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

王文秀,彭彦昆*,孙宏伟,魏文松,郑晓春,杨清华

中国农业大学工学院,国家农产品加工技术装备研发分中心,北京 100083

摘 要 为了实现原料肉新鲜度参数的无损在线实时评估,基于双波段可见/近红外反射光谱(350~1100 和1000~2500 nm)技术建立了原料肉新鲜度主要指标的在线检测系统。研究设计了装置的光源单元、光谱 采集单元、控制单元和驱动单元,优化设计了光源固定支架和安放角度,编写了相应的控制程序,开发了实 验室用和便于在不同生产线应用的两套在线检测系统。首先,对试验参数(传送带速度和样品到透镜入光口 距离)进行了优化研究,通过光谱相似度比较和显著性分析,确定传送带速度是 275 mm • s⁻¹、距离是 12 cm 时能够获得更加稳定的光谱信号。然后,基于该试验参数,分别在静止和在线条件下采集了贮藏时间为1~ 13 d 共 50 个猪肉样本的反射光谱,并利用抛物线拟合法对双波段光谱进行融合,以获取整条覆盖可见及近 红外区域的完整光谱。为了使两个波段范围内的光谱数据点权重相同,在整个波段范围内均匀分布,借助三 次样条插值法将所有光谱数据点以 2 nm 为间隔进行重新排布。采用窗口移动多项式最小二乘拟合法对光谱 作平滑处理,采用标准正态变量变换对每条光谱进行标准化预处理,分别建立了静止和在线条件下新鲜度 主要表征指标-颜色(L*, a*和 b*)、pH 和挥发性盐基氮的预测模型,以此验证所搭建系统的可靠性。经过 对比分析,发现在线条件下的建模结果不如静止状态下的建模结果,这可能与在线采集时光谱存在漂移现 象有关。进一步尝试利用一阶导数处理来消除基线漂移强化谱带特征,并对一阶导数和标准化处理顺序对 建模结果的影响进行了探讨。结果发现先经过一阶导数再经过标准化处理,能更好地消除外部干扰造成的 影响,建模结果更佳。在该处理方式下,基于第一波段光谱建立了颜色参数(L*,a*,b*)的预测模型,基于 双波段光谱建立了 pH 和挥发性盐基氮的在线检测模型, 预测相关系数分别为 0.955 3, 0.924 7, 0.955 1, 0.9615和0.9668。最后,为了验证模型的适用性,基于开发的便于在不同生产线应用的在线检测系统,利 用独立的 20 个样本对在线模型进行外部验证,对颜色参数(L*,a*,b*),pH 和挥发性盐基氮的预测相关 系数分别为 0.918 9, 0.914 1, 0.947 7, 0.950 4 和 0.960 6。研究结果表明, 该系统通过双波段光谱的实时 采集和融合,可以获取更多反应样本内部信息的光学信号,具有更强的检测能力。结合设计的光路等其他硬 件单元,可以同时获取样本表面更大区域的反射光谱信息,从而实现对原料肉新鲜度主要表征参数的无损、 在线、实时评估。该系统便于组装和拆卸,可以适应不同企业生产线的实际需要,具有较强的实用价值和较 好的市场前景。

关键词 原料肉;新鲜度;在线检测;光谱技术 中图分类号:O433 文献标识码:A DOI:10.3964/j.issn.1000-0593(2019)04-1169-08

引 言

肉及其制品是优质蛋白质的重要来源,在人们的膳食结构中占据非常重要的地位。由于肉富含营养物质和水分,极 易腐败变质,加上卫生条件和冷藏设施的影响,使原料肉的 新鲜度情况变得错综复杂,给肉的安全性带来威胁^[1]。因 此,对原料肉新鲜度进行评价有着重要的现实意义。色泽、 pH和挥发性盐基氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)是 用来评价其是否符合食用要求的客观标准^[2],然而常规检测 方法耗时费力,对样品产生了破坏,且不能做到逐一检测。 因此,研究一种能对原料肉新鲜度在线、无损、快速评估的 方法具有重要的科学意义。

