

文章编号:1001-8166(2009)07-0784-09

田块尺度作物辐射温度获取方法对比研究^{*}

康国婷, 阎广建^{*}, 任华忠, 王颢星, 钱永刚

(北京师范大学遥感科学国家重点实验室, 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要:热像仪的优势在于可以获得组分辐射温度,常用于地面温度同步测量实验中,其数据与植被覆盖度联合还可以得到作物田块尺度的平均辐射温度。以黑河流域进行的星—机—地遥感综合观测试验加密观测——盈科绿洲玉米地的热像仪和手持式红外辐射计温度测量数据为基础对不同采样方式获得的地面辐射温度进行对比。对于热像仪数据:①采用阈值法对热像仪影像中的玉米和土壤背景两组分进行分离,获得了各自辐射温度的平均值;②利用LAB彩色变换法处理同步拍摄的真彩色照片,获得每块玉米样地的植被覆盖度;③最终结合组分温度和植被覆盖度求得地块平均的辐射温度。经过实验对比发现,由热红外图像计算获得的地面平均辐射温度与手持式红外辐射计垂直垄或顺垄条带采样获得的地面平均辐射温度差值较小,基本在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内,而3种测量方式的最大值、最小值相差较多。还模拟了几种常见尺度下利用手持式红外辐射计进行随机采样时,其采样平均值以不同的置信度处于真实温度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 之间所对应的采样次数。分析表明,基于点测量的采样方案难以仅利用1~2台手持式红外辐射计实现对田块或更大尺度平均辐射温度的准确测量,高时空采样频率是保障地面辐射温度测量精度的前提,与遥感像元尺度相匹配的地面真实性检验需要进行测量方法和设备的革新。

关键词:田块尺度;辐射温度;热像仪;手持式辐射计;采样方式

中图分类号:P423.3;P407.6 **文献标志码:**A

1 引言

地球表面温度是一个重要的水文、气象参数,它是地—气系统研究能量平衡的一个关键因子,影响着大气、海、陆之间的感热和潜热交换,是诸多研究领域不可或缺的基础资料。除了太阳辐照度之外,地—气界面所有通量都可以参数化为温度的一个函数,精确的陆面温度资料将推动旱灾预报和作物缺水研究、农作物产量估算、数值天气预报、全球气候变化和全球碳平衡等领域研究的进展^[1-3],对工农业生产和进行科学研究具有重要的指导意义。

常规气象观测采用温度表来测量地表温度,其安放往往会在一定程度上破坏地面的自然状态,从而给地面温度的测定结果带来误差。同时,更重要的问题是气象站点数量有限,所测的结果只能代表观测点的局部温度,难以外延到更大区域。卫星遥感可以快速获取陆面温度大范围空间分布信息^[4],因此利用卫星数据反演地表温度受到了广泛关注,也取得了很多成果。然而,在遥感像元尺度反演的温度/组分温度的真实性检验历来是遥感界面临的难题之一,其中最主要的原因在于温度本身的高度时空异质性所导致测量的不确定性。即使是相对均一的农作物,由于地面

^{*} 收稿日期:2009-02-04;修回日期:2009-06-05.

^{*} 基金项目:国家自然科学基金项目“复杂地形区热红外方向性辐射建模及组分温度反演”(编号:40871164);国家重点基础研究发展计划项目“地表时空变化特征参数的遥感定量描述与尺度转换”(编号:2007CB714402);中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(编号:KZCX2-XB2-09)资助。

作者简介:康国婷(1984-),女,吉林吉林市人,硕士研究生,主要从事热红外高光谱遥感反演地表温度研究. E-mail:ting_92@163.com

^{*} 通讯作者:阎广建(1972-),男,山西应县人,教授,主要从事多角度遥感、热红外遥感建模及反演以及尺度转换等方面研究。

E-mail:gyjan@bnu.edu.cn

测量仪器的视场局限,田块尺度的温度测量结果也带有一定的不确定性,采用何种测量方案依然是尚在论证中的问题。

2008年5~7月在黑河流域进行了一次星—机—地遥感综合观测试验,像元尺度的地面温度是重点观测参数之一。本文采用加密观测区——盈科绿洲玉米地的热像仪和手持式红外辐射计温度测量数据,对两种仪器不同测量方式所获取的辐射温度进行



对比,并分析其不确定性。

2 实验概况

2.1 实验地点

本文所用数据均来自黑河综合遥感联合中游试验的重点实验区——盈科绿洲玉米地,样区平均海拔高度为1524 m,地表类型为制种玉米,如图1所示。



图1 盈科绿洲玉米生长初期(a)与末期(b)的地表概况

Fig.1 Land surface around the weather station in Yingke oasis

2.2 仪器设备与数据获取

本文采用的仪器包括Therma CAM SC2000热像仪和Raytek MX系列手持式红外辐射计。Therma CAM SC2000红外热像仪是第二代高性能、非制冷长波焦平面成像系统。图像的像元数为 320×240 。其优点在于可以获得同一时刻的温度场分布,因此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、手持式红外辐射计等同类仪器在空间和时间上观测不同步及破坏热平衡等问题^[5]。Raytek MX系列的手持式红外辐射计具有60:1的高光学分辨率,能从更远的距离测量,或者测量更小的物体。二者基本参数比较见表1。

