

马铃薯叶片光化学吸收与反射光谱关联分析及检测

赵若梅¹ 邢子正¹ 马旭颖¹ 宋迪¹ 李民赞^{1,2} 孙红¹

(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. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为开展马铃薯叶片 PS II 叶绿素荧光参数无损检测研究, 利用高光谱成像系统采集 200 个感兴趣区域样本点的光谱图像并提取反射率, 使用封闭式叶绿素荧光成像系统采集相应样本点的 qP 值。采用 SPXY 算法将总样本按照 2:1 的比例划分为建模集 (135 个样本) 和验证集 (65 个样本), 采用联合区间偏最小二乘法 (Synergy interval partial least squares, si-PLS) 和随机蛙跳 (Random frog, RF) 算法各筛选出 18 个敏感波长, 并用选择的特征波长建立偏最小二乘回归 (Partial least squares regression, PLSR) 模型。结果表明: si-PLS-PLSR 模型的建模集决定系数 R_c^2 为 0.628 5, 验证集决定系数 R_v^2 为 0.610 3; RF-PLSR 模型的建模集决定系数 R_c^2 为 0.709 3, 验证集决定系数 R_v^2 为 0.687 2。结果表明利用 RF 算法筛选的特征波长对马铃薯叶片 qP 值检测的解释性优于 si-PLS 算法, 特征波长在 518.72 ~ 640.64 nm, 650 ~ 800 nm 和 850 ~ 1 000 nm 范围, 体现了荧光发射信号是马铃薯作物光化学吸收 qP 值的重要响应特征, 且叶片光化学吸收与叶绿素含量、叶片结构、水分含量等属性紧密关联。绘制叶片 qP 值分布图分析马铃薯叶片光化学吸收和光合作用动态提供了直观的分析手段, 可为马铃薯作物光合活性评价及复杂生理生化动态监测提供支持。

关键词: 马铃薯叶片; 叶绿素荧光; 高光谱成像; 光合作用; 光化学猝灭系数

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0375-07

Correlation Analysis and Detection of Photochemical Absorption and Reflectance Spectra of Potato Leaves

ZHAO Ruomei¹ XING Zizheng¹ MA Xuying¹ SONG Di¹ LI Minzan^{1,2} SUN Hong¹

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

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology,

Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to carry out the non-destructive detection of chlorophyll fluorescence parameters of potato leaves, hyperspectral images of 200 regions of interest (RoI) were collected and the average reflectance was extracted. Then qP values of the corresponding areas were measured by the closed chlorophyll fluorescence imaging system of Fluorcam. Sample set partitioning based on joint X - Y distance (SPXY) algorithm was used to divide the samples into calibration set (135 samples) and validation set (65 samples) according to the ratio of 2:1. Algorithms of synergy interval partial least squares (si-PLS) and random frog (RF) were used to select feature wavelengths, and the partial least squares regression (PLSR) model was established with the selected wavelengths. The results showed that the calibration accuracy of si-PLS-PLSR model was 0.628 5, the validation accuracy was 0.610 3, and the calibration accuracy of RF-PLSR model was 0.709 3, the validation accuracy was 0.687 2. The interpretation of potato leaves by RF method was better than that by si-PLS method. Selected wavelengths mainly distributed in the range of 518.72 ~ 640.64 nm, 650 ~ 800 nm and 850 ~ 1 000 nm,

收稿日期: 2020-08-07 修回日期: 2020-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(31971785)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020TC036)和中国农业大学研究生培养教学改革项目(JG2019004、YW2020007、ZYXW037)

作者简介: 赵若梅(1996—),女,硕士生,主要从事农业信息化技术研究,E-mail: S20193081422@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

which reflected that fluorescence emission signal was an important response characteristic of photochemical absorption in potato crops. And it also showed that the photochemical absorption was closely related to chlorophyll content, leaf structure, water content and other attributes. The mapping of qP values distribution in leaves provided an intuitive method for the analysis of photochemical absorption and photosynthesis dynamics of potato leaves. The study provided a way for the evaluation of photosynthetic activity, which could also be applied in monitoring of complex physiological and biochemical dynamic of potato crops.

