

牛肉含水率无损快速检测系统研究*

石力安^{1,2} 郭辉^{1,3} 彭彦昆^{1,2} 江发潮^{1,2} 林琬^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 国家农产品加工技术装备研发分中心, 北京 100083;

3. 新疆农业大学机械交通学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 针对影响牛肉品质的主要指标, 开发了基于可见/近红外光谱技术的牛肉含水率品质快速检测系统。阐述了该系统的工作原理、工作过程、硬件组成及软件系统功能。系统的核心是波段分别为 400 ~ 960 nm 和 900 ~ 2 600 nm 的光谱仪, 结合控制器、光纤等辅助装置构成了检测系统的硬件部分。基于 VC++ 语言开发了 Windows 环境下的光谱信息采集和处理的快速无损检测软件。该系统可以实现对牛肉光谱数据的采集、处理、样品品质的快速预测和结果显示。该系统在实验室采集了 57 个牛肉背最长肌的光谱, 分别对可见、近红外和全波段的光谱数据建模, 分析显示全波段预测模型能够更好地预测牛肉的含水率, 其校正相关系数 R_c 和预测相关系数 R_p 分别为 0.96 和 0.88。然后将预测模型固化于在线检测硬件系统中, 在牛肉分割线上采集 84 个样品进行实验验证, 检测正确率为 92.8%。含水率结果表明, 该快速检测装置检测含水率的精度较高, 可靠性较好, 可用于牛肉屠宰分割线对含水率品质参数的快速无损检测。

关键词: 牛肉 含水率 无损检测 快速检测系统

中图分类号: S123; TP274+.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)07-0203-07

Nondestructive Rapid Detection System for Water Content of Beef

Shi Li'an^{1,2} Guo Hui^{1,3} Peng Yankun^{1,2} Jiang Fachao^{1,2} Lin Wan^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. National R&D Center for Agro-processing Equipment, Beijing 100083, China

3. College of Mechanical and Traffic, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Moisture content is considered as an important evaluation index for beef quality. This study focused on development of nondestructive rapid detection system device for assessing beef quality based on VIS/NIR spectroscopy. Working principal and process of the system, hardware composition, and software were introduced. Hardware of detecting system included two spectrometers, handheld probe, control instrument, bifurcated optical fiber, power unit and container. Two spectrometers in the spectral region of 400 ~ 960 nm and 900 ~ 2 600 nm were coupled together for spectral acquisition. The wavelength range of visible and near infrared spectroscopy was covered and the characteristic wavelengths in VIS/NIR band of moisture, protein, fat and other main components of beef were detected by the two spectrometers. Another important part was probe. The handheld probe was designed with two optical channels in order to reduce the effect of light source on fiber probe. One channel was designed with angle of 45° for light source and the other one was designed to be vertical for the fiber probe. Inner surface of the two channels was covered by white barium sulfate to make the light distribution even. The handheld probe was designed to ensure the same distance between the end of fiber probe and the surface of sample. Experiment showed that different samples could be detected by adjusting distance between the end of fiber

收稿日期: 2014-12-05 修回日期: 2015-04-29

* 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201003008)

作者简介: 石力安, 博士生, 主要从事农畜产品品质安全无损检测技术与装备研究, E-mail: stonelsa@cau.edu.cn

通讯作者: 彭彦昆, 教授, 博士生导师, 主要从事农畜产品品质安全无损检测技术与装备研究, E-mail: ypeng@cau.edu.cn

probe and the bottom surface of handheld probe. One end of the bifurcated fiber was connected with handheld probe and the other two were connected with two spectrometers. Software of spectral data collecting and rapid detection was developed by using VC++, and can be run in Windows environment. Main modules of the software included parameter setting module, sample information management module, trigger control module, spectral information acquisition module, quality evaluation module and results display and storage module. The system could collect spectral data, process the data, detect the quality of sample and display the results. First, the system was used to acquire optical data from 57 beef samples of *M. longissimus dorsi*, and build the prediction model of beef moisture content by visible spectra, NIR spectra, full spectra, respectively. The results showed that the prediction model developed by full spectra had the highest accuracy. The correlation coefficient of calibration (R_c) and the correlation coefficient of prediction (R_p) of the prediction model were 0.96 and 0.88, respectively. Then, experiment on the system was done to detect moisture content of beef on the processing line in two beef slaughtering enterprises. In this test, 84 beef ridge samples were extracted for moisture content detection. The detection results from the experiment yielded satisfactory results. Correct rate of non-destructive rapid detection system device testing on moisture content was 92.8%. The result shows that the system can be used for nondestructive rapid detection of beef quality with high accuracy and reliability as well as repeatability.

