-N 值方面具有应用潜力。Li 等<sup>[68]</sup>利用气流-激光技术分析牛肉 TVB-N 含量, 采用黏弹性检测系统采集牛肉的变形信息, 建立基于 MLR、PCR 和 PLSR 方法的 TVB-N 预测模型, 结果表明, PLSR 模型的预测精度最高,  $R^2_p$  为 0.821。激光诱导击穿光谱是一种元素分析技术, 该技术具有快速、操作简单等优点, 在工业中实时在线分析方面具有潜力。Velioglu 等<sup>[69]</sup>利用激光诱导击穿光谱对牛肉的肌肉和内脏进行真实性分析, 采用 PCA 成功区分内脏掺假肌肉样品, 此外, 利用 PLS 可以预测牛肉肌肉中内脏掺假含量, 该含量预测模型的  $R^2$  为 0.947, 表明激光诱导击穿光谱可用于牛肉真实性的鉴别。随着生物电子信息工程、大数据、机器学习技术、材料学等领域的发展, 多领域进行交叉与融合, 这些技术在牛肉品质检测方面可能有进一步的发展。

表 5 总结了在牛肉品质无损检测中常用技术的优缺点及应用, 可以看到每种技术均有各自的优势与不足, 其应用范围也各不相同。

表 4 牛肉品质检测中其他无损检测技术的原理及应用  
Table 4 Principle and application of other non-destructive techniques in beef quality detection

技术	原理	品质检测指标	参考文献
生物电阻抗	通过电极在生物体表面上输入微小的交流电(或电压), 然后根据电位差方面的介电特性变化获得生物体生理或病理信息	肌肉脂肪、颜色、pH、嫩度	[64]
超声成像	收集并处理超声波在待测物质中的声学信息, 在成像计算机上形成图像, 对图像特征进行分析, 获得物质的物理品质特征等	质构	[67]
气流-激光	利用气流对样品施加压力, 样品的黏弹性信息表现为变形信息的变化, 该变形信息最终由激光传感器获得, 并用来对样品的品质进行判别	TVB-N 值	[68,70]
激光诱导击穿光谱	利用高能脉冲激光聚焦入射样品表面产生激光等离子体, 对等离子体中原子和离子的发射光谱进行定性和定量分析	真实性	[69,71]

表 5 牛肉品质无损检测技术的优缺点及应用  
Table 5 Advantages and disadvantages of beef quality non-destructive detection techniques and its application

技术	应用	优点	缺点
近红外光谱	颜色、咸味、硬度、水分、粗脂肪、粗蛋白、灰分、脂肪酸、矿物质、pH、TVB-N 值、真实性	便携、操作简单、快速、高效、应用范围广	数据处理复杂、易受环境影响
拉曼光谱	颜色、质构、蛋白质、脂肪、TVC、真实性	操作简单、快速、灵敏度高	重复性和稳定性较低
高光谱成像	粘聚性、回复性、嫩度、颜色、水分、脂肪、TVC、TVB-N 值、pH、真实性	快速、高效、稳定、应用范围广	数据处理复杂、成本高
电子鼻	气味物质、真实性	便携、快速、低成本	易受环境影响、再现性较低
电子舌	滋味物质、真实性	便携、操作简单、快速、低成本	易受环境影响、再现性较低
生物电阻抗	脂肪、颜色、pH、嫩度	操作简单	易受电极因素影响、准确度较低
超声成像	质构	便携、低成本	应用范围窄
气流-激光	TVB-N 值	操作简单、快速	应用范围窄
激光诱导击穿光谱	真实性	便携、操作简单、快速	重复性和探测精度较低



