

文章编号: 1007-4619(2006)02-0145-06

# 采用热像仪测量玉米冠层半球方向亮温的 四种方法比较

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>, 梁洪有<sup>1</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 遥感信息科学重点实验室, 北京 100101; 2. 法国农科院, 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:** 为了提高玉米冠层半球方向亮温 (DBT) 测量的准确性, 对一套由工业用起重机平台和热红外成像仪组成的地面观测系统的四种测量方法进行了对比和评价。这些方法基于不同的测量原理: (1) 通过移动起重机和平台, 从不同的角度去测量一个样区的 DBT; (2) 固定起重机和平台的位置, 通过旋转热像仪, 从不同的区域收集不同角度的 DBT; (3) 对方法 2 的改进, 转动热像仪朝向的同时, 吊车沿作物垄行方向运动, 得到大区域内平均的 DBT; (4) 当热像仪沿着垂直于垄行方向的起重机臂运动时, 用高成像频率对目标热辐射进行采样。在对这些方法进行比较时, 着重考虑了玉米冠层亮温分布的时间和空间变化所产生的影响, 对本观测系统的优点和局限性进行了初步探讨。最后, 本文从实际应用的角度, 提出了一个基于这个系统且优化了的 DBT 测量方法。

**关键词:** 玉米冠层; 方向亮温; 田间测量; 基于起重机平台的热像仪观测系统

**中图分类号:** TP701 **文献标识码:** A

## Comparison of Four Measurement Methods for Acquiring Maize Hemispherical Directional Brightness Temperature with a Crane Based Thermal Camera System

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>,  
LIANG Hong-you<sup>1</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 59665, Villeneuve d'Ascq, France;  
4. Department of Mathematics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract** In this study, a recent crane based thermal camera system developed by INRA-Avignon of France is presented, and then four measuring methods for hemispherical directional brightness temperature (DBT) observations are introduced. These methods are based on different measurement principles: (1) view the same surface from different angle by moving the crane and platform to assure the sensor always toward the target; (2) view different part of the field to collect DBT of different angles by means of rotating the camera to different directions instead of moving the camera; (3) view different part of the field by moving the camera along the row direction; and (4) scan the field with a high imaging frequency while the camera moves along the crane bar.

收稿日期: 2004-11-01; 修订日期: 2005-05-12

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。

vertical to the row direction. During the comparison of these methods, special emphasis is on the analysis of temporal and spatial variations of maize canopy brightness temperature distribution, from which the main errors of these methods are analyzed. The study also presents common shortcomings and limitation of the field observations with this system. At last, recommendations for optimal field measurement of hemispherical DBT with the system are given from an application-oriented viewpoint.

**Key words** maize canopy; directional brightness temperature (DBT); field measurement; thermal camera mounted on crane platform

## 1 引 言

野外测量冠层半球方向亮温 (DBT) 的变化, 目前主要采用安装在三脚架或弧形支架上的热辐射计来完成。本文研究一个安装在起重机平台上的热红外成像仪测量自然条件下垄行作物玉米冠层半球 DBT 变化, 比较了基于这个系统的四种测量方法。在比较中, 特别强调了玉米冠层表面的热特性与几何特性随时间和空间的变化, 这对于合理开展地表 DBT 测量, 进一步提高冠层半球 DBT 的测量精度将有很大帮助。

