

# 马铃薯干物质空间分布状态可视化研究

许英超 王相友 印 祥 胡周勋 岳仁才

(山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255049)

**摘要:** 采用可见-近红外高光谱检测系统对马铃薯中干物质进行快速检测,并最终实现其分布状态的可视化。采用9种光谱预处理方法对采集的马铃薯高光谱数据进行分析对比,得到标准正态变量(SNV)结合 Savitzky-Golay 平滑(SG)和一阶导数(FD)的预处理方法效果最好。经过光谱预处理后,采用正自适应加权算法-连续投影法(CARS-SPA)对光谱进行特征变量提取,获得22个变量。对所选变量不同的建模方法进行了比较,以偏最小二乘回归(PLSR)模型预测效果最优,预测集决定系数为0.849,均方根误差为0.878%,相对分析误差为2.312,优于全波段模型。将SNV-SG-FD-CARS-SPA-PLSR模型与高光谱图像结合,得到马铃薯干物质主要分布在内髓与维管束环之间、在内髓位置干物质含量最低、由内髓向外干物质逐渐增加的空间分布。内髓位置干物质质量分数最低,为12.16%,外层最高可达24.62%。结果表明:可见-近红外高光谱技术可准确、快速地实现马铃薯干物质的检测和空间分布的可视化。

**关键词:** 马铃薯; 干物质; 空间分布; 可视化; 高光谱

**中图分类号:** O433.5; S123      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)02-0339-06

## Visualization Spatial Assessment of Potato Dry Matter

XU Yingchao WANG Xiangyou YIN Xiang HU Zhouxun YUE Rencai

(School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** In order to visualize the spatial distribution of potato dry matter, the internal dry matter content of potato was studied by using visible/near-infrared hyperspectral imaging (HSI) and a detection model of dry matter of potato was established. The reflectance spectra of sliced potatoes which were extracted from the regions of interest of HIS were performed with different pretreatments. The standard normal variable (SNV) combined with Savitzky-Golay smoothing (SG) and the first derivative (SNV-SG-FD) was the optimal pretreatment. Based on optimal pretreatment, competitive adaptive reweighted sampling (CARS) combined with successive projections algorithm (SPA) was used to select variables of the spectrum and obtained 22 variables. Three regression models based on principal component regression (PCR), support vector regression (SVMR) and partial least squares regression (PLSR) were established. The best performance was achieved by PLSR model, its determination coefficient ( $R_p^2$ ), root mean square error for prediction and relative percent difference were 0.849, 0.878% and 2.312, respectively. The PLSR model based on 22 variables was superior to the full-spectrum model. An imaging processing algorithm was developed to transfer each pixel in potato dry matter content with the SNV-SG-FD-CARS-SPA-PLSR model. The imaging showed the distribution of dry matter within the potatoes. It showed that the potato dry matter was mainly distributed between the inner pith and vascular bundle and the inner pith had the lowest dry matter content. It was gradually increased from the inner pulp to the outer. Dry matter content was 12.16% in inner pith and the outer layer reached up to 24.62%. The results show that the visible near infrared hyperspectral imaging is a useful tool for rapidly and effectively visualizing detecting spatial distribution of potato dry matter.

**Key words:** potato; dry matter; spatial distribution; visualization; hyperspectra

收稿日期: 2017-10-17    修回日期: 2017-11-17

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFD0701603-02)和山东省农机装备研发创新计划项目(2017YF056)

**作者简介:** 许英超(1980—),女,讲师,博士生,主要从事农产品无损检测研究,E-mail: xuyingchao@sdut.edu.cn

**通信作者:** 王相友(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品加工技术及装备研究,E-mail: wxy@sdut.edu.cn

## 0 引言

马铃薯作为第四大粮食作物,其品质越来越受到人们的关注。马铃薯的品质评价指标较多,如硬度、蛋白质含量、干物质含量、还原糖含量、淀粉含量等,其中,干物质含量是马铃薯加工业对马铃薯品质评价的主要指标,关系到企业原材料的成本与后续工艺参数的选择<sup>[1]</sup>。通常用于加工的马铃薯干物质质量分数需要达到马铃薯鲜质量的 18% ~ 26%<sup>[2]</sup>。但马铃薯在生长过程中,由于栽培方式<sup>[3]</sup>和栽培措施<sup>[4]</sup>的不同,干物质会发生转移,从而在马铃薯块茎内部分布不均匀。研究马铃薯各部位的干物质含量及分布状态至关重要,直接关系到马铃薯加工业的经济效益。

