

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.09.043

基于能量谱和吸光度谱的马铃薯黑心病判别模型优化

韩亚芬 赵庆亮 吕程序 杨炳南 曹有福 苑严伟
(中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 马铃薯储藏过程中,在高温、缺氧等环境下,极易产生黑心病等内部缺陷,严重影响马铃薯加工品的品质和原料加工利用率。黑心病薯无法从外观分辨,传统检测方法需要将马铃薯切开后判断,仅适用于抽样检测。基于自主研发的马铃薯内部品质光谱检测装置进行光谱数据采集,分别采集 234 条健康马铃薯和 236 条黑心病马铃薯能量谱和吸光度谱数据用于判别模型建立,采用随机法按 3:1 将样本集划分为校正集和验证集,以灵敏度、特异性指数、分类正确率作为模型评价指标。基于吸光度谱,经标准化(Auto)预处理后,在波段 500 ~ 950 nm 范围内建立马铃薯黑心病偏最小二乘线性判别模型(PLS-LDA),并通过竞争性自适应重加权法与连续投影法(CARS-SPA)进行联合变量筛选,最终采用 9 个变量,对黑心病判别的灵敏度、特异性指数、总分类正确率分别达 98.87%、98.30% 和 98.44%。基于能量谱,采用双波长相关系数法,分别计算任意波长对组合的能量差值和比值,与黑心病进行相关分析,最终采用 2 个变量能量比值 T_{699}/T_{435} 建立线性判别模型(LDA),对黑心病判别的灵敏度、特异性指数、总分类正确率分别达 97.71%、96.15% 和 97.67%。因此,基于吸光度谱的 CARS-SPA-PLS-LDA 模型和基于能量谱的 (T_{699}/T_{435}) -LDA 模型均可有效识别马铃薯黑心病,与吸光度谱模型相比,能量谱模型仅采用 2 个变量,模型更简单稳定,并且解决了白背景与暗电流 2 个参比限制的难题,适用性更广泛。

关键词: 马铃薯; 黑心病; 可见-近红外光谱; 能量谱

中图分类号: TS255.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0376-07 OSID: 

Discriminant Analysis on Potato Blackheart Defect Based on Energy Spectrum and Absorbance Spectrum

HAN Yafen ZHAO Qingliang LÜ Chengxu YANG Bingnan CAO Youfu YUAN Yanwei
(The State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology,
Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: During the storage, under high temperature and hypoxia, potato internal flesh tends to become black. It seriously reduces the quality of processed potato products and the utilization of raw materials. Blackheart potatoes can not be distinguished from their appearance. The traditional detection method requires the potato to be cut to judge, which is only suitable for sampling inspection. Potato spectrum data were collected based on the self-developed potato internal quality spectrum detection device. The energy spectrum and absorbance spectrum data of 234 healthy potatoes and 236 blackheart potatoes were collected respectively. The sample set was divided into calibration set and validation set at a ratio of 3:1 by random. The sensitivity, specificity, and classification accuracy were used as model evaluation indexes. Based on the absorbance spectrum, after pretreatment by Auto, the partial least squares-linear discriminant analysis (PLS-LDA) model for potato blackheart defect was established in the range of 500 ~ 950 nm. The competitive adaptive reweighting sampling (CARS) algorithm and successive projection algorithm (SPA) were adopted jointly to screen key variables. As a result, the sensitivity, specificity, and total accuracy of the optimal discrimination model for blackheart potato, with 9 variables, reached 98.87%, 98.30% and 98.44%, respectively. Based on the energy spectrum, the dual-wavelength correlation analysis method was adopted. The energy difference and ratio of any wavelength pair were calculated for the correlation analysis of blackheart defect. Finally, the linear discriminant

收稿日期: 2020-08-06 修回日期: 2021-02-21
基金项目: 财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS10)
作者简介: 韩亚芬(1991—),女,工程师,博士,主要从事智能检测技术研究,E-mail: hyf0825@126.com
通信作者: 苑严伟(1980—),男,研究员,博士生导师,主要从事智能检测技术研究,E-mail: yyw215@163.com

analysis (LDA) was established by the energy ratios of two variables T_{699}/T_{435} . The sensitivity, specificity and total accuracy of the discrimination model reached 97.71%, 96.15% and 97.67%, respectively. Therefore, both the CARS-SPA-PLS-LDA model based on the absorbance spectrum and the (T_{699}/T_{435}) -LDA model based on the energy spectrum could identify blackheart potato effectively. Compared with the absorbance spectrum model, the energy spectrum model used only two variables. It was simple, stable, and had a wide applicability, which solved the limits of the two reference, white and dark background.