## 2 材料和方法

### 2.1 试验场和测量系统

试验场位于法国南部, 阿尔卑斯山脉北部的阿维尼翁 (北纬  $44^\circ$ , 东经  $5^\circ$ )。观测系统包括一台光谱波段为  $7.25\mu\text{m}-13.25\mu\text{m}$  的广角热像仪, 一台工业用吊车, 一个多角度平台及一套有线控制单元。吊车由工业用起重机改装而成。起重机能够以恒速  $0.45\text{m/s}$  沿着轨道运动, 并且可以停在轨道的任意位置。轨道大约  $110\text{m}$  长, 平行于玉米垄行方向。多角度平台被安装在离地面  $20\text{m}$  高的  $24\text{m}$  长的吊车水平臂上, 它能围绕其转动轴在  $360^\circ$  范围内旋转且能停在任意一个方向上。此外, 这个平台还能让热像仪作  $0^\circ-45^\circ$  倾斜运动。平台的两种转动方式使热像仪镜头的朝向在约  $0.6\pi$  立体角内任意变化。测量中, 热像仪的倾角被固定在一个具有  $0.1^\circ$  精确度的角度电位器记录下来。整个平台能够沿着起重机臂水平运动, 并且也能在垂直方向上运动。整个系统, 包括热像仪、起重机和多角度平台, 所有的操作都通过控制器来实施。通过这个观测系统, 热像仪能够以较高的空间定位精度快速地收集作物的多角度信息。

### 2.2 对玉米冠层半球 DBT 观测的 4 种测量方法

相对于植被冠层半球 DBT 的传统测量, 这套观测系统给我们提供了更多的选择。为了得到最佳测量方式, 我们选择 4 种方法进行比较:

(1) 通过移动起重机和平台, 从不同的角度测量相同的目标区域, 以确保热红外辐射来自相同的样区;

(2) 通过旋转热像仪到不同的方向而不是移动其位置, 观测处于不同方向样区的热红外辐射来收集不同角度的 DBT;

(3) 对第 2 种方法的改进, 转动热像仪的同时沿着垄行方向移动吊车的位置以获得不同角度的 DBT;

(4) 热像仪沿着垂直于行向的起重机臂运动, 同时用高成像频率扫描目标, 由多幅图像中提取 DBT 信息。

第一种方法与用测角计和三角架来测量的方法相似, 不同之处在于测量之前将一个铝制框架放置在作物冠层中, 其大小为  $1.6\text{m} \times 1.6\text{m}$ , 是作物行距的两倍, 它的边缘平行或垂直玉米垄行方向。由于铝架的发射率 ( $0.04$ ) 很低, 所以总是能从热红外图像作物背景中清晰地分辨出来。观测时, 热像仪沿吊车横臂运动并始终朝向铝制框架。通过移动吊车到不同的位置, 可以获得多组观测数据, 形成冠层观测的多角度网格。这种方法的优点是, 样本区域不变, 它的大小和位置被一个铝制框架所固定, 因此半球 DBT 只是来自于同样的地区。然而, 这种方法的缺点是, 为了提供更多的方向观测冠层的数据而使得测量时间过长。整个测量持续大约  $30\text{min}$  甚至更长。而且, 如果热像仪的高度不变, 垂直于行向观测的天顶角最大只能是  $\pm 30^\circ$ , 这个范围对于半球 DBT 测量来说是不够的。

第二种方法中热像仪观测的区域是整块农田。在半球 DBT 的测量时, 热像仪首先垂直向下观测。扫描几秒钟以后, 镜头向南倾斜  $45^\circ$ 。测量几秒钟

之后,平台绕着中心轴顺序朝西南、西、西北、北,东北、东、东南等多个方向,得到 DBT 多角度范围。最后,图像覆盖了天顶角  $0^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ,方位角  $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$  的范围,形成了一个  $1.5\pi$  立体角的半球 DBT 观测。由于起重机轨道的影响,向东观测图像的观测天顶角的范围较其他方向窄。用这种方法,整个测量最少需要 5m in。特别需注意的是, DBT 的变化来自目标的不均匀性和目标的方向特性。对于这种方法,本文做的一个假设是作物的任何部分同其他的部分有同样的几何结构和亮温分布,或者差别非常小,在 DBT 的测量中可以忽略不计。其实自然条件下这种情况是很少见的,需要在实验中加以评价。

