

基于近红外光谱的猪肉水分在线检测与分级

彭彦昆^{1,2} 杨清华^{1,2} 王文秀^{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)

摘要: 基于近红外光谱法, 优化光纤探头检测距离并通过检测距离调节系统和多点同时检测, 设计了猪肉水分在线检测分级系统。首先, 为确定光纤探头与生鲜猪肉样品表面间的最佳检测距离, 在 13 个不同检测距离下 (5 ~ 29 mm) 采集了 54 个样品的光谱, 采用多元散射校正方法对原始光谱进行预处理, 分别建立了第 1 波段 (349 ~ 1 435 nm)、第 2 波段 (1 037 ~ 1 761 nm) 和双波段结合 3 种情况的含水率偏最小二乘回归模型, 分析了不同检测距离和不同波段的模型, 确认 19 mm 为在线检测分级装备的最佳检测距离。然后, 通过检测距离实时调节系统动态固定最佳检测距离, 设计了双波段多点同时检测系统, 采集 45 个猪肉样品在静态条件和在线条件下的光谱, 通过比较分析, 两种情况下预测结果相近, 从而证实了所设计的在线系统能够预测猪肉水分, 并且双波段融合建模效果优于单波段, 预测结果为: 校正集相关系数和校正均方根误差分别为 0.906 和 0.598, 验证集相关系数和预测均方根误差分别为 0.836 和 0.402。最后, 利用独立的 21 个猪肉样品验证猪肉预测分级模型精度及稳定性, 结果判断正确率为 90.48%, 表明可见近红外光谱法结合多点检测能有效地在线检测猪肉水分并分级。

关键词: 猪肉; 含水率; 在线检测; 近红外光谱; 检测距离; 多点同时检测

中图分类号: O657.33; TS207.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)03-0347-07

On-line Detection and Classification of Pork Moisture Based on Near-infrared Spectra

PENG Yankun^{1,2} YANG Qinghua^{1,2} WANG Wenxiu^{1,2}

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

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

Abstract: In order to realize fast, nondestructive and real-time measurement of parameters (moisture) for pork on-line and divide pork into qualified and unqualified class according to GB/T 18394—2010 (pork moisture limit value $\leq 76.5\%$), an on-line detection and classification system was designed and developed based on near infrared reflectance spectra. To determine the detecting distance from the probe to the surface of the sample, optimizing platform was set up, which included spectrum acquisition unit, distance detection unit, light source unit, transmission unit and control unit. NIR spectra (349 ~ 1 761 nm) were obtained from 54 samples with different detecting distances in the range of 5 ~ 29 mm at approximately 2 mm intervals under static conditions. Moisture contents were determined by traditional methods and then related with the spectral information by partial least-squares (PLS) regression models with the first band (349 ~ 1 435 nm), the second band (1 037 ~ 1 761 nm) and double-band. The result showed that a detecting distance of 19 mm was the best to model. Based on optimal distance, spectra were obtained from 45 samples at static state and on-line by adjusting system of detection distance and multi points simultaneous detection, and then two PLS models were established. The optimal correlation coefficients of the model were 0.915 and 0.906, respectively. The two models results were almost the same. It verified the feasibility of predicting pork moisture on-line. In order to verify stability and precision of models for detecting online, NIR spectra were obtained from another 21 samples. The results showed that the NIR spectral range had an excellent ability to predict the content of moisture ($R^2 = 0.8367$) in pork online and classification accuracy was 90.48%. Results indicated that NIR spectroscopy was a promising technique to roughly predict moisture of intact fresh pork on-line.

Key words: pork; moisture; on-line detection; near-infrared spectroscopy; detecting distance; multi-point simultaneous detection

0 引言

随着生活水平提高、膳食结构改善,人们对畜禽生鲜肉的需求量在迅速增加,对肉品的质量要求也在不断提高。其中,猪肉是我国主要畜禽肉品之一,并因其含有丰富的营养物质^[1-3]而深受人们喜爱。含水率是生鲜猪肉品质的一个重要参数,对鲜肉品质、口感等都有直接的影响^[4-6],水分过多或过少都会影响肉的加工、运输和贮藏^[7]。目前,肉品市场上注水肉现象加重,注水肉对消费者的健康生活和饮食安全影响重大,所以对水分超标肉进行有效检测并剔除在当前显得十分重要与紧迫^[8]。传统的干燥法检测水分耗时长,属于破坏性检测,不适用于规模化生产^[9-10]。