Key words: potato leaf; chlorophyll fluorescence; hyperspectral imaging; photosynthesis; photochemical quenching coefficient

0 引言

马铃薯是我国第4大主粮作物,其地下块茎的生长发育与地上部植株光合作用密切相关,生育期存在“叶片光合营养制造-根茎营养消耗-块茎营养积累”三者相互促进与制约的复杂生理生化关系^[1-2]。基于光系统II(Photosystem II, PS II)的最大光能转化效率(Maximum photochemical efficiency, Fv/Fm)、光化学猝灭系数(Photochemical quenching coefficient, qP)、非光化学猝灭系数(Non-photochemical quenching coefficient, qN)等叶绿素荧光参数反映叶片对光能的吸收与转化、能量的传递与分配以及反应中心状态,是指示植物光合作用能力与生命活力的“内在性”探针^[3]。因而,快速无损地检测植物叶绿素荧光参数是当前研究的热点^[4-5],也是马铃薯作物光合作用能力评价^[6-7]、逆境生理响应^[8-10]等研究的基础。

依据植物吸收短波长光发射荧光的PS II检测机理,封闭式叶绿素荧光成像测量需对采样叶片进行暗适应,施加饱和和脉冲光、测量光和光化光以准确探测作物荧光参数^[11-12]。而长时间的暗处理、复杂的光学探测过程限制了该方法在大田环境中的应用与高通量测试效率。由于叶绿素强吸收蓝光和红光、强反射绿光这一特性,可见光-近红外(382~1 019 nm)反射光谱因采集方式简单和测试效率高,被广泛用于叶绿素含量诊断^[13],并间接地反映作物潜在的光合作用能力。实际上,植物吸收的光和有效辐射主要用于光合作用,其余以热能的形式耗散或者以发射叶绿素荧光信号的方式释放^[14],其中发射的叶绿素荧光“微弱”信号在650~800 nm的红光及红边区域与植物反射光谱相叠加^[15-17]。因此,基于冠层反射光谱观测叶绿素荧光微弱信号响应,并解析植物PS II叶绿素荧光参数是进行大田作物光合能力高通量检测的重要方向。

针对PS II叶绿素荧光参数检测,学者关注于冠层反射光谱信号与作物光合能力的关联响应以及荧光信号的提取,针对小麦和玉米等作物相关研究开

展了敏感反射波段、植被指数和红边位置参数的筛选与估算建模。ZARCO-TEJADA等^[18]分析复叶槭冠层光谱导数反射率,发现植物荧光发射的690~710 nm反射光谱区出现了双峰红边效应,表明高光谱数据能够探测叶绿素荧光。朱艳等^[19]发现小麦顶部2片叶片的叶绿素荧光参数与520~680 nm和750~850 nm区域的光谱反射率以及由550 nm和750 nm构成的差值植被指数(Difference vegetation index, DVI)等呈稳定的相关关系。仇亚红等^[20]证明Fv/Fm、qP、实际光化学效率(Φ PS II)等荧光参数与玉米高光谱数据相关性在-0.5左右,红边位置参数(700 nm)是表示光合作用强弱的敏感波段。JIA等^[21]用曲率指数(Curvature index, CUR)、叶绿素导数指数D705/D722、红边位置参数对小麦单叶尺度和冠层尺度的Fv/Fm进行检测。这些研究表明,利用冠层反射光谱数据评价作物光合作用能力具有可行性,同时指出解析反射光与PS II探针关联,明确关联特征波长与植被指数是检测作物叶绿素荧光参数的关键。

当前,针对马铃薯这一高光合作物叶绿素荧光参数的检测还有待深入开展。因此,为评价马铃薯作物的光化学吸收活性,围绕表征捕获光能用于光化学反应份额的qP参数^[22],开展基于反射高光谱马铃薯叶片qP值检测研究,解析与马铃薯叶片光化学吸收紧密关联的特征波长,建立qP值检测模型与可视化分布图,为马铃薯作物光合活性评价及复杂生理生化动态监测提供支持。

1 材料与方法

1.1 试验及数据处理流程

2019年10月,在中国农业大学信息与电气工程学院温室培育马铃薯植株,试验研究的马铃薯品种为大西洋。在马铃薯盛花期进行采样,该生育期马铃薯冠层茎叶生长达到顶峰,同时也是地下块茎膨大的重要时期。试验中随机采集50片叶片,装入密封袋带回实验室测试数据并分析。总体试验及数据处理流程如图1所示,采集数据包括:马铃薯叶片

