

基于反射光谱探测与二维分析的玉米叶片叶绿素诊断

程 萌¹ 陈 香¹ 毛博慧¹ 孙 红¹ 李民赞^{1,2} 杨 玮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. 中国农业大学农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 设计了一套基于微小型光谱学传感器的轻量级作物冠层反射光谱探测系统,系统硬件主要由光学传感器、数据存储传输模块、控制器组成,软件包含采集参数设置、采集控制、数据管理3个模块。经系统标定,系统与标准仪器 ASD 的数据相关性平均达到 0.94 以上。分析了玉米冠层反射率随叶片叶绿素含量和含水率变化而变化的趋势,针对叶片叶绿素含量分别进行了一维和二维相关光谱分析。基于 548、594、652 nm 一阶微分光谱建立了叶片叶绿素含量 MLR 模型,建模决定系数为 0.43,验证决定系数为 0.36。结合二维相关光谱分析,讨论了玉米叶片叶绿素含量与水分光谱的响应关系,修正敏感波长为 480、594、652、819 nm,建立了大田夏玉米的叶片叶绿素含量诊断优化模型,建模决定系数和验证决定系数分别为 0.47 和 0.34。

关键词: 反射率; 二维相关光谱; 叶绿素; 玉米冠层

中图分类号: S126; Q945.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0413-06

Chlorophyll Content Diagnosis of Corn Leaves Based on Reflection Spectrum Detection and Two-dimensional Analysis

Cheng Meng¹ Chen Xiang¹ Mao Bohui¹ Sun Hong¹ Li Minzan^{1,2} Yang Wei¹

(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, Beijing 100083, China)

Abstract: Crop spectrum characteristic analysis plays an important role in growth condition monitoring and nutrition diagnosis for precision management. It is also the theoretical basis of remote sensing data analysis. In order to predict the nutrient content of crop non-destructively and quickly, a spectrum detection system for summer corn was developed to measure the reflectance of 350 ~ 820 nm. The system had three parts, i.e., optical sensor, data storage and transmission module and controller. And spectral information collection software included three modules, i.e., acquisition parameters, acquisition control and data management. Calibration experiment was carried out to test the performance of spectrum analyzing system. The correlation with ASD Field Spec Hand Held 2 was analyzed. The result showed that the average determination coefficient was 0.94. It was used to detect the chlorophyll and moisture contents of corn leaves. The relationships were analyzed based on the one- and two-dimensional correlations, respectively. Firstly, the chlorophyll content detecting model was established based on first-order differential and K-value clustering method by using 548 nm, 594 nm and 652 nm with determination coefficients of 0.43 and 0.36. Then, the response relationships between moisture content and chlorophyll content in corn leaves were discussed and the model was revised by wavelengths at 480 nm, 594 nm, 652 nm and 819 nm. The revised chlorophyll content detecting model was established with determination coefficients of 0.47 and 0.34.

Key words: reflectance; two-dimensional correlation spectrum; chlorophyll; corn canopy

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-24

基金项目: 农业部公益性行业专项(201303109)和国家自然科学基金项目(31501219、31360291)

作者简介: 程萌(1993—),女,硕士生,主要从事光谱检测传感器技术研究,E-mail: chengmeng@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

引言

作物叶绿素含量是衡量作物长势的重要指标,可为作物生产管理提供依据^[1-3]。应用光谱技术可实现作物营养含量的快速诊断。国内外已经开发了相关的作物养分光谱检测仪,通过获取敏感波长、植被指数等参数检测叶绿素、水分含量等信息^[4-6]。

尽管植物光谱特征研究表明,叶绿素的主要吸收峰在 480、650、670 ~ 680 nm 处,类胡萝卜素在 420 ~ 450 nm、470 ~ 480 nm 范围内存在吸收峰,而作物水分的吸收峰主要集中在 970、1 450、1 944 nm 处^[7-8]。但有研究指出,植物水分对叶绿素含量具有影响^[9-11]。王娟等^[12]认为玉米冠层叶片含水率与 460、500、600、650、670 nm 多个波段反射率均呈显著相关。贾夏等^[13]研究发现,菠菜叶片内的水分和叶绿素含量呈现 0.8 以上的负相关性。说明即使是基于相关性分析选取的叶绿素含量敏感波长仍会存在其他组分的作用。因此,对多组分光谱学信息的深入分析对建立高鲁棒性的叶绿素含量诊断模型十分必要。