Key words: potato; blackheart defect; VIS-NIR transmission spectrum; energy spectrum

0 引言

马铃薯是全球第四大粮食作物,具有丰富的营养价值和商业价值。黑心病等内部缺陷严重影响马铃薯加工品的品质和原料加工利用率。黑心病马铃薯(简称黑心病薯)无法从外观分辨,传统检测方法需要进行破坏性检测,仅适用于抽样检查。研究马铃薯黑心病快速无损检测技术对提高马铃薯检测分级效率、促进马铃薯产品增值和推动马铃薯检测行业技术进步等方面具有重要意义。

马铃薯组织致密、淀粉含量高,导致透光性较差。目前国内外对马铃薯内外缺陷的检测多采用反射高光谱技术,检测位于外表皮或浅表皮下的疮痂病^[1]、环腐病^[2]、黑心病^[3]、机械损伤导致的皮下黑斑^[4]等,预测集判别正确率分别达 95.83%、93.33%、94.44%、93%。反射光谱穿透深度有限,对位于马铃薯中心部位的褐变检测效果较差。同时,高光谱技术计算量大、难以直接应用于在线检测。

可见-近红外透射光谱技术穿透力强、模型简单,在水果内部缺陷检测方面已取得了广泛应用。能量谱指通过 A/D 转换得到的光谱信号,反映了透射能量强度。采集水果能量谱,通过相关分析获得与果蔬缺陷相关性高的波长对并建立判别模型,对鸭梨黑心病判别正确率达 98.3%^[5]。此外,通过光谱特征分析,由特征峰的差值、比值建立判别式也可有效检测果蔬内部缺陷^[6-7]。采集水果吸光度谱,并建立偏最小二乘判别(PLS-DA)模型,可有效识别缺陷、损伤样本,对碰伤番茄、黑心病马铃薯和黑心病鸭梨,判别正确率分别达 100%^[8]、97.89%^[9]和 98.58%^[10]。采用全光谱建模时,模型复杂、谱峰重叠,冗余信息会降低模型准确性。经竞争性自适应重加权算法(CARS)^[11]、连续投影算法(SPA)^[12]、遗传算法(GA)^[13]等变量选择算法优化后,模型变量数大大减少,准确性提升显著,UVE-CARS^[14]、CARS-SPA^[14-16]、SPA-GA^[17]、CARS-GA^[18]等联合变量选择与采用单一变量选择方法相比,模型更加简单,并且准确性提升。

不同果蔬光学特性具有明显差异,目前可见近红外透射光谱技术应用于马铃薯无损检测的深入研究较少。本文设计马铃薯黑心病透射光谱检测装置,并从吸光度谱和能量谱两个角度建立马铃薯黑心病判别模型,经过变量选择对模型进行优化,以实现马铃薯黑心病快速无损检测。

1 材料与方法

1.1 样本获取与制备

将马铃薯清洗干净后晾干,经表面消毒处理后真空包装,放入 38℃ 培养箱培养 48 h,取出后立即放入 4℃ 冰箱冷藏 3 d^[19],用于黑心病马铃薯制备。健康马铃薯(简称健康薯)、黑心病马铃薯纵切剖面图如图 1 所示(实验所用黑心病薯黑心程度为 10%~50%,以黑心面积占截面积百分比计,其中黑心程度 10%~20% 占 46%,黑心程度 20%~50% 占 54%)。

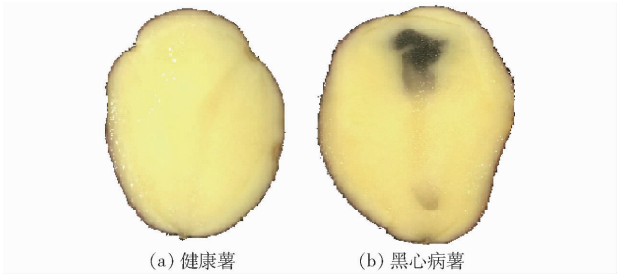


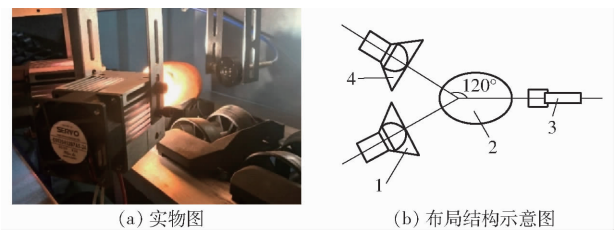
图 1 健康、黑心病马铃薯纵切剖面图
Fig. 1 Cross sections of sound potato and blackheart potato

采集 7 个品种马铃薯(中薯 19 号、中薯 26 号、川凉薯 10 号、丽薯 18 号、鄂 14 号、云薯 109 号、青薯 9 号,由湖北恩施中国南方马铃薯研究中心提供),共计 534 个。其中 234 个用于健康马铃薯光谱采集,300 个用于黑心病马铃薯制备,最终获得 236 个外观无明显褐变的黑心病马铃薯。

