

基于支持向量机的甘薯冷害光谱检测方法

张晓雪¹ 杨志辉² 曹珊珊¹ 司永胜¹

(1. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071001; 2. 河北农业大学植物保护学院, 保定 071001)

摘要: 针对甘薯早期冷害不易检测, 导致甘薯品质下降, 易感染其他病害等问题, 建立了基于光谱技术的甘薯冷害无损检测方法。基于类可分性准则的关键特征排序法选择有效特征光谱波长, 利用支持向量机算法对数据集进行训练评价, 检测特征光谱波长的准确性以及甘薯早期冷害发生情况。通过对 5 个甘薯品种共 400 个样品进行实验, 以训练数据与测试数据 5:5 比例检测甘薯冷害准确率高达 99.52%, 以 7:3 比例测试结果高达 99.63%。实验结果证明特征光谱波段选择正确, 表明光谱技术可以有效识别甘薯冷害, 此研究为甘薯贮存分类等后续工作提供了技术方法支持。

关键词: 甘薯冷害; 光谱技术; 特征选择; 支持向量机

中图分类号: S818; TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0471-07

Spectral Detection Method for Chilling Damage of Sweet Potato Based on Support Vector Machine

ZHANG Xiaoxue¹ YANG Zhihui² CAO Shanshan¹ SI Yongsheng¹

(1. College of Information Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China

2. College of Plant Protection, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China)

Abstract: The storage of sweet potato is susceptible to chilling damage, which not only affects its quality but also is susceptible to other diseases, which greatly reduces the commercial and economic value of sweet potato. For the biological detection technology and traditional detection methods will cause irreversible damage to sweet potato, so a non-destructive detection method of sweet potato chilling damage based on optical fiber spectroscopy technology was established. The feature spectrum bands were selected by the key feature ranking method based on the class separability criterion. And the support vector machine algorithm was used to train and evaluate the data set to detect the accuracy of the characteristic spectrum and the occurrence of sweet potatoes before the symptoms of chilling damage were visible to the human eyes. Totally five sweet potato varieties were used for experiments. The accuracy of detecting chilling damage in sweet potatoes was as high as 99.52% with the ratio of training data and test data of 5:5, and the incidence of the ratio of 7:3 was as high as 99.63%. The results proved the correctness of the characteristic spectrum, and the characteristic spectral bands were as follows: Jishu26 was 821.3 ~ 823.5 nm; Yanshu25 was 810.5 ~ 821.9 nm; Xiguahong was 818.8 ~ 821.9 nm; Xinong431 was 601.5 ~ 606.4 nm; and Longshu9 was 759.6 ~ 761.2 nm. The results showed that the spectroscopy technology can effectively detect and identify sweet potato chilling damage. This research provided technical method for subsequent work for sweet potato storage classification.

Key words: sweet potato chilling damage; spectral technology; feature selection; support vector machines

0 引言

甘薯是世界上重要的粮食、饲料作物, 同时还是

重要的工业原料及能源材料^[1-2]。我国是世界上最大的甘薯生产国, 每年种植面积近 4.6×10^6 hm², 占世界甘薯种植面积的 50% 以上, 鲜薯总产量达到

收稿日期: 2020-08-10 修回日期: 2020-09-11

基金项目: 河北省引进留学人员资助项目(C2018340)

作者简介: 张晓雪(1994—), 女, 硕士生, 主要从事农业领域机器视觉应用及无损检测研究, E-mail: 973181861@qq.com

通信作者: 司永胜(1973—), 男, 副教授, 博士, 主要从事农业领域机器视觉应用及无损检测研究, E-mail: siyongsheng@foxmail.com

1.0×10^8 t, 占世界甘薯总产量的 80% 左右^[3]。因甘薯贮藏期对温度敏感, 贮藏温度过高会导致甘薯呼吸旺盛, 容易失水萎蔫, 营养流失, 易霉变软腐; 贮藏温度过低则极易发生冷害。冷害对甘薯的影响较大, 冷害较轻时, 薯块表面有轻微凹陷, 出现水渍状斑点, 硬度下降, 出现“硬芯”现象; 严重时薯块会发生腐烂, 失去食用价值和商业价值^[4-8]。

我国采后甘薯主要采用棚窖、井窖、室内贮藏等传统贮藏方法^[9], 贮藏温度不易控制、波动范围大, 冷害现象时有发生。对甘薯冷害及时检测可以避免或降低损失。甘薯冷害初期无明显症状或症状轻微, 人眼难以识别, 目前测定甘薯冷害的常规方法为生物化学检测方法^[8,10-11], 属于破坏性检测且成本较高。部分研究人员利用光谱技术对水果冷害进行了研究。文献[12]利用近红外光谱技术对砂糖橘正常果和冷害果进行定性判别分析, DPLS 模型校正集正确率为 100%, 验证集正确率为 89.7%, 基本满足砂糖橘冷害果无损检测的要求, 但是验证集的判别率稍低; 文献[13]利用光谱技术对初始发生冷害的桃果实进行了判别测试, 应用独立主成分分析方法和权重系数法优选出冷害的特征波长, 利用 Fisher 判别方法建模, 验证总体正确率为 91.0%。上述研究证明了利用光谱技术进行农产品冷害检测的可行性, 但检测精度有待进一步提高。与上述砂糖橘和桃子等其他农产

