

基于高光谱的马铃薯微型种薯分类检测

李鸿强¹, 孙红², 李民赞^{2*}

(1. 河北建筑工程学院 数理系, 河北 张家口 075000; 2. 中国农业大学 现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 采用高光谱分析技术结合模式识别, 建立了8种马铃薯微型种薯(大西洋、荷兰-14、荷兰十五041、荷兰十五Q8、冀张薯12号、冀张薯8号、兴佳2号和Y2)的分类检测方法。采集276个种薯样本, 对860~1700 nm的原始光谱进行标准化、11点Savitzky-Golay平滑和4点差分一阶导数光谱预处理, 将预处理后的光谱数据进行主成分分析, 发现前3个主成分的累积贡献率为95.12%, 包含了原始光谱的大部分信息, 可作为分类变量。再分别使用线性判别分析、BP神经网络和支持向量机进行分类建模。最终通过分层、分步骤建立了8种马铃薯微型种薯的分类模型。首先采用线性判别分析模型区分大西洋、荷兰-14、荷兰十五041和其它品种, 平均正确识别率达88.79%。再建立BP神经网络模型将其它品种样本区分为两类, 一类为冀张薯8号和Y2, 另一类为荷兰十五Q8、冀张薯12号和兴佳2号, 平均正确识别率达93.24%。最后以BP神经网络模型区分冀张薯8号和Y2, 平均正确识别率为77.78%; 以支持向量机分类模型区分荷兰十五Q8、冀张薯12号和兴佳2号, 平均正确识别率为87.23%。该研究建立的8种马铃薯种薯分步骤、分层分类识别模型的平均正确识别率达89.75%, 表明高光谱光谱分析技术可用于马铃薯微型种薯的分类检测。

关键词: 马铃薯; 微型种薯; 高光谱; 分类检测

中图分类号: O657.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2020)11-1421-06

Classification Detection of Potato Micro Seed Potato Based on Hyperspectral

LI Hong-qiang¹, SUN Hong², LI Min-zan^{2*}

(1. School of Science, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China; 2. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: Using hyperspectral analysis technology combined with pattern recognition, the classification and detection methods of eight potato micro seed potatoes (Daxiyang, Holland-14, Holland fifteen 041, Holland fifteen Q8, Jizhangshu 12, Jizhangshu 8, Xingjia 2 and Y2) were established. 276 seed tuber samples were collected. The original spectra of 860-1700 nm were preprocessed by standardize, 11 points Savitzky-Golay smoothing and 4 points differential first derivative. Principal component analysis showed that the cumulative contribution rate of the first three principal components was 95.12%, including most information of the original spectra, and could be used as classification variables. Then, linear discriminant analysis, BP neural network and support vector machine were used for classification modeling. Finally, the classification models of 8 potato micro seed potatoes were established by stratification and step by step. Firstly, the linear discriminant analysis model was used to distinguish Daxiyang, Holland-14, Holland fifteen 041 and other varieties. The average correct recognition rate was 88.79%. Then BP neural network model was established to divide the samples of other varieties into two categories: Jizhangshu 8, Y2, and Holland fifteen Q8, Jizhangshu 12, Xingjia 2, with an average correct recognition rate of 93.24%. Finally, the BP neural network model was used to distinguish Jizhangshu 8 and Y2, with the average correct recognition rate of 77.78%; and the support vector machine classification model was used to distinguish Holland fifteen Q8, Jizhangshu 12 and Xingjia 2, with the average correct recognition rate of 87.23%. The method was applied to the classification detection of eight potato seed potatoes with the average correct recognition rate of 89.75%, which indicated that the hyperspectral analysis technology could be used for the

收稿日期: 2020-07-02; 修回日期: 2020-07-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31971785); 河北省高等学校科学技术研究青年基金资助项目(QN2018075)

*通讯作者: 李民赞, 博士, 教授, 研究方向: 精细农业系统研究, E-mail: limz@cau.edu.cn

classification and detection of potato micro seed potatoes.