1.2 光谱采集过程及装置

基于自主研发的马铃薯内部品质光谱检测装置进行光谱数据采集,该装置由 2 个 50 W 卤素光源、准直光纤、复享 PG2000L 型光谱仪 3 部分组成,光谱采集方式为漫透射方式,光源入射方向与出射方向呈 120° 夹角,检测波段 368~1 039 nm。光源与光

纤布置方式如图 2 所示。为了尽可能利用马铃薯自身遮挡,减少杂散光对光谱采集的影响,将光纤安装位置设置为马铃薯中心向下 1/4 高度处。光谱采集参数设置:样品与参比积分时间均为 50 ms,平滑宽度为 5,平均次数为 2。用聚四氟乙烯球(直径 70 mm)采集参比光谱,遮光处理后采集暗光谱,用于样本吸光度计算。光谱采集过程为在线采集,运行速度为电机转速 560 r/min,检测马铃薯速度约为 3.3 个/s。



(a) 实物图 (b) 布局结构示意图

图 2 光谱检测模块

Fig. 2 Spectrum detection module

1、4. 光源 2. 马铃薯 3. 准直光纤

光谱采集前,将马铃薯放置室温(20℃)中平衡 24 h,每个马铃薯采集 1 条光谱。共采集 470 条光谱,其中健康薯 234 条、黑心病薯 236 条。分别保存样本吸光度谱和能量谱用于模型建立及评价(图 3)。采用随机法按照 3:1 的比例,将样品集划分为校正集和预测集。校正集包含健康马铃薯光谱 176 条,黑心病马铃薯光谱 177 条,预测集包含健康马铃薯光谱 58 条,黑心病马铃薯光谱 59 条。

1.3 变量选择方法

1.3.1 双波长相关系数法

分别计算任意波长对组合的差值和比值,并与样本类别值进行 Pearson 相关分析,计算决定系数^[20-21],并绘制等高线图,决定系数最高的波长对组合用于模型建立。

1.3.2 竞争性自适应重加权算法

CARS 算法^[22]模仿达尔文进化理论中“适者生存”的原则,将每个波长变量看成一个个体,利用指数衰减函数(Exponentially decreasing function,EDF)和自适应重加权采样技术(Adaptive reweighted sampling,ARS)结合的方法优选出偏最小二乘法模型中回归系数绝对值大的变量点,去除权重较小的变量点,从而获得一系列波长变量子集。对每个波长变量子集采用交互验证建模,交互验证均方根误差最小的子集所包含的变量即为最优变量组合。

1.3.3 连续投影算法

SPA^[23-25]是一种前向选择方法,其基本思想是利用向量的投影分析,从光谱信息中充分寻找含有最低限度冗余信息的变量组,使变量间共线性最小

化。SPA 能够大大减少建模所用光谱变量数量,最大程度避免信息重复,提高建模的速度和效率^[26]。

双波长相关系数法可选出与黑心病相关性最强的波长对组合。CARS 算法可以优选出黑心病判别模型中权重较大的关键变量,有利于模型准确度的提高;SPA 算法可最大限度减少冗余信息,对模型的简化效果较好。本文采用双波长相关系数法优化能量谱判别模型,采用 CARS-SPA 联合变量选择法优化吸光度谱判别模型。

1.4 定性判别模型建立及模型评价方法

将黑心病马铃薯样本设置为类别 1,健康马铃薯样本设置为类别 -1,判别阈值为 0。原始能量谱经 SG(Savitzky-Golay)平滑和 SNV(标准正态变量变换)预处理后,采用双波长相关系数法优选黑心病特征波长对,并建立黑心病线性判别模型(Linear discrimination analysis,LDA)。

吸光度谱去除吸光度谱曲线两端噪声较大的部分,在波段 500~950 nm 范围内,建立黑心病偏最小二乘-线性判别模型(Partial least squares-linear discriminant analysis,PLS-LDA),以 Auto 法作为光谱预处理方法,并通过 CARS-SPA 算法对 PLS-LDA 模型进行优化。

采用分类正确率($C, %$)、灵敏度($S_e, %$)、特异性指数($S_p, %$)、分类器特性(Receiver operating characteristic,ROC)曲线下面积 A 作为模型性能评价指标^[27]。其中分类正确率包括校正集分类正确率 C_{cal} 、验证集分类正确率 C_{val} 及总分类正确率 C ,总分类正确率为校正集分类正确率和验证集分类正确率的算术平均值。

以上方法均通过 Matlab R2016a 软件进行计算。PLS-LDA、LDA 算法使用 libpls 工具包^[28]实现。

2 试验与分析

2.1 CARS-SPA 联合变量选择法优化吸光度谱判别模型

在波段 500~950 nm 范围内,建立吸光度谱全变量黑心病 PLS-LDA 判别模型(表 1),灵敏度和特异性指数分别为 98.31% 和 93.75%,灵敏度和特异性指数又称为真阳性率和真阴性率,分别代表黑心病薯和健康薯被正确判别的比例,说明模型可以准确地识别黑心病薯,对黑心病薯的错判率为 1.69%,对健康薯的错判率为 6.25%。校正集、验证集、总体分类正确率分别达 96.03%、92.31%、94.17%,说明波段 500~950 nm 范围内基于吸光度谱的 PLS-LDA 模型可以很好地区分黑心病薯和健

