

文章编号: 1007-4619(2005)06-0640-06

利用夜间热红外遥感影像研究 玉米冠层孔隙率分布

余 涛¹, 顾行发^{1,2}, 田国良¹, M. Legrand³, J. F. Hanocq²,
R. Bosseno², 蔡红艳⁴, 张 勇¹

(1. 中国科学院 遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 2. 法国农业科学院, Avignon 84914, 法国;
3. 法国 Lille 大学, Lille 59665, 法国; 4. 北京师范大学数学系, 北京 100875)

摘 要: 为了测量高覆盖条件下 (LAI=5) 玉米冠层的方向孔隙率, 利用一台基于工业用吊车平台的窄视角热红外成像仪开展测量。在此基础上建立了一个几何光学和辐射传输混合模型模拟半球空间的孔隙率分布。测量结果表明, 大多数的孔隙出现在邻近的植株行之间, 这导致了在热红外图像中, 冠层还保持着垄行结构的特征。基于已经得到的几何参数, 本研究发展的模型具有垄行作物孔隙率分布特征, 模拟的孔隙率与被观测的孔隙率保持很好的一致。更进一步的改进, 需通过计算机模拟以建立更加真实的作物结构描述, 这也是以后的一个研究方向。

关键词: 玉米冠层; 孔隙率; GORT 模型; TIR 晚间影像

中图分类号: TP722.6/TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

孔隙率是光线穿过植被冠层而没有被叶子或茎阻挡的概率。作为描述冠层结构和密度空间分布的一个主要参量, 孔隙率已经被广泛地应用于 PAR、冠层结构、作物水份状态估计, BRDF 等遥感信息提取中。

本研究的目的是测量并定量描述孔隙率的空间分布和在整个半球上的多角度方向变化。不同于通常所用的方法, 我们在晚上用小视场角的 TIR 热像仪观测作物冠层, 并通过组分亮温值的差异识别土壤背景和叶片。对于孔隙率多角度变化的描述, 我们提供了一个简单的几何光学辐射传输模型 (GORT)。

2 模型与方法

2.1 实验地概述

试验田位于法国南部 INRA-Avignon (北纬

43°57', 东经 4°5'), 大小为南北 150m 长, 东西 100m 宽。玉米在 1999-05-10 以南北方向为垄行方向种植。平均行宽 0.8m, 密度 9.32 棵 /m²。几何结构测量是在 1999-06-22 的白天展开, 结果见表 1。LAI 是平均叶面指数; H 是植物平均高度; h 是玉米底层的大叶到地面的高度, 其下枯萎的和小的叶子忽略不计, 我们假设冠层密度是主要分布在 H-h 之间; w 是植株的平均宽度, 它的定义为从高处垂直向下观测, 得到的植株最大宽度。作物行的宽度 A 被定义为:

$$A = w \sum f_i \cos \alpha$$

式中, α 是植株的方位角, 即植株叶片的伸展方向和垄行方向之间的夹角; f_i 是 α 出现在测量中的概率, 平均的植物方位角大约是 12°。在这次测量中, 这

表 1 玉米冠层的农学和几何参数 (1999-07-26)

Table 1 Agronomic and geometrical parameters of the maize canopy (1999-07-26)

LAI	H/m	h/m	w/m	A/m
4.9 ± 0.3	1.85 ± 0.17	0.5 ± 0.1	0.92 ± 0.07	0.88 ± 0.08

收稿日期: 2004-01-20; 修订日期: 2005-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40371088), 法国农科院奖学金, 国家重点基础研究发展规划项目 (G2000077902), 国家高技术研究发展计划项目 (2002AA130010), 中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助 (CX020011)。

作者简介: 余涛 (1967—), 男, 2002 年毕业于法国 Lille 大学大气光学实验室, 获博士学位, 现主要从事遥感机理研究工作。http://www.cnki.net

