

## 应用近地成像高光谱估算玉米叶绿素含量

张东彦<sup>1,2</sup>, 刘榕源<sup>2,3</sup>, 宋晓宇<sup>2</sup>, 徐新刚<sup>2</sup>, 黄文江<sup>2</sup>, 朱大洲<sup>2</sup>, 王纪华<sup>1,2\*</sup>

1. 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江 杭州 310029
2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097
3. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875

**摘要** 图谱合一的近地成像高光谱是现代数字农业对田块尺度的作物长势信息进行动态监测和实时管理的需要, 是促进农业定量遥感发展的重要手段之一。文章通过自主研发的田间扫描成像光谱仪近地获得盆栽和大田玉米的冠层高光谱影像, 从影像中精确提取玉米不同层位的叶片反射光谱并计算 TCARI, OSA-VI, CARI, NDVI 等多种光谱植被指数, 构建玉米叶绿素含量的光谱预测模型, 并对模型进行了验证。结果表明, 基于光谱指数 MCARI/OSAVI 构建的玉米植株叶绿素含量预测模型精度较高, 验证样本预测的决定系数  $R^2=0.887$ , 预测均方根误差 RMSE 为 1.8。研究表明, 成像光谱仪在微观尺度上的作物组分光谱信息探测方面具有较大的应用潜力。

**关键词** 成像高光谱; 植被指数; 玉米; 叶绿素含量

**中图分类号**: S127 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)03-0771-05

### 引言

用作物的光谱信息反演作物的生物物理和化学组分具有及时、快速和非损伤性, 适用于现代数字农业对田块尺度农作物进行动态监测和精细管理<sup>[1]</sup>。近 20 年来, 国内外专家已在多种作物上进行作物种类、覆盖度、养分和水分的敏感波段探测研究, 构建多个用于区分作物种类、估测覆盖度和作物养分、水分含量的光谱参量及数据库<sup>[2-5]</sup>。基于作物覆盖度、养分和水分光谱探测原理, 国内外已经研制了相关的光谱探测仪器, 如日本 Minolta 公司生产的 SPAD-502 叶绿素计; 美国 Oklahoma 公司研制的手持式冠层长势仪 Greens-eeker, 美国欧普特公司研制生产的地物光谱仪 ASD Field-spec FR2500, 英国 Yara 公司生产的作物冠层氮素诊断仪 N-Sensor, 中国国家农业信息化工程技术研究中心研制的可见-近红外作物氮素光电测量仪等。这些设备在农业田间的应用, 极大地促进了精细农业的发展, 满足了人们利用信息技术对农田进行动态管理与灾时指导的迫切需求。但是这些设备具有明显的局限性, 其中 SPAD, Greenseeker, N-Sensor, 氮素光电测量仪的光谱不连续, 只能获取一个或几个波段的生物信息, 外延性不强且精确度不高<sup>[6-8]</sup>, 而地物光谱

仪 ASD 只能获取点状的地物光谱数据, 不能形成图谱合一的信息, 无法实现作物生长信息图像显示、诊断和决策<sup>[9]</sup>。因此, 成像高光谱的近地应用成为遥感器发展的趋势之一。目前, 发展田间成像光谱探测器用于作物信息获取逐渐得到国内外学者普遍认可, 围绕作物组分信息定量解析的相关问题成为研究的热点。基于此, 本研究利用高光谱、高空间分辨率的田间成像光谱仪获取玉米植株影像, 然后从影像中精确提取不同层位叶片的光谱反射率, 对自然生长环境下玉米的叶绿素含量进行反演, 将结果在大田进行验证, 以期采用这种方法获得较高精度的预测模型, 为农业定量遥感提供新的研究手段。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验设计

本试验于 2009 年 8~10 月在北京市农林科学院实验农场(39.93°N, 116.27°E)进行。实验对象为玉米, 采用盆栽和大田两种种植方式, 常规水肥管理。供试品种为郑单 958, 披叶型。2009 年 8 月 21 日播种, 在玉米的拔节期利用成像光谱仪进行成像高光谱采集。

