

基于光谱红边位置提取算法的番茄叶片叶绿素含量估测

丁永军¹ 张晶晶¹ 李修华² 李民赞³

(1. 兰州城市学院信息工程学院, 兰州 730070; 2. 广西大学电气工程学院, 南宁 530004;
3. 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)

摘要: 为了快速、准确估测番茄叶片叶绿素含量, 分析了不同营养水平下的番茄叶片光谱红边参数变化规律, 发现红边位置最能表征番茄叶绿素状况, 统计分析了6种算法提取的光谱红边位置的差异性, 并为每种算法分别建立了5种估测模型, 验证结果表明每种红边位置提取算法所对应的最佳模型为线性四点内插法的指数曲线模型和其他红边位置算法的对数曲线模型。其中线性外推法模型精度最高, 校正集决定系数 R_c^2 为0.618 6, 验证集决定系数 R_v^2 达到0.771 1, 验证集均方根误差 RMSE_v 为8.359 6, 可以有效诊断番茄叶绿素含量。线性四点内插法根据670、700、740、780 nm 4个波段的叶片反射率计算红边位置, 运算简单, 模型精度较高, R_c^2 为0.621 7, R_v^2 达到0.766 6, RMSE_v 为8.568 2, 可以作为开发番茄叶绿素含量监测仪器的依据。

关键词: 番茄叶片; 叶绿素含量; 光谱分析; 红边位置

中图分类号: O657.3; S15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)03-0292-06

Estimation of Chlorophyll Content of Tomato Leaf Using Spectrum Red Edge Position Extraction Algorithm

Ding Yongjun¹ Zhang Jingjing¹ Li Xiuhua² Li Minzan³

(1. College of Information Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China
2. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China
3. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The red edge parameters of plants spectrum were used to estimate foliar chlorophyll for nitrogen content and leaf area. Among these parameters, the red edge position (REP) is the best one for diagnosing the growth state of tomato according to statistical analysis. The REP was defined by the wavelength of the maximum first derivative of the reflectance spectrum in the region (660 nm to 780 nm) of the red edge. The six algorithms could be used to extract the REP, including four-point interpolation, maximum first derivative, inverted Gaussian fitting, Lagrangian, linear extrapolation, and polynomial fitting. In order to achieve a rapid and accurate application for predicting the chlorophyll content of tomato with REP, this study systematically analyzed the quantitative relationships and statistical characters between REP on various algorithms and leaf chlorophyll status, and then the linear regression, logarithmic regression, power regression, exponential regression and quadratic polynomial regression were used to develop the prediction models of the chlorophyll content for each REP extraction algorithm. The result showed that the logarithmic model of the linear extrapolation had the best accuracy and reliability. The calibration R_c^2 was 0.618 6, the validation R_v^2 was 0.771 1 and the root mean squared error of validation set (RMSE_v) was 8.359 6. The exponential model of the four-point interpolation could be

收稿日期: 2015-07-18 修回日期: 2015-10-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(31360291, 31401290)和甘肃省高等学校科研基金项目(2013B-071)
作者简介: 丁永军(1978—), 男, 副教授, 博士, 主要从事光谱及多光谱图像分析研究, E-mail: dingyj@lzcw.edu.cn
通信作者: 李民赞(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业信息化研究, E-mail: limz@cau.edu.cn

obtained easily according to reflectance at 670 nm, 700 nm, 740 nm and 780 nm, the calibration R_c^2 was 0.621 7, validation R_v^2 was 0.766 6 and RMSE_v was 8.568 2. The predictive ability was good enough to develop a monitoring instrument of tomato chlorophyll content.

Key words: tomato leaf; chlorophyll content; spectral analysis; red edge position

引言

作物生长过程中,叶绿素是参与光合作用的主要色素,也是合成作物叶片氮素的重要组成部分,其叶绿素浓度直接影响代谢活动、生长周期和产量形成^[1-2]。大量研究表明反射光谱、微分光谱及植被指数具有定量反演作物生化参数的能力,可以有效克服人工观测主观性强、效率低下的弊端,又可以解决遥感技术受分辨率、空域条件、气象状况、时间周期等因素制约的问题^[3-8]。另外,截止到 2014 年,我国设施蔬菜总产量超过 2.7 亿 t,占蔬菜总产量的 39.4%,其中番茄是最重要的栽培作物之一,对于番茄叶绿素光谱诊断,部分学者进行了初步研究,其中姜伟杰等^[9]提出番茄叶绿素含量的敏感光谱波段为 532、610、700 nm;赵国富等^[10]分析了光谱反射率与叶绿素含量的相关关系;丁永军等^[11-12]利用番茄叶绿素微分光谱特征参量及 384、405、436、554、675、693 nm 处的吸光度建立了预测模型。