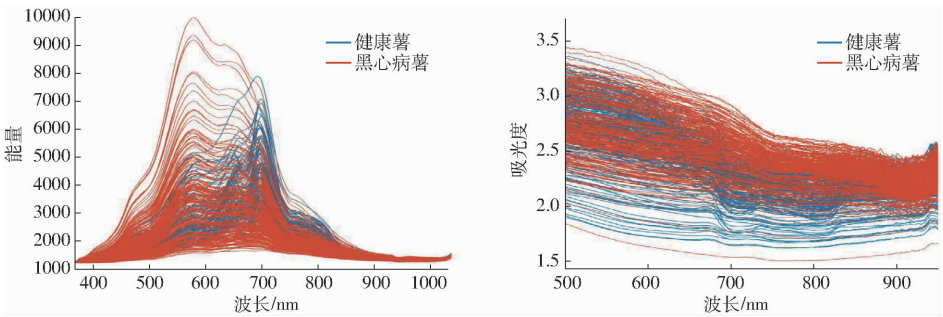


图 3 健康、黑心病马铃薯光谱曲线

Fig. 3 Spectral curves of sound potato and blackheart potato

表 1 基于吸光度谱的马铃薯黑心病 PLS-LDA 模型优化结果

Tab. 1 Classification results of optimized PLS-LDA model of blackheart defect based on absorbance spectrum

变量选择 方法	变量数	因子数	$S_e/\%$	$S_p/\%$	A	分类正确率/%		
						C_{cal}	C_{val}	C
全变量	1 381	4	98. 31	93. 75	0. 989 3	96. 03	92. 31	94. 17
CARS	14	5	98. 87	97. 73	0. 993 4	98. 30	98. 29	98. 30
CARS-SPA	9	5	98. 87	98. 30	0. 993 4	98. 58	98. 29	98. 44

康薯,但该模型包含 1 381 个变量,模型运算量大、检测效率低,不利于在线检测,需要进一步简化。

首先采用 CARS 算法对黑心病特征变量进行选择(图 4)。随采样次数增加,无关变量被逐步剔除,交互验证均方根误差缓慢降低。当剔除关键变量时,交互验证均方根误差急剧升高,模型效果显著变差,选择该转折点对应的采样次数 35 次所得变量子集作为最终变量组合(图 4b)。图 4c 蓝色星号垂线代表交互验证均方根误差最小时,最佳采样次数对应的变量子集。

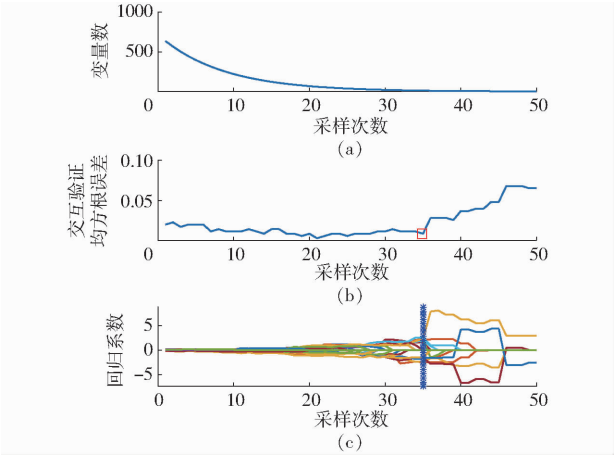


图 4 马铃薯黑心病 CARS 变量选择过程

Fig. 4 Variable selection of blackheart defect discrimination model based on CARS algorithm

在 CARS 算法中通过 35 次采样,共选出 14 个变量(包括 507、608、769、804、849、850、851、864、871、911、915、916、919、933 nm),用于 PLS-LDA 模型建立(表 1)。与原变量 PLS-LDA 模型相比,经过 CARS 处理后,光谱变量数减少了 99%,模型复

杂程度大大降低,同时,模型的总分类正确率达 98. 30%,与全变量模型相比提高 4. 13 个百分点,说明 CARS 能够有效选择对黑心病判别模型贡献率最高的关键变量。

为了进一步简化模型,去除冗余变量,对 CARS 算法优化后的模型进一步进行 SPA 处理,当变量数为 9 时,模型预测均方根误差达到最小值(图 5)。

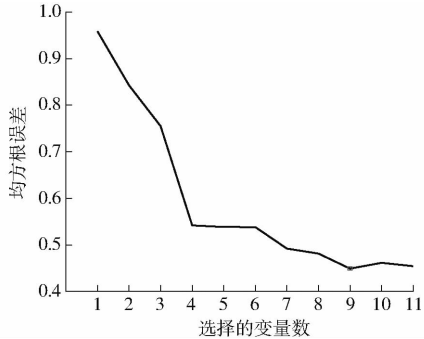


图 5 马铃薯黑心病 CARS-SPA 变量选择过程

Fig. 5 Variable selection of blackheart defect discrimination model based on CARS-SPA algorithm