基于光谱技术对肉品的新鲜度进行检测,许多学者展开

e-mail: Godlovexiu@163.com

收稿日期: 2018-02-04,修订日期: 2018-06-19

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0401205)资助

作者简介:王文秀,女,1989年生,中国农业大学工学院博士研究生 * 通讯联系人 e-mail: ypeng@cau. edu. cn

了相关的研究,证明了该技术的可行性。Cai 等[3]利用1000 ~2 500 nm 的反射光谱对猪肉中 TVB-N 含量进行了预测, 采用联合区间偏最小二乘法建立的模型预测相关系数为 0.808 4。马世榜等^[4]利用 400~1 700 nm 之间的宽波段反射 光谱,对牛肉中 TVB-N 含量进行了检测研究,预测相关系 数达到 0.925。在线检测研究方面, Liao 等[5-6] 基于点光源搭 建了在线检测平台,利用 350~1 100 nm 光谱对猪肉的 pH 和肌内脂肪含量进行了在线分析,预测相关系数分别为 0.890 和 0.834。张海云等^[7]利用 350~1 100 nm 光谱对猪肉 水分展开了在线研究,通过不断停止和开启传送带切换不同 通道来增大检测区域,其验证集相关系数为0.903。然而,综 合现有研究来看,目前对原料肉新鲜度参数在线检测分析的 报道很少,且现有在线检测系统多基于单一波段光谱建立, 检测能力有限,检测结果有待进一步提高。此外还存在点光 源检测范围小或检测过程需要传送带不断启停的缺点,需要 进一步优化设计。

为了实现原料肉新鲜度指标的在线评价,设计了基于双 波段光谱的新鲜度主要表征参数的在线检测系统,克服上述 检测系统中存在的弊端,旨在为近红外光谱技术的实际在线 应用提供参考和方法指导。具体内容包括:(1)构建了原料 肉新鲜度指标在线检测系统,更进一步地设计了便于在不同 生产线上应用的检测系统;(2)优化确定试验参数,经过双 波段光谱融合和数据重排,建立了新鲜度主要参数在线预测 模型,并与静止状态对比,以此验证所搭建系统和方法的可 靠性;(3)对模型进行外部验证。

1 实验部分

1.1 材料

试验所用样本为屠宰后经过 24 h 冷却排酸的大长白猪 肉,部位为背最长肌,一次性购买于北京市美廉美超市。将 样本修整为长×宽×高约 100 mm×80 mm×25 mm 的肉块, 用自封袋包装后放置于4 ℃冰箱中保存。试验样本包括两部 分,其中一部分用于静止与在线条件下预测模型的建立,共 包括有效样本 50 个。为了使测定的新鲜度指标理化值范围 更广,试验时每天从冰箱中随机取出 4 个用于光谱采集和理 化值分析,试验持续 13 d。第二部分用于在线预测模型的验 证,每天从冰箱取 2 个用于试验,持续 10 d,共获得 20 个样 本。

1.2 仪器与光谱采集

1.2.1 在线检测系统设计

在线检测系统实物图如图1所示,该系统主要包括光源 单元、光谱采集单元、控制单元和驱动单元。光源单元包括 8个12V5W卤钨灯、稳压电源。同时设计了光源固定支架 [图 1(b)],优化了光源安放角度,使卤钨灯呈环状分布,并 在光源固定支架中心固定有遮光筒,可防止灯光不照射到样 品而直接进入收集光纤内。光谱采集单元包括光纤、透镜和 光谱仪。光纤选择大芯径双包层 Y 型石英光纤,其两端分别 通过 SMA905 接口与光谱仪相连。为了增加采光宽度,在光 纤探头前端配置透镜,通过外螺纹与光源固定支架连接。由 前期研究可知^[8],基于双波段光谱建立的 pH 和 TVB-N 模 型更佳,因此系统选用了两台光纤光谱仪,分别是 AvaSpec-2048 光谱仪 (AVANTES)和 AvaSpec-NIR256-2.5 光谱仪 (AVANTES), 波段范围分别是 350~1 100 和 1 000~2 500 nm(以下称为第一波段和第二波段)。驱动单元主要由调速 驱动电机、传送带和支架等组成,电机启停和转速通过电气 控制柜「图 1(a)]进行设置和调节。控制单元包括上位机和下 位机两部分,对射式光电传感器检测到样品到位后,将信号 传至单片机开发板,经电平转换后将信号传给上位机,触发 系统完成光谱采集、实时处理、结果计算、显示和保存。软 件系统基于 VisualStudio2010 开发环境,采用 C 语言编写, 主要实现参数设置、光谱校正、光谱采集、结果计算及保存 功能。当静态条件下试验时,放置好样品后,按下界面按钮 控件完成相应操作;在线试验时,通过串口触发自动完成指 定操作。

