

生鲜猪肉主要品质参数无损在线检测系统*

张海云^{1,2} 彭彦昆¹ 王伟¹ 赵松玮¹ Sagar Dhakal¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 山东理工大学机械工程学院, 淄博 255049)

摘要: 基于可见近红外光谱技术,设计了生鲜猪肉品质无损在线检测装置。介绍了该系统的工作原理、工作过程、硬件组成及软件系统功能。系统硬件包括光谱信息采集装置、样品传送单元、位置检测单元、控制单元和计算机等。基于 Delphi 和 Matlab 语言开发了与 PC 硬件和 Windows XP 软件环境兼容的光谱信息自动采集和实时处理的无损在线检测软件系统。该系统可实现生鲜猪肉样品光谱数据的自动采集、光谱数据的在线处理、样品品质参数的在线预测与检测结果的在线显示。将该系统用于生鲜猪肉水分含量的在线检测。结果表明,该在线检测装置检测精度高、可靠性好,可用于肉品主要品质参数的无损在线检测。

关键词: 生鲜猪肉 品质检测 无损 在线系统

中图分类号: S123; TP274.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)04-0146-06

Nondestructive Real-time Detection System for Assessing Main Quality Parameters of Fresh Pork

Zhang Haiyun^{1,2} Peng Yankun¹ Wang Wei¹ Zhao Songwei¹ Sagar Dhakal¹

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

2. College of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Quality parameters of fresh meat play an important role in influencing on consumers' purchasing power and producers' economic benefit. Non-destructive, real-time detection system device for assessing fresh pork quality based on VIS/NIR spectroscopy was developed. Working principal and process of the system, hardware composition, and software system were introduced. Hardware system included spectral data collection device, conveyor belt, position detection sensor, control system and computer. Non-destructive, on-line detection software system with compatibility of PC hardware and Windows XP software environment was developed based on Delphi and Matlab language, with the function of spectrum acquired and processed online. The system could collect spectral data automatically, process spectral data, predict the sample quality and display the detection results on real time basis. Finally, the system was used to detect water content of fresh pork in real time basis. The detection results from the experiment yielded satisfactory results. The experimental result shows that this system can be used for non-invasive detection of meat quality in real time basis with high accuracy and reliability as well as repeatability.

Key words: Fresh meat Quality detection Non-destructive On-line system devices

引言

随着膳食结构的变化和健康意识的提高,肉品

的营养品质和安全品质得到日益关注。肉品品质的传统检测方法有人工感官评定、仪器测量或化学方法测量。这些检测方法存在对样品破坏大、检测效

收稿日期: 2012-08-30 修回日期: 2012-11-09

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAH04B02)和公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(2010033008)

作者简介: 张海云, 博士生, 山东理工大学副教授, 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: zhanghaiyun@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

率低、耗时长、非在线等缺点,与现代检测所要求的快速、准确、实时、无损和在线的发展方向相悖。因此,研究生鲜肉品质快速、无损、在线检测方法,对生鲜肉品质进行安全评定有着重要的经济和社会意义。

可见近红外光谱分析技术因具有分析效率高、样品无需预处理、操作简便、非破坏性、便于实现在线分析等特点,成为一种快速无损的新型检测技术。Woodcock^[1]和徐霞等^[2]在回顾可见近红外光谱分析的应用研究中表明,利用可见近红外光谱技术可实现肉品品质的快速无损检测,包括蛋白质、水分和脂肪等成分含量检测^[3-6],嫩度、大理石花纹、pH 值、新鲜度和细菌总数等品质检测^[7-11],但这些研究都是基于实验室的静态、离线检测。在线检测方面^[12-13],国内外对农产品的在线检测已取得了阶段性的研究成果^[14-15]。但对肉品品质的在线研究还不成熟,Isaksson 等^[16]构建了基于近红外反射仪的肉糜在线检测系统,该系统首次对牛肉糜中脂肪、蛋白质和水分的含量进行了在线检测。在此基础上,其他学者^[17-18]的研究成果证明了可见近红外光谱检测技术用于肉品品质在线无损检测的可行性。但这些在线检测大都是基于肉糜的检测,对生鲜肉品质的在线检测报道较少^[19],并且现有研究大多仅停留在光谱数据的在线采集,而没有实现品质参数的在线预测。特别是国内目前尚未开发出用于生鲜肉品质在线检测的系统和相关设备。