经过 CARS、SPA 两步优化,得到 9 个可用于马铃薯黑心病判别的敏感波长,分别为 507、608、769、804、850、911、915、916、919 nm(图 6),与 CARS 相比,进一步剔除了 5 个冗余变量。

马铃薯黑心病 CARS-SPA-PLS-LDA 模型判别结果如图 7 所示,与全变量模型和 CARS-PLS-LDA 模型相比,经 CARS-SPA 联合筛选后,模型变量数进一步减少,同时,模型准确度进一步提升,校正集、验证集及总分类正确率分别提高至 98. 58%、98. 29%、98. 44%(表 1)。

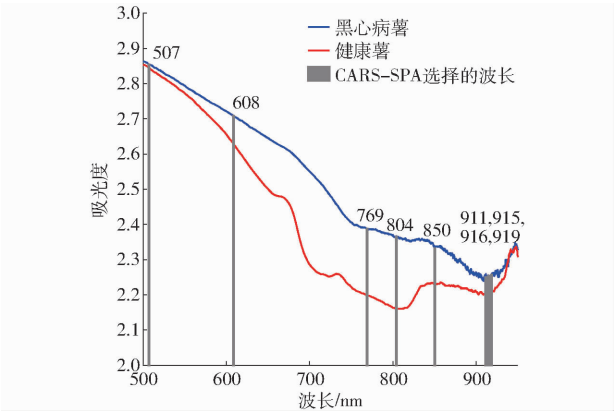


图6 马铃薯黑心病 CARS-SPA 变量选择结果

Fig.6 Optimal variable of blackheart defect discrimination model based on CARS-SPA algorithm

2.2 双波长相关系数法优化能量谱判别模型

将能量谱 368 ~ 1 039 nm 范围内 2 048 个波长变量的能量值两两配对分别计算差值和比值,与黑心病进行相关分析,分别将所有波长对组合的比值和差值与黑心病的决定系数绘制成等高线图

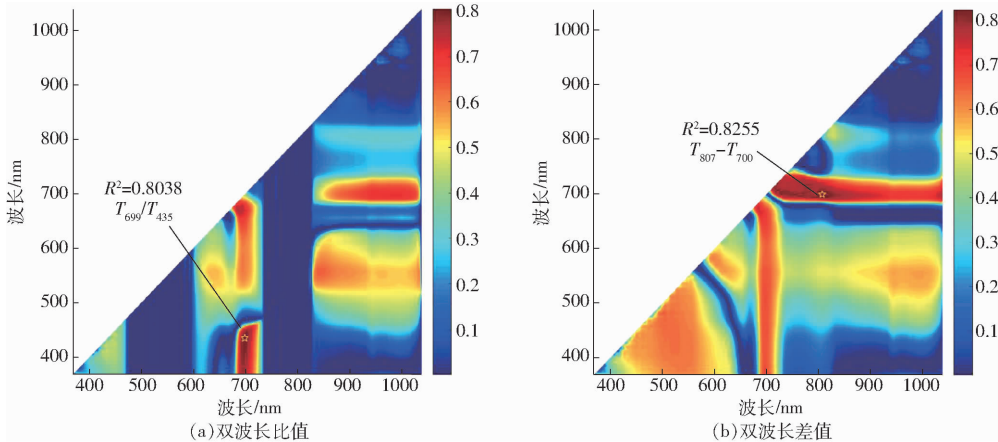


图8 基于能量谱的马铃薯黑心病双波长决定系数等高线图

Fig.8 Contour maps of dual-wavelength correlation coefficient of potato blackheart defect based on energy spectrum

分别采用 T_{699}/T_{435} 和 $T_{807} - T_{700}$ 建立黑心病线性判别模型,两模型总分类正确率接近(表2),分别为 97.67% 和 97.49%。同时, T_{699}/T_{435} 的灵敏度相对较高,对黑心病的判别正确率更高,由于实际应用中,要求对黑心病薯的误判率尽可能低,因而 T_{699}/T_{435} 处理略优于 $T_{807} - T_{700}$,其模型判别结果散点图如图9所示。

表2 基于能量谱的马铃薯黑心病双波长相关系数法模型优化结果

预处理方法	$S_e/\%$	$S_p/\%$	A	分类正确率/%		
				C_{cal}	C_{val}	C
T_{699}/T_{435}	97.71	96.15	0.987 0	96.42	98.91	97.67
$T_{807} - T_{700}$	97.14	97.12	0.985 5	96.06	98.91	97.49

