

基于高光谱成像的马铃薯叶片叶绿素分布可视化研究

郑涛¹ 刘宁¹ 孙红¹ 龙耀威¹ 杨玮¹ ZHANG Qin²

(1. 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;

2. 华盛顿州立大学精细农业及农业自动化研究中心, 普尔曼 WA 100083)

摘要: 针对马铃薯作物叶片进行了叶绿素含量无损检测技术及分布图绘制方法研究,用以指示作物长势并指导精细化管理。首先利用高光谱成像技术采集了65个马铃薯叶片的400个样本点高光谱图像和相应的SPAD值,提取并计算叶绿素测量区域的叶片平均光谱后,分别采用蒙特卡罗无信息变量消除算法(MC-UVE)和自适应重加权算法(CARS)筛选出了12个和23个叶绿素含量敏感波长,建立了马铃薯叶片叶绿素含量偏最小二乘(PLS)回归模型。建模结果如下:基于MC-UVE算法筛选的12个敏感波长的PLSR诊断模型,建模精度 R_c^2 为0.79,验证精度 R_v^2 为0.73;基于CARS算法筛选的23个敏感波长建立的PLSR诊断模型,建模精度 R_c^2 为0.82,验证精度 R_v^2 为0.80。择优选取CARS-PLSR模型计算马铃薯叶片每个像素点的叶绿素含量,从而利用伪彩色绘图绘制了马铃薯叶片叶绿素含量可视化分布图,最终实现马铃薯叶片含量无损检测以及叶绿素分布可视化表达,以期为后续马铃薯作物大田冠层叶绿素分布诊断提供支持。

关键词: 叶绿素含量; 马铃薯叶片; 蒙特卡罗无信息变量消除算法; 自适应重加权算法; 高光谱成像

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0153-07

Visualization of Chlorophyll Distribution of Potato Leaves Based on Hyperspectral Imaging Technology

ZHENG Tao¹ LIU Ning¹ SUN Hong¹ LONG Yaowei¹ YANG Wei¹ ZHANG Qin²

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Center for Precision & Automated Agricultural System, Washington State University, Pullman WA 99350, USA)

Abstract: Non-destructive detection of chlorophyll content and drawing the chlorophyll distribution map of potato crop leaves could indicate crop growth and guide field management. In this paper, the hyperspectral imaging technique was used to diagnose the chlorophyll content index and help to describe chlorophyll distribution of potato leaf. The hyperspectral images of 65 potato leaves were collected and divided into 400 regions of interesting (ROI). Meanwhile, the SPAD values of these 400 ROI samples were measured. After extracting and calculating the average leaf spectrum of the chlorophyll measurement area, the 12 chlorophyll content sensitive wavelengths were chosen by the Monte Carlo uninformative variables elimination (MC-UVE) algorithm and the 23 chlorophyll content sensitive wavelengths were selected by the competitive adaptive reweighted sampling (CARS) algorithm. They were used to establish the partial least squares regression (PLSR) model of chlorophyll content index of potato leaves respectively. The results were as follows: 12 sensitive wavelengths selected by MC-UVE algorithm were 532.54 nm, 534.27 nm, 566.78 nm, 737.60 nm, 741.61 nm, 742.51 nm, 759.49 nm, 772.92 nm, 816.54 nm, 880.88 nm, 928.84 nm, 943.88 nm. The modeling determination coefficient was 0.79, and predictive determination coefficient was 0.73. Meanwhile, 23 sensitive wavelengths selected by the CARS algorithm were 394.01 nm, 399.94 nm, 492.03 nm, 493.32 nm, 494.18 nm, 534.27 nm,

收稿日期: 2017-07-10 修回日期: 2017-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31501219)、国家重点研发计划项目(2016YFD0300606、2016YFD0300610)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017TC029)

作者简介: 郑涛(1993—),男,硕士生,主要从事农业信息化技术研究,E-mail: zhengtao@cau.edu.cn

通信作者: 孙红(1980—),女,副教授,主要从事农业信息化技术研究,E-mail: sunhong@cau.edu.cn

536.86 nm, 537.30 nm, 537.73 nm, 543.79 nm, 544.22 nm, 545.52 nm, 547.25 nm, 547.69 nm, 548.12 nm, 550.29 nm, 550.72 nm, 553.76 nm, 555.49 nm, 938.93 nm, 986.36 nm, 987.74 nm, 1 018.30 nm. The modeling determination coefficient of the PLSR diagnostic model built with these wavelengths was 0.82, and predictive determination coefficient was 0.80. Thus, the chlorophyll content of potato leaves can be calculated by CARS-PLS model, and the visual distribution map of chlorophyll content in potato leaves was plotted by using pseudo-color drawing. It provides a method for the diagnosis of chlorophyll distribution in the future.