为了便于在不同生产线上使用,将在线检测主要部件集成在控制箱内,将光源及支架、遮光筒、透镜及光纤置于暗 箱内,并通过型材支架固定在传送带上方,如图1(c)所示。 暗箱与传送带之间的距离可通过型材立柱上的滑块进行调 节。为了更加直观清楚地监视到检测过程中样本光谱曲线及 预测结果的变化,在软件界面上只保留光谱及结果显示区, 其他参数设置和控制按钮通过薄膜开关实现。

1.2.2 光谱信息采集

试验共分三部分进行,第一部分用于采集参数的优化。 对于近红外检测系统来说,在获得稳定光谱的前提下,检测 效率应尽可能高。本研究对传送带速度和透镜入光口到样品



图 1 (a)在线检测系统图; (b)光源支架; (c)简易在线检测系统 Fig. 1 (a) On-line detection system; (b) Light support; (c) Simple on-line detection system

表面距离(以下简称为距离)进行优化,考察不同参数对光谱 重复性和稳定性的影响。结合文献调研和前期预实验^[9-10], 设定速度为 200, 225, 250, 275 和 300 mm・s⁻¹,设定距离 为 10, 11 和 12 cm,距离可以通过图 1(a)中的高度调节支架 实现。试验时预热半小时,采集参比光谱和暗背景光谱后, 将样本置于传送带上进行在线检测,连续进行 20 次。然后, 调整试验参数,采集该样本在其他 14 种情况下(正交试验共 15 种情况)的 20 条光谱,通过对比确定最佳采集参数。

第二部分为在线检测模型的建立。基于上述试验确定的 最优参数,按照相同的试验步骤,采集50个猪肉样本的反射 光谱,每个样本采集5次,求取平均后作为最终建模用光谱。 为了检验该在线检测系统的性能,同时采集这50个样本静 止条件下的光谱,并进行分析比较。在第三部分试验中,另 取20个样本用于在线检测预测模型的外部验证,该部分试 验在图1(c)中的硬件条件下进行,试验参数和试验步骤与第 二部分相同。

1.3 理化值测定

猪肉颜色采用精密色差仪(HP-200,上海汉谱光电科技 有限公司)测定,经过黑白校准后,将仪器贴在样本表面,记 录下L*(明度系数),a*(红度值)和b*(黄度值)值。为了减 少试验误差,在样本表面选择5个位置进行测定并求取平 均。pH值采用pH计(METTLER TOLEDO FE20,北京连 博永通科技有限公司)测定,同样选取5个位置并求取平均。 TVB-N的测定参照GB5009.228—2016《食品中挥发性盐基 氮的测定》,利用KDY-9820型半自动凯氏定氮仪进行测定。 建模用样本和外部验证样本的理化值统计分析结果如表1所 示,可见外部验证样本的理化值范围在建模用样本范围之 内,且具有一定的浓度梯度,表明这些样本可用于验证在线 检测系统模型的性能。

