doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.060

肉品无损检测光学传感器设计与试验

郭庆辉[1,2]　彭彦昆[1,2]　李永玉[1,2]　田文健[1,2]　乔　鑫[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:畜肉品质光谱检测过程中,不同样品之间的厚度差异导致肉品表面到光纤探头的检测距离存在差异,对预测结果影响较大。针对这一问题,设计了一种用于肉品无损检测的光学传感器,并间隔玻璃从下至上对畜肉品质进行检测,消除了样品厚度对检测距离的影响,并分析了光谱曲线随检测距离变化的变化规律。为探究所设计方案的可行性,搭建了试验平台,包括光谱仪、距离调节机构、光源、石英玻璃、光学传感器和计算机,其中石英玻璃可透过 220 ~ 2 500 nm 波长范围的光而无吸收,光学传感器可以帮助采集更多的肉品漫反射光。选择了 18 个猪肉样品贮藏在 4℃环境中,并在不同的冷藏时间取出进行光谱采集(400 ~ 1 100 nm),采用不同的检测距离(8 ~ 22 mm,间隔 2 mm),最后测量样品的挥发性盐基氮(TVB-N)含量。在获得样品光谱数据后,分别用 1 阶导数、多元散射校正(MSC)、标准正态变换(SNV)和 1 阶导数 + SNV 等方法进行预处理,并建立猪肉的 TVB-N 含量的偏最小二乘回归(PLSR)预测模型。结果表明:当检测距离为 16 mm,采用 1 阶导数 + SNV 预处理时,建立的 TVB-N 含量预测模型效果最好,校正集相关系数和均方根误差分别为 0.98 和 0.92 mg/(100 g),预测集相关系数和预测均方根误差分别为 0.97 和 1.56 mg/(100 g)。因此,利用所设计光学传感器对猪肉新鲜度进行检测是可行的。

关键词:猪肉新鲜度;光学传感器;检测距离;可见近红外光谱
中图分类号:O657.33;TS251.51　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)S2-0484-07

Design and Test of Optical Sensor for Meat Non-destructive Detection

GUO Qinghui[1,2]　PENG Yankun[1,2]　LI Yongyu[1,2]　TIAN Wenjian[1,2]　QIAO Xin[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 the spectral detection of livestock products quality and safe, the thickness difference between different samples leads to the difference in the distance between the meat surface and the optical fiber probe, which has a great influence on the prediction results. Aiming at this problem, an optical sensor for nondestructive detection of meat was designed, and the quality of pork (*Longissimus dorsi* muscle) was detected from the bottom to the top through the glass, which eliminated the influence of sample thickness on the detection distance, and the variation law of spectral curve with the change of detection distance was also analyzed. In order to explore the feasibility of the design scheme, a test platform was set up, including spectral acquisition unit, distance control unit, light source, glass, optical sensor and computer. The quartz glass can pass through the wavelength range of 220 ~ 2 500 nm without absorption. And optical sensors can help collect more diffuse light from the meat. Eighteen pork samples were stored at 4℃ and taken out at different refrigeration times for spectral collection (400 ~ 1 100 nm) with different detecting distances in the range of 8 ~ 22 mm at approximately 2 mm intervals. Finally, the TVB-N content of the samples were measured. After obtaining the spectral data of the samples, the methods such as first derivative, multiplicative scattering correction (MSC), standard normal variate (SNV) and first derivative plus SNV were used to pretreat the spectral data of the samples, and the partial least squares regression (PLSR) prediction model of the content of pork's TVB-N was established. The results showed that when the detection distance was 16 mm, the prediction model of pork's TVB-N using the 1st DER plus SNV preprocessing method had the best prediction effect. The

收稿日期:2020-08-10　修回日期:2020-09-18
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1600800)
作者简介:郭庆辉(1993—),男,博士生,主要从事农产品无损检测技术与装备研究,E-mail:guoqinghui0606@163.com
通信作者:彭彦昆(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品无损检测技术与装备研究,E-mail:ypeng@cau.edu.cn

correlation coefficient and RMS error of correction set were 0.98 and 0.92 mg/(100 g), respectively, and the correlation coefficient and RMS error of prediction set were 0.97 and 1.56 mg/(100 g), respectively. Therefore, it was feasible to detect pork freshness with the designed optical sensor.

