

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.038

基于多角度成像数据的大豆冠层叶绿素密度反演*

张东彦^{1,2} Coburn Craig³ 赵晋陵² 王秀² 王之杰³ 梁栋¹

(1. 安徽大学计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039; 2. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097;
3. 莱斯布里奇大学地理学院, 莱斯布里奇 T1K3M4)

摘要: 利用多角度观测系统采集田间不同生育期大豆冠层的图谱数据, 通过提取影像中土壤背景、大豆植株、光照叶片等不同目标地物的反射光谱, 对比分析不同观测角度下成像光谱数据反演大豆冠层叶绿素密度的效果, 探讨土壤、阴影叶片及角度变化对群体叶绿素密度反演的影响。结果表明: (0°, 20°, 40°, 60°) 的天顶角组合有最高的预测模型决定系数 (R^2 为 0.834) 和最小的均方根误差 (RMSE 为 6.13); (20°, 40°, 60°) 天顶角组合的决定系数值高于 (0°, 20°, 40°) 的组合, 且在混合植被、纯植被、光照植被 3 类数据中有一致的趋势。40° 天顶角是反演叶绿素密度的最优角度。0° 方位角 (太阳主平面的后向观测) 是反演叶绿素密度的最优角度。天顶角变化是影响大豆冠层叶绿素密度反演的主要因素。

关键词: 大豆 成像高光谱 多角度 叶绿素密度 反演

中图分类号: TP79; S127 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)02-0205-09

Chlorophyll Density Inversion of Soybean Canopy Based on Multi-angle Imaging Hyperspectral Data

Zhang Dongyan^{1,2} Coburn Craig³ Zhao Jinling² Wang Xiu² Wang Zhijie³ Liang Dong¹

(1. Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China
2. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China
3. Department of Geography, University of Lethbridge, Alberta T1K3M4, Canada)

Abstract: Hyperspectral images of soybean at different growth stages were collected by using multi-angular observation system in the field. Reflectance spectra of different objectives including soil, soybean plants, and illuminated leaves were extracted and they were used to retrieve the chlorophyll density of soybean canopy by using reflectance spectra at different observation angles, and furthermore explored detailed model inversion effects of soybean group for ground soil, shadow leaves, and angle changes. Studies have been showed that when the angles combination was 0°, 20°, 40° and 60°, there were the highest determination coefficient of 0.834, and the lowest root mean square error of 6.13 for prediction model of chlorophyll density. Meanwhile, the zenith angle and azimuth angle was 40° and 0°, respectively, which had the best inversion model. The changes of zenith angles were the most key factor to affect assessment accuracy of chlorophyll density for soybean canopy.

Key words: Soybean Imaging hyperspectra Multi-angle Chlorophyll density Inversion

引言

遥感技术发展初期, 由于仪器及认知限制, 国内

外学者仅使用遥感器对植被冠层进行垂直观测, 然后通过分析植被的光谱特征, 开展不同类型植被的识别、植被长势状况的监测及病虫害胁迫的初步判

收稿日期: 2012-09-03 修回日期: 2012-09-18

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAF07B02)、国家自然科学基金资助项目(41071228、61172127)、中国博士后基金资助项目(2012M520445)、高等学校博士学科点科研基金资助项目(20113401110006)和安徽大学博士科研启动经费资助项目

作者简介: 张东彦, 讲师, 北京农业信息技术研究中心博士后, 主要从事高光谱图像处理及遥感量化研究, E-mail: zhangdy@nercita.org.cn

通讯作者: 梁栋, 教授, 主要从事图像处理及模式识别应用研究, E-mail: dliang@ahu.edu.cn

断等遥感应用^[1]。近年来,随着遥感技术由定性解释向量化反演的转变,研究者发现,垂直观测时,获取的遥感数据由于受土壤背景、植被冠层结构等因素的影响,容易出现“同物异谱”和“同谱异物”现象,且单一方向的观测数据无法满足植被生理生化参数量化反演的需要,因此提出并大力发展多角度遥感^[2]。从1996年至今,POLDER、VGT、NEW POLDER、ASTER、MODIS、MISR、AMTIS、CHRIS等多颗星载多角度传感器被发射并用于地表植被多角度数据获取及相关应用研究^[3]。目前,现有的星载多角度遥感观测器如MISR、VEGETATION和MODIS等,都只能在固定或较小太阳角变化范围内观测地表。为了给新一代星载多角度传感器的研发提供参考,需要大量的地面试验进行植被多角度观测研究^[4~11]。结果表明,多角度在不同冠层结构作物的二向反射特性解析及株型识别方面有绝对的优势,对促进物理模型的改进有重要意义。但是,不可回避的问题是,非成像获取的是植被与背景地物的混合信息,若要使反演植被生理生化参数的物理模型更接近真实自然状态,势必考虑成像高光谱在田间近地的应用与解析。

众所周知,遥感的本质是反演。虽然多角度非成像高光谱数据能对植被的二向反射特征进行定性,但是背景土壤及植被冠层结构间相互影响,尤其是光照与阴影这两个影响因素,是制约植被定量遥感的关键因子,能否再进一步解释这两个关键因子对作物生化参数反演的影响程度,从而为植被辐射传输模型的改进服务,成为一个重要方向。成像光谱技术,在发挥非成像传感器高光谱优势的基础上,可以对同步获取影像中的地物进行分类,再逐步分析不同背景地物对植被生化参数反演的影响。本文主要关注近地高光谱影像中的背景土壤和阴影叶片光谱提纯后,分析其不同角度下的反射光谱与大豆叶绿素密度间的关系,具体解释土壤、阴影叶片及角度变化对大豆叶绿素密度反演的影响。

1 多角度成像系统与数据处理

1.1 多角度成像系统

多角度高光谱成像系统如图1所示,主要包括:用于移动和支撑观测平台的四轮驱动车;调整观测架高度的液压千斤顶;控制涡轮电动机方位角旋转的弧形轨道;步进电动机控制天顶角变化的传感器搭载平台;远程控制电动机运行的计算机;实时记录观测位置信息的GPS仪及田间获取数据的可见-近红外成像光谱仪(Visible and near-infrared imaging spectrometer, VNIS)。

