## 近红外高光谱成像扫描速度对拟南芥冠层含水率预测的影响

吕梦琪<sup>1</sup>,宋宇杰<sup>4</sup>,翁海勇<sup>1,3</sup>,孙大伟<sup>1,3</sup>,董晓娅<sup>2</sup>,方 慧<sup>1,3</sup>,岑海燕<sup>1,3\*</sup>

1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院,浙江杭州 310058

2. 江苏大学农业装备工程学院, 江苏 镇江 212013

3. 农业农村部光谱检测重点实验室,浙江杭州 310058

4. 浙江大学计算机科学与技术学院,浙江杭州 310027

**摘 要**高光谱成像技术可以无损检测植物不同尺度的理化信息,现有研究往往以分析高光谱图像的平均 光谱为主,忽略了其空间维度的信息。以模式植物拟南芥为研究对象,探究高光谱成像不同扫描速度引起的 图像空间分辨率差异对植物冠层含水率测量的影响,为高光谱成像在线快速检测植物冠层含水率提供优化 方案。首先利用室内在线高光谱成像系统分别在 20,30 和 40 mm・s<sup>-1</sup>三种扫描速度下采集了拟南芥冠层高 光谱图像,并提取拟南芥冠层平均反射光谱。其次,利用偏最小二乘算法(PLSR)建立了拟南芥冠层含水率 与平均反射光谱的定量分析模型,通过决定系数(R<sup>2</sup>)、均方根误差(RMSE)、相对分析误差(RPD)对模型进 行评估。比较基于原始光谱与多元散射校正算法(MSC)、Savitsky-Golay 平滑算法等预处理光谱建立的 PLSR 模型,选取最佳光谱预处理方法用于后续的数据处理。最后,利用连续投影算法(SPA)分析比较基于 最优特征波长与全波长的模型预测准确度,探明高光谱图像扫描速度对拟南芥冠层含水率预测的影响规律。 研究结果表明,当扫描速度从 20 mm・s<sup>-1</sup>提升到 30 mm・s<sup>-1</sup>时,基于 MSC 预处理的全波段 PLSR 模型预 测拟南芥冠层含水率决定系数降低 0.88%,小于 1%;当扫描速度从 20 mm・s<sup>-1</sup>提升到 40 mm・s<sup>-1</sup>时,拟 南芥冠层含水率决定系数降低 2.3%。说明在适当提高扫描速度的同时,能够保证植物冠层的高含水率预测 准确度。改变高光谱扫描速度可以更有效地利用高光谱图像空间维度有效信息,扫描速度适当增大后,高光 谱图像的空间维度信息改变,提高实际生产应用环节的图像采集效率,减少数据处理时间。

关键词 拟南芥;冠层含水率;近红外高光谱;扫描速度;SPA;PLSR 中图分类号:TP391 文献标识码:A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)11-3508-07

## 引 言

干旱胁迫是影响植物正常生长发育的重要因素之一,快速定量测定植物冠层的含水率,了解作物受干旱胁迫的严重 程度,对制定合理的灌溉决策、实现作物精准管理有重要意 义。拟南芥属十字花科,具有显花植物的全部特征,生育期 短,其基因易于被诱导、克隆和筛选<sup>[1]</sup>。因此拟南芥是基于 植物冠层分析技术研究植物干旱胁迫响应的理想实验对象。

传统的植物冠层含水率测量手段以化学分析法为主,即 将植物带到实验室后,测定其干、湿重量,从而计算含水 率<sup>[2]</sup>。由此可见,传统植物冠层含水率的测量方法破坏植物 冠层组织结构,且测量过程繁琐,无法实现快速检测<sup>[3-5]</sup>。近 几年基于高光谱成像的植物冠层分析技术快速发展,利用植 物冠层反射光谱建立冠层含水率定量分析模型,能够实现无 损检测<sup>[6-8]</sup>。拟南芥干旱胁迫突变体基因型对干旱胁迫条件 响应效果明显。Christoph RömerA等<sup>[9]</sup>利用高光谱图像预测 谷物缺水情况的无监督学习分类方法,将真实生长环境下的 谷物高光谱图像与人工模拟的图像比较,证明高光谱图像对 于谷物生长情况预测的鲁棒性较高。Ge等<sup>[10]</sup>的研究证明了 高光谱图像中提取的玉米叶片反射光谱与含水率有明显关 系。Piyush Pandey等<sup>[11]</sup>的研究表明高通量植物冠层高光谱 成像技术可以量化预测植物叶片的含水率和氮含量。Kim 等<sup>[12]</sup>研究了 800~1 600 nm 的短波近红外高光谱与杨树叶