Key words: Beef Water content Nondestructive detection Rapid detection system

引言

牛肉作为一种营养丰富、味道鲜美的肉类产品越来越受到人们的喜爱,然而我国对牛肉品质检测的技术手段还比较落后,有关其品质安全的负面报道常见诸报端。为了丰富肉类品质检测手段、提高检测水平,国内外科研工作者针对嫩度、持水力、多汁性、含水率、细菌总数等指标的检测方法进行了研究^[1-7],使用了多种检测手段,其中可见/近红外光谱技术可对农产品的多项品质指标进行快速、无损、在线检测^[7-19]。目前基于可见/近红外光谱技术的牛肉品质参数检测方法已有很多相关研究,这些研究表明:400~2500 nm波段对牛肉主要品质指标检测具有较好的效果^[20-26]。

本文以可见/近红外波段光谱仪为核心,开发牛肉主要品质参数快速无损检测系统,并以含水率为主要指标在牛肉分割线上进行实验验证。研究目的是将可见/近红外光谱技术在牛肉品质无损快速检测领域实用化,为牛肉品质的快速无损检测提供技术、设备支持,提高牛肉品质参数的无损检测速率,降低检测成本,促进牛肉品质评级技术进步。

1 检测装置构建

本文研制的快速无损检测系统包括硬件和软件两部分,其中硬件部分的系统结构如图1所示,检测探头通过Y型光纤分别和2个光谱仪相连接,检测探头有一内置卤钨灯光源,由12V直流开关电源供

电。触发控制器的主要部件为单片机,触发开关安装在检测探头上,通过导线与触发控制器相连接。触发控制器通过COM端口与计算机相连,进行触发信号的传输。光谱仪通过USB接口与计算机连接,用于数据传输及为光谱仪供电。

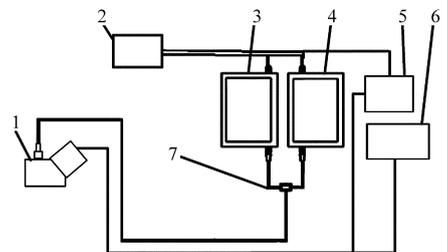


图1 系统结构示意图

Fig. 1 Structure of system

1. 检测探头 2. 计算机 3. 光谱仪(400~960 nm波段) 4. 光谱仪(900~2600 nm波段) 5. 单片机 6. 光源 7. Y型光纤

2 系统硬件

2.1 光谱仪

光谱仪主要用于光谱信息的采集,其性能直接影响系统的检测精度。综合考虑系统的性能和成本等多种因素,采用杭州晶飞科技有限公司生产的FLA4000型(有效波长范围为400~960 nm)和FLA6800型(有效波长范围为900~2600 nm)两款微型光纤光谱仪,由于光谱仪在极限检测区域的信号非常微弱且不稳定,将这部分波长剔除后,2个光谱仪的有效波长动态响应范围为400~2400 nm,基本能够有效地覆盖肉类产品的水分、蛋白质、脂肪等

主要成分在可见/近红外波段内的特征波长信息,可以用于肉类品质、安全等多指标参数的快速无损检测。

2.2 检测探头

探头是检测装置与被测样品直接接触的部件,直接影响到样品信号的采集。为了满足准确采集样本光谱信息的要求,在设计检测探头时应当考虑以下几点:①检测系统主要用于牛肉分割线上对分割后牛肉的检测,由于分割后的牛肉块质量较大,不便于搬运,因此检测探头应设计得小巧、轻便,以便于在分割线上自由选择检测样品和检测部位。②检测探头对标准反射光纤起到支撑、固定的作用,并确保工作时光纤末端距离样本的高度一致。③光纤探头端面到检测样品的表面距离可调,以保证针对不同的作业对象和作业环境下系统能够正常工作。④避免环境光线对光谱数据的影响,并且能够提供足够光强的照明。

