

光谱重构油菜叶绿素含量快速检测方法及设备研制

翁海勇¹, 黄俊昆¹, 万亮², 叶大鹏^{1*}

1. 福建农林大学机电工程学院, 福建 福州 350002

2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310058

摘要 为了实现油菜叶片中叶绿素含量的快速无损检测, 开发了手持式多光谱成像系统用于采集油菜叶片在 460, 520, 660, 740, 840 和 940 nm 六个波段的光谱图像。将一台能够采集可见光/近红外(380~1 023 nm)512 个波段光谱图像但是价格高昂且体积大的室内高光谱成像系统作为参考仪器, 将手持式多光谱成像系统作为目标仪器后, 采用伪逆法(pseudo-inverse method)求得高光谱成像系统和多光谱成像系统两台仪器之间的转换矩阵 F , 从而实现 6 个波段的多光谱图像向 512 个波段的高光谱图像的重构, 提高了手持式设备的光谱分辨率。运用偏最小二乘回归算法(PLSR)建立了重构的光谱与油菜叶片的叶绿素含量之间的关系模型。结果表明, 重构的可见光范围内的光谱反射率与叶绿素浓度之间具有很强的相关性, PLSR 回归模型建模集的决定系数 R_c^2 为 0.82, 建模集均方根误差 RMESC 为 1.98, 预测集的决定系数 R_p^2 为 0.78, 预测集均方根误差 RMESP 为 1.50, RPD 为 2.14。虽然应用本文开发的手持式成像系统结合 PLSR 模型实现油菜叶绿素含量快速无损预测的精度低于基于室内高光谱成像系统获得的高光谱图像建立的 PLSR 模型(R_c^2 , RMESC, R_p^2 , RMESP 和 RPD 分别为 0.90, 1.41, 0.82, 1.36 和 2.37), 但是明显优于基于原始多光谱成像系统 4 个波段(460, 520, 660 和 740 nm)反射率建立的 PLSR 模型得到的结果(R_c^2 , RMESC, R_p^2 , RMESP 和 RPD 分别为 0.78, 2.06, 0.72, 1.85 和 1.88)。表明光谱重构技术可提高多光谱成像预测油菜叶绿素含量的精度, 并且与室内高光谱成像系统相比, 开发的手持式设备具有体积小、成本低廉和操作简便等优点, 可为田间油菜叶片的生理状态和养分检测及可视化表达提供技术支持。

关键词 油菜; 叶绿素; 手持式多光谱成像系统; 多光谱图像; 光谱重构; 偏最小二乘回归

中图分类号: TH741 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)01-0210-06

引言

叶绿素是植物最重要的色素之一, 是判断植物健康状态的重要指标^[1]。当植物遭受生物和非生物胁迫时, 叶片中的叶绿素含量会随之改变。因此, 叶片中叶绿素含量的快速检测对植物健康状态的诊断具有重大的现实意义。传统上, 叶绿素含量的测量主要采用紫外分光光度法, 虽然结果准确可靠, 但是操作繁琐, 属于离线测量, 结果滞后, 并且产生一系列化学废弃液, 污染环境, 无法满足现代农业对植物健康状态精准高效监测的需求。

光学技术因其无损、快速、高效等优点在作物生理状态监测中具有重要的应用前景。有学者根据叶绿素对不同波长的光的吸收率不同的原理开发了手持式相对叶绿素测量仪^[2]

和绝对叶绿素检测仪^[3-5]。上述设备成本低廉, 操作方便, 但是属于单点测量, 不同测量点之间数据波动性较大, 也无法反映叶绿素在整个叶片分布的情况, 并且检测的结果也会受到叶片厚度和类型变化的影响。张建等^[6]利用普通单反相机搭载滤波片的方式拍摄了水稻叶片的可见光和近红外图像, 实现了叶片 SPAD 的测量。虽然 SPAD 值与叶绿素浓度存在较好的相关性, 但对于不同类型的植物叶片, 其 SPAD 值与叶绿素浓度之间的关系模型却不尽相同^[7]。由于光谱成像技术同时获取了光谱信息和图像信息, 能够实现植物生理状态和养分分布的可视化表达。石吉勇等^[8]应用高光谱成像提取了整个叶片的平均光谱并建立遗传偏最小二乘叶绿素校正模型, 实现了叶绿素在黄瓜叶片表面的分布, 为黄瓜的长势状态提供了有效的参考信息。甘海明等^[9]结合高光谱成像技术和深度学习实现了龙眼叶片叶绿素含量的预测, 为龙眼的生