国外部分学者已对马铃薯干物质分布情况进行研究。PRITCHARD 等<sup>[5]</sup>将马铃薯长轴顶端部分去掉,剩余部分均匀分成 9 块,干燥后测量干物质,结果显示,外侧干物质含量高于内侧含量。BANDANA 等<sup>[6]</sup>认为马铃薯表皮层干物质含量高于其余部位。以上研究均表明马铃薯干物质在马铃薯块茎各部位的分布不同,但由于取样方法的局限性,不能精确显示各部位的具体情况。因此,需要新的方法提供更详细的马铃薯干物质含量分布信息,目前未见国内学者进行此项研究的相关文献。

高光谱成像技术将光谱技术与成像技术相结合,可同时获取高光谱图像中每个像素点的光谱信息和空间信息<sup>[7]</sup>,根据官能团分子的振动跃迁特性,定量测量被测物的化学、物理性质及它们的空间分布状态。目前,高光谱成像技术已被广泛应用于食品质量的快速检测<sup>[8]</sup>,主要检测食品中的水分<sup>[9]</sup>、蛋白质<sup>[10]</sup>、脂肪<sup>[11]</sup>、可溶性固形物<sup>[12]</sup>、还原糖<sup>[13]</sup>和干物质等含量<sup>[14]</sup>。

本文采用高光谱成像技术对马铃薯干物质的空间分布状态进行可视化检测,结合光谱技术与图像处理技术,建立预测模型,旨在确定马铃薯干物质空间分布状态的可视化,以期马铃薯精加工提供理论指导,为开发便携式测量装置提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 样本

试验用马铃薯采收于山东省滕州市,品种为希森 6 号。挑选外表完好、无机械损伤、大小均匀的马铃薯 20 个。洗净放于恒温 23℃ 暗室内晾干 24 h。参照 MO 等<sup>[15]</sup>方法结合前期的马铃薯光学特性试验研究,将每个样品在平行于轴线方向用 ST-208B 型手动切片机从右向左依次切 11 mm 的切片。如

图 1 所示共有 6 个切片,Ⅰ~Ⅴ厚度为 11 mm,第 6 片厚度随机。如 A-A 所示,将Ⅰ~Ⅴ切片用直径 15 mm 的打孔器做 30 个标记。采用高光谱成像系统对切片进行扫描,将标记处的马铃薯采用干燥法<sup>[16]</sup>进行干物质测量。

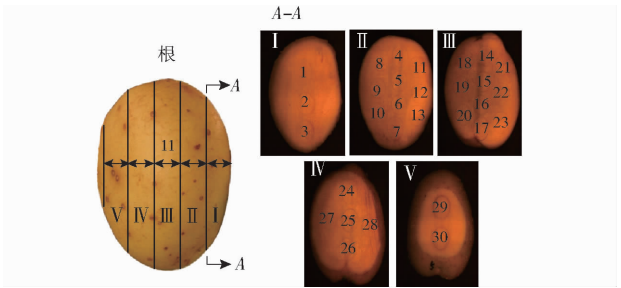


图 1 取样示意图  
Fig. 1 Sampling image

### 1.2 高光谱成像系统

样品信息采集,采用可见-近红外高光谱成像系统。本系统主要包括 CCD 相机(美国 Xenics 公司)、Specim V10E 型线扫式近红外光谱仪(芬兰奥卢光谱成像有限公司)、双分支光纤光源(美国 Advanced illumination 公司)、一轴电动移动平台(台湾五铃光学股份有限公司)、暗箱、计算机等。高光谱系统的波长范围为 382 ~ 1 010 nm,光谱分辨率为 2.8 nm,入射光狭缝宽 30 μm。相机分辨率 1 600 像素×1 200 像素。光源采用 21 V/150 W 卤素灯接发光长度 152.4 mm 的线性光导管加线型聚光镜,移动平台移动距离为 400 mm。

### 1.3 高光谱图像采集

采集的高光谱图像质量与相机的曝光时间、镜头的焦距、移动平台的移动速度以及光源入射角度有关<sup>[17]</sup>。高光谱图像采集前先将光源提前预热 30 min,以确保光源稳定。然后调整各参数,确保图像信息真实有效。经过优化,最终设置的参数如下:曝光时间为 25 ms,位移平台移动速度为 3.5 mm/s,图像分辨率为 804 像素×440 像素,物距为 210 mm,光源入射角度为 45°,如图 2 所示。将 3 片厚度为 11 mm 的马铃薯切片根部向右按顺序平铺在移动平台上,关闭暗箱。打开光谱采集软件 IRCP0071-1COMB(台湾五铃光学股份有限公司),采集每片马铃薯的高光谱图像。之后将剩余 2 片马铃薯切片按相同步骤进行高光谱图像采集。