表 1 猪肉新鲜度指标统计结果 Table 1 Statistical results of freshness attributes for pork

<i>全 粉</i>	建模用样本				外部验证样本				
<i>参</i> 奴	最小值	最大值	平均值	标准偏差	最小值	最大值	平均值	标准偏差	
L*	37.49	51.83	44.81	3.71	41.32	50.00	45.67	2.81	
a *	5.48	14.14	9.53	1.79	6.70	11.99	9.74	1.46	
b *	-4.91	1.89	-2.86	1.52	-4.71	1.55	-2.60	1.41	
$_{\rm pH}$	5.61	6.16	5.80	0.15	5.62	6.02	5.76	0.12	
$TVB-N/(mg \cdot 100 g^{-1})$	5.20	33.28	16.51	6.25	5.58	27.33	15.88	6.78	

1.4 数据分析

在第一部分试验中,有15个试验组,每组有20个平行, 共得到300条光谱。利用均方根误差来衡量每个试验组不同 平行之间的光谱相似度^[11],计算公式如式(1)

$$\text{RMS}_{j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (Y_{ij} - \overline{Y}_{i})^{2}}{n}}$$
(1)

式中, Y_{ij} 为第j条光谱在波长i处的反射率, \overline{Y}_i 为平均光谱 在波长i处的反射率,n是一条光谱上的总数据点数。然后, 将 20 个平行下的 RMS $_j$ 进行平均,得到该试验组下的 RMS 值。

对于第二部分试验,首先利用抛物线拟合方法对双波段 光谱进行融合,具体如式(2)所示

$$\frac{R_{\text{before}}(\lambda)}{R_{\text{after}}(\lambda)} = a(\lambda - b)^2 + c$$
(2)

式中, *R*_{before}(λ), *R*_{after}(λ)分别为波长 λ 下融合前后反射率 (%); *a*, *b* 和 *c* 是抛物线的三个参数。然后按 3:1 的比例将 其分为校正集和验证集。由于光谱采集过程中会受到杂散 光、光散射等的影响,需对光谱进行预处理来消除与待测组 分无关的因素带来的影响。本研究首先采用窗口移动多项式 最小二乘拟合法降噪以提高信噪比,然后采用标准正态变量 变换(standard normal variate transformation, SNV)对每条光 谱进行标准化处理。进一步,由于在线检测过程光谱发生漂 移,利用导数进行校正。模型建立方法为偏最小二乘回归法 (partial least square regression, PLSR),采用校正集相关系 数(R_{e})、验证集相关系数(R_{p})、校正集标准分析误差(standard error of calibration, SEC)和验证集标准分析误差(standard error of prediction, SEP)对模型进行评价。对于第三部 分外部验证试验,利用相关系数*r*来评价效果。上述数据分 析过程均在 Matlab2012a 中进行。

2 结果与讨论

2.1 采集参数优化

将15个试验条件下的 RMS 值进行对比,如图2所示, 同时对两个变量对 RMS 的影响进行无交互作用的双因素方 差分析。结果表明,只有距离通过了 F 检验,说明距离对 RMS 有显著性影响。进一步利用最小显著差数法(LSD)比较 距离的三个水平的显著性差异。水平1(10 cm)和水平2(11 cm)、水平3(12 cm)均具有显著性差异,水平2和水平3没 有显著性差异,说明水平1对变量3的影响最大,水平2次 之,水平3最小,与图中结果一致。由于在距离12 cm下软 件自动获取的光谱仪最佳积分时间已经接近仪器最小积分时 间,因此距离不能继续增大,将12 cm 作为最佳高度。在速 度为225,250和275 mm • s⁻¹下的 RMS 值差异不大,但速 度提高到300 mm • s⁻¹,误差变大,因此将速度确定为275 mm • s⁻¹。在该条件下,对第一光谱仪的最佳积分时间和平 均次数分别是2.17 ms 和100 次,对第二光谱仪分别为 20.05 ms和25次,完成一个样品的检测用时在1 s 以内。