收稿日期: 2019-12-10, 修订日期: 2020-04-28

基金项目: 福建省高峰高原学科项目(712018014), 福建省教育厅中青年教育科研项目(107/KLA19043A)资助

作者简介: 翁海勇, 1989 年生, 福建农林大学机电工程学院讲师 e-mail: hyweng@fafu.edu.cn

* 通讯作者 e-mail: ydp@fafu.edu.cn

长状况及养分分布提供理论依据。Feng 等^[10]利用高光谱成像技术实现不同生长期水稻叶片叶绿素含量的快速检测,实现了水稻生长状况的快速诊断。Shi 等^[11]获取了黄瓜叶片的近红外高光谱图像,结合多元线性回归模型实现了叶绿素含量的快速检测。与非成像的手持式叶绿素检测仪相比,上述成像设备虽然能够准确地获取到叶绿素浓度及其在叶片空间的分布情况,但是仪器设备成本高,体积大,无法被大面积推广使用。

鉴于上述情况,有必要开发一款体积小、成本低廉、操作简便、结果可靠且能够使叶绿素含量在整个叶片可视化表达的手持式设备。因此,以油菜为研究对象,采用自主研发的手持式多光谱成像系统采集油菜叶片的多光谱图像,融合光谱重构技术,提高光谱分辨率,以期提高模型对叶绿素含量的反演能力,从而为油菜的生理状态以及养分的精准化管理提供理论依据。

1 实验部分

1.1 油菜叶片采集

油菜来源于浙江省杭州市西湖区浙江大学紫荆港校区西区试验田。油菜品种为浙大 630,物候期为苗期。试验田分成三个试验小区,每个小区地块面积为 $6.4\text{ m} \times 24.4\text{ m}$,三块小区的氮肥(尿素)施肥量分别为 $75, 150$ 和 $225\text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$,磷肥(过磷酸钙)和钾肥(氯化钾)的施用量均分别为 60 和 $150\text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ 。尿素在 12 月中旬和来年 2 月份中旬施肥,磷酸钙和氯化钾则在油菜种植前施一次。为了使试验数据分布

范围尽可能大,在采样过程中分别从每个小区内采集 100 片(共 300 片)不同叶绿素含量的油菜叶片作为研究对象。

1.2 多光谱和高光谱图像采集

为了实现油菜叶片叶绿素的快速无损精准检测,本文开发了便携式多光谱成像系统,用于油菜叶片多光谱图像的采集。该设备主要包含了分辨率为 480×640 pixels 的单体黑白 CMOS 相机(MT9V032, ON Semiconductor, Phoenix, Arizona, USA),光源 LED(Epileds Technologies, Inc, Taiwan, China)、镜头(M0814-MP, CBC Corporation, Tokyo, Japan)和上位机软件[图 1(a)]。在绘制电路板时,每个波长的 LED 安装 3 个,间隔为 120° [图 1(b)]。六个波段 LED 的中心波长分别为 $460, 520, 660, 740, 840$ 和 940 nm ,半带宽均为 25 nm [图 1(c)]。上位机软件依次触发不同波长 LED 的驱动电路,从而依次点亮对应波长的 LED,此时相机采集对应波段的光谱图像,构成多光谱图像立方块[图 1(d)]。为了实现光谱重构,提高光谱分辨率,本试验选取了室内高光谱成像系统作为参考仪器[图 1(e)]。高光谱成像系统主要由分辨率为 672×512 pixels 的 CCD 相机(C8484-05, Hamamatsu Photonics, Hamamatsu City, Japan)、线光源(Fiber-Lite DC950, Dolan Jenner Industries Inc., Boxborough, MA)、波长范围为 $379 \sim 1\,023\text{ nm}$ 、分辨率为 2.8 nm 的光谱仪(ImSpector V10E, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland)、电控移动平台、暗箱和电脑。为了使样品的多光谱和高光谱图像一一对应,利用打孔器从叶片上取下面积为 50 cm^2 的圆盘叶片用于光谱图像采集,并将整个叶片圆盘作为感兴趣区域(region of interest, ROI),用于提取平均光谱。多光谱图像的采集参

