

漫反射和透射光谱检测马铃薯黑心病的比较

周 竹, 李小昱^{*}, 高海龙, 陶海龙, 李 鹏

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘 要: 针对马铃薯黑心病不易检测, 提出马铃薯黑心病的光学无损检测方法, 并比较了马铃薯黑心病的漫反射光谱和透射光谱检测方法。通过高光谱图像采集系统、透射光谱采集系统和傅里叶变换近红外光谱仪获取合格马铃薯与黑心病马铃薯的可见/近红外漫反射光谱、可见/近红外透射光谱以及近红外漫反射光谱, 并采用偏最小二乘-线性判别分析方法建立马铃薯黑心病的识别模型。透射光谱采集系统采集的可见/近红外透射光谱所建模型的判别正确率最高, 对测试集样本的识别正确率为 98.46%; 高光谱图像采集系统获取的可见/近红外漫反射光谱经二阶导与标准化组合预处理后所建模型对测试集样本的识别正确率为 92.31%; 傅里叶变换近红外光谱仪获取的漫反射光谱经标准正态变量变换与标准化组合预处理后所建模型对测试集样本的识别正确率 90.77%。试验结果表明: 采用光谱检测马铃薯黑心病, 透射光谱系统优于高光谱成像系统, 高光谱成像系统优于傅里叶近红外光谱仪。研究结果为马铃薯内部缺陷的光谱定性判别及便携式仪器的研制提供了参考。

关键词: 近红外光谱, 模型, 优化, 马铃薯, 黑心病, 高光谱, 漫反射光谱, 透射光谱

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.11.038

中图分类号: S123; O657.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-11-0237-06

周 竹, 李小昱, 高海龙, 等. 漫反射和透射光谱检测马铃薯黑心病的比较[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 237-242.

Zhou Zhu, Li Xiaoyu, Gao Hailong, et al. Comparison of diffuse reflection and transmission mode of visible/near infrared spectroscopy for detecting black heart of potato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 237-242. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

马铃薯黑心病是发生在块茎内部的一种生理性病害, 该病的发生与品种、贮藏环境条件及收获期间的机械损伤程度有关^[1]。黑心病会降低马铃薯的食用、种用及深加工用价值。因此, 建立一种无损、可靠的方法来检测马铃薯黑心病, 是马铃薯综合品质检测分级的重要环节之一, 对于马铃薯育种、贮藏以及深加工等方面有着重要的科学意义。

可见/近红外光谱分析技术是近年来发展起来的一种高效、快速、不破坏或少破坏样品、无公害、多组分同时分析的现代分析技术, 已被成功用于石油、食品、医药等领域。目前, 国内外学者利用可见/近红外光谱分析技术对农产品内部病害检测进行了多项研究, 主要集中在苹果褐腐病^[2-3]、梨的褐腐病^[4-5]、枣的内部虫害^[6-7]、板栗的霉变^[8-9]等。然而可见/近红外光谱分析技术只提供对检验客体一个较小区域的检测, 由于农产品的品质在空间上存在差异, 所以该方法还存在一定的局限。高光

谱成像技术是传统成像技术和光谱技术有机结合形成的一种新技术, 不仅可以用来检测农产品外部品质, 还可以检测其内部品质, 具备综合检测农产品多种品质的潜力。通过待测农产品的高光谱图像获取感兴趣区域的漫反射光谱, 可以对其内部特征进行分析^[10]。但现有的农产品内部品质高光谱分析主要用于成分如糖度^[10-12]、水分^[11]、成熟度等^[13-14]的定量分析以及外部缺陷的定性判别^[15-20], 鲜有对马铃薯的内部缺陷进行定性分析。

本文提出基于光学特性的马铃薯黑心病检测方法。通过高光谱成像系统获取马铃薯高光谱图像, 然后提取漫反射光谱, 并与透射光谱仪、傅里叶变换近红外光谱仪采集的可见/近红外透射光谱、近红外漫反射光谱进行比较分析, 采用偏最小二乘-线性判别分析 (partial least squares-linear discriminant analysis, PLS-LDA) 建立马铃薯黑心病识别模型并比较不同光谱仪器下的识别结果, 为光谱技术用于马铃薯综合品质检测提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料及仪器