为了分析被测对象中不同组分或外界干扰因素对其光谱特性的影响,二维相关光谱技术在二维尺度上围绕同步相关光谱和异步相关光谱两方面展开,被用于药材、土壤、水样等物质的动态分析中,筛选敏感波段,分析敏感变化程度,进而消除多组分的影响^[14-17]。

为了快速获取大田玉米冠层叶绿素含量,本文设计一套基于微小型光谱学传感器的作物冠层反射光谱探测系统,在田间便携式测量玉米冠层可见光-近红外反射光谱,在讨论反射率随叶片叶绿素含量和含水率变化特征的基础上,基于二维相关光谱分析技术,选取叶绿素含量诊断敏感波长,建立大田夏玉米的叶绿素含量诊断模型,以期为农田精细化管理提供支持。

1 冠层反射光谱探测系统设计

1.1 硬件设计与集成

由于大田玉米植株在拔节后生长迅速,高度较高,受重量和携带方式的制约,常见的如 ASD 光谱辐射仪、GreenSeeker 作物光谱探测分析仪等无法在田间进行携带式采集冠层反射光谱。为了快速、轻量、便携地获取玉米冠层光谱,设计开发了一套基于微小型光谱学传感器的作物冠层反射光谱探测系统。如图 1 所示,系统主要由光学传感器、数据存储传输模块、控制器组成。系统选用海洋公司的微小型 STS-VIS 型传感器采集 350 ~ 820 nm 的光学信

号,光学分辨率为 12 nm,信噪比大于 1 500:1,传感器尺寸为 40 mm × 42 mm × 24 mm,质量 68 g,可通过垂直杆安装采集玉米冠层数据。

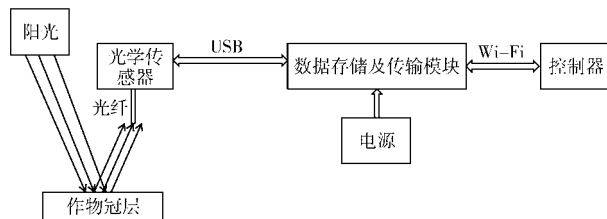


图1 系统硬件结构

Fig.1 Mechanical structure of hardware system

测试时,传感器外接 10 cm 的 SMA905 型光纤,垂直于作物冠层,经光学传感器完成光电转换,数据由 USB 线传送到数据存储传输模块,利用 Wi-Fi 无线传输至控制器终端,田间传输距离大于 10 m。控制器终端采用手机或计算机来浏览光谱检测控制软件。

1.2 软件设计与开发

光谱检测控制软件采用 PHP 语言编写,如图 2 所示,软件包含采集参数设置、采集控制、数据管理 3 个模块。

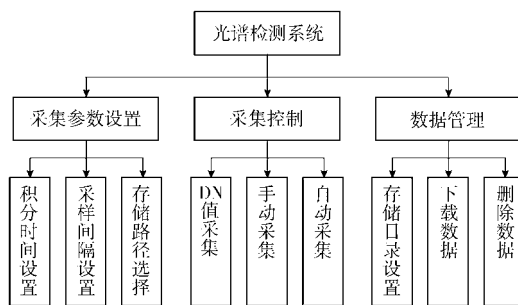


图2 软件模块框图

Fig.2 Software block

在采集参数设置界面,使用者可以根据实验时的光照强度手动调节积分时间(10 μ s ~ 10 s),设置采样平均次数(1 ~ 5 000 次),选择文件存储路径。采集控制模块可以设置自动采集和手动采集 2 种模式。自动采集模式下,可以设置采集时间间隔(大于 50 μ s)并进行自动保存。数据管理模块可以以目录形式查看已保存的 txt 文件,并依据需求选择下载文件或删除错误文本。

使用时,首先连接仪器,开启后根据白板 DN 值设置系统参数,选择使用模式,然后依次测量暗电流、参考值和样品点数据,暗电流为仪器自身噪声,参考值为反射率为 100% 的白板的反射光强 DN 值,样品点数据为叶片反射光强 DN 值,反射率为去除暗噪声之后样品点反射光强 DN 值与白板反射光强 DN 值的比值。

1.3 标定实验

为了验证仪器性能,对作物冠层反射光谱探测

系统进行了标定测试。实验于2016年3月13日在中国农业大学东校区信息与电气工程学院楼顶进行,天气晴朗。实验采用如图3a所示的标准灰度板为测量对象,该灰度板包含4块不同灰度的标准板(从白色到黑色依次为G1、G2、G3、G4),各级标准反射率如图3b所示。

