

基于近红外高光谱成像的冷鲜羊肉表面细菌总数检测

郭中华^{1,2}, 郑彩英¹, 金 灵¹

(1.宁夏大学物理电气信息学院,宁夏银川 750021;

2.宁夏沙漠信息智能感知重点实验室,宁夏银川 750021)

摘要:细菌总数是反映肉品被污染和腐败状况的重要指标,为寻找快速有效的冷鲜羊肉表面细菌总数无损检测方法,本研究利用近红外高光谱(900~1700nm)成像技术对20d贮藏期内的冷鲜羊肉表面细菌总数进行快速无损检测。由80个样本表面高光谱图像获取目标区域反射光谱,采用多元散射校正和二阶导数相结合(MSC+SD)的方法进行预处理。将用主成分分析法对光谱降维后获得6个特征波长作为输入变量,分别采用偏最小二乘回归(PLS)、误差反向传递神经网络(BP-ANN)和径向基函数神经网络(RBF-ANN)三种方法建立模型对冷却羊肉表面细菌总数进行预测,均取得较好预测结果,其中,神经网络建模效果优于PLS,预测效果最好的是RBF-ANN模型,相关系数 R 为0.9988,均方根误差RMSEP为0.2507。结果表明,NIR高光谱图像技术可用于冷鲜羊肉表面细菌总数的快速无损检测。
关键词:高光谱成像,冷鲜羊肉,细菌总数,无损检测

Measurement of total viable count on chilled mutton surface based on near-infrared hyperspectral imaging technique

GUO Zhong-hua^{1,2}, ZHENG Cai-ying¹, JIN Ling¹

(1.School of Physics and Electronic Information Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2.Ningxia Key Laboratory of Intelligent Sensing for Desert Information, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Total viable count (TVC) is an important index to reflect the contamination and corruption of meat. In order to look for a quick and efficient detection method of TVC on chilled mutton surface, NIR hyperspectral (900~1700nm) imaging technique was applied to the nondestructive detection of TVC on chilled mutton surface, there were 80 samples stored 1 to 20 days in this study. Spectral reflectance curves obtained from the target area of hyperspectral imaging of all samples. Two mixed methods: multiplicative scatter correction adding second derivative (MSC+SD) for pretreatment were used. Then dimensions were reduced by principal component analysis (PCA) to get six characteristic wavelengths as the input variables. Three models were established by using partial least squares (PLS), BP artificial neural network (BP-ANN) and radial basis function artificial neural network (RBF-ANN), all of them had achieved better prediction results, in which the neural network modeling was better than PLS. Overall, the best prediction result was based on the radial basis function artificial neural network (RBF-ANN) model, the correlation coefficient and the root mean square error of prediction were 0.9988 and 0.2507. Therefore, hyperspectral imaging technique could be used for the nondestructive detection of TVC on chilled mutton surface.

Key words: hyperspectral imaging; chilled mutton; total viable count; nondestructive detection

中图分类号: TS251.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2014)20-0066-04

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2014.20.005

我国是羊肉生产大国和消费大国,生产量和消费量均居世界第一。2006年,清真羊肉产业更是被列入宁夏回族自治区四大支柱产业之一,确定了其在农业经济发展中战略性主导地位。2008年,国家农业部发布的《优势农产品区域布局规划》中,宁夏清

真羊肉被确定为全国重点发展的11种优势农产品之一^[1-3]。随着居民生活水平的提高,对健康、营养、安全等重视程度的增加,冷鲜羊肉由于其营养好,风味佳,更是代表了未来羊肉类产品主流方向之一。然而,由于冷链系统不够完善,在贮藏、加工等过程中,冷鲜羊肉表面微生物的大量繁殖不仅使冷却肉的颜色、气味等感官性质发生改变,更会导致病原体、毒素的形成,如假单胞菌、乳酸菌、黄杆菌及肠杆菌等^[4],对人体健康造成危害。传统的肉品表面细菌总数的检测方法效率低、周期长、肉品破损严重,这已