Key words: pork freshness; optical sensor; detection distance; visible near infrared spectrum

0　引言

猪肉含有 15% 脂肪、20% 的蛋白质、1% 的碳水化合物以及必要的维生素[1]。由于猪肉含有丰富的营养物质和水分，卫生条件和冷藏设施不足容易滋生细菌腐败变质[2]，为保证猪肉安全品质、需要对猪肉的安全品质指标进行检测分类[3]。TVB-N 是指在微生物的作用下，肉品中蛋白质被分解成的氨和胺类化合物等碱性含氮物质，因此，TVB-N 含量是衡量肉品是否腐败变质的重要指标[4]。然而，传统猪肉品质的检测存在检测效率低、检测时间长、样品被破坏等问题[5-7]，因此，研究肉品快速、无损检测方法具有重要意义。

近红外光谱检测方法是利用近红外光(750 ~ 2 500 nm)对含氢基团(—CH、—NH、—OH 等)振动的倍频和合频吸收来分析待测物的化学成分和品质特性[8-9]。目前已经有较多研究利用近红外光谱技术对肉品安全品质进行检测，文献[10]利用可见/近红外反射光谱(400 ~ 1 495 nm)建立猪肉 pH 值、颜色、肌内脂肪含量和剪切力的偏最小二乘(PLSR)模型，取得了一定效果。文献[11]选取了 13 个特征波长对白肌肉、正常肉和黑干肉进行判别，预测正确率分别为 84.62%、94.11% 和 84.62%。由于待检测猪肉样品厚度不一，因此造成光纤探头与猪肉样品之间距离不同，进而对预测结果产生影响，文献[12]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，对猪肉含水率在线预测相关系数和预测均方根误差分别为 0.836 和 0.402%，所研发的距离调节装置可以实现距离的调节，但需要研发更加复杂的调节设备，增加了成本。

本文设计一种用于肉品无损在线检测的光学传感器，并间隔玻璃从下至上对猪肉的 TVB-N 含量进行检测，消除样品厚度对检测距离的影响以及分析光谱曲线随检测距离变化的变化规律。

1　材料与方法

1.1　检测方案及试验平台

1.1.1　检测方案设计

如图 1a 所示为传统近红外光谱检测肉品示意图，在肉样光谱采集过程中，首先打开光源照射肉样，极少部分光发生镜面反射直接反射出去，而大部分光经过漫反射进入样品，经过肉样的吸收、反射、折射和衍射等一部分携带有肉品内部信息的光返回肉样表面经光纤探头被光谱仪采集[13]。由于检测肉样厚度不均匀，因此光纤探头到肉样上表面距离不同。

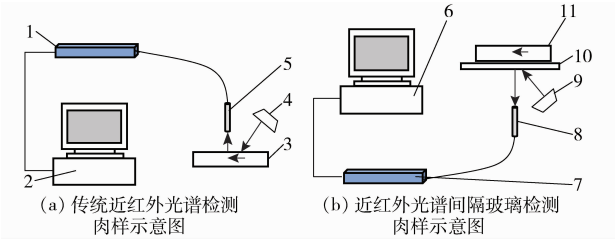

图 1　近红外光谱检测肉样示意图

Fig. 1　Schematics of meat sample detection by near-infrared spectroscopy

1、7. 光谱仪　2、6. 计算机　3、11. 待测肉品　4、9. 光源　5、8. 光纤探头　10. 石英玻璃

为保证光纤探头到肉样表面保持一定距离，提出了一种间隔玻璃检测肉品的检测方案，如图 1b 所示，光源发出光线透射过石英玻璃到达待测肉品并进入到肉品内部，经肉品的吸收、反射、折射和衍射等过程后，一部分携带肉品内部信息的光透过石英玻璃，经光纤探头被光谱仪采集。此外利用近红外光谱检测农畜产品时，要尽可能多地采集携带有农产品内部信息的漫反射光，并避免光源不经过样品直接进入光纤探头及环境光的影响，为此设计了一种光学传感器，可阻止光源发射光不经过肉品直接进入到光纤采集探头，并且所设计的光学传感器可帮助收集更多的携带有肉品内部信息的有用光。

1.1.2　检测试验平台设计

为检验所设计光学传感器及从下往上间隔玻璃检测肉品方案的可行性，搭建了试验平台，并进行试验验证。图 2a 所示为所搭建试验平台三维结构图，主要包括光谱仪、高度调节机构、石英玻璃、光学传感器和光源。其中石英玻璃固定在支架上，光学传感器安装在距离调节机构上，并可进行高度位置调节。整个检测过程，卤钨灯发射光线通过环形光纤和光学传感器透过石英玻璃照射在待测样品上，经样品反射回来的光透射过石英玻璃，经过光学传感器被光谱仪所采集。所设计光学传感器起到防止光照不进入到样品内部而直接进入到采集探头以及帮助采集更多的肉品漫反射光的作用。图 2b 所示为