## 6 结语与展望

牛肉作为消费者肉类饮食结构中的重要组成之一,其品质受到越来越多的关注,促进了快速、高效、灵敏、准确和信息丰富的无损检测技术发展。在牛肉品质分析中应用的无损检测技术包括:近红外光谱、拉曼光谱、高光谱成像、电子鼻、电子舌、生物抗阻、超声波成像、气流-激光、激光诱导击穿光谱等。本文对以上各个无损检测技术的基本原理、特点和应用研究现状进行了综述,并总结了牛肉品质无损检测技术的优缺点及应用,发现以上无损检测技术在牛肉品质检测方面具有应用的可行性,但仍存在以下三个方面的挑战:

第一,数据处理能力要求高。利用NIRS、RS、HSI等技术进行品质分析时会产生大量的数据,需要利用合适的化学计量学方法从庞大数据中提取出有用的特征数据,建立合理准确的定量或者定性模型,这对检测人员的能力要求高。不同的待测样品、品质检测指标和检测技术,会产生不同的数据信息,复杂的化学计量学方法不一定能提高模型准确度,这导致难以建立稳定、可靠的通用模型。因此,未来需要针对机器学习算法和化学计量学方法进行更深入的研究,同时建立品质分析数据库,推动稳定、可靠的通用模型的建立。

第二,仪器性能方面需要改进。光谱技术中的光谱设备会产生共线信息、光散射、条纹和随机噪声等冗余数据信息;仿生技术中的核心部件(传感器)易受实验环境影响,导致出现基线漂移、长期稳定性差的问题。因此,需要开发降低系统噪声、提高数据采集速度、高特异性、低成本、简单便携的仪器,也可以采用合适的数据预处理方法,使检测更快速、便捷、灵敏。目前,越来越多新型材料(纳米合成材料、超导材料等)逐渐应用于检测仪器中,以期对光谱等仪器性能方面有所提升。

第三,技术应用推广难。目前牛肉无损检测领域的研究主要集中于数据分析和建模的实验室阶段,较少应用于实际市场的需求中。存在原因有:大部分无损检测设备存在较为昂贵、单一化、抗干扰能力差、对环境要求高等缺点;各种品质检测模型的通用性有待研究;对检测人员的数据处理能力要求高。因此,如何实现先进技术实用化、落地化,是未来研究的重点任务之一。随着计算机和检测技术的发展,研究人员有望开发出更多的在线检测设备,在牛肉品质检测领域发挥更大的作用。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 参考文献