收稿日期: 2014-02-24

作者简介: 郭中华(1973-),男,博士,教授,研究方向: 电路与系统,信号处理与检测。

基金项目: 宁夏自然科学基金课题(NZ14047)。

严重制约着我国羊肉产业的发展^[5]。因此,对于肉类的质量安全控制愈加严格的大环境下,对于准确、高效、简便的监测手段的需求也愈加迫切,快速无损检测技术具有重要现实意义。高光谱图像技术同时具有光谱分辨能力和图像分辨能力,克服了近红外(NIR)光谱技术只能对农产品的光谱信息进行处理,而无法获得被测样的图像信息的局限性^[6],可以同时获取研究对象的外部品质和内部成分信息,是多信息融合检测农产品的首选技术^[7],近年来在农畜产品内外品质检验中成为热点之一,应用高光谱成像处理技术对肉品质检测主要包括禽类表面污染检测^[8-9]、肉类表面大理石花纹^[10-11]、肉类嫩度^[12-13]、新鲜度^[14]及含水量^[15]等方面的检测。在微生物检测方面,陶斐斐等^[16]以冷却猪肉为对象,利用高光谱成像系统(400~1100nm)结合支持向量机的方法,研究其在14d贮藏期内,表面菌落总数与高光谱图像的关系,选取五个最佳波长,采用支持向量机的方法,对猪肉细菌总数进行预测,相关系数 $r=0.87$,取得了较好的预测效果,但相关报道多集中于禽类、猪肉及牛肉等,鲜有对羊肉的研究,且研究使用建模方法较为单一,未作对比研究。本实验选取储藏期内冷鲜羊肉表面为研究对象,对其表面细菌总数进行检测。在近红外高光谱成像系统(900~1700nm波长范围)进行实验,采集样品的光谱和图像数据,获取目标区域反射光谱,确定最佳预处理方法并优选特征波长,结合多种方法建立预测模型加以分析比较,实现冷鲜羊肉表面细菌总数的无损检测,为高光谱成像技术应用于羊肉安全质量实时检测系统开发提供理论依据和技术支持。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

羊肉 宁夏本地羊肉,将采回样本分割为5cm×5cm×2cm(长×宽×厚)的肉块,共计80个样本,装入密封保鲜袋中,置于4℃冰箱中贮存待测,实验期间依次对样本进行标记与编号。

高光谱成像系统(900~1700nm) 主要由高光谱成像光谱仪(Imspector N17E)、CCD相机(Zelos-285GV)、4个35W的卤钨灯(HSIA-LS-TDIF)、暗箱、移动平台(PSA200-11-X)和笔记本电脑等部件组成,光谱分辨率5nm,共256个波段;LRH-150B生化培养箱 广东省医疗器械厂;LDZM-80KSC立式压力蒸汽灭菌锅 上海申安医疗器械厂;HDLAPPARATUS超净工作台 北京东联哈尔仪器制造厂。

1.2 微生物测定

微生物测定参考GB 4789.2-2010食品安全国家标准法^[17]。采用平板计数法对冷鲜羊肉样本表面的细菌总数测定。

1.3 光谱测定

贮藏期20d测量期间,每天随机从4℃冰箱内拿出4个待测样品,将其置于室温下30min后采集样品的高光谱图像。光谱数据采集前系统设置:光谱范围900~1700nm,曝光时间为10ms,曝光速度为15mm/s,扫描宽度为180mm,以确保图像清晰不失真。在采集样本图像之前,为校正相机暗电流和室内照明对图

像的影响,进行黑白校正^[18]。

$$R = (R_0 - D) / (W - D) \quad \text{式(1)}$$

式中,R为校正后的高光谱图像, R_0 为原始高光谱图像,W为白板图像,D为暗图像。后期实验中所用数据的分析均是基于黑白校正后的高光谱图像。

1.4 建模方法

1.4.1 BP-ANN建模 BP神经网络由输入层、隐含层、输出层组成,是一种多层前馈神经网络,信号向前传递,误差向后传播。输入层包含6个节点,确定隐含层节点数为10,迭代次数为1000,目标误差为0.001。

1.4.2 RBF-ANN建模 RBF神经网络属于前向神经网络类型,其基本思想是用RBF作为隐单元的基构成隐藏层空间,隐含层对输入变量进行变换,将低维模式的输入数据变换到高维空间内,使得低维空间内线性不可分的问题在高维空间内线性可分。输入层包含6个节点,隐含层节点数为10。

1.4.3 模型的评价参数 通过模型评价指标相关系数(R)和预测集均方根误差(RMSEP)来评价模型拟合精度和模型的预测能力。R值越接近1,RMSEP值越小,所建模型性能就越好。