本文基于可见近红外光谱技术,设计一套生鲜猪肉品质在线无损检测系统装置。包括系统总体设计、硬件结构、系统工作流程、软件开发等,并将该系统用于生鲜猪肉水分的在线预测。

1 检测装置总体方案

1.1 工作原理

采用光谱分析技术实现生鲜肉品质参数的在线检测,需要构建基于光谱技术的光谱曲线自动采集和数据处理系统,自动获取放置于生产线上的生鲜肉样品的光谱数据,并对所采集的数据进行实时处理。本文所研制的在线检测装置包括硬件和软件两部分。具体包括光谱信息采集装置、样品传送装置、控制装置、位置检测装置、数据采集和处理单元、计算机等,系统总体结构原理框图如图 1 所示。系统结构示意图如图 2 所示。

1.2 工作过程

系统工作过程如图 3 所示,生鲜猪肉样本放置于传送带上,调速电动机可驱动传送带以不同的速度运行。当光电传感器检测到样品信号后,通过控制器控制调速电动机,同时触发处于硬件外触发模

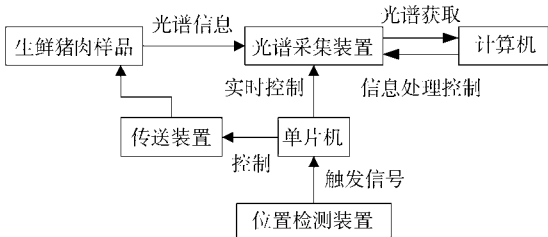


图 1 系统总体原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of whole system structure

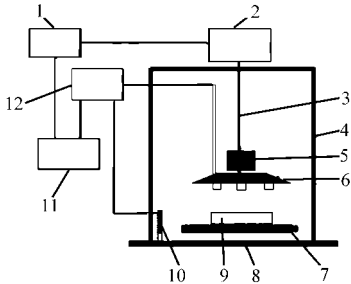


图 2 系统结构示意图

Fig. 2 System diagram

- 1. 光谱仪 2. 复用器 3. 光纤探头 4. 暗箱 5. 光纤夹具
- 6. 卤钨灯 7. 传送带 8. 光学平台 9. 样品 10. 传感器
- 11. 计算机 12. 控制器

式的光谱仪。通过所开发的软件控制进行多个位置光谱数据的采集与保存。光谱信息采集完毕后,传送带继续前进,以等待下一个样品的检测。同时系统软件对所采集的光谱信息进行在线处理,将检测处理结果进行实时显示,并对样品等级进行判断。

2 系统硬件设计

系统中的各个组成部分要相互协调匹配才能采集到高质量的光谱信息、得到客观的检测结果。因此硬件设计的主要任务是:相匹配设备的选择、配套机械装置的设计和对系统各参数的调试确定,从而使整个系统能够协调工作。硬件系统由光谱采集单元、光源单元、位置检测装置、驱动传送装置、控制装置和计算机等组成。

2.1 光谱采集单元

光谱采集单元由光谱仪、复用器、PC 机、光纤探头、光纤探头夹具、光纤支撑装置和光学平台等组成。

光谱仪用于进行光谱信息的采集,是系统的核心部件,其性能参数直接影响系统的功能,如波长范围、信噪比、分辨率等。有效波长范围是其中一个非常重要的参数,根据所检测生鲜猪肉不同品质参数(新鲜度、颜色、水分、细菌总数等)的特征响应波段^[3-6,11]进行选择,以满足多品质参数同时检测的要求。系统所选用的波长范围为 350 ~ 1 100 nm 的可见近红外光纤光谱仪采用线阵 CCD 探测器,光谱