Key words: chlorophyll content; potato leaves; MC-UVE; CARS; hyperspectral imaging

引言

植物叶片中的叶绿素在光合作用过程中起着重要作用,其含量是评价植物生长状况的一项重要指标。通过检测叶绿素浓度,能够判断植物的长势信息^[1-3]。基于叶绿素对特定波长光谱的吸收和反射等特性,国内外已经开展了大量作物叶绿素光谱学诊断研究和传感器开发^[4-7]。如 SPAD (Soil plant analysis development) 叶绿素计,利用 650 nm 和 940 nm 处的透射光的相对比值来计算叶绿素含量指标^[8-10]。基于植物在近红外和红光范围的反射光谱,构建的归一化植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI) 用于检测植被生长状态,形成了如 Greenseeker 型便携式光谱仪 (650 nm 和 770 nm)、Crop Circle ACS-210 型冠层反射光谱传感器 (650 nm 和 880 nm)、Yara N-Sensor 型氮素测量仪 (650 nm 和 840 nm) 等作物生长诊断系统,并进行了田间应用^[11-13]。

然而,一方面这些传感器主要是对特定波长处的局部点光谱进行分析,无法直观体现叶片或冠层整体的光谱分布差异;另一方面在不同作物对象不同生产条件下,对比各种反射光谱传感器检测的效果发现,受其固定波长的局限,需要对设备的进行选型应用^[14-15]。高光谱成像仪结合了光谱与图像二者的优势,具有多波段、高分辨率、图谱合一等特点,既能利用多波段光谱对植物叶绿素含量进行定量分析,又能利用图像像素关系对其空间分布差异进行可视化研究,可为植物叶绿素定量诊断提供新的技术支持。

利用光谱反射特性,邹小波等^[16]选取黄瓜叶片的高光谱图像数据中 450~850 nm 波段作为研究波段,并选取 8 个植被指数预测了黄瓜叶片叶绿素含量。赵杰文等^[17]从茶树叶片高光谱数据中提取二次土壤调节植被指数建立茶树叶绿素预测模型,相关系数达 0.843。赵艳茹等^[18]采用高光谱成像技术预测了南瓜叶片的叶绿素含量,并绘制了其含量分布图,该分布图同时也反映了霜霉病的感染分布。余克强等^[19]利用高光谱图像对不同叶位尖椒叶片

氮素含量分布和叶绿素分布进行了可视化研究。

马铃薯是我国第四大主粮,但与小麦、玉米、水稻三大主粮作物相比,基于光谱学原理对马铃薯生长期叶片叶绿素无损诊断方面的研究较少。宋英博^[20]分别利用 SPAD 叶绿素仪和 Unispec-SC 光谱仪 (310~1 130 nm) 检测了马铃薯叶片氮素含量,得出特征波段的光谱反射率与氮素含量的相关性呈显著水平。JONGSCHAAP 等^[21]利用 SPAD-520 型叶绿素计、光谱仪和 CropScan 多波段光谱辐射仪分别对马铃薯叶片、植株和冠层 3 个尺度数据测量对氮素进行诊断,发现叶片尺度 SPAD 值与氮素含量呈指数相关,红边指数与冠层氮含量相关性 $r=0.82$, 叶片 SPAD 值可代表约 0.44 m² 面积上冠层光谱诊断的结果。何彩莲等^[22]运用数字图像与光谱技术相结合分析了不同施氮水平下马铃薯生长期数字化指标、叶片光谱指标、SPAD、产量的变化情况,据此建立了各个指标评价马铃薯氮营养的量化标准。但是以上研究多是基于便携式仪器开展的,没有应用具有图谱合一特性的高光谱成像技术采集数据。

因此,为深入解析马铃薯作物叶绿素含量光谱学诊断敏感波长和诊断模型,本文采用高光谱成像技术,针对马铃薯叶片叶绿素含量诊断和空间分布绘制方法展开研究。首先对马铃薯叶片叶绿素诊断敏感波长进行筛选,建立可以快速诊断叶绿素含量的数学模型,然后结合叶片图像优选出最优模型并计算出马铃薯叶片每个像素点的叶绿素指标值,进而绘制马铃薯叶片叶绿素含量空间分布图,为大田马铃薯冠层叶绿素含量分布分析提供新的手段。

1 材料与方法

1.1 试验样本

试验对象为大西洋品种马铃薯,地点位于中国农业大学试验温室。马铃薯于 2017 年 4 月种植,生长过程中不作任何特殊处理,保证每颗植株生长条件基本一致。当作物长到开花期时,于 2017 年 5 月 23 日人为对马铃薯植株叶片进行拔除处理,随机采集 65 个叶片样本,装入密封袋,以保持叶片新鲜,带回实验室马上对马铃薯叶片进行高光谱图像信息

采集。

1.2 马铃薯叶片高光谱图像信息获取

本文采用 Gaia 型高光谱成像系统, 结构如图 1 所示, 主要由 OL23 型镜头、LT365 型面阵 CCD 探测器、V10E 型光谱仪、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 1 394 像素 × 1 024 像素, 光谱范围为 382 ~ 1 019 nm, 光谱分辨率为 2.8 nm, 采样间隔为 0.65 nm, 最终得到一个包含了影像信息和光谱信息的三维数据立方体。

在试验开始前, 须先预热系统, 以消除基线漂移的影响。然后对高光谱成像仪进行调焦, 设置系统曝光时间为 15 ms, 移动平台移动速度为 2.8 mm/s。采集时将马铃薯叶片平放在移动平台上, 使用 SpecVIEW 软件采集高光谱图像数据。

