

# 基于几何标记模型参数反演的作物株形敏感性分析

赵春江<sup>1</sup>, 黄文江<sup>1,2\*</sup>, 穆西晗<sup>2</sup>, 王锦地<sup>2</sup>, 王纪华<sup>1</sup>

1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097
2. 北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 北京 100875

**摘要** 传统的利用冠层反射光谱和光谱指数进行叶面积指数反演时, 株形(利用平均叶倾角ALA等指标来表征)对叶面积指数的反演精度存在较大的影响, 使得利用遥感手段进行作物长势监测和肥水调控决策时, 株形因素不容忽略, 以免造成遥感监测精度不高。研究首先利用模拟作物冠层反射光谱的PROSAIL模型将影响作物冠层光谱的叶面积指数等其他参数保持不变的情况下, 分析了ALA对作物冠层反射光谱的影响; 并基于半经验的几何光学模型对作物株形对冠层光谱影响的不同波段受到ALA变化的敏感性进行了定量分析, 对于研究如何消除株形影响, 提高遥感反演作物长势和叶面积指数的精度和提高作物大面积、快速遥感肥水调控决策水平具有重要意义。

**关键词** 几何光学模型; 株形; 敏感性; 平均叶倾角

**中图分类号:** TP79    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)09-2555-05

## 引言

作物冠层结构系作物地上部分各器官的数量及其空间分布状态, 由群体几何形态、数量和空间散布三方面性状组成。株形指植株个体在空间的几何分布, 是构成冠层结构的重要因素之一。冠层结构不仅直接影响太阳光的截获量, 而且通过影响冠层内水、热、气等微环境最终影响群体的光合效率和作物产量<sup>[1-6]</sup>, 因此, 株形多年来一直是作物生理、栽培和育种等学科研究的热点。Pepper等<sup>[7]</sup>提出利用叶向值(LOV)反映叶片倾斜角度和发生角度倾斜的位置, 即表示叶片紧凑和平展的程度, 其数值越大, 表示叶片越紧凑, 则株形紧凑(紧凑型); 其数值越小, 表示叶片越披散, 则株形平展(披散型), 处于两者之间的株形中等(中间型), 目前已被广泛接受。对于株形信息的获取方法前人开展了一些研究。李少昆等<sup>[8]</sup>将多媒体图像技术应用于对玉米株形信息提取、表述和管理。然而, 对于遥感的大规模“面状信息”需求, 利用光谱数据提取株形信息无疑是更好的解决途径, HUANG等<sup>[8]</sup>基于核驱动模型参数对作物株形进行了光谱识别。但是作物株形对作物冠层光谱影响程度和贡献率等的敏感性分析, 迄今还缺少研究。本文探讨基于几何光学模型参数来研

究作物株形对冠层反射光谱影响的敏感性。

## 1 实验材料、仪器、软件与测试方法

### 1.1 试验设计及处理

试验于2003~2004年在小汤山试验基地进行(北纬40°11', 东经116°27')。0~0.20 m耕层土壤养分含量如下: 有机质1.42%~1.48%, 全氮0.08%~0.10%, 碱解氮58.6~68.0 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效磷20.1~55.4 mg·kg<sup>-1</sup>, 有效钾117.6~129.1 mg·kg<sup>-1</sup>。供试品种为紧凑型品种京411和披散型品种中优9507。不同株形品种行距、播种密度相同且基本苗相近, 正常肥水管理。

### 1.2 研究项目与测定方法

#### 1.2.1 小麦冠层反射光谱

小麦冠层光谱测量使用的仪器为ASD Fieldspec FR2500光谱仪, 采样间隔为1.4 nm(350~1 000 nm)和2 nm(1 000~2 500 nm)。所有光谱测量在天气晴朗、风速很小、距地表1.3 m于北京时间10:00~14:00时进行测量。视场角25°, 在视场范围内重复20次, 取平均值, 测定前后进行参考板校正。

收稿日期: 2008-06-18, 修订日期: 2008-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701119), 国家“973”项目(2007CB714406), 国家“863”项目(2007AA10Z201)和遥感科学国家重点实验室开放基金项目资助