收稿日期: 2019-10-08, 修订日期: 2020-02-12

**基金项目:**浙江省重点研发计划项目(2017C02031),江苏省现代农业装备与技术协同创新中心项目(4091600007),国家自然科学基金项目 (31971776)资助

**作者简介:** 吕梦琪, 女, 1998 年生, 浙江大学生物系统工程与食品科学学院本科生 e-mail: 3160101113@zju. edu. cn \* 通讯联系人 e-mail: hycen@zju. edu. cn

片含水率的关系,当干旱胁迫达到 20%及以上时,可以区分 出两种状态的叶片。宋镇等<sup>[4]</sup>应用高光谱成像技术,建立了 高精度杏鲍菇含水率预测模型。

上述研究表明,利用近红外高光谱成像建立植物冠层含 水率预测模型具有可行性,尽管上述方法获得了较好的预测 效果,但将高光谱成像技术应用于在线检测仍需要进一步研 究。基于扫描速度对植物冠层含水率检测的研究很少,本研 究以模式植物拟南芥为例,利用拟南芥突变体、野生型基因 型对干旱胁迫的响应不同的性质,探究测定含水率理化性质 时合适的植株冠层高光谱成像扫描速度,并建立拟南芥冠层 反射率与含水率的预测模型。

### 1 实验部分

#### 1.1 样本及培养方法

本试验以哥伦比亚型拟南芥 Col-0(Arabidopsis thaliana, ecotype Columbia)和 OSCA1(Arabidopsis reduced hyperosmolality-induced [Ca<sup>2+</sup>]; increase 1)突变体为研究材料。其中 Col-0为野生型对照组,OSCA1为干旱敏感型突变体。OS-CA1基因型拟南芥保卫细胞和根细胞的渗透钙离子通道受 损,无法调节植物体内渗透压,致使蒸腾调控作用和根生长 受到抑制,从而导致其生长在干旱胁迫下更易受到抑制<sup>[13]</sup>。

采用 1/2 MS (Half-strength Murashigend Skoogsalts)无 菌培养基培养和营养土移栽相结合的方法快速种植拟南芥。 拟南芥在 1/2 MS 无菌培养的第 10 天进行移栽,每盆中加入 约 150 mL 的营养土,每盆 1 株。最后用喷壶喷水 1 次,覆盖 保鲜膜。保鲜膜覆盖维持 3 d,每天定时浇 5 mL 超纯水。在 植物培养箱中全过程培养拟南芥,环境温度设定为 22 ℃, 湿度为 70%,光合有效辐射为 100  $\mu$ mol・(m<sup>2</sup>・s)<sup>-1</sup>,光照 周期为 16/8 h。

共采用 192 株拟南芥,其中 OSCA1 突变型 96 株,Col-0 野生型 96 株。通过不同的扫描速度采集高光谱图像后,对在 不同培养条件下的每株拟南芥的近红外高光谱图像进行处理 分析。

#### 1.2 拟南芥干旱胁迫处理方法

在营养土中培养拟南芥植株13d后,选择生长状态一致的拟南芥植株,以5mL超纯水为变量进行干旱处理,处理时间为:1,2,3,4和5d。以0d作为空白对照组,在生长状态下,空白对照组的拟南芥植株每天有5mL超纯水作为水分来源,实验组干旱处理期间无外加水分来源。

#### 1.3 近红外高光谱图像采集

拟南芥光谱数据的采集使用高光谱成像仪,其波长范围 是 874~1734 nm,共有 256 个波段。本研究所用系统配置有 IMSector N17E 光谱仪(Spectral imaging LTD., Oulu, Finland),两个 150 W 卤钨灯的 2900Lightsource 线光源(Illumination Technologies Inc., USA),型号为 OLES22 的 Cmount 成像镜头(Spectral imaging LTD., Oulu, Finland),型号为 IRCP0076d 的电控位移平台(Isuzu Optics Crops., Taiwan, China),高光谱成像系统采集软件(Isuzu Optics Crops, Taiwan, China)以及配套的电脑。 在 20 mm・s<sup>-1</sup>(原始扫描速度)、30 mm・s<sup>-1</sup>(1.5×原 始扫描速度)和 40 mm・s<sup>-1</sup>(2×原始扫描速度)的扫描速度 下分别获取拟南芥冠层的近红外高光谱图像,进行参考板与 暗电流校正,将校正后的近红外高光谱图像读入计算机,对 采集后的图像进行校正,校正公式为

$$\mathbf{R} = (I_{\rm raw} - I_{\rm dark}) / (I_{\rm ref} - I_{\rm dark})$$
(1)