本文利用热像仪在飞行同步的20~30 min内每隔1~2 min对玉米样地进行均匀采样。与此同时,还利用手持式红外辐射计采用垂直垄方向或顺垄方向进行连续测量,以得到田块辐射温度的平均值、最大值和最小值。这3种测量方式是较为典型的地面辐射温度的同步测量方案,在之前的各种遥感试验中被广泛采用。

采用的数据源为2008年5月28日、5月30日、6月1日、6月29日及7月7日5天两种测温仪器的观测数据。其中5月28日、5月30日及6月1日的玉米处于生长初期,植株矮小,行结构明显;而6月29日、7月7日接近玉米生长末期,玉米基本封垄。热像仪所选的采样点均匀分布在4块玉米地中,距离冠层的拍摄高度在5月28日及6月1日约为1.20 m,5月30日约为1.10 m,6月29日为0.40 m,7月7日为0.5 m,且均为垂直向下拍摄;手持式红外辐射计选用两种采样方式的数据,前3天及7月7日采用垂直垄的条带采样方式,而6月29日采用顺垄的条带采样方式。同时,在上述观测日期当天或者近期一两天内均有植被覆盖度的观测数据。

表1 热像仪与手持式红外辐射计主要参数

Table 1 Main parameters of thermal camera and hand-held thermal radiometer

	热像仪	手持式红外辐射计
仪器型号	ThermaCAM SC2000	Raytek MX 系列
视场角或分辨率	$18^\circ \times 24^\circ$	1°
波长范围(μm)	7.5~13	8~14
灵敏度($^\circ\text{C}$)	± 0.08	± 0.1
响应时间(s)	0.017~0.02	0.25 (95%)

3 数据处理及分析

3.1 热像仪数据处理

3.1.1 组分温度提取方法

在研究农作物热辐射方向特性中, Francois 等^[6]将目标分为土壤与植被两个类别。本次实验采用的样区是盈科灌区的4块玉米地,也将热红外图像分为玉米植株和背景土壤两组分进行提取。提取方法分为以下两种:

(1) 手动提取法:利用热像仪配套软件 ThermaCAM Researcher 2001,在热红外图像上直接提取,即参考光学相片手工勾勒出玉米植株“包络线”(图2)。提取玉米组分时,尽量避免受土壤影响较大的叶片;除玉米外的其余部分均默认为背景土壤。植被的结构在热红外图像上表现得比较明显,同时热像仪对温度的探测精度高,因此可以在图上只选择典型区域分别代表玉米和土壤,然后记录每张图像各组分的最大值、最小值及平均辐射温度。

(2) 阈值提取法:阈值法分为两步完成,第一步确定每张图像的玉米及背景温度的最大值及最小值。利用 ThermaCAM Researcher 2001 中提取的相应组分的温度最大值和最小值来确定组分温度的初值,然后用自行编写的图像温度提取程序查看效果,最后进行局部温度调整,以实现温度的全面提取,图3(a)所示红色部分为提取的玉米组分,图3(b)淡红色为提取的背景土壤。第二步根据最值提取各图像组分温度并计算相应组分的平均值。

最后,根据热像仪黑体定标公式: $y = 1.0061x - 0.353, R^2 = 0.9999$ (来源于实验室定标)对热像仪进行辐射定标并计算各组分定标后的真实辐射温度值。

3.1.2 田块平均辐射温度计算

利用热像仪得到玉米和背景的平均组分温度后,计算田块平均辐射温度还需要知道植被覆盖度这一参数。植被覆盖度是指植被(包括叶、茎、枝)在单位面积内植被的垂直投影面积所占总面积的百分比^[7-10],即从目标地域上方垂直向下观测到的植被覆盖面积与观测区域总面积的比率。

本文首先求算各样地的平均植被覆盖度。即利用数码相机从目标地域上方获取植物冠层照片,结合布设的标志物与影像分类技术提取照片视场范围的总面积与植被面积,并最终分别获得样区中4块玉米地的植被覆盖度。其具体过程可分为野外拍照和计算机数字图像处理(真彩色照片进行LAB彩色空间变换)两部分。

(1) 野外拍照。在野外拍照时,我们选用3 m长度的吊杆将相机悬挂在观测区域上方,利用重力使相机保持垂直向下的拍摄角度,拍摄同一玉米样地内不同地点的多张冠层照片,并在照片范围内放置长度已知物体作为拍摄范围参照,用于估算照片覆盖的面积。