供试马铃薯品种为克新 6 号, 于 2010 年 8 月购于武汉白沙洲批发市场。根据马铃薯黑心病发病原因^[1,21], 将每个马铃薯样本单独用密封袋包装, 并放置在 4℃ 下贮藏, 4 个月后采集样本高光谱图像及光谱。试验仪器主要有美国 Headwall 公司的 VNIR-N 型成像光谱仪, 美国 Ocean Optics 公司的 USB4000 便携式光谱仪以及美国 Thermo Electron 公司的 Antaris II 傅里叶变换近红外光

收稿日期: 2011-09-01 修订日期: 2012-05-14

基金项目: 湖北省自然科学基金重点项目 (2011CDA033); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20090146110018)

作者简介: 周 竹 (1984—), 男, 湖北汉川人, 研究方向: 智能化检测技术。武汉华中农业大学工学院, 430070。Email: zhouzhuniba@163.com

※通信作者: 李小昱 (1953—), 女, 教授, 博士生导师, 中国农业工程学会高级会员 (E041200068S), 研究方向: 智能化检测技术。武汉华中农业大学工学院, 430070。Email: lixiaoyu@mail.hzau.edu.cn

谱仪。

1.2 高光谱图像及光谱采集

采用的高光谱图像采集系统采集马铃薯样本高光谱图像，进而获取样本的可见/近红外漫反射光谱；采用透射光谱采集系统马铃薯样本的可见/近红外透射光谱；采用 Antaris II 傅里叶变换近红外光谱仪采集马铃薯样本的近红外漫反射光谱。

基于成像光谱仪的马铃薯高光谱图像采集系统如图 1a 所示。其组成部件及相关参数设置与文献[22]相同。在采样之前，为减弱成像光谱仪暗电流和室内照明对图像的影响，以参考文献[22]的方法进行黑白校正并提取反射光谱。

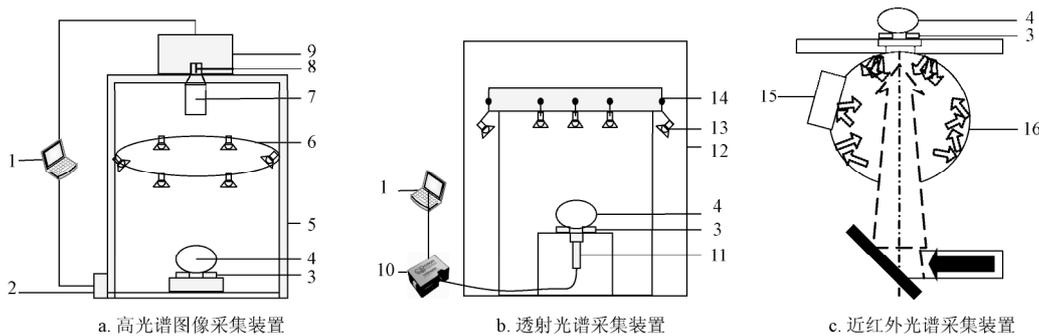
基于 USB4000 的透射光谱采集系统如图 1b 所示，主要包括 USB4000 光谱仪、光谱采集箱、光源、光纤、样品固定仿形胶垫以及计算机等。光谱仪的光谱采集范围为 200~900 nm。6 只卤素灯泡 (Philips, 35 W) 均布安装在环形灯架上，另外 1 只卤素灯泡 (Philips, 35 W) 安装在环形灯架的中心位置。光谱仪与计算机连接，透射光谱信号通过便携式光谱仪传送到计算机。根据前期

预试验结果，便携式光谱仪参数设置如下：光谱采集积分时间为 100 ms，平滑度为 50，平均次数为 9。在采集所有样本透射光谱之前，需对透射光谱采集系统进行标定。分别采用遮住光纤探头和采集标准玻璃纸 (黄色) 透射光谱方式获取暗场光强和参比光强，然后按公式 (1) 计算透射率即透射光谱。

$$T=(T_s-T_d)/(T_r-T_d)\times 100\% \quad (1)$$

式中， T 为透射率(%), T_s 为原始光强, T_r 为参比光强, T_d 为暗场光强。

马铃薯近红外漫反射光谱采集仪器为 Antaris II 傅里叶变换近红外光谱仪。使用 InGaAs 检测器，内置参比背景。通过漫反射式积分球附件进行光谱采集，如图 1c 所示。样品承载台上装样品固定仿形胶垫，以防止外界光干扰。扫描波长范围为 800~2 632 nm，扫描次数 32 次，分辨率 8 cm^{-1} 。选择马铃薯表面的中心以及 4 个方位上等距的区域作为光谱采样点。每个样本采集 2 个面共 10 个标记部位的光谱，并将其平均光谱作为该样品的原始光谱。