实际搭建的试验平台,周围用黑色硬纸板封闭,且整体位于暗箱中,以减小外界杂散光的影响。

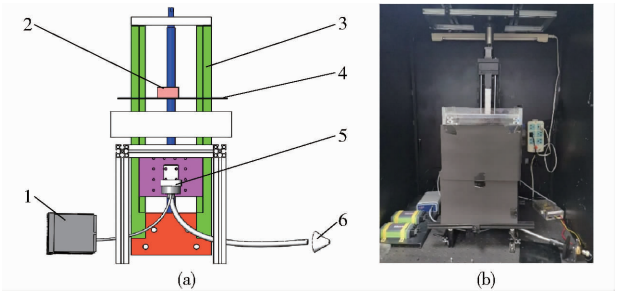

图 2 试验平台结构

Fig. 2 Structure of test platform

1. 光谱仪 2. 肉样 3. 高度调节机构 4. 石英玻璃 5. 光学传感器 6. 光源

1.2 材料

试验材料选择屠宰后经 24 h 冷却排酸的猪肉背最长肌部分,购买后利用低温保温箱迅速运至实验室。在无菌条件下,剔除猪肉皮、脂肪、筋腱等部分,并将样品分割成表面平整,尺寸为 50 mm × 50 mm × 25 mm(长 × 宽 × 厚,约 30 ~ 35 g)的肉块,共 18 块。每个样品分别单独保存于灭菌的自封袋内,且编号后放置于 4℃冰箱中冷藏,样品相互之间无积压,最后用于光谱采集和 TVB-N 含量的测量。

1.3 光谱数据采集

采用图 2 所搭建的试验平台,其中光谱仪型号为 Avaspec - ULS2048XL,可采集 400 ~ 1 100 nm 范围内的光谱数据,所用卤钨灯为 12 V、100 W,石英玻璃型号为 JGS2,可透过 220 ~ 2 500 nm 波长范围的光,透光率大于 92%,对试验影响可忽略不计[14]。采集样品光谱数据前 30 min 打开光谱仪进行预热,同时从冰箱中拿出样品暴露空气中 30 min 冷却到室温(20℃),擦去猪肉表面水分并放在玻璃上。采集过程中手动调节距离调节机构使得光学传感器距离肉品表面 8 mm,然后利用 AvaSoft 7.8 软件进行光谱采集,采集猪肉光谱前先采集黑白参考,光谱数据采集时尽量避开脂肪及结缔组织的区域,每个样品在不同位置采集 3 次取其平均值作为单个猪肉样品的光谱值,然后分别调整光学传感器距离肉品表面距离(10 ~ 22 mm,间隔 2 mm)重复上述操作。单个样品采集完成之后,用酒精擦拭玻璃之后进行第 2 个样品的测量,采集完所有样本光谱之后,进行样本 TVB-N 含量的测量。

1.4 理化值测定

国标中规定,新鲜肉的 TVB-N 含量(质量比)应小于等于 15 mg/(100 g)[15],因此,TNB-N 含量是衡量肉品是否腐败变质的重要指标。本文主要对猪肉中 TVB-N 含量进行预测。

猪肉样品挥发性盐基氮(TVB-N)含量标准值依据国家标准 GB/T 5009.228—2016 所规定的自动凯氏定氮仪法进行测量。所采用仪器为 KDY - 9820 型半自动凯式定氮仪、试管、锥形瓶、BL25B12 型搅拌杯、移液枪等,挥发性盐基氮含量计算方法[16]为

$$X = \frac{14(V_1 - V_2)C}{0.1m} \times 100 \tag{1}$$

式中 X——试样中 TVB-N 的含量,mg/(100 g)