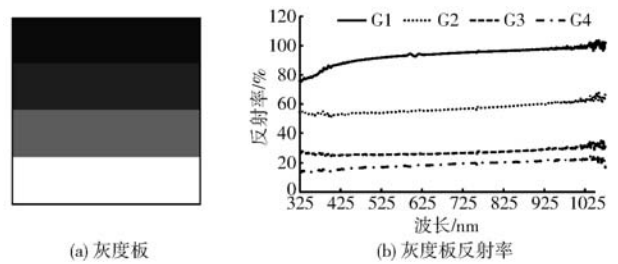


图3 灰度板及其反射率
Fig.3 Spectral reflectance of gray board

实验中,分别对上述各级灰度板进行反射光谱测量,于当日12:00—15:10,每隔10 min进行一次,分析作物冠层反射光谱探测系统所测反射率与ASD FieldSpec HandHeld 2所测反射率间相关性。结果如表1所示,作物冠层反射光谱探测系统测量结果与ASD测量结果决定系数大部分在0.9以上,最高为0.99,平均决定系数为0.94。结果表明,在不同光照情况下,针对多级灰度,自主开发的作物冠层反射光谱探测系统与ASD光谱辐射仪测量结果一致性较高,可以用于玉米冠层反射光谱的采集。

2 大田玉米冠层叶绿素含量诊断

2.1 材料与方法

2.1.1 田间实验

供试玉米植株选自中国农业大学上庄实验站,品种为农大98,生长期为拔节期。实验地块分为80个样区,在各区域中心选取样本植株冠层第3叶为采样叶片。

采集冠层反射光谱时,每次测量前后进行白板标定,测量3次取平均值作为样本反射率。采样叶片装入密封袋并避光保存,带回实验室进行叶绿素含量和含水率的测定。

2.1.2 叶绿素含量测定

叶绿素含量(质量浓度)采用Spectrum 752型紫外可见分光光度计测定。选取玉米叶片中部,剪去主茎,剪碎后称取0.4 g,用体积分数99%的丙酮和无水乙醇以体积比2:1混合,取混合液25 mL,将称取的叶片在混合液中浸泡24 h。在浸泡过程中摇动3次,以加速叶绿素的提取。叶片完全变白后测定645、663 nm处吸光度,测量3次取平均值。根据吸光度计算叶片叶绿素含量,计算式为

表1 作物冠层反射光谱探测系统和ASD测量结果(R^2)
Tab.1 Determination coefficient analyzed between reflectance measured by spectrum detection system and ASD(R^2)

时刻	G1	G2	G3	G4
12:00	0.97	0.98	0.98	0.77
12:10	0.89	0.95	0.92	0.85
12:20	0.84	0.96	0.96	0.85
12:30	0.99	0.99	0.98	0.94
12:40	0.87	0.97	0.95	0.85
12:50	0.99	0.98	0.97	0.94
13:00	0.99	0.98	0.97	0.92
13:10	0.99	0.97	0.97	0.95
13:20	0.99	0.95	0.90	0.72
13:30	0.82	0.81	0.83	0.80
13:40	0.98	0.98	0.98	0.93
13:50	0.99	0.98	0.98	0.88
14:00	0.98	0.98	0.97	0.83
14:10	0.99	0.99	0.98	0.68
14:20	0.99	0.99	0.95	0.74
14:30	0.99	0.98	0.98	0.92
14:40	0.98	0.98	0.97	0.93
14:50	0.98	0.99	0.95	0.84
15:00	0.99	0.99	0.98	0.67
15:10	0.99	0.98	0.98	0.86

