

高光谱定量反演火龙果茎枝叶绿素含量的研究

李莉婕^{1,2}, 岳延滨², 王延仓³, 赵泽英², 黎瑞君², 聂克艳², 袁玲^{1*}

1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716
2. 贵州省农业科学院科技信息研究所, 贵州 贵阳 550006
3. 北华航天工业学院, 河北 廊坊 065000

摘要 火龙果是近年来引进我国的营养价值高、经济效益好的新型水果, 肉质茎枝是其主要光合器官, 与常见果树具有较大差异。为探索以茎枝为光合作用器官的植被的光谱特征及其生化组分的估测方法, 以火龙果为研究对象, 在贵州省典型种植区罗甸县开展了4个氮肥梯度田间试验, 同步测定不同养分丰缺程度下的火龙果茎枝高光谱和相应叶绿素含量数据; 然后分析火龙果茎枝光谱数据的演化规律, 并采用数学变换、连续小波变换算法并结合相关性分析算法处理分析火龙果茎枝光谱数据, 提取并筛选特征波段; 最后利用偏最小二乘算法构建火龙果茎枝叶绿素含量估测模型。研究结果表明: (1) 火龙果肉质茎枝的原始光谱曲线整体趋势与常见绿叶植物相似, 但随施氮量的增加, 火龙果近红外处的光谱反射率逐渐降低, 变化趋势与常见绿叶植物相反, 茎枝光谱的吸收峰(谷)随施氮量的增加呈升高(加深)的趋势。(2) 数学变换中的一阶微分与在 L_1-L_5 尺度内的连续小波变换能有效提升光谱对叶绿素含量的敏感性, 火龙果茎枝原始光谱与叶绿素含量的敏感区域主要位于730~1400 nm, 数学变换与连续小波变换均能提升光谱对叶绿素含量的敏感性。与常见绿叶植物相比, 火龙果茎枝敏感波段分布相对分散, 且多位于730 nm附近与近红外区域(1100~1600 nm)。(3) 数学变换和连续小波变换能明显提升光谱对火龙果茎枝叶绿素含量的估测能力, 其中基于一阶微分的估测模型与基于连续小波变换 L_1 与 L_4 的估测模型分别为数学变换与连续小波变换的最优模型, 其验证精度分别为 $R_{验证}^2 = 0.625$, $RMSE = 0.048$, $RPD = 1.238$ (一阶微分); $R_{验证}^2 = 0.678$, $RMSE = 0.037$, $RPD = 1.652$ (连续小波变换); 表明高光谱技术可以作为火龙果茎枝叶绿素含量和营养诊断的无损检测手段。该研究为完善不同植被类型基于高光谱指数的叶绿素反演提供了补充。

关键词 火龙果; 叶绿素含量; 高光谱; 数学变换; 偏最小二乘

中图分类号: S667.9 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)11-3538-07

引言

位于植物表层的叶绿素在捕获、转化光能中承担着重要作用, 其含量高低直接影响着植物的正常生长、发育, 且叶绿素浓度与植物氮的供给密切相关, 因此, 叶绿素含量的高低是评价植物生长状况的重要指标之一。采用叶片物理模型开展光与叶片理化组分作用机理, 可以为叶片叶绿素含量的精准诊断提供理论支撑^[1]。目前研究多利用数学变换、小波变换处理分析叶片光谱, 或统计分析红边位置、吸收峰深度等光谱特征参量, 或构建新型植被指数, 并结合相关分析法提取敏感参量筛选, 以提高光谱对叶绿素含量的敏感

性^[2-3]。在模型构建算法中, 随机森林、偏最小二乘算法(partial least squares regression, PLS)和支持向量机等算法常用于叶片生化参量诊断模型的构建^[4]; 利用植被多光谱、高光谱成像技术分析叶绿素在植株中的空间分布已取得一定的研究成果, 采用高光谱技术反演植物叶片生化组分的研究偏多, 少见针对以茎枝进行光合作用的植被光谱特性的研究, 因此开展茎枝植被研究对于完善不同类型植被基于高光谱指数的叶绿素反演具有重要意义。

火龙果为仙人掌科(Cactaceae)量天尺属(*Hylocereus*)攀援性植物, 是一种通过肉质茎枝进行光合作用的热带水果, 叶片退化为刺, 茎枝表皮和皮层均具有完整的叶绿体结构^[5]。火龙果于20世纪90年代初引入我国后在西南地区种

收稿日期: 2021-05-25, 修订日期: 2021-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31460319), 贵州省科技计划项目(黔科合服企[2021]15号)资助