- [1] AN R, NICKOLS-RICHARDSON M S, KHAN N, et al. Impact of beef and beef product intake on cognition in children and young adults: A systematic review[J]. *Nutrients*, 2019, 11(8): 1797.
- [2] REVILLA I, VIVAR-QUINTANA A M, INMACULADA GONZALEZ-MARTIN M, et al. NIR spectroscopy for discriminating and predicting the sensory profile of dry-cured beef "Cecina"[J]. *Sensors*, 2020, 20(23): 6892.
- [3] ARIANNA G, JEAN-FRANÇOIS H, ERIKA P, et al. Hand-held near-infrared spectrometer allows on-line prediction of beef quality traits[J]. *Meat Science*, 2022, 108694.
- [4] PIAO S, OKURA T, IRIE M. On-site evaluation of wagyu beef carcasses based on the monounsaturated, oleic, and saturated fatty acid composition using a handheld fiber-optic near-infrared spectrometer[J]. *Meat Science*, 2018, 137: 258–264.
- [5] PATEL N, TOLEDO-ALVARADO H, CECCHINATO A, et al. Predicting the content of 20 minerals in beef by different portable near-infrared (NIR) spectrometers[J]. *Foods*, 2020, 9(10): 1389.
- [6] 亏开兴, 吴金亮, 杨凯, 等. 利用近红外光谱建立牛肉理化品质预测模型[J]. *草食家畜*, 2018(5): 14–23. [ZHANG K X, WU J L, YANG K, et al. Establishing prediction model of physicochemical qualities of beef by near infrared spectroscopy[J]. *Grass-Feeding Livestock*, 2018(5): 14–23.]
- [7] MADURO D C S A M, NUNES H P, MELO T M M, et al. Application of near infrared reflectance (NIR) spectroscopy to predict the moisture, protein, and fat content of beef for gourmet hamburger preparation[J]. *Livestock Science*, 2021, 254: 104772.
- [8] SU H, ZHANG S, LI H, et al. Using near-infrared reflectance spectroscopy to predict physical parameters of beef[J]. *Spectroscopy Letters*, 2018, 51(4): 163–168.
- [9] 郭丽丽, 花锦, 张梨花, 等. 基于近红外技术测定不同鲜肉中挥发性盐基氮含量[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(11): 2739–2743. [GUO L L, HUA J, ZHANG L H, et al. Detection of total volatile basic nitrogen in different kinds of meat based on near infrared spectroscopy[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2018, 9(11): 2739–2743.]
- [10] LÓPEZ-MAESTRESALAS A, INSAUSTI K, JARÉN C, et al. Detection of minced lamb and beef fraud using NIR spectroscopy[J]. *Food Control*, 2019, 98: 465–473.
- [11] 唐鸣, 田潇瑜, 王旭, 等. 基于近红外特征波段的注水肉识别模型研究[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(S1): 440–446. [TANG M, TIAN X Y, WANG X, et al. Recognition model of water-injected meat based on characteristic spectrum extraction of infrared spectroscopy[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(S1): 440–446.]
- [12] 李锋, 冷拓, 唐丽君, 等. 基于NIR结合化学计量法牛肉糜掺假检测[J]. *南昌大学学报(理科版)*, 2022, 46(5): 557–562. [LI F, LENG T, TANG L J, et al. Detection of beef surimi adulteration based on NIR and chemometrics[J]. *Journal of Nanchang University(Natural Science)*, 2022, 46(5): 557–562.]
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 41366-2022, 畜禽肉品质检测 水分、蛋白质、脂肪含量的测定 近红外法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022. [State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 41366-2022, Livestock and poultry meat quality testing-Determination of moisture, protein and fat-Near-infrared spectroscopy method[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2022.]
- [14] BEKHIT A E D A, HOLMAN B W B, GITERU S G, et al. Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 109: 280–302.
- [15] ZHANG T, LI Y, LUO R, et al. Preliminary investigation on

the relationship between Raman spectra of beef and metmyoglobin and metmyoglobin reductase activity[J]. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2022, 2022: 4117261.

[16] CHEN Q, ZHANG Y, GUO Y, et al. Non-destructive prediction of texture of frozen/thaw raw beef by Raman spectroscopy[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 266: 109693.

[17] CHEN Q, XIE Y, YU H, et al. Application of Raman spectroscopy in a correlation study between protein oxidation/denaturation and conformational changes in beef after repeated freeze-thaw[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2022, 57(1): 719–727.

[18] BAI J, ZANG M, ZOU H, et al. Prediction of the lipid degradation and storage time of chilled beef flank by using Raman spectroscopy and chemometrics[J]. *Food Analytical Methods*, 2022, 15(8): 2213–2223.

[19] YANG H, HOPKINS D L, ZHANG Y, et al. Preliminary investigation of the use of Raman spectroscopy to predict beef spoilage in different types of packaging[J]. *Meat Science*, 2020, 165: 108136.

[20] 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: 128441.

[21] LOGAN B G, HOPKINS D L, SCHMIDTKE L, et al. Preliminary investigation into the use of Raman spectroscopy for the verification of Australian grass and grain fed beef[J]. *Meat Science*, 2020, 160: 107970.

[22] 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: 107652.

[23] 梁荣蓉, 许宝琛, 张一敏, 等. 蛋白质组学在生鲜肉肉色变化机制研究中的应用[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(16): 283–292.

[LIANG R R, XU B C, ZHANG Y M, et al. Application of proteomics in mechanism research of fresh meat color changes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(16): 283–292.]