作者简介: 赵春江, 1964年生, 国家农业信息化工程技术研究中心研究员 e-mail: zhaocj@nercita.org.cn

\* 通讯联系人 e-mail: yellowstar0618@163.com

**Table 1 Parameters for simulating canopy spectrum under different average leaf angles**

平均叶倾角/(°)	叶面积指数	天空散射光/%	土壤反射率/%	叶子结构参数	叶绿素含量/(\mu g·cm⁻²)	偏心率	等效水厚度/cm	干物质/(g·cm⁻²)	太阳天顶角/(°)	观测天顶角/(°)	观测方位角/(°)
0~90	3.5	0.2	0.2	1.4	32	0.988	0.025	0.0094	38.5	0	0

### 1.2.2 小麦冠层多角度反射光谱

对于选取的紧凑型和披散型品种，采用有导轨的多角度观测架分别测定太阳主平面和垂直指向不同观测天顶角(-60°到60°的10°间隔，观测天顶角为正表示与太阳同侧位，后向；为负表示与太阳异侧，前向)条件下的多角度光谱数据。使用的仪器与冠层反射光谱相同。

### 1.2.3 叶面积指数(LAI)

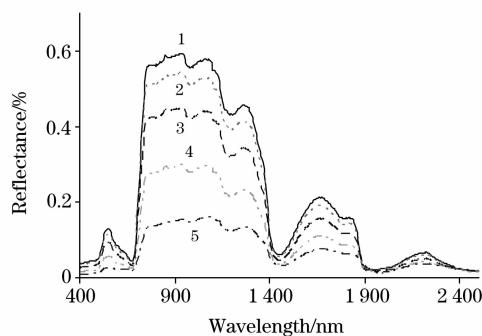
采用干重法，即同一品种取50~100片叶测量面积后，烘干称重，再根据被测对象的干重反推叶面积，用CI-203型激光叶面积仪进行校正。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同平均叶倾角条件下小麦冠层反射光谱

表1为利用PROSAIL模型进行模拟ALA对作物冠层光谱反射率影响的其他固定参数的给定值。平均叶倾角(ALA)是反映作物群体叶片空间伸展角度的重要度量指标，平均叶倾角越大，表明叶片越紧凑，群体对光的截获能力越弱；平均叶倾角度越小，叶片越披散，群体对光的截获能力越强；由于叶片在近红外波段主要以反射为主，造成在相同的叶面积指数条件下，冠层光谱反射率随着ALA的增大而减小。

图1为给定影响作物冠层光谱的其他参数保持不变的情况下，单纯由ALA的变化引起的作物冠层光谱反射率的变化特性，可知在平均叶倾角较大，65°<ALA≤90°时，基本表现为紧凑型株形品种特征，相同叶面积指数条件下，作物冠层光谱视场内作物覆盖度较低，受土壤的影响较大，表现为土壤的光谱特征比较明显；当ALA为40°<ALA≤65°时，表现为中间型品种特征，冠层光谱基本表现为植被光谱特征，但仍受到土壤光谱影响；当ALA为0°≤ALA≤40°时，表现为披散型品种特征，冠层光谱基本表现为植被光谱特征，受到土壤光谱影响很小，覆盖度较大。表明植被冠层光谱在相同叶面积条件下，ALA对冠层光谱影响较大，随着

**Fig.1 Canopy reflectance under different average leaf angles**

$$\text{ALA}=10^\circ \text{ (1)}; 30^\circ \text{ (2)}; 50^\circ \text{ (3)}; 70^\circ \text{ (4)}; 90^\circ \text{ (5)}$$

ALA的增加，作物冠层光谱反射率在可见光波段和近红外波段均随着ALA的增大而减小，且可见光波段和近红外波段对叶面积指数(LAI)变化敏感性均较高。

由图1可知，在利用遥感技术监测和评价作物长势状况等因素时，不能忽略作物平均叶倾角(ALA)对作物冠层光谱的影响。且随LAI和ALA的变化引起的可见光和近红外作物冠层反射光谱数值的变化仅仅通过肉眼观察是很难进行区分的，应该对由于LAI和ALA的变化引起的变化各自进行敏感性分析，分别找出各自的敏感波段，以利于提高遥感反演LAI等参数的精确度和准确度。