品相比, 甘薯的表皮较厚、透光性较差, 利用光谱技术进行冷害检测具有更高的难度。文献[14]利用高光谱成像结合化学计量学对早期检测青椒冷害进行研究, 使用偏最小二乘判别分析建立光谱的监督分类模型, 对新鲜和储藏样品分类的误码率为 88% 和 84%, 原始光谱反而显示出更高的分类精度。文献[15]利用光谱技术和化学方法检测马铃薯和甘薯含水率, 通过偏最小二乘回归、支持向量机回归、局部加权偏最小二乘回归和反向传播神经网络建立了多元模型, 获得良好的模型性能, 预测确定系数较高, 但未见利用光谱技术进行甘薯冷害检测研究。本文基于光谱技术利用支持向量机针对早期甘薯冷害展开研究, 选择敏感波段, 实现甘薯冷害的无损检测, 为早期发现并处理甘薯冷害, 延长甘薯的贮藏时间, 提高甘薯经济效益, 避免经济损失, 提供理论依据和技术支持。

1 材料与方 法

1.1 实验材料及设备

1.1.1 实验样品

本文测试甘薯于 2019 年 11 月采收于河北农业大学保定甘薯实验基地。共测试 5 个甘薯品种, 分别为济薯 26、烟薯 25、西瓜红、西农 431 和陇薯 9 号, 选择无病虫害、无机械损伤的甘薯块茎作为测试样品, 如图 1 所示。



图 1 甘薯样品

Fig. 1 Sweet potato samples

1.1.2 主要仪器与设备

USB2000 + 型光纤光谱仪: 美国海洋光学公司, 精度 1.5 nm, 波长范围为 350 ~ 1 000 nm; 配备 99% 漫反射标准板(250 ~ 2 500 nm); 可调谐高功率卤钨灯光源(360 ~ 2 500 nm); 全光谱一分三反射探头(200 ~ 2 500 nm)。恒温生化培养箱: 苏州市国飞实验仪器有限公司, 温度范围 5 ~ 65℃, 温度波动度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$, 温度均匀度 $\pm 1\%$, 控温方式为 PID 自动恒温。大型恒温恒湿实验室: 温度范围 -50 ~ 80℃, 相对湿度范围 20% ~ 98%, 温度分布均匀度 $\pm 3^\circ\text{C}$, 温度控制精度 0.1℃, 相对湿度分布均匀度 $\pm 3\%$, 相对湿度控制精度 $\pm 0.1\%$ 。

1.1.3 所用软件

利用 USB2000 + 型光纤光谱仪自带的光谱分析

软件 OceanView 1.6.7 采集光谱数据。利用 Matlab R2014a(美国 MathWork 公司)完成光谱数据预处理、样本划分、特征波长提取、模型建立和甘薯冷害检测。

1.2 实验准备及数据采集

1.2.1 实验准备

甘薯采收后直接放进恒温箱存储, 恒温箱温度分别设定为 10℃(对照组)和 8、6、1℃(实验组)。每个品种每个温度下存放 20 个样品, 共计 400 个甘薯。

1.2.2 光谱数据采集及处理

实验过程中每天观察各温度下贮藏的甘薯块茎, 拍照记录, 并请农学专家鉴别甘薯的冷害发生情况。同时利用光谱仪采集样品的反射光谱数据, 光

谱仪工作参数如下: 光谱数据采集方式为反射; 光谱扫描范围为 350 ~ 1 000 nm; 光谱分辨率为 1.5 nm; 扫描次数设为 100; 滑动平均宽度设为 3; 积分时间选择自动。

将光纤探头距离甘薯表皮 5 mm 进行光谱数据采集。为减少外界光线影响, 探头和甘薯表面之间放置黑色套管。每个甘薯随机选择 3 个不同位置点进行数据采集。

由于受到仪器自身或外界环境干扰, 采集的光谱数据在 350 nm 波长附近不稳定, 故实际采用的光谱范围为 360.5 ~ 1 000 nm。

1.3 特征波长选择

利用光谱数据对甘薯冷害分析之前, 需要选择特征波长。特征波长选择的质量对于数据分析的结果有较大的影响。准确选择特征可以减少特征数量, 使模型泛化能力更强, 减少过拟合^[16-18]。本文采用基于类可分性准则的关键特征排序法选择特征波长, 其方法首先计算特征显著性指数, 然后按显著性指数进行排序^[19], 即

$$Z^* = Z(1 - AP) \quad (1)$$

式中 Z ——显著性指数

Z^* ——改进后显著性指数

A ——显著性水平

P ——互相关系数绝对值的平均值

$$P(z_i) = \frac{\sum_{m=1}^i |r(z_i, z_m)|}{i} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

$$\text{其中 } r(z_i, z_m) = \frac{\text{Cov}(z_i, z_m)}{\sqrt{\text{Var}[z_i] \text{Var}[z_m]}} \quad (3)$$