[24] 张同刚, 罗瑞明, 李亚蕾, 等. 拉曼光谱分析牛肉贮藏过程中肌红蛋白结构的变化[J]. *食品科学*, 2019, 40(7): 15–19. [ZHANG T G, LUO R M, LI Y L, et al. Structural changes of myoglobin during beef storage as analyzed by Raman spectroscopy[J]. *Food Science*, 2019, 40(7): 15–19.]

[25] ESTÉVEZ M. Protein carbonyls in meat systems: A review[J]. *Meat Science*, 2011, 89(3): 259–279.

[26] TAO F, NGADI M. Recent advances in rapid and nondestructive determination of fat content and fatty acids composition of muscle foods[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(9): 1565–1593.

[27] CAMA-MONCUNILL R, CAFFERKY J, AUGIER C, et al. Prediction of Warner-Bratzler shear force, intramuscular fat, drip-loss and cook-loss in beef via Raman spectroscopy and chemometrics[J]. *Meat Science*, 2020, 167: 108157.

[28] ODEYEMI A O, ALEGBELEYE O O, STRATEVA M, et al. Understanding spoilage microbial community and spoilage mechanisms in foods of animal origin[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(2): 311–331.

[29] 何馥娴, 蒙庆华, 唐柳, 等. 高光谱成像技术在水果品质检测中的研究进展[J]. *果树学报*, 2021, 38(9): 1590–1599. [HE F X, MENG Q H, TANG L, et al. Research progress in hyperspectral imaging technology for fruit quality detection[J]. *Journal of Fruit Science*, 2021, 38(9): 1590–1599.]

[30] WU D, SUN D W. Advanced applications of hyperspectral

imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review-Part I: Fundamentals[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 19: 1–14.

[31] 方瑶, 谢天铎, 郭渭, 等. 基于高光谱多参数的冷鲜牛肉品质快速检测技术[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(8): 2572–2577.

[FANG Y, XIE T H, GUO W, et al. On-line fast detection technology of chilled fresh meat quality based on hyperspectral and multi-paramete[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(8): 2572–2577.]

[32] NUBIATO K E Z, MAZON M R, ANTONELLO D S, et al. A bench-top hyperspectral imaging system to classify beef from nelore cattle based on tenderness[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2018, 89: 247–254.

[33] VON-GERSDORFF G J E, KIRCHNER S M, HENSEL O, et al. Impact of drying temperature and salt pre-treatments on drying behavior and instrumental color and investigations on spectral product monitoring during drying of beef slices[J]. *Meat Science*, 2021, 178: 108525.

[34] LIU Y, SUN D W, CHENG J H, et al. Hyperspectral imaging sensing of changes in moisture content and color of beef during microwave heating process[J]. *Food Analytical Methods*, 2018, 11(9): 2472–2484.

[35] 禹文杰, 王彩霞, 乔芦, 等. 基于高光谱成像技术的泾源黄牛肉色度 PLSR 预测模型构建[J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(3): 527–533. [YU W J, WANG C X, QIAO L, et al. Construction of PLSR prediction model for detecting color of Jingyuan yellow beef by hyper spectral technique[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2020, 32(3): 527–533.]

[36] 禹文杰, 王彩霞, 乔芦, 等. 高光谱成像技术对牛肉水分含量及分布的快速检测[J]. *光电子·激光*, 2020, 31(3): 326–333.

[YU W J, WANG C X, QIAO L, et al. Rapid detection of beef moisture content and distribution by hyper-spectral imaging[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2020, 31(3): 326–333.]

[37] ACHATA E M, ESQUERRE C, OJHA K S, et al. Development of NIR-HSI and chemometrics process analytical technology for drying of beef jerky[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 69: 102611.

[38] AHMED M R, REED D D, YOUNG J M, et al. Beef quality grade classification based on intramuscular fat content using hyperspectral imaging technology[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2021, 11(10): 4588.