### 2.2 基于几何光学模型参数反演的作物株形敏感性分析

由于植被结构的复杂性和植被叶面积指数、叶角分布状况和群体几何特征尺度等空间分布的非随机性，使得很难精确地模拟植被二向反射特性(BRDF)的空间分布。如果BRDF观测值对冠层参数的变化十分敏感，那么噪音就会导致对冠层参数的估算误差。一种理想的情况是：反演过程对感兴趣的参数敏感，但又不十分敏感<sup>[9,10]</sup>。李小文等<sup>[12]</sup>定义的敏感性矩阵元素为

$$S(i, j) = \Delta\text{BRDF}(i, j)/\text{BRDFexp}(i)$$

其中 $\Delta\text{BRDF}(i, j)$ 为第*i*个方向采样于其他参数固定在期待值时，第*j*个参数在其不确定范围内导致BRDF的最大值与最小值之差，而 $\text{BRDFexp}(i)$ 是所有参数固定在期待值时第*i*个方向采样处BRDF的值。“不确定范围”建议为期待值处±1个标准差在物理限制之内者，从而S可以称为“不确定性和敏感性矩阵”(USM)。

半经验几何光学模型兼具物理模型和经验模型两者的特点，用有一定物理意义的核的线性组合来拟合地表的二向性反射特征。用公式表示如下<sup>[13]</sup>

$$R(\theta_i, \theta_v, \varphi) = f_{\text{iso}} + f_{\text{vol}} k_{\text{vol}}(\theta_i, \theta_v, \varphi) + f_{\text{geo}} k_{\text{geo}}(\theta_i, \theta_v, \varphi)$$

式中 $R$ 为二向反射率， $k_{\text{vol}}$ 为体散射核， $k_{\text{geo}}$ 为几何光学核，都是光线入射角和观察角的函数。 $\theta_i$ 为光线入射天顶角， $\theta_v$ 为观测天顶角， $\varphi$ 为相对方位角。 $f_{\text{iso}}$ ， $f_{\text{vol}}$ 和 $f_{\text{geo}}$ 则是常系数，分别表示模型中各向同性核、体散射核、几何光学核这三部分所占比例(权重)。通过线性回归，反演出拟合数据最优的 $f_{\text{iso}}$ ， $f_{\text{vol}}$ 和 $f_{\text{geo}}$ ，然后通过核驱动模型的外推可求出任意光线入射角和观察角的二向反射。因此，在给定观测数据的情况下，反演得到的参数 $f_{\text{iso}}$ ， $f_{\text{geo}}$ 和 $f_{\text{vol}}$ 在一定程度上表现了地物BRDF的特征。对处于不同冠层结构特征的小麦来说，其ALA分布等结构特征具有不同特点，导致BRDF特征发生相应变化，能否通过参数 $f_{\text{iso}}$ ， $f_{\text{geo}}$ 和 $f_{\text{vol}}$ 相应变化反映出叶倾角变化特征，是本研究主要目的。

本文借鉴Gao等<sup>[13]</sup>和Sandmeier等<sup>[14]</sup>的研究结论，选取拔节期冠层反射光谱在红光(680 nm)和近红外(800 nm)波段进行结构参数的不确定性和敏感性分析。

### 2.3 红光波段和近红外波段不同观测平面的敏感性矩阵及其分析

将  $f_{\text{iso}}$ ,  $f_{\text{vol}}$  和  $f_{\text{geo}}$  在红光(680 nm)和近红外(800 nm)处

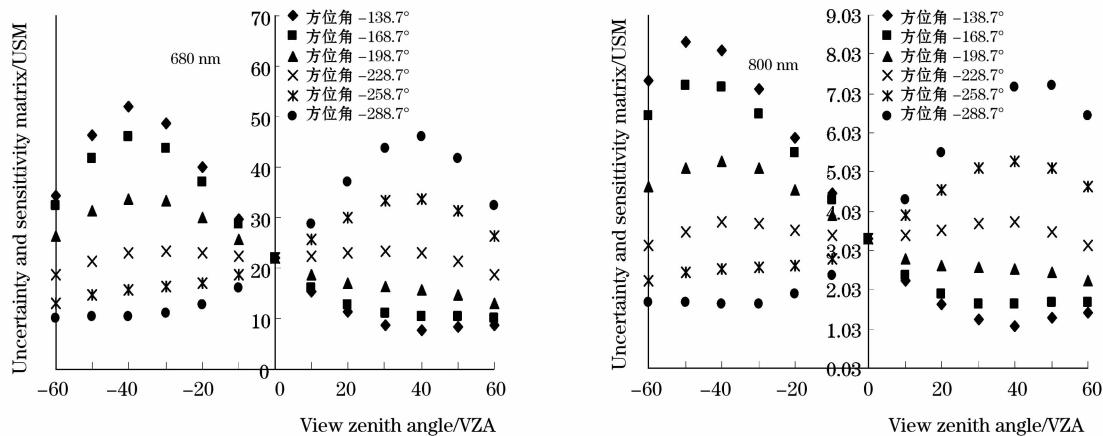


Fig. 2 Uncertainty sensitive matrix of  $f_{\text{iso}}$  under different observation zenith angles and observation azimuth angles

