

多角度成像解析大豆冠层的二向反射特征

张东彦^{1,2}, 梁 栋¹, 赵晋陵², Coburn Craig³, Wang Zhijie³, 王 秀²

(1. 安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039; 2. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 3. Department of Geography, University of Lethbridge, Alberta T1K3M4, Canada)

摘要: 植被冠层二向性反射特征是定量遥感必须关注的一个问题。论文借助自主研发的多角度成像系统, 在不同观测时间对不同种植密度下的大豆冠层进行多角度成像数据采集, 通过对“图谱合一”的高光谱影像中大豆植株、土壤背景和阴影叶片进行逐步分离, 对比分析纯大豆植被与植被-土壤混合冠层的二向反射 (Bidirectional Reflectance, BR) 变化特征, 研究发现: 在主平面观测时, 土壤光谱去除后, 即纯植被冠层反射率在前向观测时, 随着天顶角的减小而增大, 这不同于植被和土壤同时存在时的研究结果 (BR 随着天顶角的增加而增大); 当观测方向由主平面的前向朝后向变动时, 可见光和近红外波段的纯植被冠层反射率表现为逐步增大的趋势, 这和土壤光谱去除前的变化趋势也不同; 在垂直主平面观测时, 去除土壤背景后的纯植被冠层反射率与混合植被反射率特征有相同的趋势, 但在垂直主平面方向的对称性更强。上述结果在不同密度、不同观测时间的大豆冠层 BR 特征有相近的趋势, 这为多角度遥感的发展提供了必要的基础研究。

关键词: 图谱解析; BR; 天顶角; 方位角; 大豆

中图分类号: TP79; S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)03-0787-11

Bidirectional reflectance characteristics of soybean canopy using multi-angle hyperspectral imaging

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

(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: Research on bidirectional reflectance characteristics of vegetation canopy is an important direction for quantitative remote sensing. The self-developed multi-angle observation system in this paper was used to collect imaging data of soybean in different sowing density from branch period to flowering period. Characteristics of changes in Bidirectional Reflectance (BR) for pure vegetation and mixed canopy, including vegetation and soil, were analyzed by hyperspectral images from segmenting vegetation, background soil, and shadow leaves. Studies have shown that observation position is the principal plane; canopy reflectance of pure vegetation after soil spectra is removed, gradually increased along with the

收稿日期: 2012-07-22; 修订日期: 2012-08-19

基金项目: 安徽省自然科学基金青年基金(1308085); 安徽省高等学校省级自然科学基金项目(KJ2013A026); 国家高技术研究发展计划(2012AA101903); 高等学校博士学科点科研基金(20113401110006); 安徽大学博士科研启动项目

作者简介: 张东彦(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事高光谱图像处理及遥感定量化的研究. Email: zhangdy@nercita.org.cn

通讯作者: 王秀(1965-), 男, 研究员, 博士, 主要从事精准农业装置的开发与应用. Email: wangqx@nercita.org.cn

decrease of zenith angle. When forward observation was conducted in principal plane, it differed from the canopy composed of vegetation and soil. When observation direction changed from backward to forward in the principal plane, canopy reflectance of pure vegetation in visible and near-infrared region showed a growing tendency gradually and the soil spectra was removed, this was different from before. In addition, when the observation position was in a perpendicular plane, there was a similar change for reflectance of soybean canopy before and after soil spectra was removed; but the symmetry of canopy reflectance of the former was better than the latter. The results had similar trends with BR change of soybean canopy in different sowing density. The paper provides a basis for the development of multi-angle remote sensing.

Key words: analysis of image and spectrum; BR; zenith angle; azimuth angle; soybean

0 引言

研究表明, 遥感传感器所观测到的冠层辐射亮度不仅与冠层的构成要素有关, 还与观测方向和太阳入射方向有密切的联系^[1-2]。正因如此, 植被冠层二向性反射特征解析成为遥感定量化研究必须关注的一个问题。

目前, 对作物二向反射 (BR) 的研究主要是利用非成像地物光谱仪 ASD 展开的。Qin 等以小麦、大豆等作物为例, 考虑了非叶器官如茎的二向反射作用, 改进了“热点”效应中重叠函数的计算模式, 发展了多组分的双向反射模型^[3]; Sandmeier 等提出的基于不同观测角度实际测定的二向反射率及其组合, 提出运用各向异性因子和各向异性指数对株型紧凑的草坪和平展的豆瓣菜进行识别^[4-5]; d'Entremont 等和 Gao 等分别利用 AMBRALS 核驱动模型提取近红外和红光波段的核系数和构建结构散射指数 (Structural Scattering Index, SSI), 通过多角度模型进行反演, 对处于归一化植被指数数值相同的不同结构的作物类型(草坪、小麦、玉米、大豆)进行区分^[6-7]; 申广荣等和李云梅等利用田间实测多角度光谱数据, 详细分析了水稻的一些结构参数及其它因子对双向反射因子的影响^[8-9]; Schneider 等分析玉米冠层 BRDF 对 PROSAIL 模型反演的生理生化参数的影响^[10]; 黄文江等利用多角度信息对不同株型小麦品种进行识别^[11]。上述研究都涉及到背景地物(土壤或水体)对作物冠层二向反射的影响。受传感器性能限制(获取地物光谱是混合信息), 未能逐步分析背景地物中各个分量对作物冠层二向性贡献的大小。

近年来, 随着多光谱相机及高光谱成像仪在作物冠层上的应用^[12-13], 研究者发现新型传感器对于

解译作物 BRDF 特征具有巨大的优势, 即在研究其热点-冷点变化规律的同时, 可以利用其同步成像的特点, 分析同一场景中作物(光照与阴影)与土壤(光照与阴影)的 BRDF 变化特征, 进而分析背景地物对作物冠层光谱的影响^[14], 这为研究作物生理生化参数反演模型精度的提高提供了重要的理论支持。文中拟采用多角度观测方式, 在不同观测时间对不同种植密度下的大豆冠层进行多角度成像数据采集, 通过对“图谱合一”的高光谱影像中大豆植株、土壤背景和阴影叶片进行逐步分离, 对比研究纯大豆植被与植被-土壤混合冠层的 BR 变化特征, 最终解释土壤、阴影叶片及角度变化对作物 BR 贡献的影响程度。