(2) 计算机数字图像处理。由于观测区域植被都为绿色的情况,因此可以利用数字图像处理技术中基于颜色的分类方法与人机交互将绿色植被划分出来,计算照片中绿色部分占统计区域的比例,并认为该比例即是照片的植被覆盖度。最后把同一样地内在同一时间段拍摄的所有照片植被覆盖度平均值作为该样地的植被覆盖度。利用同样的方法获得了4块样地不同观测日期的植被覆盖度数据。

获取植被覆盖度和经过辐射定标后的玉米植株与背景土壤的组分温度后,便可利用覆盖率与相应组分温度的加权平均获得基于单张热红外图像的地面平均辐射温度,公式如下:

$$T_{ave} = \rho_v \cdot T_v + (1 - \rho_v) \cdot T_s \quad (1)$$

其中, T_{ave} 为地面平均辐射温度, ρ_v 为植被覆盖率, T_v 与 T_s 分别为玉米植株与背景土壤平均辐射温度。

3.2 手持式红外辐射计数据处理

手持式红外辐射计数据的处理根据采样方式可分为两种:

(1) 当采用垂直垄条带采样方式时,只需利用定标参数计算出定标后的辐射温度值,再计算田块平均辐射温度值即可。

(2) 当选用顺垄条带采样方式时,引入垄宽与垄间距比例的权重来计算田块平均辐射温度,公式如下:

$$T_{ave} = \gamma_v \cdot T_v + \gamma_s \cdot T_s \quad (2)$$

其中: γ_v 为垄宽占一个周期的百分比, γ_s 为垄间距占一个周期的百分比,其他符号含义与式(1)相同。

需要指出的是,式(1)与(2)均是利用植被与土壤的平均辐射温度的加权和来求取田块的平均辐射温度,而不是来自于对组分辐射能量的加权和。主要是由于手持式辐射计的测量原理就是对每一次测量的辐射温度进行简单的算术平均得到整个地块的辐射温度,这和遥感传感器一个像元范围内是亚像元的能量积分的概念不同。其次,在于野外测量时难以获得植被和土壤二者的真实比辐射率,且手持式红外辐射计测量视场内常常难以保证完全的“纯像元”,特别是当采用垂直垄条带的方式时,测量值是植被或土壤二者共同的辐射贡献,此时难以从数据中分离出植被与土壤的成分。所以本文采用公式

(1)、(2)进行两种方法在田块尺度的对比验证。

然而,从热像仪的像元到手持式辐射计的视场尺度是一个典型的能量积分,采用上面的方法就存在可能的尺度问题。为了探讨本文采用的式(1)在辐射计视场尺度简单求和对计算结果可能带来潜在的误差,我们模拟对比了辐射能量加权法得到的结果与这种简单求和得到结果的差异。忽略多次散射的影响,辐射能量加权法可以表示为:

$$T_1 = [\rho_v \varepsilon_v T_{v0}^4 + (1 - \rho_v) \varepsilon_s T_{s0}^4]^{0.25} \quad (3)$$

式中: ε_v 和 ε_s 分别为玉米与背景土壤比辐射率, T_{v0} 和 T_{s0} 分别为植被与土壤的真实物理温度。

将比辐射率和真实物理温度代入公式(1),可以得到:

$$T_2 = \rho_v \cdot \varepsilon_v^{0.25} \cdot T_{v0} + (1 - \rho_v) \cdot \varepsilon_s^{0.25} \cdot T_{s0} \quad (4)$$

在计算机模拟过程中,统计样本为 136 个,即一个手持式辐射计视场内约包含 136 个热像仪像元,在计算机模拟过程中,取经验值 $\varepsilon_v = 0.985$, $\varepsilon_s =$

0.95,并假设 T_{v0} 与 T_{s0} 在统计样本空间内围绕各自平均值呈正态分布, T_{v0} 与 T_{s0} 的采样个数分别为样本总量与 $\rho_v \cdot (1 - \rho_v)$ 乘积,且平均温度 $\overline{T_{s0}} > \overline{T_{v0}}$ 。图 4 为 $\overline{T_{v0}} = 310 \text{ K}$, $\overline{T_{s0}} - \overline{T_{v0}}$ 以 0.5°C 为间隔递增,且介于 $[0.5, 15]$ 之间,当 ρ_v 在以 0.1 间隔从 0.1 到 0.9 递增过程中,式(3)与(4)中 $|T_1 - T_2|$ 的变化情况。从图中可以发现,在模拟情况下,手持式辐射计视场内的尺度问题很小,由于式(3)和(4)采用的两种计算方式不同而导致的 $|T_1 - T_2|$ 是很小的(图中的差异最大值为 0.32 K),并且对植被覆盖度的大小不敏感。进一步试验表明, ε_v 、 ε_s 和 T_{v0} 的典型变化具有相似的结果。因此可以认为,本文在对比田块尺度两种方法的测量结果时,忽略手持式辐射计尺度上的尺度效应,采用式(1)直接对热像仪获取的像元辐射温度进行加权和取代辐射能量的加权和所带来的误差是可以忽略的,同时,这种做法还有效地回避了对植被与土壤真实比辐射率的需求。