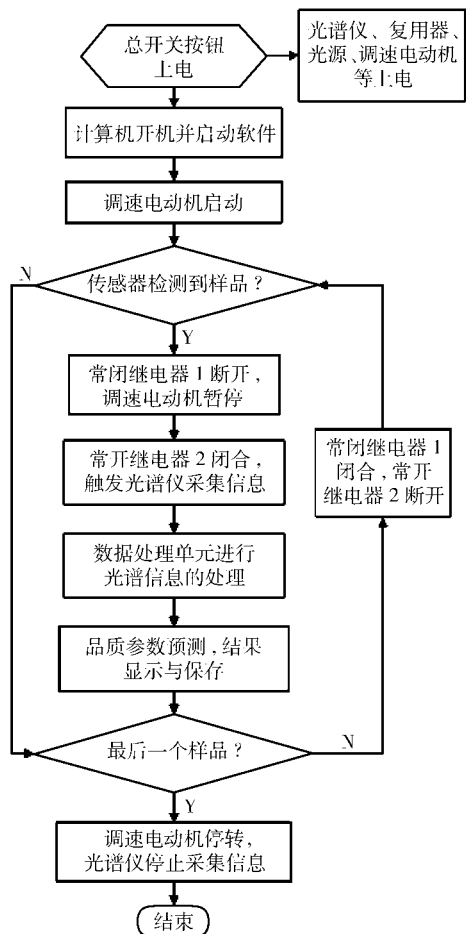


图3 在线检测系统流程图

Fig. 3 Flow chart of online detection system

分辨率为 2.4 nm, 采样间隔为 0.5 nm, 光谱仪与 PC 机之间通过 USB 连接。

为实现样品多点位测量, 系统中采用复用器 (FOM-IR400) 和多根光纤探头进行数据采集, 其间通过 SMA905 接口进行连接。复用器与 PC 机间通过 RS232 串口连接。为保证光谱数据采集时多个光纤探头与样品之间的距离保持一致, 设计了用于固定多条光纤的光纤探头夹具 (图 4)。光纤探头夹具通过支架安装固定在平台上, 其与平台之间的距离可以单独调节。

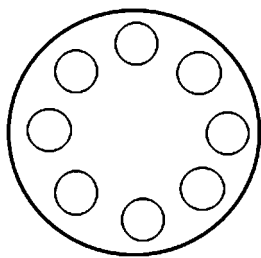


图4 光纤探头夹具

Fig. 4 Holder of optical fiber probe

2.2 光源单元

光源单元由光照暗箱、卤钨灯光源、开关电源及

其固定装置组成, 其功能是为样品光谱信息的采集提供足够的光照强度。基本要求为: 光源的光谱分布范围应覆盖所要检测的品质参数的特征波段范围, 即要覆盖可见近红外区间; 光照强度足够; 光照均匀。光源性能的好坏直接影响光谱信息的采集, 结合已有基础实验研究^[5-6], 本系统采用 4 个 12 V 功率分别为 10 W 的卤钨灯光源, 其有效波长范围为 200 ~ 2 100 nm。4 个卤钨灯均布安装, 光源在样品表面形成均匀光斑。光源固定装置与平台之间的距离可以调节。

为防止外界自然光对光谱数据的影响, 光源及其固定装置、光纤探头及其夹具、光纤支撑环、光学安装平台、光电传感器等安放于光照暗箱中, 如图 2 所示。

2.3 位置检测装置设计

为实现光谱信息的在线采集与检测, 系统通过光电传感器 (3Z-T61 型, OMRONE) 实现样品位置和信号有无的判断。传感器通过传感器支架固定安装在光学平台上, 对称分布在传送带的两侧。该传感器有发射端和接收端, 当有样品经过时, 传感器接收到样品信号, 橙色指示灯亮; 当样品经过后, 橙色指示灯灭, 当下一个样品通过时, 重复该过程。

