

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.037

基于多波段光谱探测仪的玉米冠层叶绿素含量诊断*

刘豪杰¹ 赵毅² 文瑶¹ 孙红¹ 李民赞^{1,2} Zhang Qin³

- (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;
3. 华盛顿州立大学精细农业及农业自动化研究中心, 华盛顿 99350)

摘要: 为了快速无损地检测大田作物冠层叶绿素含量,使用便携式多波段光谱探测仪针对农大8号(G1)、郑单(G2)、先玉(G3)和京农科(G4)4种玉米作物品种,在拔节期采集550、650、766、850 nm波长处太阳光信号和作物冠层反射光信号,用于建立玉米冠层叶绿素含量诊断模型。首先,利用作物冠层650 nm和550 nm波长反射率之间的差值 T_b 剔除了土壤背景数据点($T_b > 0$)。然后,组合计算了NDVI、RVI和DVI共12个植被指数,分析各植被指数与叶绿素含量之间的相关关系,结果显示与G1~G4品种叶绿素含量相关性最优的参数分别为RVI(766,550)、DVI(850,650)、NDVI(850,550)和RVI(766,550),相关系数均达0.6以上。数据按一定间隔聚类后,相关性分析结果表明多波段光谱探测仪对玉米叶绿素含量检测最优分辨率为0.5 mg/L,且NDVI(850,550)、NDVI(766,550)和RVI(850,550)与叶绿素含量的相关系数分别为0.837 0、0.773 7和0.767 7,达到了强相关水平。最后,建立了多品种通用型玉米拔节期叶绿素含量诊断模型,可为大田玉米拔节期叶绿素含量诊断提供技术支持。

关键词: 叶绿素含量 植被指数 冠层反射率 多光谱检测仪

中图分类号: S237; TP216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0228-06

Diagnosis of Chlorophyll Content in Corn Canopy
Leaves Based on Multispectral Detector

Liu Haojie¹ Zhao Yi² Wen Yao¹ Sun Hong¹ Li Minzan^{1,2} Zhang Qin³

- (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,
China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. Center for Precision and Automated Agricultural Systems, Washington State University, Washington 99350, USA)

Abstract: In order to rapidly detect the nutrition content of crop, a portable multispectral detector was developed. The detector was composed of a controller and an optical sensor node, which communicated with each other through the ZigBee protocol. The optical sensor node can measure both the intensity of solar light and crop reflective light at 550 nm, 766 nm, 650 nm and 850 nm wavebands, respectively. The control unit is a PDA, in which a ZigBee wireless communication module is embedded. As the coordinator of the whole wireless sensor network, the ZigBee wireless communication module is responsible for receiving, processing and displaying the spectral data transmitted by the measuring unit. The objective of the research was to assess the agronomic performance of the detector, i. e., the accuracy of chlorophyll content estimation when using the instrument in different arable crops. Field experiments were conducted on four varieties of corn (Nongda No. 8 (G1), Zhengdan (G2), Xianyu (G3) and

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-19

* 农业部引进国际先进农业科学技术计划(948计划)资助项目(2011-G32)、北京市科技计划资助项目(D151100004215002)和海外名师资助项目

作者简介: 刘豪杰, 硕士生, 主要从事光谱检测传感器技术研究, E-mail: hjliu267@163.com

通讯作者: 孙红, 副教授, 主要从事农业信息获取技术研究, E-mail: sunhong@cau.edu.cn

Jingnongke (G4)). Crop canopy reflectance was measured by the detector at jointing stage. The chlorophyll contents of sampling leaves were measured by the spectrophotometer in the laboratory. According to the typical spectral characteristics of crop and soil, the differences of reflectance between 550 nm and 650 nm (T_b) were used to remove the soil background data points ($T_b > 0$). Furthermore, combinations of R_{nir} and $R_r((850, 550), (850, 650), (766, 550)$ and $(766, 650))$ were used to calculate vegetation indices, including DVI, NDVI and RVI. Relationship between each vegetation index and chlorophyll content of each variety was analyzed. The results showed that the optimal parameters of G1 ~ G4 were RVI (766, 550), DVI (850, 650), NDVI (850, 550) and RVI (766, 550), respectively, and the correlation coefficients were above 0.6. The chlorophyll content of the four varieties was clustered respectively at intervals of 0.2 mg/L, 0.5 mg/L and 0.8 mg/L. The correlation analysis results showed that the optimal resolution of the multispectral detector for detecting chlorophyll content of corn was 0.5 mg/L. The correlation coefficients of NDVI (850, 550), NDVI (766, 550) and RVI (850, 550) and chlorophyll content were 0.837 0, 0.773 7 and 0.767 7, respectively. The NDVI (850, 550) and RVI (850, 550) were selected to establish the diagnosis model with R_c^2 of 0.715 4 and R_v^2 of 0.684 0. The research could provide theoretical and technical support for the diagnosis of chlorophyll content of corn at jointing stage.