上述研究虽然在特定条件下取得了一定的成果,但温室栽培番茄长势的监测诊断机理与方法的相关研究还处于发展阶段,还没有可被广泛应用的研究成果。又因为温室环境下光照强度及光谱构成有别于大田栽培,因此有必要对温室环境下的番茄营养光谱诊断进行深入研究,构建计算简单、精度较高的预测模型,为番茄叶绿素含量监测仪器的开发提供科学依据。

由于作物叶绿素对红光的强烈吸收,及对近红外光的多次散射,通常在 660 ~ 780 nm 之间形成陡而直的红边,常用的红边参数包括红边位置、红边幅值、红边面积、最小振幅等。FENG 等^[13-18]研究了红边特征与小麦、生菜、草地、森林氮素或叶绿素含量的相关性;LI 等^[19]研究了光谱带宽及作物生长环境对红边参数提取的影响;陈兵等^[20-21]利用红边参数识别了棉叶萎病害和小麦条锈病;还有学者利用 660 ~ 780 nm 范围内微分光谱曲线的几何特征定义了新的红边参数^[22-24]。

红边位置是红边区域变化最快的波段,当作物叶绿素含量增加时,红边位置会向红外方向偏移,当叶绿素含量减少时,红边位置则向相反方向变化,因此红边位置可以作为有效的叶绿素含量指示参数,常用的红边位置提取算法包括最大一阶导数法、多

项式拟合法、拉格朗日法、线性外推法、倒高斯模型法和线性四点内插法^[25-27]。

本试验以温室番茄为研究对象,研究作物光谱特性与叶绿素含量间的变化规律,对比 6 种算法提取光谱红边位置的差异性及对估测模型的影响。

1 方法与材料

试验在中国农业大学水利与土木工程学院可控温室内进行,育苗前晒种 3 d 后用福尔马林 500 倍液浸种 1 h,再置于 25℃ 的环境下进行 3 d 催芽,之后在营养皿中进行播种育苗,待苗高达到 10 ~ 15 cm 后选择茎秆粗壮、多绒毛的大壮苗定植于栽培基质,设计 4 种营养水平(T1 ~ T4),基质草炭、蛭石质量配比依次为 1:0、4:1、1:1、0:1,每 30 cm × 40 cm 区域定植番茄 1 株,共植 40 株。定植 20 d 及开花坐果期分别实施缓效复合肥一次。通常每 2 ~ 3 d 灌水一次。始花坐果期是番茄从营养生长过渡到生殖生长与营养生长同等发展的转折时期,直接关系到果实器官形成和产量,分别于番茄移植后 30 d(始花坐果期)、50 d(结果初期)、85 d(结果期)、112 d(拉秧期),采集叶片光谱,测定叶片叶绿素含量,前后共采集样本 108 个。光谱分析及数据处理过程中,使用 Matlab 2010a(Mathworks,美国)进行红边参数提取,使用 SAS 9.2(Statistics analysis system,美国)和 EXCEL 2007(Microsoft,美国)进行红边参数统计分析及番茄叶绿素含量估测模型建立。

1.1 光谱数据采集

番茄叶片光谱反射率采集选择晴朗或少云天气,在 11:00—15:00 时段进行,使用 ASD FieldSpecTM HH 型便携式光谱辐射仪(Analytical Spectral Device Inc.),采集前通过标准白板进行仪器标定,每组样本由 4 片叶面积最大的叶片构成,测量时光谱辐射仪探头垂直向下,距样本 25 cm 左右,每组反复测量 3 次取平均值。

1.2 叶绿素含量测定

采用 752 型紫外可见分光光度计(上海精密科学仪器有限公司)测定叶绿素含量,按丙酮和无水乙醇质量比 2:1 配置萃取液,剔除叶脉称取叶片 0.4 g 置于 25 mL 萃取液中,在背光处浸泡 24 h 后,测量 645、652、663 nm 3 个波长处的吸光度,计算叶