式中: R 为校正后的图像,  $I_{raw}$  为原始图像,  $I_{dark}$  为暗电流图像,  $I_{ref}$  为参考板图像。

通过对高光谱图像分割、降噪,获取拟南芥的全部冠层,作为目标区域(region of interest, ROI),求出拟南芥冠层在 874~1733 nm 的平均光谱反射率,研究高光谱成像扫描速度对图像信息的影响。

#### 1.4 冠层含水率测量

首先,准确称量拟南芥冠层样本的质量(精度为 0.001 g),然后按照顺序放入干燥箱,温度设定为 80 ℃,干燥 20 min 后放入干燥器中静置 10 min 至室温,称取样品质量。再 将样品放入干燥箱 5 min 后冷却再次测量。重复干燥、冷却、 测量的操作,直至干燥后的样品质量恒定,取出样本后计算 冠层含水率,计算公式为

 $M(\frac{0}{0}) = (M_1 - m_0)/(M_1 - m_1)$  (2)

式中:M为冠层含水率(%), $m_1$ 为容器质量(g), $M_1$ 为烘干 前冠层样本质量和容器总重(g), $m_0$ 为烘干后冠层样本质量 和容器总重(g)<sup>[14-15]</sup>。

#### 1.5 拟南芥检测特征波段选择与建模方法

#### 1.5.1 PLSR 模型建立

偏最小二乘算法(partial least squares regression, PLSR) 将多因变量的样本映射到多自变量空间,回归建模,当变量 内部有高度线性相关性时,回归模型的准确度高<sup>[16-17]</sup>。将拟 南芥的冠层反射率原始特征数据  $X_0$  ( $N \times m$ )维和  $Y_0$  ( $N \times n$ ) 维利用主成分回归的思想进行标准化处理,得到  $E_0 =$  $(x_j)_{N \times m}$ 和 $F_0 = (y_i)_{N \times n}$ 两个标准化的矩阵。对拟南芥近红外 高光谱冠层反射率信息重新综合筛选,从中选取若干对含水 率具有最佳解释能力的成分进行回归建模。通过拉格朗日算 法逐次迭代计算,建立 PLSR 回归模型,进行含水率预测。 1.5.2 连续投影算法选择特征波长

利用拟南芥冠层近红外高光谱全波段信息进行模型训练 预测冠层含水率时,数据量大,运行速度较慢。连续投影算 法(successive projection algorithm, SPA)筛选矢量空间线性 最小化的前向变量,从光谱变量中找出冗杂信息最少的变量 组,并且该变量组内变量之间共线性最小<sup>[18]</sup>。

构造测试集矩阵的正交投影矢量,求解出最大投影至对 应的波长位置,获得降维的测试集矩阵,根据多元定量校正 模型获取 *m* 个(1≪*m*≪256)最优波长的数值。

1.5.3 模型识别效果的评判标准及数据分析软件

模型预测精度选择决定系数(determination coefficients,  $R^2$ )、均方根误差(root mean squared error, RMSE)、相对分 析误差(relative percent deviation, RPD)三个参数。 $R^2$  反映 模型建立和验证的稳定性,越接近 1,模型稳定性越好; RMSE 越小的模型预测能力越好; RPD $\geq 2$  时,模型具有极 好的预测能力。 本次数据分析的软件平台为 MATLAB R2017b(Math-Works, Inc., Natick, MA, USA)和 IBM SPSS Statistics (Version 24.0, IBM Corporation, Armonk, New York, USA)。

## 2 结果与讨论

#### 2.1 拟南芥 RGB 图像随干旱天数变化

拟南芥培养过程中对干旱胁迫的响应与拟南芥基因型、 干旱胁迫强度等因素有关。从图1中可以看出,拟南芥培养 到十叶期附近,干旱天数越长,受干旱胁迫影响越大,两种 基因型的拟南芥主侧茎受到抑制,叶面积越小。