V_1——试液消耗盐酸标准滴定溶液的体积,mL

V_2——对照组空白试剂消耗盐酸标准滴定溶液的体积,mL

C——盐酸标准滴定溶液的浓度,mol/L

m——样品质量,g

1.5 光谱数据处理方法

本检测装置是基于猪肉样品反射光谱,因此选择肉品光谱的反射率作为光谱信息的研究参数。反射率的计算公式[17]为

$$R = \frac{I_0 - I_b}{I_w - I_b} \times 100\% \tag{2}$$

式中 R——检测肉品光谱反射率

I_0——检测肉块所反射的光谱强度

I_w——标准较正白板反射的光谱强度

I_b——标准黑板反射的光谱强度

由于光谱仪在采集光谱数据时容易受到光谱仪、光的散射、猪肉表面平整度及外界环境等因素的影响,因此常伴有噪声。为提高模型的预测能力和稳定性,分别选择标准正态变换(Standard normalized variate, SNV)、多元散射校正(Multiplicative scatter correction, MSC)、1 阶导数(First derivative, 1st DER)和 1 阶导数 + 标准正态变换等方法进行光谱数据预处理。

2 结果与分析

2.1 试验结果分析

制作好的样品每天从冰箱中取出 3 个进行试验,由于前 3 d 样品 TVB-N 含量变化较小,因此间隔 2 d 开始试验。由图 3 可知,所购买的新鲜里脊肉的 TVB-N 初始含量约为 8 mg/(100 g),第 7 天左右,猪肉 TVB-N 含量超过 15 mg/(100 g),变成次新鲜肉或者变质肉,第 8 天 TVB-N 快速增长,样品 TVB-N 含量超过 20 mg/(100 g)。

2.2 光谱数据分析

如图 4 所示为不同距离下所采集的样品原始光谱数据,从图中可以看出,不同冷藏时间猪肉光谱呈现相同的变化趋势。在同一检测距离下,不同冷藏时间猪肉光谱曲线在 450 ~ 600 nm、650 ~ 850 nm 处呈现出较大的差距。不同的检测距离下,不同冷藏

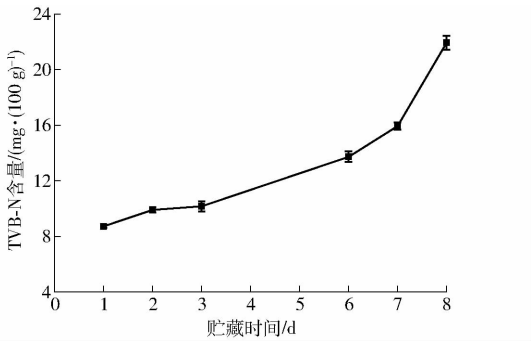

图 3　猪肉 TVB-N 含量随冷藏时间的变化规律

Fig. 3　Variation of TVB-N content of pork during cold storage time

时间猪肉光谱反射率在 650 ~ 850 nm 波段处差异大小不同。且随检测距离的增大，光谱反射率呈现先减小后增大的趋势，这可能与积分时间相关。当检测距离为 8 mm 时，利用参考白板设置最佳积分时间时，有较少的光进入光谱采集探头，因此为达到最佳的效果需要更大的积分时间，而当检测距离为 10 ~ 18 mm 时，所设计光学传感器能收集到更多的参考白板反射光，因此所设置的积分时间也较小；当检测距离大于 20 mm 时，随距离的增大，光学传感器能采集的光减少，因此自动设置的积分时间也增大。由于参考白板校准时符合光反射定律，因此大部分光被垂直反射回光学传感器，而经过样品散射回的光各个方向都存在，更加均匀，所以在文中所选的检测距离下，光学传感器所能采集到的样品散射光差别较小，而不同的检测距离所设置的积分时间呈现先减小后增大的趋势，因此，随检测距离的增大，光谱反射率呈现先减小后增大的趋势。

对不同检测距离下的原始光谱分别采用 SNV、MSC、1 阶导数、1 阶导数 + SNV 等方法进行预处理，检测距离为 16 mm 时平滑后的光谱曲线如图 5 所示：与原始光谱对比，SNV 与 MSC 可消除样品表面颗粒散射带来的影响[18]，光谱矫正后在 460、560、820 nm 有明显的吸收峰；其中 460 nm 为肌肉高铁肌红蛋白吸收峰；560 nm 为氧化肌红蛋白吸收峰；820 nm 为C—H 振动 3 级倍频吸收峰和 C—H 伸缩振动 4 级倍频吸收峰[19-22]。这说明随着冷藏时间的增加，猪肉内蛋白质逐渐分解为 TVB-N。