式中 z_i ——候选特征 z_m ——已选特征

$\text{Var}[z_i]$ —— z_i 方差 $\text{Var}[z_m]$ —— z_m 方差

$\text{Cov}(z_i, z_m)$ —— z_i 与 z_m 的协方差

$r(z_i, z_m)$ —— z_i 与 z_m 互相关系数

N ——特征数量

分析特征波长是要提取低温下存储甘薯与 10℃ 存储的甘薯光谱数据的区别, 已有研究显示 10℃ 左右适合甘薯贮藏, 故提取每个品种特征波长的实验数据由相应的低温与 10℃ 采集的甘薯光谱数据构成, 即 20 个 10℃ 和 20 个 1℃ 贮存的甘薯, 每个样品采集 3 个位置点共 120 组光谱反射率数据按 5:5 组成 1℃ 的数据集, 其他温度数据集同理。基于类可分性准则的关键特征排序法通过分析低温光谱反射率数据与 10℃ 健康数据的区别, 从而找到相对应的波长, 根据显著性指数对其进行排序并提取显著性指数高的波长作为最终的特征波长。此方法默

认使用绝对值双样本 t -检验联合方差估计准则, 即 A 取值为 0, 不对潜在要素加权; 而本文使用互相关加权进一步减少所需的特征数量^[20-21]。首先利用式(2)、(3)计算出候选特征和所有先前选择的特征之间的互相关系数的绝对值的平均值 P , 利用数据分析软件 SPSS 计算显著性指数 Z , 设置 $A = 0.05$, 对其进行加权, 使用 t -检验统计量对输入特征进行排序, 通过删除高度相关的特征进一步减少特征值数量, 得到 Z^* 。基于类可分性准则的关键特征排序法选择出特征光谱波长后, 下一步利用支持向量机进行检测, 检测甘薯发生水渍状当天及之前的数据, 分析甘薯冷害发生情况。

1.4 支持向量机

本文利用支持向量机 (Support vector machine, SVM) 根据特征波长对获得的甘薯光谱反射率数据进行训练分析, 将受冷害影响的甘薯与健康甘薯进行分类。支持向量机在解决小样本、非线性和高维样本等问题中具有突出的优势, 对于原始样本空间不是线性可分的情况, 可将样本从原始空间映射到一个更高维的特征空间, 使得样本在这个特征空间内线性可分^[22-26]。原理如下:

令 $\varphi(x_i)$ 表示将 x_i 映射后的特征向量, 则特征空间中划分超平面所对应的模型可表示为

$$f(x_i) = y_i(\omega^T \varphi(x_i) + b) \quad (4)$$

式中 (x_i, y_i) ——样本点数据集

b ——偏置系数 ω ——权值向量

i ——样本总数

构造目标函数为

$$L = \min \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j y_i y_j \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) - \sum_{i=1}^N \alpha_i \right) \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i = 0 \\ \alpha_i \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$y_i(\omega^T \varphi(x_i) + b) \geq 1 \quad (7)$$

式中 α_i, α_j ——拉格朗日乘子

式(5)是凸函数, 有最优解, 相比其他形式的表达具有更大的优势。

若遇到高维或无穷维问题, $\varphi(x_i)^T \varphi(x_j)$ 不易求解, 此时可以利用核函数 $K(x_i, x_j)$ 解决。

$$K(x_i, x_j) = \langle \varphi(x_i), \varphi(x_j) \rangle = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) \quad (8)$$

求解后得到

$$\begin{aligned} f(x_i) &= y_i(\omega^T \varphi(x_i) + b) = \\ &= \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) + b = \\ &= \sum_{i=1}^N \alpha_i y_i K(x_i, x_j) + b \end{aligned} \quad (9)$$

本文以非线性径向基函数为核即高斯核 (Radial basis function, RBF) 建立支持向量机模型, 使用核函数就不需要每次都具体计算出原始样本点映射的新的无穷维度的样本点, 直接使用映射后的新的样本点的点乘计算公式即可, 减少计算量同时节省存储空间^[27-30]。

2 结果分析

2.1 实验结果

温度越低甘薯越容易发生冷害。水渍状是人眼所能识别的冷害初始症状(图2a), 内部组织边缘出现黑色斑点(图2b), 受冷害影响严重的甘薯, 甚至会发霉腐烂(图2c)。