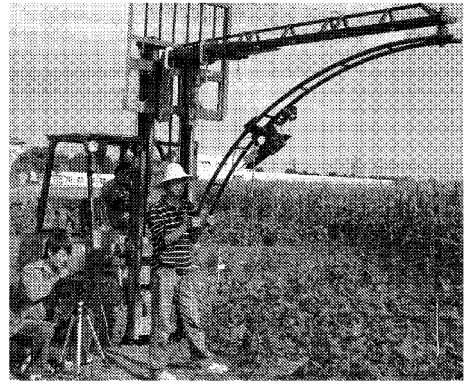


图1 多角度高光谱成像系统

Fig.1 Multi-angle hyperspectral imaging system

其中,VNIS由Hamamatsu C8484-05G型高分辨率相机、V10E型光谱仪、外置扫描镜构成,性能参数如表1所示。外置扫描镜由仪器自带的软件CSISpec-IS-lite(Channel Systems Inc.,Manitoba,Canada)控制,通过扫描镜360°旋转实现一幅图像的快速获取。

表1 VNIS的性能参数

Tab.1 Key performance parameters of VNIS

| 参数 | 数值 |
|-----------------|----------------------|
| 光谱区间/nm | 400~1000 |
| 光谱分辨率/nm | 2.8 |
| 空间分辨率 | 可精确到毫米级 |
| 采样间隔/nm | 2.4 |
| 图像大小/mm×mm | 7.15(光谱维)×14.3(空间维) |
| 视场角/(°)×(°)×(°) | 14(水平)×11(垂直)×18(对角) |

1.2 实验设计

2010年8~9月,在北京市昌平区小汤山镇国家精准农业研究示范基地(40.18°N,116.27°E)采集大豆的多角度成像数据。大豆品种为中黄13,紧凑型;中黄30,中间型。于2010年7月1日播种,正常田间管理。每个小区播种面积30m²(长6m×宽5m),约200株大豆无作物操作区域宽3m,共计播种面积957m²。详细种植信息如表2所示。

表2 大豆种植信息

Tab.2 Planting information of soybean

| 品种 | 生育期 | 高度/cm |
|------|-----|-------|
| 中黄30 | 开花期 | 64 |
| | 分枝期 | |
| 中黄13 | 开花期 | 70 |
| | 分枝期 | |

1.3 数据获取与处理

1.3.1 数据获取

对大豆冠层进行成像时,先根据植株的高度确定光谱仪镜头的观测高度。这里以大豆分枝期为例,植株株高30~40cm,行距15cm,为了保证视场

内有完整大豆植株,设定 VNIS 观测高度距大豆冠层 178 cm,距地面 228 cm,视场范围为 60 cm × 60 cm 的正方形。在成像光谱数据采集时,用地物光谱仪 ASD 同步采集参考白板的数字量化值,并实时记录当时的天气状况,为反射率提取进行原始数据获取。完成观测区的影像采集后,取大豆活体植株测定叶绿素密度等相关参数,参考标准以农业定量遥感基础与应用为准^[3]。

1.3.2 影像处理

获取的高光谱影像要转换成相对反射率才能用于作物的定量化反演研究,相对反射率转换和光谱提纯方法参照文献[12~13]。

2 结果与分析

2.1 天顶角变化时大豆叶绿素密度反演

前人研究表明:多角度观测时,因视场内大豆冠层结构和背景土壤的比例发生变化,所以不同天顶角下的冠层光谱是不同的,这些变化对作物生理生化指标的反演有重要的研究意义。目前,国内外主

要以植被叶面积指数反演为主^[14],虽然部分学者探讨了多角度反演氮素垂直分布的可行性^[15],寻找了反演籽粒蛋白质含量的最佳天顶角等^[16],但是没有分析多角度冠层光谱与群体叶绿素密度之间的关系。本文将重点探讨不同类型地物光谱提纯前、后与叶绿素密度的相关关系,并对不同角度组合下的叶绿素密度预测模型进行评价。

2.1.1 不同天顶角时大豆冠层光谱与叶绿素密度相关性分析

传统的作物高光谱营养诊断技术,都是由冠层尺度垂直观测展开的。但是,作物生长发育进程中,养分分布如氮素存在明显的垂直梯度差异^[17~18]。为了实现养分信息的三维立体全方位精确诊断,有必要开展多角度的遥感监测。但多角度观测时,影像中背景地物和阴影的面积是影响光谱信息的重要因素^[19]。图2是不同天顶角时(0°、20°、40°、60°)大豆的高光谱影像图。表3是同一观测区不同天顶角时不同分量地物所占的像素数统计。

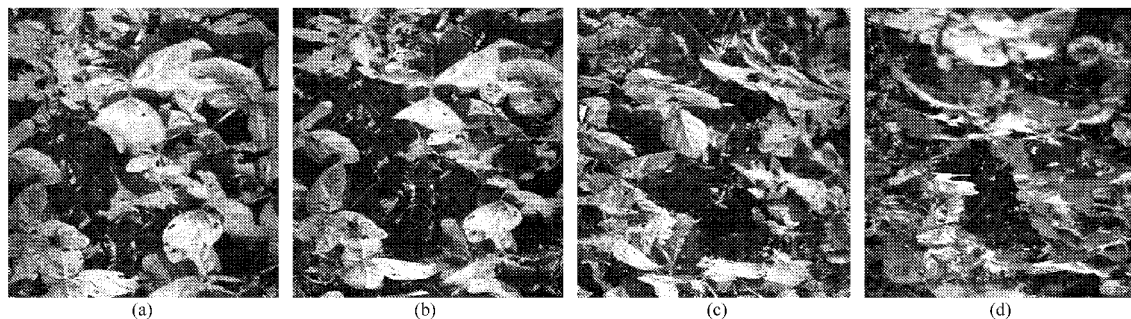


图2 不同天顶角时的大豆冠层影像

Fig. 2 Acquired images of soybean canopy at different zenith angles

(a) 0° (b) 20° (c) 40° (d) 60°

表3 不同类型地物像素数统计

Tab. 3 Statistics of pixel number of different topological objects at different zenith angles

| 角度/(°) | 光照土 | 阴影土 | 光照叶 | 阴影叶 | 裸土 | 叶片 |
|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 0 | 5 883 | 40 610 | 74 385 | 82 | 46 493 | 74 467 |
| 20 | 6 311 | 54 386 | 59 862 | 401 | 60 697 | 60 263 |
| 40 | 10 154 | 53 795 | 56 285 | 726 | 63 949 | 57 011 |
| 60 | 7 549 | 52 746 | 56 841 | 3 824 | 60 295 | 60 665 |