2.2 静态试验条件下模型建立

基于上述确定的最佳距离,利用图 1(a)中搭建的在线检测系统,首先建立静止条件下的新鲜度预测模型。由于光谱 仪获取的光谱信号在两端信噪比较低,因此将噪声信号较大 的波段截掉。对于两台光谱仪,选取的波段范围分别为 353.59~1 100.26 和 1 039.98~2 384.15 nm,在该范围内 50 个猪肉样本的原始光谱曲线如图 3(a)所示。其中,530~ 580 nm之间的吸收峰与肉中肌红蛋白和血红蛋白有关, 775~850 nm 与 N—H 键伸缩振动的三级倍频有关,980 nm 处与O—H键的振动一级倍频有关,1 400~1 500 nm之间





Fig. 3 Original and pretreated spectra of pork samples under static condition

(a): Original spectra; (b): Pretreated spectra

与 N—H 键振动的一级倍频有关^[12-15]。同时,从图中也可看 出,1039.98~1100.26 nm 为波段重合区域,在该范围内两 台仪器获取的光谱数据存在偏差。为了更充分的利用该区域 光谱信息,采用抛物线拟合的方法,对两个波段光谱数据进 行融合,效果如图 3(a)中子图所示。可见融合前后,重合区 光谱曲线有了明显的改善,两个波段范围的光谱得以融合为 一条完整的覆盖整个可见光及近红外区域的光谱曲线。

然后进行光谱预处理。先对数据进行 5 点平滑处理以提 高光谱的信噪比,然后采用 SNV 校正不同样品之间因散射 引起的误差。这两种算法均是对每个波长点下数据进行处 理,且需要借助其他波长下的数据进行校正。如平滑需在待 分析波长点前后各取5个数据点组成窗口进行多项式最小二 乘拟合,SNV则要计算整条光谱的平均值和标准偏差使原 光谱数据标准正态化。本研究中所用两台光谱仪采样间隔分 别为 0.59 和 6.80 nm,因此对于波段融合后的光谱来说,在 353.59~1039.98 nm 之间共1210个数据点,在1039.98~ 2 384.15 nm 之间共 209 个数据点。这就导致在前波段范围 内数据点多而密集,而后波段范围数据点相对少而稀疏,这 种不均匀分布会对预处理效果造成影响,如图3(b)中子图所 示。因此本研究以 2 nm 为间隔对原光谱进行重排使数据均 匀分布,第二波段在相应波长点处的数据通过三次样条插值 获得。再次进行预处理后效果如图 3(b)所示,可见经过数据 重排,后波段数据点的权重得以提高,有了明显的处理效 果。

然后,分别建立 L*, a*, b*, pH 和 TVB-N 的 PLSR 预测模型。由前期研究可知,对于颜色参数,前波段光谱的 建模结果优于全波段光谱,而对于 pH 和 TVB-N,基于全波 段光谱数据建模的效果更佳^[8]。因此,基于前波段数据建立 了 L*, a*, b*的预测模型,基于全光谱数据建立了 pH 和 TVB-N 的预测模型,结果如表 2 所示。从表中可以看出,对 5 个参数的预测相关系数均在 0.90 以上,尤其以 TVB-N 的 预测集相关系数最高,达到 0.951 5。

表 2 静态条件下颜色参数(L*, a*, b*), pH 和 TVB-N 的 PLSR 模型结果

Table 2 The PLSR model results for color $(L^{\,\ast}\,\,,\,a^{\,\ast}\,\,,\,b^{\,\ast}\,)\,,$

pH, and TVB-N under static condition

参数	$R_{ m c}$	SEC	$R_{ m p}$	SEP
L *	0.9697	0.915 0	0.942 9	1.435 8
a *	0.920 6	0.637 5	0.909 0	0.873 5
b *	0.939 1	0.498 3	0.931 6	0.692 4
$_{\rm pH}$	0.957 3	0.043 2	0.945 3	0.051 8
TVB-N	0.9537	1.981 9	0.951 5	2.143 9