Key words: Chlorophyll content Vegetation index Canopy reflectance Multispectral detector

引言

快速获取并监测反映农田作物生长情况的叶绿素含量,可为农田精细管理决策提供数据支持,对提高资源利用率并减少环境污染具有重要意义。

传统叶绿素含量测定需要破坏性采样并进行化学分析测量,费时、费力。现代光谱分析技术研究发现,植物叶绿素、水分等成分对光线具有明显的吸收和反射特性,而叶绿素含量的变化会导致叶片或冠层反射光谱特征的变化^[1-2]。因此,利用光谱学传感器可快速、无损地获取并分析田间作物叶绿素含量指标。

基于光谱分析技术,学者们已经针对水稻、玉米等作物的叶绿素、氮素营养诊断机理和方法开展了大量研究^[3-5]。Tumbo 等利用比值植被指数(RVI)预测玉米 V6 生长期的叶绿素含量($R = 0.94$)^[6]。Thomas 等利用 550 nm 处光谱反射率对甜椒叶片含氮量进行检测^[7]。孙红等指出玉米拔节期和喇叭口期是光谱诊断的敏感时期,并采用 714 nm 和 558 nm 差值植被指数(DVI)检测叶绿素含量^[8]。李树强等提出一种基于 550 nm 和 650 nm 处反射率的动态光谱指数,用于诊断玉米苗期冠层或叶片营养状态^[9]。郭志顶等认为归一化植被指数(NDVI)可用于玉米冠层叶绿素含量监测与追肥指导^[10]。徐新刚等指出高光谱反射曲线斜率和夹角等新型的特征参数与作物叶片氮含量显著相关^[11]。

基于理论研究形成的一些敏感波长和植被指数,已经指导开发了多种作物冠层分析仪。具有典

型代表性的有:Marvin L Stone 设计的主动光源式光谱反射率测量传感器与控制器装置 Green Seeker^[12],通过采集目标在红光(656 nm)与近红外(770 nm)处作物反射光信号计算 NDVI 来分析作物长势;日本 Topcon 公司开发的 Cropspec 采用 808 nm 和 753 nm 处反射光计算 RVI,经线性变换后用于检测田间作物冠层叶绿素分布情况。

国内,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先后设计了两代基于红光与近红外 2 个波段冠层反射率的作物长势监测仪,检测作物 NDVI 等植被指数^[13]。进而又开发了多波段光谱探测仪,获取 4 个波长处的作物反射光信号^[14-15],可组合计算多种植被指数。应用该仪器已经对小麦的叶绿素含量进行了检测,初步构建了检测模型。但由于不同作物、不同品种在关键生长阶段条件下的光谱学特征也有所不同,因此本文利用实验室开发的多波段光谱探测仪,针对 4 种不同品种的玉米作物,在拔节期采集冠层反射光信号,计算多种植被指数,寻找适于不同品种玉米作物的叶绿素含量检测参数,建立应用范围更为广泛的叶绿素含量诊断模型,以期对玉米拔节期田间精细化管理提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 多波段作物冠层光谱数据采集仪器

试验采用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开发的便携式多波段光谱探测仪获取玉米作物冠层反射光谱。该仪器硬件结构

示意图如图 1 所示,包括测量单元和控制单元两部分。

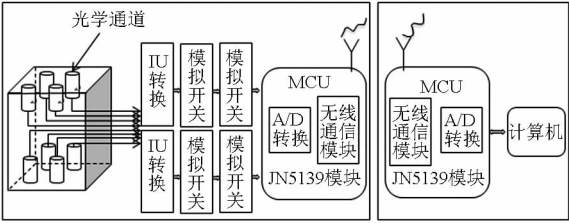


图 1 硬件结构示意图

Fig. 1 Block diagram of hardware structure

其中,测量单元由光学通道、信号调理电路、微控制器和相应外围电路组成。光学通道包括 4 组上行和下行通道,分别采集可见光和近红外光(550、650、766、850 nm)4 个波长处太阳光信号和作物冠层反射光信号。采用 4:1 模拟开关 ADG704 对 4 路光信号进行选择,以便对放大电路进行分时复用,放大电路采用 3 V 单电源供电的低功耗运算放大器 OPA333。经放大、滤波、A/D 转换为数字信号后进入微控制器。微控制器采用 JENNIC 公司生产的 JN5139 模块。该模块内嵌了 ZigBee 无线通信协议及天线接口,可以实现快捷组网无线通信功能,将采集的数字信号发送至控制单元。