### 1.4 高光谱图像校正

由于暗电流的存在以及光源强度在不同波段下的不均匀分布,高光谱图像中含有噪声信号,故需要对高光谱图像进行黑白标定<sup>[18]</sup>。将反射率为 0.99 且与样品等高的白板(芬兰 Specim 公司)置于样品采集区域,将采集的图像作为全白图像,标记为

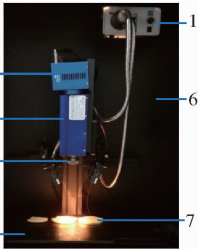


图2 高光谱成像系统

Fig. 2 Hyperspectral imaging system

1. 光源 2. CCD 相机 3. 光谱仪 4. 镜头 5. 电动移动平台  
6. 暗箱 7. 马铃薯切片

$I_w$ 。将镜头盖上镜头盖采集图像,作为全黑图像,记为  $I_b$ 。对马铃薯干物质图像进行校正,公式为

$$I = \frac{I_r - I_b}{I_w - I_b} \tag{1}$$

式中  $I$ ——校正后的马铃薯切片图像

$I_r$ ——原始的马铃薯切片图像

1.5 数据处理及建模方法

采用 Unscrambler 10.5 软件对原始光谱进行预处理,建立了马铃薯干物质含量的回归预测模型。采用 Matlab 2012 软件对光谱进行特征变量的选取。

分别采用主成分分析 (Principal component regression, PCR)、支持向量机 (Support vector regression, SVMR) 与偏最小二乘回归 (Partial least squares regression, PLSR) 预测马铃薯干物质含量,并得到最优模型。将高光谱图像与最优模型结合,转化成可视化干物质分布图。

2 结果与分析

2.1 马铃薯干物质分布

试验选用 20 个马铃薯,每个马铃薯取 30 个感兴趣区域 (Region of interesting, ROI),共 600 个 ROI,图 3 是马铃薯 600 个 ROI 的干物质含量分布情况。如图 3 所示,马铃薯干物质含量基本服从正态分布,在 19.5% ~ 22.5% 附近较多,两侧较少。20.5% 和 21.5% 的频数最高,均为 93 次。马铃薯干物质质量分数取值范围较大,最小值为 12.16%,最大值为 28.82%,平均值为 20.47%,偏差 2.03%。

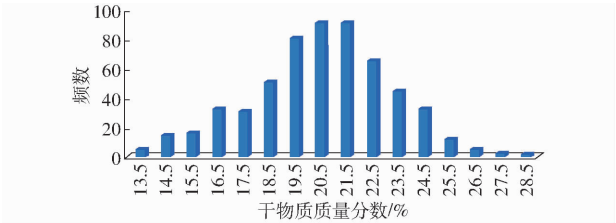


图3 马铃薯干物质分布情况

Fig. 3 Distribution of potato dry matter content

图 4 为各个马铃薯干物质的平均含量及偏差情

况。20 个马铃薯中干物质总质量分数最小为 18.70%,最大为 22.92%,偏差范围为 1.60% ~ 3.74%。

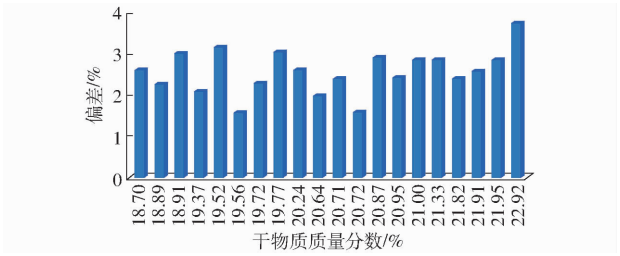


图4 各马铃薯干物质平均含量及偏差

Fig. 4 Average dry matter content and standard deviation of each potato

2.2 光谱特征提取

将高光谱图像校正处理后,提取高光谱图像上每个 ROI 的平均光谱。图 5 为单个马铃薯 30 个 ROI 的原始光谱曲线,如图所示光谱在 450 nm 附近有较大吸收带,类胡萝卜素中叶黄素和玉米黄素的吸收带均在 450 nm 左右<sup>[19]</sup>,希森 6 号为黄肉品种,类胡萝卜素含量较高。650 nm 附近有小吸收峰,叶绿素在此有吸收带。750、970 nm 吸收峰分别为水的 O—H 三级倍频和二级倍频的吸收带<sup>[20]</sup>。马铃薯中含有 70% ~ 80% 的水,因此谱图中 970 nm 附近有较大吸收带。