作者简介: 李莉婕, 1979年生, 西南大学资源环境学院博士研究生, 副研究员 e-mail: 32051185@qq.com

* 通讯作者 e-mail: lingyuanh@aliyun.com

植面积扩展迅速, 贵州为主要产区之一。火龙果生长快, 栽植一年后即可开始投产, 在贵州主要种植在低海拔富热区的荒地, 因其耐旱耐瘠、经济价值高, 已成为当地脱贫致富的重要产业支撑。火龙果成龄树年产量 $37\ 500\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上, 其中通过果实吸收的纯氮量达 $84.38\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 充足的氮素供应是保证其高产稳产的重要因子^[6]。实时、动态监测火龙果茎枝叶绿素含量的变化, 对于田间火龙果的氮素营养诊断与施肥决策具有重要作用。遥感技术是开展区域尺度地物信息监测的最前沿手段, 为研究火龙果无损营养诊断技术, 弥补针对茎枝植被研究的不足, 分析火龙果茎枝光谱特性, 研究其叶绿素含量的估测方法, 以不同供氮水平下实测高光谱数据及叶绿素含量为数据源, 采用数学变换、二进制小波变换处理分析光谱数据, 并利用 PLS 构建火龙果叶绿素含量估测模型, 以期为火龙果植株叶绿素含量的精准监测提供基础支撑。

1 实验部分

1.1 试验概况

为更好地分析火龙果茎枝光谱特性及其叶绿素含量的监测方法, 以田间试验观测数据为数据源。试验在赤水河流域贵州省罗甸县龙坪镇烟山火龙果种植基地开展。试验区海拔 $473\ \text{m}$, 年降雨量 $1\ 176.8\ \text{mm}$, 月均温 $19.6\ ^\circ\text{C}$, 无霜期 $335\ \text{d}$, 年日照 $1\ 509.3\ \text{h}$, 总辐射 $4\ 307.394\ \text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 年积温 $7\ 162.2\ ^\circ\text{C}$, $\geq 10\ ^\circ\text{C}$ 积温 $6\ 260.9\ ^\circ\text{C}$ 。供试土壤为当地典型的砂质风化红壤, pH 值 7.37 , 有机质 $23.98\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.51\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $119.0\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $146.1\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $52.0\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

供试火龙果品种为紫红龙 (*Hylocereus polyrhizus*, Zihonglong), 采用柱式栽培, 以水泥柱和水泥盘为支撑, 水泥柱长 \times 宽 \times 高为 $0.1\ \text{m} \times 0.1\ \text{m} \times 2\ \text{m}$, 水泥柱底部入土 $50\ \text{cm}$, 柱顶加盖直径为 $0.5\ \text{m}$ 的水泥圈。在每桩水泥柱周围种植 3 株火龙果苗并绑缚主茎顺柱向上生长, 分枝穿过水泥圈后继续延伸生长至老熟下垂。2012 年栽植, 2013 年开始挂

果, 试验期间处于盛果期。设 4 个氮素水平, 分别为: N_0 (纯氮 $0\ \text{g} \cdot \text{桩}^{-1}$)、 N_1 (纯氮 $100\ \text{g} \cdot \text{桩}^{-1}$)、 N_2 (纯氮 $200\ \text{g} \cdot \text{桩}^{-1}$) 和 N_3 (纯氮 $300\ \text{g} \cdot \text{桩}^{-1}$)。以有机肥 (腐熟羊粪, N, P_2O_5 , K_2O 分别为 0.65% , 0.5% 和 0.3% , $15\ \text{kg} \cdot \text{桩}^{-1}$) 和磷肥 (过磷酸钙, P_2O_5 12% , $0.33\ \text{kg} \cdot \text{桩}^{-1}$) 做基肥, 于 2 月初开挖弧形沟 (深 $20\ \text{cm}$), 将基肥施入土壤, 混匀后覆土; 氮肥 (尿素, 含 N 46.4%) 钾肥 (硫酸钾, 含 K_2O 50% , $0.60\ \text{kg} \cdot \text{桩}^{-1}$) 全部作追肥, 分 3 次施用 (按总用量的 40% , 30% 和 30% 于 5 月初、7 月中旬和 9 月中旬施入土壤)。每个处理 3 次重复, 共 12 个小区, 共计 72 桩 (216 株) 火龙果。其他田间管理措施同常规栽培。

1.2 样本采集

选用火龙果一年生成熟枝条为研究对象, 首先对目标茎枝进行光谱测量, 然后在光谱测定部位快速剪取表皮和皮层组织, 采用乙醇浸提法测定叶绿素含量^[7], 其统计量如表 1 所示。

