

文章编号: 1007-4619(2006)05-0683-07

# 利用夜间热红外数据求取玉米冠层孔隙率

余珊珊<sup>1, 2, 3</sup>, 余涛<sup>1, 2</sup>, 顾行发<sup>1, 2, 4</sup>, 赵峰<sup>1, 2, 3</sup>, 高海亮<sup>1, 2, 3</sup>, 张勇<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 4. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054)

**摘 要:** 孔隙率是光线透过冠层未被拦截到达地表的概率, 是描述冠层结构和生物量空间分布的关键变量。已有研究证明, 在夜间热红外图像上, 玉米地各亮温组分比较稳定, 并且温度均值有明显差异, 易于区分。本研究的目的是利用 2005 年 8 月 23 日在怀来测得的夜间热红外数据求取中等密度的玉米冠层 ( $LAI=3.64$ ) 在不同角度下的孔隙率。结果表明, 在沿垄行方向, 孔隙率随着天顶角变化缓慢; 而在其他方向 ( $45^\circ$  和  $90^\circ$ ) 变化较快, 且变化趋势相似。将测得结构参数代入余涛的热红外方向辐射性模型, 模拟出不同方向下的孔隙率。将测量值与模拟值进行对比, 二者有一定的相似性, 模型能较好地抓住玉米冠层孔隙率的主要特征。针对二者间的差异, 初步分析是由测量中观测目标不完全一致、角度控制不精确、测量高度过低以及投影函数和丛生参数的选择等原因引起的。

**关键词:** 玉米冠层; 孔隙率; GORT 模型; 夜间 TIR 图像**中图分类号:** TP702 **文献标识码:** A

## Investigating the Gap Frequency of a Maize Canopy Using Night TIR Data

YU Shan-shan<sup>1, 2, 3</sup>, YU Tao<sup>1, 2</sup>, GU Xing-fa<sup>1, 2, 4</sup>, ZHAO Feng<sup>1, 2, 3</sup>, GAO Hai-liang<sup>1, 2, 3</sup>, ZHANG Yong<sup>1, 2, 3</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University Beijing 100101, China;

2. The Center for National Spaceborne Demonstration Beijing 100101, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China;

4. School of Automation Engineering the University of Electronic Science and Technology of China Sichuan Chengdu 610054, China)

**Abstract** Gap frequency is the probability that a light unintercepted penetrates through the canopy and reaches the surface under the vegetation, and it is a key variable describing canopy structure and biomass spatial distribution. Previous study revealed that in the night TIR images, the brightness components of maize field was stable and easy to be distinguished. The objective of the research is to investigate the directional variation of gap fraction over a maize canopy ( $LAI=3.64$ ) by night thermal infrared (TIR) experimental data which was acquired on August 23rd, 2005 in Huailai county of Hebei Province. The results showed that very little azimuth variation appears for gap frequency except for the observations along row direction, gap frequency declines from the nadir slowly; in other azimuth directions, gap frequency declines sharply. The measured parameters were input into a GORT model and the gap fractions were simulated at different angles. By

收稿日期: 2006-04-10; 修订日期: 2006-05-26

**基金项目:** 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

**作者简介:** 余珊珊 (1982—), 女, 硕士研究生, 2004 年毕业于中国地质大学土地资源管理专业。现为中国科学院遥感应用研究所硕士生。主要从事热红外方向性研究。E-mail: yushan0427@163.com。

comparing the simulated gap frequency with the measured one the two had good agreement. The model caught the main features of the measured gap fraction of maize canopy and reflected the characteristics of row crop. The differences between them were due to some reasons such as the disagreement of the objects, the angle variation was not controlled accurately in experiment, the measurement height was too low; the selection of projection function and clumping parameter et al.