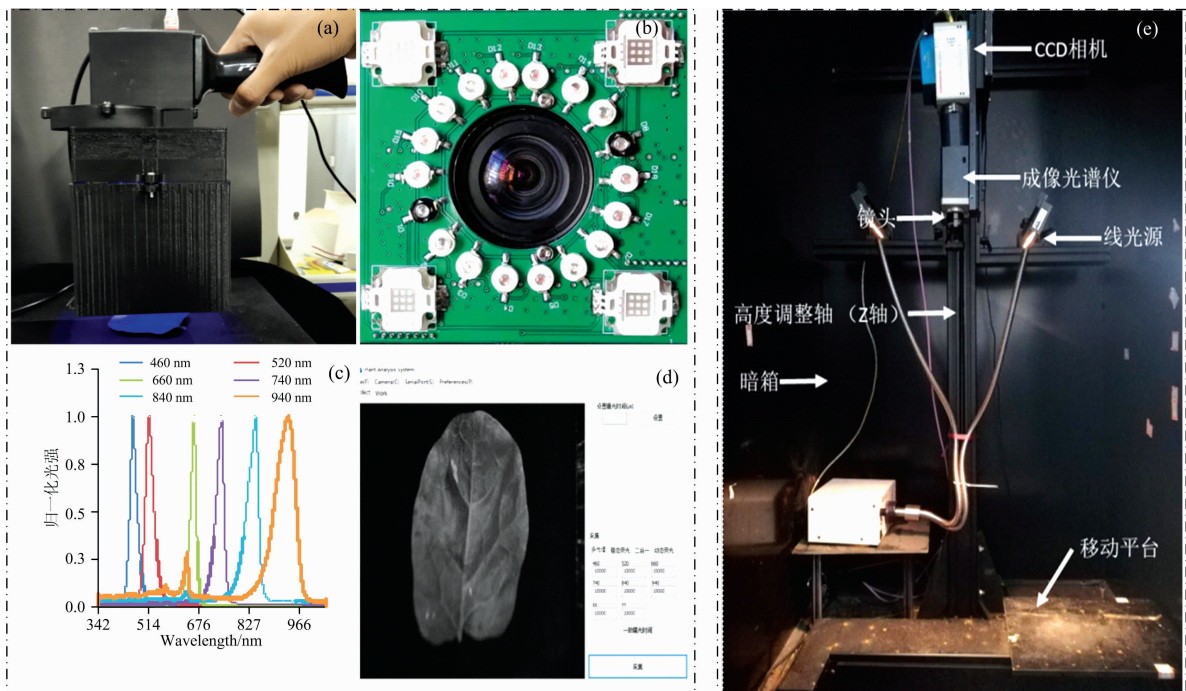


图 1 手持式多光谱成像系统(a)、不同波长 LED 的布局(b)、各个 LED 的中心波长(c)、上位机软件(d)及室内高光谱成像系统(e)

Fig. 1 The handheld multispectral imaging system (a), the layout of LEDs (b), the central wavelength of each LED (c), the software (d) and the in-house hyperspectral imaging system (e)

数为物镜距离 30 cm, 曝光时间为 35 ms, 高光谱图像的采集参数则为物镜距离 30 cm, 曝光时间为 30 ms, 平台移动速度为 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在油菜叶片的高光谱和多光谱图像采集前, 首先获取参考板和暗电流的光谱图像数据, 用于数据处理前原始光谱图像的校正, 以减少光照不均匀和暗电流对光谱图像的影响, 校正公式为

$$R = \frac{I_{\text{raw}} - I_{\text{dark}}}{I_{\text{ref}} - I_{\text{dark}}} \quad (1)$$