Key words: potato; micro seed potato; hyperspectral; classification detection

马铃薯是继小麦、稻谷和玉米之后全球第四大重要的粮食作物。目前,利用光谱技术对马铃薯块茎品质检测主要集中于马铃薯的缺陷^[1-5]及内部品质^[6-7],鲜见应用于马铃薯微型种薯品种检测的报道。马铃薯微型种薯(又称原原种)是用脱毒的试管苗移栽或扦插最初产生的种薯,质量约 1~20 g,其经济价值高,经过多年发展已有较多品种,为保证品种的纯度,开展马铃薯微型种薯种类无损鉴别研究,有助于马铃薯生产的良性发展。

模式识别是最常用的一种借助于数学方法进行光谱模式区分和识别的综合方法。光谱定性分析的模式识别方法有判别分析(DA)^[8]、BP 神经网络^[9]、支持向量机(SVM)^[10-13]。DA 是一种线性分类器,其原理是将带上标签的数据点通过投影方法,投影到维度更低的空间中,使得投影后的点会形成按类别区分为一簇一簇的情况,相同类别的点将会在投影后的空间中更接近。对于 K 个类别的分类问题,每个类别对应一个分类公式,将待识别对象代入分类公式,得到 K 个分类值,其最大值决定待识别对象的类别。BP 神经网络是一种多层的前向型神经网络,该网络中信号为前向传播,误差的调整过程从最后的输出层依次向之前各层逐渐进行,标准的 BP 网络采用梯度下降算法,网络权值沿着性能函数的梯度反向调整,该网络模式识别是一种有监督的模式识别方法,通常具有一个或多个 Sigmoid 隐含层和线性输出层。SVM 是 Vapnik 等^[14]于 1992 年首先提出的机器学习方法,可用作模式识别,其理论基础是结构风险最小化的近似实现,能较好地解决小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题。基于此,本研究采用高光谱分析技术和模式识别方法,对大西洋等 8 种马铃薯微型种薯的分类检测方法进行研究。

1 实验部分

1.1 仪器与样品

“盖亚(Gaia Sorter)”高光谱分选仪,配卓立汉光公司 Image- λ “谱像”系列高光谱相机^[15-16]; Gaia Sorter 高光谱成像系统由镜头(OL23)、面阵 CCD 侦测器(LT365)、光谱仪(V17E)、均匀光源(2 套溴钨灯)、电控移动平台、计算机及控制软件等部件组成;摄像头分辨率为 320×256 pix,光谱范围为 860~1 745 nm,光谱分辨率为 5 nm,光谱采样点为 6.3 nm,光谱通道数为 256。

实验所用马铃薯微型种薯为大西洋(24 个)、荷兰-14(28 个)、荷兰十五 041(50 个)、荷兰十五 Q8(60 个)、冀张薯 12 号(24 个)、冀张薯 8 号(31 个)、兴佳 2 号(24 个)和 Y2(36 个) 8 个品种总计 276 个样本。其中大西洋马铃薯还原糖含量低,主要用作油炸马铃薯片,中熟品种;荷兰-14 为红皮黄肉,鲜食中熟品种;荷兰十五 041 为黄皮黄肉,鲜食早熟品种;荷兰十五 Q8 为黄皮黄肉,鲜食中熟品种;冀张薯 12 号为白皮白肉,鲜食高产中熟品种;冀张薯 8 号为白皮白肉,鲜食晚熟品种;兴佳 2 号为黄皮黄肉,鲜食中熟品种;Y2 为黄皮黄肉,晚熟品种。8 种种薯,生长周期和内在品质各有特点。

1.2 光谱采集

高光谱图像数据采集前,先预热系统,以消除基线漂移的影响。对高光谱成像仪进行调焦,设定曝光时间,调整输送装置速度,调整镜头高度,保证得到清晰的图像。供试样品去除表面杂质,常温静置 24 h,采集光谱数据,调试后的采集参量为:镜头高度 26.5 cm,前进速度 0.75 cm/s,回退速度 3 cm/s,曝光时间 25 ms。利用系统自带 Spec View 软件进行采集控制,每个样本对应一个包含影像信息和光谱信息的三维数据立方体,由于 1 700~1 745 nm 波长范围的光谱重叠严重,因此选择 860~1 700 nm 的数据进行分析,共 256 个波长。