些参数从至少 25 个样本中得到。

2.2 红外遥感系统、野外测量方法与数据处理

红外成像遥感系统由一个单波段热红外成像仪、一个 20m 高的工业用吊车以及一个多角度控制平台组成。成像仪装备有视场角为 $7^\circ \times 5^\circ$ 的透镜, 光谱范围 $7.25-13.25\mu\text{m}$ 。为了开展孔隙率方向变化的测量, 起重机的被移动到农田中央, 并且起重机臂垂直于垄行方向。通过控制多角度平台, 成像仪沿 3 个条带方向进行观测, 即沿垄行方向 (北机下点 - 南), 垂直垄行方向 (东机下点 - 西), 斜向 45° (东北 - 机下点 - 西南)。在拍照期间, 热像仪对准某一方向拍照, 过程持续 20s 成像速率为 1 幅 /s, 因此对某一个区域有大约 20 幅图, 该区域亮温的真实值是这 20 次观测的平均值。观测一个条带一般需要 5m in, 整个测量约 15m in。

本研究将采用直方图法从热红外遥感影像中提取玉米冠层的孔隙率^[1]。在数据处理时, 首先从热影像图中区分出亮温组分, 建立热红外影像亮温的频率分布, 再用一组正态分布曲线去套直方图亮温分布。可以认为这组正态分布曲线代表了组分亮温分布特点。取样中, 若所选择的距型采样区域包括了整倍数的行距, 则这组正态分布曲线的面积比等于组分在农田中的权重, 其中土壤的权重即是玉米冠层的孔隙率。

2.3 玉米冠层孔隙率模型

玉米地被简化成两部分: 无限长的矩形截面植被行和行与行之间的空地。植被被假设为存在孔隙可透光的, 以便光线能穿过行及行之间的空隙。此外, 植被行不是直接接触土壤面, 而是悬浮在土壤以上有限的高度, 在土壤平面和植被矩形低部的纤细部分和小叶子被忽略不计。图 1 给出了在垂直于垄行方向平面上的坐标系和变量定义。X 的起点是矩形的左角; H 和 h 分别是矩形顶部和底部的高度; b 是植被矩形的厚度: $b=H-h$; a 是矩形的宽度, L 是行距, α 是在垂直面上的投影观测角度。它由以下公式计算:

$$\tan\alpha = \tan\theta \tan\varphi \tag{1}$$

式中, θ 和 φ 是观测的天顶角和方位角。

Warren Wilson 李小文等人^[2,3] 对于一个均匀的冠层来说孔隙率方程能被表示为:

$$P(\theta) = \exp\left[-\lambda(\theta)G(\theta)LAI\frac{l(\theta)}{b}\right] \tag{2}$$

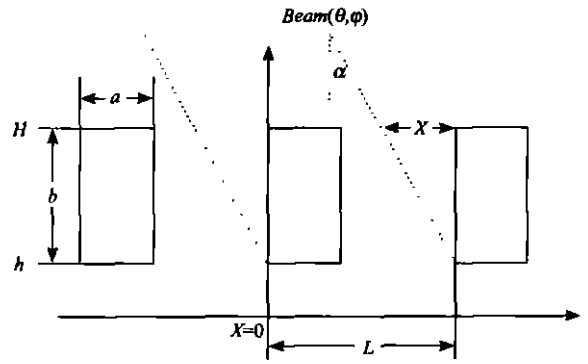


图 1 在垂直垄向的平面里玉米冠层的图解和变量定义
Fig 1 Scheme of maize canopy geometry and definition of variables as seen in the plane perpendicular to the row direction

在这里 $l(\theta)$ 是光线穿过冠层的路径长度, b 是冠层厚度, $D = \frac{LAI}{b}$ 被定义为叶面密度, 单位是 $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$, 均匀冠层的空隙率依赖光线通过冠层的路径长, 并且这种表达式能够应用于行结构的目标上, 即 $l(\theta)$ 和叶面密度随空间位置的变化而变化。行结构冠层在 (x, y) 点处从 (θ, φ) 方向上观测的空隙率 $P(\theta, \varphi, x, y)$ 可以表示为:

$$P(\theta, \varphi, x, y) = \exp\left[-\lambda(\theta)G(\theta)D\frac{L}{a}l(\theta, \varphi, x, y)\right] \tag{3}$$