检测探头的结构示意图如图 2 所示。

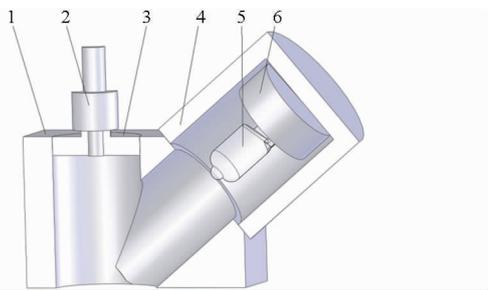


图 2 检测探头结构简图

Fig.2 Structure of detector

1. 底座 2. 光纤探头 3. 光纤探头固定座 4. 光源防护罩 5. 卤钨灯 6. 卤钨灯底座

检测探头主要由底座、光纤探头、光纤探头固定座、光源防护罩、卤钨灯和卤钨灯底座等主要部件组成。在检测探头底座上,与其底面垂直的通道为反射光通道,光线经过样本表面反射后,通过此通道进入到光纤探头中;与其底面呈一定倾斜角度的通道为入射光通道,卤钨灯光源发出的光线通过此通道照射到待测样本表面。入射光通道和反射光通道呈一定角度可以将光源和光纤探头有效隔离开,防止光源的光线直接照射到光纤探头上,以降低光源对检测结果的影响。

在检测探头底座上的入射光通道和反射光通道的内壁上均匀覆盖硫酸钡涂层,可以提高光源照射到样本表面的均匀度,并且可以消除因探测器上的入射光源不均匀分布或光束偏移所造成的误差,从而使样本反射出的光线能够均匀地进入到检测探头当中。

光纤探头通过 SMA905 接口与光纤探头固定座

相连接,光纤探头固定座可以在底座上的反射光通道内上下移动以调节光纤探头至待测样本的距离,光纤探头高度确定后可通过底座侧面的螺钉将光纤探头固定座的位置固定。

检测探头中采用卤钨灯作为光源,其发出的光线能够有效覆盖 380 ~ 2 600 nm 波长范围,卤钨灯的输出功率为 20 W,线性误差小于 0.1%,灯泡寿命达 2 000 h,当光源经过 10 min 预热后,光源性能趋于稳定,漂移在 0.1% 以内。

检测探头中的卤钨灯所发出的光,通过检测探头中的光线通道可以在待测样品表面达到较高的光照强度,从而使检测探头获取更强的样品表面反射光谱信号,在光源有效覆盖 380 ~ 2 600 nm 波长范围内,去除能量不足边缘区间,该光源较强的光谱区间为 400 ~ 2 400 nm,与光谱仪的工作区间基本一致。

3 系统软件

开发的系统软件运行环境为 Windows 系统。检测系统软件采用了模块化的设计思路,主要功能模块如图 3 所示。

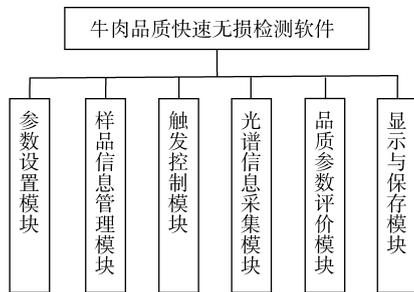


图 3 系统软件功能模块

Fig.3 Function modules of software

检测软件主要完成(光谱仪)参数设置、样品信息管理、品质参数的检测与评价、人机交互(包含触发控制、光谱信息采集 2 个模块)、结果显示与保存等功能。软件操作界面如图 4 所示。

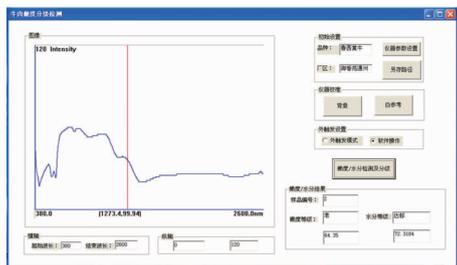


图 4 系统软件界面

Fig.4 Interface of system software

软件中的参数设置模块主要用于对光谱仪的相关参数进行设置,如积分时间、平均次数等;样品信息管理模块可以对样品的品种、产地等信息进行管理,方便用户了解各样品的相关信息;触发控制模块