近红外光谱技术具有快速、无损、实时、原位等优点,目前,已有许多国内外学者利用该方法对猪肉品质开展了深入研究^[11-16]。BARLOCCO等^[17]在静态条件下使用近红外反射光谱法建立偏最小二乘模型预测猪肉肌脂肪、水分和剪切力,其中水分预测决定系数 R^2 为0.9。LIAO等^[18]基于可见近红外光谱在线单点检测猪肉含水率,建立的偏最小二乘模型预测决定系数为0.832。张海云等^[19]基于近红外技术建立无损在线检测系统,采用多点位轮换探头采集生鲜猪肉样本反射光谱,实现在线检测猪肉品质。上述研究表明了近红外光谱静态及在线条件下检测猪肉水分等品质的可行性,但光谱采集及预测模型建立主要基于静态实验平台,或为在线单点检测,检测结果不具有代表性,或为多点异步检测,单个样品检测时间较长、效率低,并且没有考虑不同样品厚度的影响。在实际生产中,需要更加快速精准的检测方法监控肉品质量。

由于基于光谱的在线检测系统检测精度易受光纤探头检测距离的影响^[20-21],为了减少单个样品检测时间,本文基于近红外光谱技术,构建在线分级装备,优化探头检测距离并采用多点同时采集,建立猪肉在线水分分级模型。首先,基于不同检查距离,在静态条件下采集生鲜猪肉光谱建立模型,通过光谱和模型比较得出最佳检测距离;其次,基于最优检测距离,运用在线多点同时检测,建立水分在线预测模型,实现在线快速无损检测生鲜猪肉水分并将不合格猪肉剔除。

1 实验材料与方法

1.1 材料与试剂

所用材料选用屠宰后经24 h排酸的生鲜猪肉背最长肌部分,用蓄冷装置快速运至实验室,将每个

样品去除结缔组织并修整成尺寸约8 cm × 5 cm × 3 cm(长 × 宽 × 厚)的肉块,分别装入保鲜袋并编号,放置于4℃冰箱中备用,本实验共取有效样品120个,其中54块用于检测距离优化,45块用于模型建立,21块用于在线分级验证。为达到分级目的,需制备注水肉样品扩大含水率范围。将样本静置室温(20℃)后,使用1 mL注射器将水从样本各表面均匀注入,间歇注水,待饱和用滤纸擦拭表面未被肉吸收的水,静置10 min后即可采集光谱。

1.2 实验仪器

基于本实验室前期和他人研究成果^[17,22-24]可知,980 nm和1 440 nm附近的吸收波段与O—H键拉伸和第一泛音有关,为水分吸收峰,因此本文设计了波长范围覆盖短波近红外(Visible/short-wavelength near infrared, Vis/SWNIR)和长波近红外(Longwavelength near infrared, LWNIR)双波段在线检测分级系统。该系统具体包括样品传输单元、到位识别单元、测距单元、高度调整单元、光谱采集和处理单元等。检测系统部件主要由传送带、激光位移传感器、爱万提斯光谱仪(AvaSpec-ULS2048XL型,第1波段349~1 435 nm;AvaSpec-NIR256/512-1.7型,第2波段1 037~1 761 nm)、卤钨灯光源、Y型光纤、可调高度升降台以及计算机等组成。系统中采用2台光谱仪,波段可覆盖短波和长波近红外区域,光谱范围广且光谱信息丰富,能得到更加全面地反映水分特性的有效光谱信息,从而建立稳健的水分预测模型。光谱仪及光源连接方式如图1所示,采用5根Y型光纤探头与5个卤钨灯光源连接并通过圆转线光纤分别接入2台光谱仪,同时使用五点同步采集光谱,获得样品更加全面的光谱信息。