式中, R 为校正后的光谱图像, I_{dark} 为暗电流图像, I_{raw} 为原始光谱图像, I_{ref} 为参考板光谱图像。

1.3 叶绿素含量测定

在光学图像采集后, 采用传统方法测量叶片中叶绿素含量^[12]。将上述 50 cm^2 的圆盘叶片浸泡在装有 8 mL 95% 乙醇的离心管中。黑暗环境中静置 24 h 后, 使用酶标仪 (Epoch2, BioTek Instruments, Inc, Vermont, USA) 测量叶绿素溶液在 470, 649 和 665 nm 的吸光度值 (A_{470} , A_{649} 和 A_{665}), 用于计算出叶片中叶绿素的浓度。

1.4 光谱重构

光谱重构技术是将目标物低维的光谱值恢复高维的光谱值, 达到提高分辨率和检测精度的目的。采用伪逆法求解转换矩阵实现多光谱向高光谱重构, 转换矩阵的求解过程如式 (2)~式 (4)^[13]

$$\mathbf{X}_{\text{ms}} = \mathbf{X}_{\text{ss}} \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{X}_{\text{ss}}^+ \mathbf{X}_{\text{ms}} \quad (3)$$

$$\mathbf{X}_{\text{ss,c}} = \mathbf{X}_{\text{ss,u}} \mathbf{F} \quad (4)$$

式中, \mathbf{F} 为转换矩阵, \mathbf{X}_{ms} 为标样集的高光谱数据, \mathbf{X}_{ss} 为标样集的多光谱数据, \mathbf{X}_{ss}^+ 为 \mathbf{X}_{ss} 的广义逆矩阵。采用 Kennard/Stone (KS) 算法从多光谱数据中选择标样集。对未知样本多光谱数据 $\mathbf{X}_{\text{ss,u}}$, 应用式 (4) 进行求解, 得到重构的高光谱数据 $\mathbf{X}_{\text{ss,c}}$ 。

1.5 预测模型的建立与评价

选择偏最小二乘回归算法 (partial least square regression, PLSR) 建立重构光谱和油菜叶绿素含量 \mathbf{Y} 之间的化学计量法分析模型。在模型建立过程中, PLSR 对光谱矩阵和化学值矩阵 \mathbf{Y} 同时进行分解, 并将 \mathbf{Y} 的信息引入到光谱矩阵的分解过程中。在计算每一个新的主成分前, 将光谱矩阵的得分矩阵 \mathbf{T} 和化学值 \mathbf{Y} 的得分矩阵 \mathbf{U} 进行交换, 使得光谱矩阵的主成分与 \mathbf{Y} 最大程度的相关, 从而保证建立最佳的预测模型^[14]。采用 Kennard/Stone (KS) 算法按照 2:1 的比例分成建模集和预测集。最后, 引入预测集决定系数 (determination coefficient of prediction set, R_p^2), 预测集均方根误差 (root mean square error of prediction, RMESP) 和剩余预测偏差 (residual prediction deviation, RPD) 作为模型性能的主要评价指标。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) 作为辅助评价指标。模型的 R^2 和 RPD 越高, RMSE 越低, 则说明模型的预测性能越好。