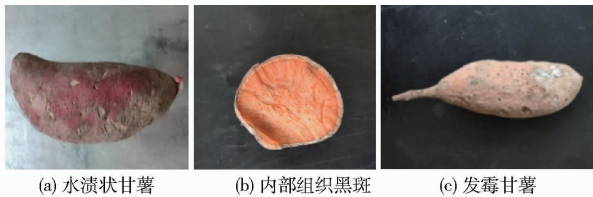


图2 受冷害影响甘薯样品

Fig. 2 Sweet potato samples affected by chilling damage

由于本实验要检测甘薯发生水渍状之前的冷害情况, 因此记录甘薯初始发生水渍状的时间, 实验过程中5个品种的甘薯初始发生水渍状时间基本一致, 1、6、8℃贮藏条件下的甘薯样品分别在贮藏10、17、22 d时出现水渍状, 而10℃贮藏的甘薯并未出现水渍状。

2.2 特征波长选择

采用基于类可分性准则的关键特征排序法选取特征波长, 光谱数据为甘薯样品初始发生水渍当天及之前每天采集的数据, 分别检测每个甘薯样品对应的1、6、8、10℃的光谱反射率。将每个品种在3个低温下选出的相同的光谱波长作为该品种的特征波长, 5个甘薯品种最终选出的特征光谱波长如表1所示。

表1 特征光谱波长选择

Tab. 1 Characteristic spectrum band selection nm

品种	特征光谱波长
济薯26	823.2、822.3、821.6、822.9、823.5、821.3、822.6
烟薯25	818.5、818.1、821.9、817.8、810.5
西瓜红	819.1、819.4、818.8、819.7、820.0、821.9、820.7、821.6、821.0
西农431	604.7、605.4、604.3、605.0、604.0、605.7、603.6、603.3、606.1、606.4、602.9、602.6、602.2、601.9、601.5
陇薯9号	361.3、360.9、361.6、362.4、360.5、362.0、761.2、760.9、759.6、362.8

从表1中可以看出, 济薯26的特征光谱波长在821.3~823.5 nm之间, 烟薯25的特征光谱波长在810.5~821.9 nm之间, 西瓜红特征光谱波长在818.8~821.9 nm之间, 以上三者的特征光谱波长比较接近, 分布在810~824 nm之间, 属于近红外波段; 西农431特征光谱波长在601.5~606.4 nm之间, 属于可见光波段; 陇薯9号特征光谱波长在360.5~362.8 nm和759.6~761.2 nm两个波段间, 分别属于近紫外波段和可见光波段。

提取出特征光谱波长后, 分析特征光谱波长反射率数据情况, 为便于分析, 将反射率数据做归一化处理, 归一化反射率如表2所示。

表2 归一化反射率分析结果

Tab. 2 Normalized reflectance analysis					
温度/℃	济薯26	烟薯25	西瓜红	西农431	陇薯9号
1	0.028 5 ~ 0.03	0.028 ~ 0.029	0.028 5 ~ 0.029 5	0.016 ~ 0.019	0.005 ~ 0.03
	0.028 ~ 0.029 5	0.028 5 ~ 0.029	0.028 5 ~ 0.03	0.016 ~ 0.019	0.007 ~ 0.027
6	0.028 ~ 0.029	0.028 ~ 0.029	0.028 5 ~ 0.029 5	0.015 ~ 0.019	0.005 ~ 0.025
	0.027 ~ 0.028	0.026 5 ~ 0.027 5	0.027 5 ~ 0.028 5	0.012 ~ 0.016	0.005 ~ 0.025
8	0.028 ~ 0.029	0.028 ~ 0.029	0.028 5 ~ 0.029 5	0.015 ~ 0.019	0.005 ~ 0.025
	0.027 ~ 0.028	0.026 5 ~ 0.027 5	0.027 5 ~ 0.028 5	0.012 ~ 0.016	0.005 ~ 0.025
10	0.028 ~ 0.029	0.028 ~ 0.029	0.028 5 ~ 0.029 5	0.015 ~ 0.019	0.005 ~ 0.025
	0.027 ~ 0.028	0.026 5 ~ 0.027 5	0.027 5 ~ 0.028 5	0.012 ~ 0.016	0.005 ~ 0.025