1 材料与方法

1.1 实验设计

实验于 2010 年 8 月至 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)展开。研究对象是大豆(中黄 13), 具有株型紧凑的特点, 于 2010 年 7 月 1 日播种, 正常田间管理, 无特殊处理。当大豆处于幼苗分枝期时, 应用多角度成像系统进行植株冠层的影像数据采集。表 1 是田间获取

表 1 大豆多角度观测数据列表

Tab.1 Statistics of experimental parameters for soybean multi-angles data

Observation date	Observation time	Solar zenith	Solar azimuth	Density	Weather
2010-8-28 pm	14:55-15:25	49.85°	245.30°	dense	sunny
	15:35-15:58	55.20°	251.70°	thin	sunny
2010-8-29 am	10:19-10:41	38.50°	135.30°	thin	sunny
	11:09-11:34	33.50°	152.45°	dense	sunny

数据的观测时间、天气状况、种植密度以及太阳角度信息。

1.2 多角度成像系统与数据获取

1.2.1 多角度成像系统介绍

田间多角度成像系统由北京农业信息技术研究中心提供(见图 1)。它主要由几部分构成:用于移动和支撑观测平台的四轮驱动车;调整高度的观测架;变化天顶角、方位角的弧形轨道;控制涡轮电机、步进电机工作的笔记本电脑以及实现数据采集的可见-近红外成像光谱仪(VNIS)。其中,VNIS 由 Hamamatsu C8484-05G 高分辨率相机、V10E 光谱仪、外置扫描镜构成,光谱仪的光谱范围是 400~1 000 nm,光谱分辨率为 2.8 nm,光谱间隔是 2.4 nm;光谱仪的视场范围是 14°(水平)×11°(垂直)×18°(对角线)。每次数据采集时,通过 VNIS 自带的软件 CSIspec-IS-lite (Channel Systems Inc., Manitoba, Canada)控制扫描镜 360°旋转实现一幅图像的快速获取。



图 1 多角度高光谱成像系统

Fig.1 Multi-angle hyperspectral imaging system

1.2.2 数据获取

多角度成像数据采集包含天顶角与方位角两部分。其中,天顶角在半径为 2 m 的圆弧上每隔 20°进行一次数据获取,分别为天顶角 0°、20°、40°、60°;方位角在一个圆周内每隔 20°进行一次数据获取,从太阳主平面的 0°开始,到 340°截止。具体的角度变化如图 2 所示^[15]。因作物二向反射特性与太阳高度角及观测方位角都有关系,在观测仪器角度发生变化时,要保证太阳高度角基本不变或变化小可忽略。前人研究表明,若天气晴朗无云,植被 BRDF 研究的数据采集可控制在半个小时内^[16]。VNIS 采集每幅影像的时间为 10 s,角度变化由电机精确控制,每次只需 5 s,因此 10~20 min 可完成一个观测点数据采集(时间由观测角度增加而增加),有效地保证了作物

BR 特性研究的准确性。

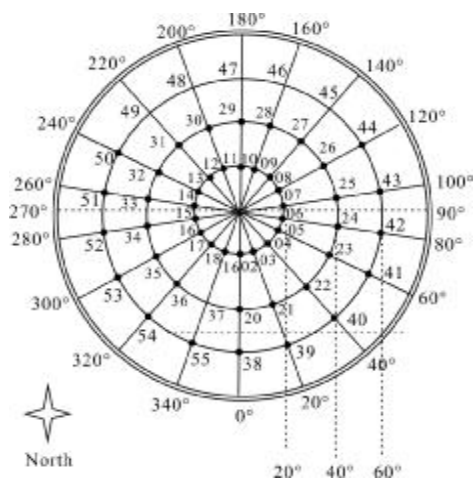


图 2 多角度观测顺序示意图

Fig.2 Diagram of multi-angle observation sequences

1.2.3 数据处理

成像数据采集时,用地物光谱仪 ASD 同步采集参考白板的数字量化值,实时记录当时的天气变化,用于后期的影像反射率反演。文中的影像反射率提取参考 Wang 等的定标方法^[17],光谱提纯采用归一化光谱分类指数处理^[14]。

2 结果与分析

2.1 不同观测天顶角下的大豆冠层 BR 变化

植被冠层二向反射率与观测方向有密切联系^[18-21]。文中主要研究不同观测天顶角下大豆冠层的二向反射率变化趋势。图 3 是稠密大豆冠层上、下午观测时的 BR 变化图;图 4 是稀疏大豆冠层上、下午观测时的 BR 变化特征;图 5 是不同密度大豆冠层上、下午观测时的近红外波段 BR 变化特征。图 3~5 中 BR 变化特征都表现出相同的规律。图中,D 代表稠密,T 代表稀疏,aft 代表下午,mor 代表上午,450 nm、551 nm、670 nm、860 nm 代表不同的波段。即在主平面观测时,后向反射率大于前向反射率;冠层反射率随着观测天顶角的增加而增大。这和李云梅^[2]、Schneider 等^[10]、Wu^[21]有相同的研究结果。上述可解释为:在后向观测时,传感器与太阳在同一侧,探测到的信息主要是太阳直接照射到的光照部分,所以它的反射率大;在前向观测时,传感器在太阳的对侧,探测到的信息主要是太阳没有直接照射到的阴影部分,所以反射率小。当传感器从后向朝前向变动时,观测天顶角发生了