表 1 火龙果茎枝的叶绿素含量的统计性描述

Table 1 The statistical description of chlorophyll contents of *Hylocereus polyrhizus* branches

Statistic	Number	Minimum	Maximum	Mean	Standard deviation
CHL/%	96	0.041	0.359	0.161	0.060

1.3 光谱测量

用便携式地物光谱仪 (ASD Fieldspec[®] 3, USA), 测定 $350\sim 2\ 500\ \text{nm}$ 范围内的反射光谱。由于试验区大气湿度偏高, 易对光谱测定产生负面影响, 为避免外界不可控因子的干扰, 提升光谱数据信噪比, 使测定的光谱能客观反映火龙果茎枝信息, 选用 ASD 提供的卤光灯作为光源, 在火龙果采收末期, 选择各处理健壮枝条中部部位, 将探头垂直对准茎枝生长在光下的棱面进行光谱测量 (图 1), 每次光谱测定前均采用标准白板校正, 同一目标物观测 3 次, 取其平均值作为最终光谱, 共计测量样品 96 个。



图 1 火龙果茎枝光谱测量方法

Fig. 1 Spectral measurement of *Hylocereus polyrhizus* branch

1.4 光谱数据的处理

火龙果茎枝光谱测定后, 先利用长度为 9 的海明窗低通

滤波器对光谱数据进行平滑、去噪处理, 以削弱高频噪声对火龙果茎枝光谱的影响; 然后利用一阶微分 (R')、倒数变换

($1/R$)、对数变换($\text{Log}(R)$)、倒数的一阶微分($(1/R)'$)、对数的一阶微分($(\text{Log}(R))'$)等数学变换和连续小波变换^[8]两类变换方法对光谱数据进行处理,以分析两类光谱变换方法在提升光谱对火龙果茎枝叶绿素含量敏感性方面的作用。

1.5 模型精度验证

火龙果茎枝光谱进行数学变换与连续小波处理后,利用 PLS 构建火龙果茎枝叶绿素含量诊断模型。采用随机方法将样本分为 2 组:建模组(64 份)、验证组(32 份),其中建模组用于诊断模型的构建,验证组用于检验模型的预测精度。为客观对所建模型进行评价,共采用 3 类指标进行评价,即决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)及剩余预测残差(RPD),其计算方法如式(1)~式(4)所示

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\text{CHL}_i - \text{CHLP}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\text{CHL}_i - \overline{\text{CHL}})^2} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{CHL}_i - \text{HCLP}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$\text{RPD} = \frac{\text{SD}}{\text{RMSE}} \quad (3)$$

其中

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{CHL}_i - \overline{\text{CHL}})^2}{n}} \quad (4)$$

式中,CHL 为火龙果茎枝实测叶绿素含量,CHLP 为基于茎

枝叶绿素含量诊断模型的预测值, $\overline{\text{CHL}}$ 为茎枝实测叶绿素含量的均值。

2 结果与讨论

2.1 火龙果茎枝光谱特征分析

图 2 是不同施氮水平下的火龙果茎枝光谱[图 2(a)]及其吸收峰深度[图 2(b)]图。由图 2(a)可知,在 410~2 500 nm 区间,火龙果茎枝光谱曲线整体趋势与绿色叶片光谱相近,但茎枝曲线整体随施氮量的增加而呈逐步降低的趋势,这与常规绿叶植物相关研究结论存在差异,其中 350~750 nm 光谱反射率逐步降低的主要原因应为施氮量的增加有助于火龙果茎枝叶绿素含量的提升,进而增强了可见光区域的吸收作用。810~2 350 nm 降低的原因可能是火龙果茎枝表层的叶绿素是火龙果植株获取能量的主要形式,火龙果茎枝呈肥厚肉质状,含有发达的储水组织,叶绿素含量的增加有助于火龙果茎枝的生长和储水量的提升,增强了其对近红外区域的吸收作用。由图 2(b)可知,位于 410~2 350 nm 的主要吸收峰随氮素供应水平的增加而增高,即位于原光谱的吸收谷随施氮量的增加而逐步加深,究其原因是茎枝叶绿素含量与茎枝内储水组织的增加增强了茎枝对光谱的吸收作用。综上可知,火龙果茎枝光谱整体上与常规植物叶片相似,但在近红外处,其随施氮量的变化规律与常见植株绿色叶片变化趋势相反;火龙果茎枝光谱的吸收峰(谷)随施氮量的增加而呈升高(加深)的趋势。