2.3 在线检测模型建立

调节距离为 12 cm,设定传送带的运行速度为 275 mm • s⁻¹,采集样本在运动状态的反射光谱曲线。然后,将每个样 本在线采集的平均光谱与静止状态下的光谱进行对比,以此 来验证在线获取的光谱数据的准确性。同时,求取每个样本 的5条光谱的变异系数,来验证光谱数据的稳定性。图 4 为 1号样本在前后两个波段范围内运动(实线)和静止(虚线)状态下平均光谱的对比图以及不同波长下的变异系数。可以看出,在线采集和静止条件下获取的光谱曲线趋势基本一致, 仅在部分波段范围内有微小的波动和偏移,说明所获取的数据真实有效。同时,两个波段范围内的变异系数均小于 15%,表明数据可用于进一步的统计分析。



图 4 同一样本在静止和在线条件下的光谱对比和变异系数 (a):第一波段;(b):第二波段



(a): First band; (b): Second band

同样,对在线获取的光谱数据进行 5 点平滑和 SNV 预 处理,建立各参数的在线预测模型,并与静态条件下的模型 结果进行对比,结果如表 3 所示。与表 2 中静态条件结果相 比,除颜色参数 L*外,其他 4 个参数的预测效果均有所下 降,同时预测集误差有所上升。原因一方面在于运动状态下 由于振动带来的噪声信号,另一方面在于背景等其他因素导 致光谱出现的位移或漂移,这一点在图 4 中也可以得到印 证。为了消除这部分影响,进一步采用一阶导数去除与波长 无关的漂移,以强化谱带特征。根据 Huang 等研究可知^[16], SNV 和导数处理的顺序不同也会产生不同的结果。因此,基 于 5 点平滑后的光谱数据,分别进行 SNV+一阶导数和一阶 导数+SNV 处理,结果如图 5 所示。可见两种方式处理后光 谱具有相同的趋势,仅在数值上有所不同。

基于按不同顺序处理后的光谱数据,分别建立各个参数 的预测模型,并与未经过导数处理的建模结果进行比较,如



Fig. 5 (a) Spectra after treatment with SNV and first derivative; (b) Spectra after first derivative and SNV

表 3 所示。可以看出,经过一阶导数+SNV处理后,各参数 的预测模型效果均有所改善,说明导数处理能有效的减少基 线漂移和背景干扰引起的数据偏差。与静态条件下建立的模 型相比,模型效果整体略有所改善,并且参数 a*, b*, pH 比 L*和 TVB-N 提高的更加明显。而对于先经过 SNV 再经 过一阶导数处理的光谱,参数 L*, a*, b*和 TVB-N 的预测 效果相比只经过 SNV 处理有所提高,但对参数 pH 的预测 效果反而下降。此外,通过对比两个顺序处理后的建模结果 发现,前者的模型结果整体优于后者,对每个参数建立的模 型预测相关系数更好,预测误差更小。这与 Huang^[16]和 Modrono^[17]的发现是一致的,即不同的预处理顺序所产生的效 果是不一样的,且先经过导数处理再作 SNV 校正,能更好 地消除散射造成的影响。综合上述分析,将经过 5 点平滑、 一阶导数以及 SNV 处理后建立的模型作为在线检测采用的 最终预测模型。

2.4 外部验证

为了验证所建立的动态检测模型的可靠性,利用 20 个 样本进行外部验证。光谱采集在搭建的简易在线检测系统上 进行[图 1(c)],试验参数和模型建立时一致。20 个样本真实 值和预测值的散点分布图如图 6 所示。对 L*, a*, b*, pH 和 TVB-N 的相关系数分别为 0.918 9, 0.914 1, 0.947 7, 0.950 4 和 0.960 6,标准分析误差分别为 1.249 4, 0.611 2,

	表 3	在线条件下颜色参数(L*,a*,b*)、pH 和 TVB-N 的 PLSR 模型结果
Fable 3	The Pl	SR model results for color (L^*, a^*, b^*) , pH, and TVB-N under online condition