由图 2 可知,  $f_{\text{iso}}$  在红光(680 nm)和近红外(800 nm)波段随观测天顶角和观测方位角的变化引起的敏感性分布相当一致, 只是存在绝对量上的差别。

$f_{\text{iso}}$  在观测方位角为 138.7°(主平面)、观测方位角为 168.7°的观测平面和观测方位角为 198.7°的观测平面(顺垄平面)时最敏感的观测天顶角位于前向观测  $-40^{\circ}$  左右。在后向观测时, 随着观测天顶角的增加, 敏感性逐渐降低。

$f_{\text{iso}}$  在观测方位角为 228.7°(垂直主平面)观测时最敏感的观测天顶角位于前向观测  $-40^{\circ}$  和后向观测  $40^{\circ}$  左右, 不同观测天顶角的敏感性均较低。

$f_{\text{iso}}$  在观测方位角为 258.7°的观测平面和观测方位角为 288.7°的观测平面(垂直垄平面)时最敏感的观测天顶角位于后向观测( $40^{\circ}$ )左右, 与太阳天顶角相近。

由图 3 可知,  $f_{\text{vol}}$  在红光(680 nm)和近红外(800 nm)波

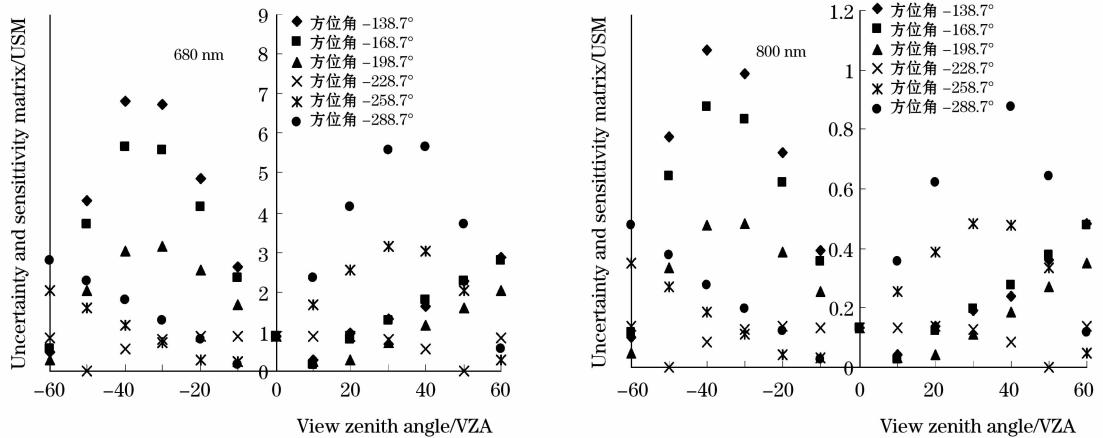
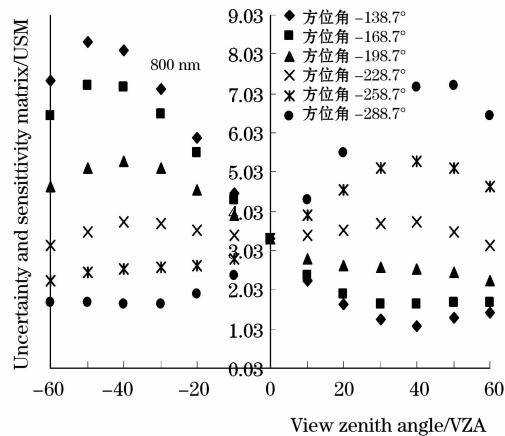


Fig. 3 Uncertainty sensitive matrix of  $f_{\text{vol}}$  under different observation zenith angles and observation azimuth angles

由图 4 可知, 几何光学核所占比例( $f_{\text{geo}}$ )在红光(680 nm)和近红外(800 nm)波段随观测天顶角和观测方位角的变化引起的敏感性分布相当一致, 只是存在绝对量上的差别。