变化,在视场内大豆冠层上部光照部分所占比例随之改变;相应的,冠层中下部包含的阴影部分所占的比例也会发生相应的变化,所以冠层反射率随着观测天顶角的变化时刻改变。文中的观测对象是大豆,冠层结构相对均匀,当观测天顶角增大时,视场中植被部分(即冠层上部)增加,阴影部分(即冠层下部分)减少,所以冠层反射率也增大。因此,冠层反射率随着观测天顶角度的增加而增大,近红外波段与可见光波段有相同的趋势。

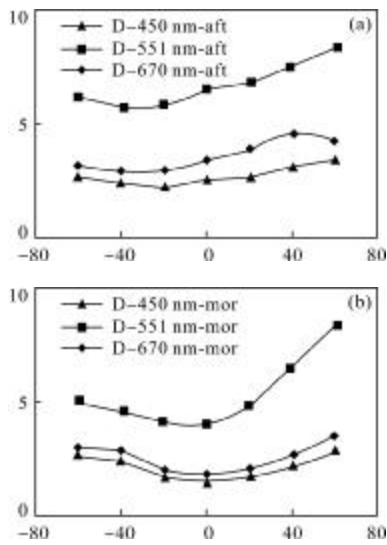


图 3 稠密大豆冠层上、下午观测时的 BR 变化特征
Fig.3 BR change features for dense soybean canopy in different times

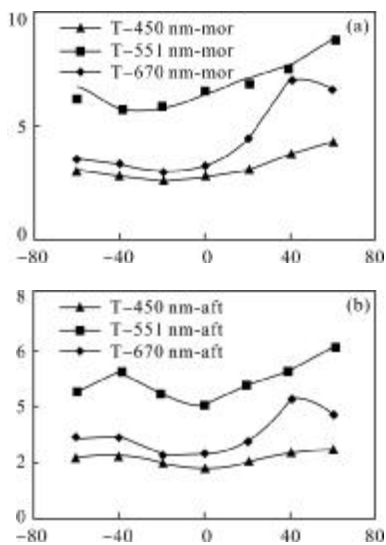


图 4 稀疏大豆冠层上、下午观测时的 BR 变化特征
Fig.4 BR change features for thin soybean canopy in different times

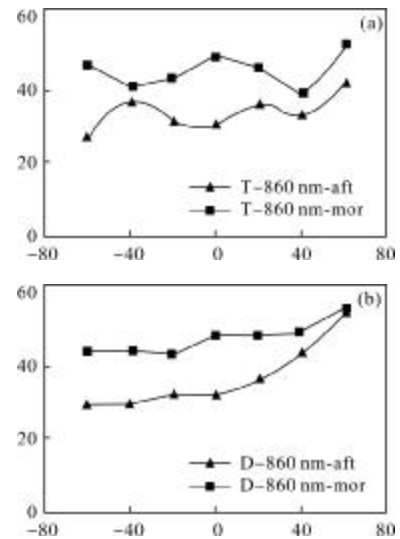


图 5 不同密度大豆冠层上、下午观测时的 BR 变化特征
Fig.5 BR change features for dense and thin soybean canopy in different times

图 6~8 是高光谱影像去除背景土壤(光照与阴影土壤)后的不同观测时间、不同密度、不同波长位置的大豆冠层 BR 变化趋势图。从图像中可看出,冠层反射率在前向观测时,随着天顶角的减小而增大;后向观测时,随着天顶角的增加而增大;后向反射率高于前向。这和视场内同时存在植被和土壤时的部分研究结果不同,即前人利用地物光谱仪 ASD 得出前向观测时随着天顶角的增加冠层反射率增大。分析其原因可能是:前向观测时,视场内主要以冠层的阴

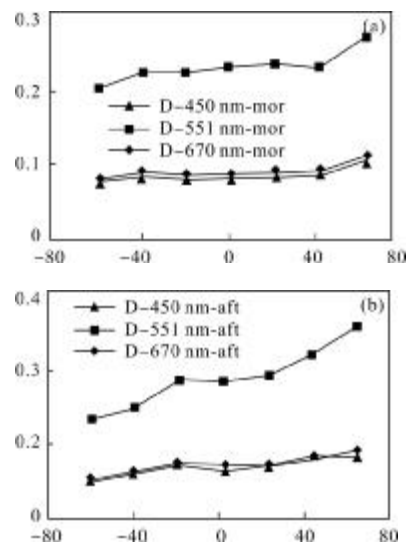


图 6 稠密的大豆纯植被冠层上、下午观测时的 BR 变化特征
Fig.6 BR change features for pure dense soybean canopy in different times

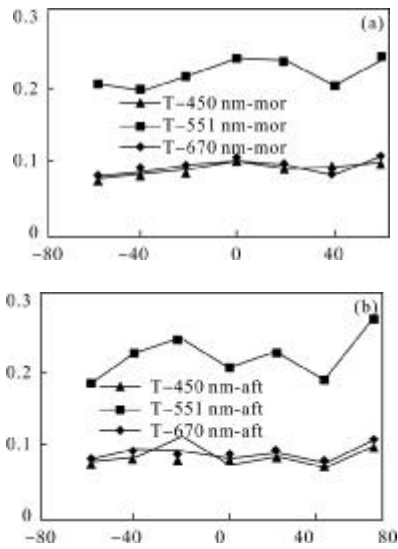


图 7 稀疏的大豆纯植被冠层上、下午观测时的 BR 变化特征

Fig.7 BR change features for pure thin soybean canopy in different times

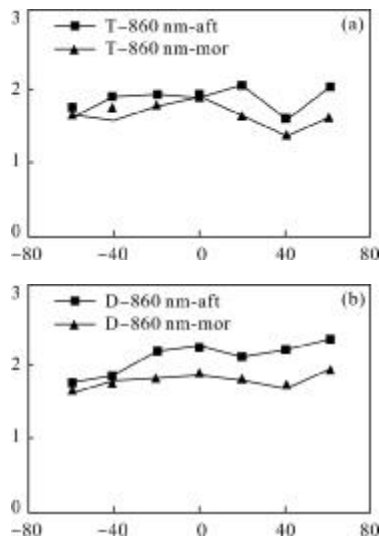


图 8 不同密度的大豆纯植被冠层上、下午观测时的 BR 变化特征

Fig.8 BR change features for pure dense and pure thin soybean canopy in different times