Key words maize canopy; gap fraction; GORT model; night TR images

## 1 引 言

孔隙率是光线透过冠层未被拦截到达地表的概率。孔隙率作为描述冠层结构和生物量空间分布的关键变量,在可见、红外的建模中起了非常重要的作用,并在 FPAR 估计、冠层能量平衡估计、水胁迫和多角度信息提取等遥感应用中得到广泛应用。

在连续冠层和非连续冠层的孔隙率方面,已有过许多研究。Monsi和 Saeko最先提出孔隙率为叶面积指数的负指数形式的表达式<sup>[1]</sup>。李小文研究了非连续冠层的孔隙率<sup>[2]</sup>,并把孔隙率模型引入几何光学模型,利用辐射传输来解释多次散射,使得几何辐射传输模型(GORT)得以发展。对于理想的均匀植被,孔隙率可以描述为 LAI和 LAD 的函数(Ross 1981)。对于空间分布均一的植被,仅需考虑叶子在冠层中分布的非均一性,从卡尔科夫链可以得到孔隙率的表达式<sup>[3,4]</sup>。

然而,实际的冠层尤其是垄行结构作物,生物量的分布是空间不均一的,因此测量值与孔隙率模型存在着差异。许多研究者指出行播作物的孔隙率是由冠层形状、植被的空间分布以及叶倾角分布和冠层中叶子的空间分布决定的。Jackson(1972)首先认为果园的植被是不透光的行进行了建模,随后假设光线可以透过植被间的孔隙对模型进行了改进<sup>[5]</sup>。Jackson等人(1979)改进的部分覆盖的棉花模型被 Kimes在研究棉花地的方向亮温时应用和验证<sup>[6]</sup>。Sinoquet(1992)等研究间作混合的玉米生长早期和晚期的辐射传输,表明了冠层几何在空间上的分布的重要作用<sup>[7]</sup>。最近,Gains(1997)提出了一个几何光学辐射传输模型(GORT)来估算玉米冠层的孔隙率<sup>[8]</sup>,Tsubo等(2002)提出一个研究玉米大豆混合冠层的辐射拦截特性的简单方法<sup>[9]</sup>。然而,在这些研究中,玉米叶子被认为是随机分布的,或者丛生系数为一个固定的值(如  $\lambda=0.7$ )。

获取和分析玉米冠层半球孔隙率的实验方法在许多文献中都有描述。许多测量都是基于可见光波

段的太阳辐射的反射,其准确程度受目标的光谱特性、天空光和观测几何的影响。随着热红外遥感的发展,热红外图像对几何和辐射的准确度更高,而且比可见光更能突现目标的结构信息,因此被广泛应用于遥感中。用热红外辐射来进行孔隙率的测量研究,将是孔隙率研究的另一种方法。陈良富从热红外建立了行结构孔隙率模型<sup>[10]</sup>。余涛等进行了玉米地亮温组分变化研究,发现在夜间农田能量交换达到平衡,各组分亮温相对比较稳定,情况比较简单,各组分分量易于区分<sup>[11]</sup>,并在法国开展了一个搭载于工业吊车的窄视场热像仪,来获取高覆盖情况下的玉米冠层的方向孔隙率的实验,并且建立了热红外的几何光学辐射传输模型,进行孔隙率的模拟<sup>[12,13]</sup>。国内对于行播作物的方向性研究的地面试验主要是通过 BRDF多角度观测架来实现的。对小麦的方向性已有较多研究;而对于生长后期的玉米地,由于观测架平台较低,其视场较小,精度不高,较少有研究。

本文的研究目的是利用一个简易的车载热像仪成像系统,从不同方位采集同一地块的多角度热红外图像,从而获取中等密度的已封垄的玉米冠层(LAI=3.64)孔隙率随方向的变化特性,并且用余涛等<sup>[12]</sup>提出的 GORT模型进行模拟和比较。

## 2 实验与实验数据分析

### 2.1 实验地点和设备

实验于 2005年 8月 23日在河北怀来实验场进行。玉米处于生长后期,已经成熟,抽穗封垄,行结构不太明显。所选玉米地大小为 20m×20m,垄行为南北方向,空间分布比较均一。行宽为 0.5m,植株密度为 6株/m<sup>2</sup>,玉米冠层离地高度约为 2.2m。