的 USM 随观测天顶角和观测方位角的变化分别作成图, 见图 2。

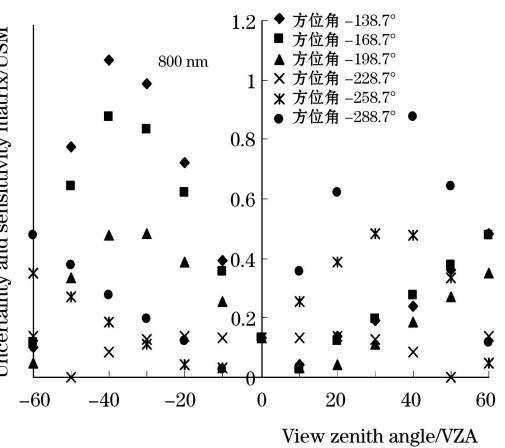


段随观测天顶角和观测方位角的变化引起的敏感性分布相当一致, 只是存在绝对量上的差别。

$f_{\text{vol}}$  在观测方位角为 138.7°(主平面)、观测方位角为 168.7°的观测平面和观测方位角为 198.7°的观测平面(顺垄平面)最敏感的观测天顶角位于前向观测( $-40^{\circ}$ )和后向观测  $60^{\circ}$  左右。在后向观测时, 随着观测天顶角的增加, 敏感性逐渐升高。

$f_{\text{vol}}$  在观测方位角为 228.7°(垂直主平面)观测时, 最敏感的观测天顶角位于前向观测  $-30^{\circ}$  和后向观测  $30^{\circ}$  左右, 不同观测天顶角的敏感性均较低。

$f_{\text{vol}}$  在观测方位角为 258.7°的观测平面和观测方位角为 288.7°的观测平面(垂直垄平面)最敏感的观测天顶角位于后向观测( $40^{\circ}$ )和前向观测  $60^{\circ}$  左右。



$f_{\text{geo}}$  在观测方位角为 138.7°(主平面)、观测方位角为 168.7°的观测平面和观测方位角为 198.7°的观测平面(顺垄平面)最敏感的观测天顶角位于前向观测  $-40^{\circ}$  左右。 $f_{\text{geo}}$  在

观测方位角 228.7°(垂直主平面)观测时, 敏感性随观测天顶角变化不明显。 $f_{\text{geo}}$ 在观测方位角为 258.7°的观测平面和观测方位角为 288.7°的观测平面(垂直垄平面)最敏感的观测天

顶角位于后向观测(40°), 最不敏感的观测天顶角为前向 30°左右。

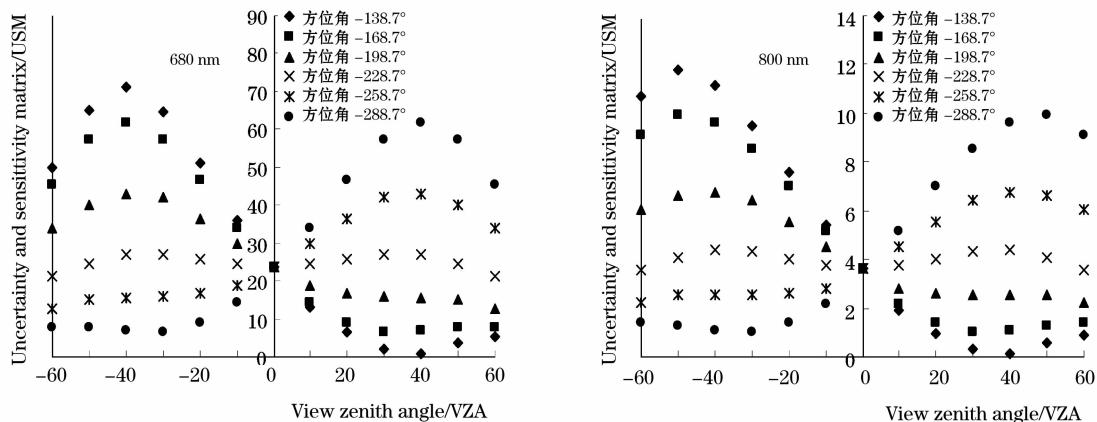


Fig. 4 Uncertainty sensitive matrix of  $f_{\text{geo}}$  under different observation zenith angles and observation azimuth angles