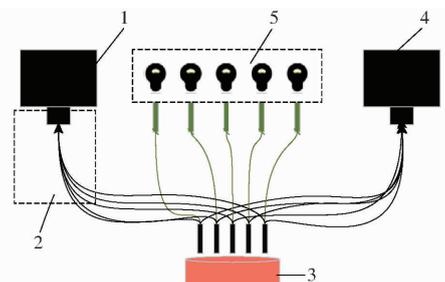


图1 光谱采集单元连接示意图

Fig. 1 Connection diagram of spectral acquisition unit

1、4. 光谱仪 2. 圆转线光纤 3. 检测样品 5. 卤钨灯光源

激光位移传感器和光纤探头由夹具固定,激光位移传感器检测到距离并反馈调节距离后采集光谱。其中光纤探头与生鲜猪肉样品上表面的检测距离计算公式为

$$d = d_2 - d_1 \quad (1)$$

式中 d ——检测距离

d_1 ——激光位移传感器到探头垂直距离, 固定为 10 cm

d_2 ——激光位移传感器到样品表面距离

在线采集时, 样品经过激光位移传感器探测得到 d_2 , 反馈至计算机得到检测距离 d , 再反馈计算机控制部分控制可调高度升降台使 d 达到所需求的高度, 传感器反复执行这一过程保持检测距离一致直到采集光谱, 重复定位精度为 30 μm 。距离优化时, 关闭传送单元并在光纤探头旁安装一个激光位移传感器。静态与在线检测系统结构图如图 2 所示, 分为测距单元、采集单元以及传送单元。

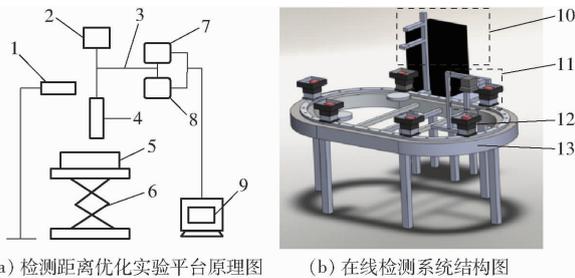


图 2 检测装置工作原理图

Fig. 2 Working principle diagrams of detection device

1. 激光位移传感器 2. 15W 卤钨灯 3. 光纤 4. 光纤探头 5. 生鲜猪肉样品 6、12. 可调高度升降台 7. AvaSpec - UL2048XL 型光谱仪 8. AvaSpec - NIR256 - 1.7 型光谱仪 9. 计算机 10. 光谱采集单元 11. 测距单元 13. 样品传输单元

1.3 光谱采集方法

1.3.1 探头检测距离优化

选定探头到样品表面的检测距离优化范围 5 ~ 29 mm, 每隔 2 mm 取一个检测距离, 共 13 个。采集每个距离下第 1 波段和第 2 波段生鲜猪肉的光谱信息, 所用样品为 54 块。将样品放置在升降台上, 根据激光位移传感器探测到的距离, 计算机控制调节升降台高度使光纤探头与样品上表面检测距离为 10 mm, 采集黑、白参考后即可采集生鲜猪肉样品光谱, 之后距离依次操作, 通过 5 点同时采集到的 5 条光谱取平均值作为该样品的光谱数据。

1.3.2 静态条件与在线条件下的分级模型建立

基于以上优化后的检测距离, 使用 45 块鲜猪肉样品分别于静态条件下和在线条件下采集光谱。将样品静置室温, 擦干表面水分。静态条件下, 确定探头到样品的距离为优化距离, 使用 AvaSoft 7.8 软件采集样品光谱。在线条件下, 激光位移传感器监测光纤探头与猪肉样品上表面距离实时保持为优化距离, 并使用自行开发的软件采集光谱。其中, AvaSpec - ULS2048XL 型光谱仪与 AvaSpec - NIR256 - 1.7 型光谱仪参数设置为: 积分时间

28 ms, 平均次数 5 次, 平滑度设置为 3。

1.3.3 在线检测分级验证

依据 GB/T 18394—2010《畜禽肉水分限量》规定的猪肉含水率限量值为 76.5%, 使用 21 块独立生鲜猪肉进行在线分级验证, 即通过在线水分预测模型分选猪肉, 将含水率大于 76.5% 的猪肉剔除。