1.计算机 2.移动平台 3.样品固定仿形胶垫 4.马铃薯 5.试验箱 6.环形光源 7.镜头 8.狭缝 9.成像光谱仪 10.USB4000 光谱仪 11.光纤 12.光谱采集箱 13.卤素灯 14.灯架 15.检测器 16.漫反射积分球

图 1 高光谱图像及光谱采集示意图

Fig.1 Schematic of acquisition system for hyperspectral image and spectrum

1.3 马铃薯黑心病的评价

高光谱图像及光谱采集完毕后的马铃薯，首先进行形态学参数测量，随后沿果实长径部分切开，以判断黑心程度。横截面用数码相机 (Canon IXUS105, 分辨率 $4\ 000\times 3\ 000$) 拍照，照片通过 LabVIEW IMAQ 图像处理工具包进行处理，计算黑心面积所占截面比例。试验用黑心样本的黑心面积所占截面比例范围为 0.18%~78.37%，规定 0~20%、>20%~50%、50%以上分别代表轻度、中度和重度黑心。

表 1 给出了试验样本的质量、长径、短径、体积等参数。图 2 为试验过程中典型样本图像。最终马铃薯黑心病评价的结果为：合格马铃薯样本 93 个，不同程度的黑心病样本 99 个。图 3 为 99 个黑心马铃薯黑心程度的分布，由图 3 可知轻度、中度以及重度样本个数分别为 34、40 和 25 个，因此试验样本具有一定的代表性。

表 1 样本的形态学参数描述

Table 1 Morphological parameter description of samples				
	质量/g	长径/mm	短径/mm	体积/mm ³
范围	96.7~286.5	60~105	52~86	100~270
平均值	175.6	80.50	67.8	170.8
标准差	35.0	9.1	5.2	31.8

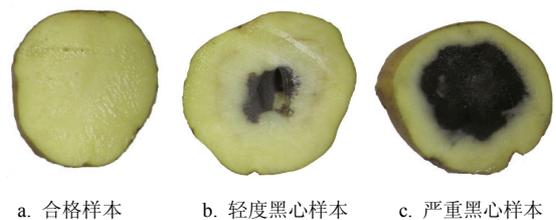


图 2 马铃薯样本
Fig.2 Potato samples

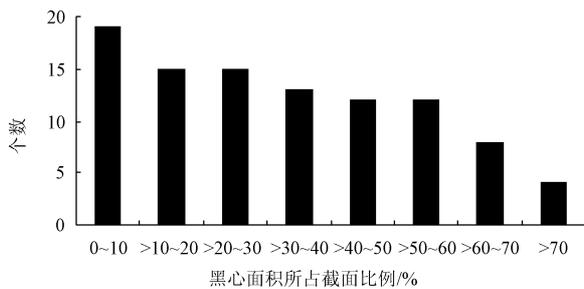


图 3 马铃薯黑心样本黑心程度分布图

Fig.3 Distribution histogram of black heart potatoes in various degree

1.4 分析方法

偏最小二乘-线性判别分析法 (PLS-LDA) 是偏最小二乘法与线性判别分析的结合, 即先用偏最小二乘法对数据进行降维, 并得到新的变量——得分矢量, 然后对得分矢量进行线性判别分析, 得到分类函数进而建立判别模型。