#### 1.2 高光谱成像采集系统

收稿日期: 2010-05-10, 修订日期: 2010-08-20

基金项目: 国家高新技术研究发展计划(863 计划)项目(2006AA120108, 2006AA10A308, 2007AA10Z202)资助

作者简介: 张东彦, 1982 年生, 浙江大学农业遥感与信息技术应用所博士研究生 e-mail:hello-lion@hotmail.com

\* 通讯联系人 e-mail:wangjh@nercita.org.cn

采用的高光谱成像系统如图 1 所示。该系统主要由田间扫描成像光谱仪(pushbroom imaging spectrometer, PIS)、可升降导轨观测架、步进电机控制器及笔记本电脑组成。光谱仪在应用之前,委托中国科学院安徽光学精密机械研究所的国家光辐射定标与标征技术创新实验室进行了严格定标和测试,确定光谱仪的光谱定标参数及辐射定标参数,具体性能参数见表 1。



Fig. 1 Acquisition system of hyperspectral imaging

Table 1 Key performance parameters of spectrometer

性能参数	
光谱范围	400~1 000 nm
光谱分辨	2 nm
空间分辨率	0.5 mm
图像分辨率	1 400(Spatial)×1 024(Spectrum)
光谱采样间隔	0.7 nm
像元尺寸	7.4 μm×7.4 μm
视场角 FOV	16°

### 1.3 数据的获取与处理

#### 1.3.1 玉米冠层影像获取

为了保证观测玉米整株在影像内,根据仪器的视场角度和玉米的高、宽固定好观测架的高度。经测量得出光谱仪的镜头距玉米冠层 150 cm 处为最佳高度,此时成像宽度为 28 cm。打开图像采集软件,根据当时的太阳辐射强度,利用参考板和栅格纸,设置最佳的曝光时间为 50 ms;在保证光谱信息的前提下,为了对目标物进行清晰成像,调整导轨的运行速度和图像采集帧频达到一个平衡,分别为 180 转·s<sup>-1</sup>和 12 fps。影像采集选择晴朗无风的天气,于 9:30~15:00 进行。每次成像视场内放置参考板、黑布(与冠层高度一致),进行场地定标。

#### 1.3.2 影像反射率转换

成像光谱仪采集的原始数据是 BMP 格式的图片,必须拼接成可用遥感软件处理的影像才可以进行反射率的转换。处理过程:(1)用 Matlab 软件编写程序把 BMP 格式的图片拼接成 BIL 格式的整幅影像。(2)用 IDL 编程进行影像归一化反射率转换。利用经验线性法把原始 DN 值图像转换为反射率图像<sup>[10]</sup>;经逐步逐步平均法进行光谱噪声去除<sup>[11]</sup>;选

择逐像元计算每个像素的光谱均值,然后每个波段光谱反射率除以该均值,最后得到归一化反射率在[0, 3]之间。归一化反射率能抑制因光照差异造成的影响,比如光照和阴影叶片的差异,同时还便于区分不同地物的光谱信息。具体的公式如下<sup>[12]</sup>

$$R_{ij} = \frac{R_{ij}}{\left(\frac{1}{K} \sum_j R_{ij}\right)} \quad (1)$$

$R_{ij}$  表示归一化反射率, $i$  和  $j$  分别表示起始和终止波段, $K$  表示总的波段数。

#### 1.3.3 玉米叶片反射率提取

完成整幅影像的反射率转换后,用 ENVI4.5 软件在影像中选择感兴趣区提取顶叶至倒 4 叶的反射率值(倒 5 叶因发黄或者可视性不好,所以未取样)。手动选择整个叶片作为感兴趣区,每个感兴趣区包含若干像元,采用样区像素统计平均,把平均值作为每片叶的光谱值。上述操作以叶片面状光谱代替点状光谱,所以可能全面的反应叶片的光谱信息。其中盆栽采样 7 株,大田采样 7 株,顶叶、倒 2 叶、倒 3 叶至倒 4 叶共采集 56 片单叶的光谱值。

#### 1.4 叶绿素数据测定

选择完全展开的玉米叶片,从顶叶至倒 4 叶,使用 SPAD502 叶绿素计进行叶绿素含量测定。每片叶子在叶尖、叶中、叶基三个部位各测定 10 次,然后求平均作为每片叶的叶绿素值。共获得 56 片叶子的数值,其中 28 片(盆栽 7 株)作为建模样本,28 片(实验田 7 株)用来模型验证。表 2 是所有样本的统计值。从分析结果看,叶片叶绿素含量无论是最大值、最小值、平均值、均方根误差都表现为倒 3 叶>倒 2 叶>倒 4 叶>顶叶,且在不同层位之间有明显的变异空间,可以用光谱进行叶绿素含量的预测。

Table 2 Statistic values of chlorophyll contents of leaves on different layers

	最大值	最小值	平均值	均方根误差
First leaf	35.2	24.9	30.3	3.39
Second leaf	40.0	30.7	35.2	3.07
Third leaf	42.2	32.3	37.5	2.90
Forth leaf	36.9	26.2	32.5	3.30