热红外图像获取系统是利用一架搭载于依维柯车上的宽波段热像仪来实现的。车高约为 2.5m。观测人员手持热像仪站在车顶,热像仪离车顶约为 1.5—1.6m,则热像仪离玉米冠层顶高度为 1.8—

1.9m。热像仪的视场角为 24°,热像仪图像的像元数为 320 × 240。灵敏度为 0.1K,响应时间为 1/50—1/60s,即每秒钟最快可采集 50—60 幅热红外图像。热像仪的优点在于可以获得同一时间上的温度场分布,组分亮温可以直接从热红外图像上采样获得,避免了用点温计、辐射枪等在空间和时间上不同步及破坏热平衡等问题。

在测量时,车将置于玉米地的不同位置,将热像仪伸向正前方进行条带式观测,从不同角度对该地块进行扫描,不同条带观测到的目标会交汇于地块中心(如图 1 所示)。与 BRDF 观测架相比,该系统扫描条带成像范围更大,而 BRDF 的观测区域是以观测点为中心的一小块区域;另外对于生长后期的玉米冠层, BRDF 观测架高度不够。与基于工业吊车的热像仪成像系统相比,前者为在相同观测点对不同目标进行观测,该系统是在不同点对相同目标进行观测,无需作目标的归一化处理。该系统简单灵活,不足之处在于成像过程由人工控制,稳定性不好,可以考虑加入固定角度装置来进行改进。

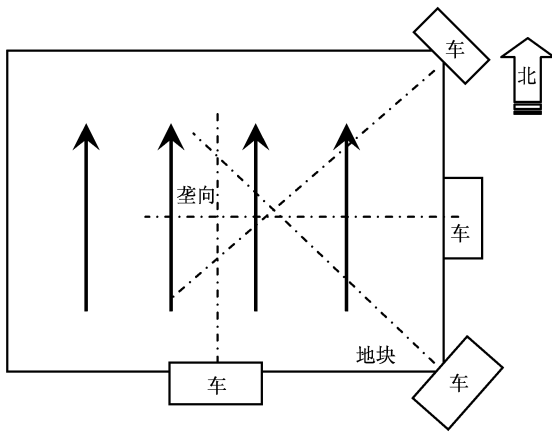


图 1 观测几何示意图

Fig 1 Scheme of observing geometry

## 2.2 目标参数获取

玉米冠层的几何参数测量是在当天白天进行的,均通过多次测量取均值。叶面积指数的获取采用破坏性采样测量,并且采用多种方法进行测量和比较。测得玉米冠层的平均高度约为 2.2m,最底端的叶子离地高度约为 0.5m,其下细小叶子和枯枝败叶忽略不计。植株的宽度约为 0.68m。测量叶倾角时,按照叶子的拐点将其分成若干段,分别测量每段的叶倾角以及长度和宽度,这些数据都可用于计算机植被模拟中。经过统计,叶倾角主要集中在

50°—70°间。玉米冠层的农学和几何参数见表 1。

表 1 玉米冠层的农学和几何参数 (2005-08-23)

Table 1 Agronomic and geometrical parameters of the maize canopy (2005-08-23)

LAI	H /m	h /m	A /m
3.64	2.2 ± 0.17	0.5 ± 0.2	0.68 ± 0.08

热像仪图像的获取是在当地时间晚上 10 点钟进行的。在这个时候,地间能量交换达到平衡,各组分温度相对比较稳定,且视场中仅存两种组分:叶片和土壤,它们的亮温可认为是服从高斯分布的,其均值分别为 17.9°C 和 19.7°C,方差分别为 0.3°C 和 0.7°C。当测量玉米冠层的热红外图像时,车被停靠在在选择观测的农田的不同边界上,分别由观测人员手持热像仪站在车顶,通过量角器角度控制,保持热像仪在该主平面内从 10°开始至 80°结束,每隔 10°记录一次,观测玉米地块。拟定在地块的东、南边界上及东北和东南两个角点分别进行观测,以保证热像仪沿三个条带方向进行扫描,即沿垄行方向(机下点—南),垂直垄行方向(机下点—西),斜向 45°(机下点—西北),斜向 135°(机下点—西南),并且这 4 个条带观测到的目标会交汇于地块中心。具体观测几何如图 1 所示。