负责读取检测人员发出的触发信号并将信号传递给计算机,由计算机控制光谱仪进行光谱数据的采集;光谱信息采集模块用于对光谱仪采集的数据进行实时处理,包括对光谱信息进行平滑、多元散射校正等预处理;品质参数评价模块根据所选择的不同参数运用相应的预测模型进行预测,并计算出结果,该结果由显示与保存模块显示在操作界面上,并按照操作人员的要求按照特定格式保存至指定地址或指定文件。

4 系统验证

4.1 样品牛肉含水率

本实验含水率的测量参照 GB 5009.3—2010《食品中水分的测定》。实测 57 个样品牛肉含水率范围为 74.21%~82.50%,包含了 GB 18394—2001《畜禽肉水分限量》中牛肉水分限量指标值。标准差为 2.51%,变异系数为 3.20%。具体数据如表 1 所示。

表 1 样品牛肉含水率

Tab.1 Reference value of beef moisture %

样本数	最大值	最小值	均值	标准差	变异系数
57	82.50	74.21	78.23	2.51	3.20

4.2 建模样品准备

建模实验样本取自超市的牛胴体(西门塔尔牛)背部 12~13 肋骨处的背最长肌,垂直于肌肉纤维方向切成厚度约为 3 cm 表面平整的 57 个肉块。保留结缔组织和脂肪来支撑肌肉纤维,减少运输途中挤压导致的肉块水分流失,切好后放入自封袋,排出空气后封口,贮藏在 4℃ 的冰箱里备用。

样品在空气中放置 30 min 以达到室温,用滤纸吸干样品表面渗出的水,避免入射光在水膜上镜面反射导致的光谱曲线饱和。可见波段积分时间为

30 ms,平均次数 10 次,平滑次数 5 次;近红外波段积分时间 350 ms,平均次数 30 次,平滑次数 5 次。

光谱采集前,用四氟乙烯(PTFE)漫反射白板校正白参考,关闭光源采集黑参考。采集每块样品 4 个不同位置的光谱得到样品的平均光谱,进行 3 d 实验,第 1 天准备 17 个样品,后两天各准备 20 个样品。预处理后所有牛肉样本按 3:1 分成校正集和预测集,分别包含 43 个和 14 个样品。

4.3 可见波段预测模型建立

可见波段原始光谱如图 5 所示,曲线两端的噪声比较大,选取范围在 450~850 nm 的光谱数据建立预测模型。

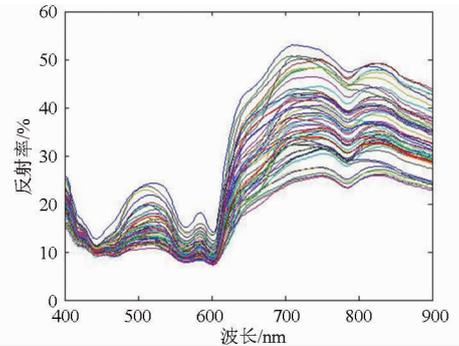


图 5 牛肉样品的可见波段原始光谱

Fig. 5 Original visible spectra of beef samples

光谱曲线进行中值平滑滤波、多元散射校正和变量标准化等预处理,结合偏最小二乘回归法(Partial least square regression, PLSR)进行建模。预测值与标准值的相关系数 R 和均方根误差 RMSE 分别如表 2 和图 6 所示。