1.3 数据提取及处理方法

利用光谱采集系统自带的 Spec View 软件进行黑白校正,使用 ENVI 5.1 软件从校正后的图像中获取 5~6 个 10 像素×10 像素的感兴趣区域(Region of interest, ROI),获得原始光谱数据。数据处理均在 MATLAB R2013b 环境中进行。

1.4 光谱预处理与模型性能评价方法

1.4.1 光谱预处理 光谱预处理^[17]采用 Z-Score 标准化、Savitzky-Golay 卷积平滑、一阶导数。Z-

Score 标准化是基于原始数据的均值和标准差进行数据的标准化方法，其计算采用原始数据减去原始数据的均值，得到的差再除以原始数据的标准差。Savitzky - Golay 卷积平滑通过移动窗口，利用最小二乘法进行最佳拟合，以最小二乘拟合系数为数字滤波响应函数进行原光谱的卷积平滑处理。本研究采用 11 点 Savitzky - Golay 卷积平滑，将 Savitzky - Golay 系数 $W = [-36, 9, 44, 69, 84, 89, 84, 69, 44, 9, -36]$ 代入公式(1)求解：

$$X_i^* = \frac{\sum_{j=-r}^r X_{i+j} W_j}{\sum_{j=-r}^r W_j} \quad (1)$$

式中， X_i 和 X_i^* 分别为平滑前、后光谱数据向量中的一个元素， X_{i+j} 为第 i 个窗口中第 j 个元素， W_j 为移动窗口平滑中的系数($r=5$)。数据平滑可用平滑高频噪声提高信噪比。

一阶导数可消除基线漂移或平缓背景干扰的影响，本研究使用 4 点差分公式计算一阶微分光谱：

$$f'(x_i) = \frac{1}{6h} (-11x_i + 18x_{i-1} - 9x_{i-2} + 2x_{i-3}) \quad (2)$$

式中， x_i 表示波长 i 处的原始光谱反射率数据； $f'(x_i)$ 表示波长 i 处的微分光谱反射率； h 表示差分时的步长(本研究取 $h=2$)。

1.4.2 分类模型性能评价方法 模型鉴定效果的评价指标为正确识别率和错误识别率。

正确识别率 = (正确接收的样品个数/测试样品个数) × 100%

错误识别率 = (错误接收的样品个数/测试样品个数) × 100%

2 结果与讨论

2.1 原始光谱特点分析

8 个品种种薯的平均原始光谱见图 1，其光谱反射率总体变化趋势一致，均在 960 ~ 1 100、1 160 ~ 1 200、1 410 ~ 1 510 nm 之间表现出不同程度的深吸收；在 880 ~ 920、1 060 ~ 1 100、1 260 ~ 1 300 nm 范围内表现为不同程度的局部强反射，在 915 nm 处的光谱反射率出现尖峰，在 915 ~ 956 nm 和 1 122 ~ 1 149 nm 范围内的光谱反射率出现急速下降。大西洋品种在 885 ~ 1 130 nm 之间的反射率在 8 个品种种薯样品中最低，而在 1 370 ~ 1 660 nm 之间的反射率最高。荷兰 - 14 在 920 ~ 1 400 nm 之间的反射率最高。荷兰十五 041 和荷兰十五 Q8 在整个波段反射率处于中等水平，荷兰十五 Q8 在 1 100 ~ 1 370 nm 时的反射率整体高于荷兰十五 041，而在 1 370 ~ 1 635 nm 的反射率又整体低于荷兰十五 041。冀张薯 12 号在 860 ~ 930 nm 的反射率在 8 个品种种薯中最高。冀张薯 8 号与冀张薯 12 号的反射率变化规律相似，但在整个波段中的反射率低于冀张薯 12 号。Y2 品种在 1 400 ~ 1 510 nm 的反射率在 8 个品种种薯中最低，之后反射率平稳上升。兴佳 2 号与 Y2 品种的反射率变化规律较相似，但在 1 510 nm 之前各点反射率比 Y2 高，而在 1 510 nm 后反射率回升速度低于 Y2。