1.4 水分理化值分析

水分理化值依据 GB 5009.3—2010《食品中水分的测定》测量作为标准值对照。

1.5 数据分析方法

采用 Matlab 7.0 对数据处理分析。首先, 从光谱采集区域提取样品两波段的反射光谱数据, 两段光谱曲线在 1 037 ~ 1 435 nm 处重叠, 为得到全面的水分光谱信息, 将两波段光谱数据有效融合。关于波段融合方法采用前期王文秀等^[25]提出的最小二乘法重叠区间连接法, 将两条光谱曲线融合为一条完整的曲线。其次, 利用多元散射校正 (Multivariate scattering correction, MSC) 进行预处理, 有效去除光谱散射影响, 使有用的光谱信息显现更加明显。最后, 使用偏最小二乘回归模型 (Partial least square regression, PLSR) 建立第 1 波段、第 2 波段以及双波段融合的水分预测模型, 并分析比较。为评价模型的准确性与稳定性, 本实验引用校正集相关系数 R_c 、校正均方根误差、验证集相关系数 R_p 和预测均方根误差作为模型的评定标准。一般情况下, R_c 、 R_p 越大, 校正均方根误差、预测均方根误差越小, 模型精度越高。

2 结果与讨论

2.1 水分理化值结果分析

本实验共采集 120 个样本, 其中 54 个用于优化距离, 45 个用于建立模型, 21 个用于在线分级验证。样品含水率理化值分析如表 1 所示, 样本集均值分别为 74.61%、75.37%、75.24%, 整体范围内猪肉含水率相对偏高, 最小值为 66.18%, 最大值为 83.18%。

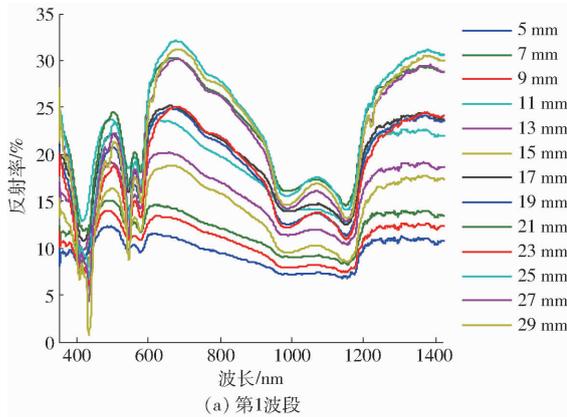
表 1 含水率结果

Tab. 1 Result of water value				%
数量/个	最大值	最小值	均值	标准差
54	83.18	66.18	74.61	4.90
45	82.19	67.35	75.37	4.45
21	80.70	69.60	75.24	3.08

从表 1 可看到, 样品含水率变化范围较大, 并包含验证集水分, 满足建立近红外校正模型基本条件, 样本集含水率最大值大于限量值, 达到了分级要求。

2.2 最佳采集距离确定

基于静态检测系统采集的两波段不同距离下的猪肉原始光谱曲线如图3所示,同一样品不同



距离下采集的光谱曲线差异很大,主要由于检测距离改变,吸收反射有所影响,尤其第1波段受影响较大。

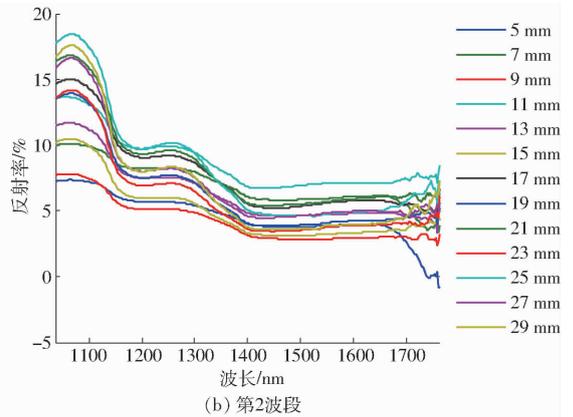


图3 第1波段与第2波段不同距离下的原始光谱曲线

Fig.3 Original spectrum at different distances of the first band and second band

将单波段以及融合波段经过MSC处理后采用PLSR方法分别建立第1波段、第2波段以及双波段的含水率预测模型。图4为不同波段下的校正集与预测集的相关系数散点图,从图中可看到,仅间隔2 mm的检测距离,模型有较大差异,随着检测距离