$$C_a = 12.72A_{663} - 2.59A_{645} \tag{1}$$

$$C_b = 22.88A_{645} - 4.67A_{663} \tag{2}$$

$$C_t = C_a + C_b \tag{3}$$

式中 C_a ——叶绿素a的含量,mg/L
 C_b ——叶绿素b的含量,mg/L
 C_t ——叶绿素总含量,mg/L
 A ——特定波长处的吸光度

2.1.3 叶片含水率测定

玉米叶片含水率采用干燥法进行测定。首先称量新鲜叶片质量并记录,然后放入干燥箱于75℃杀青,在40℃下干燥至质量恒定,称取并记录干质量。叶片含水率计算公式为

$$C_w = (m_w - m_d) / m_d \times 100\% \tag{4}$$

式中 C_w ——叶片湿基含水率
 m_w ——叶片鲜质量
 m_d ——叶片干质量

2.2 结果与分析

2.2.1 反射光谱随叶片叶绿素含量的变化趋势

采集的80组数据的叶绿素含量范围为34~51 mg/L,均值为43.96 mg/L,方差为10.33,其中数据主要聚集在42~48 mg/L区间。观察了反射率随叶绿素含量变化的趋势,在42~48 mg/L范围内选取42.8、44.2、45.4、47.5 mg/L 4条反射率曲线,如图4所示。总体而言,玉米冠层光谱反射率随叶绿

素含量增加呈上升趋势。但在 350 ~ 820 nm 波段内变化趋势基本相同,在 550 nm 处具有绿色反射峰,650 nm 后反射率急剧上升,在近红外处反射率较高且在 800 nm 处形成反射峰。

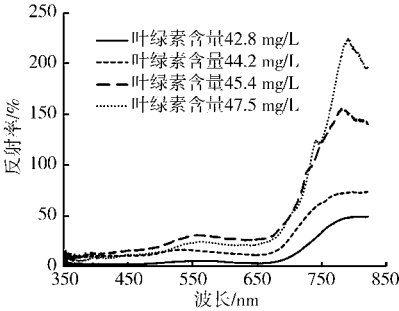


图 4 不同叶绿素含量的反射率曲线对比
Fig.4 Comparison of reflectance curves under different chlorophyll content conditions

由于反射率是在大田环境下测量的,存在土壤背景和相邻叶片散射光等因素的干扰,因此,采用一阶微分进行光谱预处理来提高信噪比^[18]。

分析不同叶绿素含量下一阶微分光谱曲线发现,当叶绿素含量相同或接近时,光谱曲线存在高度重叠或密集交叉现象,这可能与大田环境下光谱数据漂移或光谱对叶绿素含量浓度分辨率有关。为了消减此类误差,利用 SPSS 软件对采集的 80 组数据进行 K-均值聚类分析,该方法以距离作为度量个体之间关系紧密程度的指标,按照距离类中心最近原则把观测量分配到各类中心所在的类中。K-均值聚类分析需要事先给定分类数 k ,通过比较 k 值分别为 60、50、40、30 时的聚类结果,发现 k 值越小,类间距离越大,从而提高建模精度;综合考虑样本个数和建模效果,最终选择 $k = 40$ 对样本集进行聚类,此时迭代次数为 7,初始中心间的最小距离为 0.005。

2.2.2 反射光谱随叶片含水率的变化趋势

测定叶片含水率范围为 64% ~ 76%,均值为 73%,方差为 0.000 3。含水率数据分布较为集中,主要位于 71% ~ 76% 之间(均为质量含水率)。

首先将原始光谱数据按照含水率排序,在 71% ~ 76% 之间聚类了 5 条曲线(71%、72%、73%、74%、76%),其光谱反射率如图 5 所示。整体而言,不同含水率下反射光谱总体变化趋势一致;同时随含水率的升高,反射率呈降低趋势,但是在 500 ~ 650 nm 和 740 ~ 820 nm 波段内不同含水率的曲线出现了交叉反复的现象。

2.2.3 基于一维相关性分析的叶绿素含量诊断

利用线性相关系数分析法分析聚类后的 40 个样本光谱曲线与对应的叶绿素含量间的相关度,得到相关性较强的波段区域。另外,为了消除相近波

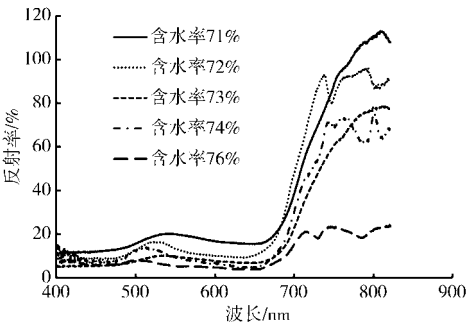


图 5 不同叶片含水率下的光谱曲线
Fig.5 Spectrum curves under different moisture contents

长造成的信息冗余,所选波长需要位于不同的波段。因此,最终选出 480、548、594、652、776、810、819 nm 共 7 个波长。而这些波长大部分落入 500 ~ 650 nm 和 740 ~ 820 nm 范围内。在这 2 个范围内的玉米冠层反射光谱是由叶片叶绿素和水分共同作用的结果。因此,诊断叶绿素含量需要综合考虑水分的干扰作用。