在余涛测量孔隙率的实验中,是将吊车停在地块中心,通过控制多角度平台,向不同的方位进行扫描。这样可以得到以工业吊车为中心的全方位的扫描图像,每个方向的扫描目标是不同的,仅有的公共区域为车下点,但是该区域受到热像仪成像系统的影响。而在本研究实验方法中,各条带的目标彼此有交点,因此研究目标是相同的。

但在实际测量过程中,车只是停靠在地块的南边和东边,在车的南面沿垄向测量,在地块东边分别测量了垂直垄向,以及斜向 45°和斜向 135°三个方向。在拍照期间,热像仪对某一方向拍照,过程持续 20s,成像速率为每两秒一幅。因此对某一个方向大约有 10 幅图像,该区域亮温的真实值是这 10 次观测的平均值。观测一个条带一般需要 10min,整个数据采集过程从 21 时 42 分持续到 23 时 10 分。

## 2.3 数据处理与结果分析

由于只存在土壤和植被两种组分,孔隙率即等效于土壤比例。从热红外图像的获取不同方位下各组分亮温随天顶角的变化,进行可分性分析。由图

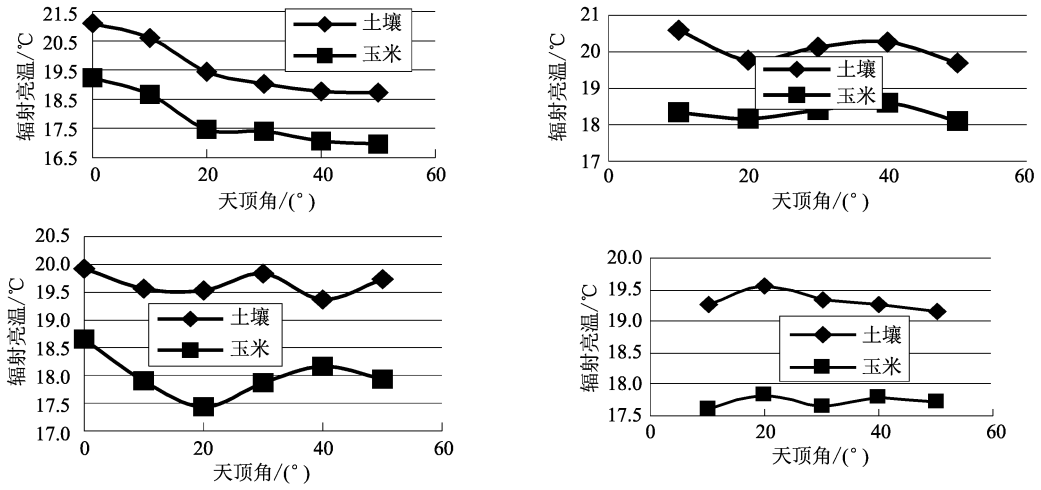


图 2 方位角为 0°, 45°, 90°, 135° 时多角度温度分布图

Fig 2 The directional brightness temperatures when azimuthally 0, 45, 90, 135 degrees respectively