表 2 可见波段 PLSR 建模结果

Tab.2 Prediction results of visible band with PLSR

样品集	样品数	R	RMSE
校正集	43	0.89	1.03
预测集	14	0.76	1.51

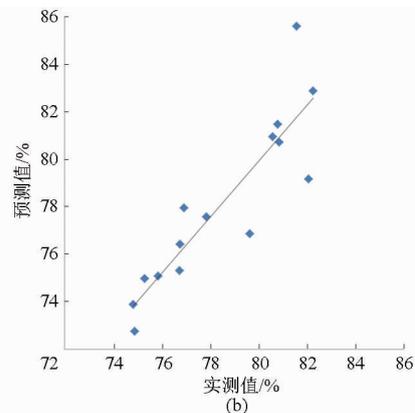
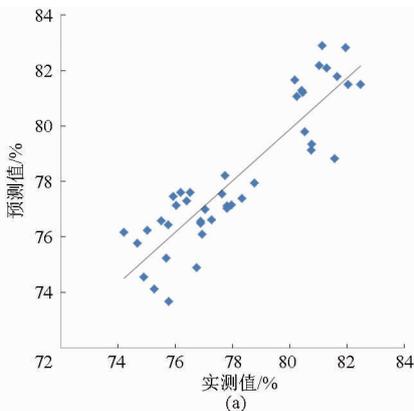


图 6 近红外波段 PLSR 预测模型的结果

Fig. 6 Results of NIR band with PLSR model

(a) 校正集 (b) 预测集

4.4 近红外波段预测模型建立

近红外波段原始光谱如图 7 所示, 曲线两端的噪声比较大, 选取范围在 950 ~ 2 400 nm 的光谱数据建立预测模型。

光谱曲线进行中值平滑滤波、多元散射校正和

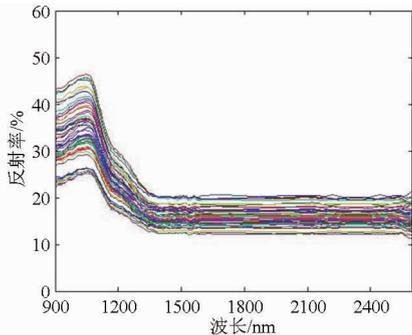


图 7 牛肉样品的近红外波段原始光谱

Fig. 7 Original NIR spectra of beef samples

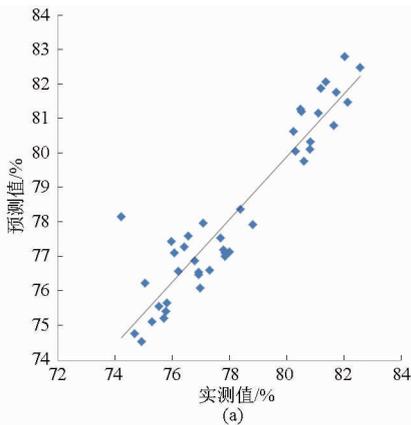


图 8 近红外波段 PLSR 预测模型的结果

Fig. 8 Results of NIR band with PLSR model

(a) 校正集 (b) 预测集

变量标准化等预处理, 结合偏最小二乘回归法进行建模。预测值与标准值的相关系数和均方根误差分别如表 3 和图 8 所示。

表 3 近红外波段 PLSR 建模结果

Tab. 3 Prediction results of NIR band PLSR

样品集	样品数	R	RMSE
校正集	43	0.93	0.95
预测集	14	0.87	1.25

4.5 全波段预测模型建立

提取这 2 个波段波长 900 nm 处左右各 5 个重叠区域数据(共 11 个点), 通过最小二乘法求出最佳链接移动距离, 生成一条 350 ~ 2 600 nm 的反射曲线。实验所采集的 57 个牛肉样品的全波段反射光谱曲线如图 9 所示。

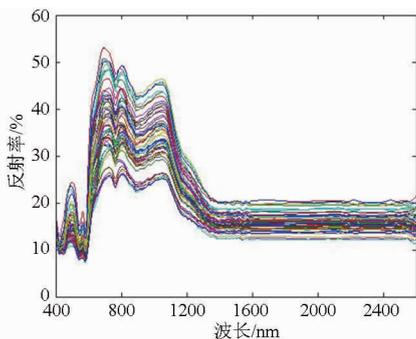
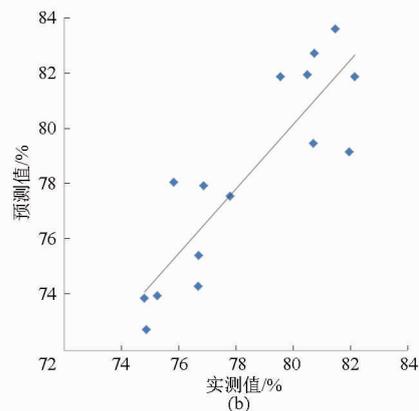