高光谱图像信息、叶绿素荧光参数; 数据分析包括: 样本集划分、qP 值与反射光谱关联分析、特征波长筛选、诊断建模以及建立可视化分布图。

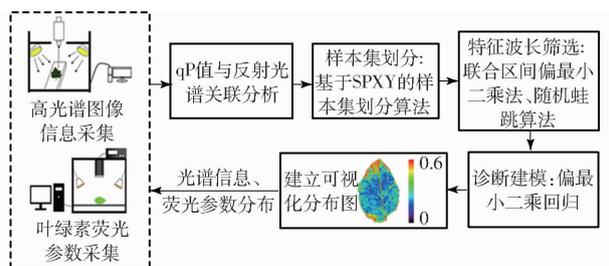


图 1 试验及数据处理流程图

Fig. 1 Flow chart of test and data processing

1.2 马铃薯叶片高光谱图像信息采集

采用 Gaia 型高光谱成像系统(四川双利合谱科技有限公司)采集高光谱图像信息, 光谱范围 388 ~ 1 026 nm, 分辨率为 2.8 nm。为消除光照不均匀及摄像头存在暗电流等因素的影响, 对原始高光谱图像反射率进行黑白校正^[23], 校正后光谱图像反射率计算公式为

$$R = (I - W) / (W - B) \quad (1)$$

式中 R ——校正后光谱图像反射率

I ——原始光谱图像反射率

W ——全白标定光谱图像反射率

B ——全黑标定光谱图像反射率

用软件 ENVI 5.1 选取 10 像素 × 10 像素矩形为感兴趣区域 (Region of interest, RoI), 提取样本的光谱数据为 RoI 反射光谱的平均值。

1.3 马铃薯叶片荧光参数测定

使用 FluorCam 封闭式叶绿素荧光成像系统(北京易科泰生态技术有限公司)测量叶绿素荧光参数, 系统由测量光光源(610 ~ 620 nm, 红光)、光化学光光源(610 ~ 620 nm, 红光; 470 ~ 480 nm, 蓝光)、饱和光光源(470 ~ 480 nm, 蓝光)、隔板、计算机及控制软件等部件组成。采集时将进行暗处理 30 min 的马铃薯叶片平放在暗适应操作箱内的隔板上, 控制系统通过 USB 与计算机相连, 并通过 FluorCam7 软件控制和采集分析数据。在 Protocols 窗口设置激发光源强度以及持续时间, 本文使用 Menu Wizard 中的 Quenching Act1 模式; 在 Pre-processing 窗口进行数据加载和感兴趣区域的选择, 本研究选取 10 像素 × 10 像素的矩形区域为 RoI, 可以得到选择区域的荧光动力学曲线; 在 Result 窗口可以得到 qP 值, 最终获得 200 个区域的 qP 值。

1.4 数据处理方法

1.4.1 样本集划分

采用 SPXY (Sample set partitioning based on joint

X - Y distance) 算法划分建模集和验证集, 样品间距离计算时同时考虑光谱数据和待分析变量^[24], 计算公式为

$$d_x(p, q) = \sqrt{\sum_{j=1}^J (x_p(j) - x_q(j))^2} \quad (2)$$

$$d_x(p, q) = \frac{d_x(p, q)}{\max_{p, q \in [1, N]} d_x(p, q)} + \frac{d_y(p, q)}{\max_{p, q \in [1, N]} d_y(p, q)} \quad (3)$$

式中 J ——光谱数据的波长数

$x_p(j)$ 、 $x_q(j)$ ——样本 p 、 q 光谱值

$d_x(p, q)$ ——样本 p 、 q 的 x 变量欧氏距离

$d_y(p, q)$ ——样本 p 、 q 的 y 变量欧氏距离

具体划分步骤如下^[25]:

(1) 计算样本数据之间的距离, 距离最大的两个样本作为最初被选定的样本。

(2) 计算剩余样本与被选样本之间的距离, 对于每个剩余样本, 与起始样本间的最短距离被选中。

(3) 在每个剩余样本的最短距离中选择最长距离所对应的样本, 作为下一个被选择的样本, 以此类推, 直至所选样本数目达到设定个数。

1.4.2 变量筛选

采用相关性分析法 (Correlation analysis, CA) 分析叶片光化学吸收与反射光谱之间的关联关系, 并应用联合区间偏最小二乘法 (Synergy interval partial least squares, si - PLS) 和随机蛙跳 (Random frog, RF) 两种算法进行 qP 值响应特征参数筛选。