结合图2和表3分析,不同角度下图中裸土和阴影叶片面积的比例不同。当垂直观测时(0°),裸土和阴影叶片面积都最小,分别为46 493和82个像素;多角度观测时,20°天顶角下与垂直观测相差不大;40°天顶角下,裸土面积最大,共63 949个像素;60°天顶角下,阴影叶片面积最大,共3 824个像素。由此说明,获取作物多角度遥感信息时,必须关注研究区内裸土及阴影的影响,尤其是裸土的面积。

本文利用归一化光谱指数对影像中裸土面积进行掩膜处理^[13](图3),去除裸土的光谱信息后,得到纯大豆植被的光谱信息(图3b)。相应地,影像中的阴影叶片被去除,得到相应的光照叶片光谱信息(图3d)。

为了说明混合光谱信息(大豆植被和裸土)和纯大豆植被光谱信息在研究目标地物时的结果差异,利用上述多角度数据和叶绿素密度进行相关性分析,从敏感波段和相关性方面说明光谱提纯在多角度数据使用上的变化特征,结果如图4所示。

由图4a可知,混合植被冠层光谱与叶绿素密度的相关性较差,仅在921~962 nm波段区间有极显著相关性(表4),置信度为1%, $R > 0.42$, $n = 20$ 。分析其原因,可能是20个样本中,有10个来自分枝期,虽然有2个大豆品种,但此时植被覆盖度较低,裸土面积较大,且品种间的叶绿素差距不大,因此整

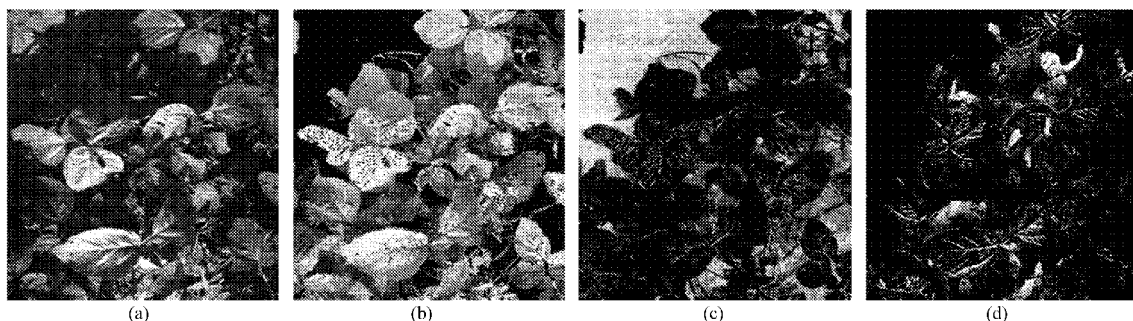


图3 不同地物分类后的掩膜影像

Fig. 3 Masked images of different typological objects

(a) 混合植被 (b) 纯植被 (c) 裸土 (d) 阴影叶片

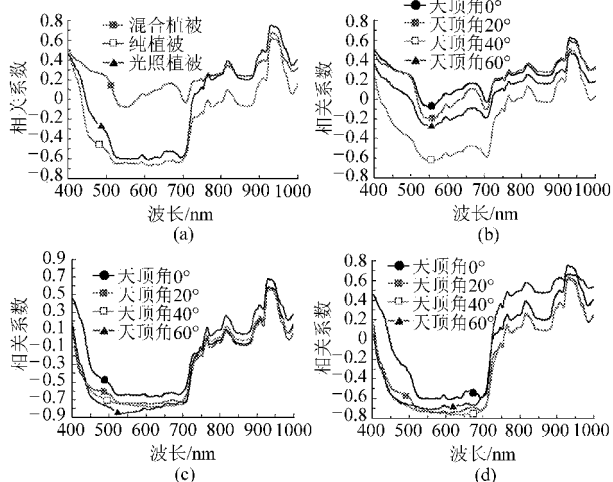


图4 不同天顶角下冠层光谱与叶绿素密度相关性

Fig. 4 Correlation between chlorophyll density and canopy spectra from different zenith angles

- (a) 垂直观测时冠层光谱提纯前后与叶绿素密度的相关性
 (b) 不同天顶角下混合植被光谱与叶绿素密度的相关性
 (c) 不同天顶角下纯植被光谱与叶绿素密度的相关性
 (d) 不同天顶角下光照植被光谱与叶绿素密度的相关性

体相关性偏低。刘良云^[20]、谭昌伟^[21]在作物生育前期利用冠层光谱反演叶绿素密度有相同的结果。当植被与土壤光谱分离,分析纯植被与叶绿素密度的相关性时,发现相关性立刻提高,敏感波段增加,且主要集中在500~700 nm的绿、红波段。由此说明,植被生育前期的土壤背景对光谱反演作物叶绿素密度有较大影响。土壤背景去除后,敏感波段是绿、红光区间,因为这两个区间是植被叶绿素对光最敏感的区间,植被的光合作用及荧光特征主要在这两个波段体现,这和植被的光谱响应特征一致。在田间获取植被光谱信息时,阴影叶片是影响其生化参数反演精度的一个重要因素。本文对阴影叶片光谱进行去除,研究光照叶片与叶绿素密度的相关性,发现它在红、绿波段有极显著相关,与纯植被光谱相近;但是相关性略低于纯植被,这可解释为阴影叶片反映的也是植被的生命信息,它与视场内阴影的比

例有关,若去除,植被的一些生命信息将被消除,所以与叶绿素密度的相关性降低。由图4a还可知,光谱提纯前后在近红外波段区间变化不大,说明土壤对这个区间影响较小。

表4 叶绿素密度和不同天顶角下冠层光谱的相关系数、入选波长、敏感区间

Tab. 4 Correlation coefficients, sensitive regions and selected wavebands between chlorophyll density and canopy spectra from different zenith angles

| 类型 | 天顶角 / (°) | 敏感区间波长/nm | 入选波长 /nm | 相关系数 |
|----|-----------|------------------------|----------|--------|
| MV | 0 | 921 ~ 962 | 933 | 0.626 |
| | 20 | 922 ~ 957 | 934 | 0.590 |
| | 40 | 504 ~ 717, 927 ~ 951 | 562 | -0.628 |
| | 60 | 926 ~ 950 | 934 | 0.477 |
| PV | 0 | 466 ~ 715, 923 ~ 957 | 933 | 0.682 |
| | 20 | 427 ~ 720, 926 ~ 954 | 610 | -0.750 |
| | 40 | 430 ~ 723, 925 ~ 955 | 612 | -0.783 |
| | 60 | 433 ~ 721, 922 ~ 962 | 537 | -0.857 |
| SV | 0 | 509 ~ 712, 895 ~ 975 | 932 | 0.752 |
| | 20 | 443 ~ 718, 922 ~ 962 | 610 | -0.744 |
| | 40 | 435 ~ 721, 923 ~ 959 | 641 | -0.765 |
| | 60 | 437 ~ 714, 759 ~ 1 000 | 561 | -0.708 |