的增加,不同波段的校正集和验证集相关系数 R_c 和 R_p 都在19 mm处达到最高,并且不同波段影响模型稳定性,可看到双波段下校正集与预测集相关系数最高且整体差距最小,说明双波段下建立模型更加稳定。

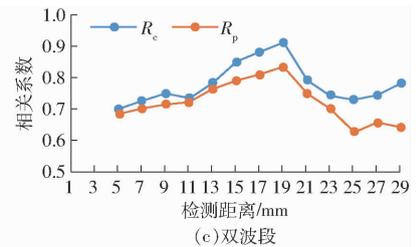
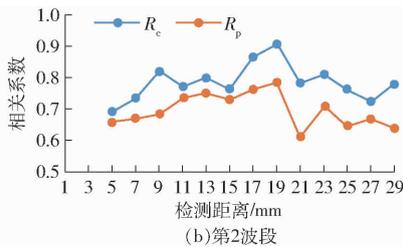
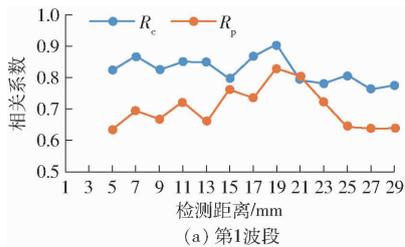


图4 不同波段校正集与验证集相关系数散点图

Fig.4 Correlation coefficient scatter plot of calibration set and prediction set

根据图4结果,挑选出每个波段下建模相关系数最优的模型进行比较,结果如表2所示。从表2可知,在双波段下检测距离为19 mm时,建立的模型最优最稳定,校正集与预测集相关系数分别为0.913和0.838,均方根误差分别为0.259和0.534,故将在线检测分级系统的检测距离定为19 mm。

表2 不同波段和检测距离条件下含水率的PLS模型

Tab.2 PLSR modeling model of moisture content under different detection distances of the first wave band

	较优距离/mm	主因子数	R_c	校正均方根误差	R_p	预测均方根误差
第1波段	19	7	0.907	0.475	0.832	0.707
第2波段	19	10	0.908	0.559	0.786	0.800
双波段	19	8	0.913	0.259	0.838	0.534

2.3 静态与在线水分分级模型建立

分别采集静态和在线系统的猪肉光谱数据,图5a、5b为静态与在线条件下双波段融合后的猪肉

原始光谱曲线,由图可知,动态条件与静态条件下采集的猪肉光谱趋势一致,但由于样品运动过程实时发生位移变化且伴有细微的上下震动而造成曲线噪声较大,为了消除干扰信号影响以及突出光谱中各参数特征信息,需对光谱进行预处理。光谱经MSC处理后如图5c、5d所示,在保留光谱特征峰的同时也消除了光谱散射的影响,变得更加平滑。

在静态条件下,采用原始数据和MSC处理后的数据建立PLS水分预测模型。建模性能如表3所示,利用原始光谱建立的模型性能较差,校正集相关系数最优为0.796,验证集为0.659,经过MSC预处理后,肌肉表面肌肉组织和肌内脂肪组织的不均匀性,以及切面的不平滑等物理特性不同引起的散射差异得到了消除,模型性能有所改善。最优模型为双波段模型,其校正集和验证集相关系数分别为0.915和0.860,相比原始光谱提高了模型的精度,主因子数有所降低。