1.5 数据处理与统计分析

1.5.1 光谱数据预处理 在光谱信息采集过程中,由于受到测量的条件、环境等因素的影响,光谱中除了样本信息外还包含有噪声信号,因此,在分析数据之前需要对原始光谱进行预处理分析,获得低背景干扰、高信噪比的分析信号,提高模型的检测精度和稳定性。本实验中使用多元散射校正(MSC)、导数法(derivative)、标准正态变量变换(SNV)以及其相结合的算法等十种方法对原始光谱进行预处理。最后代入建立羊肉表面的细菌总数(TVC)建立模型,通过评价指标进行比较分析。

1.5.2 主成分分析提取最优波段 经预处理后光谱,在900~1700nm波长范围,共有256个波段,数据中必然存在大量的冗余信息,通过主成分分析(PCA),去除无关信息,提取有用的信息,降低数据分析的计算量,提高分析模型的精度,找出局部相关系数极大值或极小值所对应的波长作为特征波长。实验中选取的6个局部相关系数极大值和极小值作为特征波长,分别是987、1022、1106、1234、1440、1631nm建立冷鲜羊肉表面TVC预测模型,这6个主成分就能最大限度表征原始光谱的信息。

2 结果与分析

2.1 细菌总数测定

样本的高光谱图像数据采集后,立即对其进行表面细菌总数标准值的获取,按照1:10比例梯度稀释倒平板,恒温培养48h后计数,取对数值作为参考数据,采用平板计数法获得的冷鲜羊肉表面细菌总数的参考值统计如表1所示。共计80个样本,随机分为校正集和预测集,校正集为60个样本,预测集为20个样本,成3:1的比例。

2.2 光谱数据处理与分析

2.2.1 光谱值的获取 高光谱图像数据分析采用ENVI4.6软件平台。对校正后羊肉样本高光谱图像,

表1 贮藏期20d内细菌总数参考测量值统计(log CFU/g)

Table 1 Descriptive statistics for reference measurements in 20 days (log CFU/g)

样品集	样品数	最小值	最大值	平均值	标准差
校正集	60	2.00	11.47	6.45	2.77
预测集	20	2.23	11.30	6.64	2.84

选取它表面一个目标区域ROI并计算平均反射光谱作为样本原始光谱,依次对所有样本进行处理,得到80个样本的原始反射光谱曲线如图1所示。

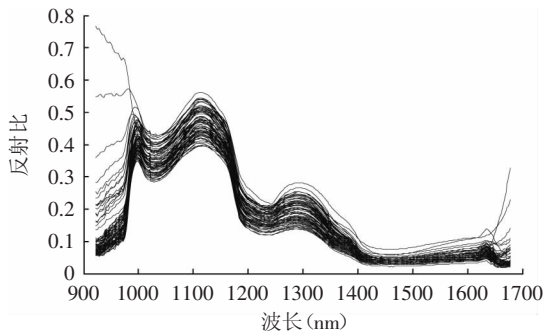


图1 样本表面原始光谱图

Fig.1 Mean reflectance spectrum extracted from the hyperspectral image in ROI for all samples

2.2.2 光谱数据预处理 采用多种方法对原始光谱进行预处理,通过建模评价指标反映,可以得出细菌总数建模的最佳光谱预处理方法为多元散射校正和二阶导数相结(MSC+SD),此预处理方法能够很好地解决由基线漂移、散射等的影响。图2为80样本原始光谱经MSC+SD预处理后所得的光谱图,即TVC建模的最佳预处理光谱图。

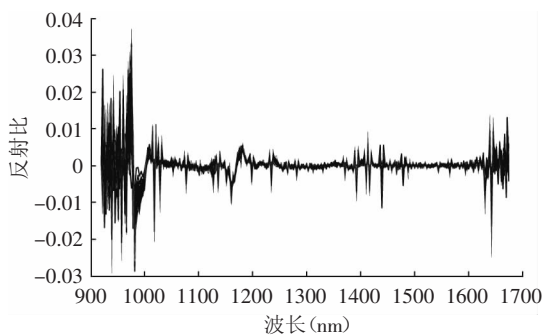


图2 建模最佳预处理光谱图(MSC+SD)

Fig.2 The best preprocessed spectroscopy of prediction model (MSC+SD)

2.3 模型的建立及预测结果

本实验使用PLS及神经网络建立模型并进行预测,比较各种建模方法预测细菌总数的能力。将经MSC+SD预处理及主成分分析提取最优波段后的光谱数据进行建模,依据所建模型对预测集样品进行验证。表2列出了使用PLS、BP-ANN以及RBF-ANN三种建模方法建立的冷鲜羊肉表面细菌总数的预测模型的评价参数数值。由表2可知,三种方法均取得了较好的预测效果,其相关系数(R)分别达到了0.9847、