2 结果与讨论

2.1 光谱反射率分析

应用室内高光谱成像系统和手持式多光谱成像系统所测得所有油菜叶片的平均光谱反射率曲线如图 2(a) 和 (b) 所示。分析图 2(a) 和 (b) 可知, 两台仪器测得油菜叶片平均反射率的绝对值不同; 原因可能由于两者的传感器响应 (室内高光谱成像系统用的是 CCD, 而手持式多光谱成像设备用的是 CMOS) 存在差异引起的。然而进一步分析可知, 两台设备测得的叶片的平均光谱曲线趋势一致, 表现为因叶绿素和类胡萝卜素吸收引起的在蓝光 (460 nm) 和红光 (660 nm) 区域出现的波谷, 叶片反射绿光在 520 nm 引起的绿色反射峰。因“红边”效应引起的在 660~740 nm 波长范围内的反射率急剧上升。由于植物对近红外光几乎不吸收, 导致近红外区域 (740~940 nm) 的反射率较高。图 2(c) 显示了重构的和室内高光谱成像系统所测的所有样品在 430~1 023 nm 内的高光谱反射率。分析图 2(c) 可知, 重构的油菜高光谱反射率和室内高光谱成像系统所测的高光谱反射率基本上处于相同的数值区间。对比分析可见光 (430~740 nm) 和近红外 (740~1 023 nm) 区域的重构效果可以看出, 重构的光谱反射率与室内系统获得的光谱反射率在可见光区域的重叠度高于近红外。这可能是由于相机传感器在可见光范围内的量子效率优于近红外。图 2(d) 显示了所有样本重构的光谱反射率和室内高光谱成像系统测得的光谱反射率两者之间的相关性系数 (r) 均可达到 0.99 以上, 说明了伪逆法能够实现多光谱向高光谱的重构。

2.2 校正模型的预测性能分析

图 2(c) 的结果表明在可见光范围内的重构效果优于近红外。另一方面, 由于叶绿素的吸收光谱分布在可见光范围内。因此, 建立了基于可见光 (460~740 nm) 范围内的光谱反射率和油菜叶绿素含量间的化学计量法分析模型。图 3(a) 显示了室内高光谱成像系统测得的油菜叶片在 460~740 nm 范围内 225 个波段的光谱反射率与叶绿素含量建立的 PLSR 模型建模集和预测集的预测效果。PLSR 模型建模集的决定系数 R_c^2 为 0.90, 建模集均方根误差 RMESC 为 1.41, 预测集的决定系数 R_p^2 为 0.82, 预测集均方根误差 RMESP 为 1.36, RPD 为 2.37, 表明利用可见光范围内的光谱反射率建立的 PLSR 模型能够较好的实现油菜叶片叶绿素快速检测。利用手持式多光谱成像系统获得的可见光范围内的 4 个波段 (460, 520, 660 和 740 nm) 反射率建立叶绿素 PLSR 模型得到的建模集的决定系数 R_c^2 为 0.78, 建模集均方根误差 RMESC 为 2.06, 预测集的决定系数 R_p^2 为 0.72, 预测集均方根误差 RMESP 为 1.85, RPD 为 1.88 [图 3(b)], 效果差于室内高光谱成像系统。

2.3 光谱重构的效果评价

为了进一步提高手持式多光谱成像系统获得的可见光范围内 4 个波段光谱反射率建立的 PLSR 模型对叶绿素的预测能力。采用伪逆法实现多光谱向高光谱重构, 提高光谱的分辨率。在光谱重构过程中, 标样集的个数会影响光谱重构的效果。若标样集个数太少, 则会遗漏两台仪器之间的差异信息, 导致转换矩阵 \mathbf{F} 包含的信息不足, 重构效果较差; 若标样集个数太多, 则转换矩阵 \mathbf{F} 中会包含与仪器差异特征无关的信息, 也会出现过校正的现象, 导致重构效果较差^[15]。因

此，需要选取合适的标样集个数。由图 4(a)可以看出，标样数量对光谱重构的效果具有较大的影响，当标样集个数从 1 增加至 5 时，预测均方根误差 RMSEP 急剧下降，预测集决

定系数 R_p^2 和剩余预测偏差 RPD 出现较大幅度的提升。随着标样集的增加，模型的预测性能并没有随着标样数个数的增加而改善。当标样集个数为 5 时，利用重构的光谱建立的