参数	SNV			一阶导数+SNV				SNV+一阶导数				
	$R_{ m c}$	SEC	$R_{ m p}$	SEP	$R_{ m c}$	SEC	$R_{ m p}$	SEP	$R_{ m c}$	SEC	$R_{ m p}$	SEP
L *	0.9537	1.148 7	0.947 1	1.289 9	0.967 8	0.942 5	0.955 3	1.435 4	0.977 9	0.760 4	0.950 6	1.238 5
a *	0.892 8	0.735 3	0.883 9	1.001 9	0.934 7	0.580 8	0.924 7	0.773 5	0.928 1	0.607 7	0.902 4	0.835 9
b *	0.929 9	0.533 3	0.907 6	0.751 5	0.968 9	0.3518	0.955 1	0.499 1	0.955 6	0.418 9	0.940 0	0.575 4
$_{\rm pH}$	0.949 8	0.043 7	0.911 8	0.0716	0.967 2	0.038 1	0.961 5	0.042 7	0.947 3	0.048 1	0.907 4	0.067 6
TVB-N	0.936 9	2.146 2	0.922 0	2.8898	0.968 4	1.444 2	0.966 8	2.141 7	0.950 8	1.791 3	0.944 0	2.170 6



0.5831, 0.0401和1.9752mg • 100g⁻¹。整体预测效果较 好,可见所建立的在线检测系统和建模方法是有效的。

3 结 论

开发了原料肉新鲜度主要表征参数的在线检测系统,设 计了光路,并开发了相应的控制程序。通过对试验参数进行 优化,确定透镜入光口和样品表面最佳距离是 12 cm,传送 带速度是 275 mm • s⁻¹时光谱稳定性更好。基于该试验条

件,在线采集了肉反射光谱,经过双波段光谱融合和数据重 排后,建立了新鲜度主要表征参数的预测模型。同时,考察 了 SNV 和一阶导数处理顺序对结果的影响,表明一阶导数 +SNV 的处理顺序能更好的消除影响。利用独立样本进行 外部验证,对L*,a*,b*,pH和TVB-N的r分别为0.918 9,0.9141,0.9477,0.9504和0.9606。表明该系统能够 实现对原料肉新鲜度主要参数的在线实时无损评估。可进一 步增加其他参数的预测模型,实现多参数同时在线检测与综 合评价。

References

- [1] ZHANG Qiu-hui, ZHAO Gai-ming, LI Miao-yun, et al(张秋会, 赵改名, 李苗云, 等). Meat Research(肉类研究), 2011, 25(5): 58.
- [2] ZHANG Lei-lei, LI Yong-yu, PENG Yan-kun, et al(张雷蕾,李永玉,彭彦昆,等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2012, 28(7): 254.
- [3] Cai J R, Chen Q S, Wan X M, et al. Food Chemistry, 2011, 126: 1354.
- [4] MA Shi-bang, XU Yang, PENG Yan-kun, et al(马世榜,徐 杨,彭彦昆,等). Journal of Jiangsu University(江苏大学学报), 2013, 34 (1): 44.
- [5] LIAO Yi-tao, FAN Yu-xia, WU Xue-qian, et al(廖宜涛, 樊玉霞, 伍学千, 等). Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery(农业机械学报), 2010, 41(9): 44.
- [6] Liao Y T, Fan Y X, Cheng F. Journal of Food Engineering, 2012, 109: 668.
- [7] ZHANG Hai-yun, PENG Yan-kun, WANG Wei, et al(张海云,彭彦昆,王 伟,等). Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery(农业机械学报), 2013, 44(4): 146.
- [8] WANG Wen-xiu, PENG Yan-kun, SUN Hong-wei, et al(王文秀,彭彦昆,孙宏伟,等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2016, 32(23): 290.
- [9] Xue J J, Yang Z L, Han L J, et al. Fuel, 2014, 117(1): 1027.
- [10] XUE Jun-jie, HAN Lu-jia, YANG Zeng-ling, et al(薛俊杰, 韩鲁佳, 杨增玲, 等). Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery(农业机械学报), 2016, 47(7): 216.
- [11] Salguerochaparro L, Baeten V, Abbas O, et al. Journal of Food Engineering, 2012, 112(3): 152.
- [12] Cozzolino D, Barlocco N, Vadell A, et al. LWT-Food Science and Technology, 2003, 36(2): 195.
- [13] ElMasry G, Sun D W, Allen P. Journal of Food Engineering, 2012, 110(1): 127.
- [14] Xie A G, Sun D W, Xu Z, et al. Talanta, 2015, 139: 208.
- [15] Ritthiruangdej P, Ritthiron R, Shinzawa H, et al. Food Chemistry, 2011, 129(2): 684.
- [16] Huang J, Romero-Torres S, Moshgbar M. American Pharmaceutical Review, 2010, 13(6): 116.
- [17] Modrono S, Soldado A, Martinez-Fernandez A, et al. Talanta, 2017, 162: 597.