注: MV、PV、SV 分别代表混合大豆植被、纯大豆植被、光照大豆植被。表5~9相同。

在上述分析的基础上,本文对光谱提纯前后的不同天顶角变化下的光谱与叶绿素密度相关性也进行分析,结果如图4b~4d所示。由图4b可知,随着天顶角的增大,大豆冠层光谱与叶绿素密度的相关性减小。说明背景地物有明显土壤存在时,垂直观测还是较好的观测方式。但是,天顶角为40°时,冠层光谱与叶绿素密度的相关性在可见光波段显著增加,近红外波段仍低于垂直观测的结果。这可能是因为40°时能获取大豆植株上、中、下层信息,光谱信息能更全面反映大豆的真实养分状况。在实际大豆植株取样时,一般是选择研究区植株地上部分所有叶片进行计算得出的,40°观测时既有上层信息,

也包含中下层信息,所以有较高的相关性。同时,前人研究表明,天顶角在 $30^\circ \sim 40^\circ$,是获取植被热点信息的最佳角度区间,即包含冠层结构信息和植株养分信息最多的区域^[11]。因此观测角为 40° 时,能获得较高的相关性。

分析图 4c 可知,当进行土壤光谱去除后,不同天顶角下的大豆冠层光谱与叶绿素密度的相关性随着角度的增加而增加,这和混合植被光谱与叶绿素密度相关结果相比,土壤去除后的相关性显著提高,表现在蓝、绿、红的可见光波段,相关性最高为 -0.857 (表 4),但是近红外波段相关性没有明显变化。再次说明背景土壤对冠层光谱有较大影响,尤其在可见光波段。

分析图 4d 可知,当阴影叶片光谱去除后,不同天顶角下的大豆冠层光谱与叶绿素密度的相关性和土壤光谱去除前后有相似的变化趋势,即可见光波段的相关性显著增加。但是,天顶角为 60° 时,可见-近红外波段敏感区间有较大变化,这可能与 60° 观测获取的遥感数据中阴影叶片比例较多有关,当去除后,势必使冠层光谱发生变化而引起结果的变化。

在上述处理分别分析基础上,进一步对比分析土壤、阴影光谱去除后,冠层光谱与叶绿素密度相关性变化。对比图 4c 和图 4d 发现,纯植被(光照与阴影)冠层光谱与叶绿素密度相关性在不同天顶角下的变化,波长 $450 \sim 600 \text{ nm}$ 有较大差异,波长 650 nm 附近红光区间差异很小;但是,光照植被得出的相关性,与此相反,即波长 $600 \sim 680 \text{ nm}$ 区间差异大,波长 500 nm 差异较小。这可能是当光照与阴影叶片都存在时,红光区间都有强烈的吸收作用,所以差异小;而蓝、绿波段受不同天顶角下阴影叶片比例不同的影响,反射率有较大变化,所以差异大。当阴影叶片去除后,视场内光照叶片的比例不同,所以红光区间的吸收差异就得以显现。此外,是否和大豆的茎秆、枝等器官有关系,有待进一步研究。

2.1.2 不同天顶角时大豆叶绿素密度反演

对敏感波段进行分析后,在此对相关系数最高的角度进行组合,评价不同角度组合下建立冠层叶绿素密度预测模型的能力(表 5)。

由表 5 可知,混合植被在 4 个天顶角同时存在时,冠层光谱与叶绿素密度的决定系数最高($R^2 = 0.834$),均方根误差为 6.13。为了分析不同天顶角在大豆冠层叶绿素密度模型构建时的贡献度,对不同形式的组合进行解释:角度组合为($0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$)时,决定系数为 0.780;角度组合为($20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$)时,决定系数为 0.814,均方根误差为 5.80,低于其他角度组合结果。可解释为 40° 和 60° 观测角时,能

表 5 叶绿素密度和不同天顶角组合下冠层光谱的决定系数和均方根误差

Tab. 5 R^2 and RMSE between chlorophyll density and canopy spectra from angles combination of different zenith angles

| 类型 | 角度组合/($^\circ$) | R^2 | RMSE |
|----|-------------------|-------|------|
| MV | (0,20,40,60) | 0.834 | 6.13 |
| | (0,20,40) | 0.780 | 6.30 |
| | (20,40) | 0.689 | 5.82 |
| | (20,40,60) | 0.814 | 5.80 |
| | (40,60) | 0.776 | 5.81 |
| | (40) | 0.410 | |
| PV | (0,20,40,60) | 0.816 | 6.45 |
| | (0,20,40) | 0.744 | 6.80 |
| | (20,40) | 0.613 | 6.33 |
| | (20,40,60) | 0.778 | 6.33 |
| | (40,60) | 0.762 | 6.00 |
| | (60) | 0.734 | |
| SV | (0,20,40,60) | 0.774 | 7.14 |
| | (0,20,40) | 0.713 | 7.20 |
| | (20,40) | 0.588 | 7.20 |
| | (20,40,60) | 0.729 | 7.00 |
| | (40,60) | 0.682 | 6.92 |
| | (40) | 0.585 | |

获取大豆中下层的光谱信息; 0° 和 20° 观测角时,主要获取大豆上层的光谱信息,而群体的叶绿素密度计算时,中下层也有较大贡献。当采集的光谱和群体叶绿素密度近似对应时,叶绿素密度线性拟合模型的决定系数将增大。因此, ($20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$)的角度组合优于($0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$)的角度组合。为了进一步说明这个结果,也对($20^\circ, 40^\circ$)和($40^\circ, 60^\circ$)组合进行对比,发现后者计算的确定系数高于前者,且均方根误差在同一个水平。由此说明,若反演大豆群体叶绿素密度时,下层光谱信息是影响预测模型精度的重要因素。