0.9906和0.9988,预测集均方根误差(RMSEP)分别为0.5414、0.3331和0.2507,且两种神经网络模型评价参数优于PLS。

图3分别给出了经过三种建模方法预测的预测值和实际值之间的关系。从图3中可以看出,当预测值越接近理想预测线,说明其相关性越好,也说明所建模型的精度越高其中,由此可以看出图3(c)所对应的RBF-ANN模型预测值和实际值相关性最好,预测效果最佳,优于其他两种方法。

表2 PLS、BP-ANN和RBF-ANN建模比较

Table 2 Comparison of PLS, BP-ANN and RBF-ANN

参数	PLS	BP-ANN	RBF-ANN
R	0.9847	0.9906	0.9988
RMSEP	0.5414	0.3331	0.2507

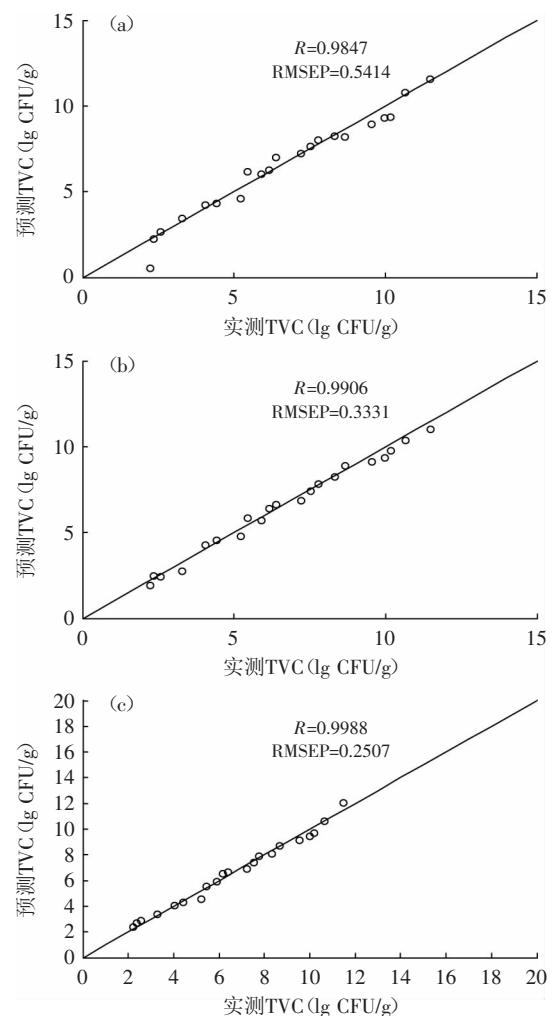


图3 定量模型预测集相关图

Fig.3 Correlation diagram of prediction set in quantitative model
注:实线是理想的预测线,空心的点是预测值;(a)PLS(900~1700nm);(b)BP-ANN(900~1700nm);(c)RBF-ANN(900~1700nm)。

3 讨论

通过三种预测模型PLS、BP-ANN和RBF-ANN与

(下转第81页)

containing O-polysaccharide from *Proteus mirabilis* O40 [J]. Carbohydrate Research, 2005, 340: 1612-1617.

[17] Fan J M, Zhang J S, Tang Q J, et al. Structural elucidation of a neutral fucogalactan from the mycelium of *Coprinus comatus* [J]. Carbohydrate Research, 2006, 341: 1130-1134.

[18] Bao X F, Liu C P, Fang J N, et al. Structural and immunological studies of a major polysaccharide from spores of *Ganoderma lucidum* (Fr.) Karst [J]. Carbohydrate Research, 2001, 332: 67-74.

[19] Kocharova N A, Ovchinnikova O G, Toukach F V, et al. The O-polysaccharide from the lipopolysaccharide of *Providencia stuartii* O44 contains L-quinovose, a 6-deoxy sugar rarely occurring in bacterial polysaccharides [J]. Carbohydrate Research, 2005, 340: 1419-1423.

[20] 杨开, 薛介丰, 金月忠, 等. 松木层孔菌多糖的微波提取和

体外活性研究[J]. 食药菌, 2013, 21(2): 102-107.

[21] Chen H X, Zhang M, Qu Z S, et al. Antioxidant activities of different fractions of polysaccharide conjugates from green tea (*Camellia Sinensis*) [J]. Food Chemistry, 2008, 106: 559-563.

