

文章编号: 1007-4619 (2005)01-0016-08

玉米地组分亮度温度分类变化研究

余 涛¹, 顾行发², 田国良¹, Michel Legrand³,
Jean-François Hanocq², Roland Bosseno², 蔡红艳⁴

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 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: 以玉米整个生长期野外热红外辐射观测数据为基础, 对两种组分亮温分类方法作了比较, 并对玉米地组分亮温的变化特征展开了分析。结果表明, 农田亮温组分的数目和数值随测量时间和日期改变。在整个测量期间, 在当地时间中午前后, 农田呈现出 3 个亮温组分: 植被、被阳光照到的亮土和植被阴影下的暗土。观测早期, 植被亮温分布相对集中; 随着农田植被覆盖率的增高, 植被亮温分布逐步分散, 组分间温差缩小, 部分亮温值相互重叠。产生这些现象的原因将在以后的研究中加以探讨。

关键词: 玉米地; 组分亮温; 分类

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

作为农田地表长波辐射的一个度量参量, 方向亮温 (Directional brightness temperature, 简称 DBT) 已广泛应用在地表能量平衡估算、植被生态指标反演以及遥感传感器特性分析等多个领域^[1-7]。

由于植被的形态结构和农田能量交换等多种因素的作用, 农田热红外辐射呈现复杂空间分布。在遥感定量反演地表能量平衡和农田辐射特性研究中, 通常需将农田亮温分布进行分类处理, 形成几个温度值不同的亮温组分^[2, 7, 8]。

目前已有多种农田亮温空间分布的分类方法, 如以亮温数值差异划分, 或以物质特征划分, 或将这两者相结合进行划分。在研究农作物热辐射方向特性中, Francois 等人^[9]将目标分为土壤与植被两个类别; 而 Kimes 等人^[7]将棉花地分为被阳光照亮的土壤与植被、暗影中的土壤与植被等四个分量。在其观测中, 虽然植被棉花被分为亮与暗两个部分, 但这两个部分的温差很小, 在总共 18 个观测中, 其差别小于 0.5℃。Kustas 等人^[8]在棉花地温度分类研究中得到了类似结论, 即部分覆盖的棉花地温度可有

效地分为植被、被阳光照亮的土壤与暗影中的土壤等三个分量。在森林热辐射研究中, Anthoni 等人^[10]发现需要至少 4 个类别才能对森林热分布进行比较合理的描述。而对于均匀植被^[11], 在 Kimes 等人研究中, 植被被分为相互平行、数目不等的温度层。这种方法也被 Pévot^[12]和 Paw 等人^[13]采用。采用这种方法, 温度组分的数目一般超过了 4 个。

植被温度分类分析中, 许多研究者已经揭示组分的数值和分布随观测时间产生变化。Kimes 等人^[7]和 Kustas 等人^[8]的棉花地温度观测显示, 亮土温度从早上到中午有 30℃ 的变化, 暗土与植被的温度随亮土温度变化趋势改变, 但浮动范围分别缩小为 20℃ 和 10℃。在早晨的观测中, 三个组分温度有着基本相同的值, 区别小于 5℃。而在中午时分, 亮土温度远远大于其他两个分量的温度值。同时, 组分温度的分布也不尽相同, 亮土温度数值上的分布最为分散, 其它两个组分的温度分布范围相对较窄。当然, 他们的结果来源于一日的观测, 未对组分温度的分类如何随植被生长变化展开观测。

最近, 我们利用一套热红外成像仪和多波段成像仪对玉米地的亮温分布随时间的变化展开了观测。本研究将在这些观测数据的基础上, 确定玉米

收稿日期: 2003-09-27; 修订日期: 2004-06-28

基金项目: 法国农科院奖学金, 自然科学基金(49371088), 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。

地组分亮温的数目,并且初步总结出所研究的玉米地组分亮温在数目和数值上随观测时间和观测日期的变化特征,为进一步定量描述农田亮温分布的变化趋势打下基础。

2 材料与方法

2.1 组分亮温的定义

位于农田位置 (x, y) 的一个任意小区域,可被认为是一个光滑平整的小面元,在波段长为 λ 时,其对外辐射 $R_{B, \lambda}(\theta, \varphi, x, y)$ 为^[14]:

$$\begin{aligned} R_{B, \lambda}(\theta, \varphi, x, y) &= R(T_{B, \lambda}(\theta, \varphi, x, y)) \\ &= R(T_{b, \lambda}(\theta, \varphi, x, y)) + \\ &L'_{\lambda}(\theta, \varphi, x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $T_{B, \lambda}(\theta, \varphi, x, y)$ 是小面元方向亮温; $T_{b, \lambda}(\theta, \varphi, x, y)$ 是由小面元对外辐射值计算的方向辐射温度; $L'_{\lambda}(\theta, \varphi, x, y)$ 是由小面元反射的背景贡献,一般由周围的植被和天空辐射造成。