其中, si - PLS 算法将获取的光谱曲线按照等间隔划分为 120 个区间, 对划分区间进行编号后进行回归分析, 选择交叉验证均方根误差 (Root mean square error of cross validation, RMSECV) 最小的区间组合作为特征波长^[26]; RF 算法与可逆跳跃马尔可夫链蒙特卡洛类似, 模拟模型空间中呈稳态分布的马尔可夫链衡量每个变量所占的权重, 即被选择的可能性, 变量对模型越重要被选中的概率就越大^[27]。因此, 对所有变量的选择概率进行排序, 选择概率较高的变量作为特征变量。本研究设置迭代次数为 500, 叶绿素荧光参数特征波长选择阈值为 0.28。

1.4.3 建模与评价方法

采用偏最小二乘回归 (Partial least squares regression, PLSR) 建立马铃薯叶片叶绿素荧光参数 qP 检测模型并比较两种筛选算法, 采用 10 倍交叉验证算法确定主成分 (Principle components, PCs) 个数, 以 RMSECV 为标准选取最优主成分个数。使用建模集决定系数 (Determination coefficient of calibration set, R_c^2)、建模集均方根误差 (Root mean square error of calibration, RMSEC)、验证集决定系数

(Determination coefficient of validation set, R_v^2)、验证集均方根误差(Root mean square error of validation, RMSEV)评价模型^[28]。

上述数据处理利用 Matlab R2016b 软件完成。最后将高光谱图像中每个像素点的反射率代入最优的检测模型中,使用 ENVI5.1 软件对其进行伪彩色处理即可建立马铃薯叶片 qP 值分布图。

2 结果与分析

2.1 马铃薯叶片 qP 值统计分析与样本集划分

对马铃薯每个叶片样本提取 4 个 RoI 的平均光谱,共获取 200 个 RoI 的光谱数据。对采集到的 200 个 RoI 的叶绿素荧光参数 qP 值进行统计分析,SPXY 算法划分样本集的结果如表 1 所示,建模集样本 qP 值取值范围(0.06 ~ 0.55)包含验证集的取值范围(0.08 ~ 0.50),用于后续数据分析处理。

表 1 样本集 qP 值统计结果

Tab.1 Statistical results of sample set partition

样本集	样本数	最大值	最小值	平均值	标准差
总样本集	200	0.55	0.06	0.264 0	0.098 7
建模集	135	0.55	0.06	0.276 6	0.099 0
验证集	65	0.50	0.08	0.237 8	0.092 8

2.2 马铃薯叶片光谱反射率曲线分析

图 2 是叶片提取的 RoI 位置及对应的反射率曲线,呈现典型绿色植物反射光谱特性,在 450 nm 和 670 nm 附近出现强吸收峰,540 nm 附近形成强反射峰,在红边位置附近(700 ~ 750 nm)反射率急剧上升进入近红外平台区。

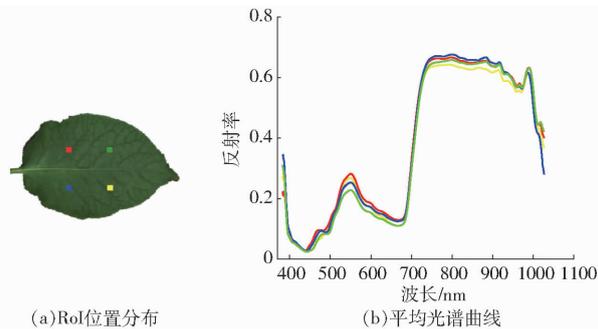


图 2 RoI 及其平均光谱曲线

Fig.2 RoI selection and its spectral curves

2.3 光谱反射率与 qP 值相关性分析

为了阐明叶片光化学吸收与反射光谱之间的关联关系,分析马铃薯叶片光谱反射率与 qP 值之间的相关性。相关系数曲线如图 3 所示,二者总体呈负相关,这是由于 qP 值与 PS II 开放能力有关,体现了对光能的吸收能力,所以当 PS II 吸收增强时,反射率降低;当 PS II 吸收降低时,反射率增高,且在