2 可看出, 玉米和土壤的组分温度相对比较稳定, 温度差异显著, 两种组分比较容易区分开, 因此能够采用阈值法将二者区分开。

植被的结构在热红外图上表现得比较明显, 并且该热像仪精度高, 可直接在图上进行采样, 因此可以在图上选择有代表性的区域分别代表植被和土壤, 如图 3 所示, 根据亮温分布情况选定阈值, 对植被和土壤组分进行分类。为了保证分类精度, 对每个图像都进行阈值的选取。最后计算出不同方位角下, 孔隙率随着天顶角的变化情况及它们的拟合曲线, 如图 4 所示, 分别为南北方向, 东南至西北方向, 东西方向。结果表明, 随着观测天顶角的增大, 孔隙率是在下降的。在垄行方向, 机下点的孔隙率为 0.324; 而在其他方向, 机下点的孔隙率为 0.379。这是因为在垄行方向的机下点和其他方向的观测目标是不一样的。垄行方向的孔隙率随着观测天顶角的增大缓慢减小, 到 50° 时为 0.14。而在其他两个方向, 孔隙率随着天顶角增加快速下降, 到 50° 时接近于零, 分别为 0.04 和 0.05, 并且这两个方向的

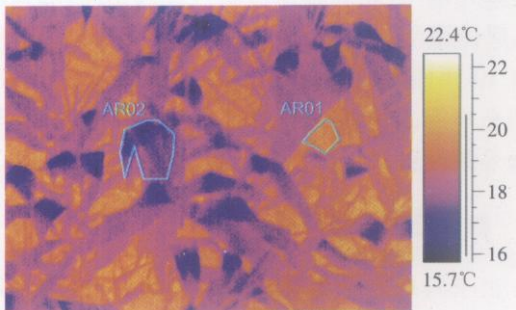


图 3 选择土壤 (AR01) 和叶片 (AR02)

Fig 3 Selection of soil (AR01) and leaf (AR02)

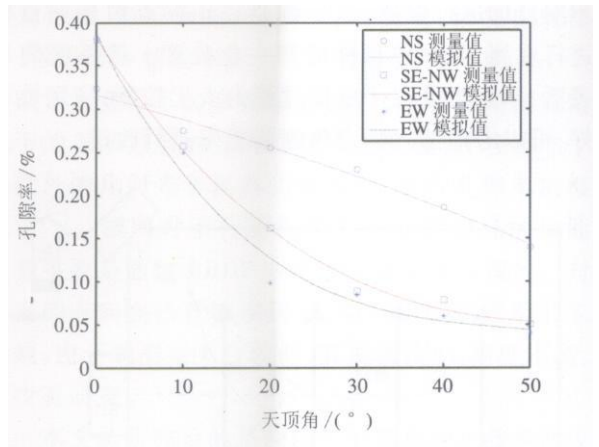


图 4 南机下点, 西机下点和西北机下点的方向孔隙率和它们的回归曲线

Fig 4 The directional gap fraction in three directions of south to nadir, west to nadir, north west to nadir and their regress lines

变化趋势非常相似。这是与植被的垄行结构特性相符的, 沿着垄行方向, 植被行间的空地可以被观测到, 因此天顶角增大, 土壤比例也会比较大。而在其他方向, 当天顶角增大时, 行间空地被植被遮挡了, 因而孔隙率随着天顶角快速下降, 到天顶角很大时, 几乎只能看到植被。尽管实验条件简易, 测量结果仍然反映了垄行作物的主要特征。

### 3 方向孔隙率的模拟

#### 3.1 方向孔隙率的模拟

方向亮温模型来模拟玉米冠层的孔隙率<sup>[12-13]</sup>。在该模型中,玉米地被简化为无限长的矩形截面植被行以及行与行之间的空地。植被行是有孔隙的,光线可以穿透植被间的孔隙照射到地面。另外,植被行不是直接接触地面的,而是离地有一定距离,因为在地面和植被底部的部分细小叶子可以忽略不计,因此这种假设是可以接受的。

对于均一的植被冠层,仅需考虑叶子尺度级的非均一性,孔隙率可以写为:

$$P(\theta) = \exp(-\lambda(\theta)G(\theta)DI(\theta)) \quad (1)$$

式中,  $\theta$  是观测方向; LAI 为叶面积指数; 投影函数  $G(\theta)$  是单位叶面积投影到观测方向法平面上的比例;  $\lambda(\theta)$  是丛生系数, 冠层均一随机分布时  $\lambda=1$ ; 规则分布时  $\lambda>1$ ; 丛生分布时由于叶子彼此重叠, 对光的拦截效率低,  $\lambda<1$ ;  $I(\theta)$  是光线穿透植被冠层的真实路径;  $D$  是叶面积体密度, 为  $LAI/b$  单位是  $m^2 m^{-3}$ 。