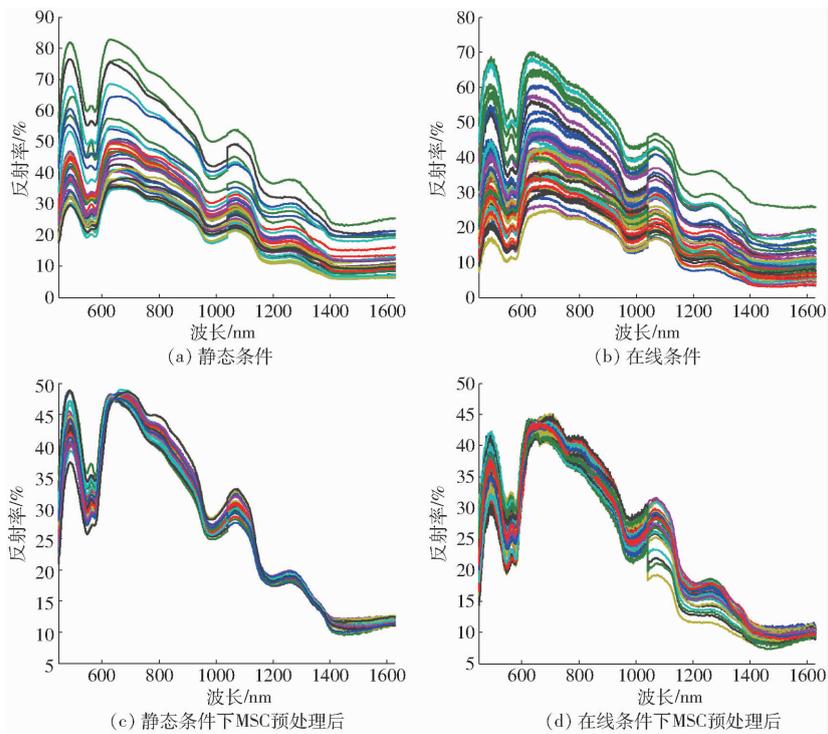


图 5 原始光谱图

Fig. 5 Original spectrograms

表 3 静态条件下 PLS 建模结果

Tab. 3 Results of PLS model under static condition

预处理方法		第 1 波段	第 2 波段	双波段
原始光谱	主因子数	12	11	11
	R_c	0.780	0.774	0.796
	校正均方根误差	2.885	2.594	2.555
	R_p	0.678	0.684	0.659
	预测均方根误差	4.562	5.680	4.669
MSC	主因子数	8	8	7
	R_c	0.903	0.920	0.915
	校正均方根误差	0.249	0.369	0.209
	R_p	0.822	0.805	0.860
	预测均方根误差	0.551	0.461	0.402

表 4 在线条件下 PLS 模型结果

Tab. 4 Results of PLS model under online condition

预处理方法		第 1 波段	第 2 波段	双波段
原始光谱	主因子数	12	12	10
	R_c	0.723	0.707	0.744
	校正均方根误差	2.396	1.096	2.613
	R_p	0.603	0.616	0.687
	预测均方根误差	5.061	3.072	5.321
MSC	主因子数	10	9	7
	R_c	0.817	0.916	0.906
	校正均方根误差	0.498	0.599	0.598
	R_p	0.780	0.795	0.836
	预测均方根误差	0.769	0.461	0.402

在线条件下,采用原始数据和 MSC 处理后的数据建立 PLSR 模型,模型性能如表 4 所示,使用双波段并经过 MSC 处理的模型结果最佳,其校正集相关系数和校正均方根误差分别为 0.906 和 0.598,验证集相关系数和预测均方根误差分别为 0.836 和 0.402,主因子数为 7,与静态系统建模结果基本一致,验证了在线多点同时检测猪肉水分的可行性并证实了检测距离的优化与波段的挑选的作用。

2.4 在线分级验证

为检验在线水分分级模型的精度与可靠性,另取 21 块新鲜猪肉通脊样品,其中 5 块为注水肉样品。将样本静置室温,利用在线采集装置采集反射光谱,通过在线预测模型预测水分并分级,将含水率

超过 76.5% 判为不合格。结果如表 5 所示,判断等级正确 19 个,误判 2 个,正确率为 90.48%,外部验证判断率较高。图 6 为在线水分预测结果,决定系数为 0.836 7,标准分析误差为 0.018 6,表明模型具有一定的稳定性以及预测精度较高。

3 结论

(1) 基于近红外光谱技术,搭建了探头检测距离优化实验平台,采集 13 个不同检测距离下 54 个生鲜猪肉样品的光谱曲线,通过多元散射校正预处理,建立了生鲜猪肉含水率的第 1 波段、第 2 波段和双波段结合的偏最小二乘回归模型,比较分析得出最优检测距离为 19 mm 时模型能够更好的预测猪肉水分,表明检测距离对建模的重要性。