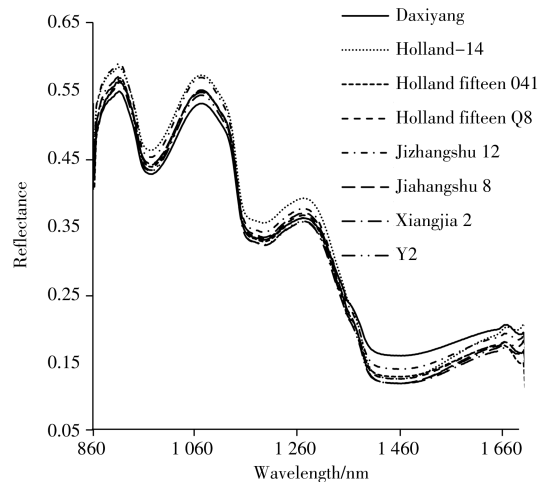


图 1 8 个品种种薯的原始光谱图
Fig. 1 Raw spectra of eight seed potatoes

由此可见，8 个品种种薯样本的光谱反射率总体变化趋势一致，但彼此间存在一定差异，为后续依据光谱反射率建立微型种薯分类模型奠定了基础。

2.2 数据处理

对原始光谱进行标准化、Savitzky - Golay 平滑和一阶导数光谱预处理，以预处理后的数据所建 SVM 模型的测试性能作为预处理方法的选择依据，最终确定标准化、11 点 Savitzky - Golay 平滑和步长为 2 的一阶差分导数的组合光谱预处理为本实验的最佳预处理方法。对处理后的光谱数据进行主成分分析，得前 3 个主成分的累积贡献率为 95.12%，表明前 3 个主成分基本包含了原始光谱的大部分信息。

2.3 探索分类

以前 3 个主成分为分类参数, 研究 8 种马铃薯微型种薯的分类方法^[18]。考虑到种类较多, 首先, 选用泛化能力强的支持向量机进行探索分类。所建支持向量机分类模型的测试结果如下: 大西洋测试正确率 50.00%, 荷兰-14 测试正确率 75.00%, 荷兰十五 041 测试正确率 96.67%, 荷兰十五 Q8 测试正确率 51.28%, 冀张薯 8 号测试正确率 100%, 冀张薯 12 号测试正确率 25.00%, 兴佳 2 号测试正确率 50.00%, Y2 测试正确率为 31.25%。总测试正确率为 49.14%, 测试错误率为 50.86%, 由此可见, 8 个品种用一个模型分类判别的效果较差, 需分组、分步骤建立检测模型。

图 2 为样本 1, 3 主成分得分图。由图可见, 3 类样本类间重叠较少, 存在明显的界限, 类内又具有聚集性。其它 5 个品种分布在大西洋、荷兰-14、荷兰十五 041 之间。因此, 首先将大西洋、荷兰-14、荷兰十五 041 和其它 5 个品种看成 4 个类别建立模型。再对其它 5 个品种分组探索分类模型。以此类推, 分组、分步骤建立 8 个品种的分类检测模型。