控制单元为一台内嵌 ZigBee 模块的 PDA。它一方面作为 ZigBee 网络的协调器,负责建立管理无线网络并接受若干个测量单元节点发送的数据;另一方面内嵌控制软件,可实现数据的显示、存储和分类管理等功能。

1.2 田间试验

试验于 2015 年 7 月在北京市海淀区中国农业大学上庄试验农场进行。试验田分为 4 个试验区,分别种植 4 种不同品种的玉米,分别为农大 8 号(G1)、郑单(G2)、先玉(G3)和京农科(G4)。株间距约为 60 cm,生长物候期为拔节期。测试当天天气晴好,于 10:00—14:00 进行数据采集。在每个品种 20 m × 10 m 的种植区域内选取 20 个采样区,采集玉米冠层叶片反射光谱数据并进行叶片采样,带回实验室用分光光度法测量叶片的叶绿素含量。

利用多波段光谱探测仪采集叶片反射光谱时,将测量单元固定在垂直支架上,距离作物冠层 30 cm,同步获取 4 组光学通道数据,并在每次采集目标光谱前后利用白板进行校正。每个采样区移动测量,采集 10 个采样点的数据,经数据判别,删除非作物冠层光谱数据,对保留下来的数据取平均值作为该采样区的作物冠层光谱数据。对各采样点同步进行 GPS 记录,保证每次试验采样点位置一致。

1.3 植被指数计算

传感器测得可见光特征波长处太阳入射光的电

信号为 E_s 、对应波长植被反射光的电信号为 E_p 、近红外光特征波长处太阳入射光的电信号为 E_{nirs} 、对应波长植被反射光的电信号为 E_{nirp} ,则有

$$R_{nir} = k_{nir} \frac{E_{nirp}}{E_{nirs}} \quad R_r = k_r \frac{E_p}{E_s}$$

式中, k_{nir} 和 k_r 为比例常数,由装置的光学系统、光电探测及其适配放大器的特性决定。 R_{nir} 为近红外光特征波长处的反射率; R_r 为可见光特征波长处的反射率。

为寻找适于玉米拔节期叶绿素含量诊断的植被指数,研究依据冠层在可见光与近红外光处反射率的不同组合,分别计算比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)和差值植被指数(DVI),计算公式分别为

$$R_{VI} = R_{nir}/R_r$$
$$N_{DVI} = \frac{R_{nir} - R_r}{R_{nir} + R_r}$$
$$D_{VI} = R_{nir} - R_r$$

1.4 叶绿素含量测定

将田间采集叶片样本装在密封袋带回实验室,于当日测定其叶绿素含量。测定之前,首先去除叶片主茎,再将叶片剪碎混匀,称取 0.4 g 用 99% 的丙酮和无水乙醇 2:1 的混合液 25 mL 浸泡 24 h。在浸泡过程中摇动 3 次,以加速叶绿素的提取。取萃取液用分光光度计分别测定 645 nm 和 663 nm 处的吸光度。计算公式为

$$C_a = 12.72A_{663} - 2.59A_{645}$$
$$C_b = 22.88A_{645} - 4.67A_{663}$$

式中 A_{645} 、 A_{663} ——645 nm 和 663 nm 波长处的吸光度
 C_a 、 C_b ——叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量, mg/L
将 C_a 和 C_b 相加即得叶绿素总量 C_T 。

对上述冠层光谱数据采集仪器采集的电信号和叶绿素含量的测定数据进行处理。首先基于电信号计算作物冠层在敏感波段的反射率;然后根据反射率对采集的数据进行有效性判别,去除非作物光谱数据,利用保留下来的数据计算植被指数。通过植被指数与叶绿素含量相关性分析来选取适于玉米拔节期叶绿素诊断的敏感参数,并建立线性回归模型。

2 结果分析与讨论

2.1 非作物冠层光谱数据剔除

由于对每个采样区移动式采集 10 组数据,因此采集到的数据中可能存在个别点为株间土壤背景,而非玉米冠层数据。因此需要进行采集数据判别,来剔除非作物冠层光谱数据,保证后续分析数据均为玉米冠层反射光谱数据。

