

文章编号: 1007-4619(2006)01-0015-06

## 垄行结构玉米冠层方向亮温模型研究

余 涛<sup>1</sup>, 顾行发<sup>1,2</sup>, 田国良<sup>1</sup>, M. Legrand<sup>3</sup>, J. F. Hanocq<sup>2</sup>,  
R. Bosseno<sup>2</sup>, 蔡红艳<sup>4</sup>, 程天海<sup>1</sup>, 余珊珊<sup>1</sup>

(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 59655, 法国; 4. 北京师范大学数学系, 北京 100875)

**摘 要:** 基于热红外成像仪获取的玉米冠层图像, 对垄行结构玉米的方向亮温 (DBT) 进行模型化描述并开展了初步验证工作。模型中假设某一方向上的冠层 DBT 是组分亮温及各组分在视场中所占面积权重的函数, 它们在视场中的比例依赖太阳与传感器的几何位置关系, 以及在作物行内, 作物行与行之间孔隙的分布。对于玉米冠层的几何特征, 简化为横截面是矩形的、其中有空隙透光的一组无限长的平行立方体; 立方体内双向孔隙率的方向变化由 Kuusk 函数来描述。模型模拟表明, 玉米亮温组分在视场中的权重具有垄行特性。中午前后, 通过对中等密度的冠层 DBT 模拟, 在 DBT 极坐标图形上发现了一个明显位于垄行方向的热条带的出现, 热点出现在太阳位置的周围。最后, 利用实地观测的结果与模型模拟结果作对比, 对该模型的不足和以后的改进作了初步分析。

**关键词:** 方向亮温; GORT 模型; 玉米冠层; 垄行结构

**中图分类号:** TP701 **文献标识码:** A

## Modeling Directional Brightness Temperature over a Maize Canopy in Row Structure

YU Tao<sup>1</sup>, GU Xing-fa<sup>1,2</sup>, TIAN Guo-liang<sup>1</sup>, M. Legrand<sup>3</sup>, J. F. Hanocq<sup>2</sup>, R. Bosseno<sup>2</sup>,  
CAI Hong-yan<sup>4</sup>, CHENG Tian-hai<sup>1</sup>, YU Shan-shan<sup>1</sup>

(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:** A modeling study on the variations of directional brightness temperature (DBT) for row-structure crops was carried out with the help of the images captured by a large aperture thermal infrared camera over a maize canopy. The model assumes that the DBT is a function of component brightness temperatures and their directional fractions. Component fractions in the scene of view depend on sun-view geometry and the distributions of gaps within and between plant rows. To describe canopy geometrical features, a system of porous hedgerows with rectangle cross-section has been used; the directional variations of gap fraction are described by Kuusk function. The model demonstrates directional variations of DBT as a function of sun-viewing geometry and canopy geometrical structure as well as component brightness temperatures. In the simulation of DBT over a middle dense canopy near the noontime, the results reveal an evident row-direction-oriented hot stripe in DBT polar map, where appeared the hot spot along the sun direction. Further validation analysis has also been conducted, which demonstrates modeled DBT agreeing closely with field observations.

**Key words:** DBT; GORT model; crop canopy; row-structure

收稿日期: 2004-01-15; 修订日期: 2005-05-20

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。

## 1 引 言

方向亮温 (DBT) 在描述作物冠层热红外辐射分布上起着重要作用, 作为一个能被遥感系统直接获得的参数, DBT 已在地表能量估算, 植被生态、物候学参数的反演以及遥感信息标准化等方面有广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。从野外观测垄行结构玉米 DBT 的实验中发现, DBT 大小和角度变化依赖冠层的温度分布、几何结构以及“太阳-目标-传感器”的几何位置关系。特别是当传感器顺着太阳光入射方向时, 出现了所谓的热点效应的趋势。目前为止, 已有的研究垄行结构玉米 DBT 的模型未能很好地说明产生热点效应这一现象。本研究介绍一个新的 GORT 模型, 用它来分析冠层几何结构和亮温空间分布对 DBT 的影响, 并对热点效应做出解释。