530.80 ~ 559.40 nm、699.80 ~ 716.67 nm、1 002.54 ~ 1 011.81 nm 波段的相关系数绝对值均大于 0.6。

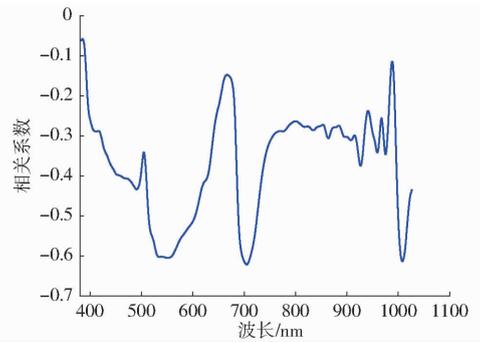


图 3 光化学猝灭系数与光谱反射率相关系数曲线

Fig.3 Correlation between spectral reflectance and qP

2.4 特征波长筛选结果

2.4.1 基于 si-PLS 的特征波长筛选结果

使用 si-PLS 方法将原始光谱划分为 120 个子区间,联合 3 个区间进行特征波长的筛选。选择最优区间组合,区间序号分别为 28、54 和 118, RMSECV 为 0.068 6,该区间组合包括 18 个波长,分别位于 527.35 ~ 531.67 nm、663.54 ~ 667.95 nm、1 010.88 ~ 1 015.52 nm 之间,选择的波段位于 qP 值与光谱数据相关系数绝对值大于 0.6 的波段附近,如图 4 所示,其中 527.35 ~ 531.67 nm 主要位于绿光强反射区域;663.54 ~ 667.95 nm 属于荧光发射波段区域;近红外区域 1 010.88 ~ 1 015.52 nm 属于植物叶片内部结构响应的高反射区,呈现 C—H 和 H—O 化学键的倍频特征。

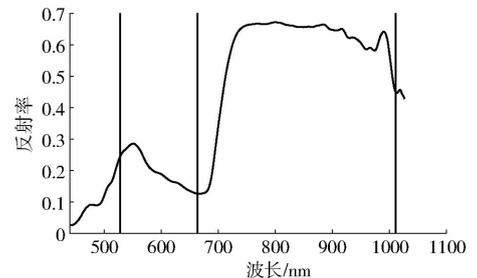


图 4 si-PLS 算法波长提取结果

Fig.4 Wavelengths selection result by si-PLS algorithm

2.4.2 基于 RF 算法的特征波长筛选结果

采用 RF 算法选取的波长如图 5 所示,筛选出 18 个特征波长,按照被选择概率由大到小依次为 684.74、640.64、893.18、584.62、766.65、697.14、1 002.50、849.54、869.51、573.30、998.84、569.82、529.95、518.72、765.75、631.86、993.29、871.33 nm。这些波长主要集中于 3 个波段范围,684.74、697.14、765.75、766.65、849.54 nm 位于 650 ~ 800 nm,属于荧光发射波长范围;518.72、529.95、569.82、573.30、584.62、631.86、640.64 nm 位于叶绿素绿光强反射和红光强吸收范围,与叶片叶绿素浓度存在

紧密关联;893.18、869.51、871.33、998.84、993.29 nm 位于近红外波段(850~1 000 nm),主要受植物细胞结构、水分的弱吸收等影响。与 si-PLS 算法相比,RF 算法选取的波长分布范围较广,且主要包括了叶绿素浓度吸收的响应特征、红边、荧光辐射、水分弱吸收等多元化的特性。

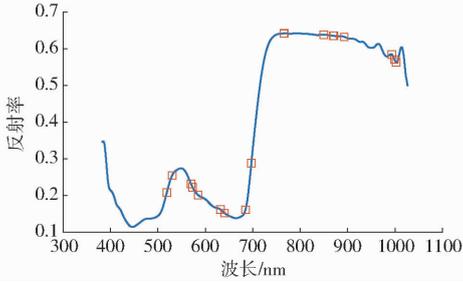
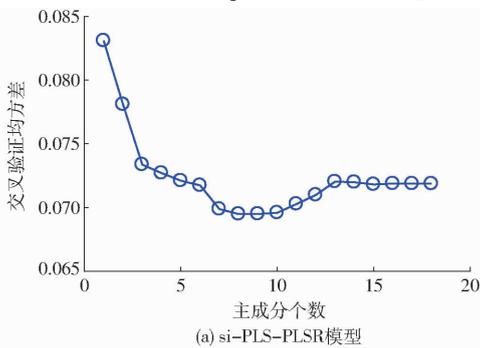


图 5 RF 算法运行结果

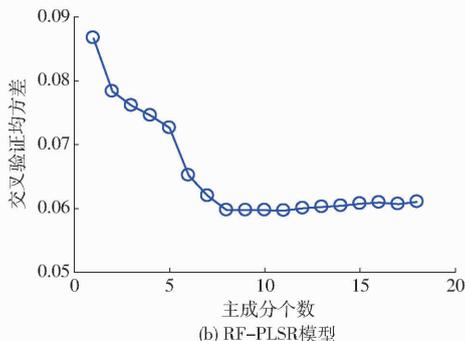
Fig. 5 Result of selection variables using RF algorithm