图 1(a)为正常状态下的 Col-0 野生型拟南芥,图 1(g)为 正常状态下的 OSCA1 干旱敏感型突变体,但是无法根据肉 眼进行区分。如图 1(f)与图 1(l)比较,OSCA1 突变体拟南芥 冠层叶片呈现明显卷曲,Col-0 拟南芥卷曲程度较低。因此 Col-0 野生型与 OSCA1 突变体基因型拟南芥可以作为植物 冠层含水率预测的实验对象。



图 1 拟南芥的 RGB 图片

(a)-(f): Col-0 野生型干旱胁迫天数 0~5 d;

(g)-(l): OSCA1 突变体基因型干旱胁迫天数 0~5 d

#### Fig. 1 RGB images of Arabidopsis phenotypes

(a)—(f): Col-0 ecotype on 0~5 days of drought stress;
(g)—(1): OSCA1 mutant genotypes on 0~5 days of drought stress

#### 2.2 拟南芥冠层含水率随干旱胁迫天数变化

从图 2 拟南芥冠层含水率变化趋势中可以看出,在相同 培养条件下,Col-0 野生型拟南芥冠层含水率略高于 OSCA1 突变型拟南芥,随着干旱胁迫时间增加,拟南芥冠层含水率 降低。

OSCA1 突变型拟南芥在干旱胁迫条件下,冠层含水率 下降速度大于 Col-0 野生型拟南芥。通过样本的标准偏差分 析,在干旱胁迫 0 天的情况下,Col-0 野生型标准偏差为 0.10,OSCA1 突变型标准偏差为 0.12,在干旱胁迫 5 d 的情 况下,Col-0 野生型标准偏差为 0.86,OSCA1 突变型标准偏 差为 0.97。从中可以看出实验所用 OSCA1 突变型拟南芥的 抗旱能力低于野生型拟南芥。

在正常培养状态下,OSCA1 突变型与野生型含水率存 在差异,Duncan 检验结果显示,在空白对照组的对照下,实 验组中干旱天数为1和2d的两组拟南芥突变体与野生型含 水率显著性差异均小于0.01,对干旱胁迫程度响应并不敏 感。

#### 2.3 不同光谱预处理方法模型效果分析

原始扫描速度下, 拟南芥冠层近红外高光谱平均光谱在

930 和1400 nm 左右分别出现反射率峰值,且在这些峰值上的光谱值差异较大。在1450 nm 为O—H的伸缩振动的一级倍频,附近有明显的水分吸收谷<sup>[19]</sup>。不同干旱胁迫程度的 拟南芥近红外高光谱图像反射率曲线的吸收深度和吸收面积 不同。



图 2 拟南芥冠层含水率与干旱胁迫天数的关系

灰色为 Col-0 基因型、白色为 OSCA1 基因型;每一列数据代表着平均值±标准偏差; *p* 为 Duncan 检验的显著性; \* 代表 0.03 < *p* < 0.05, \* \* 代表 0.01 < *p* < 0.03

# Fig. 2 The relationship between water content of *Arabidopsis* thaliana and the number of days post drought stress

Gray color represents Col-1 and white color represents OSCA1; Changes are represented by the mean $\pm$  standard deviation; \* and \* \* represent the degree of significant differences based on Duncan test ( \* represents 0.03; \* \* represents 0.01<math>)



把预处理后的光谱数据作为自变量,拟南芥冠层含水率 作为因变量,建立 PLSR 模型。比较原始光谱与多元散射校 正(multiplicative scatter correction, MSC)、Savitsky-Golay、 Savitsky-Golay 对数变换三种预处理方式后 PLSR 模型的结 果,选取最佳光谱预处理方法用于后续的数据处理。MSC 预 处理方法所建立的 PLSR 模型结果最优。该方法得出的决定

表 1 不同光谱预处理方法的 PLSR 模型结果(20 mm・s<sup>-1</sup>) Table 1 The performance of PLSR model based on different spectral pretreatment methods (20 mm・s<sup>-1</sup>)

speer ar predeatment methods (20 mm 5 )				
预处理方法	None	MSC	SG	SG+log
$R_{ m C}^2$	0.920	0.921	0.915	0.914
RMSEC	0.003	0.003	0.003	0.003
$R_{ m P}^2$	0.905	0.907	0.902	0.897
RMSEP	0.003	0.003	0.003	0.003
RPD	3.05	3.28	3.19	3.12