表5 含水率检测结果与预测结果

Tab.5 Results of water content test and prediction

样品序号	真实值/%	实际等级	预测值/%	预测等级
1	76.5	1	78.5	2
2	77.5	2	78.6	2
3	79.6	2	78.0	2
4	78.9	2	79.5	2
5	76.4	1	76.2	1
6	70.9	1	73.4	1
7	76.8	1	76.9	1
8	73.6	1	76.2	1
9	73.2	1	75.4	1
10	74.2	1	77.4	2
11	75.8	1	71.7	1
12	72.1	1	71.8	1
13	69.6	1	68.9	1
14	76.6	2	77.7	2
15	73.3	1	71.3	1
16	80.7	2	81.4	2
17	71.5	1	68.9	1
18	72.8	1	73.4	1
19	80.0	2	78.0	2
20	74.8	1	76.2	1
21	75.4	1	76.1	1

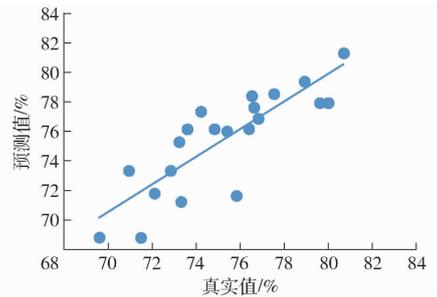


图6 含水率预测结果

Fig.6 Prediction result of water content

(2) 基于最佳检测距离 19 mm, 在线条件下通过距离实时调节系统, 5 点同时采集鲜猪肉样品光谱共 45 条建立水分偏最小二乘预测模型, 得出最佳模型校正集相关系数和验证集相关系数分别为 0.906 和 0.836。

(3) 验证了在线分级模型精度与稳定性。使用 21 个样本外部验证在线分级效果, 通过在线分级系统预测, 判断正确率为 90.48%, 水分预测决定系数为 0.8367, 结果表明该模型能够实现在线实时快速无损检测猪肉水分并分级。

参 考 文 献

- 孙朋朋, 宋春阳. 猪肉品质的评价指标及营养因素对猪肉品质影响的研究进展[J]. 猪业科学, 2014(2):112-114.
- 成芳, 樊玉霞, 廖宜涛. 应用近红外漫反射光谱对猪肉肉糜进行定性定量检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(2):354-359.
CHENG Fang, FAN Yuxia, LIAO Yitao. Qualitative and quantitative detection of minced pork quality by near infrared reflectance spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(2):354-359. (in Chinese)
- BALAGE J M, SILVA S D L E, GOMIDE C A, et al. Predicting pork quality using vis/NIR spectroscopy[J]. Meat Science, 2015, 108:37-43.
- 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)
- 林岩, 郭培源, 王昕琨. 基于近红外光谱的猪肉蛋白质及脂肪含量检测[J]. 食品科技, 2014(2):262-266.
LIN Yan, GUO Peiyuan, WANG Xinkun. Detection of meat protein and fat percentage composition based on near-infrared spectrum [J]. Food Science and Technology, 2014(2):262-266. (in Chinese)
- BARBIN D F, ELMASRY G, SUN D W, et al. Non-destructive determination of chemical composition in intact and minced pork using near-infrared hyperspectral imaging[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2-3):1162-1171.
- 闵连吉. 肉的科学及加工技术[M]. 北京:中国食品出版社, 1988.
- 黄玉萍, 陈桂云, 夏建春, 等. 注水肉无损检测技术现状与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1):207-215.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150130&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.030.
- HUANG Yuping, CHEN Guiyun, XIA Jianchun, et al. Status and trends of nondestructive detection technology for water injected meat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):207-215. (in Chinese)
- 刘伟, 吴昊旻, 孙东东, 等. 近红外光谱分析技术在鲜鸡肉快速检测分析中的应用研究[J]. 中国家禽, 2009, 31(2):8-11.
LIU Wei, WU Haomin, SUN Dongdong, et al. Fast determination of fresh chicken using FT-NIR spectroscopy [J]. China Poultry, 2009, 31(2):8-11. (in Chinese)
- 杨秀娟, 赵金燕, 赵家松, 等. 便携近红外检测仪测定鲜猪肉水分含量的研究[J]. 食品科技, 2012(7):267-270.
YANG Xiujuan, ZHAO Jinyan, ZHAO Jiasong, et al. Study on portable near-infrared detection to measure the moisture content of fresh pork[J]. Food Science and Technology, 2012(7):267-270. (in Chinese)
- 刘媛媛, 彭彦昆, 王文秀, 等. 基于偏最小二乘投影的可见/近红外光谱猪肉综合品质分类[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23):306-313.