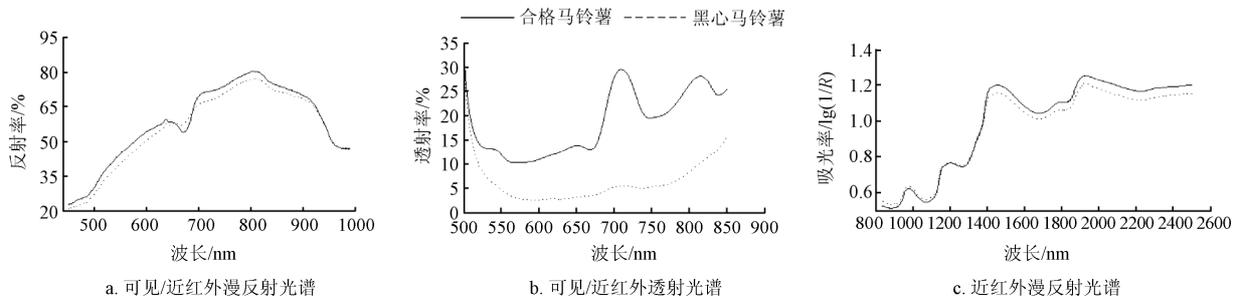


图 4 马铃薯原始平均光谱

Fig.4 Average spectra of potatoes with/without black heart

图 4a 是高光谱图像采集系统获取的可见/近红外漫反射原始光谱图。合格样本与黑心样本光谱形态相似, 在 660~680 nm 范围内, 黑心样本的反射率高于合格马铃薯样本的反射率, 而在 450~660 nm 以及 680~930 nm 范围内, 合格马铃薯样本的反射率均高于黑心马铃薯样本; 而在 930 nm 之后, 两类样本的光谱差异逐渐减少。

图 4b 是透射光谱系统获取的可见/近红外透射原始光谱图。从图中可以看出, 合格样本与黑心样本的透射光谱差异很大。在 500~850 nm 范围内, 合格样本的透射率均高于黑心样本的透射率。合格样本的透射光谱在 710、815 nm 附近的透过率变化比较显著, 呈现明显的透射峰。黑心样本在 500~850 nm 范围内比合格样本具有更强的吸收能力, 无明显的透射峰。二者差异的一个主要原因是由于黑心马铃薯在 500~850 nm 范围的吸收增强引起的。

图 4c 是傅里叶近红外光谱仪采集的马铃薯近红外漫反射原始光谱图(图中 R 表示反射率)。可以发现, 两类样本的主要特征吸收峰均在 970、1 190、1 450、1 790 和 1 940 nm 附近。在 833~930 nm 范围内, 黑心样本的吸光度高于合格样本的吸光度, 即黑心样本的反射率低于合格样本, 这和可见/近红外光谱中同波段范围表现的光谱

特性一致。930~1 000 nm 范围内黑心样本的吸光度仍高于合格马铃薯样本, 这和高光谱采集系统中获取的光谱不一致, 可能是由仪器的差异造成的。1 400 nm 之后的光谱表现出与 833~1 200 nm 相反的光学特性, 即黑心样本的吸光度要低于合格样本的吸光度。两类马铃薯样本表现出的这些特点, 可能是黑心样本引起的马铃薯表层物化性质综合作用的结果, 有待于进一步研究。

假设用 n 个偏最小二乘变量组成的得分矢量建立线性判别模型, 则其方程为:

$$\alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2 + \alpha_3 s_3 + \dots + \alpha_n s_n = c \quad (2)$$

式中, $S = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_n]$ 为 PLS 得到的得分矢量, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ 是判别模型方程的系数, c 是常数。

2 结果与分析

2.1 不同采集方式下的原始光谱分析

考虑到马铃薯的可见/近红外漫反射光谱、透射光谱以及近红外漫反射光谱的首尾两端信噪比较低, 结合前期的预试验分析, 确定可见/近红外漫反射光谱、透射光谱以及近红外漫反射光谱的分析范围分别为: 450~990、500~850 和 833~2 500 nm。

图 4 是 3 种仪器下获得的黑心样本与合格样本的平均光谱。从图 4 中可以看出: 无论是透射方式还是漫反射方式, 黑心病都会影响马铃薯的光谱。这为马铃薯黑心病的光谱判别提供了基础。

3 种类型的光谱在各自的波段范围内均存在一定程度的噪声, 分别使用多元散射校正、标准正态变量变换与中心化、二阶导与中心化、二阶导与标准化等 4 种方法对 3 类原始光谱进行预处理。