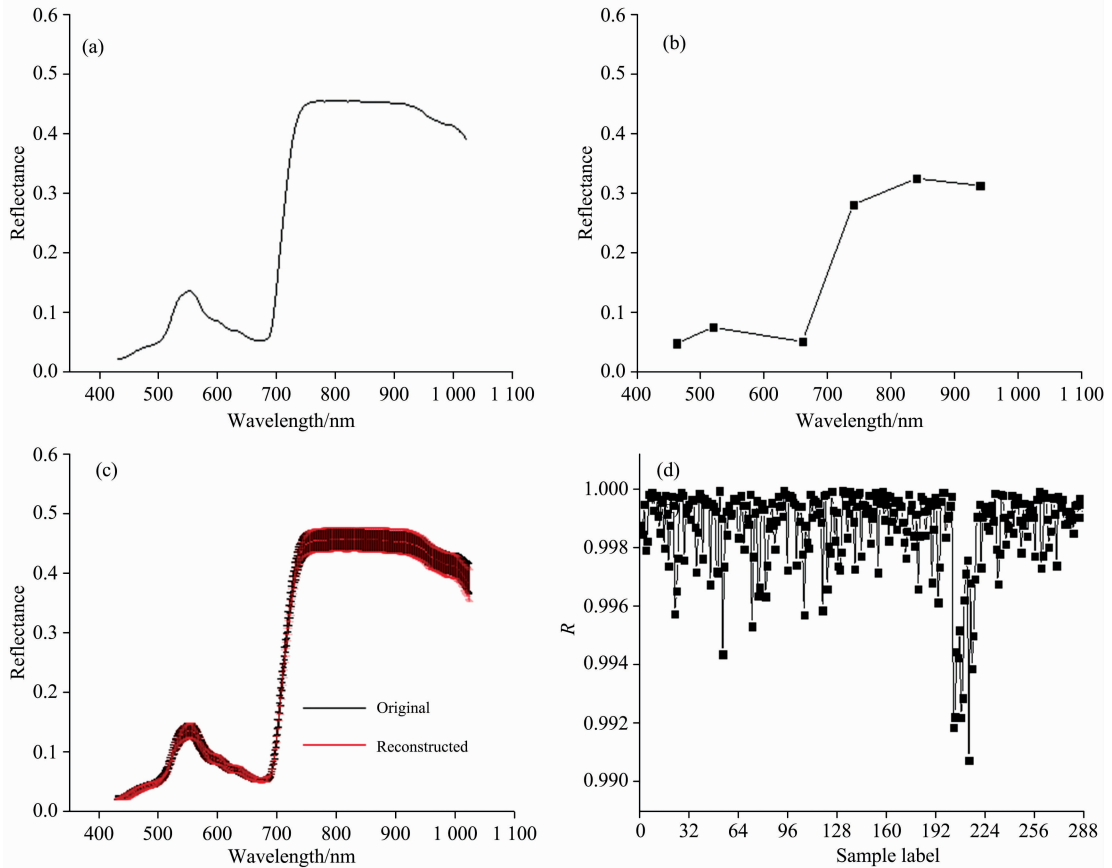


图 2 室内高光谱成像系统获得的所有油菜叶片的平均光谱反射率 (a)，手持式多光谱成像系统测得的所有油菜叶片的平均光谱反射率 (b)，重构的高光谱反射率和室内高光谱成像系统测得的叶片高光谱反射率 (c)，重构的光谱反射率和室内高光谱成像系统测得的叶片光谱反射率之间的相关性系数 (d)

Fig. 2 The mean spectral reflectance measured by the indoor hyperspectral imaging system (a) and the handheld multispectral imaging system (b), the original hyperspectral reflectance and reconstructed hyperspectral reflectance (c), the correlation coefficient between the original hyperspectral reflectance and reconstructed hyperspectral reflectance (d)