## 2 玉米冠层的方向亮温模型

### 2.1 玉米冠层几何结构以及太阳-目标-传感器几何关系的描述

在 Kimes 等人<sup>[4]</sup>建立的模型中, 玉米冠层被简化为截面是矩形的、无限长的、不透明的、相互平行的立方体, 并且与土壤平面直接接触, 土壤部分位于两个相邻的植株行之间, 叶片只分布在立方体内。在我们的研究中, 植被被认为是充满孔隙的, 光线可以通过孔隙, 穿透一行或多行植被。此外, 立方体以一个小距离悬浮于土平面之上。在土平面和矩形底部之间的细茎和小叶子忽略不计。因为大多数的叶子聚集在植物的上部, 所以这种简化是可以接受的。图 1 所示为在垂直于行向的平面里的坐标系和变量的定义。x 的起点是一个矩形的左下角; H 和 h 分别是矩形边缘的上部和底部, b 是矩形的高度 ( $b = H - h$ ); a 是矩形的宽度; L 是行距, 阳光和观测方向在与行垂直的平面上的投影分别是  $\alpha_s$  和  $\alpha_v$ 。倾角  $\alpha$  的绝对值是:

$$\tan \alpha = \tan \theta_s \sin \varphi \quad (1)$$

式中  $\theta$  和  $\varphi$  分别是太阳和观测方向的天顶角和方位角。对于玉米冠层孔隙率的计算, 采用改进李小文等人<sup>[5]</sup>拓展的适合不连续植被的孔隙率模型。

### 2.2 玉米冠层的三分量热特性和 DBT 的计算

本研究中, 有别于多层假设, 四分量或两分量模型, 我们将采用 Kustas 等人<sup>[6]</sup>所建议的玉米冠层

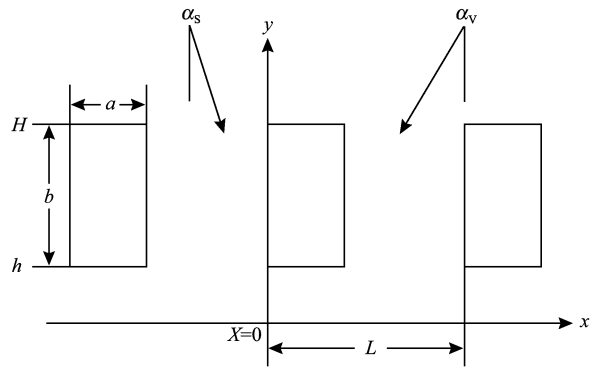


图 1 太阳-玉米冠层-传感器几何位置关系、玉米冠层结构和在垂直于行向的平面里的变量定义

Fig 1 Sun maize canopy-sensor geometry and definition of variables as seen in the plane perpendicular to the row direction

“三个亮温分量”的分类方法, 即亮地、暗地和植被。在垄行结构玉米冠层野外实验中, 已经发现在被阳光照射和不被阳光照射时, 叶片的温度差异跟亮地和暗地之间温度差异相比是非常小的。例如, Kimes 等人<sup>[7]</sup>解释了一个典型的例子: 亮地是  $66.6^{\circ}\text{C}$ , 暗地是  $44.3^{\circ}\text{C}$ ; 向阳植被是  $40.5^{\circ}\text{C}$ , 背阳植被是  $40.4^{\circ}\text{C}$ , 它们之间的差值只是  $0.1^{\circ}\text{C}$ 。在白天当地时间中午前后对整个生长期玉米的测量中证实了“三亮温组分”的假设。方向亮温作为组分亮温和它们在投影图形中各自所占比例的一个函数, 它的值可以用以下公式来计算:

$$T_b^4 = T_v^4 C_v + T_{sb}^4 C_{sb} + T_{so}^4 C_{so} \quad (2)$$

式中  $T_b$  是冠层方向亮温;  $T_v$  是植被组分亮温;  $C_v$  是植被所占比例;  $T_{so}$  是暗土组分亮温;  $C_{so}$  是暗土所占的比例;  $T_{sb}$  是亮土组分亮温;  $C_{sb}$  是亮土组分所占的比例。