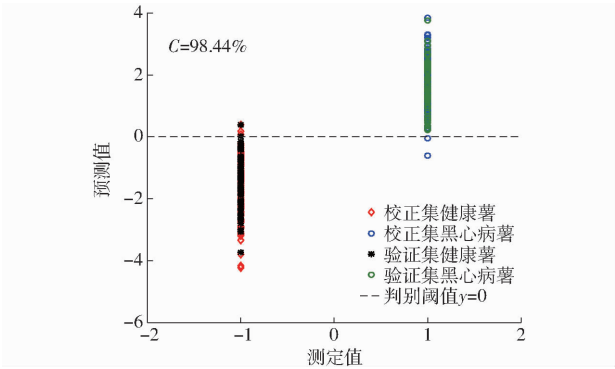


图7 基于吸光度谱的马铃薯黑心病 CARS-SPA-PLS-LDA 模型判别结果散点图

Fig.7 Classification of blackheart and sound potatoes by using CARS-SPA-PLS-LDA method based on absorbance spectrum

(图8),结果表明, T_{699}/T_{435} (T 表示能量,下角标表示波长(单位: nm)) 在所有波长对比值相关分析中决定系数最高,达 0.803 8, $T_{807} - T_{700}$ 在所有波长对差值相关分析中决定系数最高,达 0.825 5。

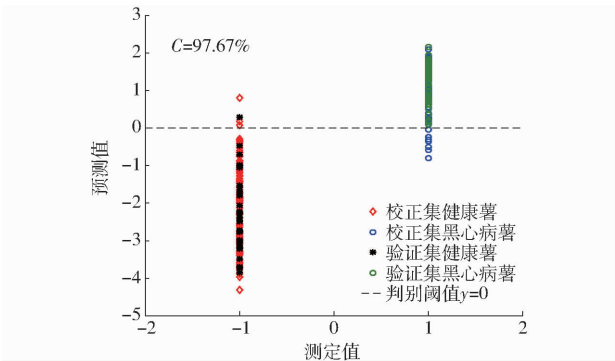


图9 基于能量谱的马铃薯黑心病最优模型 (T_{699}/T_{435})-LDA 判别结果散点图

Fig.9 Classification of blackheart and sound potatoes by using (T_{699}/T_{435})-LDA method based on energy spectrum

健康果蔬的原始能量谱通常在波长 (710 ± 15) nm 和 810 nm 附近有 2 个吸收峰,并且波长 710 nm 附

近峰值与果蔬病害高度相关,通常能量从小到大依次为黑心病果蔬、健康果蔬、水心(或空心)果蔬^[6-7,29-30],而波长 810 nm 附近病害果蔬与健康果蔬峰值差别不明显,作为参比波长可消除直径、表皮粗糙程度等个体差异。因此采用 $T_{807} - T_{700}$ 判别式可有效识别黑心病,同时消除个体差异影响。而由笔者同期对马铃薯干物质和淀粉 PLS 模型特征变量筛选结果可知,波长 699 nm 附近与干物质和淀粉含量高度相关(分别为 694 nm 和 696 nm),而波长 435 nm 附近为叶黄素、 β -胡萝卜素等黄色色素的特征峰^[31-32],与薯肉颜色相关。因此由 T_{699}/T_{435} 建立的黑心病判别式分别代表了黑心病薯内部颜色和营养成分的变化。

2.3 外部验证实验

将优化后的 $(T_{699}/T_{435}) - \text{LDA}$ 模型载入在线检测系统,采集未参与建模的 20 个健康马铃薯和 20 个黑心病马铃薯的光谱用于外部验证(图 10),分别有 1 个健康薯和 1 个黑心病薯被误判,总分类正确率为 95.00%,说明基于能量谱可实现马铃薯黑心病的在线无损检测。被误判黑心病薯黑心程度小于 10%,且黑心颜色偏浅,实验台黑心程度检测阈值需通过增大样本量,进一步实验验证确定。

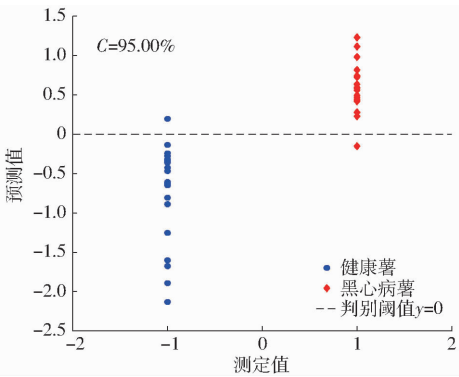


图 10 $(T_{699}/T_{435}) - \text{LDA}$ 模型外部验证结果

Fig. 10 $(T_{699}/T_{435}) - \text{LDA}$ model external verification results

3 结论

- (1)以马铃薯黑心病为研究对象,分别从能量谱和吸光度谱两个角度建立线性判别模型,均可实现黑心病马铃薯的快速无损检测。
- (2)采用 CARS - SPA 算法对吸光度谱模型进行优化,选用 9 个变量,总分类正确率达 98.44%。采用双波长相关系数法对能量谱模型进行优化,仅使用两波长的能量比值 T_{699}/T_{435} ,总分类正确率达 97.67%,外部验证总分类正确率达 95.00%。
- (3)与吸光度谱模型相比,能量谱模型更简单、稳定,并且解决了白背景与暗电流 2 个参比限制的难题,适用性更广泛。