绿素含量。

1.3 红边位置提取算法

采用以下6种算法对红边位置进行提取^[25-27]：最大一阶导数法（Maximum first derivative spectrum）、线性四点内插法（Linear four-point interpolation technique）、多项式拟合法（Polynomial fitting technique）、倒高斯拟合法（Inverted Gaussian fitting technique）、拉格朗日法（Lagrangian technique）、线性外推法（Linear extrapolation technique）。

1.4 模型建立及评价方法

采用线性回归 $y = ax + b$ 、对数曲线回归 $y = a \ln x + b$ 、乘幂曲线回归 $y = ax^b$ 、指数曲线回归 $y = ae^{bx}$ 、二次多项式回归 $y = ax^2 + bx + c$ 5种方法建立番茄叶片叶绿素含量模型，并由决定系数和均方根误差进行模型评价。

2 结果与分析

2.1 番茄光谱特征及红边参数

图1为4种养分胁迫（T1~T4）处理下的番茄结果期（50 d）叶片660~780 nm范围内的光谱及其一阶导数曲线，T1~T4对应的叶绿素含量依次为

14.3、29.7、40.3、50.4 mg/L。图1a为原始光谱曲线，可以看出番茄结果期4种养分胁迫下的叶绿素平均含量和光谱曲线差异显著，红光被叶绿体吸收进行光合作用，680 nm附近形成波谷，690~760 nm范围，曲线陡而接近直线，随叶绿素含量的增加该直线向红外方向偏移明显，反射率也随之降低。图1b为一阶导数光谱曲线，4种处理下的红边位置分别为697、700、714、718 nm，随叶绿素含量改变呈现出明显的差异性，而T1、T2、T3的红边幅值变化不显著，均在0.015附近，T2、T3、T4的红边面积又均在0.7左右，红边位置处光谱反射率T1、T2接近0.29，T3、T4接近0.43。

表1为番茄结果期（50 d）所采集到的40条光谱信息所对应的红边参数统计，红边幅值与叶绿素含量相关系数仅为0.184 7，而且从极差和变异系数可知红边幅值不足以表征作物叶绿素水平。红边面积、红边位置反射率与叶绿素含量相关性分别为0.509 8、0.627 0，可以作为作物叶绿素诊断的参考特征参量，对预测模型的贡献有待进一步分析。红边位置的相关性达到0.871 8，极差为30.000 0，所以本文在红边参数中着重分析红边位置的提取及对叶绿素预测模型的影响。

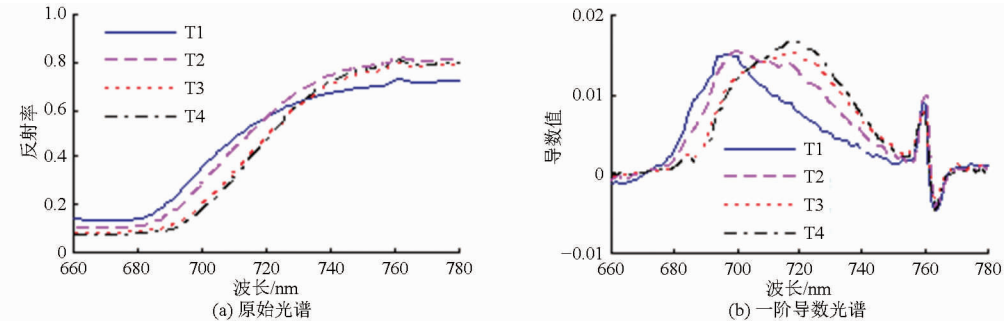


图1 番茄叶片红边光谱曲线
Fig.1 Red edge spectrum of tomato leaves

表1 番茄光谱红边参数统计
Tab.1 Statistic of tomato red edge parameters

参数	均值	标准差	最大值	最小值	极差	变异系数	相关系数
红边幅值	0.016 3	0.002 5	0.023 3	0.010 4	0.012 8	0.155 6	0.184 7
红边位置	708.900 0	10.078 7	724.000 0	694.000 0	30.000 0	0.014 2	0.871 8
红边面积	0.679 9	0.109 0	0.965 3	0.355 4	0.609 9	0.160 3	0.509 8
红边位置反射率	0.379 8	0.086 0	0.559 7	0.250 3	0.309 4	0.226 5	0.627 0

2.2 红边位置提取算法结果分析

图2为6种红边算法提取的红边位置直方图。线性四点内插法提取的红边位置集中于695~702 nm，饱和现象明显，当叶绿素含量较高时，表现较不敏感。最大一阶导数法提取的红边位置分布均匀，并在700 nm和718 nm附近形成双峰，加之光谱导数能有效剔除背景干扰，说明导数红边