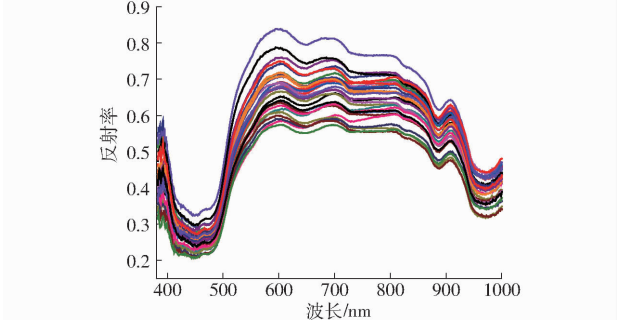


图5 马铃薯原始光谱

Fig. 5 Raw spectra of potato

2.3 光谱预处理

由于暗电流、噪声等因素,原始光谱会存在冗余信息,有时会掩盖光谱的真实信息,采用适当的预处理方法以消除冗余信息。采用归一化、Savitzky - Golay (SG) 平滑、标准正态变量 (Standard normal variable, SNV)、去趋势化 (De-trending)、多元散射校正 (Multiplicative scatter correction, MSC)、一阶导数法 (First derivative, FD)、二阶导数 (Second derivative, SD) 等作为光谱分析预处理方法。以校正集决定系数 ( $R_c^2$ )、预测集决定系数 ( $R_p^2$ )、校正集均方根误差、预测集均方根误差和预测集相对分析误差为参数来判别模型。通常相对分析误差大于 2 时模型可对样本进行准确预测。决定系数越接近于

1,误差越接近于0,模型的预测性能越好。

将 600 个马铃薯样本按照 2:1 的比例分配校正集和预测集,并保证最大值和最小值在校正集中。表 1 为马铃薯干物质在不同预处理下建立的偏最小

表 1 干物质不同预处理方法的 PLSR 预测模型

| 预处理方法       | 校正集     |         | 预测集     |         | 相对分析误差 |
|-------------|---------|---------|---------|---------|--------|
|             | $R_c^2$ | 均方根误差/% | $R_p^2$ | 均方根误差/% |        |
| 无           | 0.810   | 0.883   | 0.774   | 0.966   | 2.101  |
| SG 平滑       | 0.756   | 0.921   | 0.769   | 0.976   | 2.079  |
| SNV         | 0.822   | 0.855   | 0.786   | 0.939   | 2.162  |
| MSC         | 0.810   | 0.883   | 0.780   | 0.956   | 2.123  |
| 归一化         | 0.814   | 0.874   | 0.778   | 0.958   | 2.119  |
| De-trending | 0.800   | 0.905   | 0.780   | 0.956   | 2.123  |
| SG-FD       | 0.805   | 0.896   | 0.776   | 0.963   | 2.107  |
| SG-SD       | 0.802   | 0.901   | 0.753   | 1.010   | 2.009  |
| SNV-SG-FD   | 0.830   | 0.835   | 0.803   | 0.903   | 2.248  |
| MSC-SG-FD   | 0.834   | 0.827   | 0.792   | 0.927   | 2.189  |

二乘回归模型。SNV-SG-FD 的 PLSR 模型最好。预测集的决定系数和均方根误差分别为 0.803 和 0.903%,相对分析误差为 2.248,该值大于 2,因此有好的预测效果。

图 6 为光谱预处理后的效果图。图 6a 为 SG 平滑预处理后光谱图,SG 平滑预处理可有效去除光谱噪声;与原始光谱相比光谱更平滑。图 6b 为 SNV 预处理后光谱图,SNV 能减少基线漂移及光散射引起的光谱冗余数据,图 6b 中光谱冗余数据少,更集中。图 6c 为 SNV-SG-FD 预处理后光谱,FD 可降低背景因素的干扰,三者相结合能更好地去除干扰,显示有效光谱数据。由图 6c 可以看出,光谱去除冗余信息,显示出明显的波峰与波谷。在 520 nm 出现明显波峰,花青素的吸收带在 490~550 nm<sup>[21]</sup>,马铃薯果肉中有较多含量的花青素<sup>[22]</sup>。在 900 nm 附近有较大的吸收峰,淀粉中的 C-H 三级倍频和四级倍频吸收带分别在 900 nm 和 740 nm 附近。