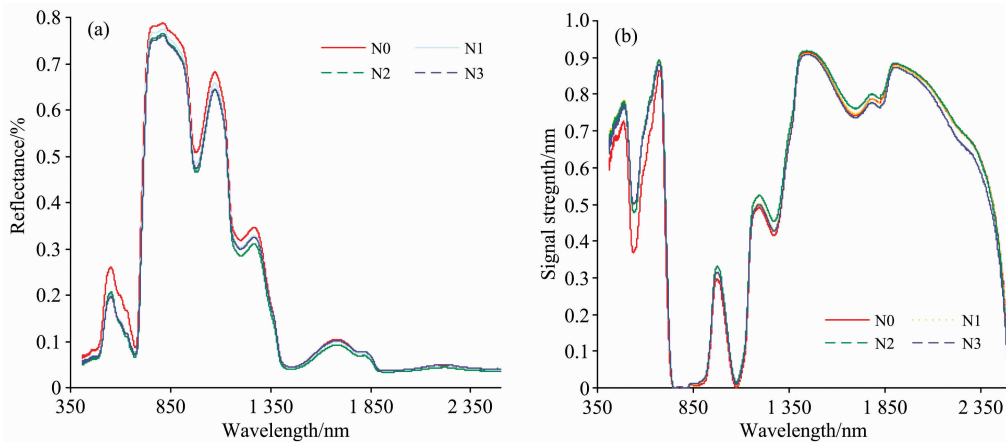


图 2 不同施氮水平下的火龙果茎枝光谱曲线(a)及吸收峰深度(b)

Fig. 2 Reflectance spectra (a) and absorption peak depth (b) of stems of *Hylocereus polyrhizus* under different nitrogen levels

2.2 相关性分析

经数学变换、小波变换后,火龙果茎枝光谱与相应叶绿素含量的决定系数矩阵(R^2)如图 3 所示。由图 3 可知,原光谱与火龙果茎枝叶绿素含量的敏感区域主要位于 730~1 400 nm,这与常见绿叶植物叶绿素含量的敏感波段为红、绿波段结论不同。数学变换与连续小波变换均能明显提升光谱对叶绿素含量的敏感性,且连续小波变换提升精度更高,表明连续小波变换更能有效挖掘原光谱内的可用信息。在 L_1 — L_{10} 尺度内,敏感波段在 L_1 — L_5 尺度内的波段位置相对稳定,

主要位于 730 nm 附近与近红外(1 100~1 600 nm)内,这与常见植物叶片叶绿素含量的敏感波段分布存在较大差异;随分解尺度的提升,敏感波段在 L_6 — L_{10} 尺度内的波段位置逐步向短波、长波方向移动,其中 730 nm 附近的敏感波段随分解尺度的提升逐步分别向短波、长波方向移动,近红外区域则主要向长波方向移动。在 5 类数学变换中,倒数变换($1/R$)、对数变换($\text{Log}(R)$)与原光谱的敏感区域相一致,一阶微分(R')、倒数的微分($(1/R)'$)、对数的微分($(\text{Log}(R))'$)则与原始光谱的敏感区域相差较大,其中,一阶微分能明显提

升光谱对叶绿素含量的敏感性,且敏感区域与连续小波变换 L_1-L_5 尺度的敏感区域大体一致。综上可知,光谱变换方法均能明显提升光谱对叶绿素含量的敏感性;与常见植株叶片