2.2 光谱的偏最小二乘分析

利用 PLS 算法对预处理后的光谱数据进行压缩处理, 图 5 是 3 种仪器下的光谱数据经 PLS 处理后样本在主成分 1~3 的 3 个投影方向的得分图。从图 5 中可以看出, 虽然 3 种仪器获取的光谱基本可以区分黑心马铃薯和合格马铃薯, 但均存在一些重叠现象, 其中采用 Antaris II 傅里叶变换近红外光谱仪采集的近红外漫反射光谱重叠最为严重(图 5c 所示), 这说明仅靠 3 个主成分得分所构成的特征向量不足以达到良好的分类效果, 必须增加更多的信息。

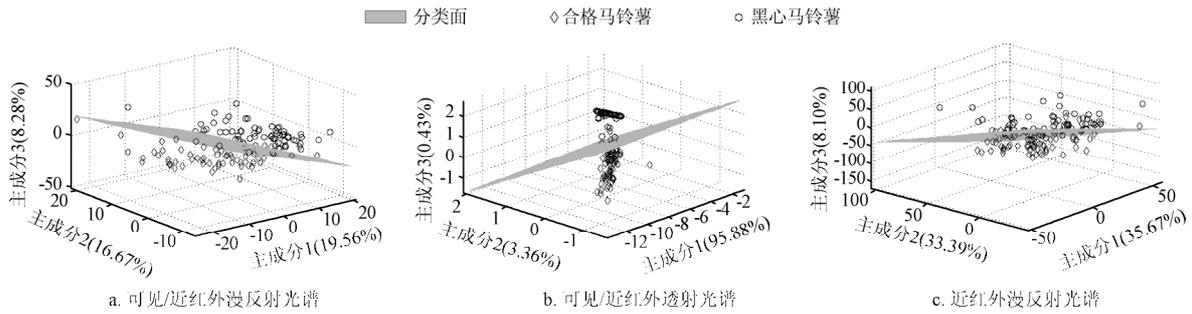


图 5 3 种光谱 PLS 分析中前 3 主成分投影图

Fig.5 First three principal components skiagraphs from PLS analysis of three modes of spectra

2.3 不同仪器下的 PLS-LDA 模型结果分析

采用 Kennard-Stone(KS)算法^[23]将 192 个样本划分为校正集和测试集。校正集中共有样本 127 个，其中合格马铃薯、黑心马铃薯分别为 62、65 个；测试集中共有样本 65 个，其中合格马铃薯、黑心马铃薯分别为 31、34 个。由于马铃薯发生黑心对消费者来说是不能接受的，

所以实际检测过程中只需 2 个结果，即合格或者黑心。将合格马铃薯样本标记为“1”，不同黑心马铃薯样本标记为“-1”，采用 PLS-LDA 方法对不同仪器下且经不同光谱预处理的光谱数据建立模型，通过蒙特卡罗双层交互检验法^[24]来确定最优主成分数，通过识别正确率来评价和比较所建模型的预测能力，结果见表 2。

表 2 3 种仪器的马铃薯黑心病检测结果

Table 2 Results of detection for black heart potatoes by three type of equipments

仪器	预处理方法	主成分数	校正集			测试集		
			误判数/个		识别	误判数/个		识别
			合格马铃薯	黑心马铃薯	正确率/%	合格马铃薯	黑心马铃薯	正确率/%
高光谱图像采集系统	NONE	14	3	3	95.28	5	4	86.15
	MSC	10	6	2	93.70	4	4	87.69
	SNV + Auto scale	11	4	2	95.27	0	34	47.69
	SD + Mean Center	15	0	0	100	6	2	87.69
	SD + Auto scale	11	0	0	100	4	1	92.31
透射光谱采集系统	NONE	4	0	0	100	0	1	98.46
	MSC	2	1	7	93.70	0	2	96.92
	SNV + Mean Center	11	1	4	96.07	1	2	95.38
	SD + Mean Center	5	0	1	99.21	0	2	96.92
	SD + Auto Scale	3	0	1	99.21	0	4	93.85
近红外漫反射光谱采集系统	NONE	17	4	1	96.06	6	1	89.23
	MSC	18	3	1	96.85	5	1	90.77
	SNV + Auto scale	16	1	0	99.21	4	2	90.77
	SD + Mean Center	17	4	2	96.06	9	3	81.54
	SD + Auto scale	5	3	2	95.28	6	5	83.08