式中, $l(\theta, \varphi, x, y)$ 是有效路径, 只考虑光线通过冠层的长度, 不计行与行之间的路径长; $\frac{DL}{a}$ 可定义为垄行作物植被行的有效叶面密度。 (x, y) 被定义为分别垂直和平行于行向的位置。冠层空隙率 $P(\theta, \varphi)$ 可以通过在整个区域上积分来得到:

$$P(\theta, \varphi) = \frac{\iint P(\theta, \varphi, x, y) dx dy}{S} \tag{4}$$

考虑玉米冠层结构的周期特征, 空隙率的表达式被简化了。 $l(\theta, \varphi, x, y)$ 沿 x 轴周期性变化, 因此我们只沿 x 轴观察, 得到 $l(\theta, \varphi, x)$ 和 $P(\theta, \varphi, x)$, 积分区域简化为一条直线 (x 轴):

$$P(\theta, \varphi) = \frac{\int_0^L \exp\left[-\frac{\lambda(\theta)G(\theta)DLl(\theta, \varphi, x)}{a}\right] dx}{L} = \frac{\int_0^L \exp(-\tau(\theta)l(\theta, \varphi, x)) dx}{L} \tag{5}$$

式中, $\tau(\theta) = \frac{\lambda(\theta)G(\theta)DL}{a}$ 是冠层的消光系数, 只与观测或照射的角度有关, 而与观测位置无关。变量 $l(\theta, \varphi, x)$ 是空间位置的函数, 它的计算采用了一种简便的新方法, 即首先确定 l 在垂直茎向平面上的投影长度, 确定穿过冠层的起止位置, 减去露在土壤区段的投影长度后, 反算回路程 l 的长度。模拟计

算中, 起止位置在 $[0, L]$ 之间变化, 以模拟由于位置变化产生的影响。

模拟模型 G 和 λ 的输入值, 分别采用 Nilson 和 Espana 等人的结果^[4,5], G 值是一个二次多项式 $G(\theta)$, λ 与玉米的生长状况和观测方向有关。当 LAI 是 5 时, 我们采用如图 2 的由样条函数得到的模拟曲线。

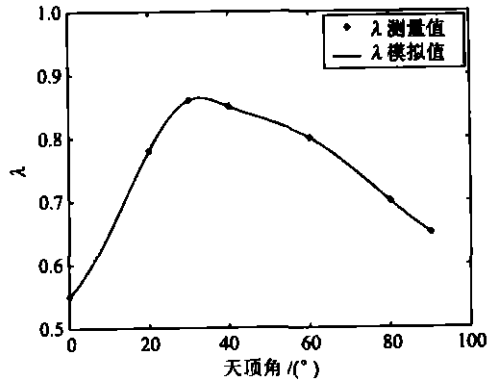
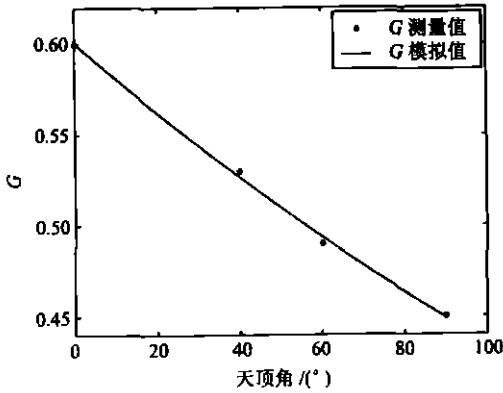


图 2 在模型中采用的投影函数 G 和叶片离散系数 λ 随角度的变化

Fig 2 Projection function G and clumping parameter λ as input for the model

3 结果和讨论

3.1 晚间用热红外成像仪测玉米冠层孔隙率

图 3 为在 1999-07-26 当地时间 22 点获取的 3 个条带方向上的孔隙率, 即从南到机下点 (NS)、从西到机下点 (EW) 以及从西南到机下点 (NW-SE) 的变化。玉米冠层的孔隙率依赖于观测方向。随着观测天顶角的增加, 孔隙率沿着 3 个方位角下降。在机下点处孔隙率的值是 0.3。而沿 45° 倾斜观测时, 在南北方向 (茎行方向) 上孔隙率逐渐下降到 0.15; 在其他的两个方向上, 根据模拟的曲线倾向孔隙率几乎下降到 0。这种现象直接与冠层行结构有关, 大多数的植被叶子聚集在茎的周围, 相邻行之间的孔隙没有被覆盖。