能较好地地表征作物叶绿素变化。倒高斯拟合法提取的红边差异性较小，多集中于701~711 nm，其值偏大，不合适用于作物叶绿素诊断。由于拉格朗日法基于一阶微分，所以其分布与导数法类似。而线性外推法和多项式拟合法提取的红边位置分布较均匀，变幅较大，可以作为叶绿素含量诊断的备选特征参数。

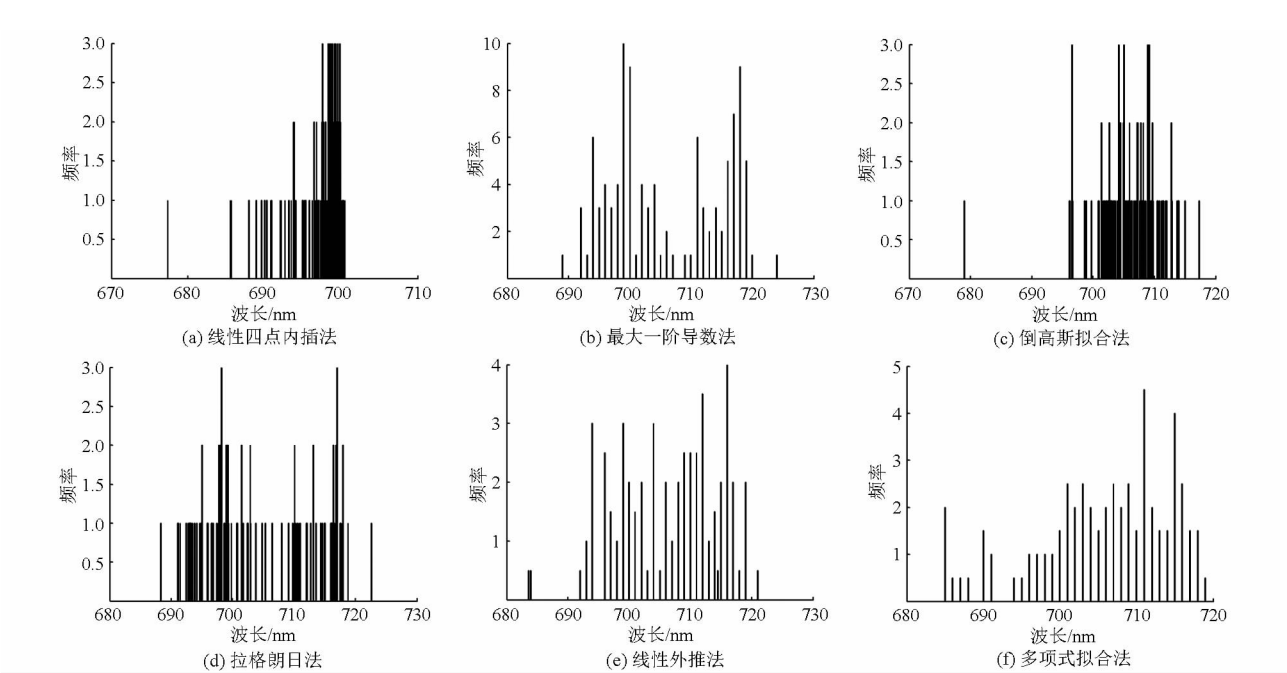


图 2 不同算法提取的红边位置直方图

Fig. 2 Histograms of REP extracted by various algorithms

表 2 为 6 种算法提取的红边位置统计分析。线性四点内插法均值为 713.842 6,其值偏大,相关系数为 0.710 0,仅高于倒高斯拟合法,分析其原因可能跟所选取的 4 点有关。倒高斯拟合法标准差最小,为 5.130 8,且相关系数最小,为 -0.555 9,其原

因可能和反射率最低点和最高点的选取有关,而且拟合时采用迭代逐步逼近还是转换为线性拟合也对其结果有较大的影响。最大一阶导数法、拉格朗日法、线性外推法统计结果接近。多项式拟合法运算量最大,但拟合精度最高,相关系数达到 0.816 8。