第三种方法是对第二种方法的修正。两种方法惟一的区别是,为了获得半球 DBT,热像仪倾斜到不同的角度时,起重机是否在移动。测量开始时起重机在轨道的北端,并且热像仪向南倾斜  $45^{\circ}$ 。随着起重机在南北方向上来回移动,热像仪镜头转而向北、西、东等不同方向,最后再向下作垂直观测。Lagourade 基于航空平台研究大片松林的 DBT 中已经采用过类似方法<sup>[1]</sup>,与他所证实的一样,这种方法的优点是热像仪能够以相同的观测角度扫描目标的不同部分,并且这种对目标不同位置测量的方法所获得的 DBT 自然对目标产生了一个空间平均,可以有效地减小由于作物空间不均匀性带来的影响。然而,这种方法最少需要 12m in(热像仪顺序朝向 5 个不同方向),而且吊车的移动会使图像有一定的抖动。

上述三种方法都依赖提高热像仪的高度来减小观测中视场角效应的影响。第四种方法在理论上能使热像仪在任何高度完成观测。采用这种测量方法,起重机臂垂直于南北走向的垄行方向,热像仪镜头垂直向下,平台沿着起重机臂东西方向移动。观测时,热像仪以一个非常高的成像频率,随着平台的移动获得一系列的图像。如果像元数字足够大,可以认为不同图像代表同一方向的像元包括了在这个观测方向上所能遇到的所有的情况。对这些像元的数值取平均,可以被认为得到了目标在这一角度的 DBT。第四种方法只与像元特征有关,由于每个像元的瞬时视场角 (IFOV) 非常小,所以这种方法具有非常高的角度观测精确度。然而,这种方法的一个局限是数据量非常大。由于高成像频率以及为了得到理想值而进行的长时间扫描,造成影像的数目达到了几百幅。而且,如果平台的高度很低的话,此装置所引起的阴影的影响将变得非常严重。为了在单

向观测中覆盖尽量大的角度范围,热像仪的高度必须降低。这种方法的测量时间需要 8m in 左右。

### 2.3 测量玉米半球 DBT 中引起误差的原因

在实地测量作物冠层半球 DBT 中,引起误差的因素包含在数据获取和数据处理中。根据顾行发等人的研究<sup>[2]</sup>,多角度测量的精确性依赖传感器的特征、目标角度特征、环境条件、测量方法以及为了提取目标角度变化而做的数据处理过程。这些因素可以分为实验装置和目标状况两个部分。

从试验装置的角度来看,定位能力、辐射测量精确度和传感器技术参数是三个主要的指标。定位准确依赖设备的机械系统和光学系统,这些系统决定了测量过程的可重复性和稳定性。辐射测量精度是通过一些光电指标来表征的,它详细说明了用一个热红外成像系统精确地、稳定地获得目标温度差异的能力。遥感器技术参数包括许多因素,例如图像更新率,调制转换函数 (MTF) 及像元 IFOV 等,这些因素代表遥感器获取数据的能力,并且在实地测量中起着重要的作用。

对目标状况而言,目标的表面特征和环境因素是两个主要方面。目标表面特征指的是植被冠层几何结构对热辐射分布的影响。作为作物 DBT 的代表,样本热辐射的方向特性必须与目标的热辐射方向特性相同,并且样本几何结构也能通过复制形成整个目标。这就要求对非均匀目标样本区域的选择进行权衡。通常情况下,依赖本身和环境的能量交换,目标位于近似的热平衡状态。任何一个环境改变都可能影响目标热辐射分布的状况,例如太阳位置、大气辐射、风场变化及土壤水分变化等。