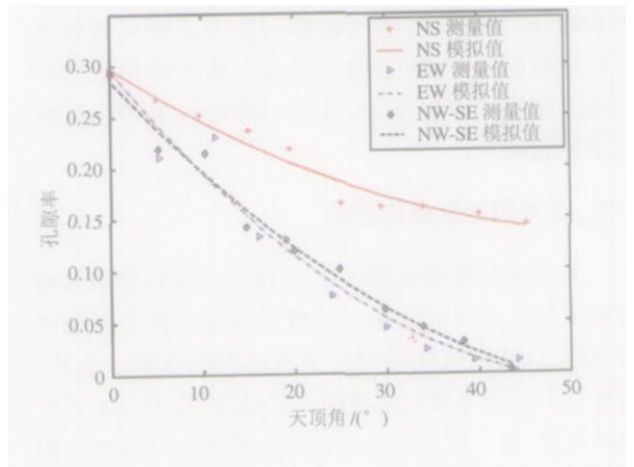


图 3 在 3 个方向上的孔隙率和它们的拟和曲线

Fig 3 Directional gap frequency in three directions of south to nadir (solid line), west to nadir north west to nadir and their fit lines (solid line dash point line dash line)

3.2 模型模拟结果

为了解析茎行作物路径如何随观测位置和方向的变化, 5 个天顶角方向 ($0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 80^\circ$) 在 3 个方位上 ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) 的模拟结果由图 4 表示。模型输入中, 叶面积指数 $LAI=4.9$; 行距 $L=0.8m$; 冠层行高 $H=1.35m$, 矩形底端距地为 0, 宽度 $a=$

选择在当地时间 22 点开展测量, 主要考虑到太阳落山后几小时玉米冠层内的温度交换使得土壤与植被温度各自趋向均一。这与白天和太阳刚刚落山时, 或在太阳出来以前的温度分布情况是不同的。另外, 在午夜时分, 冠层温度慢慢的变化, 在一个方向上的重复测量将有助于找到理想的精确值, 相对长的测量周期在结果上并没有带来明显的误差。

0.67m。若距地面距离 $h \neq 0$, 整个曲线向右平移。从图 4(a)中可以看出当方位角是 0° 时的路径长度。沿着行向, 零值区域出现在所有的曲线上。在植被区域里, 路径长度稳定的上升。然而, 上升速度不同, 对于小的天顶角, 变化很小, 对于大的天顶角, 上

升非常显著。在其他两个图形中 (观测方位角分别是 45° 和 90°), 除了天顶角为 0° 所对应的那条曲线, 有零值的区域均消失了, 土壤部分被冠层所遮挡。在这两个图形中, 曲线有不同的形状, 表明观测位置对路径长度值有非常大的影响。