注: R<sup>2</sup> 为决定系数; RMSE 为均方根误差; RPD 为相对分析误差; C 代表建模集; P 代表预测集; None 为原始光谱反射率; 下同。

Note:  $R^2$  is determination coefficients; RMSE is root mean squared error; RPD is relative percent deviation; C represents calibration sets; P represents prediction sets; None is the raw spectral reflectance (the same below)





# Fig. 4 PLSR model results for different moving speeds with full spectra

(a): 20 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>; (b): 30 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>; (c): 40 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>

系数 R<sup>2</sup>、相对分析误差 RPD 最大分别为 0.907 和 3.28, 证 明模型有较好的准确度和稳定性;同时原始光谱与 MSC 预 处理光谱的 RMSEP 相同,表明 MSC 预处理方法最优。

#### 基于全波段的不同扫描速度下拟南芥冠层含水率预测 模型

利用扫描速度为 20 mm·s<sup>-1</sup>的拟南芥近红外高光谱图 像计算拟南芥冠层的平均反射率,将经过 MSC 预处理后全 波段下的平均冠层反射率作为输入变量,利用 PLSR 算法建 立冠层含水率预测模型。后改变扫描速度为 30 和 40 mm· s<sup>-1</sup>,同样采用 PLSR 算法建立冠层含水率预测模型,可以发 现,随着扫描速度的增加,高光谱图像的空间分辨率降低, 冠层含水率预测模型的准确度略有下降,扫描速度从 20 mm·s<sup>-1</sup>提升到 30 mm·s<sup>-1</sup>,预测模型决定系数  $R^2$  下降 0.88%,相对分析误差 RPD 下降 4.3%;扫描速度提升到 40 mm·s<sup>-1</sup>的情况下,预测模型  $R^2$  下降 2.3%,相对分析误差 RPD 下降 6.9%。综合考虑效率和准确度,选择 30 mm·s<sup>-1</sup> 扫描速度进行拟南芥冠层含水率预测效果最佳。

如图 5 所示, 1.5×原始扫描速度下的近红外高光谱图 片的空间维度分辨率为原始扫描速度的 66%, 2×原始扫描 速度的近红外高光谱图像的空间维度分辨率为 1×原始扫描 速度的 44.75%。三种扫描速度情况下, PLSR 冠层含水率预 测模型的 RPD≥2,证明模型始终有较好的预测能力。但利 用全波段信息建立的冠层含水率预测模型 1.5×原始扫描速 度的冠层含水率预测模型准确度降低 0.94%,小于 1%,因 此利用近红外光谱预测植物冠层含水率时,适当提高扫描速 度,能够显著加快信息处理速度。



(a): 20 mm • s<sup>-1</sup>; (b): 30 mm • s<sup>-1</sup>; (c): 40 mm • s<sup>-1</sup> Fig. 5 The variation of spatial resolution caused by different scanning speeds

(a): 20 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>; (b): 30 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>; (c): 40 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>

## 2.5 基于特征波长的不同扫描速度下拟南芥冠层含水率预 测模型

利用连续投影算法,从基于 MSC 预处理后的不同扫描 速度的全波段冠层反射率数据中,筛选出最优波长数据,将 最优波长下的拟南芥冠层反射率数据作为输入变量,建立冠 层含水率预测模型。

从图 6 结果中可以发现基于最优特征波长建立的 PLSR 拟南芥冠层含水率预测模型中,20 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>扫描速度预测 准确度  $R^2$  为 0. 847, 30 和 40 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>扫描速度的准确度与 原始扫描速度相比,分别下降 5.0%和 13.3%。SPA 筛选最 优特征波长,只能保证高光谱图像中的部分关键信息不丢 失,三种扫描速度的拟南芥冠层含水率预测模型准确率与全 波段情况下的预测模型准确率相比分别下降了 7.1%, 10.9%和 17.5%,在 SPA 方法中,只用了极少数的变量来 建模,所以建立的 PLSR 模型精度均低于全波长冠层含水率 模型。

## 表 2 不同扫描速度下连续投影算法的近红外高光谱图像的 最优特征波长

 
 Table 2
 The summary of optimal wavelengths based on Successive projection algorithm (SPA)