设计研究方法时,改变样本区域的大小,使之从一个像元到几米之间变化,用于得到样本亮温随样本尺寸的变化曲线,从而分析作物的垄行结构对采样尺度的影响。从热红外图像中提取样本区域的 DBT 采用 Plank 方程的反函数来计算。假设样本区域有  $N$  个像元,对于宽波段 (例如  $8 \sim 14 \mu\text{m}$ ) 的热红外辐射,当把波段放宽到全波段时,到达传感器方向的热辐射可以表示为:

$$T_b^d(\theta, \varphi) \approx \frac{\sum_{k=1}^N T_k^d}{N} \quad (1)$$

为了评价由于整个试验区作物生长状态和环境空间的差异所导致的 DBT 测量中的误差,本文设计了一个评价指标,其数值等于同时得到的垂直样区

与 30°倾角样区 DBT 的差。

### 3 结果和讨论

#### 3.1 作物亮温分布的时间和空间变化

图 1 为作物冠层亮温随样本尺寸和观测角度的变化。图中的 3 个角度 0°, 15°和 45°是观测的天顶角观测方位为垂直垄向, 观测方位为垂直垄向; 而样本大小则从一个像元逐步放大到几米。在图 1 中, 有相同观测角的两条连接线代表了从不同起始位置开始提取出来的亮温, 一个是在温度比较高的热土上开始, 另一个是在温度比较低的植被行上开始。两个测量的时间间隔小于 10 s。

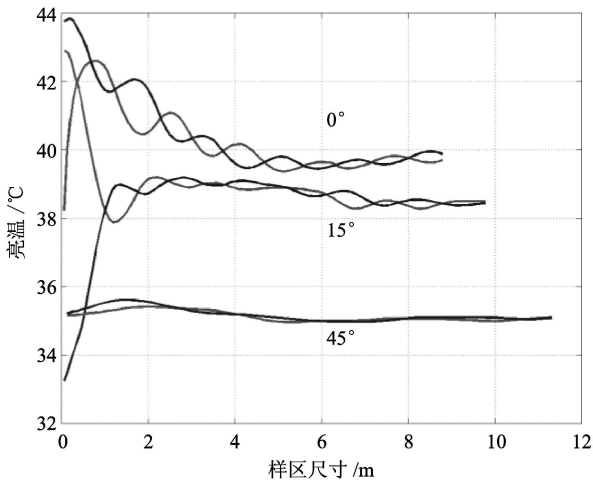


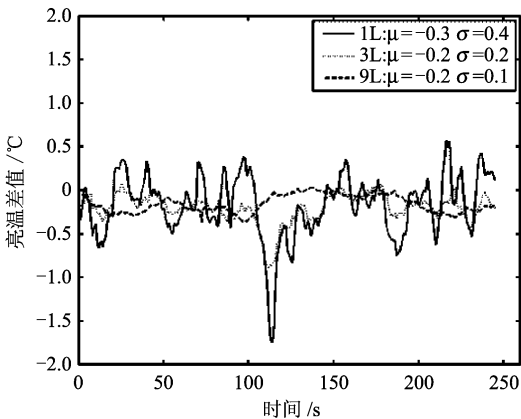
图 1 当地时间 1999-06-16 11: 59— 12: 03 样本 DBT 随样本尺寸和观测角度的变化

Fig 1 Sample DBT varies with sample size and view angle at 11: 59 to 12: 03 of local time on June 16, 1999

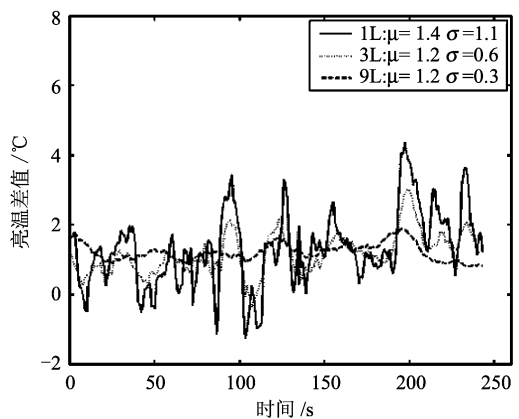
在垂直观测和以 15°小倾角观测的情况下, 曲线形状的波动较大, 变化形式由样本中心的位置决定。当样本中心点在热土上时, 温度线将从一个高值开始; 当样本的中心点在温度较低的冠层时, 曲线将以一个低值开始。随着样本区域的扩大, 冠层更多的部分进入观测范围, 这使得样本亮温产生周期性的波动, 并使变化幅度逐渐降低。从分析中可以得到, 小样本的亮温值变化比大样本的亮温值变化大。当样本大小足够大以至能覆盖几个土壤和植被行时, 样本的增大不能明显的改变温度分布, 减小了波动的振幅。另外, 亮温曲线的变化也由观测角度所决定。随着观测天顶角的加大, 玉米叶子遮挡了更多的土壤, 这使得观测目标的温度分布变得均匀起来, 从而导致温度波动变得很小。