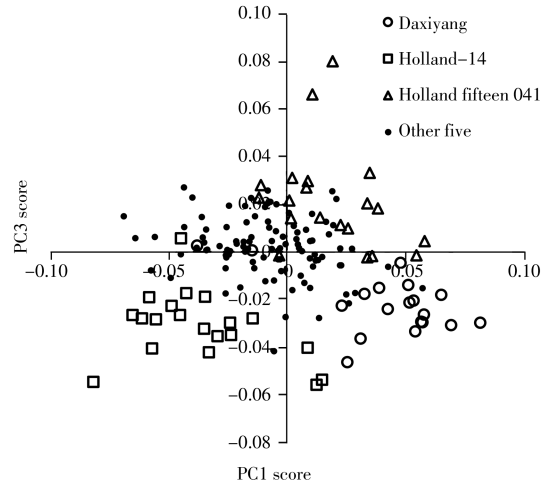


图 2 样本得分图

Fig. 2 Sample score chart

2.4 分组、分步骤建模

2.4.1 大西洋、荷兰-14、荷兰十五 041 和其它品种的线性判别分类模型 将大西洋、荷兰-14、荷兰十五 041 和其它品种分为 4 组, 设置类别标签依次为“1, 2, 3, 4”, 以 1, 3 主成分得分作为分类变量, 建立以上 4 个类别种薯的线性判别分类模型。训练集 160 个样本, 测试集 116 个样本。

测试集测试混淆结果如表 1 所示。大西洋(4 个)测试正确率 75.00%, 荷兰-14(8 个)测试正确率 87.50%, 荷兰十五 041(30 个), 测试正确率 92.86%, 其它品种(74 个)测试正确率 87.84%。大西洋、荷兰-14、荷兰十五 041 测试错误样本均被测试为其它品种, 其它品种样本被错误测试为大西洋和荷兰-14 样本有 8 个, 占错误测试样本的 87.50%。由此可见, 大西洋、荷兰-14、荷兰十五 041 三者之间线性分类界限分明。线性判别模型的平均正确识别率为 88.79%, 可作为大西洋、荷兰-14、荷兰十五 041 和其它品种的分类模型。

表 1 大西洋、荷兰-14、荷兰十五 041 和其它品种的线性分类测试结果

Table 1 Classification test results of Daxiyang, Holland-14, Holland fifteen 041 and other

Confusing results (混淆结果)	Daxiyang(大西洋)	Holland-14(荷兰-14)	Holland fifteen 041 (荷兰十五 041)	Other(其它)
Daxiyang	3	0	0	1
Holland-14	0	7	0	1
Holland fifteen 041	0	0	28	2
Other	4	4	1	65

2.4.2 荷兰十五 Q8、冀张薯 8 号、冀张薯 12 号、兴佳 2 号与 Y2 的分类模型 对“2.4.1”中其它品种种薯应用 BP 神经网络分类建模, 测试集测试混淆结果见表 2。由表 2 数据计算得: 荷兰十五 Q8 测试正确率 41.03%, 冀张薯 8 号测试正确率 54.55%, 冀张薯 12 号测试正确率 50.00%, 兴佳 2 号测试正确率 50.00%, Y2 测试正确率 93.75%。Y2 样本的测试准确率较高, 冀张薯 8 号的测试准确率也高于其它品种, Y2 样本被错误识别的 1 个样本被测试为兴佳 2 号, 冀张薯 8 号的 5 个样本被错误识别为 Y2。冀张薯 8 号和 Y2 对其它品种非线性判别分析界限较明显, 但此二者间的分类界限模糊。

表2 荷兰十五 Q8、冀张薯 8 号、冀张薯 12 号、兴佳 2 号和 Y2 的 BP 网络分类测试结果

Table 2 Classification test results of BP neural network for Holland fifteen Q8, Jizhangshu 8, Jizhangshu 12, Xingjia 2 and Y2

Confusing results	Holland fifteen Q8 (荷兰十五 Q8)	Jizhangshu 8 (冀张薯 8 号)	Jizhangshu 12 (冀张薯 12 号)	Xingjia 2 (兴佳 2 号)	Y2
Holland fifteen Q8	16	4	12	7	0
Jizhangshu 8	0	6	0	0	5
Jizhangshu 12	1	0	2	1	0
Xingjia 2	1	0	1	2	0
Y2	0	0	0	1	15

2.4.3 荷兰十五 Q8、冀张薯 12 号、兴佳 2 号与冀张薯 8 号、Y2 分类模型 由“2.4.2”分类模型的测试结果可知，冀张薯 8 号和 Y2 分类特性较相似，两者不易区分，荷兰十五 Q8、冀张薯 12 号和兴佳 2 号相互之间均有误判。因此，将冀张薯 8 号和 Y2 合并作为一类，荷兰十五 Q8、冀张薯 12 号和兴佳 2 号合并作为另一类，分别进行 2 分类建模。