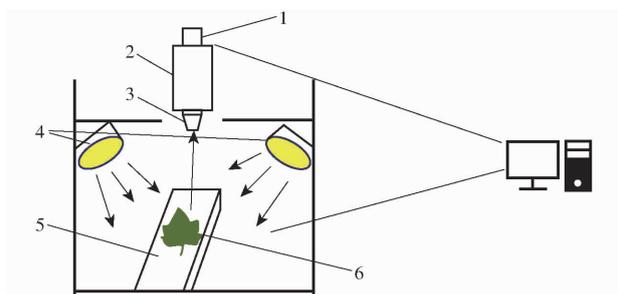


图 1 高光谱成像系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of hyperspectral imaging system

1. CCD 探测器 2. 光栅光谱仪 3. 镜头 4. 光源 5. 一维电机平台 6. 样品

1.3 高光谱图像黑白校正

为消除光照不均匀和外界环境因素的影响, 在数据处理前需对高光谱图像进行黑白校正^[23]。在与数据采集相同条件下, 盖上镜头盖且关闭光源进行全黑校正, 取下镜头盖打开光源进行白板校正, 然后对原始图像进行校正, 公式为

$$I = \frac{I_0 - B}{W - B} \quad (1)$$

式中 I ——黑白校正后图像数据

W ——全白标定图像数据(反射率接近 99%)

B ——全黑标定图像数据(反射率接近零)

I_0 ——原始图像数据

1.4 叶绿素含量测定

化学分析方法需要对整个叶片进行破坏, 同时对测试样本质量有要求。为了分析叶片叶绿素含量的分布, 首先对测试叶片样本进行区域划分, 然后利用手持式 SPAD-502 型叶绿素仪对划分区域进行无损检测, 以 SPAD 值作为叶绿素含量参考指标^[24-25]。

测量时, 以 10 × 10(像素数)的矩形区域为感兴趣区域(Region of interesting, ROI)在同一区域上测量 3 次 SPAD 值, 取其平均值作为该区域的叶绿素值, 最终通过对 65 个马铃薯叶片样本的测量, 获得了 400 个区域的 400 个 SPAD 值。测得 SPAD 值的区域编号标记, 以便提取相应的光谱。

1.5 数据处理

对马铃薯叶片高光谱图像进行处理主要包括光谱数据分析和图像数据处理两部分。其中, 光谱数据处理主要包括马铃薯叶片叶绿素含量敏感波长的筛选与叶绿素含量诊断检测, 分别利用了蒙特卡罗无信息变量消除算法和自适应重加权算法进行波长筛选。叶片对象各像素点的叶绿素含量分布图利用伪彩色处理实现。

1.5.1 Kennard - Stone 算法

研究采用 Kennard - Stone 算法对样本进行筛选以划分校正集和预测集。实现步骤如下: ①首先计算两两样本之间距离, 选择距离最大的两个样品。②然后分别计算剩余的样本与已选择的两个样品之间的距离。③对于每个剩余样本而言, 其与已选样品之间的最短距离被选择, 然后选择这些最短距离中相对最长的距离所对应的样品, 作为第 3 个样品。④重复步骤③, 直至所选的样品的个数等于事先确定的数目为止。

1.5.2 蒙特卡罗无信息变量消除算法

蒙特卡罗无信息变量消除算法(Monte Carlo uninformative variables elimination, MC - UVE)是基于偏最小二乘回归(Partial least squares regression, PLSR)系数提出的一种波长筛选的方法, 通过引入稳定的变量作为筛选标准, 从而确定变量的取舍。在 MC - UVE 方法中, 保留的建模变量数目决定着模型的预测精度。如果保留的变量个数过少, 可能会造成光谱数据有效信息的丢失; 相反, 如果保留的变量个数过多, 光谱数据中的冗余信息会使模型精度降低^[26]。

1.5.3 自适应重加权算法

自适应重加权(Competitive adaptive reweighted sampling, CARS)算法模仿达尔文进化理论中的“适者生存”原则, 主要过程是基于自适应重加权采样技术(Adaptive reweighted sampling, ARS)和指数衰减函数(Exponentially decreasing function, EDP), 选取在 PLSR 模型中回归系数绝对值大的变量, 去掉回归系数绝对值小的波段, 从而得到一系列波段子集, 然后对每个波段子集采用交叉验证建模, 从中挑选使得模型均方差最小的波段集为最优变量集, 从而简化模型^[27-28]。

1.5.4 建模方法

PLSR 是基于成分提取思想,可解决变量之间多重相关性的问题^[29-30]。PLSR 对光谱反射值矩阵和叶绿素含量矩阵同时进行分解,并在分解时考虑两者之间相互关系,加强对应计算关系,从而保证获得最佳的校正模型。建立了定量分析模型后,需要对模型预测能力进行评价,采用预测值与实测值的决定系数 R^2 进行模型的评估。决定系数越接近 1,则模型预测精度越高。

数据分析处理工作利用 ENVI 5.1 软件进行光谱数据读取,在 Matlab R2014a 软件中调用 libPLS_1.95 工具包实现。

2 结果与分析

2.1 马铃薯叶片光谱曲线分析

对采集的马铃薯叶片,用 ENVI 5.1 选取 10×10 单位像素矩形 ROI 区域,分别提取每个样本 ROI 的平均光谱。如图 2a 所示是对选取的某一叶片上 6 个感兴趣区域的分布示意,对应的 6 条原始平均光谱曲线如图 2b 所示。