Development and Test of On-Line Detection System for Meat Freshness Evaluation Based on Spectroscopy Technology

WANG Wen-xiu, PENG Yan-kun^{*}, SUN Hong-wei, WEI Wen-song, ZHENG Xiao-chun, YANG Qing-hua National Research and Development Center for Agro-processing Equipment, College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract In order to realize real-time, on-line and non-destructive evaluation of main freshness attributes of raw meat, an on-line detection system based on dual-band visible/near-infrared reflectance spectroscopy $(350 \sim 1100 \text{ and } 1000 \sim 2500 \text{ nm})$ was established in this paper. The hardware which includes the light source unit, the spectrum acquisition unit, the control unit and the driving unit was designed. The light source fixing support and installation angle were optimized, and the corresponding control program was developed. Based on those, two sets of on-line detection systems were developed for laboratory use and to satisfy the demands of different production lines. Firstly, the experimental parameters including the conveyor speed and the distance between sample surface and the entrance of the lens were optimized. By comparing the spectral similarity and the significance analysis, the conveyor speed and the distance were determined as 275 mm \cdot s⁻¹ and 12 cm to obtain stable spectra. Then, based on the experimental parameters, the reflectance spectra of 50 pork samples stored for $1 \sim 13$ days were collected under static and on-line conditions, respectively. The dual-band spectra were fused by parabolic fitting to obtain a complete spectrum which covered the whole visible and near-infrared region. Subsequently, all spectra were rearranged at 2 nm intervals by means of cubic spline interpolation to make the spectral data points distribute evenly over the two bands. Based on this, the spectrum was smoothed by the moving window polynomial fitting least square method and normalized by standard normal variable transformation. Then the prediction models for L*, a*, b*, pH and total volatile base nitrogen under static and on-line conditions were established and compared to verify the reliability of the constructed system. It was found that the modeling results for on-line detection performed worse than those under static conditions, and the reason may be attributed to the spectrum drift. Therefore,

first derivative was further employed to eliminate the baseline drift and enhance the band characteristics. The influence of processing sequence of first derivative and standardization on the modeling results was also discussed. The results showed that the first derivative followed by standardization worked more successfully to eliminate the external interference. Then the prediction models for L*, a*, and b* were established based on the first band, and the models for pH and total volatile basic nitrogen were established based on the dual-band spectrum, with correlation coefficients of 0.955 3, 0.924 7, 0.955 1, 0.961 5 and 0.966 8. Finally, 20 independent samples were detected using the developed on-line inspection system to verify the model applicability, and the correlation coefficients for L*, a*, b*, pH and total volatile basic nitrogen were 0.918 9, 0.914 1, 0.947 7, 0.950 4 and 0.960 6, respectively. The results showed that by the real-time acquisition and fusion of dual-band spectroscopy, more optical signal were collected to reflect the internal information of tested samples. Combined with the designed optical path and other hardware units, the spectral information within a larger area of the sample surface were obtained. Thus, the non-destructive, online, and real-time assessment of the main attributes for raw meat freshness was achieved. The system was easy to assemble and disassemble, which made it possible to satisfy the actual needs of different production lines and had strong practical value and market prospects.

Keywords Raw meat; Freshness; On-line detection; Spectroscopy technology

(Received Feb. 4, 2018; accepted Jun. 19, 2018)

* Corresponding author