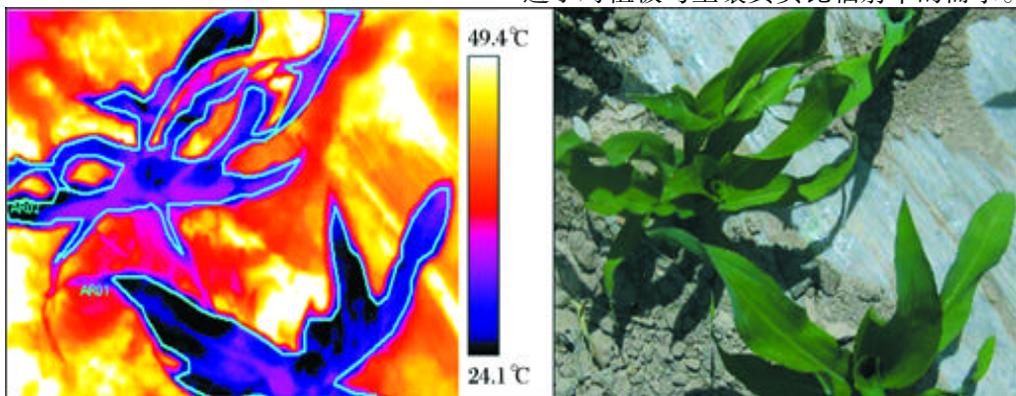


图 2 手动提取玉米组分

Fig. 2 Manually extracted maize component



图 3 阈值法提取的玉米组分 (a) 和 阈值提取背景组分 (b)

Fig. 3 Maize component (a) and background component extracted by the threshold method

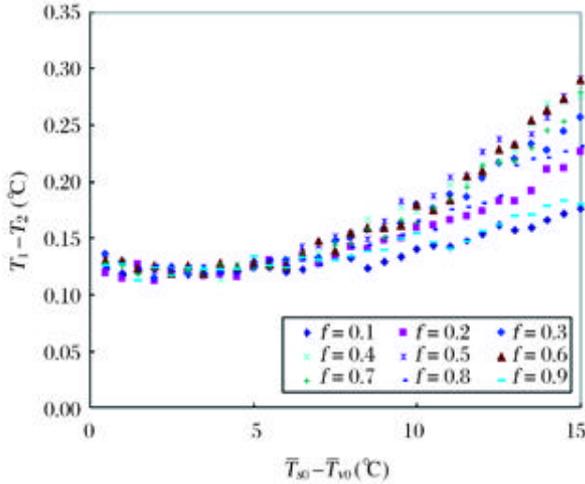


图 4 手持式辐射计尺度 T_1 与 T_2 差值

Fig.4 The differences between T_1 and T_2 at the scale of hand-held radiometer

3.3 结果分析

比较利用植被覆盖度与热红外图像计算而得的田块平均辐射温度与手持式红外辐射计的相应数值,可以发现,二者温差最大为 0.73,最小为 0.32,它们在 5 天的地面平均辐射温度值对比结果如表 2 所示。

由于植被覆盖度数据未能完全与温度测量日期匹配,本文在处理数据过程中进行了如下处理:5 月 28 日、5 月 30 日与 6 月 1 日玉米仍处于生长初期,植株生长缓慢,植被覆盖度变化微小,为了减少结果对比的不确定性,这 3 天均选用了 5 月 28 日的植被覆盖度进行田块平均辐射温度的计算,而 6 月 29 日是玉米生长末期,则选用与之日期最接近的 6 月 27 日植被覆盖度数据;7 月 7 日没有植被覆盖度数据,但是热像仪分别对玉米冠层和茎间进行了数据采集,所以可根据手持式红外辐射计数据处理原理,对