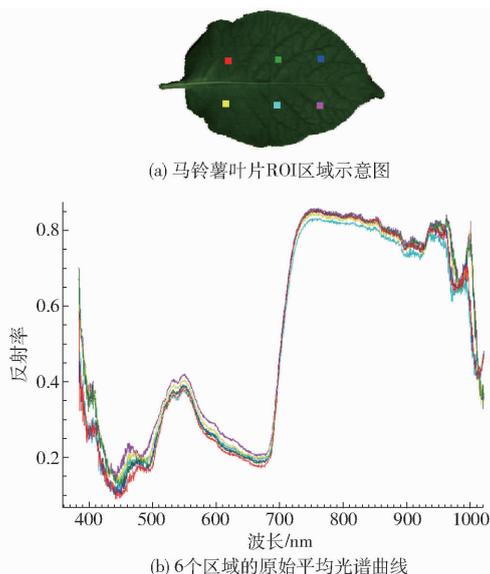


图 2 感兴趣区域及其平均光谱曲线

Fig.2 ROI selection and its spectral curve

图 2b 中 6 条光谱曲线波形较为接近,总体而言符合绿色植物的光谱特性,即由于叶绿素的强反射作用,光谱曲线 550 nm 附近出现了波峰;由于叶绿素的强吸收作用,光谱曲线 650 ~ 700 nm 波段附近出现了波谷;且在近红外区(700 ~ 750 nm)光谱反射率急剧上升。由于在封闭灯箱中采集马铃薯叶片高光图像,因此避免了外界光照等环境因素的影响,同时计算了 ROI 区域内所有像素点对应的平均光谱,对光谱曲线有平滑作用,故而该平滑光谱可用于后续数据分析。

2.2 马铃薯叶片 SPAD 值统计

针对 400 个 ROI 样本区,测量该位置叶绿素 SPAD 值。SPAD 值范围为 29.1 ~ 55.7,平均值为 42.31,其中 SPAD 值主要集中在 35.6 ~ 52.1 区间。根据 Kennard - Stone 算法来划分样本,如表 1 所示,将 300 个样本作为校正集,其余 100 个作为验证集,其 SPAD 值的基本统计值说明所选取的马铃薯叶片校正集和验证集均包含较大范围的 SPAD 值,将用于后续建立叶绿素含量指标诊断模型。

表 1 样本 SPAD 值基本统计

Tab.1 Basic statistics of SPAD value of samples

	样本数量	最大值	最小值	平均值	标准差
总样本	400	55.7	29.1	42.31	5.930 5
校正集	300	55.7	29.1	41.69	6.254 8
验证集	100	54.4	30.2	42.16	3.373 1

2.3 特征波长筛选

采集马铃薯叶片光谱范围为 382 ~ 1 019 nm,为了压缩光谱数据维度以诊断马铃薯叶片叶绿素含量,进行了特征波长筛选方法选择。

2.3.1 MC - UVE 算法筛选

研究设置 MC - UVE 算法运行迭代次数 N 为 500 次,主成分个数 A 为 6,运行后以变量稳定指数 (Reliability index, RI) 为筛选依据,将各个波长变量指数 (Variable index) 所对应的 RI 求绝对值,再将结果按降序排列,取绝对值数值大的波长变量作为特征波长变量。通过交叉验证,结果显示当特征波长变量个数为 12 时,模型精度达到最高。MC - UVE 算法运行结果如图 3 所示,筛选出 12 个特征波长变量,分别为: 532.54、534.27、566.78、737.60、741.61、742.51、759.49、772.92、816.54、880.88、928.84、943.88 nm。

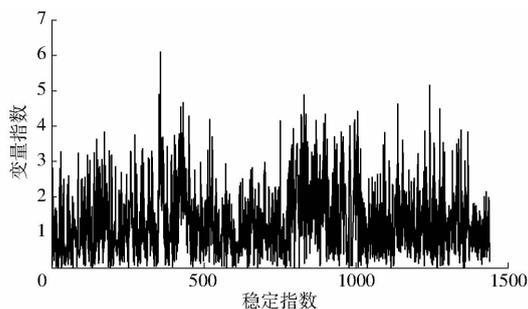


图 3 MC - UVE 运行结果

Fig.3 Results of MC - UVE

2.3.2 CARS 算法筛选

CARS 算法是对每个单独的个体变量进行逐步筛选淘汰的过程,为了控制选择变量个数,利用指数衰减函数 (EDP) 和交叉验证确立设置主成分个数 A 为 4,算法进化次数为 N 为 400 次。CARS 算法运行

结果如图4所示。图4a为筛选过程中选择变量个数的变化趋势,可知选择变量个数随采样运行次数的增加而减少;图4b为交叉验证均方差的变化趋势,350次采样之前总体趋势为随着采样运行次数增加而减少,350次采样之后交叉验证均方差开始递增,表示可能去除了与马铃薯叶片SPAD有相关性的关键变量;图4c为各光谱变量的回归系数的变化趋势,其中“*”列表示最小交叉验证均方差所对