由表2发现, 济薯26、烟薯25和西瓜红3个品种在1、6、8℃检测的反射率基本一致, 集中在0.028~0.03之间, 相对应的10℃对照组反射率集中在0.0265~0.0285之间, 各品种之间反射率无交叉; 西农431在1、6、8℃检测的反射率集中在0.015~0.019之间, 相对应的10℃对照组反射率集中在0.012~0.016之间, 仅8℃下的反射率与对照组有少部分交叉。此结果说明济薯26、烟薯25和西瓜红3组实验规律性较好, 西农431次之。虽然西农431反射率相比前三者较低, 但每个品种低温存储的甘薯反射率都较对照组(10℃)反射率偏高, 说明特征波长可以区分10℃存储的甘薯光谱反射率与低温存储下的甘薯光谱反射率。实验结果中陇薯9号甘薯的特征光谱波段却无法检测出规律性, 其数据如表2所示, 低温实验组反射率与10℃对照组反射率都集中在0.005~0.03之间, 相互之间存在交叉, 无法进一步分析不同温度对甘薯的影响。针对陇薯9号的情况, 将其两个特征波段360.5~362.8 nm和759.6~761.2 nm分开, 分别检测两个波段反射率情况, 结果如表3所示。

由表3可见, 陇薯9号在360.5~362.8 nm波段低温实验组反射率在0.005~0.014之间, 10℃对照组反射率在0.008~0.016之间, 实验组反射率比

表 3 陇薯 9 号分波段反射率检测结果

Tab. 3 Longshu 9 sub-band reflectance test results

温度/℃	波段/nm	
	360.5 ~ 362.8	759.6 ~ 761.2
1	0.005 ~ 0.013	0.027 ~ 0.029 5
6	0.007 ~ 0.014	0.027 5 ~ 0.029
8	0.005 ~ 0.012	0.028 ~ 0.029
10	0.008 ~ 0.016	0.026 5 ~ 0.027

对照组的偏低,且数据分布有交叉情况,规律性仍不明显;而在 759.6 ~ 761.2 nm 波段,实验组反射率集中在 0.027 ~ 0.029 5,对照组反射率集中在 0.026 5 ~ 0.027,可以看出实验组低温下反射率高于对照组的反射率。针对陇薯 9 号两个波段的分析结果,后续将不再分析 360.5 ~ 362.8 nm 波段的情况,仅将 759.6 ~ 761.2 nm 作为陇薯 9 号的特征波段进行研究。

2.3 甘薯冷害检测

本文利用支持向量机模型预测甘薯水渍状之前甘薯早期冷害发生的可能性。光谱数据包括水渍状发生当天及之前每天采集的数据,通过分析水渍状发生当天采集的光谱数据与未发生症状时采集的数据的规律性,来验证实验的准确性。

实验以非线性径向基函数为核建立 SVM 模型,分别按 5:5 和 7:3 的比例训练数据和测试数据,利用 5 折交叉验证法检测上述每个数据集,根据选出的特征波长将低温下的数据与 10℃ 健康的数据区分,支持向量机检测结果以其检测出的低温数据个数与样本数据集实际输入的个数做比,

作为支持向量机检测冷害发生的准确率。结果如图 3 所示。

分析图 3,从水渍状发生之前的数据检测结果来看,随着甘薯贮存时间变长,准确率升高,甘薯在刚开始存放阶段,即 1、6、8℃ 存储的甘薯分别在存放 1 ~ 4 d、1 ~ 7 d 和 1 ~ 10 d 时,冷害检测准确率低,在 10% ~ 40%,说明没有发生冷害或极其轻微;而在发生水渍状前 4 ~ 5 d 的检测准确率基本都达到 70% 及以上,意味着检测出的甘薯冷害数据越来越多。从图 3 中可以看出,对于发生水渍状当天的数据检测准确率在 90% 及以上,与发生水渍状前 1 ~ 2 d 的检测准确率一致或略高,这说明 5 个甘薯品种的检测结果在水渍状发生前后保持一致的规律性。这也与文献[31 - 34]的研究结果一致,甘薯低温短时间存储可以保鲜,但是随着贮存时间变长,会发生不同程度冷害。其次从温度可以看出,1℃ 下存储的甘薯准确率升高最快,6℃ 次之,8℃ 下的最慢,这也与常识相符,说明温度越低甘薯越容易发生冷害。虽然准确率随贮存时间总体呈上升趋势,但有些数据波动较大,尤其在甘薯贮存前期表现较为明显,分析原因可能是在甘薯贮存初期部分甘薯发生不同程度冷害或同一甘薯不同位置发生不同程度冷害,由于检测的位置点随机,所以出现数据波动现象。从实验结果还可以看出,济薯 26 和烟薯 25 的检测效果较好,以 5:5 比例检测甘薯水渍状前一天的冷害发生率高达 99.52%,以 7:3 的比例测试结果高达 99.63%。西瓜红、西农 431 和陇薯 9 号相对稍低,