[22] Huang S Q, Ding S D, Fan L P. Antioxidant activities of five polysaccharides from *Inonotus obliquus* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 50: 183-187.

[23] Ma L S, Chen H X, Zhang Y, et al. Chemical modification and antioxidant activities of polysaccharide from mushroom *Inonotus obliquus* [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 89(2): 371-378.

[24] Zhang Y L, Zhang J B, Mo X Y, et al. Modification, characterization and structure-anticoagulant activity relationships of persimmon polysaccharides [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 82(2): 515-520.

(上接第68页)

化学计量方法结合,均取得了较好的预测效果。分析比较可知,由于神经网络通过训练使得误差达到最小,且较好地解决了样本数据的非线性关系,较大的提升了模型的精度,预测效果优于PLS。其中,RBF-ANN由于具有自适应确定、不易陷入局部最小、学习速度快和函数逼近能力强等特点,模型预测效果最好,其相关系数接近1,达到0.9988,而均方根误差RMSEP较小。由此表明,RBF-ANN可以作为近红外高光谱成像技术检测冷鲜羊肉表面细菌总数的有效工具。利用NIR高光谱成像技术检测冷却羊肉表面细菌总数,较之于传统的检测方法,大大缩短了检测时间,对肉品没有破坏,且降低了人为检测因素的影响,大大提升了检测精度,这也将为高光谱成像技术应用于羊肉安全质量实时检测系统开发提供参考。

4 结论

本实验使用近红外高光谱图像技术及化学计量方法,对冷鲜羊肉表面的细菌总数的检测方法进行研究,对预处理后的样品光谱数据进行主成分分析降维。最后分别采用PLS、RBF-ANN和BP-ANN建立冷鲜羊肉表面细菌总数预测模型,结果表明RBF-ANN模型预测效果最好,相关系数达到0.9988,均方根误差为0.2507。说明高光谱图像技术结合化学计量学分析方法能够实现对冷鲜羊肉表面细菌总数的快速、无损检测,为实际的生产和生活提供了重要的理论依据。接下来应扩充实验样本的数量及多样性,考虑结合羊肉内部品质对其进行综合评价,多波段比较分析,进一步完善预测模型。

参考文献

- [1] 陈丽,张德权,王培培,等. 羊胴体产量分级模型初探[J]. 食品科技, 2011, 36(9): 114-118.
- [2] 夏晓平,李秉龙. 我国羊肉产品国际竞争力之分析[J]. 国际贸易问题, 2009(8): 13-15.
- [3] 全国优势农产品区域布局规划(2008~2015年)[N]. 农民日报, 2008-09-12005.
- [4] 李晓波. 微生物与肉类腐败变质[J]. 肉类研究, 2008, 15(9):

41-44.

[5] 周钧,尹建军,侯玉柱,等. 食品中细菌总数快速检测技术的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(12): 276-280.

[6] 吴龙国,何建国,刘贵珊,等. 基于近红外高光谱成像技术的长枣含水量无损检测[J]. 光电子·激光, 2014, 25(1): 135-140.

[7] 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.

[8] Seung C Y, Bosoon P, Kurt C L, et al. Line-scan hyperspectral imaging system for real-time inspection of poultry carcasses with fecal material and ingesta [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011, 79(3): 159-168.

[9] 赵进辉,涂冬成,欧阳静怡,等. 利用高光谱图像技术检测鸡胴体内部粪便污染物[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(3): 573-577.

[10] Qiao J, Ngadimo, Wang N, et al. Pork quality and marbling level assessment using a hyperspectral imaging system [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(1): 10-16.

[11] 高晓东. 基于高光谱成像技术的牛肉大理石花纹的评估[D]. 北京: 中国农业大学, 2009.

[12] 陈全胜,张燕华,万新民,等. 基于高光谱成像技术的猪肉嫩度检测研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2602-2607.

[13] Cluff K, Naganathan G K, Subbiah J, et al. Optical scattering in beef steak to predict tenderness using hyperspectral imaging in the VIS-NIR region [J]. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2008, 2(3): 189-196.

[14] 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.

[15] 刘善梅,李小昱,钟雄斌,等. 基于高光谱成像技术的生鲜猪肉含水率无损检测[J]. 农业机械学报, 2013, 44(S1): 165-170.

[16] 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): 3405-3409.

[17] GB 4789.2-2010, 食品安全国家标准食品微生物学检验 菌落总数测定[S]. 2010.

[18] 黄培贤,姚志湘,粟晖,等. 高光谱图像技术在食品无损检测中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(15): 412-417.