这里对土壤光谱与阴影光谱剔除后的叶绿素密度预测模型也进行分析,发现与混合植被得出的结果一致。即不同天顶角同时存在时,有最高的预测模型决定系数(0.816 和 0.774);($20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$)的角度组合优于($0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$);($40^\circ, 60^\circ$)的角度组合优于($20^\circ, 40^\circ$);综上所述,在大豆群体叶绿素密度反演时,采用多角度观测手段获取大豆下层光谱信息,能提高叶绿素密度预测模型的精度。

但是,冠层光谱中的土壤光谱去除后,与叶绿素密度的决定系数低于去除前(表 5),这和单个角度下冠层光谱与叶绿素密度相关性分析的结果不一致(表 4)。这可能是因为植土混合时,对叶绿素密度敏感的波段大多为近红外波段,它只受冠层内部结

构的影响,对天顶角变化不敏感;而纯植被时,对叶绿素敏感的波段大多表现为绿、红波段,它们主要受色素含量影响,而视场范围内的叶绿素群体因观测角变化而变化,且色素含量也同步发生变化,因此多个角度组合后,反而影响了整体的模型精度。

2.2 方位角变化下大豆叶绿素密度反演

分析了天顶角变化下不同角度组合对叶绿素密度预测模型构建的影响后,再重点讨论方位角变化

下的叶绿素密度与冠层光谱的相关性及评价不同角度组合反演叶绿素密度的能力。

2.2.1 不同方位角下大豆冠层光谱与叶绿素密度相关性分析

这里重点探讨影像中土壤光谱及阴影光谱去除前后与大豆冠层叶绿素密度在不同方位角下的相关性。混合植被(植被与土壤同时存在)与大豆冠层叶绿素密度的相关系数如图5和表6所示。

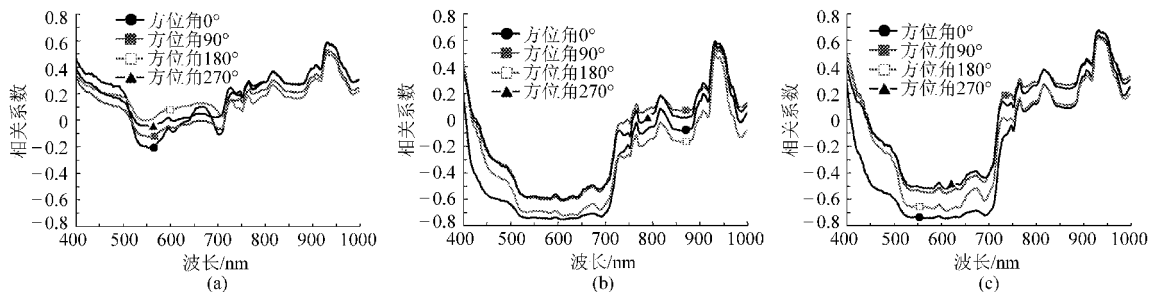


图5 不同方位角下冠层光谱与叶绿素密度相关性(20°天顶角)

Fig. 5 Correlation between chlorophyll density and canopy spectra from different azimuth angles

(a) 混合大豆植被冠层光谱与叶绿素密度的相关性 (b) 纯大豆植被冠层光谱与叶绿素密度的相关性
(c) 光照大豆植被冠层光谱与叶绿素密度的相关性

表6 叶绿素和不同方位角下冠层光谱的相关系数、入选波长、敏感区间

Tab. 6 Correlation coefficients, sensitive regions and selected wavebands between chlorophyll density and canopy spectra in different angles

| 类型 | 方位角 /(°) | 敏感区间 波长/nm | 入选波长 /nm | 相关 系数 |
|----|-------------|----------------------|-------------|----------|
| | | | | |
| MV | 0 | 922 ~ 962 | 933 | 0.590 |
| | 90 | 924 ~ 956 | 933 | 0.533 |
| | 180 | 925 ~ 954 | 933 | 0.508 |
| | 270 | 922 ~ 963 | 933 | 0.584 |
| PV | 0 | 428 ~ 720, 926 ~ 954 | 609 | -0.750 |
| | 90 | 506 ~ 728, 926 ~ 954 | 611 | -0.612 |
| | 180 | 470 ~ 718, 928 ~ 947 | 611 | -0.721 |
| | 270 | 504 ~ 710, 924 ~ 954 | 610 | -0.602 |
| SV | 0 | 445 ~ 718, 922 ~ 962 | 609 | 0.744 |
| | 90 | 516 ~ 698, 904 ~ 970 | 933 | 0.675 |
| | 180 | 509 ~ 710, 923 ~ 958 | 611 | -0.680 |
| | 270 | 518 ~ 652, 900 ~ 970 | 933 | 0.678 |

由图5和表6可知,混合植被(大豆植株与土壤)的冠层光谱在与叶绿素密度的相关性在4个方位角上都较低,仅在近红外波段(930~955 nm)有极显著正相关。其中,方位角为0°,太阳主平面后向观测时,有最高的相关系数,当方位角为180°,相关系数最低;方位角为90°和270°的垂直主平面观测时,相关系数大小在前后向观测结果的中间。当土壤光谱去除后,近红外波段的相关系数趋势与混合植被一致,但是,纯植被在可见光波段有极显著相关性,且由大到小依次是0°、180°、90°、270°。引起上述变化的主要原因是:太阳主平面观测时,后向获得植被冠层的光照信息最多,前向获得阴影信息较多。当20°天顶角时,视场内主要以光照叶片为主,且大豆为宽叶植物,前后向观测相差不大;对于垂直太阳主平面,这两个方向的阴影面积较多,所以相对的相关系数也较小。当阴影叶片光谱去除后,相关