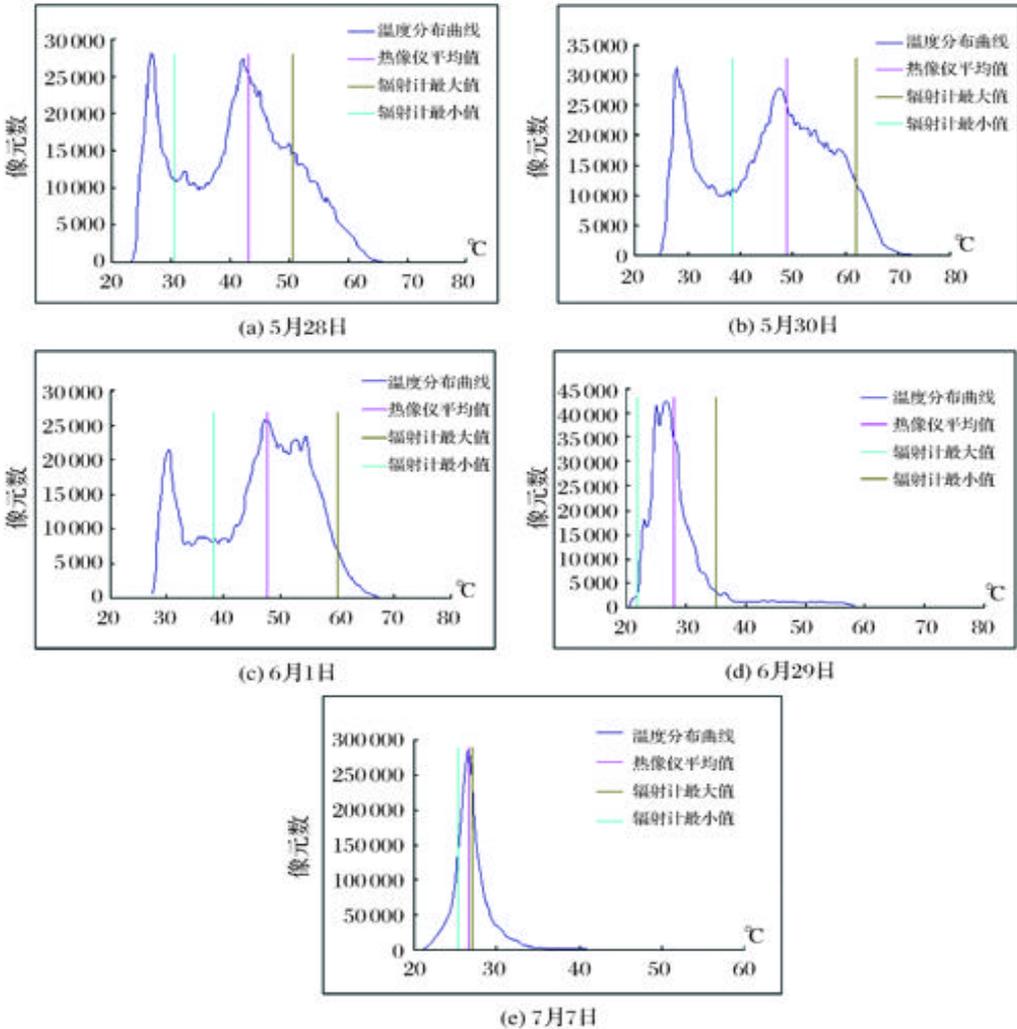


图 5 各天热像仪采样温度分布直方图

Fig.5 Histogram of temperature captured by the thermal camera

表 2 热像仪与手持式红外辐射计获得的田块平均辐射温度值比较

Table 2 Comparison of the field averaged radiative temperature measured by thermal camera and hand-held radiometer

温度 (°C)	5月28日		5月30日		6月1日		6月29日		7月7日	
	热像仪	辐射计								
均值	43.08	42.76	48.88	49.60	47.74	48.47	28.02	27.64	26.65	26.24
差值	0.32		-0.72		-0.73		0.38		0.41	