2.3　预测模型建立

对预处理后的光谱数据建立猪肉 TVB-N 含量

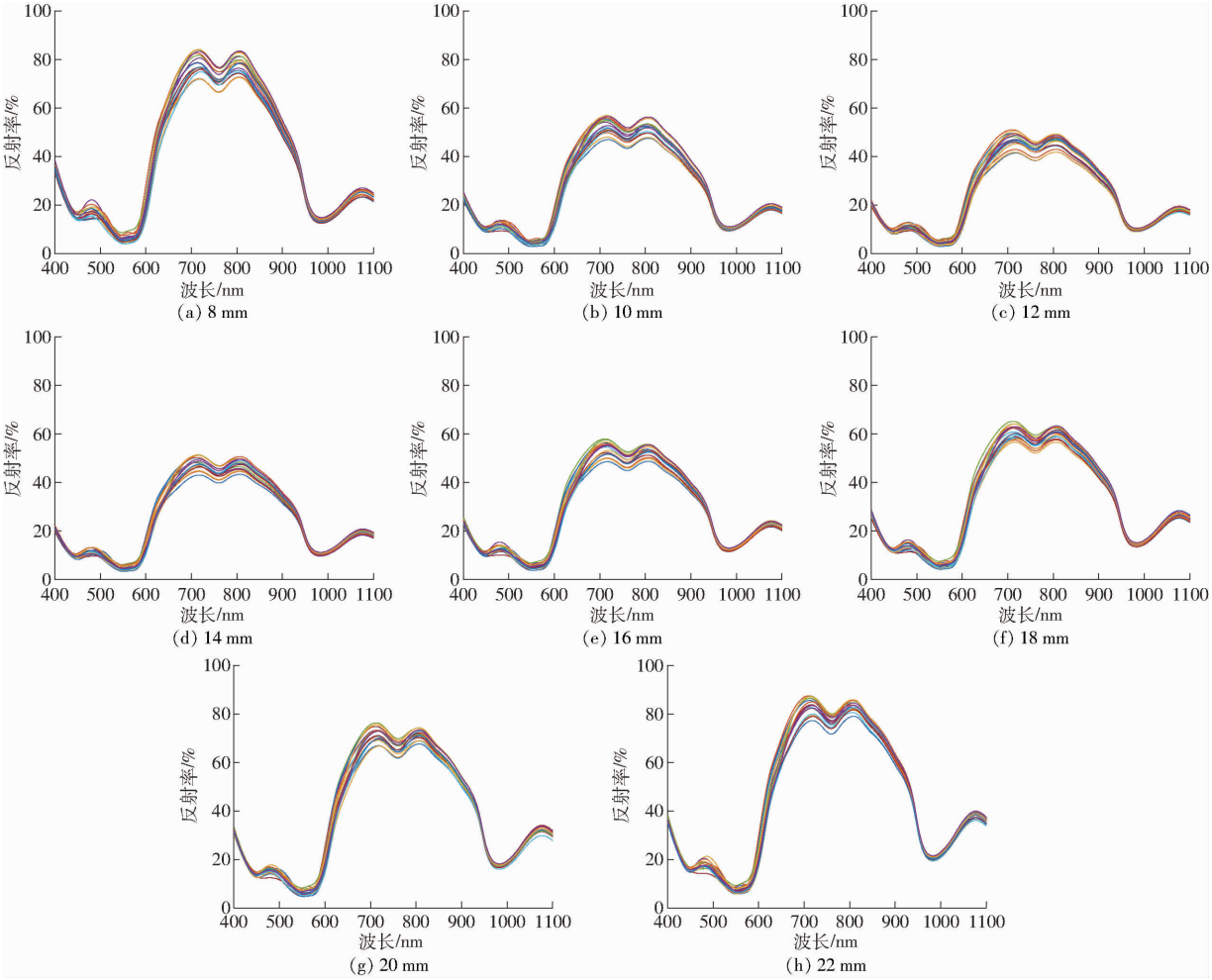

图 4　样品与探头不同距离时的原始光谱曲线

Fig. 4　Original spectral curves of samples at different distances from probe

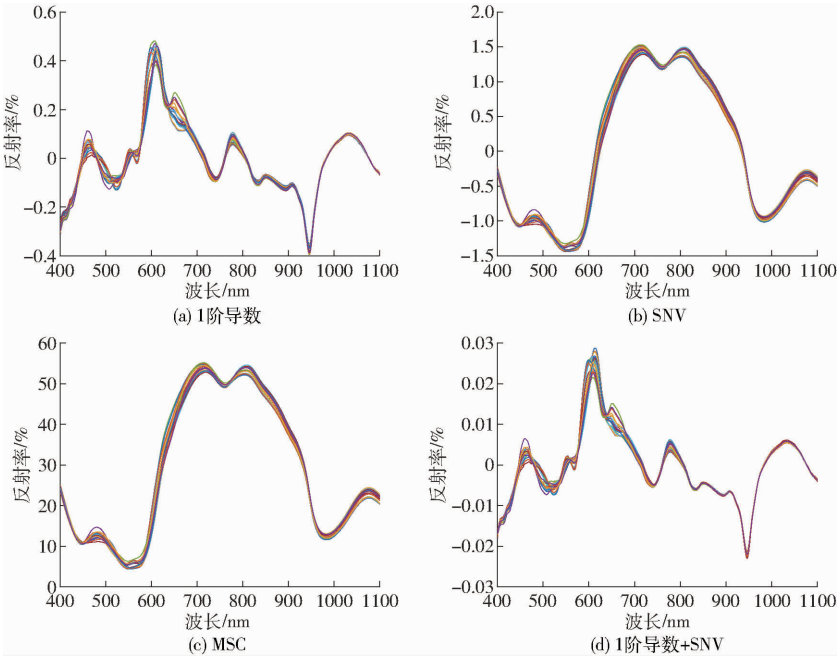

图 5 样品距离探头 16 mm 时不同预处理光谱曲线

Fig. 5 Different pretreatment spectra at 16 mm between sample and probe

的 PLSR 预测模型,建模结果如表 1 所示。从表中可以看出,相同的检测距离之下,采用 SNV 和 MSC 预处理所建立的 PLSR 模型结果基本相同,当检测距离小于 16 mm 且采用 SNV 和 MSC 预处理时所建立的 PLSR 模型效果不好(距离为 12 mm 时除外),当检测距离大于 16 mm 且采用 SNV 预处理时所建立的 PLSR 模型效果最好,这可能是由于 SNV 和 MSC 预处理方法可消除样品表面颗粒带来的影响,而距离较小时,样品表面颗粒散射影响较小,大部分光都能被光学传感器采集,而当距离增大时,样品表面颗粒散射对结果影响增大,因而采用 SNV 预处理时所建立的 PLSR 模型效果较好。不同的检测距离所建立的 PLSR 预测模型效果相差较大,当检测距离从 16 mm 增大到 20 mm 时检测效果明显降低,且随着检测距离的增大,采用不同的预处理方法每个距离最好的预测结果呈现先变好再变差的趋势。

当检测距离为 16 mm 时,预处理方法为 1 阶导数 + SNV 预处理时,所建立的 PLSR 预测模型效果最好,模型校正集相关系数和校正均方根误差分别为 0.98 和 0.92 mg/(100 g),预测集相关系数和预测均方根误差分别为 0.97 和 1.56 mg/(100 g)。这可能是由于在此距离下,光学传感器能收集到最多的光,且随着检测距离的增大,样品表明颗粒散射效应也逐渐增大,因此需要采用 1 阶导数 + SNV 的预处理方法消除基线漂移、背景干扰以及样品表面颗粒大小不均匀带来的散射影响[23]。检测结果相比于文献[2]中的相关系数和均方根误差(0.95 和

表 1 不同预处理方法 TVB-N 含量的 PLSR 建模结果