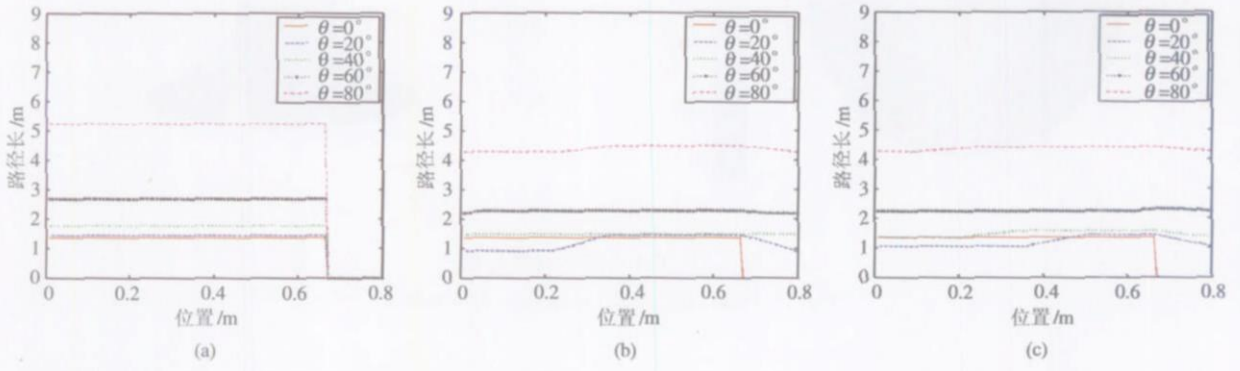


图 4 在垂直垄行方向上沿 x 轴方向, 路径长随光线位置和天顶角的变化
观测方位角分别为 0° (a), 45° (b) 和 90° (c)

Fig 4 Path length changes corresponding to beam position and direction
The azimuth of row direction is set 0° (a), 45° (b) and 90° (c)

图 5 给出路径长度随观测方位角变化而天顶角保持固定值的变化趋势。在模拟中, 观测天顶角保持常数 60° , 方位角从 0° 以步长 22.5° 变到 90° 。对应不同的方位角, 曲线有不同的形状: 沿着垄行方向 (方位角 0° 时) 观测, 路径长度随位置的变化最大, 达到 2.7 (对裸地是 0, 对植被是 2.7); 其他的 4 条线有小的或相似的变化范围 (从 2 到 2.4)。尽管对于不同的方位角, 路径随位置的变化各不相同, 但是一个有趣的事实是它们有相同的平均路径长均值 (2.24)。这一特征表现在图 6, 即对于垄行作物, 平

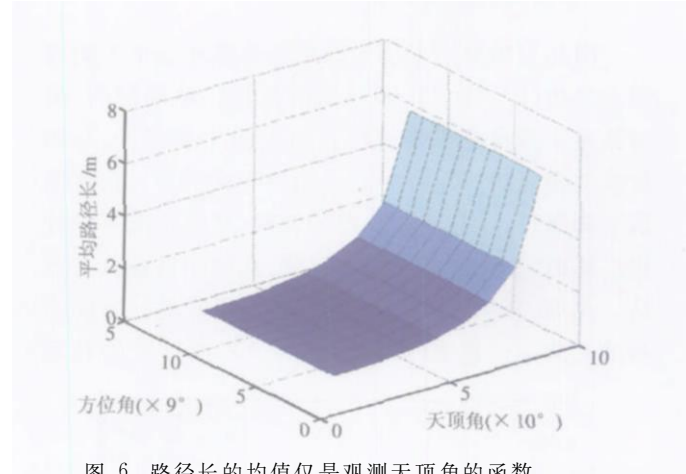


图 6 路径长的均值仅是观测天顶角的函数, 而与观测方位角无关

Fig 6 Average of path length changes as a function of view direction

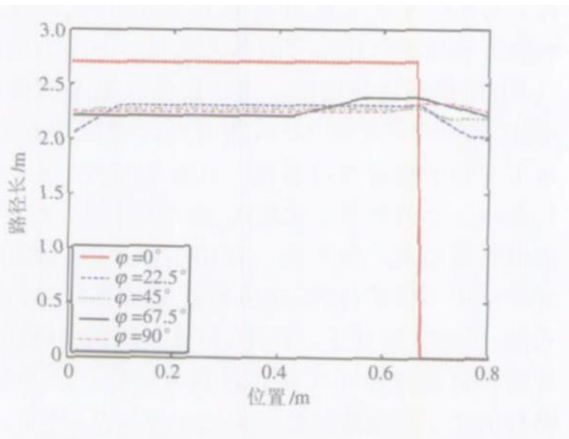


图 5 路径长随位置和方位角变化, 天顶角保持常数 60°

Fig 5 Path length changes with position and azimuth

均路径长只随着观测的天顶角变化, 而不随方位角变化。模拟结果是由 10 个方位角 ($0^\circ, 10^\circ, \dots, 90^\circ$) 和 9 个天顶角 ($0^\circ, 10^\circ, \dots, 80^\circ$) 得出的。