从图 1 中可以发现, 当样本包含了几个作物行时, 测得的 DBT 值趋于稳定。这一特点对于小倾角和垂直方向的观测非常重要。然而, 在垂直观测中, 样本的扩大导致 DBT 值明显下降, 这主要是由于视场角效应造成的<sup>[3]</sup>, 即较大视场角的观测导致视场中作物比例被高估, 一般情况下作物的温度较低, 从而导致观测温度的降低。

图 2 给出了农田空间不均匀性对测量的影响。图中横轴表示起重机沿轨道移动的时间累计, 纵轴为在不同位置, 两个不同角度观测样本的温度差 ( $T_{0^\circ} - T_{30^\circ}$ ), 即天顶角是垂直向下的 0°和向西方向 30°的两个观测的数值差。从图 2 的测量结果可以看出, 样本区域的大小影响温度变化的范围。样本的增大能够有效地平滑观测目标的空间不均匀性。例如, 当样本区域只包括一个植被行时 (图 2(b)), 温度变化的统计方差达到了 1.1°C。通过扩大样本尺寸, 差值变为



(a)



(b)

图 2 随轨道位置的不同, 亮温的差值的变化 Fig 2 The differences of brightness temperature versus the position along the rails

0.6℃和 0.3℃,顾行发也报道过这种现象<sup>[2]</sup>。

图 3 为垂直观测时农田亮温随时间的变化。测量日期分别是 7 月 20 日 9:43 和 15:01。测量中,风

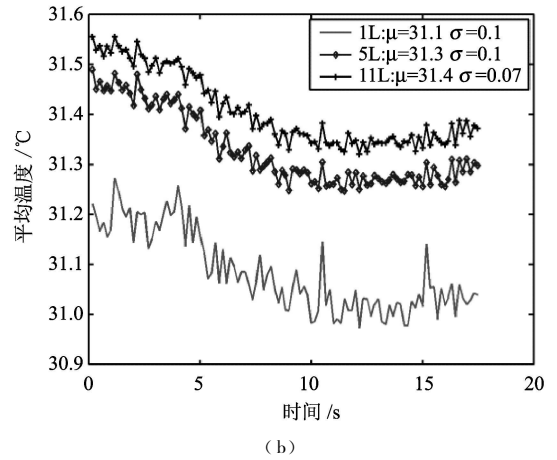
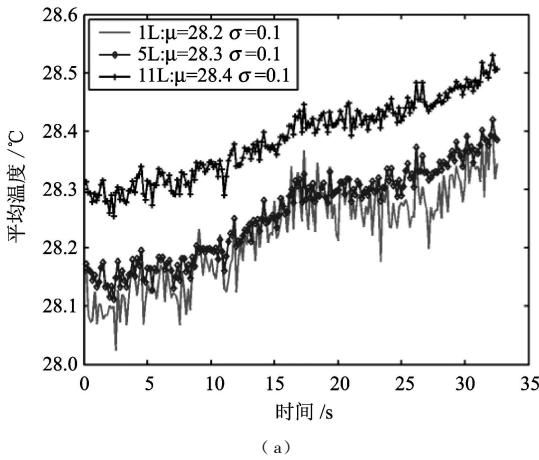