叶绿素含量的敏感波段相比,火龙果茎枝叶绿素含量的敏感波段分布相对分散,主要位于 730 nm、近红外区域。

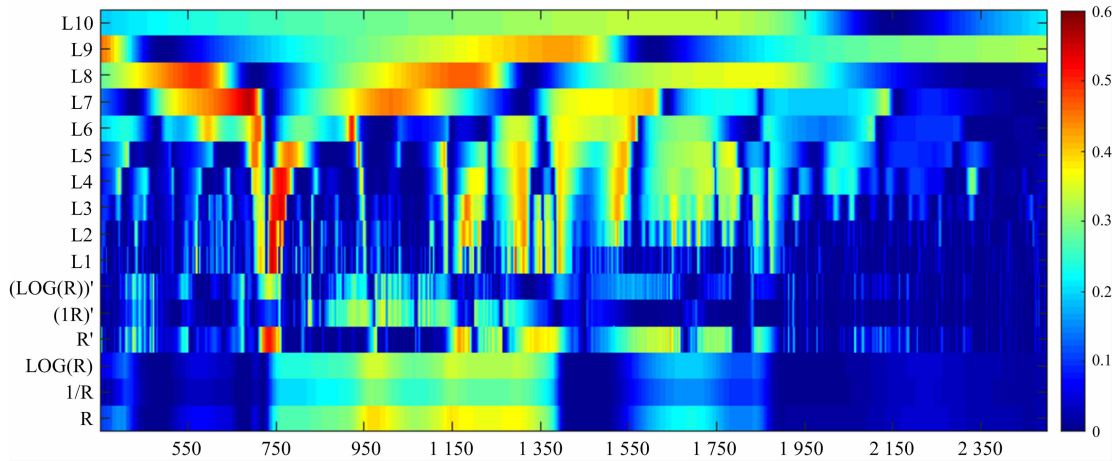


图 3 光谱与叶绿素含量的决定系数矩阵图

Fig. 3 Matrix of determination coefficient of spectrum and chlorophyll content

2.3 构建火龙果茎枝叶绿素含量的估测模型

基于数学变换构建的火龙果茎枝叶绿素含量估测模型如表 2 所示,基于一阶微分、对数的微分分别构建的火龙果茎枝叶绿素含量估测模型的建模精度与预测精度均优于原始光谱,表明一阶微分、对数的微分可明显提升光谱对火龙果茎枝叶绿素含量的估测能力;以一阶微分构建的模型的建模精度与预测精度均最高且稳定性较好,对数的微分次之,其中一阶微分变换估测模型的验证精度的 $R_{验证}^2 = 0.625$, $RMSE = 0.048$, $RPD = 1.238$,其散点图如图 4 所示;入选模型的特征波段中,位于近红外区域的特征波段明显偏多,而位于

可见光区域的则较少,其中精度较高的估测模型(一阶微分、对数的微分)的入选波段多位于近红外区域,这与常见植株叶片叶绿素估测结论存在明显差异,究其原因主要是火龙果为仙人掌科植被,其茎枝既是光合色素固定、转化光能的主要场所,又是水分存储的主要组织并且存储叶绿体的组织与储水组织紧密相连;水分及储水组织对火龙果茎枝光谱产生重要作用,尤其是近红外区域。综上可知,数学变换有助于提升光谱对火龙果茎枝的估测能力,其中一阶微分、对数的微分变换的提升效果明显;模型的入选波段主要位于近红外区域,这与常见植物叶片叶绿素含量估测研究结论存在差异。

表 2 基于数学变换火龙果茎枝叶绿素含量估测模型列表

Table 2 The list of estimation models for chlorophyll content of *Hylocereus polyrhizus* stem based on mathematical transformation

变换形式	波段	模型	建模		验证		
			$R_{建模}^2$	RMSE	$R_{验证}^2$	RMSE	RPD
R	969, 1 000	$Y = 0.079 + 7.046X_{969} - 6.560X_{1000}$	0.509	0.4	0.382	0.052	1.074
R'	735, 1 645	$Y = 2.572.400X_{735} + 74.903.5X_{1645}$	0.609	0.036	0.625	0.048	1.238
Log(R)	969, 1 000	$Y = 0.094 + 4.204X_{969} - 4.134X_{1000}$	0.491	0.041	0.383	0.054	1.033
Log(R)'	673, 756, 996	$Y = 0.300 + 1.342.700X_{673} + 5.344.200X_{756} - 12.163.4X_{996}$	0.601	0.036	0.630	0.07	0.874
1/R	969, 1 000	$Y = 0.230 - 0.023X_{969} + 0.023X_{1000}$	0.455	0.042	0.272	0.057	0.98
(1/R)'	996, 1 074	$Y = 0.320 + 31.427X_{996} - 96.869X_{1074}$	0.445	0.043	0.269	0.058	0.989

基于连续小波变换构建的火龙果茎枝叶绿素含量估测模型结果如表 3 所示,除 H_9 和 H_{10} 构建的模型外,基于连续小波变换构建的火龙果茎枝叶绿素含量估测模型的精度明显高于原光谱,这表明连续小波变换能明显提升光谱对火龙果茎枝叶绿素含量的估测能力;基于连续小波变换构建的模型的建模精度表现出随分解水平的增加而持续降低的规律,而模型的估测精度则整体上先降后升再降。模型的估测精度与建模精度相差不大,稳定性相对较高,其中基于 L_1 与 L_4 构建

的模型建模精度与估测精度相对较高,为最优模型,其估测精度的 $R_{验证}^2 = 0.678$, $RMSE = 0.037$, $RPD = 1.652$,其散点图如图 5 所示,表明连续小波变换在估测火龙果茎枝叶绿素含量方面具有较强的稳定性。对模型的入选波段分析可知,位于 730 nm 附近区域与近红外区域的特征波段明显偏多,而位于可见光区域的波段则明显偏少,这与常见植株叶片叶绿素估测相关研究结论存在明显差异。综上可知,入选模型的特征波段多位于近红外区域这与叶片相关研究存在明显差