表 2 番茄光谱红边位置统计							
Tab. 2 Statistic of tomato red edge position							
算法	均值	标准差	最大值	最小值	极差	变异系数	相关系数
线性四点内插法	713.842 6	7.485 3	721.045 5	674.702 6	46.342 9	0.010 5	0.710 0
最大一阶导数法	706.047 2	9.187 3	724.000 0	689.000 0	35.000 0	0.013 0	0.800 9
倒高斯拟合法	705.917 6	5.130 8	717.375 8	679.000 0	38.375 8	0.007 3	-0.555 9
拉格朗日法	705.035 7	9.151 4	722.673 8	688.273 4	34.400 4	0.013 0	0.803 6
线性外推法	706.330 3	8.390 1	721.000 0	683.563 2	37.436 8	0.011 9	0.802 1
多项式拟合法	705.650 9	8.838 3	719.000 0	685.000 0	34.000 0	0.012 5	0.816 8

2.3 红边位置提取算法对预测模型的影响

对 4 次采集的原始光谱数据(共 108 个样本)计算马氏距离,并设 $\sigma = 3$,剔除异常样品 4 个。对剩余的 104 个样本,随机分成校正集 68 个样本,验证集 36 个样本,对每种红边位置提取算法分别建立线性模型、对数曲线模型和乘幂曲线模型、指数曲线模型、二次多项式模型。建模、验证及评价结果如表 3 所示,可以看出每种算法二次多项式模型的决定系数都较高,但验证集均方根误差(RMSE_v)偏大,拉格朗日法对应的该类模型 RMSE_v 甚至达到 18.441 8,所以在最优预测方案中排除此类模型。综合校正集决定系数 R_c^2 、验证集决定系数 R_v^2 、RMSE_v 3 个指标,对线性四点内插法选择指数曲线模型,其他红边位置提取算法选择对数曲线模型,经

比较各方法优劣,依次为线性外推法、多项式拟合法、线性四点内插法、拉格朗日法、最大一阶导数法、倒高斯拟合法。其中,线性外推法能很好地解决导数曲线的双峰问题,模型精度最高,校正集决定系数 R_c^2 为 0.618 6,验证集决定系数 R_v^2 达到 0.771 1, RMSE_v 为 8.359 6,说明该方法可以满足叶绿素诊断的实际要求,但考虑到试验中的数据采集环境相对稳定,模型也没有考虑光照强度、作物冠层结构和栽培基质的影响,所以模型有待进一步验证和调整,在此过程中可以尝试引入高斯过程回归、支持向量回归、人工智能网络等先进的机器学习方法;线性四点内插法只需知道 670、700、740、780 nm 4 个波长的叶片反射率,计算过程简单,且模型精度较高,可以作为开发番茄叶绿素含量监测仪器的依据。

表 3 番茄叶片叶绿素估测模型的建立与评价

Tab. 3 Development and evaluation of chlorophyll content model of tomato leaf				
算法	模型	校正集决定系数	验证集决定系数	验证集均方根误差
线性四点内插法	$y = 1.9711x - 1373.6$	0.4937	0.6769	9.8585
	$y = 1394.5\ln x - 9129.6$	0.4917	0.6740	9.9306
	$y = 0.0886x^2 - 123.66x + 43162$	0.5589	0.7682	10.2415
	$y = 3 \times 10^{-173}x^{60.962}$	0.6201	0.7665	9.3791
	$y = 6 \times 10^{-26}e^{0.0861x}$	0.6217	0.7666	8.5682
最大一阶导数法	$y = 1.4406x - 983.33$	0.6097	0.7046	9.5266
	$y = 1020\ln x - 6656.7$	0.6118	0.7071	9.4760
	$y = -0.0702x^2 + 100.66x - 36044$	0.6817	0.8080	11.2419
	$y = 3 \times 10^{-111}x^{39.316}$	0.5880	0.5920	11.4390
	$y = 3 \times 10^{-16}e^{0.0555x}$	0.5853	0.5889	11.6583
倒高斯拟合法	$y = -2.7201x + 1955.1$	0.5372	0.6150	14.6832
	$y = -1919.2\ln x + 12624$	0.5374	0.6141	10.8787
	$y = 0.0201x^2 - 31.146x + 11981$	0.5383	0.6045	11.0187
	$y = 1 \times 10^{194}x^{-67.637}$	0.4257	0.5106	17.1991
	$y = 8 \times 10^{30}e^{-0.0959x}$	0.4262	0.5127	12.1791
拉格朗日法	$y = 1.4534x - 990.93$	0.6141	0.7088	9.4600
	$y = 1027.5\ln x - 6704.9$	0.6162	0.7144	9.4283
	$y = -0.074x^2 + 105.87x - 37835$	0.6887	0.8192	18.4418
	$y = 4 \times 10^{-112}x^{39.606}$	0.5921	0.5946	12.2993
	$y = 2 \times 10^{-16}e^{0.056x}$	0.5895	0.5915	11.5426
线性外推法	$y = 1.6419x - 1125.3$	0.6175	0.7705	8.3529
	$y = 1158.8\ln x - 7567.6$	0.6186	0.7711	8.3596
	$y = -0.0256x^2 + 37.704x - 13840$	0.6300	0.7690	10.9806
	$y = 4 \times 10^{-131}x^{46.267}$	0.6507	0.6670	10.5919
	$y = 2 \times 10^{-19}e^{0.0655x}$	0.6484	0.6634	11.9018
多项式拟合法	$y = 1.5436x - 1055.6$	0.6155	0.7670	8.4728
	$y = 1084.1\ln x - 7077.2$	0.6149	0.7665	8.6151
	$y = 0.0095x^2 - 11.81x + 3636.1$	0.6179	0.7688	8.4691
	$y = 5 \times 10^{-126}x^{44.497}$	0.6699	0.7136	9.5627
	$y = 1 \times 10^{-18}e^{0.0633x}$	0.6694	0.7103	11.0597