扫描速度 /(mm•s <sup>-1</sup> )	最优特征波长/nm			
20	901. 23, 904. 58, 907. 93, 917. 99, 928. 05, 944. 82, 951. 53, 975. 01, 1 042. 16, 1 237. 22, 1 338. 32, 1 372. 05, 1 402. 42, 1 429. 42, 1 476. 71, 1 567. 98, 1 652. 59, 1 669. 52, 1 679. 68, 1 686. 46, 1 689. 85, 1 700. 01, 1 703. 40			
30	901.22,904.58,928.05,968.30,1 190.09, 1 334.95,1 453.06,1 503.74,1 564.60, 1 652.59,1 669.52,1 693.24			
40	901. 22, 911. 28, 917. 99, 928. 05, 1 200. 19, 1 240. 59, 1 338. 32, 1 372. 05, 1 409. 17, 1 513. 88, 1 574. 74, 1 659. 36, 1 672. 91, 1 683. 07, 1 700. 01			

## 3 结 论

探讨了高光谱成像扫描速度对拟南芥冠层含水率测定的 影响。建立全波长和特征波长情况下,拟南芥冠层近红外高 光谱平均反射率与含水率之间关系的 PLSR 模型。在全波长 情况下,20 mm・s<sup>-1</sup>扫描速度时,拟南芥冠层含水率预测集  $R^{3}$ 为0.907,RMSEP为0.003,RPD为3.283;扫描速度提 高1.5倍, $R^{3}$ 为0.899,RMSEP为0.003,RPD为3.142, 拟南芥冠层含水率模型预测准确度降低0.88%;扫描速度提 高2倍时,模型准确度降低2.3%。在特征波长下,20 mm・ s<sup>-1</sup>扫描速度时,拟南芥冠层含水率预测集 $R^{3}$ 为0.843, RMSEP为0.001,RPD为2.558;扫描速度提高1.5倍, $R^{3}$ 为0.801,RMSEP为0.005,RPD为2.242,拟南芥冠层含 水率模型预测准确度降低5.0%;扫描速度提高至2倍时, 模型准确度降低13.3%。由上述结果分析得到,当高光谱成

#### References

- [1] WENG Hai-yong, CEN Hai-yan, HE Yong(翁海勇, 岑海燕, 何 勇). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(1), 235.
- [2] Rymaszewski W, Dauzat M, Bediee A, et al. Bio-Protocol, 2018, 8(4): e2739.
- [3] ZHAO Jing, HUANG Cao-jun, LI Bo-shi(赵 晶,黄操军,李博识). Agricultural Technology and Information(农业科技与信息), 2018, (16): 46.

![](_page_4_Figure_12.jpeg)

Fig. 6 The performance of PLSR models of different scanning speed based on optimal wavelengths

(a): 20 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>; (b): 30 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>; (c): 40 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>

像扫描速度提高时,图像的空间分辨率降低,数据处理时间 减少,实际应用环节的图像采集效率提高。全波段拟南芥高 光谱冠层平均反射光谱预测效果中和 RPD 均高于连续投影 筛选出最优特征波长后的模型预测效果。当高光谱成像扫描 速度增加 50%时,PLSR 模型预测拟南芥冠层含水率降低 0.88%,小于1%,说明提高近红外光光谱图像扫描速度,能 够在保证准确率的前提下,提高效率。因此研究高光谱成像 扫描速度对植物冠层含水率快速检测有重要的意义。基于高 光谱成像技术的 PLSR 模型能够实现较好的含水率预测效果。