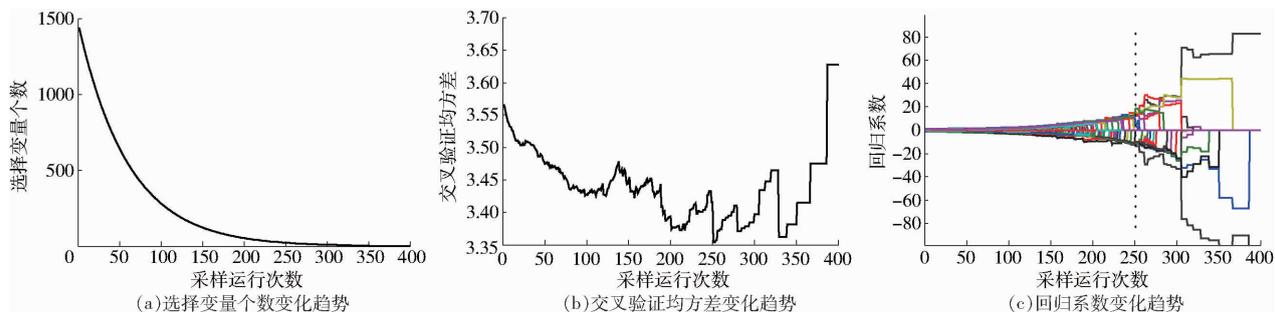


图4 CARS运行结果

Fig.4 Results of CARS

2.4 PLSR 回归模型建立

分别采用以上两种特征波长筛选算法得出的特征波长变量,建立马铃薯叶片叶绿素含量的PLSR预测模型。

为减小光谱冗余信息对于模型精度的影响,两种模型均采用10倍交叉验证的算法,得到交叉验证均方差随主成分个数增加的变化趋势。图5a和图5b分别为MC-UVE和CARS算法运行的交叉验证均方差结果,两种模型均在主成分个数为3时,交叉验证均方差值最小,最小值分别为2.9008和2.6008。由此建立MC-UVE-PLSR模型和CARS-PLSR模型如表2所示,马铃薯叶片叶绿素预测结果如图6所示。MC-UVE-PLSR模型的建模精度 R_c^2 为0.79,验证精度 R_v^2 为0.73,而CARS-PLSR模型的建模精度 R_c^2 为0.82,验证精度 R_v^2 为0.80,因此,择优选取CARS-PLSR模型用来绘制马铃薯叶片叶绿素分布图。

2.5 马铃薯叶片叶绿素分布图

利用CARS-PLSR模型可以估算马铃薯叶片每个像素点的SPAD值,然后结合伪彩色处理技术可以绘制马铃薯叶片叶绿素分布图。具体步骤如下:

- (1) 获取马铃薯叶片高光谱图像在CARS算法筛选出的23个特征波长下的图像。
- (2) 提取这些图像中每个像素点的反射率。
- (3) 代入优选出的CARS-PLSR模型中计算出每个像素点的SPAD值,从而得到一幅灰度分布图。
- (4) 对灰度分布图进行伪彩色处理,绘制马铃

薯叶片叶绿素分布图,如图7所示。运行后选择的波长量子集采用PLSR交叉验证建模,最终根据交叉验证均方差值最小来确定最优的波长量子集。CARS算法运行后筛选出特征波长变量个数为23个,分别为394.01、399.94、492.03、493.32、494.18、534.27、536.86、537.30、537.73、543.79、544.22、545.52、547.25、547.69、548.12、550.29、550.72、553.76、555.49、938.93、986.36、987.74、1018.30 nm。

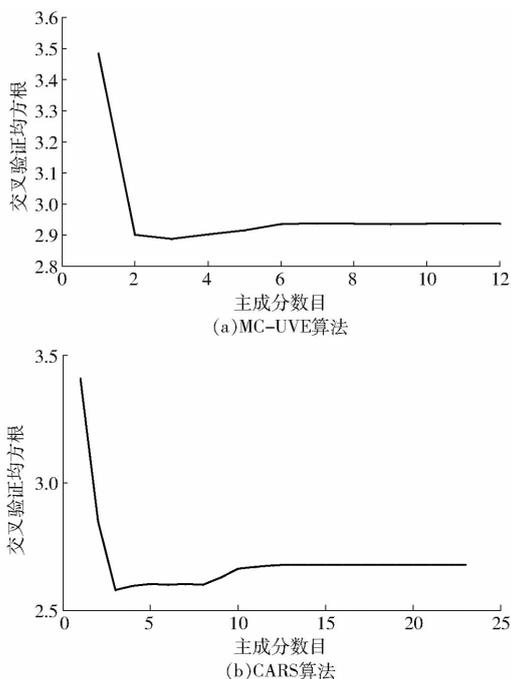


图5 交叉验证均方差随变量增加的变化趋势

Fig.5 Tendency of RMSECV with increasing variables

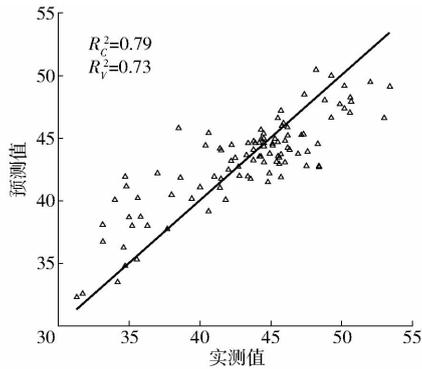
薯叶片叶绿素分布图,如图7所示。

图7中,不同颜色和颜色深浅程度代表不同浓度马铃薯叶片叶绿素含量。由图7可知,叶绿素在叶脉两侧分布较均匀,叶脉部分的叶绿素含量略高于叶肉部分的叶绿素含量。其中,叶脉部分在分布图中主要呈红色,SPAD值接近60,叶肉部分在分布图中主要呈绿色,SPAD值范围大约在30~50。图中叶片上蓝色部分可能是由于叶片不平整造成采集时光反射不均匀,并不能代表该区域的SPAD,叶片外蓝色区域为采集背景。由此最终基于CARS-