图 9 牛肉样品的全波段原始光谱

Fig. 9 Original full spectra of beef samples

对该光谱曲线进行中值平滑滤波、多元散射校正和变量标准化等预处理, 结合偏最小二乘回归法进行建模。预测值与标准值的相关系数和均方根误差分别如表 4 和图 10 所示。

对比可见波段、近红外波段的牛肉水分预测模型结果, 牛肉水分全波段预测模型的结果较好。而且本系统将添加嫩度、新鲜度等多种牛肉品质参数,

表 4 全波段 PLSR 建模结果

Tab. 4 Prediction results of full band PLSR

样品集	样品数	R	RMSE
校正集	43	0.96	0.84
预测集	14	0.88	1.29

综合考虑最终选用双通道光谱仪同时工作。

4.6 实验验证

为了验证系统的可靠性及准确性, 将本系统应用于肉牛屠宰企业的生产车间进行实际生产实验。实验地点为北京御香苑畜牧有限公司(北京通州)的牛肉分割车间和北京金维福仁清真食品有限公司(北京大兴)的牛肉分割车间。

实验分为两部分。首先在牛肉分割线上对分割后的牛通脊(第 12 ~ 13 肋之间)进行检测, 检测指标为含水率。检测完成后, 在通脊上从被检测一端切下 3 cm 厚的肉块, 用密封袋包装后放入冷藏取样箱中, 然后返回实验室进行相关理化指标的标准值

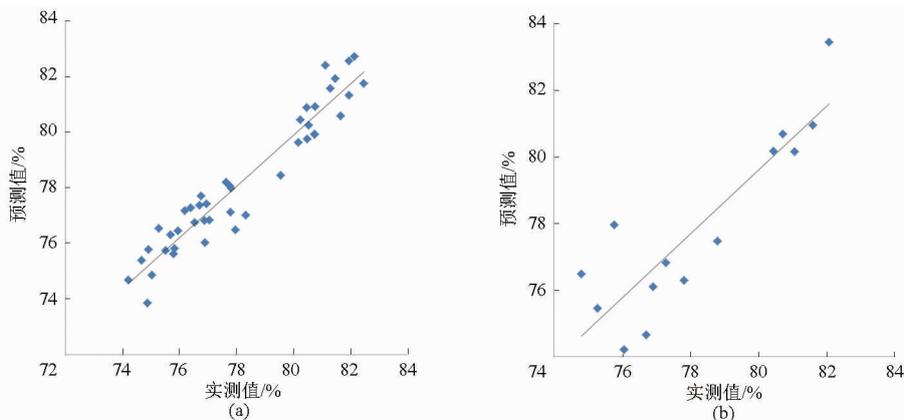


图10 全波段 PLSR 预测模型的结果

Fig. 10 Results of full band with PLSR model

(a) 校正集 (b) 预测集

测定。

在含水率检测中,将牛肉含水率指标分为2个等级:当样本所测含水率不大于77%时,定义样本为“合格”;当样本的含水率大于77%时,定义样本为“不合格”。从分割线上共取回84个通脊样本(御香苑取样57个,金维福仁取样27个)进行含水率的理化标定,分别使用快速检测装置和国标中规定的检测方法,结果对比如表5所示。

表5 含水率实验验证结果

Tab. 5 Results of moisture content test

检测方法	牛肉等级	样品数量/个	错误数量/个	正确率/%
快速检测装置	合格	75	2	92.8
	不合格	9	4	
国标规定方法	合格	77		
	不合格	7		