当传感器远离观测点,则视场内目标在波段范围 (λ_1, λ_2) 向外的辐射 $R_{B, i}(\theta, \varphi)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} R_{B, i}(\theta, \varphi) &= R(T_{B, i}(\theta, \varphi)) \\ &= \frac{\iint_{S} R_{B, \lambda}(\theta, \varphi, x, y) d\lambda dx dy}{\int_S dx dy} \\ &= \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta S \int R_{B, \lambda}(\theta, \varphi, x, y) d\lambda}{S} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $T_{B, i}(\theta, \varphi)$ 是目标的方向亮温,其数值等于相应黑体的等效温度; S 是视场的总面积; ΔS 是小区域的尺寸。

前述可知,研究中一般把具有相同亮温或相同特征的区域划分为一个组分,如土壤与植被、被阳光照亮的土壤与植被、暗影中的土壤与植被等等。由方程(2),方向辐射可以表示为这些组分辐射的和:

$$\begin{aligned} R_{B, i}(\theta, \varphi) &= \sum_{k=1}^N f_k(\theta, \varphi) R_{k, B, i}(\theta, \varphi) \\ &= \sum_{k=1}^N f_k(\theta, \varphi) R_{k, B, i}(T_k) \end{aligned} \quad (3)$$

其中 N 是组分的数目; $f_k(\theta, \varphi)$ 是第 k 个组分在视场中的权重; $R_{k, B, i}(T_k)$ 是第 k 个组分的辐射值; T_k 是第 k 个组分所对应的亮温值。

将波段范围放宽到整个波谱时,公式(4)可表现为:

$$a_B \sigma_B T_B^4(\theta, \varphi) = \sum_{k=1}^N f_k(\theta, \varphi) a_k \sigma_B T_k^4 \quad (4)$$

其中, $T_B(\theta, \varphi)$ 是目标的方向亮温, a_B 是传感器波段响应与全波段辐射的关系系数; a_k 是第 k 个组分的亮温为 T_k 时,传感器波段响应与全波段辐射的关系系数。 σ_B 数是波尔兹曼常数。根据Oliosio等人^[15]的研究,当温度范围为 $10^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}$ 之间时, $8 - 14\mu\text{m}$ 波段范围的辐射与全波段辐射的关系系数的范围为 $0.34 - 0.39$ 。若组分间温差在一定范围内,系数的变化很小,进一步简化方程(4),可以得到实际测量中组分亮温和权重与实测目标方向亮温的近似关系方程:

$$T_B^4(\theta, \varphi) \approx \sum_{k=1}^N f_k(\theta, \varphi) T_k^4 \quad (5)$$

以上各式中的温度以绝对温标表示,其单位为开尔文(K)。在以后的各节中,为了使用上的方便,将采用摄氏温标,单位为摄氏度($^\circ\text{C}$),两者相差 273.15°C 。

2.2 实验设计与数据采集

实验在法国农科院 Avignon 实验场开展。实验场的玉米按南北垄向种植,行间距为 0.8m ,植株密度约为 $9.32/\text{m}^2$ 。测量中采用了一套遥感近地表观测系统,包括一架臂高约 20m 的工业用吊车和大视场角热红外成像仪^[16]及一台高空间分辨率的6波段成像仪。两台设备被平行固定在吊车平台上,其间相距 0.4m 。采用热红外成像仪进行农田亮温分类的好处是可获取同一时间亮温场的分布,避免了采用点温计或辐射计所难以避免的时间变化影响。

在白天的测量中,传感器悬于玉米上方 2m 处。这时,热红外影像和可见光影像的空间分辨率分别不大于 1cm 和 0.2cm 。在夜间的观测中,仅采用热红外成像仪,其镜头换成 7° 窄角型,置于 20m 高度。这时的像元空间分辨率依然达到 1cm 。观测时,先将镜头垂直向下,面向植被冠层顶部拍照,然后垂直垄向,向西或向东倾斜 45° ,面向植被的下层叶片进行拍照。在每一个方向上,测量保持 20 秒钟,拍照速率为 1 幅/秒,得到 20 幅相同的图像。这样,在求组分亮温时,像元的温度精度在 95% 置信度的条件下可以达到 0.22°C 。

2.3 两种实验数据处理方法

热红外影像进行组分分类可采用两种方法,即

热红外影像与可见光影像的比对法和热红外影像亮温分布直方图法。

比对法以高分辨率可见光影像为参照,覆盖一定密度的网格,对网格点所对应位置的目标逐一进行判读,然后提取热红外影像相对应位置处的亮温值。判读中,通过对照多波段可见光影像,区别出被阳光照到的亮土和植被以及阴影下的暗土和植被等4个分量。为提高识别效率和目标识别的准确性,分类时需采用不同组合的可见光波段。在可见光影像中,不可避免地存在过暗的阴影区域,难以区分是暗土或是暗植被。这时可以直接采用热红外影像加以判断。