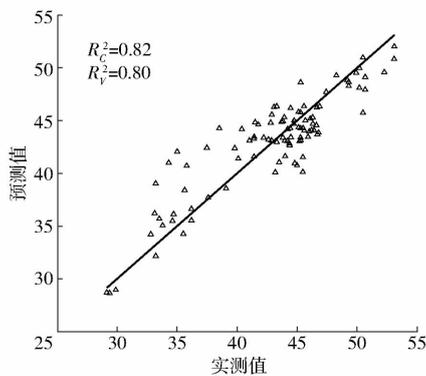
表2 基于特征波长的叶绿素含量 PLSR 模型参数

Tab.2 Parameters of chlorophyll content PLSR model based on characteristic wavelength

模型	主成分数	截距	回归系数	建模 R_c^2	验证 R_v^2
MC-UVE-PLSR	3	12.51	-51.68 -36.24 12.33 19.49 12.99 10.69	0.79	0.73
			-12.48 15.89 -56.84 24.57 -43.63 33.91		
			1.41 8.06 8.85 9.10 9.59 -11.20 -10.96 -10.51		
CARS-PLSR	3	30.17	-10.66 -10.60 -10.86 -10.57 -10.85 -11.21 -10.92	0.82	0.80
			-11.14 -10.79 -10.76 -10.29 17.05 15.72 16.09 15.47		



(a) 基于MC-UVE-PLSR模型



(b) 基于CARS-PLSR模型

图6 马铃薯叶片叶绿素诊断结果

Fig.6 Diagnostic result of chlorophyll in potato leaves

PLSR 模型诊断马铃薯叶片叶绿素的结果,绘制出叶片上叶绿素的分布情况。

3 结论

研究采集了马铃薯叶片高光谱成像数据,提取

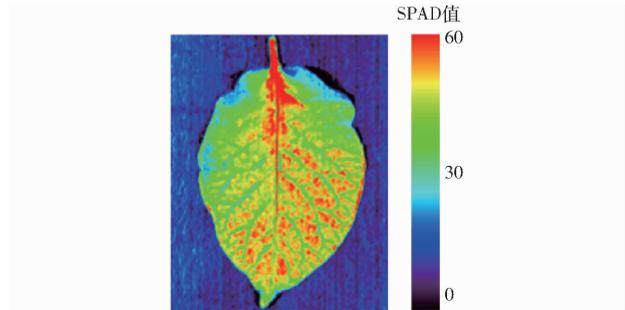


图7 马铃薯叶片叶绿素分布图

Fig.7 Chlorophyll distribution in potato leaves

了马铃薯叶片 SPAD 值测量位置的平均光谱。为了降低马铃薯叶片叶绿素诊断模型光谱数据维度,进行了特征波长筛选算法比较,并建立马铃薯叶片叶绿素 PLSR 诊断模型,绘制了马铃薯叶片叶绿素分布图,结论如下:

(1) 利用蒙特卡罗无信息变量消除 (MC-UVE) 算法和自适应重加权 (CARS) 算法分别筛选了 12 个和 23 个特征波长,用于建立叶绿素诊断 PLSR 模型。MC-UVE-PLSR 和 CARS-PLSR 马铃薯叶片叶绿素指标的预测模型建模精度 R_c^2 分别为 0.79 和 0.82,验证精度 R_v^2 分别为 0.73 和 0.80。

(2) 选取利用 CARS-PLSR 模型计算马铃薯叶片每个像素点的叶绿素含量,进而绘制马铃薯叶片叶绿素分布图,最终实现了马铃薯叶片含量无损检测以及叶绿素分布可视化表达。

参考文献

- XUE L, YANG L. Deriving leaf chlorophyll content of green-leafy vegetables from hyperspectral reflectance[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2009, 64(1):97-106.
- LIMANTARA L, DETTLING M, INDRAWATI R, et al. Analysis on the chlorophyll content of commercial green leafy vegetables [J]. *Procedia Chemistry*, 2015, 14(14):225-231.
- 董晶晶, 王力, 牛铮. 植被冠层水平叶绿素含量的高光谱估测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(11):3003-3006. DONG Jingjing, WANG Li, NIU Zheng. Estimation of canopy chlorophyll content using hyperspectral data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(11):3003-3006. (in Chinese)
- 邹兵, 侯加林, 李民赞. 基于光谱学和 ARM 的番茄叶绿素检测仪的开发[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊2):223-227. ZOU Bing, HOU Jialin, LI Minzan. Development of tomato chlorophyll content detector based on spectroscopy and ARM [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(Supp.2):223-227. (in Chinese)
- 丁永军, 李民赞, 安登奎, 等. 基于光谱特征参数的温室番茄叶片叶绿素含量预测[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(5):244-247. DING Yongjun, LI Minzan, AN Dengkui, et al. Prediction of chlorophyll content using spectral response characteristics of