该模型中通过定义有效植被宽度, 使得植被宽度大于行宽的情况仍能适用。假定玉米的叶子分布是不均匀的, 大部分叶子都集中在中间部位, 由此定义有效植被宽度。定义植被行内的孔隙率是恒定的, 与植被行中间部分的孔隙率相同, 即

$$aP_{mean} + (L - a) = \int_0^L P(0^\circ, 0^\circ, x) dx \quad (2)$$

式中,  $P(0^\circ, 0^\circ, x)$  是机下点位置  $x$  处的孔隙率, 并且可以通过前面的阈值法从热红外图像上获得;  $P_{mean}$  是植被行中间部分 ( $0.25-0.75A$ ) 的平均孔隙率, 如图 5 所示。本实验中计算的有效行宽为  $0.45m$ 。

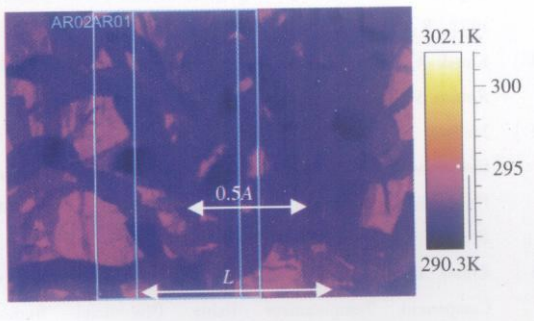


图 5 选择植被宽度和行宽示意图

AR01 为  $0.25-0.75A$ , AR02 为行宽  $L$

Fig 5 The scheme of plant width and row width

AR01 showed the range from  $0.25A$  to  $0.75A$

AR02 is the row spacing  $L$

将测得的结构参数(表 2)输入模型, 模拟出的不同方向下的孔隙率如图 6 所示。

表 2 模型输入参数

Table 2 The input parameters of model

LAI	H/m	h/m	L/m	a/m	$T_v/^\circ C$	$T_s/^\circ C$
3.64	2.2	0.5	0.5	0.45	17.9	19.7

注: 投影函数  $G$  用 Campbell 在 1986 给出的定义, 丛生系数  $\lambda$  采用 Espana 的测量结果。

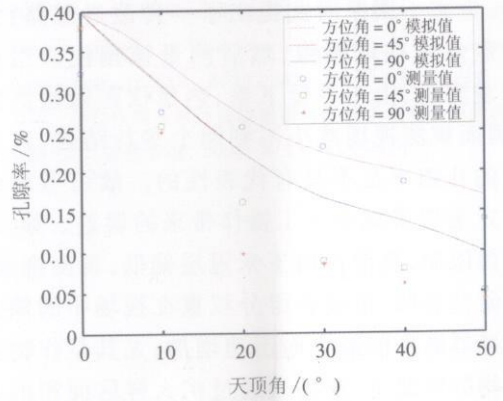


图 6 模拟孔隙率和测量孔隙率的对比

Fig 6 Comparison of simulated and measured gap frequency

由图 6 可见, 在天底方向的孔隙率为  $0.39$ , 并且在三个方向都随着天顶角增加而下降。当方位角为零时, 孔隙率缓慢下降, 到  $50^\circ$  时收敛于  $0.16$ 。方位角为  $45^\circ$  和  $90^\circ$  时下降较快, 并且两条曲线变化情况非常相似。模拟结果较好地显示了玉米冠层的垄行结构特性。