直方图法采用建立热红外影像亮温频率分布的方式,直接从热影像图中区分出亮温组分,对亮温组分的目标特性和空间结构进行确定。在数据处理中,以等间距温度间隔对整个影像的亮温范围进行划分,形成影像的亮温分布直方图,纵坐标为所对应

亮温在整个影像中的出现频率。对于热红外影像,由于组分亮温的客观存在,一般在直方图中往往出现一些相互分离的频率峰值,对应每一峰值有一占绝大多数的物质组成,如亮暗的叶片或土壤。我们设定这些峰值的出现的数目是组分亮温的数目,峰值的中心是组分亮温的平均值,所对应的物质组成是该组分亮温的组分。

实验观测中,在两个峰值间的温度区域存在大量的同温异物现象,即不同的物质组分有着相同的亮温值。为了能准确地提取组分亮温的数值分布特征,数据处理中将采用正态分布最小二乘方法进行模拟,即用一组正态分布曲线去套直方图亮温分布,经过多次循环迭代,使得偏差最小。这时,我们认为这组正态分布曲线代表了组分亮温的亮温分布特点。每一曲线的数学期望(μ)和方差(Σ)描述了组分亮温的统计分布。

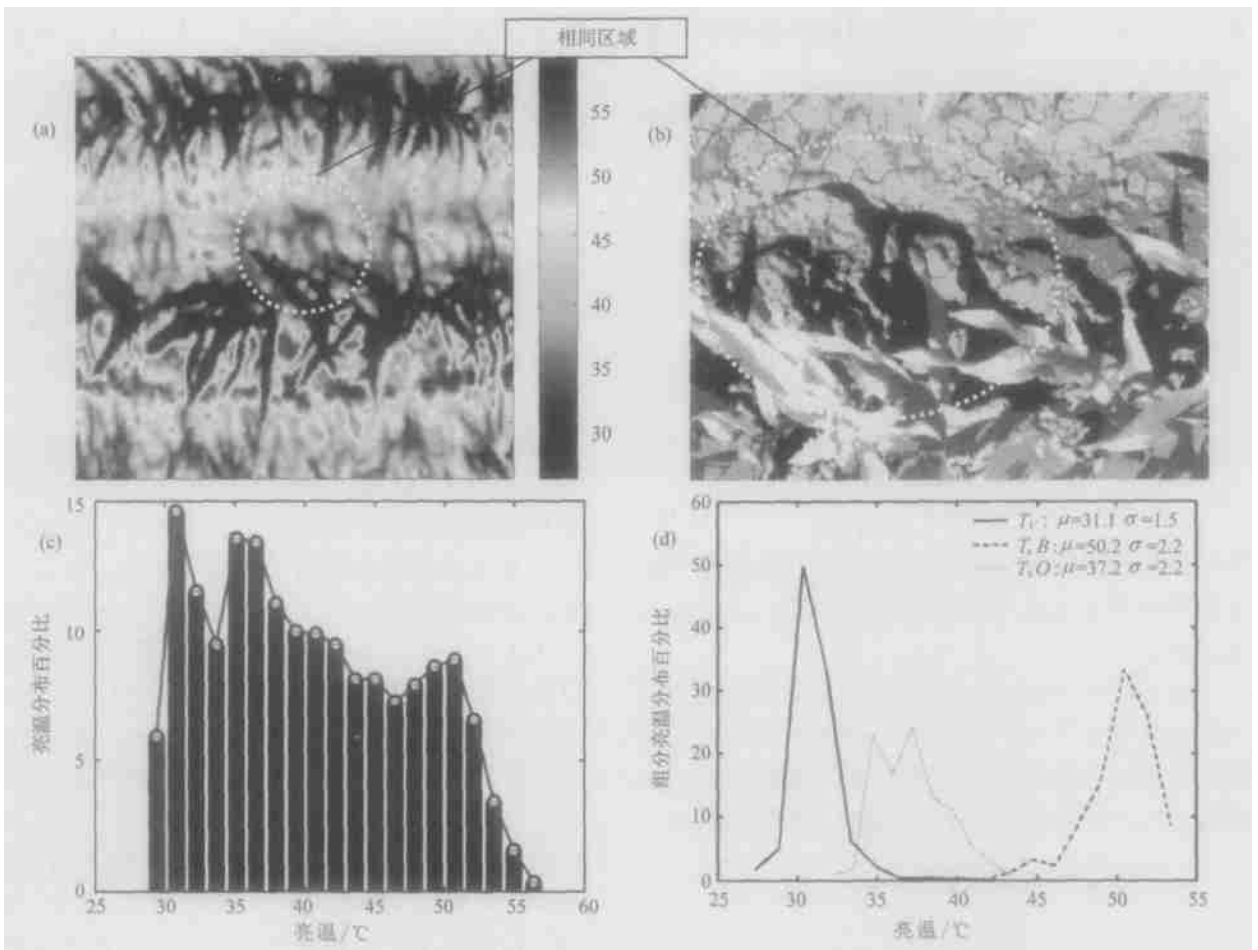


图 1 1999 年 6 月 16 日当地时间 13:55 分获得的热红外影像和可见光波段假彩色影像的比较

Fig. 1 Brightness temperature distribution at 13:55 of local time on June 16, 1999. They are thermal image (a), corresponding visible image (b), histogram of brightness temperature image (c), and histogram of three brightness temperature component selected by visual interpretation (d)

3 结果及讨论

3.1 两种方法的比较

图1显示的是1999年6月16日当地时间13:55分获得的热红外影像和可见光波段假彩色影像的比较。其中,图1(a)为热红外影像,温度变化范围从 28°C — 58°C ,温差达到了 30°C 。图1(b)为相应位置的可见光波段假彩色影像,两个图中的虚点圈标注为相同区域。图1(c)为热红外影像的亮温直方图,横坐标表示温度的分布范围,纵坐标为不同温度值出现的概率。图1(d)为可见光影像支持下进行人工判读得到的热红外影像亮温直方图,横坐标表示温度的分布范围,纵坐标为不同组分的温度值出现概率。各组分亮温分布的数学期望与方差由 (μ, σ) 表示,图中亮土、暗土和植被分别表示为 $T_s B$ 、 $T_s O$ 和 T_v 。