[39] 乔芦, 贺晓光, 王松磊, 等. 利用高光谱成像技术预测牛肉 pH 值及其空间分布[J]. *河南农业大学学报*, 2020, 54(4): 664–672. [QIAO L, HE X G, WANG S L, et al. Prediction of beef pH value and its spatial distribution using hyperspectral imaging technique[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2020, 54(4): 664–672.]

[40] SONG K, WANG S, YANG D, et al. Combination of spectral and image information from hyperspectral imaging for the prediction and visualization of the total volatile basic nitrogen content in cooked beef[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15(5): 4006–4020.

[41] YANG D, LU A, REN D, et al. Detection of total viable count in spiced beef using hyperspectral imaging combined with wavelet transform and multiway partial least squares algorithm[J]. *Journal of Food Safety*, 2018, 38(1): 12390.

[42] JIANG H, JIANG X, RU Y, et al. Detection and visualization of soybean protein powder in ground beef using visible and near-infrared hyperspectral imaging[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 127: 104401.

- [43] 王彩霞, 何智武, 吴龙国, 等. 高光谱技术结合特征波长筛选的牛肉品种多波段识别[J]. *发光学报*, 2019, 40(4): 520–527. [WANG C X, HE Z W, WU L G, et al. Multi-bands recognition of beef breeds with hyperspectral technology combined with characteristic wavelengths selection methods[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(4): 520–527.]
- [44] DIXIT Y, AL-SARAYREH M, CRAIGIE C R, et al. A global calibration model for prediction of intramuscular fat and pH in red meat using hyperspectral imaging[J]. *Meat Science*, 2021, 181: 108405.
- [45] 朱亚东, 何鸿举, 王魏, 等. 高光谱成像技术结合线性回归算法快速预测鸡肉掺假牛肉[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(4): 184–189. [ZHU Y D, HE H G, WANG W, et al. Quick detection of beef adulteration using hyperspectral imaging technology combined with linear regression algorithm[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(4): 184–189.]
- [46] ZHAO H T, FENG Y Z, 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) hyperspectral imaging[J]. *Meat Science*, 2019, 151: 75–81.
- [47] RADY A, ADEDEJI A A. Application of hyperspectral imaging and machine learning methods to detect and quantify adulterants in minced meats[J]. *Food Analytical Methods*, 2020, 13(4): 970–981.
- [48] MODZELEWSKA-KAPITULA M, JUN S. The application of computer vision systems in meat science and industry-A review[J]. *Meat Science*, 2022, 192: 108904.
- [49] 王伟静, 张松山, 谢鹏, 等. 电子鼻和电子舌快速检测炖制下牛肉的品质[J]. *食品研究与开发*, 2017, 38(17): 124–128. [WANG W J, ZHANG S S, XIE P, et al. Quick detection of the quality of wtewed beef using E-nose and E-tongue[J]. *Food Research and Development*, 2017, 38(17): 124–128.]
- [50] UTAMA D T, JANG A, KIM G Y, et al. Distinguishing aroma profile of highly-marbled beef according to quality grade using electronic nose sensors data and chemometrics approach[J]. *Food Science of Animal Resources*, 2022, 42(2): 240–251.
- [51] SHI H, ZHANG M, ADHIKARI B. Advances of electronic nose and its application in fresh foods: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(16): 2700–2710.
- [52] HU W, WAN L, JIAN Y, et al. Electronic noses: From advanced materials to sensors aided with data processing[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(2): 1800488.
- [53] HAN F, HUANG X, H. AHETO J, et al. Detection of beef adulterated with pork using a low-cost electronic nose based on colorimetric sensors[J]. *Foods*, 2020, 9(2): 193.
- [54] PULLURI K K, KUMAR V N. Qualitative and quantitative detection of food adulteration using a smart E-nose[J]. *Sensors*, 2022, 22(20): 7789.
- [55] SARNO R, TRIYANA K, SABILLA S I, et al. Detecting pork adulteration in beef for halal authentication using an optimized electronic nose system[J]. *IEEE Access*, 2020, 8(2): 21700–21711.