图 3 与时间相对的不同样本大小的亮温

(a)和 (b)分别是在当地时间 7 月 20 日的 9:42 和 15:01 测量的结果

Fig 3 Brightness temperature for different sizes of sample area versus time

(a) and (b) were of the measurements at local time 9:43 and 15:01 on July 20

从图 3 中可以看出,不同的样本大小有相似的趋势,但数值波动的幅度有所变化。随着样本区域的扩大,高频波动的振幅会减小。建立图中每条曲线的廓线,发现当样本尺寸从 1L 变到 5L 亮温值抖动振幅的变化要比样本从 5L 变到 11L 的要大。如果样本尺寸降到一个像素大小即 0.08m 时,在垂直观测中,一分钟以内能观察到的最大震动范围是 3℃。根据 Lagouarde 关于森林短时波动的研究<sup>[1]</sup>,一个像素的亮温在几秒钟之内的变化可以达到几摄氏度。扩大样本区域能够极大地减少短时振动,持续几分钟的长时间的测量也能达到同样的效果。

图 4 表明在一段较长时间内,样本亮温会随时间有所变化,图中样区亮温值为每 20s 得到一组数据的平均值,样本大小为 (1.6m × 1.6m)。604, 726, 805 分别是在当地时间 6 月 4 日 14 点 54 分, 7 月 26 日 13 点 47 分, 8 月 5 日 11 点 14 分开始观测到的。三次观测的温度在 10min 内大约变化了 3℃。本文把这种变化和环境的变化,如太阳辐射、风速、热度变化等联系起来考虑。由太阳位置引起的冠层亮温的变化会使较长观测周期的观测产生误差。在 10min 内,太阳方位角变化将近 8°,天顶角变化将近 3°;风力的影响也不可忽视,在大的阵风条件下,测量到的最大变化是 7℃。因此,半球 DBT 的测量最好只在微风、晴朗的时候开展,而且要尽量缩短测量时间。

速较低,均值分别为 0.9m/s 和 1.3m/s 植被温度比土壤温度高。由于随着样本区域的扩大,植被所占面积的权重增加,导致样区温度的上升。

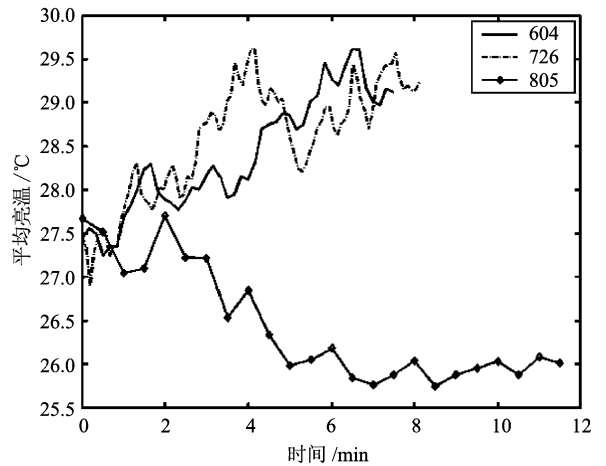


图 4 作物冠层亮温随时间的缓慢变化

Fig 4 Field brightness temperature varies with time

### 3.2 四种测量方法的误差

基于以上对垄行结构作物冠层亮温分布时空变化的分析,下面讨论 4 种观测方案。表 1 中列出了这 4 种方法的测量特性。对垄行作物半球 DBT 的测量,第 1 种方法所需时间最长,第 2 种方法需要的时间最短。而对于样区尺寸的要求,前 3 种方法须将样本设定为行距的整倍数。垂直观测时,一般采用包含 2 行或 3 行作物,相应的 IFOV 分别是 5° 和 7°。对于数据量,第四种方法的数据量最大,达到了

表 1 4种测量方法特性的比较

Table 1 Comparison of 4 measurement method properties

方法	1	2	3	4
周期 /min	30	5	12	10
样区大小	2行	>3行	>3行	<1cm
样区 FOV/(°)	5	7	7	0.22
数据量 /Mb	150	70	100	400
传感器阴影大小 /m	0.7	0.7	0.7	0.7