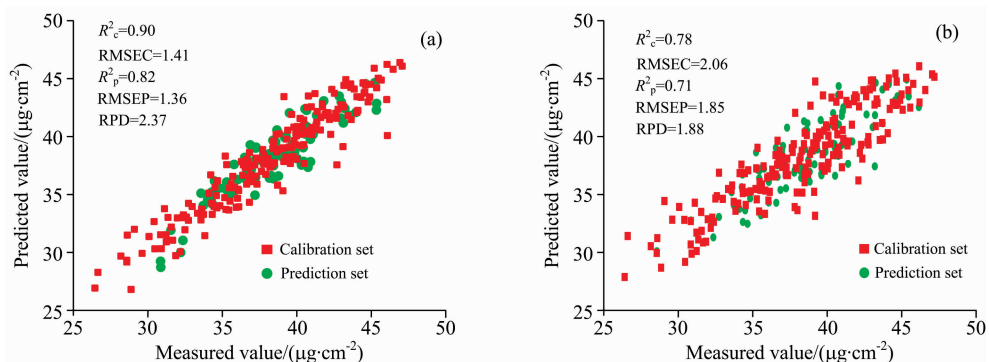


图 3 基于室内高光谱成像系统获得的可见光范围内 225 个波段光谱反射率 (a) 和手持式多光谱成像系统获得的可见光范围内 4 个波段光谱反射率建立的叶绿素 PLSR 模型的预测性能

Fig. 3 The performance of PLSR model based on spectral reflectance at 225 wavelengths in visible range measured by the indoor hyperspectral imaging system (a) and the spectral reflectance at four wavelengths in visible range measured by the handheld multispectral imaging system (b)

PLSR 模型得到的建模集的決定系数 R_c^2 为 0.82, 建模集均方根误差 RMESC 为 1.98, 预测集的決定系数 R_p^2 为 0.78, 预测集均方根误差 RMESP 为 1.50, RPD 为 2.14[图 4(b)]. 由重构的高光谱建立油菜叶绿素 PLSR 模型的预测性能虽没

有达到室内高光谱成像系统一样的效果, 但是相对于原始多光谱图谱数据有了较大的提升, 说明手持式多光谱成像系统融合光谱重构技术能够提高油菜叶绿素预测精度。

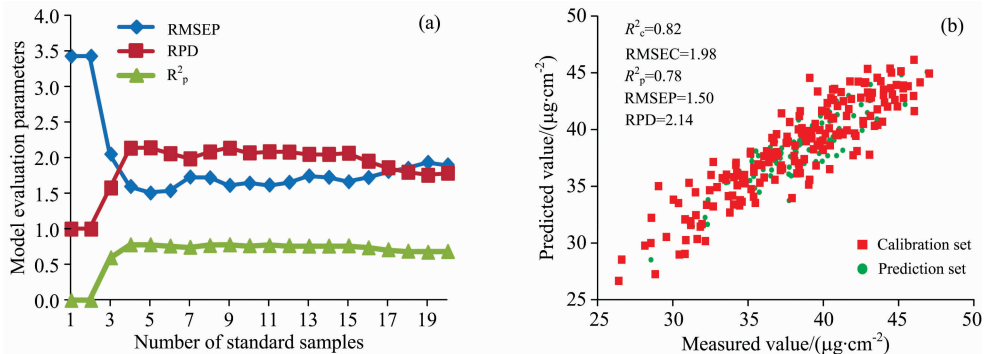


图 4 不同标样集个数对 PLSR 模型预测性能的影响(a)和标样集为 5 时重构得到的光谱建立的 PLSR 模型的预测效果(b)

Fig. 4 The impact of different numbers of standard samples on the predicting ability of PLSR model (a) and the performance of PLSR model based on the reconstructed hyperspectra using 5 standard samples (b)

3 结 论

开发了一款手持式叶绿素含量快速检测设备, 该设备具有操作简单、体积小、成本低廉以及精度高的优点。应用光谱重构技术使得该仪器获得的可见光范围内 4 个波段(460, 520, 660 和 740 nm)的光谱反射率重构成为 225 个波段的光

谱反射率, 提高了光谱分辨率。采用重构的光谱反射率建立的 PLSR 模型预测得到的叶绿素含量与实际值之间的決定系数为 R_p^2 为 0.78, 预测集均方根误差 RMESP 为 1.50, RPD 为 2.14, 优于基于原始 4 个波段反射率建立的模型。实验结果表明, 利用手持式多光谱成像设备融合光谱重构技术能够实现油菜叶绿素含量的快速、无损检测并提高模型的预测性能。