- [56] AVIAN C, LEU J-S, PRAKOSA S W, et al. An improved classification of pork adulteration in beef based on electronic nose using modified deep extreme learning with principal component analysis as feature learning[J]. *Food Analytical Methods*, 2022, 15(11): 3020–3031.
- [57] 卢烽, 张青, 吴纯洁. 电子舌技术在食品行业中的应用及研究进展[J]. *中药与临床*, 2020, 11(5): 60–63, 29. [LU F, ZHANG Q, WU C J. Application and research progress of electronic tongue technology in food industry[J]. *Pharmacy and Clinics of Chinese Materia Medica*, 2020, 11(5): 60–63, 29.]
- [58] 刘梦, 陈松, 张顺亮, 等. 微发酵对牛肉干风味的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(14): 232–239. [LIU M, CHEN S, ZHANG S L, et al. Effect of light fermentation on the flavor of beef jerky[J]. *Food Science*, 2021, 42(14): 232–239.]
- [59] 王兴亚, 庞广昌, 李阳. 电子舌与真实味觉评价的差异性研究进展[J]. *食品与机械*, 2016, 32(1): 213–216, 220. [WANG X Y, PANG G C, LI Y. Research progress on the differences between electronic tongue and real taste evaluation[J]. *Food and Machinery*, 2016, 32(1): 213–216, 220.]
- [60] ESCUDER-GILABERT L, PERIS M. Review: Highlights in recent applications of electronic tongues in food analysis[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2010, 665(1): 15–25.
- [61] LU B, HAN F, AHETO J H, et al. Artificial bionic taste sensors coupled with chemometrics for rapid detection of beef adulteration[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(9): 5220–5228.
- [62] 周天日, 谢莉, 李祥坤, 等. 生物电阻抗测量在畜禽体成分活体检测中的应用研究进展[J]. *中国畜牧杂志*, 2023, 59(7): 70–74. [ZHOU T R, XIE L, LI X K, et al. Advances in application of bio-electrical impedance measurement in livestock and poultry body composition detection[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2023, 59(7): 70–74.]
- [63] ZHANG Z, LI X, TIAN J, et al. A review: Application and research progress of bioimpedance in meat quality inspection[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2022, 45(11): e14153.
- [64] AFONSO J, GUEDES C, SANTOS V, et al. Utilization of bioelectrical impedance to predict intramuscular fat and physico-chemical traits of the beef *Longissimus thoracis et lumborum* muscle[J]. *Foods*, 2020, 9(6): 836.
- [65] AKKUS Z, CAI J, BOONROD A, et al. A survey of deep-learning applications in ultrasound: Artificial intelligence-powered ultrasound for improving clinical workflow[J]. *Journal of the American College of Radiology*, 2019, 16(9): 1318–1328.
- [66] DELGADO-PANDO G, ALLEN P, TROY D J, et al. Objective carcass measurement technologies: Latest developments and future trends[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 111: 771–782.
- [67] 孙宗保, 王天真, 邹小波, 等. 基于超声成像技术的冷鲜与解冻牛肉鉴别方法[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(7): 349–354, 166. [SUN Z B, WANG T Z, ZOU X B, et al. Discrimination of fresh and frozen-thawed beef based on ultrasound imaging[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(7): 349–354, 166.]
- [68] LI Y, WANG W, LONG Y, et al. A feasibility study of rapid nondestructive detection of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in beef based on airflow and laser ranging technique[J]. *Meat Science*, 2018, 145: 367–374.
- [69] 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.
- [70] LI Y, TANG X, SHEN Z, et al. Prediction of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content of chilled beef for freshness evaluation by using viscoelasticity based on airflow and laser technique[J]. *Food Chemistry*, 2019, 287: 126–132.
- [71] SEZER B, BJELAK A, VELIOGLU H M, et al. Identification of meat species in processed meat products by using protein based laser induced breakdown spectroscopy assay[J]. *Food Chemistry*, 2022, 372: 131245.