从图1(a)中可以区别出植被、亮土和暗土等3个亮温组分。亮土有着最高的亮温值,植被和暗土的亮温较低。然而,在温度较高的亮土与温度较低的叶片的界限处存在比较模糊的区域,其温度值介于亮土与植被的温度值之间,并且区域大于像元的尺寸。产生这一现象的原因一个是空间分辨率的影响,另一个是传感器调制传递函数(MTF)的影响。MTF反映了传感器在一定的空间分辨率下对目标反差的识别能力,即相临区域温差越大,温度分布渐变的现象就越明显。在白天的观测中,由于目标相临不同区域的温差较大,传感器调制传递函数特性的影响不可避免。可见光波段假彩色影像图1(b)中,由颜色的变化可以方便地区别出被阳光照亮和阴影下的土壤与植被,形成4个组分的划分。有别于图1(a),各成分之间的界限非常清晰,这是由于可见光波段高空间分辨率决定的,并且几乎没有MTF的影响。比较图2(a)和图2(b),两幅影像在相同区域处的景象存在着差别。除波段光谱特性和MTF影响外,主要由两个传感器位置的不同造成的。观测时,传感器平台距目标离2m的近距离情况下,它们之间的距离(0.4m)使得对同一区域的观测的角度偏差非常明显。

图1(c)的亮温直方图由热红外影像图超过30,000个像元点的亮温值构成,并被等间隔地分配在20个温度间隔中。图中出现了3个温度峰值,非常清晰地表明农田此刻存在着3个相对集中的亮温

温度范围。通过与图1(a)比较,发现从小到大亮温值分别对应于植被、暗土和亮土。根据组分亮温分类定义,将具有相同或相近亮温值的土壤或植被面元划分为一个亮温组分。这样,我们将三个峰值所对应的亮温区域确定为三个亮温组分。当然,从图中可以发现,这三个峰值之间的温度区域存在大量的数据点,即三个组分间存在着交叉。采用最小二乘法对三个组分亮温的分布进行模拟,得到各组分亮温分布的数学期望与方差:亮土($48.2 \pm 3.1^{\circ}\text{C}$),暗土($37.7 \pm 2.4^{\circ}\text{C}$)和植被($31.0 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$)。与Kustas等人^[8]的实验相对比,农田热红外三分量的划分结果相同,植被亮温分布的方差也基本相同(1.4°C),但亮土的方差远远低于其结果(9.5°C),而远远大于Kimes等人^[7]的测量结果(0.5°C)。造成这种现象的原因是多方面的,需在以后进一步的研究中加以分析。