### 3.2 比较和分析

将模拟的孔隙率和测量值进行比较, 如图 6。由图 6 可看出, 方位角为零时, 模拟值与测量值比较接近; 方位角为  $45^\circ$  和  $90^\circ$  时, 模拟的曲线比测量值大概高出  $0.05$ 。从总体上说, 模拟值与测量值的变化趋势还是相似的, 而且曲线都是下凹的。因此该模型不仅可用于模拟高覆盖度下的孔隙率<sup>[13]</sup>, 同样也适用于中等密度下的玉米冠层。

模拟值和测量值存在着较大差异的原因, 可以归结如下。

首先, 模型简化引起的。模型中将垄行简化为离地的长方体。而在实际测量中对植被宽度和最底端叶子离地高度的测量比较粗略, 采样不够。当植被宽度测量不够准确, 在计算植被有效行宽时会有较大误差, 行间空地也有较大偏差, 从而模拟的孔隙率的误差也就加大。植被离地高度偏高时, 整个植被厚度偏小, 从而也会导致计算孔隙率的偏大。

其次,投影函数  $G$  和聚集函数  $\lambda$  均采用经验参数,没有考虑行结构,也没有考虑叶倾角对投影函数的影响,因而导致模拟值会偏离实际值。因此在以后的工作中,应该更合理地选择这两个参数值。

另外实验测量方面中也存在着许多限制条件。第一,热像仪图像获取采用手工测量引起了很多误差。当变化角度时,角度可能有  $3^\circ\sim 5^\circ$  的误差,为减小误差对此提出了一种改进思路:先摆到一定角度获取图像,然后测量该角度。当垂直向下观测时,由于手臂下垂,热像仪距冠层高度降低,因而观测视场减小不到两个垄行结构,这种情况下的孔隙率是不具有代表性的。故可考虑在采用固定装置来减小人工操作带来的误差。第二,由于条件限制,热像仪离玉米冠层偏低,观测视场小。已有研究表明,植被各组分权重在视场中的偏差随着传感器高度的减小而迅速增加;尤其是作物在长势不均的情况下,则必须通过扩大样区面积的方法来弥补<sup>[14]</sup>。第三,在实际测量中,由于时间问题并未按照拟定方案,在  $45^\circ$  和  $90^\circ$  方位时在同一个观测点,  $0^\circ$  方位时为另一个观测点,因此三个条带是两两相交,但三者没有共同交汇区域。并且,这样测量在手工条件下方向也比较难以把握。由于测量区域不一致,玉米地不是理想均一分布的,因此观测结果存在误差。此外,整个观测过程比较长,由图 2 可看出,温度分布有一定脉动,而输入模型的亮温值是一个平均值,也会引起较大误差。遗憾的是,在观测中,没有对观测条件进行详细记录,因而不能进行定量的误差分析。

已有研究表明,垄行作物的地面实验应尽量在减小视场角、加大样区面积、缩短观测周期中寻求平衡<sup>[14]</sup>。针对该实验系统,为了获取更高的精度,可行的方案是尽量选取均一的植被,增加固定装置减少手工操作带来的误差,并且在可行条件下适当增加传感器的高度。

## 4 结 论

在夜间 10 点左右,田间能量交换达到平衡,组分温度比较稳定,此时农田有两个亮温组分:玉米和土壤,比白天更容易区分,其他时段组分情况比较复杂,受当时作物生长形态和局地小气候等多种情况影响。基于此种原理,该研究设计夜间热红外多角度实验,利用夜间热红外图像进行孔隙率的计算,尽管实验条件有限,测量精度不高,仍然反映了垄行作

物的主要特征。针对玉米冠层植被高度过高,一般的 BRDF 观测架不能适用的问题,本实验设计了一个简易的车载热像仪系统,来获取玉米冠层的多角度热红外数据。相比余涛的基于工业吊车平台的热像仪系统从不同方位角观测不同目标,本实验是从不同角度观测同一目标的,无需作目标的归一化处理,理论上更为合理。

将测得的孔隙率与余涛等的 GORT 模型模拟出的孔隙率进行对比,二者总体上相似。说明该模型不仅可用于模拟高覆盖度下的孔隙率,同样也适用于中等密度下的玉米冠层,进一步验证了该模型的有效性。