常见绿色作物和土壤在 400 ~ 900 nm 范围内的反射光谱曲线如图 2 所示。其中,550 nm 波长附近是叶绿素的绿色强反射峰区,作物反射率接近或高于 0.1;610 ~ 660 nm 为作物色素体如叶绿素、类胡萝卜素和藻蓝素等的强吸收带,作物反射率低于 0.1;而在 700 ~ 750 nm 作物反射率急剧上升,随后 750 ~ 850 nm 作物反射率保持平稳。而土壤反射率在 400 ~ 850 nm 范围内均呈缓慢上升趋势,反射率低于 0.15。鉴于以上作物和土壤的反射光谱特征,应用多波段光谱探测仪采集可见光和近红外(550、650、766、850 nm) 4 个波长处太阳光信号 (E_s 和 E_{nirs}) 和作物冠层反射光信号 (E_p 和 E_{nirp}) 时,利用作物冠层在 650 nm 和 550 nm 波长处反射率差值 T_d 进行作物和土壤数据判别。当 $T_d > 0$, 说明 650 nm 处反射率大于 550 nm 处,则为土壤背景,剔除该数据点;当 $T_d < 0$, 说明 650 nm 处反射率小于 550 nm 处,满足作物反射光谱特征,保留该数据点。进而对保留下来的数据取平均作为该采样区的作物冠层反射光谱数据值。

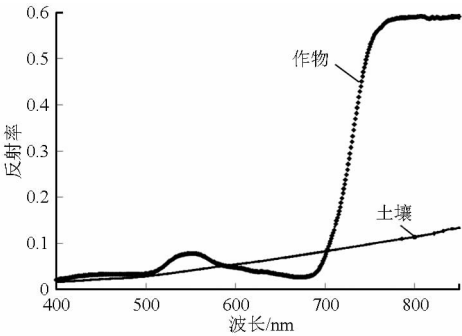


图 2 常见作物土壤光谱特征

Fig. 2 Spectral reflectances of crop and soil

2.2 不同玉米品种植被指数与叶绿素含量间相关性初步分析

应用多波段光谱探测仪采集可见光和近红外(550、650、766、850 nm)处反射光光谱数据,经非作物冠层光谱数据剔除处理后,采用(850,550)、(850,650)、(766,550)和(766,650)4种波段的组合,组合计算 RVI、NDVI 和 DVI 共 12 个植被指数参数。

对农大 8 号(G1)、郑单(G2)、先玉(G3)和京农科(G4)4 种玉米品种,冠层采样叶片叶绿素含量测定值的统计结果如表 1 所示。4 种品种总体叶绿素含量均值为 44.77 mg/L,最大值和最小值分别为 50.25 mg/L 和 29.11 mg/L。

为寻找适于不同品种玉米作物叶绿素含量检测的参数,首先对每个采样区内的所有采样叶片的叶绿素含量数据取平均作为该采样区的叶绿素含量。然后初步分析各采样区植被指数与采样区叶绿素含

量之间的相关关系。结果如表 2 所示。

由表 2 可知,针对 4 种品种,G1 中,RVI(766,550)与叶绿素含量的相关性最好,相关系数为 0.610 9;G2 中,DVI(850,650)与叶绿素含量的相关性最好,相关系数为 0.771 6;G3 中,NDVI(850,550)与叶绿素含量相关性最好,相关系数为 0.667 5;G4 中,RVI(766,550)与叶绿素含量的相关性最好,相关系数为 0.658 5。上述结果表明,对处于拔节期的 4 种不同品种玉米,均可利用该多波段光谱探测仪获取玉米作物冠层反射光谱,并选取相应波段组合构建的植被指数为参数,分别建立一元线性回归模型诊断叶绿素含量。尽管如此,为了建立适于不同玉米品种拔节期的叶绿素含量诊断模型,仍需继续选取多品种通用型的叶绿素含量诊断参数。

表 1 玉米冠层叶片叶绿素含量质量浓度
Tab.1 Mass concentration of chlorophyll content in corn canopy leaves mg/L

参数	G1	G2	G3	G4
最大值	47.89	50.25	47.76	49.86
最小值	34.84	40.64	29.11	42.41
均值	43.75	45.92	42.34	47.09

表 2 不同玉米品种植被指数与叶绿素含量的相关性分析(R)
Tab.2 Correlation analysis of vegetation index and chlorophyll content for different corn varieties (R)