基于可见光波段假彩色影像进行辅助判读分类,从热红外影像中分别得到植被、亮土和暗土的亮温分布直方图(图1(d))。这种方法能有效地避免了MTF影响,但也存在一些不足。由于视场差别等原因,虽有可见光影像的帮助,热红外影像上部分亮温值相同的点还是难以识别,同时,对于可见光影像中过暗的区域,其在热红外影像上的形状产生变形,不易比较判断,导致了实际操作中对这些难以判读的情况加以删除处理。由于这两方面的原因,在组分亮温观测点的选择上,热红外影像上的一些像元点被漏选了。由正态分布最小二乘模拟得到的组分亮温的温度分布与图2(c)直接得到的结果在数值上略有不同:亮土 $T_s B$ ($50.2 \pm 2.2^{\circ}\text{C}$),暗土 $T_s O$ ($37.2 \pm 2.2^{\circ}\text{C}$)和植被 T_v ($31.1 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$),均值有一定的偏移,方差略有缩小。

为了区别亮植被和暗植被的亮温分布,借助可见光影像进行选点,得到它们的亮温统计参数 $(\mu \pm \sigma)$ 分别为 $29.0 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ 和 $28.7 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$,差别只有 0.3°C ,只是植被方差值的一半。由于这两种情况不能从热红外影像中直接识别出来,植被被认为是一个亮温组分。这时植被的亮温分布依然小于亮土和暗土。

比较这两种数据处理方法,各组分在图中出现的权重不同(图1(c)和1(d))组分亮温值也有差别。图1(c)直接由热影像得到,这时传感器视场是平行于垄行方向的矩形,并且边长是2倍的行距。各组分在视场内的比例比较合理。但是,图中各组分间界限比较模糊,使得组分亮温的分布加宽。大量的

混合温度值聚集在峰值之间,导致多次迭代的正态分布最小二乘模拟产生偏差,亮土的亮温值偏低,植被的亮温值偏高,暗土的亮温随视场各组分权重改变。而在图 1(d)中,组分温度各点值采用人工识别的办法获取,参考可见光影像选点,各组分选择准确率高,可有效提高各组分平均亮温测量精度。但在人工选点中,像元点数目有限,按权重选择像元比较困难,所以对视场内各组分的比例未加考虑,造成了亮温频率分布不能真实反映各组分在视场中的权重。这两种方法在白天热影像分类中各有特点,但在组分亮温温度值确定上,分析表明采用可见光影像辅助判读的方法比较可靠。

对于在夜间无阳光条件下的测量,实验中只获取了热红外影像。图 2 所示为 1999 年 7 月 26 日当

地时间晚 10 点获得的影像(图 2(a))及其亮温分布直方图(图 2(b))。整幅图像的温度范围为 21°C 到 28°C 。为了方便夜间的目标定位,于传感器正下方置一铝制矩形框。铝材的发射率较低(约 0.02),框架的亮温值最低(21°C),在图中显示为黑色。事实上,真实的铝框亮温远低于 21°C ,但由于热像仪设定温度范围的限制,导致了其温度被设定在 21°C 左右。采用正态分布最小二乘方法进行模拟,得到铝框、植被和土壤的平均亮温为 21.5°C 、 24.3°C 和 26.5°C ,标准差分别为 0.15°C 、 0.52°C 和 0.44°C 。由夜间试验可以看出,当目标亮温变化较缓时,MTF 效应变得不很明显,土壤和叶片的界限可以很好地区分,所以采用热红外影像亮温频率分布的直方图法可以很好地获得农田的亮温分类和面积比例。

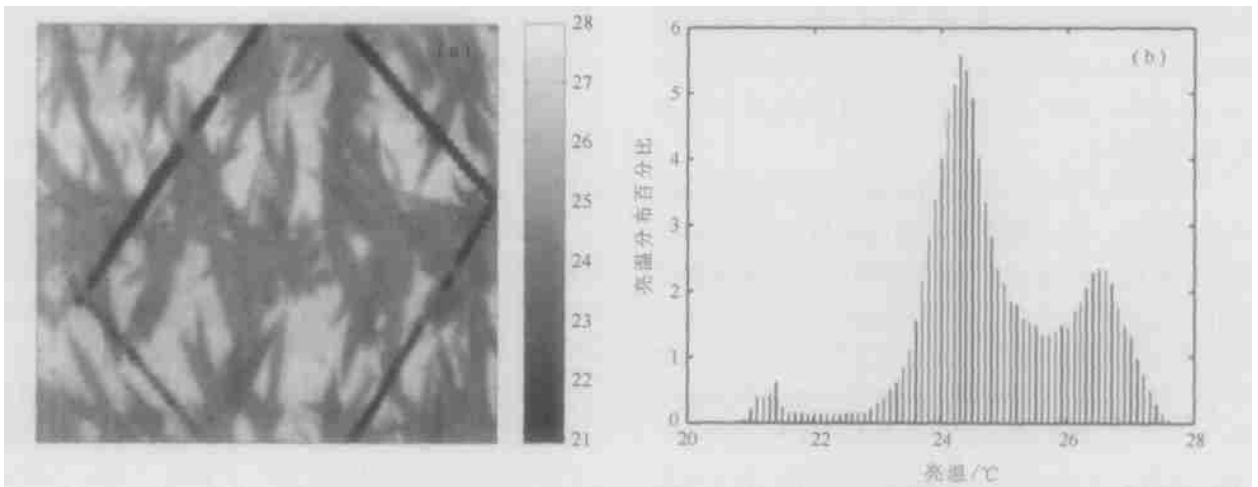


图 2 1999 年 7 月 26 日当地时间晚 10 点获得的热红外影像(a)及其亮温分布直方图(b)

Fig. 2 One thermal infrared image (a) capture at mid night on July 26, 1999 and its bright temperature histogram (b).