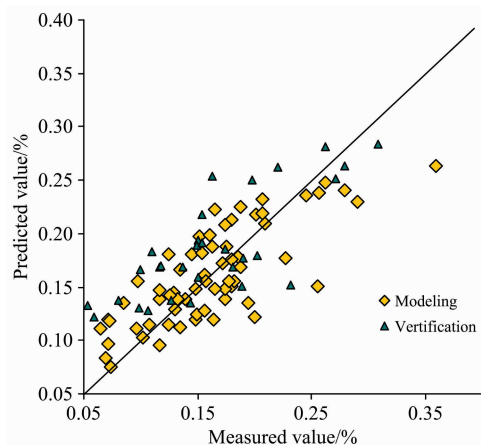


图 4 基于一阶微分变换的实测值与预测值的散点图

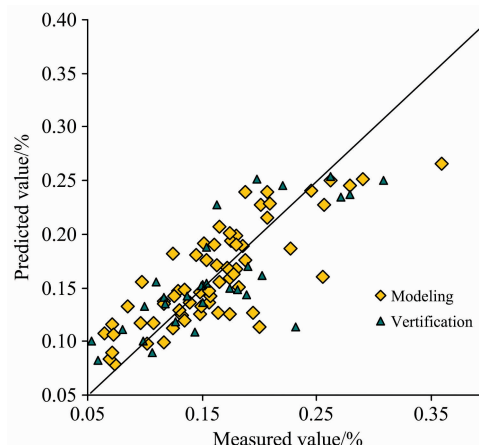


图 5 基于连续小波变换的实测值与预测值的散点图

Fig. 4 Scatter plot of measured and predicted values based on first order differential transformation

Fig. 5 Scatter plot of measured and predicted values based on continuous wavelet transform

表 3 基于连续小波火龙果茎枝叶绿素含量估测模型列表

Table 3 The estimation model list of chlorophyll content in *Hylocereus polyrhizus* stem based on binary wavelet

变换形式	波段	模型	建模		验证		
			$R^2_{建模}$	RMSE	$R^2_{验证}$	RMSE	RPD
R	969, 1 000	$Y=0.079+7.046X_{969}-6.560X_{1000}$	0.509	0.40	0.382	0.052	1.074
H ₁	740, 830	$Y=0.098+21.110X_{740}-123.046X_{830}$	0.654	0.034	0.626	0.056	0.991
H ₂	742, 1 312	$Y=-0.059+4.001X_{742}+31.806X_{1312}$	0.657	0.034	0.639	0.040	1.336
H ₃	761, 1 311	$Y=-0.012+1.883X_{761}+5.434X_{1311}$	0.629	0.035	0.628	0.040	1.317
H ₄	761, 1 134	$Y=-0.026+0.353X_{761}+0.975X_{1134}$	0.621	0.035	0.609	0.041	1.284
H ₅	702, 1 131	$Y=-0.047-0.1180X_{702}+0.656X_{1131}$	0.590	0.037	0.579	0.043	1.237
H ₆	587, 1 561	$Y=-0.059-0.122X_{587}-1.847X_{1561}$	0.584	0.037	0.624	0.041	1.300
H ₇	688, 1 595	$Y=-0.017-0.116X_{688}-0.168X_{1595}$	0.609	0.036	0.677	0.038	1.409
H ₈	568, 1 206	$Y=-0.006-0.052X_{568}+0.035X_{1206}$	0.529	0.039	0.691	0.038	1.392
H ₉	358, 1 198	$Y=-0.038-0.091X_{358}+0.011X_{1198}$	0.479	0.041	0.609	0.042	1.254
H ₁₀	1 594, 1 742	$Y=-0.092+0.019X_{1594}+0.031X_{1742}$	0.336	0.047	0.202	0.060	0.887
ALL	L ₁ -740, L ₁ -1 347, L ₁ -698	$Y=-0.075+58.988X_{L_1-740}-243.373X_{L_1-1347}+0.596X_{L_1-698}$	0.752	0.029	0.678	0.037	1.652

异；基于连续小波变换构建的火龙果茎枝叶绿素含量估测模型的估测精度与稳定性均较好，是估测火龙果茎枝叶绿素含量的有效方法。

火龙果植株形态结构有别于传统果树，叶片退化为刺，茎由复表皮、饱含大量粘液的薄壁细胞的皮层和维管组织组成^[5]，肉质茎组织结构承担了更多功能（光合作用、储水作用等）^[9]，这些特点使肉质茎的光谱特征、理化组分估测与常见绿叶类植物存在较大差异。植株氮含量和叶绿素浓度有很强的相关性，通过对叶绿素含量的无损监测可以间接反映火龙果植株的氮素含量，为其无损营养诊断和精准施肥提供支撑。然而由于火龙果茎上下表面间肉质部分厚度可达 10 mm 以上，SPAD 叶绿素速测仪等常用的无损快速检测叶绿素的仪器发射的光线不能穿透肉质茎，在火龙果植株上无法使用。本研究表明，不同供氮水平下火龙果肉质茎的光谱曲线特征差异明显，受肉质茎储水作用的影响，在近红外区域光谱特征与绿叶植物表现出不同的趋势。