首先仅针对 7 个与叶绿素相关性较高的波长进行分析,利用多元数据拟合对各波长的回归系数进行 T 检验,根据 P 值小于 0.05 的原则筛选出 548、594、652 nm。选取 30 组数据为建模集,10 组为验证集,初步建立玉米叶绿素含量的多元线性回归(Multiple linear regression, MLR)模型为

$$Y = 44.25 + 582.34R_{548} + 766.62R_{594} - 618.97R_{652} \tag{5}$$

式中 Y ——叶绿素含量预测值
 R ——指定波长下的反射率一阶微分值

建模结果如图 6 所示,建模决定系数为 0.43,验证决定系数为 0.36。

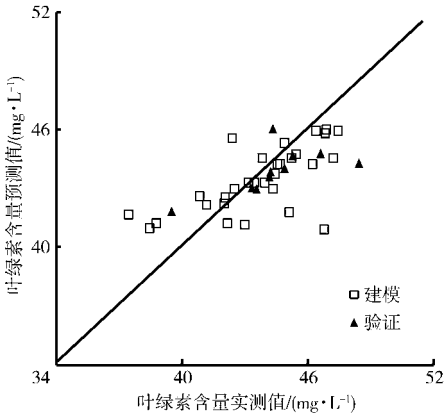


图 6 玉米叶片叶绿素含量一阶微分预测模型
Fig.6 Calibration and validation models of corn leaves chlorophyll concentration predication by first-order differential

2.2.4 基于二维相关性分析的叶绿素含量诊断模型优化

为了讨论叶绿素和水分对反射率的共同作用情况,引入二维相关性分析,基于 Matlab 程序 Mid-

Infrared Data Analysis Software 2010 计算实现^[19]。

(1) 玉米冠层二维光谱特性

按照含水率的递增,划分为 64% ~ 67%、67% ~ 70%、70% ~ 73%、73% ~ 76% 4 个梯度作为扰动信号,针对相应玉米冠层反射光谱绘制二维相关光谱图。图 7 为样本的同步相关光谱和异步相关光谱的等高线图。

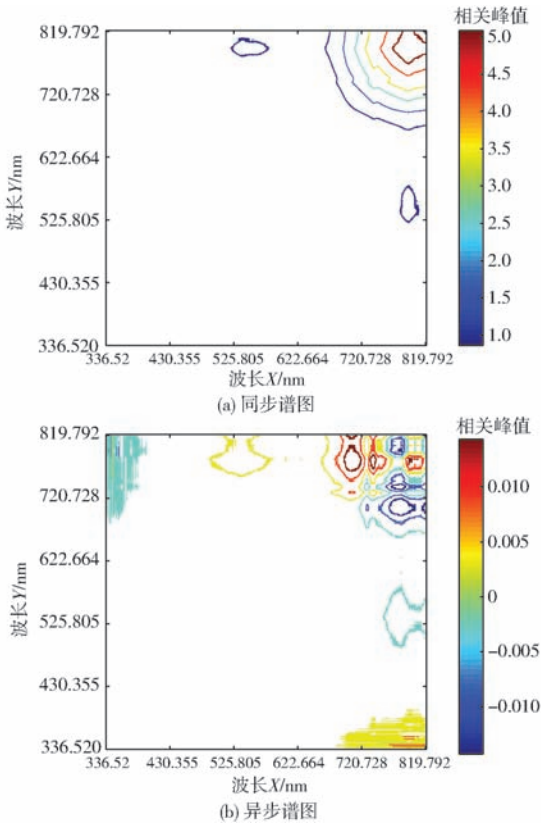


图 7 二维相关光谱等高线图

Fig. 7 Contour maps of two-dimensional correlation spectrum

同步相关光谱关于对角线对称(图 7a),图中光谱曲线在 780 ~ 820 nm 处形成了正的自相关峰,自相关峰对应着光谱强度变化的自相关函数,代表光谱强度在扰动作用下的涨落程度,说明该波段的叶绿素吸收光谱强度随含水率升高而增长的程度较大。同步交叉峰位于对角线外,交叉峰代表了不同位置光谱信号的同步变化,说明两者间对外部扰动有相互作用或协同响应。在 530 ~ 580 nm 处存在同步负交叉峰说明叶绿素和水分的响应相反,水分对叶绿素含量诊断具有抑制作用,选择敏感波段时需要避开该波段。