3 结论

(1)分析了不同营养水平下的番茄叶片光谱红边参数变化规律,使用线性四点内插法、最大一阶导数法、倒高斯拟合法、拉格朗日法、线性外推法和多项式拟合法分别计算了104个样本的红边位置,并为每种算法建立了5种回归模型。

(2)随着叶绿素含量的增加,红边向红外方向偏移明显,反射率也随之降低,红边位置与叶绿素含量的相关系数达到0.8718。红边幅值变化不显著,其值均在0.015附近,且与叶绿素含量相关系数很低,仅为0.1847,而且从极差和变异系数分析可知红边幅值不足以表征作物叶绿素水平。红边面积、红边位置反射率与叶绿素含量相关系数较高,分别为0.5098、0.6270,可以作为作物叶绿素含量诊断的参考特征参量,对预测模型的贡献有待进一步分析。

(3)线性四点内插法提取的红边位置集中于695~702 nm,存在饱和现象,均值为713.8426,其值偏大,当叶绿素含量较高时,表现的较不敏感。最大一阶导数法、拉格朗日法、线性外推法和多项式拟合法提取的红边位置分布均匀,变幅较大,可以作为叶绿素诊断的备选特征参数。倒高斯拟合法提取的红边位置标准差仅为5.1308,且与叶绿素含量的相关系数为-0.5559,不适用于作物叶绿素含量诊断。

(4)综合建模结果的 R_c^2 、 R_v^2 、RMSE_v3个指标,虽然二次多项式模型决定系数较高,但均方根误差偏大。对线性四点内插法选择指数曲线模型,其他红边位置算法选择对数曲线模型。线性外推法能很好地解决导数曲线的双峰问题,模型精度最高,校正集决定系数 R_c^2 为0.6186,验证集决定系数 R_v^2 达到0.7711, RMSE_v为8.3596,可以有效诊断番茄叶绿素含量;线性四点内插法可以根据670、700、740、

780 nm 4 个波长的叶片反射率构建预测模型,计算 0.766 6, RMSE_r 为 8.568 2, 可以作为开发番茄叶绿素含量监测仪器的依据。

简单, 模型精度较高, R_e^2 为 0.621 7, R_v^2 达到

参 考 文 献

1 BLACKBURN G A, FERWERDA J G. Retrieval of chlorophyll concentration from leaf reflectance spectra using wavelet analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1614 – 1632.

2 KOCHUBEY S M, KAZANTSEV T A. Changes in the first derivatives of leaf reflectance spectra of various plants induced by variations of chlorophyll content[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2007, 164(12): 1648 – 1655.

3 冀荣华,郑丽华,邓小蕾,等. 基于反射光谱的苹果叶片叶绿素和含水率预测模型[J]. *农业机械学报*,2014,45(8):269 – 275.

JI Ronghua, ZHENG Lihua, DENG Xiaolei, et al. Forecasting chlorophyll content and moisture of apple leaves in different tree growth period based on spectral reflectance [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(8): 269 – 275. (in Chinese)

4 IGNAT T, SCHMILOVITCH Z, FEFÖLDI J, et al. Nonlinear methods for estimation of maturity stage, total chlorophyll, and carotenoid content in intact bell peppers[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 114(4): 414 – 425.