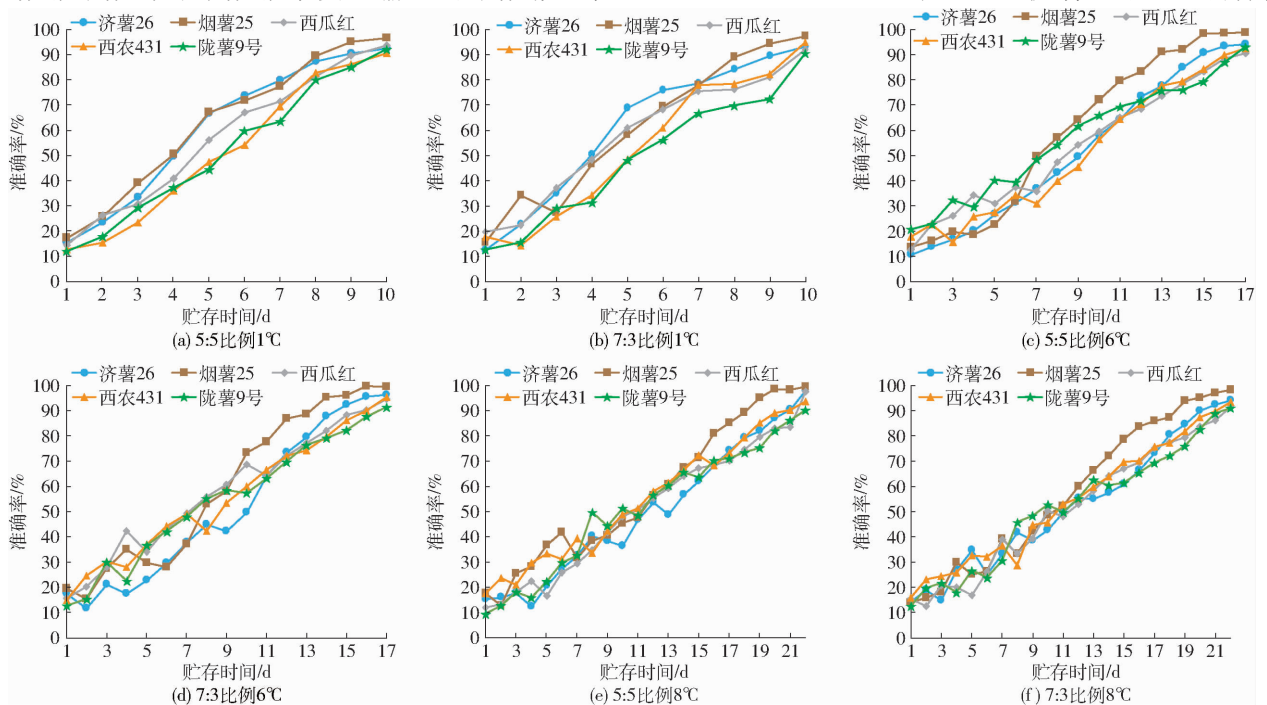


图 3 甘薯冷害检测准确率

Fig. 3 Sweet potato chilling damage detection rate

其原因可能是品种差异性,包括表皮颜色、块茎颜色等物理差异;也可能与采集数据时采集的甘薯表皮位置有关。

本实验结果证明甘薯在发生人眼可见的水渍症状之前就已经发生冷害。本实验正确选择出了5个甘薯品种的冷害敏感光谱波段,以较高的准确率检测出人眼不可识别情况下受冷害影响的甘薯。可以看出1、6、8℃存放的甘薯分别在存储第7、12、16天达到检测率70%左右,可以认为此时甘薯就已经发生冷害,而外表未有任何症状。如果把准确率降低到60%作为冷害发生标准,1、6、8℃存储环境下,在第5、9、15天已经发生冷害。

两种训练样本和测试样本比例未见结果明显不同,说明5:5比例模型训练效果已经达到较好效果。

3 结论

(1)实验基于类可分性准则的关键特征排序法选择数据集的重要特征光谱波段,效果较好,能够提

取出可识别甘薯冷害的特征光谱波长,济薯26的特征光谱波长在821.3~823.5 nm之间,烟薯25的特征光谱波长在810.5~821.9 nm之间,西瓜红的特征光谱波长在818.8~821.9 nm之间,西农431的特征光谱波长在601.5~606.4 nm之间,陇薯9号的特征光谱波长在759.6~761.2 nm之间。这一测试结果证明了此方法用于二元分类问题特征排序的有效性。

(2)使用支持向量机对甘薯冷害数据进行训练检测,检测结果与实际甘薯冷害数据检测结果相符,证明了本实验结果的可靠性,也说明支持向量机在分类问题尤其是非线性分类问题中展现出巨大优势。

(3)综上所述,本文检测准确率较好,证明甘薯在发生轻微冷害且人眼难以观察时,光谱仪技术可满足这一需求,能够以较高的准确度识别甘薯早期冷害。本研究为甘薯的品质检测及分级问题提供了技术方法支持。