植被指数	G1	G2	G3	G4
NDVI(850,550)	0.579 6	0.502 6	0.667 5	0.597 3
NDVI(850,650)	0.563 1	0.370 5	0.260 2	0.471 2
NDVI(766,550)	0.606 8	0.437 7	0.533 8	0.524 5
NDVI(766,650)	0.524 6	0.545 3	-0.091 9	0.460 3
RVI(850,550)	0.494 2	0.506 6	0.554 1	0.588 2
RVI(850,650)	0.457 9	0.663 7	0.474 0	0.306 4
RVI(766,550)	0.610 9	0.246 1	0.396 4	0.658 5
RVI(766,650)	0.496 9	0.463 1	-0.080 8	0.453 4
DVI(850,550)	0.129 4	0.746 2	0.524 1	0.430 1
DVI(850,650)	0.126 1	0.771 6	0.477 1	0.394 1
DVI(766,550)	-0.288 5	-0.010 1	0.261 3	0.507 6
DVI(766,650)	-0.293 5	0.043 4	0.249 5	0.513 8

2.3 通用型叶绿素含量诊断植被指数参数选取

为了选取适于多种品种玉米作物叶绿素含量诊断的参数,将上述 4 种品种所获取的数据进行混合,再分析数据混合之后的(850,550)、(850,650)、(766,550)和(766,650)4 种波长组合方式的 RVI、NDVI 和 DVI 共 12 个植被指数参数与叶绿素含量间的相关性。分析结果如表 3 所示。结果显示,总体而言对于(850,550)、(850,650)、(766,550)和(766,650)4 种波长组合方式,RVI、NDVI 与叶绿素

含量间相关系数普遍高于 DVI, 其中 NDVI (850, 550) 与叶绿素含量相关系数最高为 0. 675 0, 其它均低于 0. 6。

依照表 1 所示的作物冠层采样叶片叶绿素含量统计结果, 数据值位于 [29, 51] 区间范围内, 4 种品种总体叶绿素含量均值为 44. 77 mg/L, 最大值和最小值分别为 50. 25 mg/L 和 29. 11 mg/L。由此可知, 通常对各类化学成分测量精度要求达到百万分之一 (即 ppm 级), 因此, 利用多波段光谱探测仪检测玉米冠层叶绿素含量, 检测精度应至少满足 1 mg/L。

研究进一步对叶绿素含量值分别以 0. 2、0. 5、0. 8 mg/L 为间隔进行聚类, 然后分别分析以各间隔聚类后, 各波段组合的植被指数均值与叶绿素含量均值间的相关性, 结果如表 3 所示。

表 3 通用型叶绿素含量诊断植被指数参数选取 (R)
Tab.3 Selection of common type vegetation index parameters for diagnosis of chlorophyll content (R)

	(G1 ~ G4)	0. 2 mg/L	0. 5 mg/L	0. 8 mg/L
植被指数	混合原始数据	间隔聚类数据	间隔聚类数据	间隔聚类数据
NDVI (850, 550)	0. 675 0	0. 513 7	0. 837 0	0. 806 4
NDVI (850, 650)	0. 399 1	0. 555 7	0. 598 9	0. 573 0
NDVI (766, 550)	0. 502 2	0. 612 5	0. 773 7	0. 717 1
NDVI (766, 650)	0. 238 0	0. 272 1	0. 330 7	0. 292 4
RVI (850, 550)	0. 586 8	0. 693 0	0. 767 7	0. 736 8
RVI (850, 650)	0. 425 6	0. 567 4	0. 653 0	0. 710 8
RVI (766, 550)	0. 504 0	0. 626 1	0. 728 2	0. 670 8
RVI (766, 650)	0. 237 8	0. 285 9	0. 349 1	0. 332 6
DVI (850, 550)	0. 387 6	0. 521 6	0. 588 8	0. 629 2
DVI (850, 650)	0. 337 8	0. 462 7	0. 532 9	0. 552 9
DVI (766, 550)	0. 174 0	0. 221 6	0. 294 1	0. 385 7
DVI (766, 650)	0. 123 0	0. 170 0	0. 252 3	0. 347 0

结果表明, 数据聚类后相关系数均较原始数据有所提高。且就整体而言, 随着聚类间隔的增大, 植

被指数与叶绿素含量间相关系数呈增大趋势。这一现象本质与聚类间隔增加, 数据分析样本点减少有关。但以 0. 5 mg/L 为间隔聚类较以 0. 3 mg/L 为间隔聚类相关系数均值提高 10. 03%; 而以 0. 8 mg/L 为间隔聚类较以 0. 5 mg/L 为聚类相关系数均值仅提高 0. 40%, 影响不显著。且 NDVI 和 RVI 等植被指数与叶绿素含量的相关系数都呈下降趋势。由此可知, 本多波段光谱探测仪对玉米叶绿素含量的诊断的最优分辨率为 0. 5 mg/L 左右, 满足检测精度要求。