与常见植物叶片生化成分不同，火龙果茎富含多糖、多酚、次生代谢物等成分，但叶绿素含量相对低于其他植物^[10]；梭梭、多枝柽柳同化枝叶绿素的光谱响应特征均与阔叶植物有所差异^[11-12]。从火龙果光谱与叶绿素含量的敏感性进行分析可知，与茎枝叶绿素含量敏感性较强的波段多位于 730 nm 与近红外处，而常见植物叶片叶绿素含量的敏感波段则多分布在蓝、红等可见光区域^[13]，二者存在明显差异，进而导致入选的叶绿素含量估测模型的特征波段也存在差异。从光谱变换技术分析可知：与数学变换相比，小波变换能明显提升光谱对火龙果肉质茎枝叶绿素含量的敏感性，且基于小波变换构建的模型稳定性较高，究其原因主要是小波变换是按信号变异频率对光谱信息进行分离，其较强的吸收特征易被分解到不同尺度内，有利于有效光谱信息的分离，进而有利于提升光谱对火龙果茎枝叶绿素含量的敏感性。

尽管本研究在一定程度上弥补了高光谱在肉质茎生化组分诊断方面的不足，但仍存在以下局限：（1）研究以单茎枝

为研究对象,未开展冠层尺度下火龙果植株叶绿素含量估测研究,而冠层尺度的研究可为区域尺度检测提供基础理论与技术。(2)本研究选用茎枝关键部位进行样本、数据的采集,实验数据是点数据,而以面为单元的茎枝叶绿素含量的精准诊断更能反映火龙果生长发育的状况。因此,仍需继续开展深入研究,今后将进一步使用更多来自不同月龄和不同品种或区域的茎枝光谱数据进行验证。

3 结 论

以火龙果茎枝为研究对象,以茎枝光谱及相应实测叶绿素含量值为数据源,研究分析火龙果茎枝叶绿素含量的估测方法,得出如下结论:

(1)火龙果茎枝叶绿素含量的敏感波段多位于 730 nm、

近红外区域,且在近红外处,火龙果茎枝光谱随施氮量的变化规律异于常见绿叶植物叶片变化趋势,火龙果茎枝光谱的吸收峰(谷)随施氮量的增加而呈升高(加深)的趋势。

(2)与数学变换相比,连续小波变换更能明显提升光谱对叶绿素含量的敏感性,但敏感波段的分布相对分散,且位于 730 nm、近红外区域的敏感波段明显较多,不同于常见植物叶绿素含量敏感波段多分布于可见光区域的波段的现象。

(3)与数学变换相比,连续小波变换能明显提升光谱对火龙果茎枝的估测能力,其中基于 L_1 与 L_4 构建的模型建模精度与估测精度相对较高,为最优模型,其估测精度的 $R_{\text{验证}}^2=0.678$, $\text{RMSE}=0.037$, $\text{RPD}=1.652$;模型入选波段主要位于近红外区域,这与常见植物叶绿素含量估测的相关研究结论存在差异。