### 2.3 冠层双向孔隙率

Kuusk<sup>[8]</sup>对均匀分布的冠层建立了一个指数模型, 在这个模型中, 视场中看到的亮土比例为:

$$P = P_s P_v H_t = \exp \left[ -\tau \left( l_s + l_v - \frac{1 - \exp(-m l_v)}{m l_v} \sqrt{l_s l_v} \right) \right] \quad (3)$$

式中  $P_s$  是太阳方向上的孔隙率,  $P_v$  是观测方向上的孔隙率,  $H_t$  是双向函数,  $\tau$  是消光参数,  $\tau(\theta_s)$ ,  $\tau(\theta_v)$  的值分别对应于  $P_s$  和  $P_v$ ;  $l_s$  和  $l_v$  分别是植被立方体内阳光和观测的路径长度;  $m = \frac{1}{s}$ ,  $s$  是植物

特有的线性尺寸,  $l_v$  是阳光光线和观测光线的路径长度之间的差:

$$l_w = |l_v - l_s| = \sqrt{l_v^2 + l_s^2 - 2l_v l_s \cos \xi} \quad (4)$$

式中  $\cos \xi$  是太阳光线和观测光线的方向变化, 这能从它们的天顶角和方位角得出:

$$\cos \xi = \cos \theta_s \cos \theta_v + \sin \theta_s \sin \theta_v \cos(\varphi_v - \varphi_s) \quad (5)$$

式中  $\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v$  分别是太阳光和观测的天顶角和方位角。

### 3 模型结果

在这个模型中, 冠层的几何结构已经被简化为一组具有矩形截面的立方体, 叶子对光线的截取特性被消光参数描述为 LAI 的函数。观测的热辐射景观被分成 3 个部分, 它们所占的比例依赖冠层的几何结构和太阳-观测的方向。因此, 模型的输入参数被分组为:

(1) 太阳和观测的方向 (天顶角和方位角:  $\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v$ );

(2) 冠层的几何参数: 行距  $L$ ; 植被的高度和它的底部高度  $H$  和  $h$ ; 植被的宽度  $a$ ; 树叶尺寸  $m$ ; 生物量密度 LAI; 以及行向;

(3) 亮地, 暗地, 植被的亮温:  $T_{sb}, T_{so}$  和  $T_v$ 。

表 1 表明在以下模拟时输入的参数的值。

图 2 为采用表 1 的参数值输入计算得到的 DBT 极坐标一等高线图 (a) 及沿不同方向的 4 个剖面图:

表 1 GORT 模型的输入参数值

Table 1 Input parameter values for GORT model

$\theta_s / (^\circ)$	$\varphi_s / (^\circ)$	$T_{sb} / ^\circ\text{C}$	$T_{so} / ^\circ\text{C}$	$T_v / ^\circ\text{C}$	
30	30	45	33	27	
H / m	h / m	a / m	L / m	$m / m^{-1}$	LAI
1.4	0.3	0.6	1.0	5	2.5

太阳主平面 (In-SPP); 垂直太阳主平面 (C-SPP); 沿着垄行方向 (In-RD) 以及垂直垄行方向 (C-RD)。In-RD 是从方位角、天顶角 ( $0^\circ, 90^\circ$ ) 到 ( $180^\circ, 90^\circ$ ); C-RD 是从 ( $90^\circ, 90^\circ$ ) 到 ( $270^\circ, 90^\circ$ )。图 2 (a) 中, DBT 的高值出现在太阳方向的周围并沿垄行方向延长: 我们能看到在垄行方向上出现了一个热条带, 条带中, 在太阳方向上出现了一个热峰值。