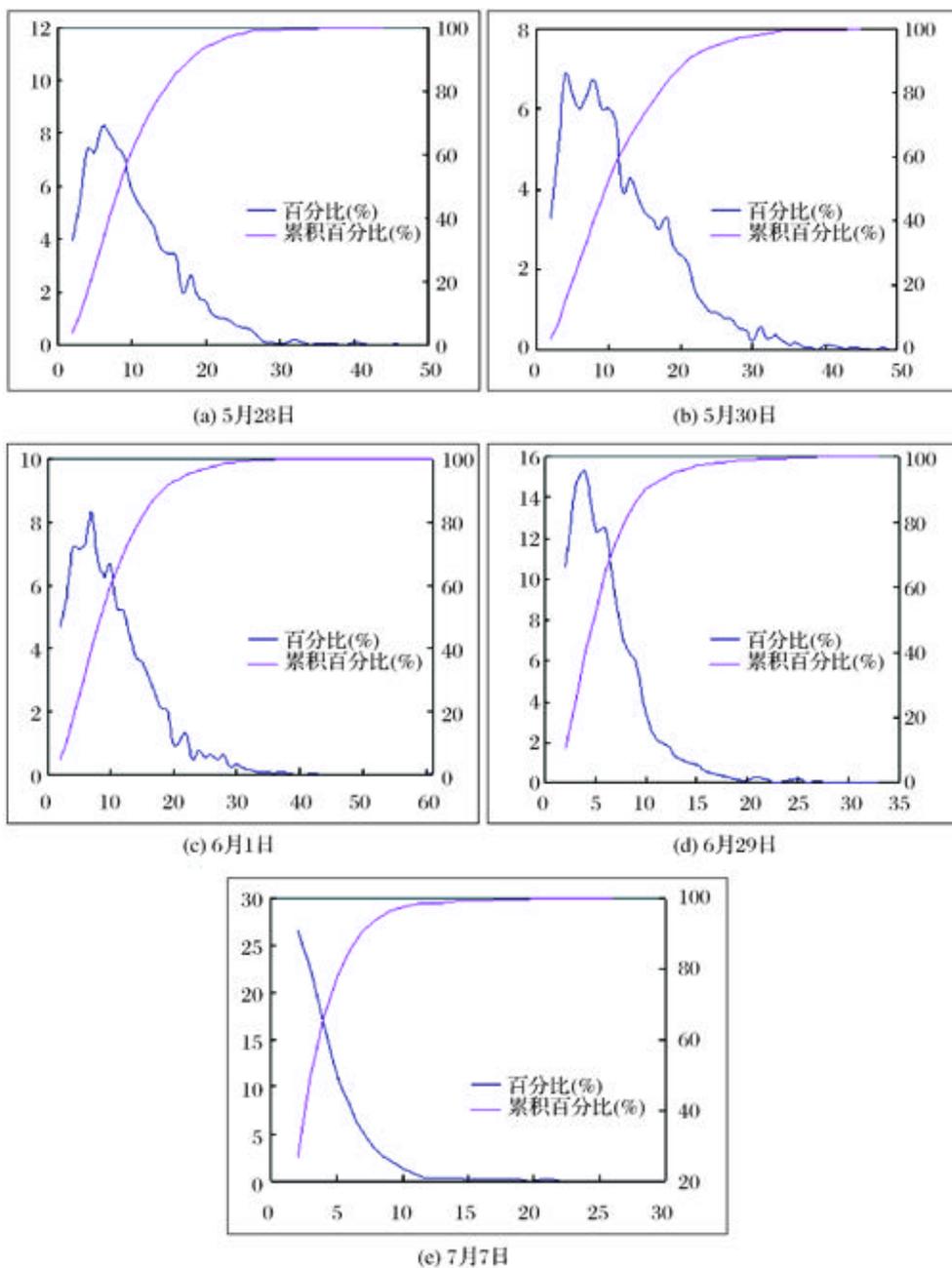


图 6 各天随机采样次数百分比与累积百分比

Fig. 6 The percents and cumulative percents of randomly sampled points of each day

表3 6月29日热像仪和手持式红外辐射计平均温度与差值

Table 3 Average temperatures and their differences captured by the thermal camera and hand-held radiometer on June 29

温度 (°C)	上午(11:15-11:35)		下午(13:58-14:10)	
	热像仪	辐射计	热像仪	辐射计
均值	25.69	24.70	30.35	30.59
差值	0.99		-0.24	

热像仪数据进行计算。另外,6月29日在上午、下午都进行辐射温度的测量,表2中的值是两段时期测量的平均值,而热像仪上午、下午各自与手持式红外辐射计获得地面平均辐射温度对比结果如表3所示。

从表2可以看出,5月28日两种仪器获得的地面平均辐射温度差值最小,其潜在原因在于热像仪与手持式红外辐射计同时采样,而且玉米植株处在生长初期,植株比较小,和背景在热像仪视场范围内具有明显的区分界线,由热像仪提取的组分温度精度也较好。此外,结合表2和表3可以发现,热像仪与手持式红外辐射计获得的田块平均辐射温度差值

并不是很大,但3种测量方式的最大值、最小值相差却较多,而且热像仪的最大值始终大于手持式红外辐射计最大值,而最小值又始终小于手持式红外辐射计的最小值,具体信息如表4所示。

对热像仪和手持式红外辐射计的最大值、最小值进行比较之后,本文又统计了热像仪温度分布直方图,分析手持式红外辐射计的最大值、最小值同热像仪平均温度值在直方图上的分布情况(图5)。由图5可以看出,在玉米生长初期(5月28日、30日及6月1日,图5a~c)手持式红外辐射计最大值、最小值与热像仪的平均温度值偏离较大,而在玉米生长末期(6月29日及7月7日,图5d~e)与热像仪平均温度值偏离较小,尤其是7月7日偏差最小。这是因为在玉米生长初期,玉米和裸土分离明显,测量视场内有多种组分温度;而在生长末期,玉米基本封垄,采样点视场范围内目标物几乎只有玉米,组分比较单一。但是由于6月29日热像仪数据中加入了裸土的采样影像,所以平均温度偏差要比7月7日没有裸土采样的热像仪影像平均温度偏差大一些。