- greenhouse tomato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5):244-247. (in Chinese)
- 6 韩书庆, 于渤, 孙明, 等. 便携式叶绿素、氮素、水分一体化测定仪设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊):256-259. HAN Shuqing, YU Bo, SUN Ming, et al. Development of a portable meter for detecting chlorophyll, nitrogen and water contents of plants[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):256-259. (in Chinese)
- 7 NETO A J S, LOPES D C, PINTO F A C, et al. Vis/NIR spectroscopy and chemometrics for non-destructive estimation of water and chlorophyll status in sunflower leaves[J]. Biosystems Engineering, 2017, 155:124-133.
- 8 刘艳春, 樊明寿. 应用叶绿素仪 SPAD-502 进行马铃薯氮素营养诊断的可行性[J]. 中国马铃薯, 2012, 26(1):45-48. LIU Yanchun, FAN Mingshou. Application feasibility of SPAD-502 in diagnosis of potato nitrogen nutrient status[J]. Chinese Potato Journal, 2012, 26(1):45-48. (in Chinese)
- 9 COSTE S, BARALOTO C, LEROY C, et al. Assessing foliar chlorophyll contents with the SPAD-502 chlorophyll meter: a calibration test with thirteen tree species of tropical rainforest in French Guiana[J]. Annals of Forest Science, 2010, 67(6):607-609.
- 10 NAUS J, PROKOPOVA J, REBICEK J, et al. SPAD chlorophyll meter reading can be pronouncedly affected by chloroplast movement[J]. Photosynthesis Research, 2010, 105(3):265-271.
- 11 薛利红, 覃夏, 李刚华, 等. 江西鹰潭早稻关键生育期的 NDVI 诊断指标[J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊2):223-227. XUE Lihong, QIN Xia, LI Ganghua, et al. Diagnostic indexes of NDVI at key growth stages for early rice at Yingtan, Jiangxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(Supp.2):223-227. (in Chinese)
- 12 刘豪杰, 李民赞, 孙红, 等. 基于车载式冠层光谱传感器的玉米拔节期叶绿素含量诊断[J]. 农业工程学报, 2015(增刊2):169-173. LIU Haojie, LI Minzan, SUN Hong, et al. Estimation of maize chlorophyll content by vehicle-mounted crop canopy sensor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015(Supp.2):169-173. (in Chinese)
- 13 MAYFIELD A H, TRENGOVE S P. Grain yield and protein responses in wheat using the N-Sensor for variable rate N application[J]. Crop & Pasture Science, 2009, 60(9):818-823.
- 14 RAPER T B, VARCO J J, HUBBARD K J. Canopy-based normalized difference vegetation index sensors for monitoring cotton nitrogen status[J]. Agronomy Journal, 2013, 105(5):1345.
- 15 SABERIOON M, SOOM M A M, GHOLIZADEH A, et al. A review of optical methods for assessing nitrogen contents during rice growth[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014, 30(4):657-669.
- 16 邹小波, 张小磊, 石吉勇, 等. 基于高光谱图像的黄瓜叶片叶绿素含量分布检测[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13):169-175. ZOU Xiaobo, ZHANG Xiaolei, SHI Jiyong, et al. Detection of chlorophyll content distribution in cucumber leaves based on hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(13):169-175. (in Chinese)
- 17 赵杰文, 王开亮, 欧阳琴, 等. 高光谱技术分析茶树叶片中叶绿素含量及分布[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(2):512-515. ZHAO Jiewen, WANG Kailiang, OUYANG Qin, et al. Measurement of chlorophyll content and distribution in tea plant's leaf using hyperspectral imaging technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(2):512-515. (in Chinese)
- 18 赵艳茹, 余克强, 李晓丽, 等. 基于高光谱成像的南瓜叶片叶绿素分布可视化研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5):1378-1382. ZHAO Yanru, YU Keqiang, LI Xiaoli, et al. Study on SPAD visualization of pumpkin leaves based on hyperspectral imaging technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(5):1378-1382. (in Chinese)
- 19 余克强, 赵艳茹, 李晓丽, 等. 高光谱成像技术的不同叶位尖椒叶片氮素分布可视化研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(3):746-750. YU Keqiang, ZHAO Yanru, LI Xiaoli, et al. Application of hyperspectral imaging for visualization of nitrogen content in pepper leaf with different positions[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(3):746-750. (in Chinese)
- 20 宋英博. 光谱仪与 SPAD 测定马铃薯叶绿素含量的比较[J]. 中国马铃薯, 2010, 24(2):271-272. SONG Yingbo. Comparison of NIRS and SPAD for testing chlorophyll content of potatoes[J]. Chinese Potato Journal, 2010, 24(2):271-272. (in Chinese)
- 21 JONGSCHAAP R E E, BOOIJ R. Spectral measurements at different spatial scales in potato: relating leaf, plant and canopy nitrogen status[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2004, 5(3):205-218.
- 22 何彩莲, 郑顺林, 万年鑫, 等. 马铃薯光谱及数字图像特征参数对氮素水平的响应及其应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(9):2930-2936. HE Cailian, ZHENG Shunlin, WAN Nianxin, et al. Potato spectrum and the digital image feature parameters on the response of the nitrogen level and its application[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(9):2930-2936. (in Chinese)
- 23 郭志明, 赵春江, 黄文倩, 等. 苹果糖度高光谱图像可视化预测的光强度校正方法[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7):227-232. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150733&journal_id=jsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.033. GUO Zhiming, ZHAO Chunjiang, HUANG Wenqian, et al. Intensity correction of visualized prediction for sugar content in apple using hyperspectral imaging[J/OL]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(7):227-232. (in Chinese)