DBT 的特征可以用玉米冠层方向分布特征来解释。沿着行向能看到更多的土壤部分, 特别是在太阳的方向上所有的可见土壤都被阳光加热, 这导致了热点的出现。在相反的方向上, DBT 的值迅速地下降。从剖面图上可以看出, 温度在热点和最低点之间的差别达到  $8^\circ\text{C}$  (从  $27^\circ\text{C}$  到  $35^\circ\text{C}$ )。此外, 剖线上还出现了一个拐点, 在太阳天顶角为  $0^\circ$  到  $30^\circ$  之间, 温度变化相对平缓, 我们认为这种情况与冠层的行结构有关。在这种结构下, 当我们沿着太阳的正向观测冠层时, 亮地的绝大部分可被观测到, 观测角度发生一定程度的变化, 观测温度可能产生巨大变化。

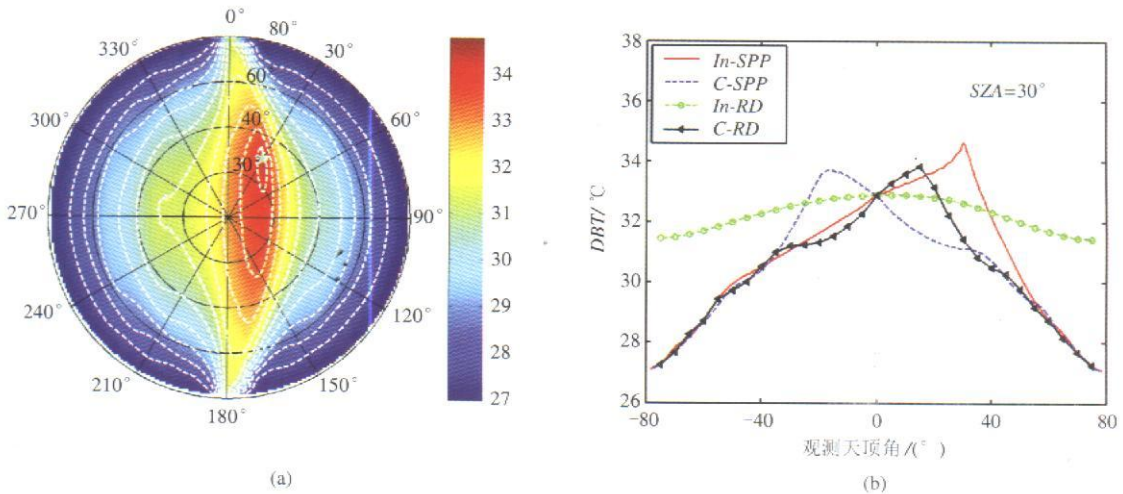


图 2 DBT 极坐标一等高线图 (a), DBT 变化的剖面图 (b)

Fig 2 Four profiles in and crossing solar principal plane: In-SPP (solar principal plane), C-SPP (cross solar principal plane) (a), In-RD (along row direction) and C-RD (cross row direction) (b)

### 4 模型验证与讨论

为了建立垄行结构玉米的 DBT模型,我们把模拟结果与在 1999年测量的 DBT做一比较。试验田位于法国南部的 INRA-Avignon (北纬  $43^{\circ}57'$ , 东经  $4^{\circ}5'$ )。在当地时间 1999年 6月 24日 13点 10分开展测量得到的玉米 DBT分布显示在图 3。图 3(a)是 DBT的极坐标—等高线图,图 3(b)是在主平面上,垂直主平面上,垄行方向,以及垂直垄行方向上的 4个剖面图。在极坐标图上,向北的方向定义为  $0^{\circ}$ 方位角,方位角顺时针上升,那么南,东和西的方位角分别是  $180^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ 和  $270^{\circ}$ 。在图 3(a)中,沿着