影叶片为主,随着天顶角的增加,阴影叶片的面积比例达到最高;相应地冠层反射率值表现为最低。背景土壤光谱未去除的前向观测时,视场内阴影土壤所占的比例随天顶角的增加而减小。那么,它对冠层反射率的影响由高到低变化。它与植被信息综合表现为较高的反射率值。即冠层反射率随着观测天顶角度的增加而增大。大量文献表明,土壤有很强的反射二向性^[23-24]。当去除土壤光谱信息后,剩下更多的阴影叶片信息,那么它的反射率值势必降低。同时,前

人利用地物光谱仪 ASD 垂直观测不同覆盖度作物冠层时,都发现当作物覆盖度低时,冠层反射率受土壤反射率的影响较大,尤其在可见光波段表现明显^[25-27]。这为文中得出的结论提供了理论支持。

此外还发现,当去除土壤光谱的后向观测时,不论在可见光波段还是近红外波段,反射率值增加都趋于平缓,尤其在近红外波段(见图 8)。对比土壤光谱信息去除前后 BR 的变化,可说明土壤对植被冠层的二向性反射有较大影响。

2.2 不同观测方位角下的大豆冠层 BR 变化

植被冠层二向反射率既与观测方向有关,也与入射光方向有密切关系^[28-29]。图 9 是稠密大豆冠层下午观测时在两个平面的 BR 变化图,包含了不同的波长位置,文中主要研究太阳主平面和垂直太阳主平面角度下的大豆冠层 BR 特征。图中,per 代表垂直太阳主平面,pri 代表太阳主平面。

图 9 显示,冠层光谱反射率在垂直主平面方向是近似对称的。在四个方位角中,以后向散射方向的反射率为最高,前向散射方向的反射率为最低,这种现象可以解释为,在后向散射方向,探测器方向与太阳入射方向一致,进入视场内的组分为太阳直接照射的部分,因而,在该方向的反射率最高。当探测器从后向散射方向朝其它方向移动时,有以下两个原因可造成反射率的减少:(1) 视场中观测到的阴影部分增加;(2) 视场中法线方向与太阳直接入射方向相偏离的组分增加,导致太阳在这些组分上的辐射减少。在前向散射方向,视场内所观测到的阴影部分较多,因为在此方向,有较多不被太阳直接照射的组分进入视场。如果这是使冠层反射率减少的唯一原因,那么,前向散射方向的反射率将随着观测天顶角的增加而降低,但是,随着观测天顶角的增加,在“可见光波段”中所述的原因开始占据主导地位,因此,反射率的最低点发生在前向散射方向中靠近天顶(天顶角为 0°)的地方,如图 9 所示,随后反射率随天顶角的增加又继续增加。

近红外波段除和可见光波段有相似的特性,但是它在主平面方向的光谱变化没有可见光波段明显。这是因为近红外波段相比可见光波段,反射率高,且反射率与透射率几乎相等,由此引起的多次散射使得此波段的反射率受角度的影响相对较小。此外,植被冠层在这个波段的反射率远高于土壤反射

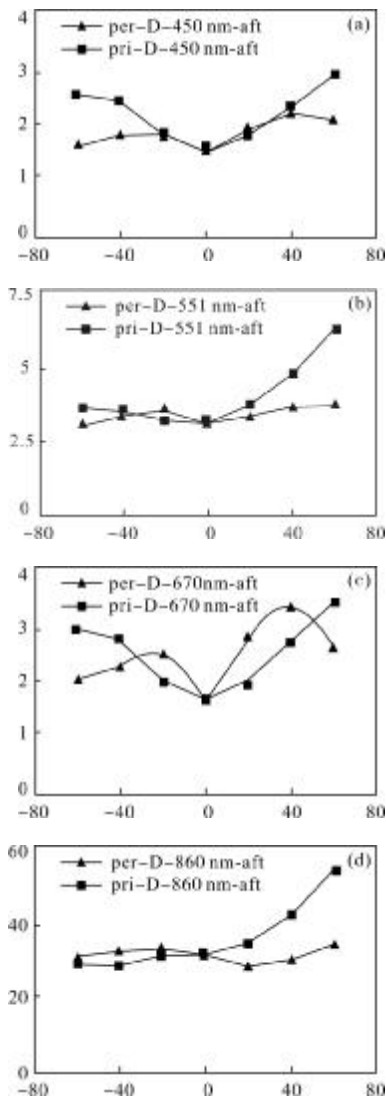


图 9 稠密大豆冠层下午观测时在不同波段的 BR 变化特征
Fig.9 BR change features in different wavelengths for dense soybean canopy at afternoon

率,所以土壤较强的后向反射特性不足以对冠层反射率造成较大影响^[20-21]。

图 10 是高光谱影像去除背景土壤(光照与阴影土壤)后的稠密大豆冠层在不同波长位置的 BR 变化趋势图。由图可知,冠层光谱反射率在垂直主平面方向是对称的;在主平面方向是前向与后向反射率差异减小,但仍是后向反射率略大于前向反射率。整体规律和土壤光谱去除前的冠层 BR 特征一致。但是,去除土壤背景后的冠层反射率在垂直主平面方向对称性更强。前人研究表明,冠层反射率在垂直主平面方向上的对称性在作物封垄行后,对水平均匀冠层尤为明显^[30-31]。文中去除土壤背景后,也得到相