同时, 各聚类计算中, (850, 550) 波长组合计算的 RVI、NDVI、DVI 与叶绿素含量间相关系数均高于同一植被指数的其它波长组合方式, 说明 550 nm 和 850 nm 2 个波长较适合于多种玉米品种的叶绿素含量诊断。其中以 0. 5 mg/L 为间隔进行聚类时, NDVI (850, 550)、NDVI (766, 550) 和 RVI (850, 550) 与叶绿素含量的相关系数分别为 0. 837 0、0. 773 7 和 0. 767 7, 达到强相关水平。因此, 它们被选为适于多品种的通用型玉米叶绿素含量诊断植被指数参数。

2.4 多品种通用型玉米拔节期叶绿素含量诊断

研究分别将 NDVI (850, 550) 和 RVI (850, 550)、NDVI (850, 550) 和 NDVI (766, 550) 2 组数据作为通用型玉米拔节期叶绿素含量诊断参数, 对以 0. 5 mg/L 间隔聚类后 26 组数据进行回归分析, 其中 18 组用于建模, 8 组用于验证, 建立适于多品种的玉米拔节期叶绿素含量多元线性回归 (MLR) 诊断模型, 分别为:

模型 1

$$Y = 68.749X_{NDVI(850,550)} - 0.567X_{RVI(850,550)} - 9.878$$

模型 2

$$Y = 14.208X_{NDVI(850,550)} - 14.384X_{NDVI(766,550)} - 13.015$$

式中, Y 为玉米冠层叶绿素含量预测值, $X_{NDVI(850,550)}$ 、 $X_{RVI(850,550)}$ 和 $X_{NDVI(766,550)}$ 分别为对应波段组合的 NDVI 和 RVI 值。建立模型结果如图 3 所示, 模型 1

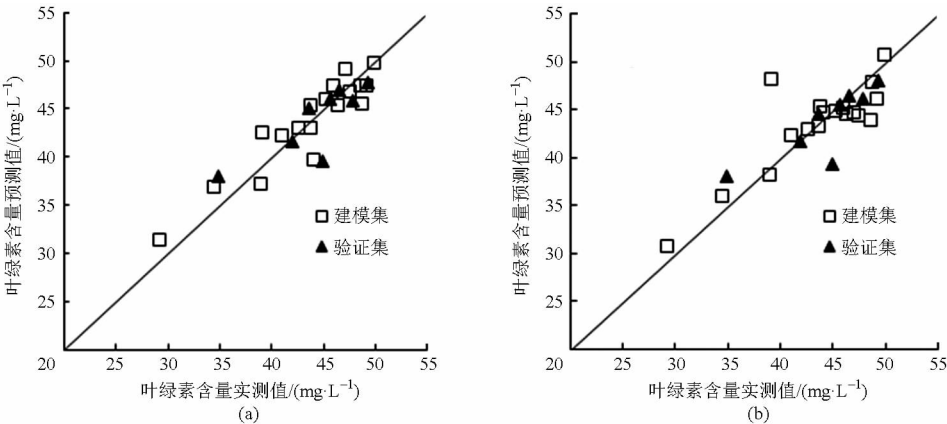


图 3 多品种通用性叶绿素含量预测模型
Fig.3 Prediction models of chlorophyll content for multivariety

(a) 以 NDVI(850,550) 和 RVI(850,550) 为参数建模 (b) 以 NDVI(850,550) 和 NDVI(766,550) 为参数建模

建模决定系数 $R_c^2 = 0.715\ 4$, 验证决定系数 $R_v^2 = 0.684\ 0$ 。模型 2 建模决定系数 $R_c^2 = 0.715\ 8$, 验证决定系数 $R_v^2 = 0.688\ 0$ 。

结果表明,2 个模型均能较好地对拔节期玉米冠层叶绿素含量进行诊断。虽然模型 2 精度略高,但是它的诊断参数 NDVI(850,550) 和 NDVI(766,550) 包含了 550、766、850 nm 3 个波长的信息,模型 1 的诊断参数 NDVI(850,550) 和 RVI(850,550) 仅包含 550 nm 和 850 nm 2 个波长的信息,模型 2 需要测量的波长多了 1 个,增加了测量工作量。因此综合比较,推荐使用模型 1 对多品种拔节期玉米冠层叶绿素含量进行诊断。

尽管如此,由于本模型针对的是分辨率为 0.5 mg/L 条件下叶绿素含量值,未来仍需要通过系统改进和大量田间试验,不断提高诊断分辨率和模型精度,为田间玉米作物精细管理提供技术支持。