### 3 结 论

作物(如小麦和玉米等)群体都具有一定的冠层空间几何结构, 本研究表明不同冠层空间几何结构的品种在相同的叶面积指数的条件下具有不同的冠层郁闭度, 在相同的冠层郁闭度条件下具有不同的叶面积指数, 而冠层郁闭度对作物冠层光谱有极大的影响, 使得叶面积指数的遥感反演受到株形

影响和限制, 得出 ALA 的变化对冠层光谱存在较大的影响。基于几何光学模型, 作物株形对冠层光谱影响进行了敏感性分析, 得出株形对冠层光谱的影响规律。基于本文研究成果, 可以提高叶面积指数等指标的遥感反演精度, 并用于指导以作物长势监测为主要内容的作物精准、变量肥水管理, 提高肥水利用效率, 减轻化肥对环境、水源等的污染, 同时也可为研制新一代用于作物长势监测等的多角度机载或星载传感器提供基础数据、理论和模型支持。

### 参 考 文 献

- [1] ZHOU Yun-hua, XIANG Yue-qin, LIN Zhong-hui(周允华, 项月琴, 林忠辉). Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报), 1997, 8(1): 21.
- [2] HU Yan-ji, LAN Jin-hao(胡延吉, 兰进好). Chinese Journal of Agrometeorology(中国农业气象), 2001, 22(3): 28.
- [3] LI Shao-kun, WANG Chong-tao(李少昆, 王崇桃). Journal of Shihezi University(Natural Science Edition)(石河子大学学报·自然科学版), 1997, 1(3): 250.
- [4] Maddonoi G A, Otegui M E. Field Crops Research, 1996, 48: 81.
- [5] Hikosaka K, Hirose T. Ecoscience, 1997, 4(4): 501.
- [6] Utsugi H. Trees Structure and Function, 1999, 14(1): 1.
- [7] Pepper G E, Pearce R B, Mock J J. Crop Science, 1977, 17(6): 883.
- [8] HUANG W J, NIU Z, WANG J H, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44 (12): 3601.
- [9] Goel N S, Strebel D E. Agronomy Journal, 1984, 76: 800.
- [10] Li X W, Strahler A H. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 23 (5): 705.
- [11] LI Xiao-wen, GAO Feng, WANG Jin-di, et al(李小文, 高峰, 王锦地, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 1997, 1(1): 5.
- [12] Li X, Strahler A H. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(2): 276.
- [13] GAO F, Schaaf C B, Strahler A H, et al. Remote Sensing of Environment, 2003, 86: 198.
- [14] Sandmeier S T, Muller C H, Hosgood B, et al. Remote Sensing of Environment, 1998, 66: 222.

# Crop Geometry Identification Based on Inversion of Semiempirical BRDF Models

ZHAO Chun-jiang<sup>1</sup>, HUANG Wen-jiang<sup>1,2\*</sup>, MU Xu-han<sup>2</sup>, WANG Jin-di<sup>2</sup>, WANG Ji-hua<sup>1</sup>

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

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract** With the rapid development of remote sensing technology, the application of remote sensing has extended from single view angle to multi-view angles. It was studied for the qualitative and quantitative effect of average leaf angle (ALA) on crop canopy reflected spectrum. Effect of ALA on canopy reflected spectrum can not be ignored with inversion of leaf area index (LAI) and monitoring of crop growth condition by remote sensing technology. Investigations of the effect of erective and horizontal varieties were conducted by bidirectional canopy reflected spectrum and semiempirical bidirectional reflectance distribution function (BRDF) models. The sensitive analysis was done based on the weight for the volumetric kernel ( $f_{vol}$ ), the weight for the geometric kernel ( $f_{geo}$ ), and the weight for constant corresponding to isotropic reflectance ( $f_{iso}$ ) at red band (680 nm) and near infrared band (800 nm). By combining the weights of the red and near-infrared bands, the semiempirical models can obtain structural information by retrieving biophysical parameters from the physical BRDF model and a number of bidirectional observations. So, it will allow an on-site and non-sampling mode of crop ALA identification, which is useful for using remote sensing for crop growth monitoring and for improving the LAI inversion accuracy, and it will help the farmers in guiding the fertilizer and irrigation management in the farmland without a priori knowledge.

**Keywords** Bidirectional reflectance distribution function (BRDF); Crop geometry; Sensitivity Analysis; Average leaf angle (ALA)

(Received Jun. 18, 2008; accepted Sep. 26, 2008)

\* Corresponding author