3.2 玉米的组分亮温数值和数目随时间和季节的变化趋势

组分亮温随时间的变化由图 3 所示。该图显示了 1999 年 6 月 24 日 9:19、12:33 和 16:34 这 3 个时间点的组分亮温值。在这 3 次观测中,始终保持着 3 个组分,各组分亮温值随时间有不同趋势的变化。其中,植被的亮温值最低,随时间变化稳步增加,但变化最小;亮土亮温最高,变化最大,峰值出现在中午时分;暗土亮温介于植被和亮土亮温之间,在上午逐步增加,在下午保持平稳。在同一天的 3 次观测中,亮土的组分亮温具有最大的离散性,标准差分别达到了 3.5°C 、 3.9°C 和 2.4°C 。是植被和暗土组分亮温标准差的近 3 倍。这个现象在 Kustas 等人^[8]的有关棉花地亮温分布的实验文章中也有所提及,他

认为亮土始终具有最大的亮温分布范围,并且认为这是由于土壤水分和土壤表面粗糙度空间分布的不均匀性造成的。但是,目前还未见支持这种原因分析的定量研究报道。

图 4 显示的是另一组组分亮温不同测量时间的数值变化。其中 T_s 是土壤的亮温。测量于 1999 年 8 月 6 日上午开始,持续到当日中午,三个时间点分别为当地时间 10:19、11:14、12:00。在 10 点左右,只能从热红外影像中分辨出植被与土壤这两个亮温组分,并且植被的亮温值高于土壤的亮温值。接近中午,三个亮温组分出现了,虽然这时组分间的温差较小,很大一部分观测点的亮温出现在组分亮温分布的重合部分。关于植被的亮温值高于土壤的亮温值的原因,我们认为这是由于植被过密造成的。由于植被拦截了大量的阳光,使得底部的土壤获得日照

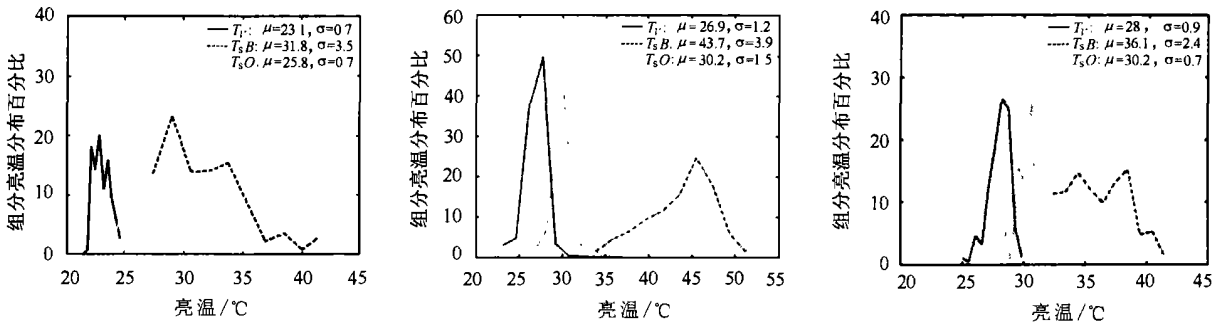


图 3 1999 年 6 月 24 日 9:19, 12:33 和 16:34 这三个时间点的组分亮温值

Fig.3 Three measurements at different time (9:19, 12:33 and 16:34) of local time on June 24, 1999 respectively