3 结论

为快速诊断玉米作物冠层叶绿素含量,应用实验室开发的便携式多波段光谱探测仪,针对农大 8 号(G1)、郑单(G2)、先玉(G3)和京农科(G4)4 种玉米作物品种,在拔节期采集作物冠层在 550、650、766、850 nm 波长处太阳光和作物反射光信号。提出了非绿色作物冠层光谱数据剔除算法,计算了多

种植被指数,选取了适于不同品种玉米作物叶绿素含量检测的参数。通过对该光谱探测仪适用精度的讨论,最终建立了多品种玉米通用型叶绿素含量诊断模型。研究结论如下:

(1) 提出采用 650 nm 和 550 nm 波长处反射率之间差值 T_b 来判别作物和土壤样本数据,从而实现了土壤背景数据点($T_b > 0$)的剔除。基于作物冠层在各波段处的反射率,分别组合计算了 NDVI、RVI 和 DVI 共 12 个植被指数,并分析了它们与叶绿素含量之间的相关关系。结果显示,与 G1 ~ G4 品种叶绿素含量相关性最优的参数分别为 RVI(766,550)、DVI(850,650)、NDVI(850,550) 和 RVI(766,550),相关系数均达 0.6 以上。

(2) 针对 4 种玉米作物品种,对叶绿素含量值以 0.2、0.5、0.8 mg/L 为间隔聚类,分析了多波长组合光谱植被指数在不同聚类间隔下,与叶绿素含量均值间的相关性。结果表明多波段光谱探测仪对玉米叶绿素含量诊断的最优分辨率为 0.5 mg/L。

(3) 针对多品种玉米作物,NDVI(850,550)、NDVI(766,550) 和 RVI(850,550) 与叶绿素含量的相关系数分别为 0.837 0、0.773 7 和 0.767 7,达到强相关水平。进而研究建立了基于 NDVI(850,550) 和 RVI(850,550) 的多品种通用型玉米拔节期叶绿素含量 MLR 诊断模型($R_c^2 = 0.715\ 4$, $R_v^2 = 0.684\ 0$)。

参 考 文 献

- 1 Filella I, Serrano L, Serra J, et al. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis[J]. Crop Science, 1995, 35(5): 1400 - 1405.
- 2 李民赞, 韩东海, 王秀. 光谱分析技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 180 - 194.
- 3 田永超, 朱艳, 姚霞, 等. 基于光谱信息的作物氮素营养无损监测技术[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1454 - 1463.
Tian Yongchao, Zhu Yan, Yao Xia, et al. Non-destructive monitoring of crop nitrogen nutrition based on spectral information[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(9): 1454 - 1463. (in Chinese)
- 4 郭建华, 赵春江, 王秀, 等. 作物氮素营养诊断方法的研究现状及进展[J]. 中国土壤与肥料, 2008(4): 10 - 14.
Guo Jianhua, Zhao Chunjiang, Wang Xiu, et al. Research advancement and status on crop nitrogen nutrition diagnosis[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008(4): 10 - 14. (in Chinese)
- 5 徐新刚, 赵春江, 王纪华, 等. 新型光谱曲线特征参数与水稻叶绿素含量间的关系研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(1): 188 - 191.
Xu Xin'gang, Zhao Chunjiang, Wang Jihua, et al. Study on relationship between new characteristic parameters of spectral curve and chlorophyll content for rice[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(1): 188 - 191. (in Chinese)
- 6 Tumbo S D, Wagner D G, Heinemann P H. On-the-go sensing of chlorophyll status in corn[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(4): 1207 - 1215.
- 7 Thomas J R, Oerther G F. Estimating nitrogen content of sweet pepper leaves by reflectance measurements [J]. Agronomy Journal, 1972, 64(1): 11 - 13.
- 8 孙红, 李民赞, 张彦娥, 等. 玉米生长期叶片叶绿素含量检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(9): 2488 - 2492.
Sun Hong, Li Minzan, Zhang Yan'e, et al. Detection of corn chlorophyll content using canopy spectral reflectance[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(9): 2488 - 2492. (in Chinese)
- 9 李树强, 李民赞, 孙红. 一种玉米苗期冠层叶片营养诊断动态光谱指数[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(6): 1605 - 1609.
Li Shuqiang, Li Minzan, Sun Hong. A novel vegetation index (MPRI) of corn canopy by vehicle-borne dynamic prediction[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(6): 1605 - 1609. (in Chinese)