5 LI F, MIAO Y, FENG G, et al. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices[J]. *Field Crops Research*, 2014, 157: 111 – 123.

6 陈书琳,毕银丽,齐礼帅,等. 接种菌根大豆叶绿素含量差异的光谱特征分析[J]. *中国矿业大学学报*,2014,44(1):170 – 175.

CHEN Shulin, BI Yinli, QI Lishuai, et al. Hyperspectral characteristics difference and estimation for chlorophyll content of soybean inoculated with mycorrhiza [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 44(1): 170 – 175. (in Chinese)

7 MAIN R, CHO M A, MATHIEU R, et al. An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(6): 751 – 761.

8 YU K, LENZ-WIEDEMANN V, CHEN X, et al. Estimating leaf chlorophyll of barley at different growth stages using spectral indices to reduce soil background and canopy structure effects[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 97: 58 – 77.

9 姜伟杰,孙明. 基于多光谱成像的番茄叶片叶绿素含量预测建模方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*,2011,31(3):758 – 761.

JIANG Weijie, SUN Ming. Research on predicting modeling for chlorophyll contents of greenhouse tomato leaves based on multi-spectral imaging [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(3): 758 – 761. (in Chinese)

10 赵国富,王建兴. 基于光谱分析的温室番茄叶片叶绿素含量预测[J]. *农机化研究*,2008(11):33 – 36.

ZHAO Guofu, WANG Jianxing. Forecasting greenhouse tomato leaves chlorophyll contents based on spectral analysis [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2008(11): 33 – 36. (in Chinese)

11 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 CSAE*, 2011, 27(5): 244 – 247. (in Chinese)

12 丁永军,李民赞,郑立华,等. 基于近红外光谱小波变换的温室番茄叶绿素含量预测[J]. *光谱学与光谱分析*,2011, 31(11):2936 – 2939.

DING Yongjun, LI Minzan, ZHENG Lihua, et al. Prediction of chlorophyll content of greenhouse tomato using wavelet transform combining with NIR spectra [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(11): 2936 – 2939. (in Chinese)

13 FENG W, GUO B B, ZHANG H Y, et al. Remote estimation of above ground nitrogen uptake during vegetative growth in winter wheat using hyperspectral red-edge ratio data [J]. *Field Crops Research*, 2015, 180(15): 197 – 206.

14 孙红,李民赞,赵勇,等. 冬小麦生长期光谱变化特征与叶绿素含量监测研究[J]. *光谱学与光谱分析*,2010,30(1):192 – 196.

SUN Hong, LI Minzan, ZHAO Yong, et al. The spectral characteristics and chlorophyll content at winter wheat growth stages [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(1): 192 – 196. (in Chinese)

15 靳彦华,熊黑钢,张芳,等. 基于红边参数的水浇地与旱地春小麦各生育期叶绿素最佳估测模型比较研究[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(1): 87 – 92.

JIN Yanhua, XIONG Heigang, ZHANG Fang, et al. Comparison of red-edge parameters for spring wheat chlorophyll content at different growth stages in irrigated and dry-land regions [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(1): 87 – 92. (in Chinese)

16 朱咏莉,李萍萍,毛罕平,等. 生菜叶片光谱红边参数对氮营养的响应特征分析[J]. *农业机械学报*,2011,42(11):174 – 177.

ZHU Yongli, LI Pingping, MAO Hanping, et al. Response features of red edge parameters for lettuce leaf spectra under different nitrogen levels [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(11): 174 – 177. (in Chinese)

17 MUTANGA O, SKIDMORE A K. Red edge shift and biochemical content in grass canopies[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(1): 34 – 42.

18 杨曦光,于颖,黄海军,等. 森林冠层氮含量遥感估算[J]. *红外与毫米波学报*,2012,31(6):536 – 543.

YANG Xiguang, YU Ying, HUANG Haijun, et al. Estimation of forest canopy nitrogen content based on remote sensing [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(6): 536 – 543. (in Chinese)

GUO Hao, WANG Peng, MA Qin, et al. Acquisition of appraisal traits for dairy cow based on depth image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 273 – 276. (in Chinese)

18 刘波,朱伟兴,杨建军,等. 基于深度图像和生猪骨架端点分析的生猪步频特征提取[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 131 – 137.