2.5 PLSR 回归模型建立

分别采用 si-PLS 和 RF 算法选择的特征波长,建立马铃薯叶片 qP 值的 PLSR 预测模型,分别记为 si-PLS-PLSR 模型和 RF-PLSR 模型。使用 10 倍交叉验证算法确定主成分的个数,结果如图 6 所示。si-PLS 和 RF 算法最优主成分个数分别为 8 和 9, RMSECV 分别为 0.065 0 和 0.059 7。建模结果如表 2 所示, si-PLS-PLSR 模型 R_c^2 为 0.628 5, RMSEC 为 0.059 7, R_v^2 为 0.610 3, RMSEV 为 0.062 1; RF-PLSR 模型 R_c^2 为 0.709 3, RMSEC 为 0.053 4, R_v^2 为 0.687 2, RMSEV 为 0.052 9。说明 RF 算法筛选的特征波长对马铃薯叶片 qP 值的解释性优于 si-PLS



(a) si-PLS-PLSR模型



(b) RF-PLSR模型

图 6 RMSECV 随着主成分数的变化趋势

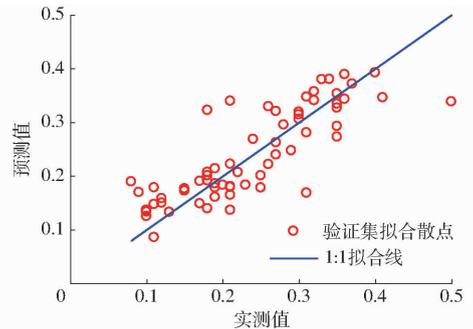
Fig. 6 Tendency of RMSECV with increasing variables

算法,体现了叶绿素是进行光合作用重要色素体,叶片光化学吸收与叶绿素含量、叶片内部结构、水分含量等属性紧密关联。因此研究选取 RF-PLSR 模型检测马铃薯叶片 qP 值,结果如图 7b 所示。

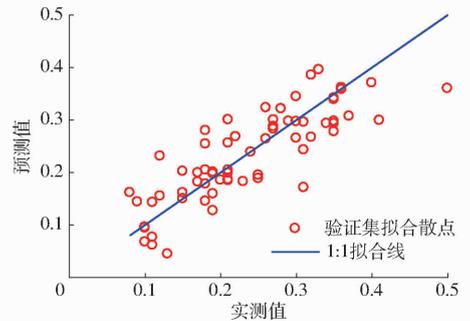
表 2 基于特征波长筛选的 PLSR 建模结果

Tab. 2 PLSR results based on wavelength selection

模型	PCs	R_c^2	RMSEC	R_v^2	RMSEV
si-PLS-PLSR	8	0.628 5	0.059 7	0.610 3	0.062 1
RF-PLSR	9	0.709 3	0.053 4	0.687 2	0.052 9



(a) si-PLS-PLSR模型



(b) RF-PLSR模型

图 7 马铃薯叶片叶绿素荧光参数检测结果

Fig. 7 Results of chlorophyll fluorescence parameters detection of potato leaves

2.6 马铃薯叶片叶绿素荧光探针参数 qP 值分布图

利用 RF-PLSR 模型计算马铃薯叶片高光谱图像所有像素点的 qP 值,使用伪彩色处理绘制马铃薯叶片叶绿素荧光参数 qP 值分布图,结果如图 8 所示。颜色深浅程度代表马铃薯叶片 qP 值的高低,叶

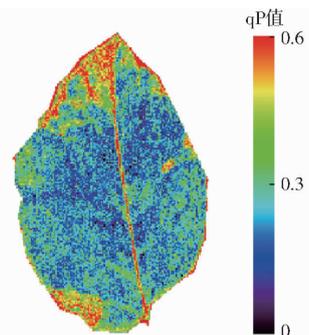


图 8 马铃薯叶片叶绿素荧光参数分布图

Fig. 8 Distribution of chlorophyll fluorescence parameters of potato leaves

脉部分的 qP 值略高于叶肉部分的 qP 值,且叶尖部和边缘部分 qP 值显著高于叶片中部。其中,叶脉部分在分布图中主要呈绿色,qP 值接近 0.3,叶肉部分在分布图中主要呈蓝色,qP 值接近 0.2,叶尖部 qP 值大于 0.4,说明了叶尖部和叶边缘处光化学反应能力高于叶中部。qP 值分布可视化可为直观分析马铃薯作物光化学吸收与光合作用动态提供基础。