参 考 文 献

- [1] 闫凯亚,张洪翠,蔡佳昂,等. 间歇热处理对鲜切甘薯贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业,2017,43(9):226-231. YAN Kaiya, ZHANG Hongcui, CAI Jiaang, et al. Effects of intermittent heat treatment on the storage quality of fresh-cut sweet potato[J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(9): 226-231. (in Chinese)
- [2] 穆桂脂,辛青青,玄冠涛,等. 甘薯秧蔓回收机仿垄切割粉碎抛送装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(12):53-62. MU Guizhi, XIN Qingqing, XUAN Guantao, et al. Design and experiment of knife roller and throwing device for sweet potato vine recycling machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 53-62. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191206&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.006. (in Chinese)
- [3] 谢一芝,郭小丁,贾赵东,等. 中国食用甘薯育种现状及展望[J]. 江苏农业学报,2018,34(6):1419-1424. XIE Yizhi, GUO Xiaoding, JIA Zhaodong, et al. Progresses and prospects on edible sweetpotato breeding in China[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2018, 34(6): 1419-1424. (in Chinese)
- [4] 林婕,王则金,林震山,等. 冷激处理对甘薯冷害及活性氧代谢的影响[J]. 粮食与饲料工业,2016(9):12-16. LIN Jie, WANG Zejin, LIN Zhenshan, et al. Effect of cold shock treatment on chilling injury and active oxygen metabolism of sweet potato[J]. Cereal Feed Industry, 2016(9): 12-16. (in Chinese)
- [5] 解则义,李洪民,马代夫,等. 低温胁迫影响甘薯贮藏的研究进展[J]. 植物生理学报,2017,53(5):758-767. XIE Zeyi, LI Hongmin, MA Daifu, et al. Research progress of the effects of low temperature stress on the sweetpotato during storage[J]. Plant Physiology Communications, 2017, 53(5): 758-767. (in Chinese)
- [6] LI X, YANG H, LU G. Low-temperature conditioning combined with cold storage inducing rapid sweetening of sweetpotato tuberous roots (*Ipomoea batatas* (L.) Lam) while inhibiting chilling injury[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 142(4): 1-9.
- [7] PAN Y, CHEN L, CHEN X, et al. Postharvest intermittent heat treatment alleviates chilling injury in cold-stored sweet potato roots through the antioxidant metabolism regulation[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(12): e14274.
- [8] 申燕飞,吴玲艳,郑剑英,等. 甘薯贮藏冷害研究现状[J]. 保鲜与加工,2017,17(6):132-135. SHEN Yanfei, WU Lingyan, ZHENG Jianying, et al. The research situation on chilling injury of sweet potatoes during storage[J]. Storage and Process, 2017, 17(6): 132-135. (in Chinese)
- [9] 忻晓庭,潘悠优,陆国权,等. 响应面法优化甘薯皮多酚超声提取工艺[J]. 江苏师范大学学报(自然科学版),2018,36(1):26-29,32. XIN Xiaoting, PAN Youyou, LU Guoquan, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction technology of polyphenols from sweetpotato peel by response surface methodology[J]. Journal of Jiangsu Normal University (Natural Science Edition), 2018, 36(1): 26-29, 32. (in Chinese)
- [10] 李杰,李喜宏,张继明,等. 紫薯最适贮藏保鲜温度研究[J]. 食品科技,2017,42(12):56-59. LI Jie, LI Xihong, ZHANG Jiming, et al. Research of different storage temperatures on fresh-keeping of purple potato[J]. Food Science and Technology, 2017, 42(12): 56-59. (in Chinese)
- [11] 杨晓月,邵海燕,钟迪颖,等. 秦薯5号甘薯营养成分测定及贮藏前低温处理对贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业,2020,46(7):201-206. YANG Xiaoyue, GAO Haiyan, ZHONG Diying, et al. Determination of nutritional components in Qinshu No. 5 sweet potato