表4 热像仪和手持式红外辐射计测量最值比较

Table 4 Maximum and minimum temperatures captured by the thermal camera and hand-held radiometer

温度 (°C)	5月28日		5月30日		6月1日		7月7日	
	热像仪	辐射计	热像仪	辐射计	热像仪	辐射计	热像仪	辐射计
最大	65.8	50.69	72.2	62.07	67.2	60.05	55.8	27.1
差值	15.11		10.13		7.15		28.7	
最小	23	30.55	24.3	38.41	26.9	38.21	20.4	25.3
差值	-7.55		-14.11		-11.31		-4.9	
温度 (°C)	6月29日(上午)				6月29日(下午)			
	热像仪		辐射计		热像仪		辐射计	
最大	42.8		27.04		58.2		35.02	
差值	15.76				23.18			
最小	19.9		21.83		23.5		26.53	
差值	-1.93				-3.03			

4 温度的空间采样模拟与分析

针对上述情况,本文认为引起两种仪器反演所得田块温度差异的主要因素是温度的空间异质性与采样方式。温度的空间差异是由地物自身结构和环境状况所主导的,并可以认为采样过程中其基本不受采样人员影响。那么,要利用手持式红外辐射计来获得整个田块或者较大区域的平均温度,就需要从其采样方式上加以考虑。

在上文数据的基础上,若假设热像仪图像代表

一个田块的尺度,本文建立了一个随机点采样模型,以热像仪的像元为单位,对5天的热像仪图像都分别进行了200次随机模型布点采样,并统计每次与热像仪平均温度差值控制在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 范围内的采样次数。采样次数直方图见图6,其中横轴X为当采样所得的平均温度符合条件时需要的随机点的个数,纵轴Y为在调用 $200 \times N$ 次(N 为当天热像仪图像数目)随机模型过程中出现相应的X值的百分比(左轴)与累积百分比。

从图中可以发现,在热像仪尺度,要在玉米生长

初期使得随机采样的平均温度以95%的置信度(约 2σ , σ 为标准差)落于真实温度的 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 之间,在5月28日、5月30日及6月1日3天的随机次数分别应不少于22、26和23,而要达到同样的水平,6月29日和7月7日分别需要不少于13次和9次采样。表5中统计了各天在多个置信度下的采样次数范围,从表中可以看出,随着玉米生长期的推进,以同样的置信度获得真实温度的 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 的采样平均值时,所需要的采样次数具有统计意义上的减小趋势。

表5 多种置信度范围内的随机采样次数

Table 5 The numbers of randomly sampled points with different reliability levels

日期	置信度 $k(\%)$			
	$k \in [68.3, 95.4)$, $k \in [95.4, 99.7)$, $k \in [99.7, 100)$	$[1\sigma, 2\sigma)$	$[2\sigma, 3\sigma)$	$[3\sigma, 1)$
5月28日	12~22	22~33	>33	
5月30日	14~26	26~41	>41	
6月1日	12~23	24~34	>34	
6月29日	7~13	14~25	>25	
7月7日	5~9	10~18	>18	

本次试验玉米生长初期热像仪图像采样视场范围约为 $38.0\text{ cm} \times 51.0\text{ cm}$ (拍摄高度为 1.2 m),那么其单一像元所对应的冠层顶的面积约为 $2.53 \times 10^{-2}\text{ cm}^2$ 。手持式红外辐射计测量时与热像仪获取数据高度相当,约为冠层上方 1.2 m ,那么其 1° 视场角所覆盖的冠层顶面积为 3.45 cm^2 ,对应136个热像仪像元。因此,若将手持式红外辐射计的视场等效于热像仪像元以进行随机采样模型,就需要把热像仪的视场等效到136倍原有视场,将长宽均变到原来11.66倍,约为 $4.44\text{ m} \times 5.96\text{ m}$,这说明若田块大小为 $4.44\text{ m} \times 5.96\text{ m}$,并具有本文提及的行播结构,那么利用手持式红外辐射计进行随机采样,当采样次数满足表5所示的数量时,其采样所得平均温度将以相应的置信水平落于真实温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 范围内。由此可以设想,当研究区域范围增大或者地表类型更加复杂,要获得同样的采样置信度所需要的采样次数在统计意义上将不少于甚至于成倍于表5所示的数目,而在星—机—地温度同步测量时基于点测量的采样方案难以仅利用1~2台手持式红外辐射计实现相应的采样频率与数目。因此目前进行与遥感像元尺度相匹配的面真实性检验还需要更高的时间与空间采样方式,需要进行测量方法和设备的革新。

5 结论与讨论

本文利用野外实际测量的数据对热像仪与手持式红外辐射计这两类红外测温仪地面温度测量的结果做了对比分析。结果表明,热像仪测温结果与手持式红外辐射计获得的平均地面辐射温度差别不大,但3种测量方式的最大、最小值相差较多。由于两种仪器都经过辐射定标,所以这种不确定性来源于测量过程,而且主要是来源于温度本身在时空二维的高度异质性和采样方式。