行向出现了一个宽的热条带。这个条带的中心部分最宽,两极最窄。太阳的位置在这条带里,并且是条带里最热的部分——它位于太阳位置和方位角  $270^{\circ}$ 之间。然而,在太阳方向上没有出现我们期望的最热的峰值。我们分析,相机的影子可能影响了热点峰值在光线方向上的形成。图形中我们能看到一些与规律不符的区域,这说明曲线表面不像期望的一样光滑。可以认为这种现象是与冠层不同的辐射率和在试验中不能避免的误差有关。另外,在极坐标图形的形成中,插值过程在热带的两个端点产生了误差,这种误差必须在进一步的分析中剔除。

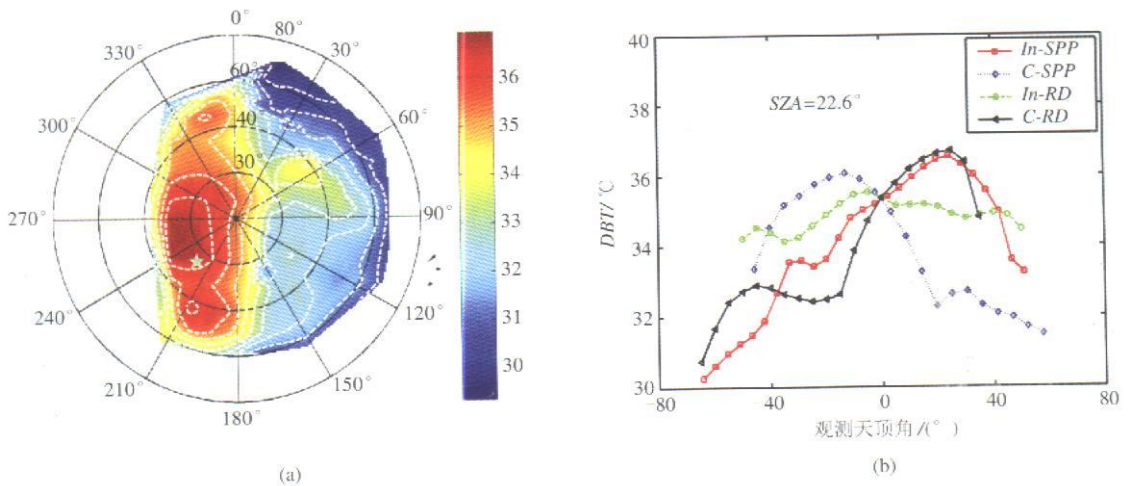


图 3 1999年 6月 24日当地时间 13:10时的 DBT。在这一时刻,太阳的天顶角和方位角分别是  $25.6^{\circ}$ 和  $222.6^{\circ}$  (a)是在整个观测方向上的极坐标图; (b)是四个剖面图

Fig 3 Field DBT at 13h10 of local time on June 24, 1999. At the time solar zenith and azimuth were  $25.6^{\circ}$  and  $222.6^{\circ}$  respectively (a) is a polar map for whole views; (b) shows four profiles in and crossing solar principal plane

模型输入系数的值如表 2。太阳位置 ( $\theta_s, \varphi_s$ ) 可以通过测量时的时间和实验所在的地理位置来计算,冠层亮温 ( $T_{sb}, T_{so}, T_v$ ) 和冠层几何参数

(H, h, a, L)来自于那一时刻的测量。叶面尺度 m 从植被的平均宽度得来,它的值等于植被宽度的  $1/2$  的倒数。

表 2 GORT模型中输入的参数值  
Table 2 Input parameter values for GORT model

$\theta_s / (^{\circ})$	$\varphi_s / (^{\circ})$	$T_{sb} / (^{\circ}C)$	$T_{so} / (^{\circ}C)$	$T_v / (^{\circ}C)$	H/m	h/m	a/m	L/m	$m / m^{-1}$	LAI
25.6	222.5	42.3	30.9	29.2	0.8	0.15	0.46	0.8	5	1.73

图 4显示了在主平面上 (a),在垂直太阳平面上 (b),在垄行方向上 (c),在垂直垄行方向上 (d) 测量数据和模拟结果的剖面图的比较。测量的和模拟的数据保持很好的一致,特别是在曲线的趋势上保持了一致。