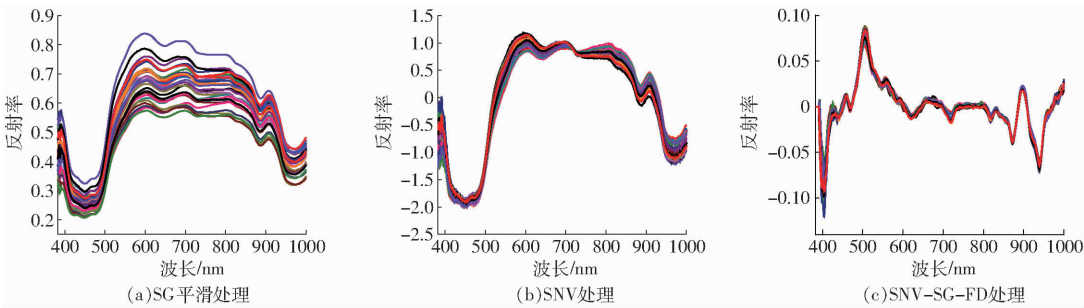


图 6 预处理光谱图

Fig. 6 Preprocessed spectrum

2.4 特征变量的选取

采集的光谱共包含 440 个波段。为了简化建模过程,加快计算速度,提高模型的预测能力,需要提取光谱的特征波段,压缩光谱数据,以期实现马铃薯干物质的在线可视化检测。本文采用正自适应加权算法(Competitive adaptive reweighted sampling, CARS)与连续投影法(Successive projections algorithm, SPA)相结合的方法对光谱进行波段选择<sup>[23]</sup>,并对所选波段进行主成分分析、偏最小二乘回归和支持向量机建模<sup>[24-25]</sup>。

正自适应加权算法选择变量,先优选出 PLSR 回归系数权重大的波长点,再利用十折交叉验证选出  $n$  个校正集均方根误差最小的子集作为最优组合。图 7a 是变量数选择的变化趋势,图 7b 是十折交叉验证的校正集均方根误差的变化状态,图 7c 是各变量在采样过程中回归系数的变化路径。从图 7 可知 95 次采样获得的校正集均方根误差最小,通子集有 42 个波段。

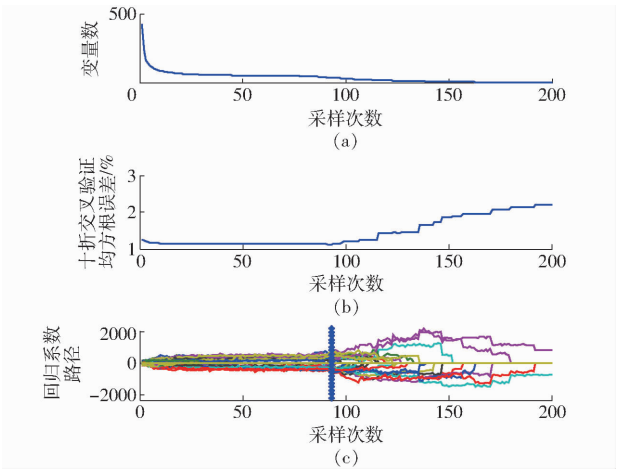


图 7 CARS 变量选择

Fig. 7 Variable selection by CARS

连续投影法通过分析向量的投影,查找含有冗余信息最少的变量组,使变量共线性最小。通过 CARS-SPA 选择变量,共获得了 22 个特征波长(410、421、446、498、525、550、560、604、644、647、661、736、778、792、845、847、898、899、900、906、912、

940 nm),结果如图 8 所示。马铃薯干物质的大部分成分为淀粉,故所选的对应波段主要在 900 nm 附近(特征波长 898、899、900、906、912 nm)。马铃薯中叶黄素、花青素和叶绿素的含量较多故所选的特征波段较多(特征波长 446、498、525、550、560、644、647、661 nm)。

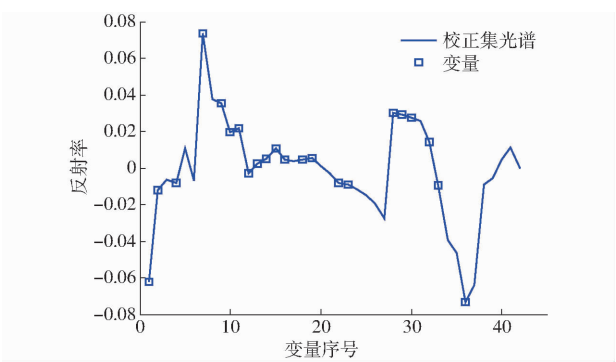


图 8 CARS-SPA 二次变量选择

Fig. 8 Variable selection by CARS-SPA

2.5 建模方法的优选

将优选出的 22 个波段采用 PCR、PLSR 和 SVMR 3 种方法对马铃薯干物质含量进行建模,结果如表 2 所示。PLSR 模型和 SVMR 模型建模效果比 PCR 建模效果好,以 PLSR 模型预测效果最优,预测集决定系数  $R_p^2$  为 0.849,相对分析误差为 2.312,大于 2,能实现精准预测。预测效果明显优于全波段 PLSR 模型的预测效果。校正集和预测集预测效果如图 9 所示。校正集和预测集的预测值分别在各自回归线两侧均匀分布,偏差较小,有较好的预测能力。