本文基于热像仪图像还模拟出了当随机采样的平均值以不同的置信度处于真实温度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 之间时所对应的采样次数,并完成了模拟数值从热像仪像元尺度到手持式红外辐射计等效视场的转换。研究结果在一定程度上说明了常规的基于点测量的采样方案难以仅利用1~2台手持式红外辐射计实现。对田块或者更大尺度平均辐射温度的准确测量,高时空采样频率是保障利用点测量的采样方案所得辐射温度精度的前提,从而要求在进行遥感像元尺度相匹配的地面真实性检验需要测量方法和设备的革新。

参考文献 (References):

- [1] Zhu Huaisong, Liu Xiaomeng, Pei Huan. Summary on retrieval of land surface temperature using thermal infrared remote sensing [J]. *Arid Meteorology*, 2007, 25(2): 17-21. [朱怀松, 刘晓猛, 裴欢. 热红外遥感反演地表温度研究现状[J]. 干旱气象, 2007, 25(2): 17-21.]
- [2] Zhang Renhua. Experimental Remote Sensing Model and Its Land Surface Process [M]. Beijing: Science Press, 1996. [张仁华. 实验遥感模型及地面基础[M]. 北京: 科学出版社, 1996.]
- [3] Wan Z M, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature from space [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 892-905.
- [4] Xu Xiru, Liu Qinhua, Chen Jiayi. The remote sensing of land surface temperature [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1998, 34(2): 248-253. [徐希孺, 柳钦火, 陈家宜. 遥感陆面温度[J]. 北京大学学报, 1998, 34(2): 248-253.]
- [5] Yu Shanshan, Yu Tao, Gu Xingfa, et al. Investigating the gap frequency of a maize canopy using night TIR fata [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 683-689. [余珊珊, 余涛, 顾行发, 等. 利用夜间热红外数据求取玉米冠层孔隙率[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 683-689.]
- [6] Francois C, Otlé C, Prévot L. Analytical parameterization of canopy directional emissivity and directional radiance in the thermal infrared. Application on the retrieval of soil and foliage temperature using two directional measurements [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(12): 2587-2621.

- [7] Purevdorj T, Tateishi R, Ishiyama T, *et al.* Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(18): 3 519-3 535.
- [8] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, *et al.* Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(1): 76-87.
- [9] Zhang Wenbo, Fu Suhua, Liu Baoyuan. Error assessment of visual estimation plant coverage [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2001, 37(3): 402-408. [章文波, 符素华, 刘宝元. 目估法测量植被盖度的精度分析 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2001, 37(3): 402-408.]
- [10] Zhang Yunxia, Li Xiaobing, Chen Yunhao. Overview of field and multi-scale remote sensing measurement approaches to grassland vegetation coverage [J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(1): 85-93. [张云霞, 李晓兵, 陈云浩. 草地植被覆盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 85-93.]

A Comparison of Different Ground-based Radiative Temperature Measurement Methods on the Field Patch Scale

KANG Guoting, YAN Guangjian, REN Huazhong,
WANG Haoxing, QIAN Yonggang

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography,
Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Thermal camera, widely used in situ measurement of land surface temperature (LST), has an advantage of obtaining component brightness temperature. A simultaneous airborne, satellite-borne, and ground-based remote sensing field campaign was carried out in the Heihe River Basin of northwest China from May to July, 2008. The radiative temperatures were obtained by two portable infrared radiometers and one thermal camera at the maize field patches around the weather station in Yingke Oasis Area with three different sampling schemes. Average temperatures of the field patches were extracted with those data. The thermal camera's data was processed as: Firstly, maize and the soil were separated by statistical threshold of radiative temperatures in thermal images, and then their mean radiative temperatures were calculated, respectively. Secondly, with the LAB color space transform technique, the vegetation fraction of each field patch is estimated from visible photos taken simultaneously. Finally, each patch's mean radiative temperature was obtained by the sum of the component temperatures of maize and soil weighted by vegetation fraction cover. By comparing of the mean radiative temperatures obtained by the thermal camera and portable radiometers sampling in cross-row and along-row direction, we found that their differences are small, and between -1 and $+1$. But, both maximum and minimum temperatures of the three methods differ a lot. By simulation on different reliability levels, we also obtained the numbers of randomly sampled points on different pixel scales. Our result indicates that it is difficult to obtain an accurate mean brightness temperature of filed patch with just only 1-2 portable radiometers based on the general point-based measure scheme. To get more accurate data for the validation of LST retrieved in different remote sensing pixel scales, new methods and instruments with high temporal and spatial sampling frequencies are required.

Key words: Field patch scale; Radiative temperatures; Thermal camera; Portable radiometer; Sampling method.