Tab. 1 Modeling results of PLSR processed by different TVB-N preprocessing methods

检测距离/mm	预处理方式	校正集 R_c	校正集均方根误差/(mg·(100 g)$^{-1}$)	预测集 R_p	预测集均方根误差/(mg·(100 g)$^{-1}$)
8	SNV	0.95	1.48	0.80	2.67
	MSC	0.95	1.48	0.80	2.67
	1 阶导数	0.93	1.78	0.93	1.82
	1 阶导数 + SNV	0.95	1.49	0.93	2.42
10	SNV	0.93	1.65	0.92	2.37
	MSC	0.93	1.65	0.92	2.37
	1 阶导数	0.96	1.27	0.95	2.08
	1 阶导数 + SNV	0.96	1.19	0.95	2.11
12	SNV	0.97	1.10	0.95	2.85
	MSC	0.94	1.49	0.94	2.84
	1 阶导数	0.97	1.05	0.89	3.12
	1 阶导数 + SNV	0.97	1.10	0.90	2.80
14	SNV	0.96	1.23	0.93	2.78
	MSC	0.96	1.20	0.93	2.82
	1 阶导数	0.93	1.64	0.88	2.35
	1 阶导数 + SNV	0.93	1.68	0.91	2.08
16	SNV	0.89	2.08	0.84	2.55
	MSC	0.89	2.07	0.84	2.56
	1 阶导数	0.92	1.70	0.91	2.33
	1 阶导数 + SNV	0.98	0.92	0.97	1.56
18	SNV	0.96	1.22	0.96	1.67
	MSC	0.96	1.22	0.96	1.68
	1 阶导数	0.86	2.49	0.86	2.10
	1 阶导数 + SNV	0.99	0.48	0.95	2.32
20	SNV	0.92	1.70	0.90	1.90
	MSC	0.87	2.44	0.87	2.81
	1 阶导数	0.85	2.48	0.84	2.75
	1 阶导数 + SNV	0.86	2.44	0.84	2.97
22	SNV	0.94	1.47	0.91	1.87
	MSC	0.94	1.47	0.91	1.87
	1 阶导数	0.90	2.01	0.88	2.10
	1 阶导数 + SNV	0.92	1.78	0.90	1.98