- and effect of pre-storage low temperature treatment on storage quality[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(7): 201–206. (in Chinese)
- [12] 耿红兰. 壳聚糖和变温处理对砂糖橘冷害的控制及其近红外光谱检测[D]. 太谷: 山西农业大学, 2015.
GENG Honglan. Controlling chilling injury of *shatangju* with chitosan coating and chang temperature treatment and nondestructive examination with near infrared spectroscopy[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [13] 张婧, 潘磊庆, 屠康. 利用半透射高光谱图像检测‘霞晖5号’水蜜桃冷害[J]. 食品科学, 2015, 36(2): 160–167.
ZHANG Qiang, PAN Leiqing, TU Kang. Detecting chilling injury of ‘Xiahui 5’ peach by hyperspectral half-transmittance imaging[J]. Food Science, 2015, 36(2): 160–167. (in Chinese)
- [14] BABELLAHI F, PALJWAL J, ERKINBAEV C, et al. Early detection of chilling injury in green bell peppers by hyperspectral imaging and chemometrics[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 162: 111100.
- [15] SU W H, BAKALIS S, SUN D W. Chemometric determination of time series moisture in both potato and sweet potato tubers during hot air and microwave drying using near/mid-infrared (NIR/MIR) hyperspectral techniques[J]. Drying Technology, 2020, 38(5–6): 806–823.
- [16] 李邳琴, 杜建强, 聂斌, 等. 特征选择方法综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(24): 10–19.
LI Zhiqin, DU Jianqiang, NIE Bin, et al. Summary of feature selection methods[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(24): 10–19. (in Chinese)
- [17] 刘艺, 曹建军, 刁兴春, 等. 稳定特征选择的多目标蚁群优化[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(6): 118–123.
LIU Yi, CAO Jianjun, DIAO Xingchun, et al. Multiobjective ant colony optimization for stable feature selection[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(6): 118–123. (in Chinese)
- [18] 孙广路, 宋智超, 刘金来, 等. 基于最大信息系数和近似马尔科夫毯的特征选择方法[J]. 自动化学报, 2017, 43(5): 795–805.
SUN Guanglu, SONG Zhichao, LIU Jinlai, et al. Feature selection method based on maximum information coefficient and approximate Markov blanket[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(5): 795–805. (in Chinese)
- [19] 曹文雄. 基于希尔伯特-黄变换的超声组织定征的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
CAO Wenxiong. Research of ultrasound tissue characterization based on Hilbert–Huang transform[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [20] KAFLE G K, KHOT L R, JAROLMASJED S, et al. Robustness of near infrared spectroscopy based spectral features for non-destructive bitter pit detection in honeycrisp apples[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 120: 188–192.
- [21] KHORRAMNIA K, KHOT L R, SHARIFF A R B M, et al. Oil palm leaf nutrient estimation by optical sensing techniques [J]. Transactions of the ASABE, 2014, 57(4): 1267–1277.
- [22] 肖志云, 刘洪. 小波域马铃薯典型虫害图像特征选择与识别[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 24–31.
XIAO Zhiyun, LIU Hong. Features selection and recognition of potato typical insect pest images in wavelet domain[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 24–31. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170903&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.003. (in Chinese)
- [23] AFIFI S, GHOLAM H H, SINHA R. A system on chip for melanoma detection using FPGA-based SVM classifier[J]. Microprocessors and Microsystems, 2019, 65: 57–68.
- [24] KHOSRVI A A, AMINI A, POURMOHAMMAD A. Random forest and SVM based face recognition using subspace methods [J]. Information Systems and Signal Processing Journal, 2018, 3(1): 5–13.
- [25] 魏丽冉, 岳峻, 李振波, 等. 基于核函数支持向量机的植物叶部病害多分类检测方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 166–171.
WEI Liran, YUE Jun, LI Zhenbo, et al. Multi-classification detection method of plant leaf disease based on kernel function SVM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 166–171. (in Chinese)
- [26] CHEN L, FENG Y, MARAM M A, et al. Multi-SVM based Dempster–Shafer theory for gesture intention understanding using sparse coding feature[J]. Applied Soft Computing, 2019, 85: 105787.
- [27] 简献忠, 顾祎婷. 一种基于全过程优化支持向量机的短期电力负荷预测方法[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(11): 45–51.
JIAN Xianzhong, GU Yiting. Short-term electric load forecasting method based on global optimization support vector machine [J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(11): 45–51. (in Chinese)
- [28] 陈方圆, 周鑫, 陈奕云, 等. 不同核函数支持向量机和可见-近红外光谱的多种植被叶片生化组分估算[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(2): 428–434.
CHEN Fangyuan, ZHOU Xin, CHEN Yiyun, et al. Estimating biochemical component contents of diverse plant leaves with different kernel based support vector regression models and VNIR spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(2): 428–434. (in Chinese)
- [29] 李子文, 李宗朋, 买书魁, 等. 最小二乘支持向量机的核桃露饮品中脂肪成分的定量分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(12): 3916–3920.
LI Ziwen, LI Zongpeng, MAI Shukui, et al. Determination of fat in walnut beverage based on least squares support vector machine[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(12): 3916–3920. (in Chinese)
- [30] CHOI I H, KOO J B, WOO J W, et al. Damage evaluation of porcelain insulators with 154 kV transmission lines by various support vector machine (SVM) and ensemble methods using frequency response data[J]. Applied Sciences, 2020, 10(1): 84.
- [31] 钱蕾. 甘薯的收获与安全贮藏技术[J]. 农业开发与装备, 2016(7): 139–140.
- [32] JI C Y, KIM H S, LEE C J, et al. Comparative transcriptome profiling of tuberous roots of two sweetpotato lines with contrasting low temperature tolerance during storage[J]. Gene, 2020, 727: 144244.
- [33] 徐秀霞. 甘薯收获及安全贮藏技术[J]. 河南农业, 2011(7): 50.
- [34] 王炜, 黄开红, 刘春泉, 等. 不同贮藏温度对甘薯商品性的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(3): 233–235.