LIU Bo, ZHU Weixing, YANG Jianjun, et al. Extracting of pig gait frequency feature based on depth image and pig skeleton endpoints analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 131 – 137. (in Chinese)

19 李卓,毛涛涛,刘同海,等. 基于机器视觉的猪体质量估测模型比较与优化[J]. 农业工程学报, 2015, 21(2): 155 – 161.

LI Zhuo, MAO Taotao, LIU Tonghai, et al. Comparison and optimization of pig mass estimation models based on machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 21(2): 155 – 161. (in Chinese)

20 BRADSKI G, KAEHLER A. Learning OpenCV: computer vision with the OpenCV library[M]. Sebastopol, CA: O'Reilly Media Inc, 2008: 442.

21 刘昭华,杨玉霞,马大喜,等. 半全局匹配算法的多基线扩展及 GPU 并行处理方法[J]. 测绘科学, 2014, 39(11): 99 – 103.

LIU Zhaohua, YANG Yuxia, MA Daxi, et al. Study on semi-global matching algorithm extended for multi baseline matching and parallel processing method based on GPU[J]. Science of Surveying and Mapping, 2014, 39(11): 99 – 103. (in Chinese)

22 HIRSCHMULLER Heiko. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 328 – 341.

23 刘同海,滕光辉,付为森,等. 基于机器视觉的猪体体尺测点提取算法与应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 161 – 168.

LIU Tonghai, TENG Guanghui, FU Weisen, et al. Extraction algorithms and applications of pig body size measurement points based on computer vision[J]. Transactions of the CASE, 2013, 29(2): 161 – 168. (in Chinese)

24 LI Zhuo, LUO Cheng, TENG Guanghui, et al. Estimation of pig weight by machine vision: a review[C] // Computer and Computing Technologies in Agriculture, 2013,2:42 – 49.

(上接第 297 页)

19 LI F, MIAO Y, FENG G, et al. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices[J]. Field Crops Research, 2014, 157(2): 111 – 123.

20 陈兵,韩焕勇,王方永,等. 利用光谱红边参数监测黄萎病棉叶叶绿素和氮素含量[J]. 作物学报,2013,39(2):319 – 329.

CHEN Bing, HAN Huanyong, WANG Fangyong, et al. Monitoring chlorophyll and nitrogen contents in cotton leaf infected by verticillium wilt with spectra red edge parameters [J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 319 – 329. (in Chinese)

21 蒋金豹,陈云浩,黄文江. 利用高光谱红边与黄边位置距离识别小麦条锈病[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(6):1614 – 1618.

JIANG Jinbao, CHEN Yunhao, HUANG Wenjiang. Using the distance between hyperspectral red edge position and yellow edge position to identify wheat yellow rust disease [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(6): 1614 – 1618. (in Chinese)

22 冯伟,朱艳,姚霞,等. 利用红边特征参数监测小麦叶片氮素积累状况[J]. 农业工程学报,2009,25(11):194 – 201.

FENG Wei, ZHU Yan, YAO Xia, et al. Monitoring nitrogen accumulation in wheat leaf with red edge characteristics parameters [J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(11): 194 – 201. (in Chinese)

23 ZHANG Jinheng, WANG Ke. New vegetation index for estimating nitrogen concentration using fresh leaf spectral reflectance [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 158 – 161.

24 JU Changhua, TIAN Yongchao, YAO Xia, et al. Estimating leaf chlorophyll content using red edge parameters[J]. Pedosphere, 2010, 20(5): 633 – 644.

25 张永贺,郭啸川,褚武道,等. 基于红边位置的木荷叶片叶绿素含量估测模型研究[J]. 红外与激光工程,2013, 42(3): 798 – 804.

ZHANG Yonghe, GUO Xiaochuan, CHU Wudao, et al. Estimation model of schima superba leaf chlorophyll content based on red edge position [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 798 – 804. (in Chinese)

26 CHO M A, SKIDMORE A K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: the linear extrapolation method [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 101(2): 181 – 193.

27 薛利红,杨林章. 采用不同红边位置提取技术估测蔬菜叶绿素含量的比较研究[J]. 农业工程学报,2008, 24(9): 165 – 169.

XUE Lihong, YANG Linzhang. Comparative study on estimation of chlorophyll content in spinach leaves using various red edge position extraction techniques [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(9): 165 – 169. (in Chinese)