3 结论

(1) 马铃薯叶片 qP 值与反射高光谱的相关性结果表明,qP 值与光谱数据呈负相关关系,在 530.80 ~ 559.40 nm、699.80 ~ 716.67 nm、1 002.54 ~ 1 011.81 nm 波段的相关系数绝对值大于 0.6,表明了利用反射高光谱数据评价作物 qP 值的可行性。

(2) 基于反射率数据提取荧光微弱信号,进行

马铃薯叶片 qP 值特征波长检测,si-PLS 算法筛选得到的 18 个特征波长分布在绿光强反射区(527.35 ~ 531.67 nm)、荧光发射波段区(663.54 ~ 667.95 nm)、植物叶片内部结构响应的高反射区(1 010.88 ~ 1 015.52 nm);RF 算法筛选得到的 18 个特征分布在叶绿素绿光强反射和红光强吸收波段(518.72 ~ 640.64 nm)、荧光发射波段(650 ~ 800 nm)以及反映叶片内部结构、水分含量的波段(850 ~ 1 000 nm)。表明叶绿素吸收与反射、植物叶片组织结构与水分等与马铃薯作物光化学吸收紧密相关。

(3) 建立马铃薯叶片 qP 值检测模型的结果表明,RF-PLSR 模型检测结果优于 si-PLS-PLSR,建模集决定系数 R_c^2 为 0.709 3,验证集决定系数 R_v^2 为 0.687 2。绘制马铃薯叶片 qP 值分布图可为快速检测马铃薯叶片叶绿素荧光参数提供支持。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 杨雅伦, 郭燕枝, 孙君茂, 等. 我国马铃薯产业发展现状及未来展望[J]. *中国农业科技导报*, 2017, 19(1):29-36.
YANG Yalun, GUO Yanzhi, SUN Junmao, et al. Present status and future prospect for potato industry in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(1):29-36. (in Chinese)
- [3] BUSSOTTIA F, GEROSAB G, DIGRADO A, et al. Selection of chlorophyll fluorescence parameters as indicators of photosynthetic efficiency in large scale plant ecological studies[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 108(1):105686.
- [4] SUN Hao, LIU Weihan, WANG Yanmei, et al. Evaluation of typical spectral vegetation indices for drought monitoring in cropland of the North China Plain[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(12):5404-5411.
- [5] FUSARO L, SALVATORI E, MEREU S, et al. Photosynthetic traits as indicators for phenotyping urban and peri-urban forests: a case study in the metropolitan city of Rome[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 103:301-311.
- [6] 李彩斌, 郭华春. 耐弱光基因型马铃薯在遮阴条件下的光合和荧光特性分析[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(8):1181-1189.
LI Caibin, GUO Huachun. Analysis of photosynthetic and fluorescence characteristics of low-light tolerant genotype potato under shade condition[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(8):1181-1189. (in Chinese)
- [7] RAJI S N, APARNA G N, MOHANAN C N, et al. Proximal remote sensing of herbicide and drought stress in field grown colocasia and sweet potato plants by sunlight-induced chlorophyll fluorescence imaging[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2017, 45(3):463-475.
- [8] LI Zhaohui, ZHANG Qian, LI Ji, et al. Solar-induced chlorophyll fluorescence and its link to canopy photosynthesis in maize from continuous ground measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236:111420.
- [9] 刘素军, 蒙美莲, 陈有君, 等. 水分胁迫下马铃薯叶片光合特性的变化及其响应机制研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(8):29-38.
LIU Sujun, MENG Meilian, CHEN Youjun, et al. Change of photosynthetic characteristics and response mechanism of potato leaves under water stress[J]. *Journal of Northwestern A&F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2019, 46(8):29-38. (in Chinese)
- [10] GERHARDS M, ROCK G, SCHLERF M, et al. Water stress detection in potato plants using leaf temperature, emissivity, and reflectance[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 53(12):27-39.
- [11] 岑海燕, 姚洁妮, 翁海勇, 等. 叶绿素荧光技术在植物表型分析的研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(12):3773-3779.
CEN Haiyan, YAO Jieni, WENG Haiyong, et al. Applications of chlorophyll fluorescence in plant phenotyping: a review [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(12):3773-3779. (in Chinese)
- [12] 李钦夫, 李征明, 纪建伟, 等. 叶绿素荧光动力学及在植物抗逆生理研究中的应用[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(22):5399-5402.
LI Qinfu, LI Zhengming, JI Jianwei, et al. Applications of chlorophyll fluorescence kinetics in the physiological resistance studies of plant[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(22):5399-5402. (in Chinese)