实验中存在的问题,主要有角度控制不准确、地块的非均一性和观测目标的不统一、测量时间过长、热像仪距离冠层过低,这些都会给孔隙率的计算带来较大误差。改进的方法是增加固定装置来代替手工测量,选择样区要考虑均一性,适当增加传感器高度。此外,在投影函数和丛生参数选取上应该从实际情况出发,还有该模型对植被结构的简化也存在一些限制性。这些问题是以后工作中应该注意和解决的。

## 参 考 文 献 (References)

- [ 1 ] Norman J M, Welles J M. Radiative Transfer in an Array of Canopies[ J]. *Agron J*, 1993, 75: 481- 488
- [ 2 ] Li X W, Alan H. Strahler Modeling the Gap Probability of a Discontinuous Vegetation Canopy [ J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1988, 26(2): 161- 170
- [ 3 ] Nilson T, Kuusk A. A Theoretical Analysis of the Frequency of Gaps in Plant Stands[ J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1971, 8: 25- 38
- [ 4 ] Kuusk A. A Fast Invertible Canopy Reflectance Model[ J]. *Remote Sensing of Environment* 1995, 51: 342- 350
- [ 5 ] Jackson J E, Palmer J W. Interception of Light by Model Hedgerow Orchards in Relation to Latitude, Time of Year and Hedgerow Configuration and Orientation[ J]. *Journal of Applied Ecology*, 1972, 9: 341- 358
- [ 6 ] Kimes D S. Remote Sensing of Row Crop Structure and Component Temperatures Using Directional Radiometric Temperatures and Inversion Technique[ J]. *Remote Sensing of Environment* 1983, 13: 33- 55
- [ 7 ] Sinoquet H, Bonhomme R. Modeling Radiative Transfer in Mixed and Row Intercropping Systems[ J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 1992, 62: 219- 240
- [ 8 ] Ganis A. Radiation Transfer Estimate in a Row Canopy: a Simple Procedure[ J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 1997, 88: 67- 76
- [ 9 ] Tsubo M, Walker S. A Model of Radiation Interception and Use

- by a Maize-bean Intercrop Canopy [ J ]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **10**: 203—215.
- [ 10 ] Chen L F, Liu Q H, Fan W J et al. A Bi-directional Gap Model for Simulating the Directional Thermal Radiance of Row Crops [ J ]. *Science in China (Series D)*, 2002, **32** ( 4 ): 290—298. [ 陈良富, 柳钦火, 范闻捷等. 行播作物热辐射方向性孔隙率模型 [ J ]. *中国科学 D 辑*, 2002, **32** ( 4 ): 290—298. ]
- [ 11 ] Yu T, Gu X F, Tian G L et al. Study on the Classification of Components Brightness Temperature over a Maize [ J ]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, **9** ( 1 ): 16—23. [ 余涛, 顾行发, 田国良等. 玉米地组分亮度温度分类变化研究 [ J ]. *遥感学报*, 2005, **9** ( 1 ): 16—23. ]
- [ 12 ] Yu T, Gu X F, Tian G L et al. Modeling Directional Brightness Temperature over a Maize Canopy in Row Canopy [ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42** ( 10 ): 2290—2304.
- [ 13 ] Yu T, Gu X F, Tian G L et al. Using Night TIR Images to Model the Gap Fraction of a Dense Maize Canopy [ A ]. *IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium [ C ]*. Toulouse, France, July 21—25, 2003.
- [ 14 ] Yu T, Gu X F, Tian G L et al. Analyzing the Errors Caused by FOV Effect on the Ground Observations of Directional Brightness Temperature over a Row Structured Canopy [ J ]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, **8** ( 5 ): 443—450. [ 余涛, 顾行发, 田国良等. 垄行作物玉米方向亮温野外测量中视场角影响的简单分析 [ J ]. *遥感学报*, 2004, **8** ( 5 ): 443—450. ]