2.1 mg/(100 g))有了改善,预测准确率从 0.95 提高到 0.97,均方根误差从 2.1 mg/(100 g)降低到 1.56 mg/(100 g),检测精度得到提升。

图 6 为检测距离 16 mm,采用 1 阶导数 + SNV 预处理时预测结果的散点图。

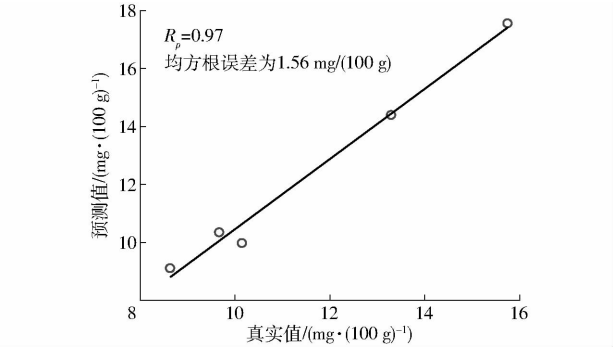

图 6　1 阶导数 + SNV 处理的 PLSR 模型散点图

Fig. 6　Scatter plot of PLSR model processed by first derivative + SNV

3　结束语

畜肉品质光谱检测过程中,针对不同样品之间的厚度差异导致肉品表面到光纤探头的距离存在差异,对预测结果影响较大这一问题,设计了一种用于肉品无损检测的光学传感器,并提出间隔玻璃从下至上对畜肉品质进行检测的检测方案。为验证所设计光学传感器及自下往上间隔玻璃检测方案的可行性,搭建了试验平台并进行试验,通过分析光谱曲线随检测距离变化的变化规律表明,当检测距离小于 16 mm 时,样品表面颗粒大小不均匀带来的散射对建模效果影响较小,当检测距离大于 16 mm 时,样品表面颗粒大小不均匀带来的散射对建模效果影响较大。另外,当检测距离为 16 mm 时,光纤探头可收集到更多的样品散射光,通过 1 阶导数 + 标准正态变换(SNV)预处理方法对原始光谱进行处理后,消除了基线漂移、背景干扰以及样品表面颗粒大小不均匀带来的散射影响,利用预处理之后的光谱曲线建立猪肉 TVB-N 含量的 PLSR 模型,所达到的效果最好,模型校正集相关系数和校正均方根误差分别为 0.98 和 0.92 mg/(100 g),预测集相关系数和预测均方根误差分别为 0.97 和 1.56 mg/(100 g)。因此,利用所设计光学传感器对猪肉新鲜度进行检测是可行的。

参　考　文　献

[1] NGUYEN-VIET H, SUN D W, PHAM-DUC P, et al. Rapid integrated assessment of food safety and nutrition related to pork consumption of regular consumers and mothers with young children in Vietnam[J]. Global Food Security, 2019, 20(3): 37 – 44.

[2] 王文秀, 彭彦昆, 孙宏伟, 等. 基于光谱技术的原料肉新鲜度指标在线检测系统开发及试验[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(4): 1169 – 1176.
WANG Wenxiu, PENG Yankun, SUN Hongwei, et al. Development and test of on-line detection system for meat freshness evaluation based on spectroscopy technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(4): 1169 – 1176. (in Chinese)

[3] BAIANO A. Applications of hyperspectral imaging for quality assessment of liquid based and semi-liquid food products: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 214: 10 – 15.