#### 1.5 光谱植被指数

植被指数是由多个波段反射率构成的光谱参数,由于综合了多波段光谱信息和降低了背景误差,所以比单波段有更好的灵敏性<sup>[13]</sup>,被广泛用于探测作物生长发育、胁迫诊断、作物识别等方面的研究<sup>[14-17]</sup>。本文的观测对象是自然生长状态下的玉米植株,不同层位的叶片之间、叶片和茎秆之间、玉米与土壤背景、玉米与杂草之间必然存在光谱的相互影响。因此,选择前人常用的光谱植被指数来降低背景影响,表 3 是选用的光谱植被指数<sup>[18, 19]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 反演叶绿素含量最佳光谱指数的选取与模型构建

为了选择最佳的建模光谱指数,本研究用盆栽、大田的数据分别与叶绿素含量进行相关性分析(表 4)。结果表明:对于盆栽的数据,与叶绿素含量显著相关的光谱植被指数有 TCARI/OSAVI, MCARI/OSAVI, CARI(列出最高的三个,下同);大田有 MTCI, MCARI/OSAVI, TCARI/OSAVI。从表 4 中可知:对于盆栽数据,相关性最高的光谱指数是 TCARI/OSAVI, 相关系数  $r$  为  $-0.865$ 。Haboudane 的研究表明,当玉米覆盖度低时,采用这个光谱指数反演玉米叶绿素含量有很高的精度,这个指数是他利用航空成像高光谱估算玉米冠层尺度叶绿素含量时建立的<sup>[20]</sup>;对于大田数据,相关性最高的是 MTCI, 相关系数  $r$  为  $0.685$ 。这个光谱指数是欧洲航天局用 MERIS(medium resolution imaging spec-

trometer)卫星监测全球陆地生态环境选用的植被指数<sup>[21]</sup>,适用于大范围的植被生长监测。由表 4 可得,盆栽和大田相关性最高的光谱指数不同。但是本实验的思路是,先从植株个体入手,再考虑群体综合影响,在玉米自然生长的状况下,寻找一个盆栽和大田同时适用的光谱植被指数。鉴于此,我们发现光谱指数 MCARI/OSAVI 在盆栽和大田都达到极显著,相关系数  $r$  分别为  $-0.833$  和  $-0.648$ ,满足本研究的要求。再者, Daughtry 曾用光谱指数 MCARI/OSAVI 准确的估算玉米叶片叶绿素含量<sup>[22]</sup>。综上所述,选择 MCARI/OSAVI 作为建模最佳光谱指数。经计算,预测模型的方程为  $y = -0.018x + 50.95$  ( $n = 28$ ), 决定系数  $R^2$  是  $0.897$ , 结果如图 2 所示。

Table 3 Spectral vegetation indices and authors

Spectral vegetation indices	Authors
$PRI = (R_{550} - R_{531}) / (R_{550} + R_{531})$	Gamon et al. (1992)
$SIPI = (R_{800} - R_{450}) / (R_{800} - R_{680})$	Penuelas et al. (1995)
$MTCI = (R_{753.75} - R_{708.75}) / (R_{708.75} - R_{681.25})$	Dash and Curran (2004)
$GNDVI = (R_{801} - R_{550}) / (R_{801} + R_{550})$	Gitelson et al. (1996)
$PSNDa = (R_{800} - R_{680}) / (R_{800} + R_{680})$	Blackburn. (1998)
$PSSRa = R_{800} / R_{680}$	Blackburn. (1998)
$HNDVI = (R_{827} - R_{668}) / (R_{827} + R_{668})$	Oppelt & Mauser. (2004)
$NDVI^{[670, 800]} = (R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red})$	Rouse et al. (1973)
$VARI^{green} = (R_{560} - R_{670}) / (R_{560} + R_{670} - R_{450})$	Anatoly et al. (2002)
$CARI = [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} + R_{670})]$	Kim et al. (1994)
$TCARI = 3 * [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550}) * (R_{700} / R_{670})]$	Haboudane et al. (2002)
$OSAVI = [(1 + 0.16) * (R_{800} - R_{670})] / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$	Rondeaux et al. (1996)
$MCARI = [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550})] * (R_{700} / R_{670})$	Daughtry et al. (2000)
$TCARI/OSAVI = 3 * [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550}) * (R_{700} / R_{670})] / [(1 + 0.16) * (R_{800} - R_{670})] / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$	Haboudane et al. (2002)
$MCARI/OSAVI = [(R_{700} - R_{670}) - 0.2 * (R_{700} - R_{550})] * (R_{700} / R_{670}) / [(1 + 0.16) * (R_{800} - R_{670})] / (R_{800} + R_{670} + 0.16)$	Daughtry et al. (2000)