2.4 驱动传送装置设计

驱动传送装置主要用于实现检测过程中样品的输送。由调速驱动电动机和传送带等组成。传送带有效宽度为 400 mm, 长度为 2 000 mm。为使所设计的系统与企业生产线接轨, 选用调速范围为 10 ~ 3 000 r/min 的调速电动机。工作时, 电动机的转速通过软件或调速旋钮进行调节, 检测过程中电动机的启停由控制器根据检测装置的触发信号进行控制, 以配合光谱仪进行光谱信息的采集。

2.5 控制装置设计

系统各部分的协调运行由控制装置来完成。本系统所设计的控制装置主要由样品位置检测控制、光谱仪触发控制、样品驱动传送装置运行控制等组成。控制装置通过其核心部件单片机接收到位置检测装置所检测到的信号后, 通过各引脚电平的高低变换来实现对光谱仪的触发和传送装置运行的控制。初始时, 常闭继电器 1 闭合, 此时光谱仪处于待触发状态, 而传送带处于运行状态。当有样品经过时, 光电传感器检测到样品信号, 常开继电器 2 闭合, 从而控制光谱仪进行光谱数据的采集。当采集完光谱数据时, 系统还原到初始状态。

另外系统中还设计了一个控制柜, 综合考虑柜体的整体性和操作的方便性, 整个控制柜尺寸为: 650 mm × 500 mm × 1 200 mm (长 × 宽 × 高)。整体

分为两部分,外显部分为人机交互平台,包括显示器、鼠标、键盘、USB 接口和系统功能开关等。系统所需的检测控制部件安装在控制柜内,为保证控制柜在移动过程中各个元器件的安全,各个元器件通过扁铁和螺栓等固定在隔板上。用于通信的光纤和数据线等通过线扎固定,并通过控制柜侧面的穿线孔引出。考虑系统的安装调试、散热和安全性,控制柜设计有带锁的前后门和通风散热窗。

3 系统软件设计

本文开发的生鲜猪肉品质无损在线检测系统以 PC 为硬件平台,开发环境为 Windows XP 系统。软件界面如图 5 所示。

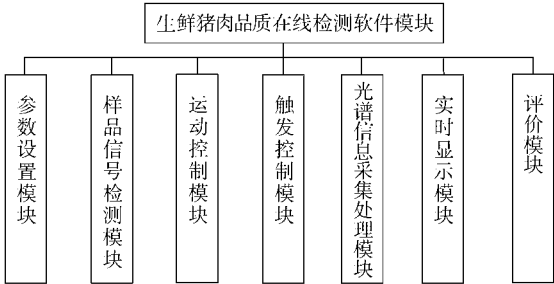


图 6 在线检测软件模块

Fig. 6 Online detection software module

包括光谱数据、光谱曲线、在线检测参数和检测结果的实时显示;评价模块可实时输出评定等级。

4 检测系统验证

将所研制的检测系统装置用于生鲜猪肉样品水分含量的在线检测,以验证该系统在线检测的应用效果。

实验分为两部分,首先将生鲜猪肉样品通过该在线检测系统进行水分含量模型的建立与预测。然后利用所建立的模型对独立样本进行预测,用以验证该检测系统和所建模型的精度和稳定性。

实验所用样本为当天屠宰的不同新鲜猪胴体上的眼肌,取自北京市超市和农贸市场。剔除脂肪或结缔组织,将肉样尺寸修整为 8 cm × 5 cm × 3 cm (长 × 宽 × 厚)的肉块,共取有效样品 73 个(连续实验 6 d)用于模型的建立与预测。另取 24 个样品(连续实验 2 d)作为独立样本集用于系统和模型的验证。实验室温度保持为 26℃。

系统参数设置如下:光谱仪(波长范围 350 ~ 1 100 nm)的积分时间为 30 ms、平均次数为 20 次、平滑次数为 3 次、触发模式为硬件外触发;光纤多路复用器采用第 1 ~ 3 共 3 个通道,轮换顺序为 1、2、3,分别对应 3 条 Y 型光纤探头,两个通道之间的切换时间间隔为 60 ms,延迟时间为 100 ms;传送带运行速度为 0.4 m/s;光纤探头与样品表面之间的距离为 55 mm;光源系统采用 4 个 12 V 功率分别为 10 W 的卤钨灯。