应用 BP 神经网络分类建模，测试集测试混淆结果显示第一类(荷兰十五 Q8、冀张薯 12 号、兴佳 2 号)47 个测试样本的测试正确率为 91.49%，4 个测试为第二类(冀张薯 8 号和 Y2)，测试错误率 8.51%。第二类(冀张薯 8 号和 Y2)27 个测试样本的测试正确率为 96.30%，测试错误率为 3.70%。由此可见，两类分类模型均有很高的分类精度，测试集正确识别率均在 90% 以上，平均正确识别率为 93.24%。

2.4.4 荷兰十五 Q8、冀张薯 12 号、兴佳 2 号分类模型 应用支持向量机对荷兰十五 Q8、冀张薯 12 号、兴佳 2 号进行分类建模。结果显示：荷兰十五 Q8 的测试正确率为 89.74%，4 个错误测试为兴佳 2 号，测试错误率 10.26%。冀张薯 12 号的测试正确率 75.00%，1 个错误测试为荷兰十五 Q8，测试错误率 25.00%。兴佳 2 号的测试正确率为 75.00%，1 个错误测试为荷兰十五 Q8，测试错误率 25.00%。平均正确识别率为 87.23%。

2.4.5 冀张薯 8 号、Y2 分类模型 应用 BP 神经网络对冀张薯 8 号、Y2 建立分类模型，结果显示：冀张薯 8 号的测试正确率为 72.73%，3 个测试为 Y2 品种，测试错误率 27.27%。Y2 的测试正确率为 81.25%，3 个测试为冀张薯 8 号，测试错误率 18.75%。平均正确识别率为 77.78%。

3 结 论

以第 1 和第 3 主成分作为分类变量，应用判别分析、BP 神经网络、支持向量机对大西洋、荷兰 - 14、荷兰十五 041、荷兰十五 Q8、冀张薯 12 号、冀张薯 8 号、兴佳 2 号和 Y2 高光谱分类检测方法进行了研究。由于类别较多，且类间特征差别较小，难以建立 8 个马铃薯微型种薯的统一分类模型，即使是泛化能力最好的 SVM 模型，平均测试正确率也仅 49.14%，因此需分步骤、分组建模。最终建立了 3 层的分组、分层检测策略：第 1 层采用线性判别分析模型将待测样本判别为大西洋、荷兰 - 14、荷兰十五 041 或其它品种，平均正确识别率达 88.79%。第 2 层采用 BP 神经网络模型将其它品种样本判别为 2 类，一类冀张薯 8 号和 Y2，另一类为荷兰十五 Q8、冀张薯 12 号和兴佳 2 号，平均正确识别率达 93.24%。第 3 层利用支持向量机分类模型荷兰十五 Q8、冀张薯 12 号和兴佳 2 号 3 个品种，平均正确识别率达 87.23%，利用 BP 神经网络分类模型区分冀张薯 8 号和 Y2 品种，平均正确识别率达 77.78%。表明高光谱分析技术可用于马铃薯微型种薯的类别检测。

参考文献：

- [1] Chu X L, Shi Y Y, Chen P, Li J Y, Xu Y P. *J. Instrum. Anal.* (褚小立, 史云颖, 陈瀑, 李敬岩, 许育鹏. 分析测试学报), **2019**, 38(5): 603-611.
- [2] Zhou Z, Li X Y, Tao H L, Gao H L. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* (周竹, 李小昱, 陶海龙, 高海龙. 农业工程学报), **2012**, 28(21): 229-236.
- [3] Gao H L, Li X Y, Xu S M, Tao H L, Li X J, Sun J F. *Spectrosc. Spectral Anal.* (高海龙, 李小昱, 徐森森, 陶海龙, 李晓金, 孙金凤. 光谱学与光谱分析), **2013**, 33(12): 3366-3371.
- [4] Li X Y, Ku J, Yan Y Y, Xu M L, Xu S M, Jin R. *Trans. Chin. Soc. Agric. Machinery* (李小昱, 库静, 颜伊芸, 徐梦玲, 徐森森, 金瑞. 农业机械学报), **2016**, 47(3): 228-233.