Table 4 Correlation coefficients between chlorophyll content and spectral indices

	CARI	MACRI	MCARI/OSAVI	TCARI	TCARI/OSAVI	MTCI
盆栽	$-0.816^{**}$	$-0.733^{**}$	$-0.833^{**}$	$-0.775^{**}$	$-0.865^{**}$	$0.800^{**}$
大田	$-0.639^{**}$	$-0.630^{**}$	$-0.648^{**}$	$-0.621^{**}$	$-0.644^{**}$	$0.685^{**}$

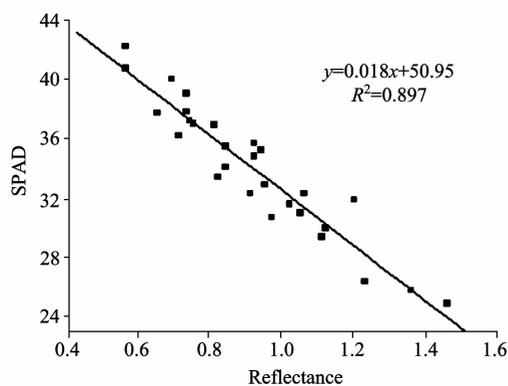


Fig. 2 Prediction modeling of chlorophyll content of maize in the plot

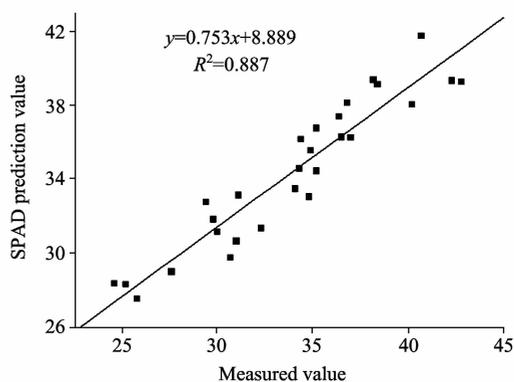


Fig. 3 Verification modeling of chlorophyll content of maize in the field

## 2.2 模型验证

利用大田数据( $n=28$ )对构建的模型进行验证,结果如图 3 所示。验证模型的方程为  $y=0.753x+8.889$ , 决定系数  $R^2=0.887$ , 均方根误差 RMSE 是 1.8。本文利用成像光谱仪探测玉米叶片的反射光谱,先从环境影响小的单株开始,建立了初步的叶绿素含量反演模型,再推广应用到环境影响复杂的大田植株,充分发挥了成像光谱仪图谱合一的优势,真实的反应了自然状况下玉米叶片的叶绿素含量。同时,在不同植被覆盖度下(盆栽一大田)玉米植株都取得很好的效果,说明该模型有较高的精度。

## 3 结 论

本文利用自主研发的成像光谱仪 PIS 对玉米植株进行成像高光谱获取,在影像上选取玉米顶叶至倒 4 叶的光谱反射率,构建了植株的叶绿素含量反演模型,然后用大田的玉米数据进行验证,最后得出预测模型的决定系数  $R^2$  为 0.897;

验证模型的决定系数  $R^2$  为 0.887,对应的均方根误差 RMSE 是 1.8,在不同植被覆盖度下(盆栽一大田)玉米植株都取得很好的效果,说明采用这种方法构建的模型具有较高的精度。

本研究是成像光谱仪在农业田间的初步应用,真正做到了不破坏作物生长环境,无损探测作物的光谱信息,进行作物生长状况的监测。这有别于前人利用地物光谱仪 ASD 破坏性的取样在实验室测定叶片光谱,再构建作物叶绿素含量的反演模型。本研究的不足之处是所建立的玉米叶绿素含量估算模型,是在玉米的一个时期,一个品种上得到的结果,模型的普适性需要进一步验证;同时反演叶绿素含量采用的是叶绿素计 SPAD 获得的数据,存在一定的误差,还需要在更多品种的不同生育期及不同作物上进行验证。本文是新仪器在田间的初步探索,是利用成像光谱仪图谱合一的特性去近地探测作物组分信息的有益尝试,这些都有助于促进农业定量遥感的发展。希望在后续的研究中,充分挖掘成像光谱仪的田间应用优势,为精确农业服务。