采集光谱前,通过采集标准校正白板采集白参考,通过关闭光源采集黑参考。光谱采集、存储、记录及黑白参考处理运算过程由所开发的生鲜肉品质无损在线检测软件进行。光谱数据采集时,将处理好的样品依次放置在传送带上,打开卤钨灯光源,样品进入光谱采集暗室,当对射式光电传感器检测到样品信号时,传送带暂停,同时触发光谱仪依次对样品表面 3 个不同位置进行光谱数据的采集(其均值为该样品的光谱数据)。

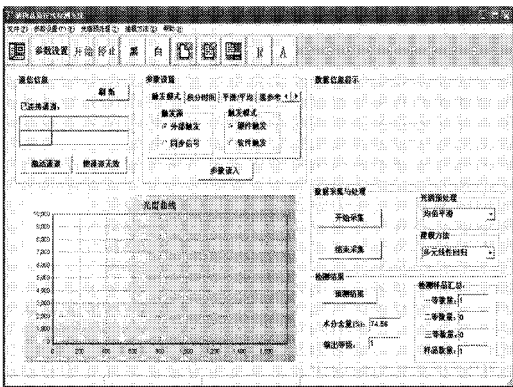


图 5 系统软件界面

Fig. 5 System software interface

系统软件采用开放式、模块化、集成化的设计思路,设计了如图 6 所示的软件结构模式。检测系统主程序主要完成参数设置、光谱信息采集与显示、光谱数据的处理、品质参数的预测与显示、人机交互、文件编辑和管理等功能。下位机完成系统样品信号的检测、输送传送装置的启停、光谱仪触发控制等。软件采用支持可视化编程的、具有灵活强大的数据库管理功能的 Delphi 语言和具有卓越科学计算能力的 Matlab 语言进行混合编程。用 Delphi 语言完成软件界面设计、光谱数据的采集、端口操作和数据管理等模块,用 Matlab 完成较为复杂的数据预处理、建模及参数预测等部分模块。

其中,参数设置模块用于对光谱仪和光纤多路复用器的相关参数进行设置;样品信号检测模块用于检测样品信号有无,将信号传入单片机的信号控制单元,触发控制光谱仪开始进行信息的采集;运动控制模块用于控制传送带的启停;光谱信息采集与处理模块用于控制光谱仪进行数据的实时采集和处理,包括对采集的光谱信息进行平滑、多元散射校正和微分等预处理,对未知样品选择不同的模型和基于所选择模型对所测参数进行预测;实时显示模块

实验所采集的 73 个用于建模的生鲜猪肉样品的反射光谱曲线如图 7 所示。

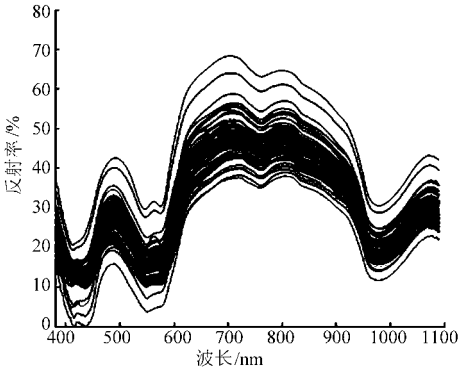


图 7 原始光谱图
Fig. 7 Original spectra

水分理化值含量的测量参照国标 GB 5009.3—2010(食品中水分的测定),作为标准值用于对照。

光谱曲线经预处理模块进行中值平滑滤波、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。将样品随机分为校正集和预测集,对校正集 55 个样品和验证集 18 个样品分别进行预测,预测值与标准值的相关系数(R)和均方根误差(RMSE)分别如表 1 所示。