表 2 不同变量选择方法及建模结果

| Tab.2 Performance of models on different spectra variable selection |     |         |       |         |       |        |
|---------------------------------------------------------------------|-----|---------|-------|---------|-------|--------|
| 建模方法                                                                | 变量数 | 校正集     |       | 预测集     |       |        |
|                                                                     |     | $R_c^2$ | 均方根误差 | $R_p^2$ | 均方根误差 | 相对分析误差 |
|                                                                     |     |         | 差/%   |         | 差/%   | 误差     |
| CARS-SPA-PCR                                                        | 22  | 0.685   | 1.263 | 0.664   | 1.302 | 1.559  |
| CARS-SPA-PLSR                                                       | 22  | 0.873   | 0.813 | 0.849   | 0.878 | 2.312  |
| CARS-SPA-SVMR                                                       | 22  | 0.869   | 0.842 | 0.822   | 0.974 | 2.084  |

2.6 马铃薯干物质含量可视化分析

马铃薯干物质的空间分布很难通过肉眼直观判断,图 10 是利用所得的 PLSR 模型,将高光谱上的像素点转换成马铃薯干物质含量后所得的马铃薯干物质含量空间分布图。颜色梯度条由下往上代表马铃薯干物质质量分数由低变高,范围为 11% ~ 28%。由图 10 可知,切片 I 和 V 的主要颜色为红色,干物质质量分数为 24.62%;切片 II 和 IV 的主要

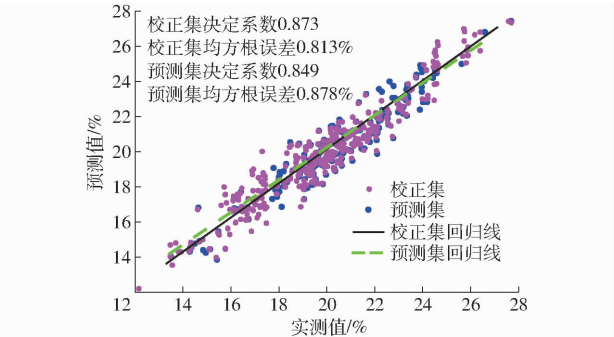


图 9 马铃薯干物质质量分数的 PLSR 预测模型

Fig.9 PLSR model for potato dry matter content

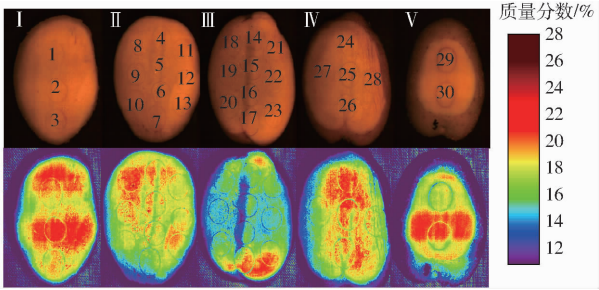


图 10 马铃薯干物质含量空间分布图

Fig. 10 Distribution map of potato dry matter content

颜色为红色和黄色,以黄色为主,干物质质量分数在 19% ~ 22% 之间;中间切片 III 主要呈蓝绿色,干物质质量分数在 12% ~ 21% 之间。表明马铃薯中心干物质含量最低,由中心向表皮干物质质量分数逐渐增加。

切片 III 的中间有条紫色竖线,是马铃薯的内髓位置,主要成分为水,因此干物质含量低,干物质质量分数为 12.16%。外围蓝色圈是马铃薯的维管束环位置,马铃薯的干物质含量主要分布在内髓与维管束环之间,内髓干物质含量最低。

由此可以看出高光谱图像技术能有效实现马铃薯干物质含量的可视化检测,相比于传统干物质的测量方法,更快速更直观。本研究为薯片薯条的加工及检测提供了技术支持,为近红外便携设备的研制提供了基础。

3 结论

(1)将 CARS-SPA 两种选择变量的方法相结合提取原始光谱的特征波段,共获得了 22 个(特征波长 410、421、446、498、525、550、560、604、644、647、661、736、778、792、845、847、898、899、900、906、912、940 nm)有效波段。