参 考 文 献

[1] 李小昱,陶海龙,高海龙,等. 基于多源信息融合技术的马铃薯痂病无损检测方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 277 - 284.
LI Xiaoyu, TAO Hailong, GAO Hailong, et al. Nondestructive detection method of potato scab based on multi-sensor information fusion technology[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 277 - 284. (in Chinese)

[2] 郭红艳,刘贵珊,吴龙国,等. 基于高光谱成像的马铃薯环腐病无损检测[J]. 食品科学, 2016, 37(12): 203 - 207.
GUO Hongyan, LIU Guishan, WU Longguo, et al. Hyper-spectral imaging technology for nondestructive detection of potato ring rot[J]. Food Science, 2016, 37(12): 203 - 207. (in Chinese)

[3] 金瑞,李小昱,颜伊芸,等. 基于高光谱图像和光谱信息融合的马铃薯多指标检测方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 258 - 263.
JIN Rui, LI Xiaoyu, YAN Yiyun, et al. Detection method of multi-target recognition of potato based on fusion of hyperspectral imaging and spectral information[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 258 - 263. (in Chinese)

[4] LÓPEZ-MAESTRESALAS A, KERESZTES J C, GOODARZI M, et al. Non-destructive detection of blackspot in potatoes by vis-NIR and SWIR hyperspectral imaging[J]. Food Control, 2016, 70(6): 229 - 241.

[5] SUN X, LIU Y, LI Y, et al. Simultaneous measurement of brown core and soluble solids content in pear by on-line visible and near infrared spectroscopy[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 116: 80 - 87.

[6] SEO Y W, NOH S H, LEE K J. Nondestructive detection of the internal defects of Fuji apple using VIS/NIR transmittance spectroscopy[C]//ASABE Meeting Presentation, 2006: 66121.

[7] 高井 秀悦. 光によるリングの褐変判別法に関する研究[J]. 職業能力開発報文誌, 2018, 30(1): 49.
TAKAI S. Nondestructive discrimination of internal browning in apples by optical technique[J]. Vocational Development Bulletin, 2018, 30(1): 49. (in Japanese)

[8] 刘燕德,饶宇,孙旭东,等. 番茄碰伤和可溶性固形物近红外光谱同时在线检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(12): 3910 - 3915.
LIU Yande, RAO Yu, SUN Xudong, et al. The online detection model research of tomatoes' bruise and SSD[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(12): 3910 - 3915. (in Chinese)

[9] 丁继刚,韩东海,李永玉,等. 基于可见/近红外漫透射光谱的马铃薯黑心病及淀粉含量同时在线无损检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(6): 1909 - 1915.
DING Jigang, HAN Donghai, LI Yongyu, et al. Simultaneous non-destructive on-line detection of potato black-heart disease and starch content based on visible/near infrared diffuse transmission spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(6): 1909 - 1915. (in Chinese)

[10] 丁继刚. 鸭梨和马铃薯黑心病及理化品质同时无损在线检测研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019.