而其他 24 个未参与建模的独立样本通过植入以上模型对生鲜肉水分含量进行在线预测的结果如表 1 所示。

表 1 PLSR 模型预测结果
Tab. 1 Prediction results of PLSR

	样品集	样品数	R	RMSE
建模样本集	校正集	55	0.909	0.428
	验证集	18	0.903	0.483
独立预测样本集	预测集	24	0.872	0.644

5 结束语

设计的基于可见近红外光谱技术的生鲜猪肉品质在线检测装置,能实现对生鲜猪肉光谱信息的自动采集、处理和分析,以及等级评定与显示的自动化,为生鲜肉品质参数的检测提供了一种快速无损在线检测方法和装置。生鲜猪肉水分含量的在线检测的实验结果说明了该系统的可行性。本系统克服了以往离线检测的不完全性、破坏性和非实时性。该检测系统的成功研制为生鲜肉多品质参数的同时检测和综合在线评定与分级提供了可靠的依据,为工业生产线急需的在线无损检测系统装置的开发和应用提供技术支持,具有良好的应用前景和重要社会价值。

参 考 文 献

1 Woodcock T,Downey G,O'Donnell C P. Better quality food and beverages;the role of near infrared spectroscopy [J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy,2008,16(1):1~29.

2 徐霞,成芳,应义斌. 近红外光谱技术在肉品检测中的应用和研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(7):1 876~1 880.
Xu Xia,Cheng Fang,Ying Yibin. Progress in application of near infrared spectroscopy to nondestructive on-line detection of products/food quality [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2009,29(7):1 876~1 880. (in Chinese)

3 Monroy M,Prasher S L. Pork meat quality classification using visible/near-infrared spectroscopic data [J]. Biosystems Engineering,2010,107(3):271~276.

4 刘魁武,成芳,林宏建,等. 可见/近红外光谱检测冷鲜猪肉中的脂肪、蛋白质和水分含量[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(1):102~105.
Liu Kuiwu,Cheng Fang,Lin Hongjian,et al. Visible/NIR analysis of fat,protein and water in chilled pork[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009,29(1):102~105. (in Chinese)

5 张海云,彭彦昆,王伟,等. 基于光谱技术和支持向量机的生鲜猪肉水分含量快速无损检测[J]. 光谱学与光谱分析,2012,32(10):2 794~2 798.
Zhang Haiyun,Peng Yankun,Wang Wei, et al. Rapid non-destructive detection of water content in fresh pork based on spectroscopy technique combined with support vector machine[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2012,32(10):2 794~2 798. (in Chinese)

6 Zhang Haiyun,Peng Yankun,Wang Wei,et al. Non-destructive detection of water content in fresh pork based on visual/near-infrared spectrum[C]//ASABE 2012 Annual Meeting, Paper No. 121341179, 2012.

7 吴建虎,彭彦昆,江发潮,等. 牛肉嫩度的高光谱法检测技术[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)

8 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)

9 高晓东,吴建虎,彭彦昆,等. 基于高光谱成像技术的牛肉大理石花纹的评估[J]. 农产品加工·学刊,2009(10):33~37.
Gao Xiaodong,Wu Jianhu,Peng Yankun,et al. Analysis of beef-marbling grade using hyperspectral imaging technology[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing·Xuekan,2009(10):33~37. (in Chinese)

10 Wang Wei,Peng Yankun,Zhang Xiaoli. Study on modeling method of total viable count of fresh pork eat based on hyperspectral imaging system[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2010,30(2):411~415.

11 陶斐斐,王伟,李永玉,等. 冷却猪肉表面菌落总数的快速无损检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(12):3 405~3 409.

Tao Feifei,Wang Wei,Li Yongyu,et al. A rapid nondestructive measurement method for assessing the total plate count on chilled pork surface[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2010,30(12):3 405~3 409. (in Chinese)

12 孙通,徐惠荣,应义斌. 近红外光谱分析技术在农产品/食品品质在线无损检测中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2009,29(1):122~126.