(2)建立了马铃薯干物质含量的空间检测模型。基于有效波段建立的 PLSR 模型预测效果明显优于全波段建模预测效果。预测集决定系数  $R_p^2$  为 0.849,预测集均方根误差为 0.878%,相对分析误

差为2.312,大于2。

(3)通过对马铃薯干物质空间分布的研究,提出了采用高光谱成像技术可视化检测马铃薯干物质的方法。利用所得的CARS-SPA-PLSR模型,将高光谱图像转换成马铃薯干物质含量空间分布图,实现了马铃薯干物质含量的直观可视

化检测。

(4)得出了马铃薯干物质的空间分布规律,马铃薯干物质主要是分布在内髓与维管束环之间,由内髓向外干物质含量逐渐增加,内髓位置干物质质量分数最低为12.16%,外层干物质质量分数可达24.62%。

## 参 考 文 献

- 1 NIELSEN G G B, KJÆR A, KLÖSGEN B, et al. Dielectric spectroscopy for evaluating dry matter content of potato tubers[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 189: 9-16.
- 2 RADY A M, GUYER D E. Rapid and/or nondestructive quality evaluation methods for potatoes: a review[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2015, 117: 31-48.
- 3 杨平, 陈昱利, 巩法江, 等. 不同栽培方式对马铃薯干物质积累分配及转运的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(8): 13-18.  
YANG Ping, CHEN Yuli, GONG Fajiang, et al. Effects of different cultivation methods on accumulation, distribution and transport of dry matter in potato[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(8): 13-18. (in Chinese)
- 4 杨相昆, 魏建军, 张占琴, 等. 不同栽培措施对马铃薯干物质积累与分配的影响[J]. *作物杂志*, 2012(4): 130-133.  
YANG Xiangkun, WEI Jianjun, ZHANG Zhanqin, et al. Study on accumulation and distribution of dry matter in potato under different cultivation[J]. *Crops*, 2012(4): 130-133. (in Chinese)
- 5 PRITCHARD M K, SCANLON M G. Mapping dry matter and sugars in potato tubers for prediction of whole tuber process quality[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 1997, 77(3): 461-467.
- 6 BANDANA, SHARMA V, KAUSHIK S K, et al. Variation in biochemical parameters in different parts of potato tubers for processing purposes[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2016, 53(4): 1-7.
- 7 尹丽华. 基于高光谱成像技术的鲜枣分级技术的研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2013.  
YIN Lihua. Research of online grading for flesh jujube based on hyperspectral imaging abstract[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 8 WU D, SUN D W. Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: a review—part II: applications[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2013, 19(1): 15-28.
- 9 SU W H, SUN D W. Potential of hyperspectral imaging for visual authentication of sliced organic potatoes from potato and sweet potato tubers and rapid grading of the tubers according to moisture proportion[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 125: 113-124.
- 10 CAPORASO N, WHITWORTH M B, FISK I D. Protein content prediction in single wheat kernels using hyperspectral imaging[J]. *Food Chemistry*, 2018, 240(2): 32-42.
- 11 ELMASRY G, SUN D W, ALLEN P. Chemical-free assessment and mapping of major constituents in beef using hyperspectral imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 117(2): 235-246.
- 12 RODRÍGUEZ-PULIDO F J, BARBIN D F, SUN D W, et al. Grape seed characterization by NIR hyperspectral imaging[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2013, 76: 74-82.
- 13 RADY A, GUYER D, LU R. Evaluation of sugar content of potatoes using hyperspectral imaging[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(5): 995-1010.
- 14 宋娟, 吴晨. 基于高光谱成像技术的马铃薯多种营养成分同时检测[J]. *河南工业大学学报: 自然科学版*, 2016, 37(1): 60-66.  
SONG Juan, WU Chen. Simultaneous detection of quality nutrients of potatoes based on hyperspectral imaging technique[J]. *Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition*, 2016, 37(1): 60-66. (in Chinese)
- 15 MO C, KIM M S, KIM G, et al. Spatial assessment of soluble solid contents on apple slices using hyperspectral imaging[J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 159: 10-21.
- 16 阚琳玮. 不同处理方式对马铃薯品质的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.  
KAN Linwei. Effect of different processing on potatoes quality [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014. (in Chinese)
- 17 马惠玲, 王若琳, 蔡骋, 等. 基于高光谱成像的苹果品种快速鉴别[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 305-312. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170440&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170440&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.040.  
MA Huiling, WANG Ruolin, CAI Cheng, et al. Rapid identification of apple varieties based on hyperspectral imaging[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 305-312. (in Chinese)
- 18 朱荣光, 姚雪东, 高广娣, 等. 不同储存时间和取样部位牛肉颜色的高光谱图像检测[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(7): 165-169. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20130728&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130728&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.07.028.  
ZHU Rongguang, YAO Xuedong, GAO Guangdi, et al. Hyperspectral imaging detection of beef color under different storage time [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(7): 165-169. (in Chinese)