- [4] SONG Zhen, JI Chang-ying, ZHANG Bo(宋 镇, 姬长英, 张 波). Jiangsu Journal of Agricultural Sciences(江苏农业学报), 2019, 35 (2): 436.
- [5] ZHANG Ya-wei, WANG Shu-mao, CHEN Du, et al(张亚伟, 王书茂, 陈 度, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2017, 48(OS1): 118.
- [6] Ariana D P, Lu R. Journal of Food Engineering, 2010, 96: 583.
- [7] ZHANG Hai-liang, GAO Jun-feng, HE Yong(章海亮,高俊峰,何 勇). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery (农业机械学报), 2013, 44(9): 177.
- [8] ZHOU Zhu, LI Xiao-yu, TAO Hai-long, et al(周 竹,李小昱,陶海龙,等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2012, 28(21), 221.
- [9] Röemer C, Wahabzada M, Ballvora A, et al. Functional Plant Biology, 2012, 39: 878.
- [10] Ge Y, Bai G, Stoerger V, et al. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 625.
- [11] Pandey P, Ge Y, Stoerger V, et al. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1348.
- [12] Kim D M, Zhang H, Zhou H, et al. Scientific Reports, 2015, 5: 15919.
- [13] Yuan F, Yang H M, Xue Y, et al. Nature, 2014, 514(7522): 367.
- [14] Leone A P, Viscarra-Rossel R A, Amenta P, et al. Current Analytical Chemistry, 2012, 8: 283.
- [15] Bilgili A V, van Es H M, Akbas F, et al. Journal of Arid Environments, 2010, 74: 229.
- [16] Helland I S, Sæbø S, Almøy T, et al. Journal of Chemometrics, 2018, 32(9): e3044.
- [17] Sutton M, Thiébaut R, Liquet B. Statistics in Medicine, 2018, 37: 3338.
- [18] ZHANG Chu, LIU Fei, KONG Wen-wen, et al(张 初,刘 飞,孔汶汶,等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2013, 29(20), 270.
- [19] ZHOU Zhu, YIN Jian-xin, ZHOU Su-yin, et al(周 竹, 尹建新, 周素茵, 等). Laser & Optoelectronics(激光与光电子学进展), 2017, 54(2): 311.

## Effect of Near Infrared Hyperspectral Imaging Scanning Speed on Prediction of Water Content in Arabidopsis

LÜ Meng-qi<sup>1</sup>, SONG Yu-jie<sup>4</sup>, WENG Hai-yong<sup>1,3</sup>, SUN Da-wei<sup>1,3</sup>, DONG Xiao-ya<sup>2</sup>, FANG Hui<sup>1,3</sup>, CEN Hai-yan<sup>1,3</sup>\*

- 1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China
- 2. School of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China
- 3. Key Laboratory of Spectroscopy Sensing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou 310058, China

4. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract Hyperspectral imaging technology can non-destructively detect physicochemical information of plants with different dimensions. Existing researches often focus on analyzing the average spectrum of hyperspectral images, ignoring the information of their spatial dimensions. In this study, the model plant Arabidopsis thaliana was used as the research object to explore the influence of spatial resolution difference caused by different scanning speeds of hyperspectral imaging on the measurement of plant canopy moisture content, and to provide optimization for rapid online detection of plant canopy moisture content by hyperspectral imaging program. An open-line hyperspectral image of the Arabidopsis canopy was extracted using an indoor online hyperspectral imaging system at 20, 30 and 40 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>, and the average of the Arabidopsis thaliana canopy reflectance spectrum was extracted. Secondly, the quantitative analysis model of canopy water content and the average reflectance spectrum of Arabidopsis thaliana was established by Partial Least Squares Regression (PLSR). The determination coefficient ( $R^2$ ), root mean square error (root), mean squared error (RMSE) and relative variance deviation (RPD) were used to evaluate the model. The PLSR model based on pre-processing spectra such as the original spectrum, Multiplicative Scatter Correction (MSC) algorithm and Savitsky-Golay smoothing algorithm is compared. The best spectral pre-processing method is selected for subsequent data processing. Finally, the successive projections algorithm (SPA) is used to analyze and compare the prediction accuracy based on the optimal feature wavelength and the full wavelength, and to determine the influence of the hyperspectral image scanning speed on the canopy water content prediction of Arabidopsis thaliana. The results show that when the scanning speed was increased from 20 to 30 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>, the full-band PLSR model based on MSC pretreatment predicted that the coefficient of canopy moisture content in Arabidopsis was reduced by 0.88%, less than 1%. When the scanning speed was increased from 20 to 40 mm  $\cdot$  s<sup>-1</sup>, the coefficient of determination of canopy water content in Arabidopsis was reduced by 2.3%. It shows that while the scanning speed is properly increased, the high water content prediction accuracy of the plant canopy can be ensured. Changing the hyperspectral scanning speed can more effectively utilize the spatial information of the hyperspectral image space. After the scanning speed is appropriately increased, the spatial dimension information of the hyperspectral image changes, improving the image collection efficiency of the actual production application and reducing the data processing time.

Keywords Arabidopsis thaliana; Canopy moisture content; Near-infrared hyperspectral imaging; Scanning speed; SPA; PLSR

(Received Oct. 8, 2019; accepued Feb. 12, 2020)

\* Corresponding author