- 41(12):183-189.
 BI Yuge, MA Shuoshi, CUI Hongmei, et al. Establishment of CO₂ prediction model and winter experiment in solar greenhouse in drought cold area of North China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12):183-189. (in Chinese)
- 16 季宇寒, 李婷, 张漫, 等. 基于 WSN 的温室 CO₂ 气肥优化调控系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 201-207. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S033&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.033.
 JI Yuhan, LI Ting, ZHANG Man, et al. Design of CO₂ fertilizer optimizing control system on WSN[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.):201-207. (in Chinese)
- 17 王建林, 温学发, 赵风华, 等. CO₂ 浓度倍增对 8 种作物叶片光合作用、蒸腾作用和水分利用效率的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(5): 438-446.
 WANG Jianlin, WEN Xuefa, ZHAO Fenghua, et al. Effects of doubled CO₂ concentration on leaf photosynthesis, transpiration and water use efficiency of eight crop species[J]. Journal of Plant Ecology, 2012, 36(5):438-446. (in Chinese)
- 18 王艳. 异常点检测后的偏最小二乘回归模型[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(19): 4556-4558.
 WANG Yan. Partial least squares regression model after outlier detection[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(19):4556-4558. (in Chinese)
- 19 王惠文, 孟洁. 多元线性回归的预测建模方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(4):500-504.
 WANG Huiwen, MENG Jie. Predictive modeling method based on multiple linear regression[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(4):500-504. (in Chinese)
- 20 朱苹. 多元线性回归模型在北京市用水量预测中的应用[J]. 科教导刊, 2015(34):167-168.
 ZHU Ping. Application of multivariate linear regression model in predict the amount of water in Beijing [J]. Science Journal, 2015(34):167-168. (in Chinese)
- 21 王春乙, 郭建平, 王修兰, 等. CO₂ 浓度增加对 C3、C4 作物生理特性影响的实验研究[J]. 作物学报, 2000, 26(6):813-817.
 WANG Chunyi, GUO Jianping, WANG Xiulan, et al. The experimental study of the effects of CO₂ concentration enrichment on physiological feature of C3 and C4 crops[J]. Acta Agronomica Sinica, 2000, 26(6):813-817. (in Chinese)
- 22 陈根云, 陈娟, 许大全, 等. 关于净光合速率和胞间 CO₂ 浓度关系的思考[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(1):64-66.
 CHEN Genyun, CHEN Juan, XU Daquan, et al. Thinking about the relationship between net photosynthetic rate and intercellular CO₂ concentration[J]. Plant Physiology Communication, 2010, 46(1):64-66. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 159 页)

- 24 王爱玉, 张春庆, 吴承来, 等. 玉米叶绿素含量快速测定方法研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(2):97-100.  
 WANG Aiyu, ZHANG Chunqing, WU Chenglai, et al. Study on a fast method of testing chlorophyll content in maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(2):97-100. (in Chinese)
- 25 姜丽芬, 石福臣, 王化田, 等. 叶绿素计 SPAD-502 在林业上应用[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12):1543-1548.  
 JIANG Lifen, SHI Fuchen, WANG Huatian, et al. Application tryout of chlorophyll meter SPAD-502 in forestry[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(12):1543-1548. (in Chinese)
- 26 郝勇, 孙旭东, 潘圆媛, 等. 蒙特卡罗无信息变量消除方法用于近红外光谱预测果品硬度和表面色泽的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(5):1225-1229.  
 HAO Yong, SUN Xudong, PAN Yuanyuan, et al. Detection of firmness and surface color of pear by near infrared spectroscopy based on Monte Carlo uninformative variables elimination method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(5):1225-1229. (in Chinese)
- 27 MOROS J, KULIGOWSKI J, QUINTAS G, et al. New cut-off criterion for uninformative variable elimination in multivariate calibration of near-infrared spectra for the determination of heroin in illicit street drugs [J]. Analytica Chimica Acta, 2008, 630(2):150.
- 28 张晓羽, 李庆波, 张广军. 基于稳定竞争自适应重加权采样的光谱分析无标模型传递方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5):1429-1433.  
 ZHANG Xiaoyu, LI Qingbo, ZHANG Guangjun. Calibration transfer without standards for spectral analysis based on stability competitive adaptive reweighted sampling[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(5):1429-1433. (in Chinese)
- 29 MOREIRA S A, SARRAGUCA J, SARAIVA D F, et al. Optimization of NIR spectroscopy based PLSR models for critical properties of vegetable oils used in biodiesel production[J]. Fuel, 2015, 150:697-704.
- 30 岳学军, 全东平, 洪添胜, 等. 柑橘叶片叶绿素含量高光谱无损检测模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1):294-302.  
 YUE Xuejun, QUAN Dongping, HONG Tiansheng, et al. Non-destructive hyperspectral measurement model of chlorophyll content for citrus leaves[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1):294-302. (in Chinese)