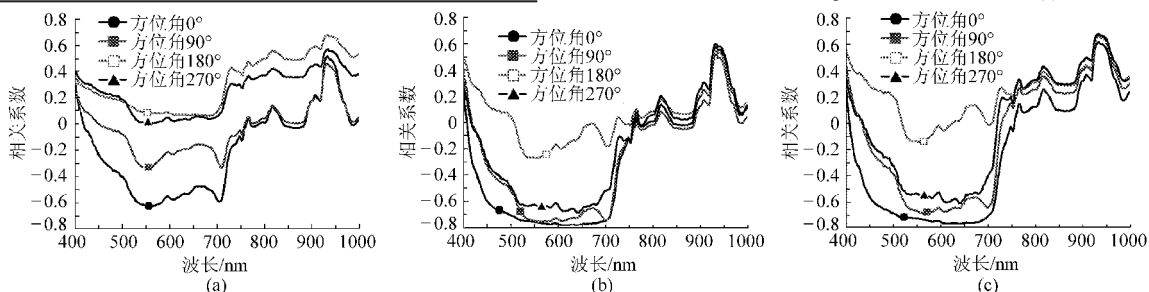


图6 不同方位角下冠层光谱与叶绿素密度相关性(40°天顶角)

Fig. 6 Correlation between chlorophyll density and canopy spectra from different azimuth angles

(a) 混合大豆植被冠层光谱与叶绿素密度的相关性 (b) 纯大豆植被冠层光谱与叶绿素密度的相关性
(c) 光照大豆植被冠层光谱与叶绿素密度的相关性

系数的整体趋势和纯植被一致,即可见光区间极显著范围大,近红外极显著位于波长 930 ~ 950 nm 附近。总体上,相关系数值较纯植被的结果低,可能是因为对冠层光谱有贡献的阴影光谱被去除所致。

当天顶角为 40°时,即研究植被热点信息的最佳观测角度。由图 6 和表 7 可知,混合植被冠层光谱与叶绿素密度的相关性整体较差,仅在近红外波长 930 ~ 950 nm 极显著相关。但是,在主平面的后向观测时,冠层光谱和叶绿素密度在可见光波段有极显著相关性。这可以说明 40°的天顶角下附近能够获取较多的植被信息。前人在水稻、小麦等作物上研究得出的热点区域位于 35°左右^[22],从而证明混合植被冠层光谱在 40°时应该有较高表现。此外,4 个方位角相关系数由大到小依次是 0°、90°、270°、180°,这和 20°天顶角下的结果不同。

当土壤光谱被去除后,4 个方位角相关系数大小的顺序和混合时结果一致。但 0°、90°、270°下的相关系数都较混合时有较大提高(在可见光波段),但是 180°没有显著性(近红外波长 930 ~ 950 nm 除外)。分析其原因可能是视场阴影叶片比例较天顶角 20°时增加,致使其相关性未能显著提高。当阴影叶片去除后,整体趋势和纯植被一致,冠层光谱与

叶绿素密度相关性差异仅在近红外波长 780 ~ 830 nm 增大,说明阴影叶片存在时,植被群体间多次散射增多,所以 4 个方位角之间差异不明显,当阴影叶片去除后,在近红外波段的多次散射效应降低,因此方位角之间的差异显现。

表 7 叶绿素密度和不同方位角下冠层光谱的相关系数、入选波长、敏感区间(40°天顶角)

Tab. 7 Correlation coefficients, sensitive regions and selected wavebands between chlorophyll density and canopy spectra in different angles

| 类型 | 方位角 / (°) | 敏感区间波长/nm | 入选波长 /nm | 相关系数 |
|----|-----------|----------------------|----------|--------|
| MV | 0 | 504 ~ 717, 926 ~ 950 | 561 | -0.628 |
| | 90 | 928 ~ 942 | 933 | 0.457 |
| | 180 | 758 ~ 1000 | 932 | 0.671 |
| | 270 | 898 ~ 972 | 933 | 0.563 |
| PV | 0 | 430 ~ 722, 925 ~ 955 | 611 | -0.783 |
| | 90 | 468 ~ 720, 927 ~ 950 | 563 | -0.757 |
| | 180 | 430 ~ 723, 926 ~ 953 | 933 | 0.551 |
| | 270 | 480 ~ 712, 924 ~ 950 | 607 | -0.686 |
| SV | 0 | 436 ~ 720, 923 ~ 959 | 640 | -0.765 |
| | 90 | 506 ~ 715, 920 ~ 965 | 933 | -0.682 |
| | 180 | 435 ~ 721, 959 ~ 970 | 563 | 0.662 |
| | 270 | 511 ~ 696, 892 ~ 972 | 933 | 0.679 |

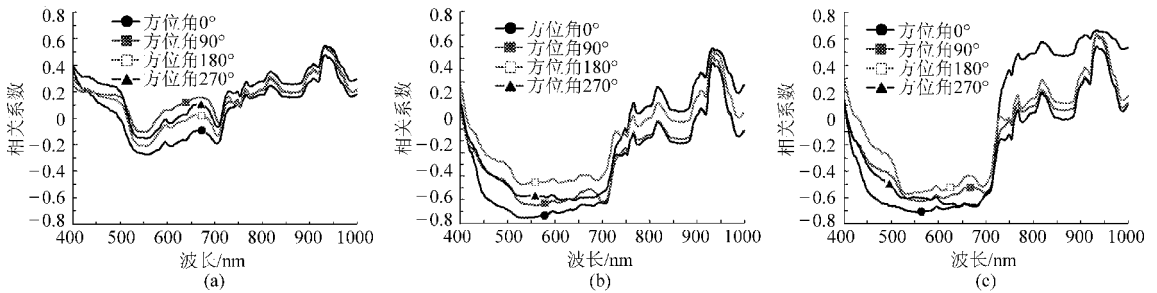


图 7 不同方位角下冠层光谱与叶绿素密度相关性(60°天顶角)

Fig. 7 Correlation between chlorophyll density and canopy spectra from different azimuth angles

(a) 混合大豆植被冠层光谱与叶绿素密度的相关性 (b) 纯大豆植被冠层光谱与叶绿素密度的相关性 (c) 光照大豆植被冠层光谱与叶绿素密度的相关性

由图 7 和表 8 可知,当天顶角为 60°时,混合植被冠层光谱包含大量的植株结构及叶片的背面信息,因此与叶绿素密度的相关性都较差。但是整体趋势在近红外波段和天顶角为 20°、40°时的结果一致;不同方位角之间的差异较小。当土壤、阴影叶片光谱去除后,4 个方位角的冠层光谱与叶绿素密度的相关性在可见光波段都有显著提高,这和天顶角为 40°时一致。但是前向观测(180°)时的相关系数,在绿、红波段达到显著相关,其值明显高于天顶角 40°时的结果。在天顶角 40°时获取的植被覆盖度低于天顶角 20°和 60°,所以土壤剔除后,20°天顶角下的前向观测有最高的相关系数($R = 0.68$);60°天顶角下前向观测时,虽然获得较多的大豆叶片背