注：NONE 为无预处理；MSC 为 multiplicative scattering correction，多元散射校正；SNV 为 standard normalized variate，标准正态变量变换；Mean Center 为中心化；SD 为 second derivative，二阶导；Auto Scale 为标准化。

由表 2 可知：不同仪器获取光谱数据建立的识别模型存在差异，随着光谱预处理方法的不同，差异也不同。由高光谱图像采集系统获取的漫反射光谱，经二阶导与标准化组合预处理后建立的 PLS-LDA 模型效果最优，该模型对校正集中合格马铃薯及黑心马铃薯的识别正确率为 100%。使用该模型对测试集样本进行检验时，对测试集中合格马铃薯及黑心马铃薯的识别正确个数分别为 27 个、33 个，总的识别正确率为 92.31%；在透射光谱采集模式下，原始光谱建立的 PLS-LDA 模型效果最优，该模型对校正集中合格马铃薯及黑心马铃薯的识别正确率为 100%，使用该模型对测试集样本进行检验时，仅将 1 个黑心马铃薯误判为合格马铃薯，总的识别正确率为

98.46%；而由傅里叶变换近红外光谱仪获取的漫反射光谱，经标准正态变量变换与标准化组合预处理后建立的 PLS-LDA 模型效果最优，该模型对校正集中合格马铃薯及黑心马铃薯的识别正确率为 99.21%，使用该模型对测试集样本进行检验时，对测试集中合格马铃薯及黑心马铃薯的误判个数分别为 4、2 个，总的识别正确率为 90.77%。PLS-LDA 建模所用主成分数的多少反映了所建模型的复杂程度，从 3 种仪器各自所建最优模型来看，透射光谱系统的最优模型最简单，所用主成分数仅为 4 个，而傅里叶近红外光谱仪的最优模型则最为复杂，所用主成分数达到 16 个。

3 种仪器所得光谱建立模型的识别准确率表现为：透

射光谱系统优于高光谱成像系统, 高光谱成像系统优于傅里叶近红外光谱仪。由此可以认为: 用透射光谱进行马铃薯内部缺陷判别的效果要优于漫反射光谱, 分析其原因可能是由于透射光谱携带了更多马铃薯内部尤其是反映果肉内部黑心的信息, 而漫反射光谱往往多是反映马铃薯近表皮部分果肉组织的信息。试验中样本的可见/近红外光谱是通过从高光谱图像上截取一块区域来完成, 这可能比采用点域的近红外漫反射法获取的信息更多。

本文测试集数据中, 黑心马铃薯的轻度、中度以及重度样本的个数分别为 15、12 和 7 个。当可见/近红外漫反射光谱最优模型应用于测试集时, 将 4 个合格马铃薯和 1 个黑心样本(该样本黑心面积所占截面比例为 3.56%)误判; 当近红外漫反射光谱最优模型应用于测试集时, 将 4 个合格马铃薯和 2 个黑心样本(误判样本的黑心面积所占截面比例分别为 4.75%、28.32%)误判; 而当透射光谱最优模型应用于测试集时, 仅将 1 个黑心样本(该样本黑心面积所占截面比例为 3.56%)误判。这表明 3 类光谱用于黑心病检测时, 透射光谱对不同程度的马铃薯黑心识别准确率较高, 更适合马铃薯黑心病的检测。进一步研究可根据透射光谱中黑心马铃薯的光学特性提取特征波长, 从而开发马铃薯黑心病便携式检测设备。

3 结 论

1) 该文提出基于光学特性的马铃薯黑心病检测方法。通过高光谱成像系统、透射光谱系统、傅里叶变换近红外光谱仪获得的马铃薯黑心样本与合格样本的可见/近红外漫反射光谱、透射光谱以及近红外漫反射光谱, 发现两类样本的光谱在各自的波段范围内存在差异, 这为马铃薯黑心病的光谱判别提供了理论依据。

2) 不同的光谱预处理方法对 PLS-LDA 方法的建模结果有影响。由高光谱图像采集系统获取的漫反射光谱, 经二阶导与标准化组合预处理后建立的 PLS-LDA 模型效果最优, 该模型对测试集样本的识别正确率为 92.31%; 在透射光谱采集模式下, 原始光谱建立的 PLS-LDA 模型效果最优, 该模型对测试集样本的识别正确率为 98.46%; 而由傅里叶变换近红外光谱仪获取的漫反射光谱, 经标准正态变量变换与标准化组合预处理后建立的 PLS-LDA 模型效果最优, 该模型对测试集样本的识别正确率为 90.77%。