Sun Tong,Xu Huirong,Ying Yibin. Progress in application of near infrared spectroscopy to nondestructive on-line detection of products/food quality[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2009,29(1):122~126. (in Chinese)

13 祝诗平,王一鸣,张小超,等. 农产品近红外光谱品质检测软件系统的设计与实现[J]. 农业工程学报,2003,19(4):175~179.

Zhu Shiping,Wang Yiming,Zhang Xiaochao,et al. Design and implementation of near infrared spectroscopy analysis software system for agricultural product quality detection[J]. Transactions of the CSAE,2003,19(4):175~179. (in Chinese)

14 Lu Renfu,Peng Yankun. Development of a multispectral imaging prototype for real-time detection of apple fruit firmness[J]. Optical Engineering,2007,46(12):123 201~123 208.

15 赵杰文,盛伟,邹小波,等. 水果外观质量在线检测系统的软件实现[J]. 农业工程学报,2006,22(6):115~118.

Zhao Jiewen,Sheng Wei,Zou Xiaobo,et al. Software design for fruit appearance on-line inspection system[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(6):115~118. (in Chinese)

16 Isaksson T, Nilsen B N. On-line,proximate analysis of ground beef directly at a meat grinder outlet[J]. Meat Science, 1996,43(3~4):245~253.

17 Hildrum K I, Nilson B N,Westad F,et al. In-line analysis of ground beef using a diode array near infrared instrument on a conveyor belt[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2004,12(6):367~376.

18 O’Farrell M,Wold J P,Hoy M,et al. On-line fat content classification of in homogeneous pork trimmings using multispectral near infrared interactance imaging[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy,2010,18(2):135~146.

19 廖宜涛,樊玉霞,伍学千,等. 猪肉肌肉脂肪含量的可见/近红外光谱在线检测[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)

(上接第 126 页)

10 王晓娇. 牲畜粪便与秸秆混合的厌氧发酵特性及工艺优化[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2010.

Wang Xiaojiao. The mixed biogas fermentation of animals’ waste and corn straw and process optimization [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese)

11 刘丹,李文哲,王忠江. 混和畜禽粪便厌氧发酵技术研究[J]. 农业工程技术:新能源产业,2007(6):11~14.

Liu Dan, Li Wenzhe, Wang Zhongjiang. Technology research on anaerobic fermentation of mix livestock and poultry wastes[J]. Agricultural Industrialization;New Energy Industry, 2007(6):11~14. (in Chinese)

12 刘荣厚,王远远,孙辰. 温度对蔬菜废弃物沼气发酵产气特性影响[J]. 农业机械学报,2009,40(9):116~121.

Liu Ronghou,Wang Yuanyuan,Sun Chen. Effects of temperature on anaerobic fermentation for biogas production from cabbage leaves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(9):116~121. (in Chinese)

13 魏荣荣,成官文,罗介均,等. 不同温度猪粪厌氧发酵甲烷产量和产能实验[J]. 农机化研究,2010,32(4):170~174.

Wei Rongrong, Cheng Guanwen, Luo Jiejun, et al. Experiment on the methane production capacity and energy output of different temperatures during anaerobic digestion of swine manure[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010,32(4):170~174. (in Chinese)

14 王丽丽,王忠江,梁俊爽,等. 20~30℃牛粪厌氧发酵产气特性的试验[J]. 东北农业大学学报,2006,37(6):791~795.

Wang Lili, Wang Zhongjiang, Liang Junshuang, et al. Study on anaerobic fermentation of dairy cattle manure at 20~30℃[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2006,37(6):791~795. (in Chinese)

15 Wua Xiao, Yao Wanying, Zhu Jun, et al. Biogas and CH₄ productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source[J]. Bioresource Technology, 2010,101(11):4 042~4 047.

16 Felipe A M, Parviz S, Hub H J C, et al. Anaerobic codigestion of municipal, farm, and industrial organic waste: a survey of recent literature[J]. Water Environment Research, 2006,78(6):607~636.