异步相关光谱关于对角线反对称(图 7b),异步交叉峰代表了 2 个不同位置测得的光强变化次序或变化的不同步特征。其中,负相关峰出现在 (790 nm, 360 nm)、(790 nm, 753 nm) 处,正相关峰出现在 (753 nm, 690 nm)、(810 nm, 790 nm) 处,当同步相关

光谱对应位置的强度为正时,正的异步交叉峰表示 790 nm 处的强度变化总是先于 360 nm 和 753 nm 处的强度变化,而负的表示 810 nm 处的强度变化总是滞后于 790 nm 处的强度变化。

(2) 玉米叶片叶绿素含量预测优化模型

结合一维相关性分析和二维相关光谱图分析结果,对叶绿素含量敏感波段进行优化。在一维相关性分析初步提出的 7 个波长 (480、548、594、652、776、810、819 nm) 中,落入二维同步谱图正相关峰叶绿素含量敏感波段 780 ~ 820 nm 内的波长 810 nm 和 819 nm 可作为敏感参数,但二者之间相关系数达 0.9;而 548 nm 位于同步谱图负交叉峰 530 ~ 580 nm 内,应该进行剔除以减少水分的干扰作用。其他波长中,480、594、652、776 nm 均未落入上述范围,说明反射光谱与水分关系较小。因此,重新利用 480、594、652、776、810、819 nm 对基于一维相关性分析初步建立的玉米叶绿素含量模型进行修正。

设定 T 检验和 F 检验的置信区间为 95%,经波长交叉验证和回归系数检验,确立检测波长为 480、594、652、819 nm。选取 30 个样本建模,10 个样本验证,建立玉米叶片叶绿素含量诊断 MLR 模型,结果如图 8 所示,建模决定系数为 0.47,验证决定系数为 0.34。优化模型精度较初建模型有所提高。其表达式为

$$Y = 43.16 + 913.89R_{480} - 538.91R_{594} - 481.45R_{652} - 85.98R_{819} \quad (6)$$

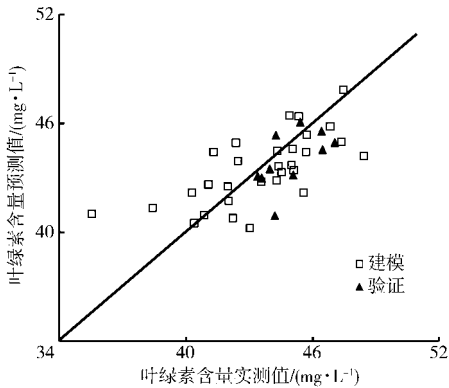


图 8 玉米叶片叶绿素含量二维相关分析预测模型

Fig. 8 Calibration and validation models of corn leaves chlorophyll concentration predication by two-dimensional correlation analysis

由于实验目的是对自主开发系统性能进行初步验证,对实验数据的统计和挖掘工作尚有不足,优化校正模型精度提高幅度不明显,后续会采集更多的实验数据,并尝试其他化学计量学方法进行分析和建模。

3 结论

(1) 设计了一套用于玉米的轻量级冠层反射光

谱探测系统,标定实验表明,其测量结果与 ASD 反射率数据的平均决定系数为 0.94。

(2)分析了玉米冠层反射率随叶绿素含量和含水率变化而变化的趋势,并针对叶绿素含量分别进

行了一维和二维相关光谱分析。结合二者分析结果,选取 480、594、652、819 nm 为敏感波长,建立叶绿素含量诊断 MLR 优化模型,其建模决定系数为 0.47,验证决定系数为 0.34。