- [13] 郑涛, 刘宁, 孙红, 等. 基于高光谱成像的马铃薯叶片叶绿素分布可视化研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊):153-159,340.
ZHENG Tao, LIU Ning, SUN Hong, et al. Visualization of chlorophyll distribution of potato leaves based on hyperspectral imaging technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.):153-159, 340. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2017s025&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1292.2017.S0.025. (in Chinese)
- [14] KALAJI H M, JAJOO A, OUKARROUM A, et al. Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions[J]. Actaphysiologiae Plantarum, 2016, 38(4):102.
- [15] 胡姣婵, 刘良云, 刘新杰, 等. FluorMOD 模拟叶绿素荧光夫琅和费暗线反演算法不确定性分析[J]. 遥感学报, 2015, 19(4):594-608.
HU Jiaochan, LIU Liangyun, LIU Xinjie, et al. Assessing uncertainties of sun-induced chlorophyll fluorescence retrieval using FluorMOD model[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(4):594-608. (in Chinese)
- [16] MOHAMMEDA G H, COLOMBOB R, MIDDLETON C E M, et al. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) in vegetation:50 years of progress[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 231:111177.
- [17] LIU W W, ATHERTON C J, MÖTTUS D M, et al. Simulating solar-induced chlorophyll fluorescence in a boreal forest stand reconstructed from terrestrial laser scanning measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 232:111274.
- [18] ZARCO-TEJADA P J, MILLER J R, PUSHNIK J C, et al. Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double-peak red-edge effects[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84:283-294.
- [19] 朱艳, 田永超, 马吉锋, 等. 小麦叶片叶绿素荧光参数与反射光谱特征的关系[J]. 作物学报, 2007, 33(8):1286-1292.
ZHU Yan, TIAN Yongchao, MA Jifeng, et al. Relationship between chlorophyll fluorescence parameters and spectral reflectance characteristics in wheat leaves[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 33(8):1286-1292. (in Chinese)
- [20] 仇亚红, 杨峰, 赵刚成, 等. 玉米穗位叶主要光合荧光参数与高光谱数据的相关分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(24):71-77.
QIU Yahong, YANG Feng, ZHAO Gangcheng, et al. Analysis of correlation between photosynthetic fluorescence parameters and hyperspectral data in ear-leaf of maize[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(24):71-77. (in Chinese)
- [21] JIA Min, LI Dong, COLOMBO R, et al. Quantifying chlorophyll fluorescence parameters from hyperspectral reflectance at the leaf scale under various nitrogen treatment regimes in winter wheat[J]. Remote Sensing, 2019, 11(23):2838.
- [22] LICHTENBERG M, TRAMPE E, VOGELMANN T C, et al. Light sheet microscopy imaging of light absorption and photosynthesis distribution in plant tissue[J]. Plant Physiology, 2017, 175(2):721-733.
- [23] 邵园园, 王永贤, 玄冠涛, 等. 基于高光谱成像的肥城桃品质可视化分析与成熟度检测[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(8):344-350.
SHAO Yuanyuan, WANG Yongxian, XUAN Guantao, et al. Visual detection of SSC and firmness and maturity prediction for Feicheng peach by using hyperspectral imaging[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8):344-350. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20200838&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.038. (in Chinese)
- [24] LIU N, QIAO L, XING Z Z, et al. Detection of chlorophyll content in growth potato based on spectral variable analysis[J]. Spectroscopy Letters, 2020, 53(6):476-488.
- [25] SUN H, LIU N, WU L, et al. Water content detection of potato leaves based on hyperspectral image[J]. IFAC-PapersOnline, 2018, 51(17):443-448.
- [26] QU Fangfang, REN Dong, HOU Jinjian, et al. The characteristic spectral selection method based on forward and backward interval partial least squares[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(2):593-598.
- [27] 赵娟, 全朋坤, 马敏娟, 等. 富士苹果采收成熟度光谱无损预测模型对比分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12):347-354.
ZHAO Juan, QUAN Pengkun, MA Minjuan, et al. Comparative analysis of harvest maturity model for Fuji apple based on visible/near spectral nondestructive detection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):347-354. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181241&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.041. (in Chinese)
- [28] ZHENG Xiaochun, LI Yongyu, WEI Song, et al. Detection of adulteration with duck meat in minced lamb meat by using visible near-infrared hyperspectral imaging[J]. Meat Science, 2019, 149:55-62.