图 7 为孔隙率分布的极坐标图。孔隙率的最大值出现在机下点, 值大约是 0.27。在除了垄行方向的其他方位上, 随着天顶角的增大而快速下降。而沿着垄向 (方位角为 0° 和 180°), 孔隙率慢慢的下降, 在非常大的天顶角时, 它的值接近极限值

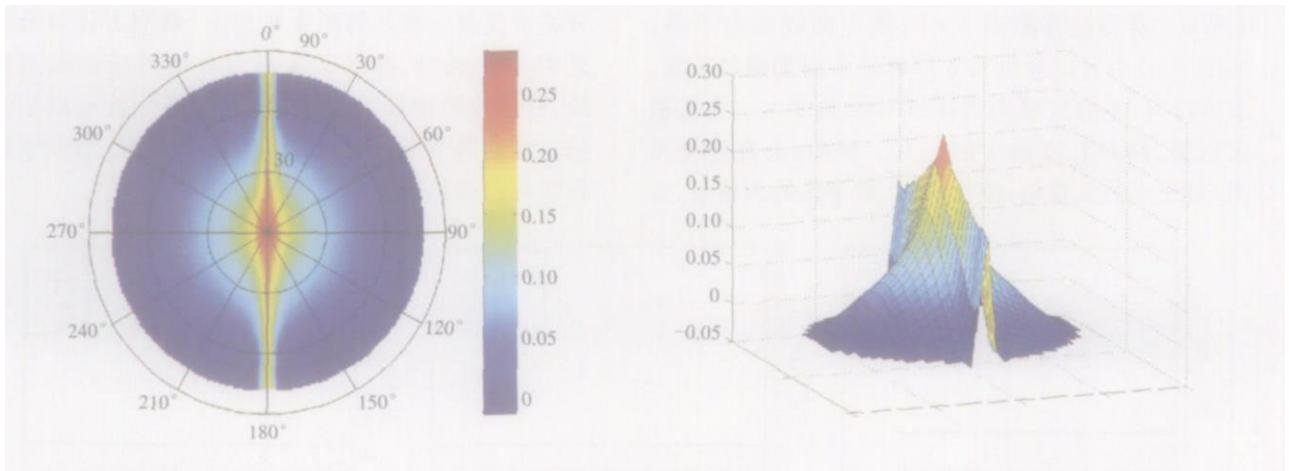


图 7 孔隙率分布的极坐标图

Fig 7 Polar map of gap frequency distribution

($\frac{L-a}{L}$)。在垄行方向附近存在一个很窄的区域，在这一区域孔隙率保持在很大的值上。对于其他方向的观测，孔隙率以相似情形快速下降。

3.3 与实地测量的比较

图 8 为模型结果与上面测量数据在 3 个不同观测方位角 (0° , 45° 和 90°) 做的比较。结果说明，模型抓住了测得的玉米冠层孔隙率的主要特征，与测量值的变化趋势保持一致。当方位角是 0° ，孔隙率值下降缓慢；在其他方位角的观测，孔隙率值下降较快。然而，在大观测天顶角范围，孔隙率值被普遍高估。例如，在 45° 天顶角处比较时，顺着垄行方向测量的孔隙率值是 $P(45^\circ, 0^\circ) = 0.14$ ，而计算的孔隙

率值是 0.19。相似地，当方位角是 45° 和 90° 时，对天顶角很小时模型拟和的非常好，而当天顶角很大 (大于 30°) 时，偏差加大。模拟的缺陷可能是由于简化了冠层几何结构的假设和冠层光学特征的原因。在模型中，玉米冠层被简单的划分为植被行和之间的空地。当我们平行于垄向观看时，甚至在天顶角很大时，我们也能看到所有的孔隙。然而，在以大的角度观测时，计算和测得的孔隙率之间的偏差是很显然的。对于该模型的改进，最大的可能是通过计算机模拟，建立更加真实的作物结构描述。并在此基础上开展孔隙率方向特性的研究。