参 考 文 献

- 薛利红,曹卫星,罗卫红,等.小麦叶片氮素状况与光谱特性的相关性研究[J].植物生态学报,2004,28(2):172-177.
XUE Lihong, CAO Weixing, LUO Weihong, et al. Correlation between leaf nitrogen status and canopy spectral characteristics in wheat[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(2): 172-177. (in Chinese)
- 李修华,李民赞,崔笛.基于光谱学原理的无损式作物冠层分析仪[J].农业机械学报,2009,40(增刊):252-255.
LI Xiuhua, LI Minzan, CUI Di. Non-destructive crop canopy analyzer based on spectral principle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 252-255. (in Chinese)
- 钟振江,李民赞,孙红,等.作物营养智能检测仪设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(增刊2):215-219.
ZHONG Zhenjiang, LI Minzan, SUN Hong, et al. Development and application of a smart apparatus for detecting crop nutrition [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2): 215-219. (in Chinese)
- CAMPBELL P K E, MIDDLETON E M, MCMURTREY J E, et al. Assessment of vegetation stress using reflectance or fluorescence measurements [J]. Journal of Environmental Quality, 2007, 36(3):832-845.
- SINGH S K, HOYOS-VILLEGAS V, RAY J D, et al. Quantification of leaf pigments in soybean (*Glycine max*, (L.) Merr.) based on wavelet decomposition of hyperspectral features[J]. Field Crops Research, 2013, 149(2):20-32.
- ATZBERGER C, GUÉRIF M, BARET F, et al. Comparative analysis of three chemometric techniques for the spectroradiometric assessment of canopy chlorophyll content in winter wheat[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2010, 73(2):165-173.
- 何勇,彭继宇,刘飞,等.基于光谱和成像技术的作物养分生理信息快速检测研究进展[J].农业工程学报,2015,31(3):174-189.
HE Yong, PENG Jiyu, LIU Fei, et al. Critical review of fast detection of crop nutrient and physiological information with spectral and imaging technology [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3):174-189. (in Chinese)
- SIMS D A, GAMON J A. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(4):526-537.
- GUERFEL M, BACCOURI O, BOUJNAH D, et al. Impacts of water stress on gas exchange, water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 119(3):257-263.
- ZHANG Q, LI Q, ZHANG G, et al. Rapid determination of leaf water content using VIS/NIR spectroscopy analysis with wavelength selection[J]. Spectroscopy, 2012, 27(2):93-105.
- 姚艳荣,贾秀领,张丽华,等.水分运筹对不同冬小麦品种旗叶叶绿素含量的影响[J].华北农学报,2008,23(4):135-139.
YAO Yanrong, JIA Xiuling, ZHANG Lihua, et al. Irrigation management effects on chlorophyll content of flag leaf for different winter wheat cultivars[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(4):135-139. (in Chinese)
- 王娟,郑国清.夏玉米冠层反射光谱与植株水分状况的关系[J].玉米科学,2010,18(5):86-88.
WANG Juan, ZHENG Guoqing. Relationships between canopy reflectance and plant water status of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2010, 18(5):86-88. (in Chinese)
- 贾夏,李栋,魏阿宝.温度和水分对存储菠菜叶绿素 a、b 含量的影响[J].湖南农业科学,2010,49(13):106-109.
JIA Xia, LI Dong, WEI Abao. Impacts of temperature and moisture on content of chlorophyll a, b in spinach during storage[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2010, 49(13):106-109. (in Chinese)
- 张瑶,郑立华,孙红,等.基于二维相关光谱的水体叶绿素含量探测[J].光谱学与光谱分析,2014,34(2):389-393.
ZHANG Yao, ZHENG Lihua, SUN Hong, et al. Detection of chlorophyll content in water body based on two-dimensional correlation spectroscopy[J]. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2014, 34(2):389-393. (in Chinese)
- 窦晓鸣,袁波,赵海鹰,等.广义二维相关光谱及其在分析领域中的应用[J].中国科学,2003,33(6):449-458.
- 郁露,孙素琴,周群,等.白芥子炒制过程的红外及二维相关光谱研究[J].光谱学与光谱分析,2006,26(12):2181-2185.
YU Lu, SUN Suqin, ZHOU Qun, et al. Research on parching procedure of white mustard seed with fourier transform infrared spectroscopy and two-dimensional IR correlation spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(12):2181-2185. (in Chinese)
- 宋海燕,程旭.水分对土壤近红外光谱检测影响的二维相关光谱解析[J].光谱学与光谱分析,2014,34(5):1240-1243.
SONG Haiyan, CHENG Xu. Analysis of the effect of moisture on soil spectra detection by using two-dimensional correlation near infrared spectroscopy [J]. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2014, 34(5):1240-1243. (in Chinese)
- CLOUTIS E A. Hyperspectral geological remote sensing: evaluation of analytical techniques [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(12):2215-2242.
- HUGHES A, REEVES M, LIU Z. Scikit-spectra: explorative spectroscopy in python[J]. Journal of Open Research Software, 2015, 3(1):e6.