似的结果。比较图 9 和图 10 可发现,近红外波段在主平面方向的光谱变化没有可见光波段明显。这是因为在此波段反射率与透射率几乎相等,并且近红外波段反射率相对较高,由此引起的多次散射使得

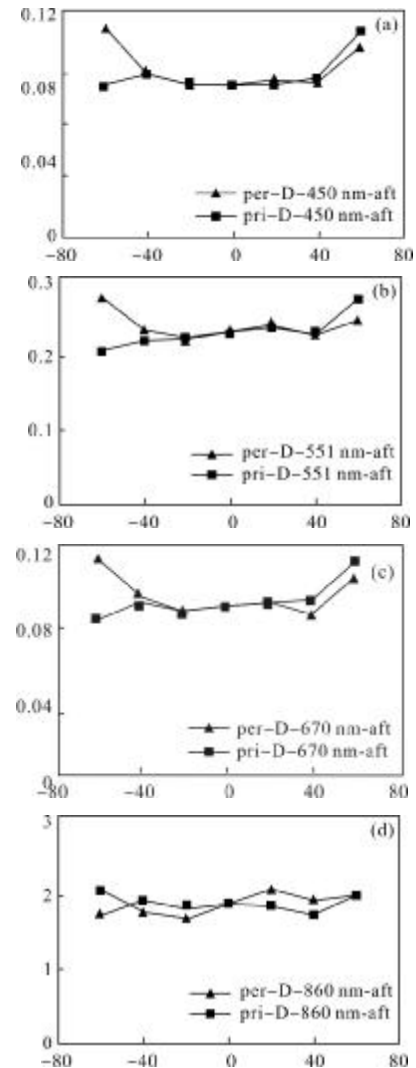


图 10 稠密大豆纯植被冠层下午观测时的不同波段 BR 变化特征
Fig.10 BR change features in different wavelengths for pure dense soybean canopy at afternoon

近红外波段的反射率受观测角的影响变小^[25]。这和未去除土壤光谱前的趋势一致。

2.3 不同密度下的大豆冠层 BR 变化

最佳播种密度的选择在作物生产中有及其重要的作用。它的正常与否,直接影响到作物的产量与品质^[32]。在植被冠层二向反射率研究中,密度不同则在叶面积指数上有直接体现,它是利用遥感手段进行作物长势监测的关键结构参数之一^[33-34]。国内外已有文献表明,在利用植被辐射传输模型进行植被生理生化

参数反演研究时,必须考虑叶面积指数对反演精度的影响^[10,12,16],即播种密度对反演精度的影响。图 11、图 12 是两个播种密度在不同角度下的大豆冠层成像图。由此直观显示密度对大豆冠层 BR 的影响。

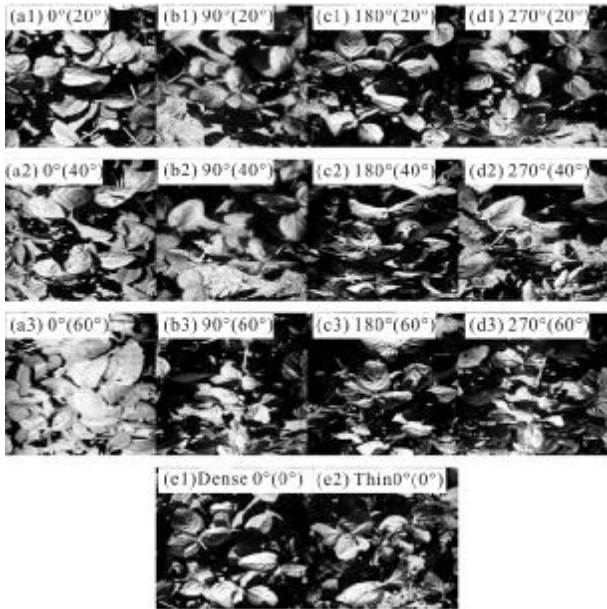


图 11 不同角度下稠密大豆冠层的成像图

Fig.11 Images of dense soybean canopy in different angles

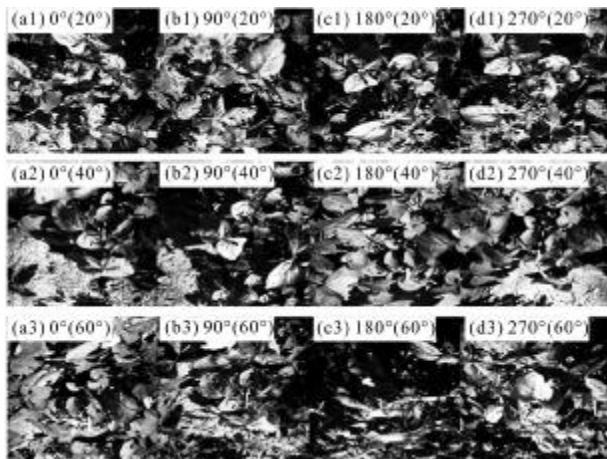


图 12 不同角度下稀疏大豆冠层的成像图

Fig.12 Images of thin soybean canopy in different angles

图 11 和图 12 的多角度数字图像可以直观地提供视场内不同地物比例的变化情况。两个密度在太阳主平面后向观测时,视场内以光照叶片为主;前向观测时以阴影叶片为主;但是,在垂直太阳主平面时,视场内的土壤面积比例明显增加。图 13 是不同密度大豆冠层在主平面的 BR 变化趋势图。