面信息,但是因为覆盖度大,所以相关系数高于天顶角为 40°时的结果。同时,比较图 5 ~ 7 中纯植被冠层光谱与叶绿素密度的相关系数图发现,方位角之间的相关系数差异最大的天顶角为 40°下,60°的天顶角次之,20°的天顶角最小。由此说明,相比方位角变化,天顶角变化对叶绿素密度反演模型的构建有更大影响。

2.2.2 不同方位角下大豆叶绿素密度反演

在分析上述敏感波段的基础上,选用相关系数最高的角度进行组合,评价不同方位角组合下建立冠层叶绿素密度预测模型的能力。结果如表 9 所示。

由表 9 可知,混合植被 4 个方位角同时存在时,

表8 叶绿素密度和不同方位角下冠层光谱的
相关系数、入选波长、敏感区间(60°天顶角)

Tab.8 Correlation coefficients, sensitive regions and
selected wavebands between chlorophyll density and
canopy spectra from different angles

| 类型 | 方位角 /(°) | 敏感区间波长/nm | 入选波长 /nm | 相关 系数 |
|----|-------------|-------------------|-------------|----------|
| MV | 0 | 926~950 | 933 | 0.477 |
| | 90 | 924~957 | 933 | 0.536 |
| | 180 | 924~957 | 933 | 0.533 |
| | 270 | 922~960 | 933 | 0.548 |
| PV | 0 | 433~720, 922~962 | 536 | -0.857 |
| | 90 | 448~722, 927~948 | 562 | -0.749 |
| | 180 | 502~710, 925~955 | 536 | -0.570 |
| | 270 | 450~719, 929~944 | 640 | -0.710 |
| SV | 0 | 437~714, 760~1000 | 561 | -0.708 |
| | 90 | 496~714, 924~956 | 933 | 0.633 |
| | 180 | 511~709, 923~959 | 933 | 0.636 |
| | 270 | 466~714, 924~955 | 641 | -0.662 |

表9 叶绿素密度和不同方位角组合下冠层
光谱的决定系数和均方根误差

Tab.9 R^2 and RMSE between chlorophyll density and canopy
spectra from angles combination of different azimuth angles

| 类型 | 天顶角/(°) | 角度组合/(°) | R^2 | RMSE |
|----|---------|----------------|-------|-------|
| MV | 20 | (0,90,180,270) | 0.549 | 10.10 |
| | | (0,90,270) | 0.542 | 9.10 |
| | | (0,180) | 0.414 | 9.41 |
| | | (90,180,270) | 0.434 | 10.12 |
| | 40 | (0,90,180,270) | 0.816 | 6.43 |
| | | (0,90,270) | 0.719 | 7.12 |
| | | (0,180) | 0.782 | 5.73 |
| | | (90,180,270) | 0.569 | 8.83 |
| | 60 | (0,90,180,270) | 0.320 | 12.40 |
| | | (0,90,270) | 0.319 | 11.10 |
| | | (0,180) | 0.289 | 10.35 |
| | | (90,180,270) | 0.310 | 11.24 |
| PV | 20 | (0,90,180,270) | 0.788 | 6.92 |
| | | (0,90,270) | 0.600 | 8.50 |
| | | (0,180) | 0.565 | 8.17 |
| | | (90,180,270) | 0.780 | 6.30 |
| | 40 | (0,90,180,270) | 0.812 | 6.52 |
| | | (0,90,270) | 0.655 | 7.90 |
| | | (0,180) | 0.681 | 6.94 |
| | | (90,180,270) | 0.799 | 6.03 |
| | 60 | (0,90,180,270) | 0.773 | 7.17 |
| | | (0,90,270) | 0.765 | 6.52 |
| | | (0,180) | 0.754 | 6.09 |
| | | (90,180,270) | 0.609 | 8.40 |
| SV | 20 | (0,90,180,270) | 0.774 | 7.13 |
| | | (0,90,270) | 0.734 | 6.94 |
| | | (0,180) | 0.557 | 8.17 |
| | | (90,180,270) | 0.774 | 6.40 |
| | 40 | (0,90,180,270) | 0.761 | 7.36 |
| | | (0,90,270) | 0.724 | 7.06 |
| | | (0,180) | 0.585 | 7.91 |
| | | (90,180,270) | 0.590 | 8.61 |
| | 60 | (0,90,180,270) | 0.883 | 5.13 |
| | | (0,90,270) | 0.687 | 7.52 |
| | | (0,180) | 0.597 | 7.79 |
| | | (90,180,270) | 0.883 | 4.60 |

冠层光谱与叶绿素密度的决定系数最高,且在不同天顶角时(20°,40°,60°)表现为:40°时决定系数最高(R^2 为0.816, RMSE为6.43);20°次之,60°最低。由此说明,天顶角变化,对不同方位角获取的大豆冠层光谱信息有直接的影响。当土壤光谱去除后,也表现为相同的规律,虽然不同天顶角下的决定系数变化不大,但是都远远大于混合植被的结果。而阴影叶片光谱剔除后,表现为天顶角60°时最高,20°次之,40°最低,这和视场内大豆冠层叶片的阴影比例有关,表3中已进行相关统计,天顶角60°时阴影叶片的比例最高,20°次之,40°最低。

为了分析不同方位角在大豆冠层叶绿素密度模型构建时的贡献度,这里进行不同形式的组合并进行解释。前提是天顶角固定,角度组合变化。在天顶角20°时,(0°,90°,270°)角度组合的决定系数分别为0.542、0.600、0.734;而(90°,180°,270°)角度组合的决定系数分别为0.434、0.780、0.774;而(0°,180°)角度组合的决定系数分别为0.414、0.565、0.557。比较三者结果,发现(90°,180°,270°)角度组合有最高的决定系数。原因是:180°为前向观测,视场范围内的阴影土壤和阴影叶片面积最大,当二者光谱未剔除前,不同方位角组合差异不大;当土壤光谱去除后,植被的光谱信息量增加,在构建叶绿素密度预测模型中的植被信息增加,因此表现为决定系数增大;当叶片阴影去除后,植被的大量信息被丢失,因此决定系数降低。