## References

- [ 1 ] Xujun Ye, Kenshi Sakai, Hiroshi Okamoto, et al. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(1): 13.
- [ 2 ] Peng Gong, Rui Liang Pu, Greg S Biging, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1355.
- [ 3 ] SONG Kai-shan, ZHANG Bai, LI Fang, et al(宋开山, 张 柏, 李 方, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2005, 21(1): 36.
- [ 4 ] Pacheco A, Bannari A, Staenz K, et al. Proceedings of the First International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, 2002, 9: 210.
- [ 5 ] WANG Yuan-yuan, LI Gui-cai, ZHANG Li-jun, et al(王圆圆, 李贵才, 张立军, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(4): 1070.
- [ 6 ] Chapman S C, Barreto H J. Agronomy Journal, 1997, 8(9): 557.
- [ 7 ] Mullen R W, Freeman K W, Raun W R. Agronomy Journal, 2003, 9(5): 347.
- [ 8 ] Mayfield A H, Trengove S P. Crop & Pasture Science, 2009, 9(60): 127.
- [ 9 ] TAN Hai-zhen, LI Shao-kun, WANG Ke-ru, et al(谭海珍, 李少昆, 王克如, 等). Acta Agronomica Sinica(作物学报), 2008, 34(10): 1812.
- [ 10 ] LIU Jian-gui, WU Chang-shan, ZHANG Bing, et al(刘建贵, 吴长山, 张 兵, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 1999, 3(4): 290.
- [ 11 ] Bin Yu, Michael I Ostland, Peng Gong, et al. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2569.
- [ 12 ] WANG Qiang, SHU Jiong, YIN Qiu(王 强, 束 炯, 尹 球). Journal of Infrared and Millimeter Waves(红外与毫米波学报), 2006, 25(1): 29.
- [ 13 ] Bannari D Morin, Bonn F, et al. Remote Sensing Reviews, 1995, 2(13): 95.
- [ 14 ] Pacheco A, Bannari A, Staenz K, et al. Canada Journal of Remote Sensing, 2008, 34(1): 252.
- [ 15 ] Patel N K, Patnaik C, Dutta S. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(12): 2401.
- [ 16 ] Penuelas J, Filella I. Trends Plant Science, 1998, 3: 151.
- [ 17 ] Pacheco A, Bannari A, Staenz K, et al. 23th Canada Symposium of Remote Sensing, 2001, 1: 281.
- [ 18 ] Buschmann C, Nagel E. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(4): 128.
- [ 19 ] Abderrazak Bannari, Shahid K Khurshid, Karl Staenz, et al. Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2007, 10(45): 210.
- [ 20 ] Haboudane D, Miller J R, Tremblay N, et al. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2): 416.
- [ 21 ] Verstraete M M, Pinty B, Curran P J. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(9): 1747.
- [ 22 ] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(2): 229.

# A Field-Based Pushbroom Imaging Spectrometer for Estimating Chlorophyll Content of Maize

ZHANG Dong-yan<sup>1, 2</sup>, LIU Rong-yuan<sup>2, 3</sup>, SONG Xiao-yu<sup>2</sup>, XU Xin-gang<sup>2</sup>, HUANG Wen-jiang<sup>2</sup>, ZHU Da-zhou<sup>2</sup>, WANG Ji-hua<sup>1, 2\*</sup>

1. Institute of Remote Sensing & Information Technique, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

3. School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract** As an image-spectrum merging technology, the field-hyperspectral imaging technology is a need for dynamic monitoring and real-time management of crop growth information acquiring at field scale in modern digital agriculture, and it is also an effective approach to promoting the development of quantitative remote sensing on agriculture. In the present study, the hyperspectral images of maize in potted trial and in field were acquired by a self-development push broom imaging spectrometer (PIS). The reflectance spectra of maize leaves in different layers were accurately extracted and then used to calculate the spectral vegetation indices, such as TCARI, OSAVI, CARI and NDVI. The spectral vegetation indices were used to construct the prediction model for measuring chlorophyll content. The results showed that the prediction model constructed by spectral index of MCARI/OSAVI had high accuracy. The coefficient of determination for the validation samples was  $R^2 = 0.887$ , and RMSE was 1.8. The study indicated that PIS had extensive application potentiality on detecting spectral information of crop components in the micro-scale.

**Keywords** Hyperspectral imaging; Vegetation indices; Corn; Chlorophyll content

(Received May 10, 2010; accepted Aug. 20, 2010)

\* Corresponding author