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] FENG Hai-kuan, YANG Fu-qin, YANG Gui-jun, et al(冯海宽, 杨福芹, 杨贵军, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2018, 34(6): 182.
- [3] QIAO Lang, ZHANG Zhi-yong, CHEN Long-sheng, et al(乔 浪, 张智勇, 陈龙胜, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2019, 50(S1): 182.
- [4] TIAN Jun-cang, YANG Zhen-feng, FENG Ke-peng, et al(田军仓, 杨振峰, 冯克鹏, 等). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报), 2020, 51(8): 178.
- [5] Wang Li, Zhang Xue, Ma Yuhua, et al. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2019, 94(5): 1.
- [6] TANG Heng-peng, LI Li-jie, QIAN Xiao-gang, et al(唐恒朋, 李莉婕, 钱晓刚, 等). Journal of Henan Agricultural Sciences(河南农业科学), 2016, 45(8): 64.
- [7] XU Lin-yu, LIU Shou-zan, BAI Yan, et al(徐琳煜, 刘守赞, 白 岩, 等). Journal of Zhejiang A&F University(浙江农林大学学报), 2018, 35(3): 467.
- [8] WANG Yan-cang, ZHANG Xiao-yu, JIN Yong-tao, et al(王延仓, 张萧誉, 金永涛, 等). Journal of Triticeae Crops(麦类作物学报), 2020, 40(4): 503.
- [9] WANG Li, ZHANG Xue, ZHAO Xiao-zhen, et al(王 荔, 张 雪, 赵晓珍, 等). Chinese Journal of Tropical Crops(热带作物学报), 2020, 41(11): 2237.
- [10] NONG Quan-dong, ZHANG Ming-yong, ZHANG Mei, et al(农全东, 张明永, 张 美, 等). Chinese Bulletin of Botany(植物学报), 2019, 54(3): 371.
- [11] ZHANG Si-nan, WANG Quan, JIN Jia, et al(张思楠, 王 权, 靳 佳, 等). Arid Zone Research(干旱区研究), 2016, 33(5): 1088.
- [12] CAO Xiao-ming, FENG Yi-ming, SHI Jian-kang, et al(曹晓明, 冯益明, 史建康, 等). Journal of Northeast Forestry University(东北林业大学学报), 2020, 48(1): 56.
- [13] ZHANG Xin-lei, LIU Lian-tao, SUN Hong-chun, et al(张鑫磊, 刘连涛, 孙红春, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2020, 36(11): 166.

The Quantitative Study on Chlorophyll Content of *Hylocereus polyrhizus* Based on Hyperspectral Analysis

LI Li-jie^{1,2}, YUE Yan-bin², WANG Yan-cang³, ZHAO Ze-ying², LI Rui-jun², NIE Ke-yan², YUAN Ling^{1*}

1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China

2. Institute of Science and Technology Information, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China

3. North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China

Abstract Pitaya is a new kind of fruit with high nutritional value and good economic benefit which was introduced into China for a short time. Its stems are the most important photosynthetic organs, which is quite different from the common green leaf fruit trees. In order to explore the spectral characteristics and the estimation method of biochemical components of vegetation using stems for photosynthesis, the field experiments were carried out at four nitrogen application levels in Luodian Guizhou, the chlorophyll content of *Hylocereus polyrhizus* stems were taken as the research object. Firstly, hyperspectral reflection data and chlorophyll content data of *Hylocereus polyrhizus* stems under different nitrogen nutrient were measured simultaneously; Secondly, the hyperspectral data were analyzed by mathematical transform, continuous wavelet transform(CWT)and correlation analysis algorithm to extract and screen the characteristic bands; Finally, the chlorophyll content estimation model of stem was established by partial least squares regression(PLSA). The results showed that: (1) The overall trend of the original spectral curve of *Hylocereus polyrhizus* stems is similar to common green leafed plants, the bands sensitive to chlorophyll content of branches are mostly located in the red edge and near-infrared region. In the near-infrared region, the variation of stems spectrum with nitrogen application is different from that of green leaves. The absorption peak (valley) of *Hylocereus polyrhizus* branches spectrum increased (deepened) with the increase of nitrogen application. (2) First derivative(FD)and CWT in the scale of L_1 — L_5 can effectively improve the sensitivity of the spectrum to chlorophyll content. The sensitive region of the original spectrum and chlorophyll content of *Hylocereus polyrhizus* stems is located in 730~1 400 nm. Both the mathematical transform and CWT can significantly improve the sensitivity of the spectrum to chlorophyll content, but the distribution of sensitive bands is relatively scattered, and there are more sensitive bands in the red edge (730 nm) and near infrared region(1 100~1 600 nm), which is different from the distribution of chlorophyll content sensitive bands in leaves. (3) Both the mathematical transformation and CWT can significantly improve the spectral estimation ability of chlorophyll content in *Hylocereus polyrhizus* stems. The estimation model based on FD the optimal models of mathematical transformation, the verification accuracy is $R_{\text{verification}}^2=0.625$, $\text{RMSE}=0.048$, $\text{RPD}=1.238$ (FD). The model based on L_1 and L_4 has relatively high modeling accuracy and estimation accuracy, which is the best model with $R_{\text{verification}}^2=0.678$, $\text{RMSE}=0.037$, $\text{RPD}=1.652$ (CWT). Hyperspectral technology can be used as a non-destructive monitoring method for chlorophyll content and nutrition diagnosis of Pitaya. This study provides a supplement for improving the retrieval of chlorophyll content of different vegetation types based on hyperspectral index.

Keywords Pitaya; Chlorophyll content; Hyperspectral; Mathematical transformation; Partial least squares

(Received May 25, 2021; accepted Sep. 22, 2021)

* Corresponding author