- DING Jigang. Simultaneous non-destructive online detection of 'Yali' pears and potatoes' black-heart disease and physical and chemical qualities[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [11] 陈东杰,姜沛宏,郭风军,等. 不同速度对近红外光谱预测库尔勒香梨品质模型的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(6): 1839–1845.
- CHEN Dongjie, JIANG Peihong, GUO Fengjun, et al. Effects of prediction model of Kolar pear based on NIR diffuse transmission under different moving speed on online[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(6): 1839–1845. (in Chinese)
- [12] 邵园园,王永贤,玄冠涛,等. 高光谱成像的猕猴桃货架期快速预测[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(6): 1940–1946.
- SHAO Yuanyuan, WANG Yongxian, XUAN Guantao, et al. Hyperspectral imaging technique for estimating the shelf-life of kiwifruits[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(6): 1940–1946. (in Chinese)
- [13] 张娟,原帅,张骏. 基于小波变换-遗传算法-偏最小二乘的草莓糖度检测研究[J]. 分析科学学报, 2020, 36(1): 111–115.
- ZHANG Juan, YUAN Shuai, ZHANG Jun. Detection of sugar degree in strawberry based on wavelet transform – genetic algorithm – partial least squares[J]. Journal of Analytical Science, 2020, 36(1): 111–115. (in Chinese)
- [14] 高升,王巧华,施行,等. 便携式红提葡萄多品质可见/近红外检测仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 308–319.
- GAO Sheng, WANG Qiaohua, SHI Hang, et al. Design and test of portable red globe grape extraction multi-quality visible/near infrared detector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 308–319. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20210230&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.030. (in Chinese)
- [15] 高升,王巧华,李庆旭,等. 基于近红外光谱的红提维生素 C 含量、糖度及总酸含量无损检测方法[J]. 分析化学, 2019, 47(6): 941–949.
- GAO Sheng, WANG Qiaohua, LI Qingxu, et al. Non-destructive detection of vitamin C, sugar content and total acidity of red globe grape based on near-infrared spectroscopy[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2019, 47(6): 941–949. (in Chinese)
- [16] TANG G, HUANG Y, TIAN K, et al. A new spectral variable selection pattern using competitive adaptive reweighted sampling combined with successive projections algorithm [J]. Analyst, 2014, 139(19): 4894.
- [17] 王文霞,马本学,罗秀芝,等. 近红外光谱结合变量优选和 GA – ELM 模型的干制哈密大枣水分含量研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(2): 543–549.
- WANG Wenxia, MA Benxue, LUO Xiuzhi, et al. Study on the moisture content of dried Hami big jujubes by near-infrared spectroscopy combined with variable preferred and GA – ELM model[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(2): 543–549. (in Chinese)
- [18] XU F, HUANG X, DAI H, et al. Nondestructive determination of bamboo shoots lignification using FT – NIR with efficient variables selection algorithms[J]. Analytical Methods, 2014, 6(4): 1090–1095.
- [19] 田芳,彭彦昆,魏文松,等. 基于机器视觉的马铃薯黑心病检测机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 287–294.
- TIAN Fang, PENG Yankun, WEI Wensong, et al. Design and experiment of detection mechanism for potato blackheart based on machine vision[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 287–294. (in Chinese)
- [20] DAVIES A M C, FEARN T. Doing it faster and smarter (Lesson 6 of matrix algebra)[J]. Spectroscopy Europe, 2002, 14(6): 24–26.
- [21] LEE K, KANG S, DELWICHE S R, et al. Correlation analysis of hyperspectral imagery for multispectral wavelength selection for detection of defects on apples[J]. Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety, 2008, 2(2): 90–96.
- [22] LI H, LIANG Y, XU Q, et al. Key wavelengths screening using competitive adaptive reweighted sampling method for multivariate calibration[J]. Analytica Chimica Acta, 2009, 648(1): 77–84.
- [23] ARAÚJO M C U, SALDANHA T C B, GALVÃO R K H, et al. The successive projections algorithm for variable selection in spectroscopic multicomponent analysis[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2001, 57(2): 65–73.
- [24] GALVÃO R K H, ARAÚJO M C U, JOSÉ G E, et al. A method for calibration and validation subset partitioning[J]. Talanta, 2005, 67(4): 736–740.
- [25] GALVÃO R K H, PIMENTEL M F, ARAÚJO M C U, et al. Aspects of the successive projections algorithm for variable selection in multivariate calibration applied to plasma emission spectrometry[J]. Analytica Chimica Acta, 2001, 443(1): 107–115.
- [26] 曹芳. 基于多波段光谱技术的鱼油关键品质信息快速检测方法研究[D]. 杭州:浙江大学, 2012.
- CAO Fang. Rapid determination for quality of fish oil based on multiple-band spectroscopy technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [27] LI M, WANG J, LIU W, et al. Non-destructive detection of internal flesh browning in 'Fuji' apples using visible/near infrared spectroscopy combined with a PLS – LDA model[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2018, 27(2): 273–281.
- [28] LI H, XU Q, LIANG Y. LibPLS: an integrated library for partial least squares regression and linear discriminant analysis[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2018, 176: 34–43.
- [29] 孙旭东,刘燕德,李铁凡,等. 鸭梨黑心病和可溶性固形物含量同时在线检测研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 227–233.
- SUN Xudong, LIU Yande, LI Yifan, et al. Simultaneous and online detection of blackheart and soluble solids content for 'Yali' pear by visible-near infrared transmittance spectroscopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 227–233. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160130&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.030. (in Chinese)
- [30] HAN Y, LV C, YUAN Y, et al. Non-destructive detection of blackheart potatoes based on energy spectrum of VIS/NIR transmittance[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 512(1): 012060.
- [31] WALSH K B, BLASCO J, ZUDE-SASSE M, et al. Visible-NIR 'point' spectroscopy in postharvest fruit and vegetable assessment: the science behind three decades of commercial use[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 168: 111246.
- [32] LÓPEZ-MAESTRESALAS A, AERNOUTS B, BEERS R V, et al. Bulk optical properties of potato flesh in the 500 ~ 1 900 nm range[J]. Food Bioprocess Technol., 2016, 9(3): 463–470.