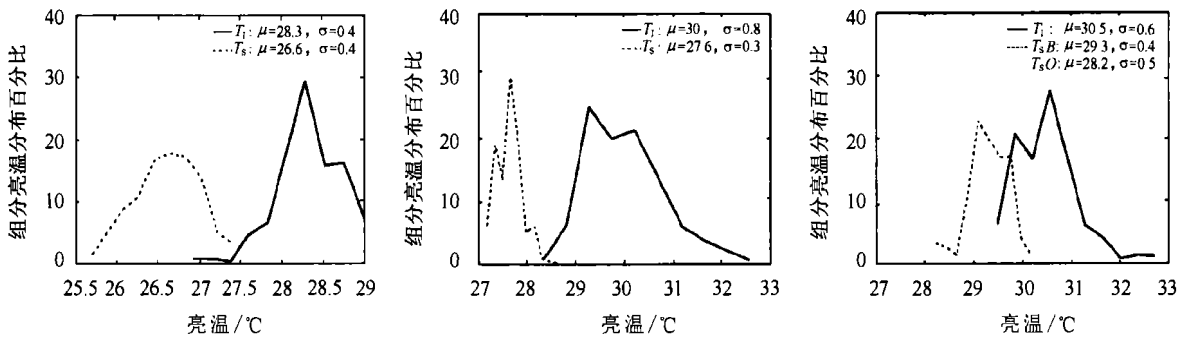


图 4 1999 年 8 月 6 日的组分亮温不同测量时间的数值变化

Fig.4 Field component brightness temperature temporal changes in the morning on August 6.

的量和时间被极大地压缩,致使土壤的亮温在日出很长一段时间内上不去。

为了研究植被生态结构的变化对组分亮温分类的影响,我们从 1999 年 6 月到 8 月对当地时间中午前后农田亮温空间分布进行了观测。表 1 所示为这一期间组分亮温的统计参数,用均值(μ)与方差(σ)表示。从中可以看出,3 个亮温组分的分类形式在整个观测中表现出来。在 7 月 20 日以前,尽管三个组分亮温的离散度数值较大,但与它们亮温值差别

相比较小,所以比较容易从影像中将各分量区别出来。而在 7 月 20 日以后,虽然离散程度降低,但各组分亮温相邻过近,反而使组分间的界线变得模糊了。关于植被在观测中表现为一个亮温组分,且温度离散性较小的现象,其原因可以初步分析是由于其植株和叶片的结构以及叶表面蒸腾共同作用的结果。玉米植株的叶片数目相对较少,阳光可以穿透区大的孔隙照到下层叶片,同时对于较宽大且较薄的玉米叶片,受光面和背光面温差相差不大,并且

表 1 不同日期组分亮温的统计参数表(1999 年)

Table 1 Table of field temperature parameters for different measuring date (1999)

日期	6 月 16 日	6 月 24 日	7 月 2 日	7 月 9 日	7 月 20 日	7 月 30 日	8 月 6 日
地方时	13:55	12:32	10:50	13:51	13:06	14:07	10:31
$\mu-T_v/^\circ\text{C}$	31.1	26.9	28.8	30.5	30.6	28.2	31.5
$\sigma-T_v/^\circ\text{C}$	1.5	1.2	1.3	1.0	0.8	0.5	0.8
$\mu-T_sB/^\circ\text{C}$	50.2	43.7	41.4	43.5	33.1	32.5	30.1
$\sigma-T_sB/^\circ\text{C}$	2.2	3.9	3.3	4.1	1.7	0.9	0.5
$\mu-T_sO/^\circ\text{C}$	37.2	30.2	31.2	35.8	30.0	29.9	28.7
$\sigma-T_sO/^\circ\text{C}$	2.2	2.5	3.0	2.3	0.5	0.4	0.4

蒸腾作用进一步缩小了这种差别。Kustas 等人^[8]对这种现象也进行了描述。作为对比, Anthoni 等人^[10]在研究树木亮区和暗区亮温差别中发现, 树两侧亮温存在很大差别; Paw 等人^[13]在研究向日葵温度变化时发现其上半部和下半部存在较大的温差。

中午前后出现的三个组分亮温数值顺序和大小也随观测日期改变。7 月 20 日以前, 亮温值从高到低的顺叙依次为亮土、暗土和植被。7 月 20 日以后, 排序变为亮土、植被和暗土或植被、亮土和暗土。相对于植被的亮温, 土壤亮温逐步降低, 组分间的温差逐步缩小。如前段的分析, 产生这种现象的原因被归结为玉米的形态结构和作物的蒸腾作用。随着时间的推移, 叶密度不断增加, 大部分阳光被叶片截获, 土壤增温效果不明显, 使得土壤与植被间温差不大。同时, 农田内部热交换也降低了各组分间的亮温差异。这种解释也可说明叶密度低时组分亮温差异较大的原因。在植被生长初期比较稀疏时, 大部分阳光透过植株缝隙, 土壤和植被大约同时被加热, 并且土壤受光面大, 使得其温度迅速增加。在实验中也发现, 土壤表面受光面的亮温与其位置和大小也有密切关系。在亮土与暗土混杂的区域, 亮土亮温总体上就小于垄行上连成片的大面积亮土的亮温。亮土亮温的空间分布和成因比较复杂, 以上分析仅仅基于野外实验观察, 建立在农田小气候基础上的定量化成因分析需要在以后的研究中加以开展。