40°天顶角时,(0°,90°,270°)角度组合的决定系数分别为0.719、0.655、0.724;而(90°,180°,270°)角度组合的决定系数分别为0.569、0.799、0.590;而(0°,180°)角度组合的决定系数分别为0.782、0.681、0.585。分析上述决定系数结果发现,40°天顶角下的方位角组合结果变动较大。这可能因40°天顶角下植被的覆盖度发生较大变化所致。此外,前后向观测(0°,180°)获得的光谱信息有较高的决定系数,是否可说明这两个方位角对40°天顶角下的植被光谱信息有最大的贡献,这需要进一步研究。

60°天顶角时,(0°,90°,270°)角度组合的决定系数分别为0.319、0.765、0.687;(90°,180°,270°)角度组合的决定系数分别为0.310、0.609、0.883;而(0°,180°)角度组合的决定系数分别为0.289、0.754、0.597。总体规律是土壤光谱剔除后,能显著提高叶绿素密度预测模型的决定系数;阴影叶片光谱剔除后,决定系数变化不大。由此说明,土壤背景在植被覆盖度低的方位角变化中占主导地位。

3 结论

(1) ($0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$)的天顶角组合有最高的预测模型决定系数和最小的均方根误差, ($20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$)的天顶角组合得到的决定系数高于($0^\circ, 20^\circ, 40^\circ$)的组合。在混合植被、纯植被、光照植被3类数据中有一致的结果。

(2)在不同天顶角下, 40° 天顶角是反演叶绿素密度的最优角度。相关系数在混合植被、纯植被、光照植被中分别为 -0.628 、 -0.783 、 -0.765 。

(3) ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$)方位角组合有最高的预测模型决定系数和最小的均方根误差,在混合植被、纯植被、光照植被3类数据中有一致的结果。

(4)在不同方位角下, 0° 方位角(太阳主平面的后向观测)是反演叶绿素密度的最优角度。

(5)在多角度反演大豆冠层叶绿素密度的反演研究中,天顶角变化是影响反演结果的主要因素。它直接决定视场范围内类型地物的比例。其次,背景土壤是影响叶绿素密度的主要因素,尤其是在大豆生育前期。

参 考 文 献

- 柳钦火,辛晓洲,唐娉,等. 定量遥感模型、应用及不确定性研究[M]. 北京:科学出版社,2010.
- 高峰,朱启疆. 植被冠层多角度遥感研究进展[J]. 地理科学,1997,17(4):346~354.
Gao Feng, Zhu Qijiang. Inversion of vegetation canopies using multiangular remote sensing [J]. Journal of Geography Sciences, 1997, 17(4): 346~354. (in Chinese)
- 王纪华,赵春江,黄文江,等. 农业定量遥感基础及应用[M]. 北京:科学出版社,2008.
- 阎广建,吴均,王锦地,等. 光谱先验知识在植被结构遥感反演中的应用[J]. 遥感学报,2002,6(1):1~6.
- 李云梅,王人潮,王秀珍,等. 水稻冠层二向反射率的模拟及其反演[J]. 中国水稻科学,2002,16(3):291~294.
Li Yunmei, Wang Renchao, Wang Xiuzhen, et al. Simulation of bi-directional reflectance on rice canopy and its inversion[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2002, 16(3): 291~294. (in Chinese)
- 李云梅. 植被辐射传输理论与应用[M]. 南京:南京师范大学出版社,2005.
- 黄文江,王纪华,刘良云,等. 基于多时相和多角度光谱信息的作物株型遥感识别初探[J]. 农业工程学报,2005,21(6):1~5.
- 张雪红,赵峰,刘绍民,等. 冬小麦红边参数各向异性特征分析[J]. 农业工程学报,2006,22(6):7~11.
Zhang Xuehong, Zhao Feng, Liu Shaomin, et al. Anisotropic characteristics analysis of red edge parameters of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(6): 7~11. (in Chinese)
- 杨贵军,邢著荣,黄文江,等. 不同株型冬小麦冠层结构特征多时相分析[J]. 农业工程学报,2010,26(7):227~234.
- Wu Chaoyang, Niu Zheng, Tang Quan, et al. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: modeling and validation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(8~9): 1230~1241.
- Wu Chaoyang, Niu Zheng, Wang Jindi, et al. Predicting leaf area index in wheat using angular vegetation indices derived from in situ canopy measurements [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2010, 36(4):301~312.
- Wang Zhijie, Coburn C A, Ren Xuemin, et al. Effect of soil surface roughness and scene components on soil surface bidirectional reflectance factor[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2012, 92(2):297~313.
- 张东彦. 基于高光谱成像技术的作物叶绿素信息诊断机理及方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.
Zhang Dongyan. Diagnosis mechanism and methods of crop chlorophyll information based on hyperspectral imaging technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- Casa R, Jones H G. Retrieval of crop canopy properties: a comparison between model inversion from hyperspectral data and image classification [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(6):1119~1130.
- Huang Wenjiang, Wang Zhijie, Huang Linsheng, et al. Estimation of vertical distribution of chlorophyll concentration by bi-directional canopy reflectance spectra in winter wheat [J]. Precision Agriculture, 2011, 12(2):165~178.
- Xiao Chunhua, Li Shaokun, Wang Keru, et al. A leaf layer spectral model for estimating protein content of wheat grains[J]. International Federation for Information Processing (IFIP), 2011, 347(4):16~29.
- Wang Zhijie, Wang Jihua, Zhao Chunjiang, et al. Vertical distribution of nitrogen in different layers of leaf and stem and their relationship with grain quality of winter wheat[J]. Journal of Plant Nutrition, 2005, 28(1):73~91.
- Wang Jihua, Huang Wenjiang, Lao Cailian, et al. Inversion of winter wheat foliage vertical distribution based on canopy reflected spectrum by partial least squares regression method [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(7):1319~1322.
- Pu Ruiliang. Broadleaf species recognition with in situ hyperspectral data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(11):2759~2779.
- 刘良云. 高光谱遥感在精准农业中的应用[R]. 中科院遥感应用研究所博士后研究报告,2002:30~60.
- 谭昌伟,王纪华,陆建飞,等. 基于红边参数的夏玉米长势监测及其营养诊断研究[J]. 中国生态农业学报,2007,15(1):82~86.
- Schneider Th, Manakos I. BRDF approximation of maize and canopy parameter retrieval by ProSail inversion[C]//The 3rd EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy, Herrsching, 2003:13~16.