3) 3 种仪器所建模型的识别准确率表现为: 透射光谱系统优于高光谱成像系统, 高光谱成像系统优于傅里叶近红外光谱仪。这表明透射光谱更适合马铃薯黑心病的检测。进一步研究可扩大样本的大小范围或品种以提高所建马铃薯黑心病识别模型的适应性。

[参 考 文 献]

- [1] Mukerji K G. Fruit and Vegetable Diseases[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004: 262—263.
- [2] 韩东海, 刘新鑫, 鲁超, 等. 苹果内部褐变的无损光学检测研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 86—88, 93.
- [3] Han Donghai, Liu Xinxin, Lu Chao, et al. Study on optical-nondestructive detection of breakdown apples[J]. Transactions of the CSAM, 2006, 37(6): 86—88, 93. (in Chinese with English abstract)
- [4] Clark C J, McGlone V A, Jordan R B. Detection of brownheart in “Braeburn” apple by transmission NIR spectroscopy[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 28(1): 87—96.
- [5] Han Donghai, Tu Runlin, Lu Chao, et al. Nondestructive detection of brown core in the Chinese pear ‘Yali’ by transmission visible-NIR spectroscopy[J]. Food Control, 2006, 17(8): 604—608.
- [6] Fu Xiaping, Ying Yibing, Lu Huishan, et al. Comparison of diffuse reflectance and transmission mode of visible-near infrared spectroscopy for detecting brown heart of pear[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 83(3): 317—323.
- [7] Wang J, Nakano K, Ohashi S. Nondestructive detection of internal insect infestation in jujubes using visible and near-infrared spectroscopy[J]. Postharvest Biology and Technology, 2011, 59(3): 272—279.
- [8] Wang J, Nakano K, Ohashi S. Nondestructive evaluation of jujube quality by visible and near-infrared spectroscopy[J]. LWT - Food Science and Technology, 2011, 44(4): 1119—1125.
- [9] 周竹, 李小昱, 李培武, 等. 基于 GA-LSSVM 和近红外傅里叶变换的霉变板栗识别[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 331—335.
- [10] Zhou Zhu, Li Xiaoyu, Li Peiwu, et al. Near-infrared spectral detection of moldy chestnut based on GA-LSSVM and FFT[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(3): 131—135. (in Chinese with English abstract)
- [11] 周竹, 刘洁, 李小昱, 等. 霉变板栗的近红外光谱和神经网络方法判别[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊 1): 109—112.
- [12] Zhou Zhu, Liu Jie, Li Xiaoyu, et al. Discrimination of moldy Chinese chestnut based on artificial neural network and near infrared spectra[J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(Supp.1): 109—112. (in Chinese with English abstract)
- [13] 单佳佳, 彭彦昆, 王伟, 等. 基于高光谱成像技术的苹果内外品质同时检测[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 140—144.
- [14] Shan Jiajia, Peng Yankun, Wang Wei, et al. Simultaneous detection of external and internal quality parameters of apples using hyperspectral technology[J]. Transactions of the CSAM, 2011, 42(3): 140—144. (in Chinese with English abstract)
- [15] 洪添胜, 乔军, Wang N, 等. 基于高光谱图像技术的雪梨梨品质无损检测[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 151—155.
- [16] Hong Tiansheng, Qiao Jun, Ning Wang, et al. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(2): 151—155. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郭恩有, 刘木华, 赵杰文, 等. 脐橙糖度的高光谱图像无损检测技术[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 91—93, 103.