含水率检测结果表明快速检测系统对含水率的检测正确率为92.8%。现场实验结果表明该牛肉品质参数快速无损检测系统能够较好地对牛肉含水率进行测定并分级。

5 结束语

阐述了牛肉含水率无损快速检测系统架构、功能、检测环境、硬件搭建、软件开发、控制原理及光谱建模。采集西门塔尔牛的背最长肌样本在实验室分析数据,建立含水率的预测模型。通过在肉牛屠宰企业的现场检测含水率,验证了该系统的可行性及可靠性,克服了传统离线检测的非时效性、破坏性、检测指标单一等不足。该系统为牛肉多品质参数的快速无损检测和分级提供了可靠的依据,具有良好的应用前景和社会价值。

参 考 文 献

- Andrés S, Silva A, Soares A L, et al. The use of visible and near infrared reflectance spectroscopy to predict beef M. longissimus thracis et lumborum quality attributes[J]. Meat Science, 2007, 78(3): 217 - 224.
- 唐鸣,徐杨,彭彦昆,等. 基于粒子群聚类的牛肉含水率光谱检测技术[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 220 - 225.
Tang Ming, Xu Yang, Peng Yankun, et al. Water content detecting of beef based on spectral analysis and clustering analysis of PSO algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 220 - 225. (in Chinese)
- 文星,梁志宏,张根伟,等. 基于稳态空间分辨光谱的猪肉新鲜度检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 334 - 339.
Wen Xing, Liang Zhihong, Zhang Genwei, et al. Measurement of pork freshness by steady spatially-resolved spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 334 - 339. (in Chinese)
- 张雷蕾,李永玉,彭彦昆,等. 基于高光谱成像技术的猪肉新鲜度评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 254 - 259.
Zhang Leilei, Li Yongyu, Peng Yankun, et al. Determination of pork freshness attributes by hyperspectral imaging technique[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7): 254 - 259. (in Chinese)
- 田潇瑜,徐杨,彭彦昆,等. 基于光谱技术的牛肉多品质参数快速检测模型[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 171 - 176.
Tian Xiaoyu, Xu Yang, Peng Yankun, et al. Rapid detection model of beef quality based on spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 171 - 176. (in Chinese)
- Prieto N, Andrés S, Gira' ldez F J, et al. Potential use of near infrared reflectance spectroscopy (NIR) for the estimation of chemical composition of oxen meat samples [J]. Meat Science, 2006, 74(3): 487 - 496.
- 朱荣光,姚雪东,高广娣,等. 不同储存时间和取样部位牛肉颜色的高光谱图像检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7): 165 - 169.