4 结 论

自然条件下的农田生态系统, 由于其复杂的空间结构和能量交换规律, 导致了其表面亮温空间分布的复杂性。为了能对亮温的分布进行有效地分类, 本文在野外试验数据的基础上研究了组分亮温划分方法以及玉米组分亮温随时间和日期的变化。结果表明, 本文所示这两种方法均能对组分亮温的分布进行提取, 但在应用中也有不足之处。白天的观测中, 直方图法受 MTF 的影响较大, 组分温差较小时, 分类效果不理想, 而可见光辅助解译法, 虽然精度可以得到保证, 但对人工分类的要求较高, 费时费力。在组分亮温变化特征的研究中发现, 组分的数目、组分的数值和分布随时间和日期变化。夜间没有阳光照射的情况下, 农田有 2 个亮温组分; 中午前后有阳光的情况下, 农田表现出 3 个亮温组分。在其它时段, 情况表现的更为复杂, 随当时作物生长

形态和局地小气候等多种因素影响。组分亮温值顺序的变化与作物生长阶段有紧密的联系, 半覆盖条件下亮土亮温最高; 高覆盖条件下植被的亮温值最高。在这些现象成因的分析中, 除了 Prévot^[12]、Kustas 等人^[8]、提出的作物几何结构、蒸腾作用和土壤水分等原因外, 数据表明, 土壤亮暗区域的大小和分布也是在以后分析中须加以考虑的一个因素。以上这些现象的定量化成因分析将在未来的工作中逐步开展。

参 考 文 献 (References)

- [1] Friedl M A. Modeling land surface fluxes using a sparse canopy model and radiometric temperature measurements[J]. *Journal of geophysics research*, 1985, **100**(D12): 25435—25446.
- [2] Jackson R D, Reginato R J, Pinter P J J, Idso S B. Plant canopy information extraction from composite scene reflectance of row crops [J]. *Applied Optics*, 1979, **18**: 3775—3782.
- [3] Weiss M, Baret F, Leroy M, Bégué A, Hauteceoeur O, Santer R. Hemispherical reflectance and albedo estimation from the accumulation of across-track sun-synchronous satellite data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**(D18): 22221—22232.
- [4] Vining R C, Blad B L. Estimation of sensible heat flux from remotely sensed canopy temperatures [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(D17): 18951—18954.
- [5] Moran M S, Clarke T R, Inove Y, Vidal A. Estimating crop water deficit using the relationship between surface-air temperature and spectral vegetation index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, **49**: 246—263.
- [6] Norman J M, Divakarla M, Goel N S. Algorithms for extracting information from remote thermal-IR observations of the earth's surface [J]. *Remote Sensing of Environment*. 1995, **51**: 157—168.
- [7] 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.
- [8] Kustas W P. Ground and aircraft infrared observations over a partially vegetated area [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **11**: 409—427.
- [9] François C, Ottlé 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, **12**: 2587—2621.
- [10] Anthoni P M, Beverly E L, Michael H U, Richard J V. Variation of net radiation over heterogeneous surface: measurements and simulation in a juniper-sagebrush ecosystem [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2000, **102**: 275—286.
- [11] Kimes D S, Smith J A, Link L E. Thermal IR exitance of a plant canopy [J]. *Applied Optics*, 1981, **20**: 623—632.
- [12] Prévot L. Modélisation des échanges radiatifs au sein des couverts végétaux. Application à la télédétection. Validation sur un couvert de

- mais[D], Doctoral Thesis, University of Paris VI, 1985.
- [13] Paw U K T, Ustin S L, Zhang C. Anisotropy of thermal infrared exitance in sunflower canopies[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 1989, **47**: 189—203.
- [14] Norman J M, Becker F. Terminology in thermal infrared Remote Sensing of natural surfaces[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1995, **12**: 159—173.
- [15] Olioso Albert. Estimating the difference between brightness and surface temperature for a vegetal canopy[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 1995, **72**: 237—242.
- [16] Jacob, F. Utilization de la télédétection courtes longueurs d'onde et infrarouge thermique à haute résolution spatiale pour l'estimation des flux d'énergie à l'échelle de la parcelle agricole [D]. L'Université Toulouse III, 1999.

Study on the Classification of Component Brightness Temperature Over a Maize Canopy

YU Tao¹, GU Xingfa², TIAN Guo-liang¹, Michel Legrand³, Jean-Francois Hanocq²,
Roland Bosseno², CAI Hongyan⁴

(1. LARSIS, 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: This paper researches on the methodology for brightness temperature component classification and temporal variations of these component values by an in situ experiment dedicated to maize canopy brightness temperature distribution. Results show the number of components and their brightness temperature values vary with time of day and biomass density. Three components of vegetation, sunlit and shaded soil could be identified at midday during the measuring period. When the canopy is highly covered, vegetation's brightness temperature has a wider range, and the components are difficult to be distinguished. The interpretation of these phenomena will be conceived in the further research.

Key words: maize canopy; classification; component brightness temperature