- Li Fengtao, Lu Xinxin, Wang Zhenzhen, et al. Biological parameters estimation model based on spectral feature on corn[J]. Journal of Qingdao Agricultural University, 2014, 31(3):196–198, 204. (in Chinese)
- 13 李冰, 刘榕源, 刘素红, 等. 基于低空无人机遥感的冬小麦覆盖度变化监测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13):160–165.
Li Bing, Liu Rongyuan, Liu Suhong, et al. Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote sensing system[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13):160–165. (in Chinese)
- 14 Lukina E V, Stone M L, Raun W R. Estimating vegetation coverage in wheat using digital images[J]. Journal of Plant Nutrition, 1999, 22(2):341–350.
- 15 李存军, 王纪华, 刘良云, 等. 基于数字照片特征的小麦覆盖度自动提取研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2004, 30(6):650–656.
Li Cunjun, Wang Jihua, Liu Liangyun, et al. Automated digital image analyses for estimating percent ground cover of winter wheat based on object features[J]. Journal of Zhejiang University, Agriculture & Life Sciences, 2004, 30(6):650–656. (in Chinese)
- 16 李存军, 赵春江, 刘良云, 等. 红外光谱指数反演大田冬小麦覆盖度及敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5):159–164.
Li Cunjun, Zhao Chunjiang, Liu Liangyun, et al. Retrieval winter wheat ground cover by short-wave infrared spectral indices in field and sensitivity analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5):159–164.
- 17 刘飞, 王莉, 何勇. 应用多光谱图像技术获取黄瓜叶片含氮量及叶面积指数[J]. 光学学报, 2009, 29(6):1616–1620.
Liu Fei, Wang Li, He Yong. Application of multi-spectral imaging technique for acquisition of cucumber growing information[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(6):1616–1620.
- 18 薛利红, 曹卫星, 罗卫红, 等. 光谱植被指数与水稻叶面积指数相关性的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(1):47–52.
Xue Lihong, Cao Weixing, Luo Weihong, et al. Relationship between spectral vegetation indices and LAI in rice[J]. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(1):47–52. (in Chinese)
- 19 杨嘉, 郭锐, 贾建华. 西北地区 MODIS/NDVI 与 MODIS/EVI 对比分析[J]. 干旱气象, 2007, 25(1):38–43.
Yang Jia, Guo Ni, Jia Jianhua. Comparison between MODIS/NDVI and MODIS/EVI in northwest China[J]. Arid Meteorology, 2007, 25(1):38–43. (in Chinese)
- 20 Wu Q, Sun H, Li M, et al. Development of 2-charge-coupled device multi-spectral imagery system for winter wheat chlorophyll Content Monitoring[J]. Sensor Letters, 2014, 12(12):818–823.
- 21 Wu Q, Sun H, Li M, et al. Development of crop monitoring system based on multispectral image technology[C]//Proceedings of the 5th Asian Conference on Precision Agriculture (ACPA), 2013:77.
- 22 吴倩, 孙红, 李民赞, 等. 玉米作物多光谱图像精准分割与叶绿素诊断方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(1):178–183.
Wu Qian, Sun Hong, Li Minzan, et al. Research on maize multispectral image accurate segmentation and chlorophyll index estimation[J]. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2015, 35(1):178–183. (in Chinese)

(上接第 233 页)

- 10 郭志顶, 李志洪, 李辛, 等. 施氮水平及方式对玉米冠层 NDVI、氮含量、叶绿素和产量的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(6):111–116, 121.
Guo Zhiding, Li Zhihong, Li Xin, et al. Effects of nitrogen levels and the methods on the canopy NDVI, nitrogen content, chlorophyll and yield of maize[J]. Journal of Maize Science, 2013, 21(6):111–116, 121. (in Chinese)
- 11 徐新刚, 赵春江, 王纪华, 等. 基于可见光-近红外新光谱特征和最有组合原理的大麦叶片氮含量监测[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(4):351–358, 365.
Xu Xin'gang, Zhao Chunjiang, Wang Jihua, et al. Associating new spectral features from visible and near infrared regions with optimal combination principle to monitor leaf nitrogen concentration in barley[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(4):351–358, 365. (in Chinese)
- 12 张喜杰, 李民赞, 崔笛, 等. 温室作物长势的光谱学诊断方法研究与仪器开发[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(5):887–890.
Zhang Xijie, Li Minzan, Cui Di, et al. New method and instrument to diagnose crop growth status in greenhouse based on spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(5):887–890. (in Chinese)
- 13 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, 227.
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, 227. (in Chinese)
- 14 李修华, 张锋, 李民赞, 等. 四波段作物冠层分析仪的开发[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11):169–173.
Li Xiuhua, Zhang Feng, Li Minzan, et al. Design of a four-waveband crop canopy analyzer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11):169–173. (in Chinese)
- 15 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)