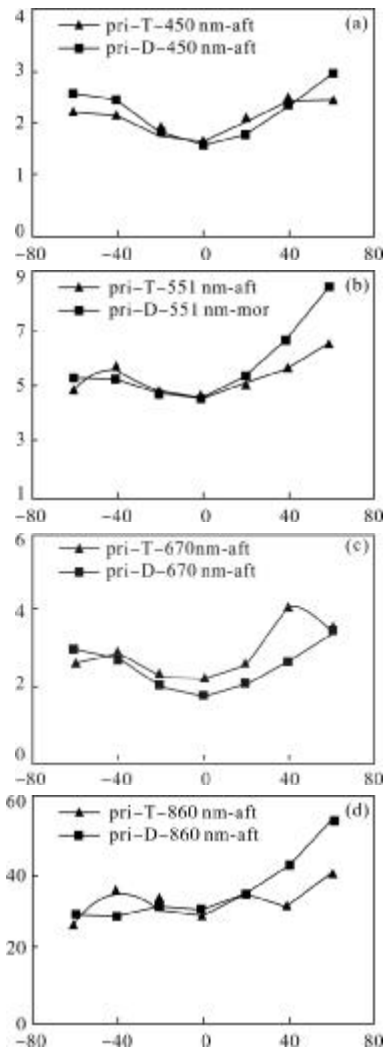


图 13 不同密度大豆冠层在主平面的 BR 特征

Fig.13 BR change features of solar principle panel for soybean canopy in different densities

图 13 显示,在主平面方向上,天顶角为 0°时的冠层反射率随视场内叶面积的增加而降低,冠层反射率受土壤反射率的影响较大,而土壤在可见光波段的反射率远大于冠层各组分的反射率,因此,随着视场内叶面积的增加,土壤对冠层反射率的影响越来越小,使得所测得的反射率减小。随着视场内叶面积的增加,大豆冠层反射率趋于平稳,在视场内叶面积最大时,前向与后向散射的差异最小。在视场内叶面积最低时,后向反射峰最明显。这种现象可以解释为:对于离散的植被冠层,冠层反射率受土壤反射率的影响较大,而土壤具有强烈的二向反射特性,土壤在可见光波段的反射率又大大高于叶片的反射率。因此,在土壤被植被遮蔽较少时,其二向反射特性在

冠层反射中明显体现出来如图 13(c)所示。

近红外波段,在天顶处的冠层反射率随视场内叶面积的增加而增大。冠层反射率在视场内叶面积较小时,抖动稍大如图 13(d)所示。与可见光相比,曲线的变化率较小,低密度冠层后向散射不明显。这是因为,在近红外波段,土壤的反射率低于植被冠层的反射率,因而土壤的二向反射特性对冠层反射率的影响较小。

在垂直主平面方向上,当大豆覆盖密度低时,冠层反射率曲线不稳定,曲线波动明显,如图 14 所示;冠层反射率在垂直主平面方向是对称的,稠密大豆冠层比稀疏大豆冠层更为显著。这是因为,进入探测器视场内的冠层组分的多少不均一,致使冠层反射

率在有些角度受土壤影响大,而在另一些角度却主要受大豆冠层组分的影响,因此,冠层反射率曲线波动较大,随着视场内叶面积的增加,冠层反射率主要受大豆冠层各组分光学特性的影响。因而,其反射率曲线趋于稳定。在近红外波段,稠密大豆冠层反射率表现更平缓;稀疏大豆冠层相比于稠密大豆冠层波动明显,但仍低于可见光波段的变化率。

图 15 是高光谱影像去除背景土壤(光照与阴影土壤)后的不同密度大豆冠层在主平面不同波长位置的 BR 变化趋势图。由图 15 可知,(1)当观测方向由主平面的前向朝后向变动时,可见光和近红外波段的冠层反射率表现为逐步增大的趋势,这和土壤

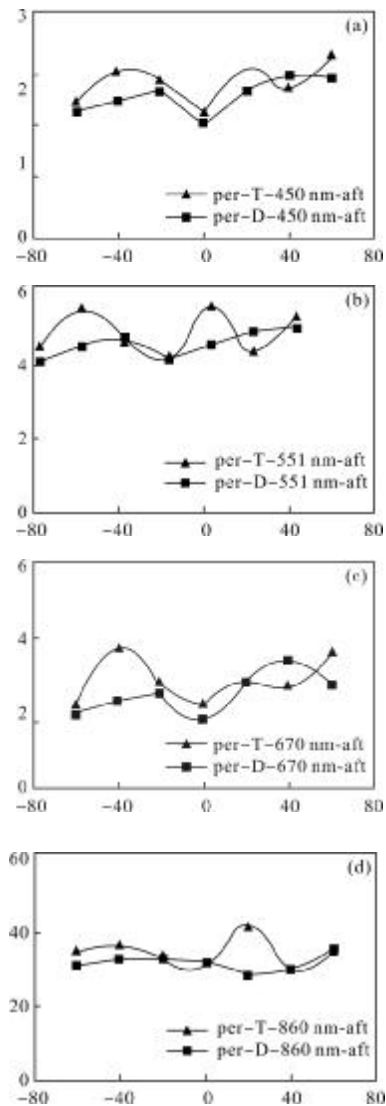


图 14 不同密度大豆冠层在垂直主平面的 BR 特征

Fig.14 BR change features of solar perpendicular panel for soybean canopy in different densities