4 结 语

基于工业用吊车平台的窄视场角成像仪获取的夜间热红外线图像被用于测量冠层孔隙率的方向变化。对于一个高植被覆盖的玉米冠层，孔隙率和观测的天顶角和方位角之间的关系通过一个几何辐射 (GORT) 模型进行模拟。为了提高孔隙率测量的精确度，影响因素例如 FOV, 测量时间和操作方法，在这个实验中均被加以考虑。在晚间观测，每个组分只有一个小的温度变化范围，这与在白天、太阳刚刚落山时或出来之前不同。在模型建立时，设定植株叶片集中在植被行内，在植被行与植被行之间存在孔隙，没有任何叶子。此外，植被行的消光特性依赖叶面投影函数和叶片离散系数来调整。结果表明，模型抓住了玉米冠层孔隙率的主要特征，然而，不论方位角是多少时，在大的天顶角方向上孔隙率的估计过高。我们认为这种偏差是与玉米冠层几何结构的简化和错误的估计消光参数有关。进一步的建立

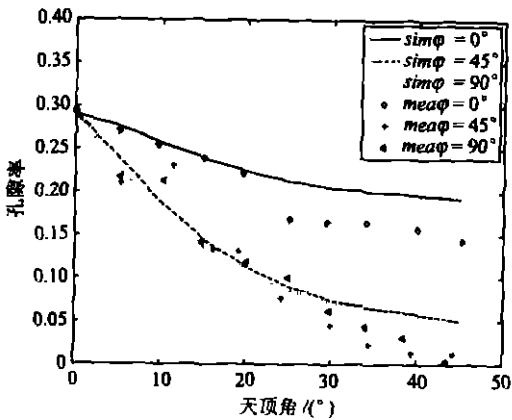


图 8 在 3 个方向上 (0° , 45° , 90°) 模拟孔隙率和测量的孔隙率的比较

Fig 8 The comparison of simulated and measured gap frequency in 3 directions that the azimuth are 0° , 45° and 90° respectively

在计算机真实场景模拟基础上的模型开发正在进行中。

参 考 文 献 (Reference)

- [1] Yu T, Gu X F, Tian G L et al Study on the Classification of Component Brightness Temperature over a Maize Canopy [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 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, 2004, 9(1): 16-23.]
- [2] Warren Wilson J Stand Structure and Light Penetration Analysis by Points Quadrates [J]. Journal of Applied Ecology, 1965, 2: 383-390.
- [3] Li X W, Stahler A H Modeling the Gap Probability of a Discontinuous Vegetation Canopy [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(2): 161-170.
- [4] Nilson T, Kuusk A A Theoretical Analysis of the Frequency of Gaps in Plant Stands [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1971, 8: 25-38.
- [5] Espana Boquera M L Simulation de la Variation Temporelle Directionelle et Spectrale de la réflectance de Cultures de Maïs à Partir d'un Modèle Dynamique de la Structure 3D du Couvert [D]. Université de Mame-la-Vallée, 1997.

Investigating Gap Frequency of a Maize Canopy using TIR Camera at Night

YU Tao¹, GU Xing-fa^{1,2}, TIAN Guo-liang¹, M. Legrand³, J F Hanocq²,
R. Bosseno², CAI Hong-yan⁴, ZHANG Yong¹

- (1. State Key Laboratory of Remote Sensing Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences Beijing 100101, China;
2. INRA-CSE, 84914, Avignon, France;
3. Laboratoire d'Optique Atmosphérique Université des Sciences et Technologies de Lille 59655, Villeneuve d'Ascq France;
4. Department of Mathematics Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract In order to estimate directional variation of gap frequency over a over covered maize canopy (LAI=5), an experiment using a narrow FOV thermal infrared camera mounted on a crane boom was conducted at night on July 26, 1999. A geometric optical and radiative transfer model was proposed to simulate hemispherical gap frequency. Observations showed most gaps appeared between the adjacent hedgerows which lead the canopy still to keep row feature in thermal infrared images. The measured gap frequency confirmed the results mentioned in many papers that very little azimuthal variation appeared except the observations parallel to the rows. Based on already obtained geometrical parameters, the developed model captured the main features of the measured gap frequency; the simulated gap frequency showed a fairly good agreement with observed gap frequency.

Key words maize canopy; gap frequency; GORT model; night TIR images