图 5表示测得的数据和模拟的数据变化的柱状图。图中大多数变化集中在  $0.5^{\circ}C - 1^{\circ}C$  的范围内,其分布是高斯分布。在玉米 DBT模拟中存在着误差。一方面是由于模型的原因,另一方面也是由于测量数据的误差造成的。

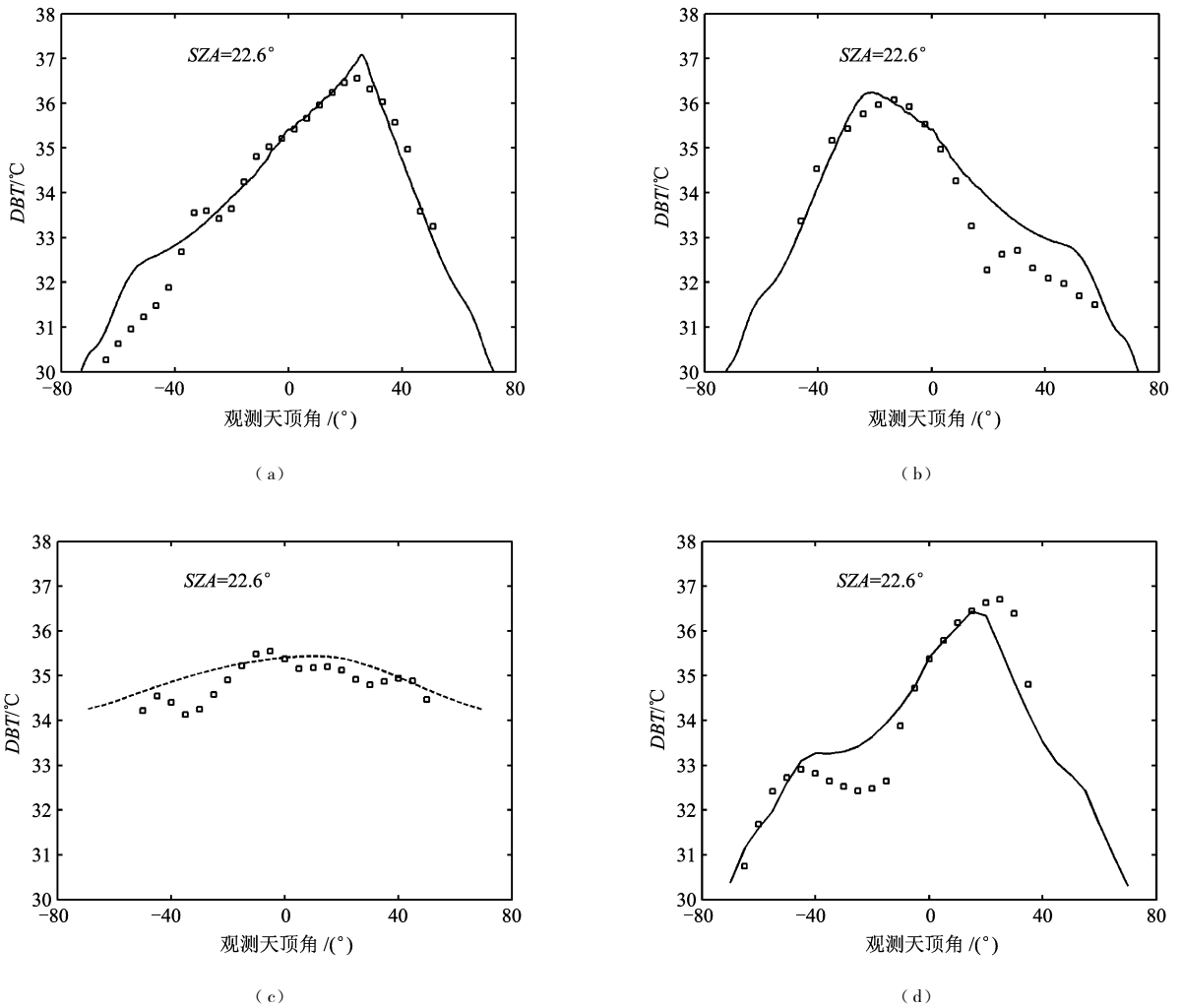


图 4 模型 DBT 剖面图与测量的数据的比较

Fig 4 Comparisons of the modeled DBT profiles with measured data

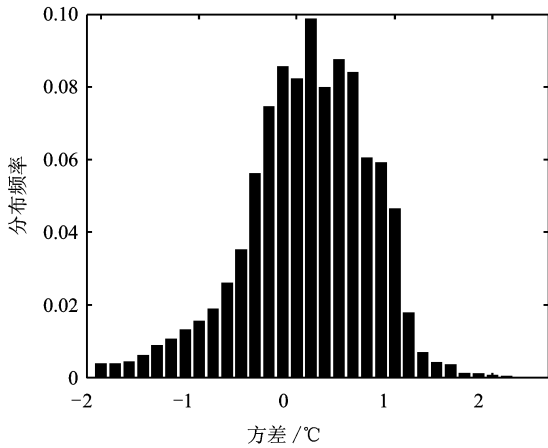


图 5 测量的数据和模拟的数据的不同

Fig 5 The difference between two polar maps for measured and simulated data

### 5 结 论

基于冠层几何结构、光学特性以及温度分布等的一系列的假设, 本文提供了用一个简化的混合几何光学和辐射转化模型 (GORT) 去模拟垄行结构玉米的 DBT。与先前的 GORT 模型相比, 新模型同时考虑垄行结构的影响和热点效应。在极坐标图上, 沿着行向, 热点周围的热带形成了一个核状条带, 这是由于垄行结构的影响。这两个特征可以被在植被之间和植被内的孔隙率以及组分温度的变化来解释。然而, DBT 的最大值的位置很可能不是热点, 这取决于输入参数的变化。更深入的分析表明模型模拟的 DBT 与测量的 DBT 拟合的非常好, 模型抓住了玉米 DBT 的主要特征, 并且清楚的解释了热点和垄行结构影响的联系。有关测量数据和模拟数据

之间的一些轻微不同还在进一步的研究中,对于玉米几何结构和孔隙率更复杂的描述将在以后的研究中展开。

### 参 考 文 献 (References)

- [ 1 ] Jackson R D, Reginato R J, Idso S B. Wheat Canopy Temperature: A Practical Tool for Evaluating Water Requirement [J]. *Water Resour Res* 1977, **13**: 651— 656.
- [ 2 ] Jackson R D, Reginato R J, Pinter P J J et al. Plant Canopy Information Extraction from Composite Scene Reflectance of Row Crops[J]. *Appl Opt* 1979, **18**: 3775— 3782.
- [ 3 ] Seguin B, Itier B. Using Midday Surface Temperature to Estimate Daily Evaporation from Satellite Thermal IR Data [J]. *Int J Remote Sens*, 1983, **4**: 371— 383.
- [ 4 ] Kimes D S. Remote Sensing of Row Crop Structure and Component Temperatures Using Directional Radiometric Temperatures and Inversion Technique [J]. *Remote Sens Environ*, 1983, **13**: 33— 55.
- [ 5 ] Li X W, Strahler A H. Modeling the Gap Probability of a Discontinuous Vegetation Canop [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1988, **26**: 161— 170.
- [ 6 ] Kustas W P. Ground and Aircraft Infrared Observations Over a Partially-vegetated Area [J]. *Int J Remote Sens*, 1990, **11**: 409— 427.
- [ 7 ] Kimes D S. Remote Sensing of Temperature Profiles in Vegetation Canopies Using Multiple View Angle and Inversion Techniques [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1981, **GE-19**: 85— 90.
- [ 8 ] Kuusk A. The Hot Spot Effect of a Uniform Vegetative Cover [J]. *Sov J Remote Sens*, 1985, **3**: 645— 658.