References

- [1] LEI Xiang-xiang, ZHAO Jing, LIU Hou-cheng, et al(雷祥祥, 赵静, 刘厚诚, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2019, 39(10): 3256.
- [2] SUN Hong, ZHAO Yi, ZHANG Meng, et al(孙红, 赵毅, 张猛, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2015, (S2): 186.
- [3] TAN Wen-jing, WANG Yong-qian, ZHAO Peng-fei, et al(谭文静, 王永千, 赵鹏飞, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2014, 30(10): 160.
- [4] YANG Biao, DU Rong-yu, YANG Yu, et al(杨彪, 杜荣宇, 杨玉, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2019, 50(12): 180.
- [5] SUN Hong, XING Zi-zheng, ZHANG Zhi-yong, et al(孙红, 邢子正, 张智勇, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2019, 50(S1): 175, 296.
- [6] XIE Jing, CHEN Shi, WANG Jun-ke, et al(谢静, 陈适, 王珺珂, 等). Journal of Central China Normal University • Natural Science(华中师范大学学报 • 自然科学版), 2014, (2): 269.
- [7] Ling Qihua, Huang Weihua, Jarvis Paul. Photosynthesis Research, 2011, 107(2): 209.
- [8] SHI Ji-yong, LI Wen-ting, GUO Zhi-ming, et al(石吉勇, 李文亭, 郭志明, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2019, 50: 264.
- [9] HONG Tian-sheng, GAN Hai-ming, YUE Xue-jun, et al(洪添胜, 甘海明, 岳学军, 等). Journal of South China Agricultural University(华南农业大学学报), 2018, 39: 102.
- [10] Feng Hui, Chen Guoxing, Xiong Lizhong, et al. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1238.
- [11] Shi J Y, Zou X T, Zhao J W, et al. Scientia Horticulturae, 2012, 138(1): 190.
- [12] Li Dong, Cheng Tao, Jia Min, et al. Remote Sensing of Environment, 2018, 206: 1.
- [13] Yoon S C, Shin T S, Heitschmidt G W, et al. Journal of Biosystems Engineering, 2019, 44(3): 169.
- [14] CHEN Li-dan, ZHAO Yan-ru(陈立旦, 赵艳茹). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2014,

30(8): 168.

- [15] LIU Jiao, LI Xiao-yu, GUO Xiao-xu, et al(刘 娇, 李小昱, 郭小许, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2014, 30: 276.

Rapidly Detecting Chlorophyll Content in Oilseed Rape Based on Spectral Reconstruction and Its Device Development

WENG Hai-yong¹, HUANG Jun-kun¹, WAN Liang², YE Da-peng^{1*}

1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2. College of Biological System Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract In order to rapidly and nondestructively detect chlorophyll content in leaves, a handheld multi-spectral imaging system was developed in this study to collect multispectral images of oilseed rape leaves. The pseudo-inverse method was introduced to reconstruct the multispectral reflectance at 6 wavebands (460, 520, 660, 740, 840 and 940 nm) to the hyperspectral reflectance at 512 wavebands in the range of 379 ~ 1 023 nm with the aim to improve the spectral resolution. The partial least square regression (PLSR) was then used to build a model to predict chlorophyll content in leaves based on the reconstructed hyperspectral reflectance. The results showed that the reflectance in the visible range of the reconstructed hyperspectral presented a high relationship with the chlorophyll content. The performance of PLSR model using reconstructed spectrum as inputs was evaluated using the parameters of the determination coefficient of prediction set (R_p^2), root mean square error of prediction (RMSEP) and residual prediction deviation (RPD) with the values of 0.78, 1.50 and 2.14, respectively, which was better than that using original spectrum at 4 wavebands (460, 520, 660 and 740 nm) with the values of R_p^2 , RMESP and RPD of 0.72, 1.85 and 1.88, respectively. The results demonstrated that the combination multispectral imaging with spectral reconstruction technology could improve the predicting ability of the PLSR model and this technology can be used for monitoring physiology and nutrient status in oilseed rape leaves.

Keywords Oilseed rape; Chlorophyll content; Handheld multispectral imaging system; Multispectral imaging; Spectral reconstruction; Partial least squares regression

(Received Dec. 10, 2019; accepted Apr. 28, 2020)

* Corresponding author