400MB。而第 2 和第 3 种方法的数据量较小。在测量中,阴影大小对 DBT 的测量以及热点的获得起着非常重要的作用。本观测系统的阴影大小约 0.7m,第四种方法不适合对 DBT 和热点的测量,这是由于传感器的高度太低,如此大的阴影不仅遮蔽了热点处的阳光,而且使测量区域中很大一部分的温度发生了变化。对于第一种具有 1.6m×1.6m 稳定的样本尺寸的测量方法来说,0.7m 的阴影通过降低样本亮温值干扰了热点的形成。对于第 2 种和第 3 种方法来说,当以倾斜角度观测时,在 FOV 不变的情况下,样本面积变大,降低了传感器阴影对热点的形成的影响,但这种偏差依然不能避免。

在第 1 种和第 4 种方法中,农田温度空间分布的不均匀性没有或者仅有很小的影响,而对于第 2 种和第 3 种方法来说却有很大的影响。对于这种影响,只有通过扩大样区的大小来加以抑制,而不能完全剔除。第 3 种方法通过沿着轨道移动热像仪能够平均掉温度空间分布的不均匀性。若不考虑这种方法测量时间较第 2 种方法为长,则可能是获得半球 DBT 的最佳方法。

表 2 记录了在 1999-07-26 早晨 DBT 随时间的变化。样本包括了 2 个植被行。从表 2 中可以看出,短期内温度变化的趋势是很难定量描述的,短时间的温度波动跟时间没有一个稳定的关系。这反映了环境影响的本质。第一个测量方法需要 30min 是其他的测量方法所需时间的 2 倍多。尽管改变量是 2.3°C,与 8min 的改变量相比不大,但是这种变化包含了由于太阳位置的变化所引起的改变,而这种温度空间重新分布所引起的误差在数据处理中却不能被订正。对于第 4 种方法,样本区域是一个像元,变化可能比在图表中所示的值大很多,数据的校正变得更加复杂。从这个角度看,第 2 种方法和第

表 2 空间和时间对测量的影响

Table 2 Spatial and temporal influence on the measurement

周期 /min	8	10	14	30
样区温度变化 /°C	2.5	2	2	2.3

3 种方法更加适合测量半球 DBT。

## 4 结 论

为了在野外实验中获得垄行结构冠层的半球 DBT,本文比较了一个由 TIR 热像仪和起重机所组成的观测系统的 4 种测量方法。在测量方法的比较中,除了讨论装置的限制外,还探讨了垄行作物亮温空间分布随时间和空间的变化。分析表明:亮温场随时间的波动是由于环境的影响造成的。在几秒钟内,这种波动可以达到几度。目标温度空间不均匀性是由于作物生长不均匀性和环境因素引起的。通过建立一个温度差指标,定量比较了由于温度场不均匀性造成的 DBT 测量误差。实验表明,这种误差能够通过扩大样本面积或者多次测量平均等办法来降低。此外,本研究也提出了这种系统的一般缺点和用这种系统实地观测的局限性,例如热点观测的能力较弱和对田间环境变化的敏感性。最后从应用的角度出发,给出了使用这个系统测量半球 DBT 的最佳测量方法。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Lagouarde J. P., Moreau D. S., Guyon P. D. Analyse de l'Ergodicité de la Température de Surface sur des Couverts Forestiers à Diverses Résolutions Spatiales [A]. Guyot G., Phulpin T. In Proc. 7th Symp. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing Balkema A. A., Rotterdam, 1997.
- [2] Gu X. F., Verbeughe G. G. M. Evaluation of Measurement Errors in Ground Surface Reflectance for Satellite Calibration [J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(14): 2531-2546.
- [3] 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): 444-450 [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初步分析 [J]. 遥感学报, 2004, 8(5): 444-450.]