[4] 邹昊, 田寒友, 刘飞, 等. 近红外光谱的预处理对羊肉 TVB-N 模型的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 180 – 186.
ZOU Hao, TIAN Hanyou, LIU Fei, et al. Effects of spectral pretreatments on prediction of total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in mutton using near infrared spectroscopy[J]. Food Science, 2016, 37(22):180 – 186. (in Chinese)

[5] 张海云, 彭彦昆, 赵玉刚,等. 手持式肉品品质无损检测系统设计[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(8):3192 – 3196.
ZHANG Haiyun, PENG Yankun, ZHAO Yugang, et al. Design of conveyable non-destructive detection system for meat quality[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2017, 8(8):3192 – 3196. (in Chinese)

[6] 黄长平, 朱欣然, 张辰璐, 等. 猪肉新鲜度光谱特征指数构建及敏感性分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(2): 552 – 558.
HUANG Changping, ZHU Xinran, ZHANG Chenlu, et al. Pork freshness spectral feature index: development and sensitivity analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(2): 552 – 558. (in Chinese)

[7] 沈啸, 唐修君, 樊艳凤, 等.近红外光谱技术在肉类品质评价中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(21): 7260 – 7264.
SHEN Xiao, TANG Xiujun, FAN Yanfeng, et al. Appication of near infrared spectroscopy in meat quality evaluation[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2019, 10(21): 7260 – 7264. (in Chinese)

[8] 王凡, 李永玉, 彭彦昆, 等. 马铃薯多品质参数可见/近红外光谱无损快速检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(12): 3736 – 3742.
WANG Fan, LI Yongyu, PENG Yankun, et al. Multi-parameter potato quality non-destructive rapid detection by visible near-infrared spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(12): 3736 – 3742. (in Chinese)

[9] 王文秀, 彭彦昆, 房晓倩, 等. 二维相关光谱的猪肉 TVB-N 特征变量优选研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(7):

2094 – 2100.
WANG Wenxiu, PENG Yankun, FANG Xiaoqian, et al. Characteristic variables optimization for TVB-N in pork based on two-dimensional correlation spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(7): 2094 – 2100. (in Chinese)
[10] JULIANA M B, SAULO da L S, CATARINA A G, et al. Predicting pork quality using Vis/NIR spectroscopy[J]. Meat Science, 2015, 108: 37 – 43.
[11] 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] 彭彦昆, 杨清华, 王文秀. 基于近红外光谱的猪肉水分在线检测与分级[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 347 – 353.
PENG Yankun, YANG Qinghua, WANG Wenxiu. On-line detection and classification of pork moisture based on near-infrared spectra[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3):347 – 353. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180343&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.043. (in Chinese)
[13] 彭彦昆. 农畜产品品质安全光学无损快速检测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
[14] http://www.highlightoptics.com/Technology/185.html. 2020 – 9 – 19.
[15] GB/T 2707—2016 食品安全国家标准 鲜(冻)畜、禽产品[S]. 2016
[16] GB/T 5009.228—2016 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定[S]. 2016.
[17] 孙宏伟, 彭彦昆, 林琬. 便携式生鲜猪肉多品质参数同时检测装置研发[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 268 – 273.
SUN Hongwei, PENG Yankun, LIN Wan. Development of a portable device for simultaneous detection on multi-quality attributes of fresh por[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 268 – 273. (in Chinese)
[18] 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)
[19] 王文秀, 彭彦昆, 孙宏伟,等. 基于可见/近红外光谱生鲜肉多品质参数检测装置研发[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 290 – 296.
WANG Wenxiu, PENG Yankun, SUN Hongwei, et al. Development of simultaneous detection device for multi-quality parameters of meat based on Vis/NIR spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23): 290 – 296. (in Chinese)
[20] 魏文松, 彭彦昆. 手持式生鲜肉品质参数无损检测装置研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 324 – 331.
WEI Wensong, PENG Yankun. Research on hand-held device for nondestructive detection of meat quality parameters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 324 – 331. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2016s050&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.050. (in Chinese)
[21] 魏文松, 彭彦昆, 郑晓春,等. 基于优选波长的多光谱检测系统快速检测猪肉中挥发性盐基氮的含量[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 382 – 393.
WEI Wensong, PENG Yankun, ZHENG Xiaochun, et al. Rapid determination of content of total volatile basic nitrogen in pork based on multispectral detection[J]. Journal of the Optical, 2017, 37(11): 382 – 393. (in Chinese)
[22] 庄齐斌, 郑晓春, 杨德勇,等. 基于高光谱反射特性的猪肉新鲜度和腐败程度的对比分析[J/OL]. 食品科学, http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20200601.1444.072.html.
[23] 赵文杰, 林颢. 食品、农产品检测中的数据处理和分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.