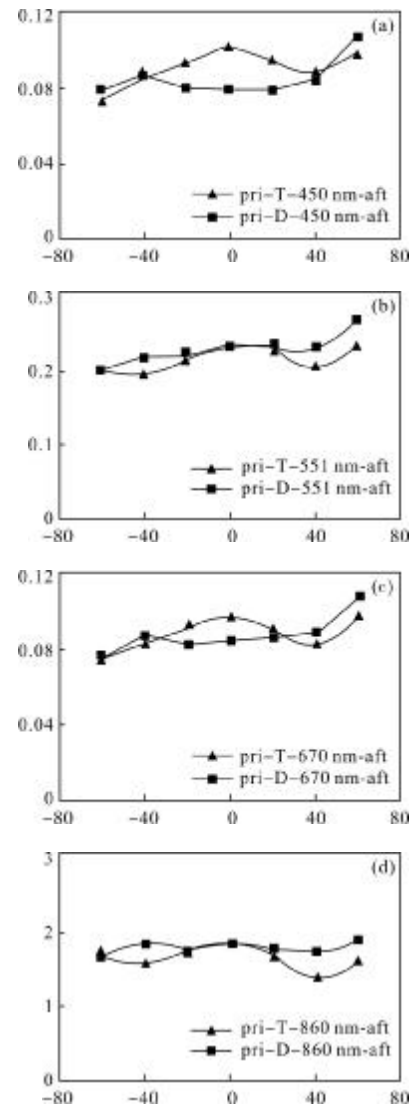


图 15 不同密度大豆纯植被冠层在主平面的 BR 特征

Fig.15 BR change features of solar principle panel for pure soybean canopy in different densities

光谱去除前的变化趋势不同;后向反射率值大于前向的,这和土壤光谱去除前的变化趋势相同。上述部分结论不同可能是因为,土壤有很强的二向性反射。当土壤和植被混合存在时,综合表现为:随着前向天顶角的增加,反射率也随之增大;当去除土壤信息后,只剩下较多的阴影植被信息,因此冠层反射率迅速降低,且在天顶角最大处,降到最低。(2)不同密度冠层反射率总体趋势相同,在可见光波段,高密度的冠层反射率在天顶角为 0° 时,低于稀疏冠层反射率;在近红外波段,高于稀疏冠层反射率,文中在此处差异不显著。这和未去除土壤前的冠层反射率变化特征一致。(3)相比稀疏大豆冠层,稠密大豆冠层反射率在可见光和近红外波段都变化较小。

图16是高光谱影像去除背景土壤(光照与阴

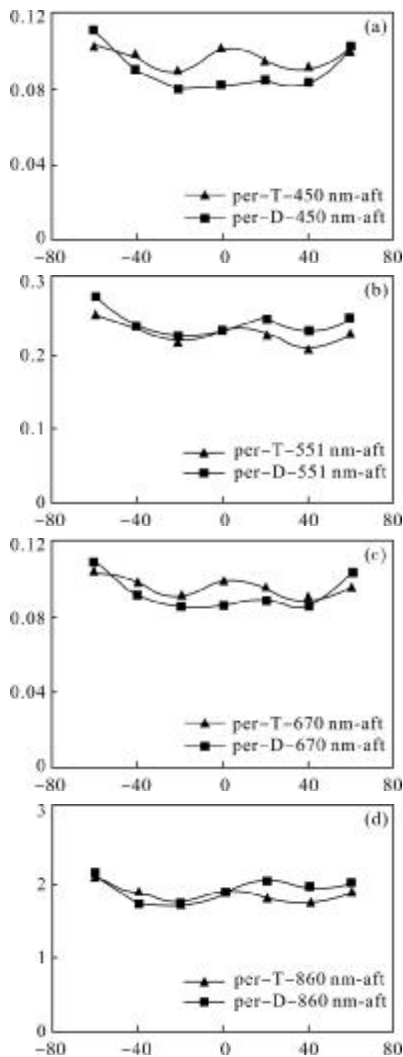


图16 不同密度大豆纯植被冠层在垂直主平面的BR特征

Fig.16 BR change features of solar perpendicular panel for pure soybean canopy in different densities

影土壤)后的不同密度大豆冠层在垂直主平面不同波长位置的BR变化趋势图。由图16可知,(1)不同密度大豆冠层反射率在垂直主平面有一致的对称性;(2)高密度大豆冠层反射率在天顶角为 0° 时较低,且高密度反射率值低于稀疏密度的;(3)相比于土壤去除前的反射率变化率,去除土壤后不同密度冠层的反射率变化率降低;但仍然表现为稀疏大豆冠层变化大于稠密大豆冠层;(4)与未去除土壤前的冠层反射率相比,去除后的前后向反射率对称性更明显。

通过对比土壤去除前后不同密度大豆冠层反射率在垂直主平面的变化如图11,12,14,16所示,可以得知,土壤二向性反射对植被冠层反射率有较大影响,尤其是植被覆盖度低时如图16所示,能显著影响植被冠层的反射率。

3 结论与讨论

对植被冠层的二向反射特性进行研究,目的是建立更加准确的植被BRDF模型,从而为基于航天及航空平台的大尺度多角度遥感定量解译地表植被生长发育过程服务。但是植被二向反射特性不仅与植被冠层结构、各个器官的生化组分、生育期及冠层的下垫面有关,还与太阳光的入射方向及仪器观测方向有关。因此,必须开展大量的地面试验,搞清楚这些影响因素之间的关系,才能从机理上充分地改进植被辐射传输模型,从而真正实现遥感的定量化反演。

文中在借鉴前人研究的基础上,利用“图谱合一”的成像光谱仪VNIS,对不同密度大豆冠层在不同时间进行多角度数据获取,在研究同一视场内植被与土壤混合光谱信息的基础上,采用归一化光谱分类指数对土壤光谱信息进行掩膜处理^[14],再对比分析纯植被与混合植被的冠层BR变化特征,有如下结论:

在主平面观测时,混合植被冠层反射率随着观测天顶角的增加而增大,后向反射率大于前向反射率,近红外波段与可见光波段有相同的趋势。土壤光谱去除后,即纯植被冠层反射率在前向观测时,随着天顶角的减小而增大,这和视场内同时存在植被和土壤时的研究结果不同;后向观测时,随着天顶角的

增加而增大;后向反射率高于前向,这和混合植被的 BR 特征一致。

混合植被冠层反射率在垂直主平面方向是近似对称的。去除土壤背景后的纯植被冠层反射率与混合植被反射率特征有相同的趋势,但是在垂直主平面方向的对称性更强。混合植被与纯植被冠层在主平面方向的 BR 变化特征,在近红外波段的光谱变化没有可见光波段明显,土壤去除前后有一致的表现。