- control [J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(6): 825 – 829. (in Chinese)
- 14 鲁植雄, 郭兵, 高强. 拖拉机耕深模糊自动控制方法与试验研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 23 – 29.  
LU Zhixiong, GUO Bing, GAO Qiang, et al. Study on auto-control method and experiment for tractor depth based on fuzzy control [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 23 – 29. (in Chinese)
- 15 李丽娜, 柳洪义, 罗忠, 等. 模糊 PID 复合控制算法改进及应用[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(2): 274 – 278.  
LI Li'na, LIU Hongyi, LUO Zhong, et al. Study on improved Fuzzy – PID composite control arithmetics and its applications [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2009, 30(2): 274 – 278. (in Chinese)
- 16 Rexroth Bosch Group. Knowledge explanation: hydraulic for tractor[M]. Ditzingen, Germany: Bosch Robert AG, 2014.
- 17 谢凌云. 大功率拖拉机电液悬挂系统耕深自动控制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.  
XIE Lingyun. Research on plowing depth automatic control for high-power tractor electro-hydraulic hitch system [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- 18 葛宝明, 林飞, 李国国. 先进控制理论及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- 19 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166 – 172.  
WANG Shuyan, SHI Yu, FENG Zhongxu. A method for controlling a loading system based on a Fuzzy – PID controller [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 166 – 172. (in Chinese)
- 20 谢斌. 拖拉机农具仿真作业机组悬挂系统电液控制技术的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.  
XIE Bin. Study on electro-hydraulic control technology of hitch system for the tractor-implement combination [D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese)
- 21 谭彧. 拖拉机液压悬挂和加载系统性能研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.  
TAN Yu. The study of characteristics for hydraulic hitch & loading system in tractor [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 22 SAEYS W, ENGELEN K, RAMON H, et al. An automatic depth control system for shallow manure injection, Part 1: modelling of the depth control system [J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(2): 146 – 154.
- 23 刘义, 高翔, 王寅晓, 等. 拖拉机电-液悬挂系统耕深自动控制的研究[J]. 机床与液压, 2012, 40(1): 51 – 53.  
LIU Yi, GAO Xiang, WANG Yinxiao, et al. Research on plowing depth automatic control for tractor electric-hydraulic hitch system [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(1): 51 – 53. (in Chinese)
- 

(上接第 344 页)

- 19 张春秋, 刘杰, 谢开云, 等. 高效液相色谱法测定马铃薯薯肉中类胡萝卜素[J]. 食品科学, 2008, 29(4): 302 – 305.  
ZHANG Chunqiu, LIU Jie, XIE Kaiyun, et al. Determination of carotenoids in tuber flesh by HPLC in potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Food Science, 2008, 29(4): 302 – 305. (in Chinese)
- 20 HELGERUD T, WOLD J P, PEDERSEN M B, et al. Towards on-line prediction of dry matter content in whole unpeeled potatoes using near-infrared spectroscopy [J]. Talanta, 2015, 143: 138 – 144.
- 21 PARK B, LU R. Hyperspectral imaging technology in food and agriculture [M]. New York: Springer, 2015: 104 – 108.
- 22 BROWN C R, CULLEY D, YANG C P, et al. Variation of anthocyanin and carotenoid contents and associated antioxidant values in potato breeding lines [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2005, 130(2): 174 – 180.
- 23 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/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 128 – 133, 185. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20120226&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120226&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.026.  
ZHOU Zhu, LI Xiaoyu, GAO Hailong, et al. Comparison of different variable selection methods on potato dry matter detection by hyperspectral imaging technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 128 – 133, 185. (in Chinese)
- 24 石力安, 郭辉, 彭彦昆, 等. 牛肉含水率无损快速检测系统研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 203 – 209. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150729&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150729&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.029.  
SHI Li'an, GUO Hui, PENG Yankun, et al. Nondestructive rapid detection system for water content of beef [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 203 – 209. (in Chinese)
- 25 刘贵珊, 房盟盟, 冯愈钦, 等. 基于高光谱联合流化床富集的红葡萄酒白藜芦醇检测 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 301 – 308. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170738&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170738&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.038.  
LIU Guishan, FANG Mengmeng, FENG Yuqin, et al. Detection of resveratrol in red wine based on fluidized bed preconcentration-hyperspectral imaging [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 301 – 308. (in Chinese)