- LIU Yuanyuan, PENG Yankun, WANG Wenxiu, et al. Classification of pork comprehensive quality based on partial least squares projection and vis/NIR spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23):306-313. (in Chinese)
- 12 黄伟, 杨秀娟, 曹志勇, 等. 近红外反射光谱快速检测滇南小耳猪肉中水分、粗脂肪及粗蛋白含量的研究[J]. 中国畜牧杂志, 2015, 51(7):73-77.
- HUANG Wei, YANG Xiujuan, CAO Zhiyong, et al. Rapid determination of moisture, crude fat and crude protein content of Diannan small ear in pork by near infrared reflectance spectroscopy[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2015, 51(7):73-77. (in Chinese)
- 13 PRIETO N, JUAREZ M, ZIJLSTRA R T, et al. Rapid authentication of enhanced quality pork by visible and near infrared spectroscopy[J]. Meat Science, 2015, 99(5):149.
- 14 MONROY M, PRASHER S, NGADI M O, et al. Pork meat quality classification using visible/near-infrared spectroscopic data[J]. Biosystems Engineering, 2010, 107(3):271-276.
- 15 廖宜涛, 樊玉霞, 伍学千, 等. 猪肉肌内脂肪含量的可见/近红外光谱在线检测[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9):104-107.
- 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. (in Chinese)
- 16 王文秀, 彭彦昆, 郑晓春, 等. 便携式猪肉营养组分无损实时检测装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9):303-311. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170938&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.038.
- WANG Wenxiu, PENG Yankun, ZHENG Xiaochun, et al. Portable nondestructive detection device for nutrient components of pork [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9):303-311. (in Chinese)
- 17 BARLOCCO N, VADELL A, BALLESTEROS F, et al. Predicting intramuscular fat, moisture and Warner-Bratzler shear force in pork muscle using near infrared reflectance spectroscopy[J]. Animal Science, 2006, 82(1):111-116.
- 18 LIAO Y T, FAN Y X, CHENG F. On-line prediction of fresh pork quality using visible/near-infrared reflectance spectroscopy[J]. Meat Science, 2010, 86(4):901-907.
- 19 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/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(4):146-151. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130426&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.026.
- ZHANG Haiyun, PENG Yankun, WANG Wei, et al. Nondestructive real-time detection system for assessing main quality parameters of fresh pork [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):146-151. (in Chinese)
- 20 王建旭, 范利锋, 赵鹏飞, 等. 基于近红外的鲜肉块水分检测方法研究[C]//农业电气化与信息化工程与学科创新发展学术年会, 2014.
- 21 XUE J, YANG Z, HAN L, et al. Study of the influence of NIRS acquisition parameters on the spectral repeatability for on-line measurement of crop straw fuel properties[J]. Fuel, 2014, 117(1):1027-1033.
- 22 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):2794-2798.
- ZHANG Haiyun, PENG Yankun, WANG Wei, et al. Rapid nondestructive detection of water content in fresh pork based on spectroscopy technique combined with support vector machine[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(10):2794-2798. (in Chinese)
- 23 BRONDUM J, BYRNE D V, BAK L S, et al. Warmed-over flavour in porcine meat—a combined spectroscopic, sensory and chemometric study[J]. Meat Science, 2000, 54(1):83-95.
- 24 COZZOLINO D, MURRAY I. Effect of sample presentation and animal muscle species on the analysis of meat by near infrared reflectance spectroscopy[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2002, 10(1):37-44.
- 25 王文秀, 彭彦昆, 徐田锋, 等. 双波段光谱融合的猪肉多品质参数同时检测方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(12):4001-4005.
- WANG Wenxiu, PENG Yankun, XU Tianfeng, et al. Simultaneous detection of multiple quality parameters of pork based on fused dual band spectral[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(12):4001-4005. (in Chinese)