在主平面方向上:当观测方向由主平面的前向朝后向变动时,可见光和近红外波段的纯植被冠层反射率表现为逐步增大的趋势,这和未剔除土壤光谱前的变化趋势不同;后向反射率值大于前向的,这和未剔除土壤光谱前的变化趋势相同。土壤光谱去除前后,不同密度冠层反射率总体趋势相同,在可见光波段,稠密大豆冠层反射率在天顶角为 0° 时,低于稀疏大豆冠层反射率;在近红外波段,高于稀疏大豆冠层反射率;相比稀疏大豆冠层,稠密大豆冠层反射率在可见光和近红外波段都变化较小。

在垂直主平面方向上:土壤光谱去除前后的不同密度大豆冠层反射率在垂直主平面都有一致的对称性,去除后的前后向反射率对称性更明显。稠密大豆冠层反射率在天顶角为 0° 时较低,且稠密反射率值低于稀疏密度的。相比于土壤去除前的反射率变化率,去除土壤后不同密度冠层的反射率变化率降低;但仍表现为稀疏冠层变化大于稠密冠层。

参考文献:

- [1] Feng Xiaoming, Zhao Yingshi. A spectral-directional reflectance remote sensing model of the semiarid landscape [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9 (4): 337-342. (in Chinese)
- [2] 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.
- [3] Qin Wenhan, Xiang Yueqin. An analytical model for bidirectional reflectance factor of multi-component vegetation canopies [J]. *Science China (Series C)*, 1996, 26: 542-551. (in Chinese)
- [4] Sandmeier St, Muller Ch, Hosgood B, et al. Physical mechanisms in hyperspectral BRDF data of grass and watercress [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66: 222-233.
- [5] Sandmeier S, Deering D W. Structure analysis and classification of Boreal forests using airborne hyperspectral BRDF data from ASAS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 69: 281-295.
- [6] D'Entremont, Schaaf R P, Lucht C B, et al. Retrieval of red spectral albedo and bidirectional reflectance from 1km² satellite observations for the New England region [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104: 6229-6339.
- [7] Gao Feng, Schaaf C B, Strahler A H, et al. Detecting vegetation structure using a Kernel-Based BRDF model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86:1 98-205.
- [8] Shen Guangrong, Wang Renchao. A study on multicomponent bidirectional reflectance model for rice [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(3): 394-398. (in Chinese)
- [9] Li Yunmei. Theory and Application of Vegetation Radiation Transfer [M]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2005: 11. (in Chinese)
- [10] Schneider Th, Manakos I. BRDF approximation of maize and canopy parameter retrieval by ProSail inversion [C]//The 3rd EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy, 2003, 5: 13-16.
- [11] Huang Wenjiang, Wang Jihua, Liu Liangyun, et al. Remote sensing identification of plant structural types based on multi-temporal and bidirectional canopy spectrum [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(6) :1-5. (in Chinese)
- [12] Schut. Imaging spectroscopy for characterization of grass swards [D]. Netherlands: Wageningen University, 2003.
- [13] 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.
- [14] Zhang Dongyan. Diagnosis mechanism and methods of crop chlorophyll information based on hypersepctral imaging technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] Liu Qinhuo, Xin Xiaozhou, Tang Pin, et al. Research Model, Application and Uncertainty of Quantitative Remote Sensing [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1. (in Chinese)

- [17] 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.
- [18] Li Xiaowen, Strahler A, Zhu Qijiang. Geometric-optical bidirectional reflectance modelling of ground objects and its progress in measurement [J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, 1991, 7(1): 9-19. (in Chinese)
- [19] Kimes D S, Newcomb W W, Tucker C J, et al. Directional reflectance factor distribution for cover types of Northern Africa [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 18:1-19.
- [20] Kimes D S. Dynamics of directional reflectance factor distributions for vegetation canopies [J]. *Application Optics*, 1993, 22(9): 1364-1372.
- [21] Kuusk A. The angular distribution of reflectance and vegetation indices in barley and clover canopies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 37: 143-151.
- [22] Li Yunmei. Studying on rice BRDF model integration and its application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese)
- [23] Chen Jieliang. Hyperspectral Remote Sensing Information Extraction and BRDF Model of Soil [M]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [24] Li Yunmei, Wang Renchao, Wang Xiuzhen, et al. Effect of rice canopy structural changes on bidirectional reflectance [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 32 (3):47-52.(in Chinese)
- [25] Haboudane D, Miller J, Tremblay N, et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81: 416-426.
- [26] Tan Changwei, Wang Jihua, Lu Jianfei, et al. Summer maize growth supervision and nutrition diagnosis with red edge parameters [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(1): 82-86. (in Chinese)
- [27] Niu Zheng. Recent advance in studies on vegetative bidirectional reflecting property [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1997, 12(3): 49-57. (in Chinese)
- [28] Yang Guijun, Xing Zhurong, Huang Wenjiang, et al. Analysis of winter wheat canopy structure for different plant types of growth period [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(7): 227-234.(in Chinese)
- [27] Li Yunmei, Wang Renchao, Wang Xiuzhen, et al. Simulation of bidirectional reflectance on rice canopy and its inversion [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2002, 16 (3): 291-294. (in Chinese)
- [28] Fan Wenjie, Yan Binyan, Xu Xiru, et al. Crop area and leaf area index simultaneous retrieval based on spatial scaling transformation [J]. *Science China Earth Science*, 2010, 40 (12): 1735-1732. (in Chinese)
- [29] Zhang Zhengyi. Effect on Yield and Quality of Soybean in Different Sowing Density and Relay-cropping [M]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [30] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81: 337-354.
- [31] Haboudane D, Miller J R, Pattey E. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 90: 337-352.