- Zhu Rongguang, Yao Xuedong, Gao Guangdi, et al. Hyperspectral imaging detection of beef color under different storage time[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7):165-169. (in Chinese)
- 8 洪添胜,李震,吴春胤,等. 高光谱图像技术在水果品质无损检测中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11):280-285.
Hong Tiansheng, Li Zhen, Wu Chunyin, et al. Review of hyperspectral image technology for non-destructive inspection of fruit quality[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 280-285. (in Chinese)
- 9 彭彦昆,张雷蕾. 农畜产品品质安全高光谱无损检测技术进展和趋势[J]. 农业机械学报,2013,44(4):137-145.
Peng Yankun, Zhang Leilei. Advancement and trend of hyperspectral imaging technique for nondestructive detection of agro-product quality and safety[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(4):137-145. (in Chinese)
- 10 张雷蕾,彭彦昆,刘媛媛,等. 冷却肉微生物污染和肉色变化的 Vis/NIR 光谱无损检测[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):159-164.
Zhang Leilei, Peng Yankun, Liu Yuanyuan, et al. Non-invasive detection to TVC and color of chilled pork based on Vis/NIR spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.1):159-164. (in Chinese)
- 11 赵杰文,王宁,Ngadi M O, et al. Prediction of drip-loss, pH, and color for pork using a hyperspectral imaging technique[J]. Meat Science, 2007, 76(1): 1-8.
- 12 廖宜涛,樊玉霞,伍学千,等. 猪肉 pH 值的可见近红外光谱在线检测研究[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(3):681-684.
Liao Yitao, Fan Yuxia, Wu Xueqian, et al. Online determination of pH in fresh pork by visible/near-infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(3): 681-684. (in Chinese)
- 13 Savenije B, Geesink G H, Van-der-Palen J G P, et al. Prediction of pork quality using visible/near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Meat Science, 2006, 73(1): 181-184.
- 14 郭培源,曲世海,陈岩,等. 猪肉新鲜度的智能检测方法[J]. 农业机械学报,2006,37(8):78-81.
Guo Peiyuan, Qu Shihai, Chen Yan, et al. Study on intellectual detection techniques to freshness of pork[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(8): 78-81. (in Chinese)
- 15 张海云,彭彦昆,王伟,等. 生鲜猪肉主要品质参数无损在线检测系统[J]. 农业机械学报,2013,44(4):146-151.
Zhang Haiyun, Peng Yankun, Wang Wei, et al. Nondestructive real-time detection system for assessing main quality parameters of fresh pork[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(4):146-151. (in Chinese)
- 16 赵杰文,翟剑妹,刘木华,等. 牛肉嫩度的近红外光谱法检测技术研究[J]. 光谱学与光谱分析,2006, 26(4): 640-642.
Zhao Jiewen, Zhai Jianmei, Liu Muhua, et al. The determination of beef tenderness using near-infrared spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(4): 640-642. (in Chinese)
- 17 杨建松,孟庆翔,任丽萍,等. 近红外光谱法快速评定牛肉品质[J]. 光谱学与光谱分析,2010, 30(3): 685-687.
Yang Jiansong, Meng Qingxiang, Ren Liping, et al. Rapid evaluation of beef quality by NIRS technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(3): 685-687. (in Chinese)
- 18 Naganathan G K, Grimes L M, Subbia J. Partial least squares analysis of near-infrared hyperspectral images for beef tenderness prediction[J]. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2008, 2(3):178-188.
- 19 廖宜涛,樊玉霞,伍学千,等. 猪肉肌肉内脂肪含量的可见/近红外在线检测[J]. 农业机械学报,2010,41(9): 104-107, 137.
Liao Yitao, Fan Yuxia, Wu Xueqian, et al. On line prediction of intramuscular fat content in pork muscle with visible/near-infrared spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(9): 104-107, 137. (in Chinese)
- 20 吴建虎,彭彦昆,陈菁菁,等. 基于高光谱散射特征的牛肉品质参数的预测研究[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(7):1815-1819.
Wu Jianhu, Peng Yankun, Chen Jingjing, et al. Study of spatially resolved hyperspectral scattering images for assessing beef quality characteristics[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010,30(7):1815-1819. (in Chinese)
- 21 Shackford S D, Wheeler T L, Koohmarie M. On-line classification of US select beef Carcasses. for longissimus tenderness using visible and near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Meat Science,2005,69(3):409-415.
- 22 Gamal ElMasry, Da-Wen Sun, Paul Allen. Near-infrared hyperspectral imaging for predicting colour, pH and tenderness of fresh beef[J]. Journal of Food Engineering,2012, 110(1): 127-140.
- 23 吴建虎,彭彦昆,江发潮,等. 牛肉嫩度的高光谱检测技术[J]. 农业机械学报,2009,40(12):135-138,150.
Wu Jianhu, Peng Yankun, Jiang Fachao, et al. Hyperspectral scattering profiles for prediction of beef tenderness [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(12):135-138,150. (in Chinese)
- 24 Prieto N, Andres S, Giraldez F J, et al. Ability of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to estimate physical parameters of adult steers (oxen) and young cattle meat samples[J]. Meat Science,2008,79(4):692-699.
- 25 吴建虎,彭彦昆,高晓东,等. 基于 VIS/NIR 高光谱散射特征预测牛肉的嫩度[J]. 食品安全质量检测技术,2009,1(1):20-26.
Wu Jianhu, Peng Yankun, Gao Xiaodong, et al. Prediction of beef tenderness using VIS/NIR hyperspectral scattering characteristics[J]. Food Safety and Quality Detection Technology, 2009,1(1):20-26. (in Chinese)
- 26 郭辉,江发潮,彭彦昆,等. 牛肉品质快速检测装置的设计[J]. 食品安全质量检测学报,2012,3(6):617-620.
Guo Hui, Jiang Fachao, Peng Yankun, et al. Development of a rapid beef quality detection device[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2012, 3(6):617-620. (in Chinese)