- Guo Enyou, Liu Muhua, Zhao Jienwen, et al. Nondestructive detection of sugar content on Navel orange with hyperspectral imaging[J]. Transactions of the CSAM, 2008, 39(5): 91—93, 103. (in Chinese with English abstract)
- [13] Rajkumar P, Wang N, Eimasry G, et al. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(1): 194—200.
- [14] Zhao Jiewen, Chen Quansheng, Vittayapadung S, et al. Determination of apple firmness using hyperspectral imaging technique and multivariate calibrations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 226—231.
- [15] 蔡健荣, 王建黑, 陈全胜, 等. 波段比算法结合高光谱图像技术检测柑橘果锈[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 127—131.
- Cai Jianrong, Wang Jianhei, Chen Quansheng, et al. Detection of rust in citrus by hyperspectral imaging technology and band ratio algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(1): 127—131. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李江波, 饶秀勤, 应义斌, 等. 基于高光谱成像技术检测脐橙溃疡[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 222—228.
- Li Jiangbo, Rao Xiuqin, Ying Yibin, et al. Detection of navel oranges canker based on hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 222—228. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张红涛, 毛罕平, 韩绿化. 近红外高光谱成像技术检测粮仓米象活虫[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 263—268.
- Zhang Hongtao, Mao Hanping, Han Lühua. Detection of live Sitophilus oryzae (L.) in stored wheat by near-infrared hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 263—268. (in Chinese with English abstract)
- [18] Gómez-Sanchis J, Martín-Guerrero JD, Soria-Olivas E, et al. Detecting rottenness caused by Penicillium genus fungi in citrus fruits using machine learning techniques[J]. Expert Systems With Applications, 2012, 39(1): 780—785.
- [19] Wang W, Li C, Tollner E W, et al. Shortwave infrared hyperspectral imaging for detecting sour skin (Burkholderia cepacia)-infected onions[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 109(1): 38—48.
- [20] 蒋帆, 乔欣, 郑华军, 等. 基于高光谱分析技术的机炒龙井茶等级识别方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 343—348.
- Jiang Fan, Qiao Xin, Zheng Huajun, et al. Grade discrimination of machine fried Longjing tea based on hyperspectral technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 343—348. (in Chinese with English abstract)
- [21] 宋吉轩, 张敏, 邓宽平. 贵州马铃薯贮藏现状、存在问题及解决措施[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(30): 9488—9489.
- Song Jixuan, Zhang Min, Deng Kuanping. Present situation and existence problem and solution of potato storage in Guizhou province[J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2007, 35(30): 9488—9489. (in Chinese with English abstract)
- [22] 周竹, 李小昱, 高海龙, 等. 马铃薯干物质含量高光谱检测中变量选择方法比较[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 128—133, 185.
- Zhou Zhu, Li Xiaoyu, Gao Hailong, et al. Comparison of different variable selection methods on potato dry matter detection by hyperspectral imaging technology[J]. Transactions of the CSAM, 2012, 43(2): 128—133, 185. (in Chinese with English abstract)
- [23] Galvão R K H, Araujo M C U, José G E, et al. A method for calibration and validation subset partitioning[J]. Talanta, 2005, 67(4): 736—740.
- [24] Li Hongdong, Liang Yizeng, Xu Qingsong, et al. Model population analysis for variable selection[J]. Journal of Chemometrics, 2010, 24(7/8): 418—423.

Comparison of diffuse reflection and transmission mode of visible/near infrared spectroscopy for detecting black heart of potato

Zhou Zhu, Li Xiaoyu^{*}, Gao Hailong, Tao Hailong, Li Peng

(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The objective of this research was to compare transmission and diffuse reflection modes of visible (VIS)/near infrared (NIR) spectroscopy for detecting black heart in potatoes. Vis/NIR spectra, Vis/NIT spectra and NIR spectra were acquired using hyperspectral image acquisition system, portable transmission spectrum acquisition system and FT-NIR spectrometer, respectively. Partial Least Squares-Linear Discriminant Analysis (PLS-LDA) method was employed to classify the potatoes with or without black heart. Better results were obtained based on Vis/NIT spectra than those on diffuse reflection spectra. The classifying correct rate was 98.46% by using Vis/NIT spectra. The classifying correct rates were 92.31% and 90.77% respectively acquired by hyperspectral image spectrum acquisition system and FT-NIR spectrometer. The results indicated that Vis/NIT spectra method was feasible for detecting black heart in potatoes and transmission mode was better than reflection mode for internal disorder detection. The research can provide references for potato internal defect detection and portable instrument development based on spectroscopy technique.

Key words: near infrared spectroscopy, models, optimization, potato, black heart, hyperspectral imaging, diffuse reflection spectrum, transmission spectrum