- [5] Sun J Y, Yu Z H, Xi N S C K T. *J. Inner Mongolia Agric. Univ. : Nat. Sci. Ed.* (孙建英, 郁志宏, 席那顺朝克图. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版), **2019**, 40(4): 52 - 57.
- [6] Ding J G, Han D H, Li Y Y, Peng Y K, Wang Q, Han X. *Spectrosc. Spectral Anal.* (丁继刚, 韩东海, 李永玉, 彭彦昆, 王绮, 韩熹. 光谱学与光谱分析), **2020**, 40(6): 1909 - 1915.
- [7] Wang F, Li Y Y, Peng Y K, Yang B N, Li L, Liu Y C. *Spectrosc. Spectral Anal.* (王凡, 李永玉, 彭彦昆, 杨炳南, 李龙, 刘亚超. 光谱学与光谱分析), **2018**, 38(12): 3736 - 3742.
- [8] Xue J X, Zhang S J, Sun H X, Zhou J B. *Trans. Chin. Soc. Agric. Machinery*(薛建新, 张淑娟, 孙海霞, 周靖博. 农业机械学报), **2013**, 44(8): 169 - 173.
- [9] Yang W J. *J. Earth Sci. Environ.* (杨文娟. 地球科学与环境学报), **2008**, 30(1): 101 - 106.
- [10] Zhang J, Liu Z B, Song W A, Fu L Z, Zhang Y L. *Spectrosc. Spectral Anal.* (张静, 刘忠宝, 宋文爱, 富丽贞, 章永来. 光谱学与光谱分析), **2018**, 38(7): 2307 - 2310.
- [11] Xu S H, Yang N K, Yi M Q. *Value Eng.* (徐晟皓, 杨楠堃, 易梦乔. 价值工程), **2015**, 34(4): 19 - 21.
- [12] Si L Q, Qian Y, Bai W J, Ye H F, Hu Y, Sheng G H, Jiang X C. *High Voltage Apparatus*(司良奇, 钱勇, 白万建, 叶海峰, 胡岳, 盛戈皞, 江秀臣. 高压电器), **2014**, 50(11): 1 - 6.
- [13] Chu X L, Xu Y P, Lu W Z. *J. Instrum. Anal.* (褚小立, 许育鹏, 陆婉珍. 分析测试学报), **2008**, (6): 619 - 622.
- [14] Vapnik V N, Lerner A Y. *Avtomat. i Telemekh.*, **1963**, 24(6): 774 - 780.
- [15] Zheng T, Liu N, Sun H, Long Y W, Yang W, Zhang Q. *Trans. Chin. Soc. Agric. Machinery*(郑涛, 刘宁, 孙红, 龙耀威, 杨玮, 张勤. 农业机械学报), **2017**, 48(S1): 153 - 159, 340.
- [16] Sun H, Zheng T, Liu N, Cheng M, Li M Z, Zhang Q. *Trans. Chin. Soc. Agric. Eng.* (孙红, 郑涛, 刘宁, 程萌, 李民赞, Zhang Qin. 农业工程学报), **2018**, 34(1): 149 - 156.
- [17] Sun Y, Du Z H, Yin X, Xu K X. *Spectrosc. Spectral Anal.* (孙毅, 杜振辉, 尹新, 徐可欣. 光谱学与光谱分析), **2008**, 28(10): 2282 - 2284.
- [18] Li H Q. *Study on Detection Method of Vegetable Quality Based on Hyperspectral Analysis*. Beijing: China Agricultural University(李鸿强. 基于高光谱分析的蔬菜品质检测方法研究. 北京: 中国农业大学), **2019**.

(责任编辑: 周启动)