

文章编号: 1007 4619(2006) 05 0661-09

城市简单目标方向亮温研究

余 涛^{1,2}, 田启燕³, 顾行发^{1,2,4}, 王 进^{1,2}, 刘 强¹, 阎广建⁵

(1. 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101;

3. 北京师范大学, 北京 100875; 4. 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054

5. 遥感科学国家重点实验室 北京师范大学, 北京 100875)

摘 要: 本研究以哈尔滨野外试验数据为基础, 分析了城市表面亮温分布地表测量中, 典型目标选择、目标亮温变化以及分类等方面的问题。结果表明, 城市典型目标的选择, 不仅需用材料特性划分, 而且还需考虑阳光与周围环境的变化。此外, 城市典型目标的亮温在数值上均随测量时间改变, 并且变化比较复杂, 需深入研究。在以上实验分析的基础上, 建立了一种简单情况下的城市方向亮温模拟模型。模型中, 抓住部分建筑区楼房以行结构为主要空间分布特征的特点, 将建筑物进行简化, 得到了不同观测角度下城市方向亮温的数值。模拟结果显示, 方向亮温极化图中出现了条带结构, 这与实验结果很吻合, 但未能发现热点效应, 需要进一步深入研究。

关键词: 城市; 方向亮度温度; 分类; 模型

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

Modelling Directional Brightness Temperature over a Simple Typical Structure of Urban Areas

YU Tao^{1,2}, TIAN Qiyan³, GU Xingfa^{1,2,4}, WANG Jin^{1,2}, LIU Qiang¹, YAN Guangjian⁵

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China

2. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China

3. Beijing Normal University, Beijing 100875, China

4. School of Automation Engineering, the University of Electronic Science and Technology of China, Sichuan Chengdu 610054, China

5. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100875, China)

Abstract This paper focuses on the methodology for brightness temperature component selection and temporal variations of these component values by an in situ experiment dedicated to urban brightness temperature distribution. Results reveal that the number of typical objects of an urban area and their brightness temperature values vary with time of day due to the complex of urban thermal feature and structures. More thorough analysis is needed in the further research. A modelling study on the variations of directional brightness temperature (DBT) for row-structured building arrays was carried out with the help of the ground observations over urban areas.

The model assumes that the DBT is a function of component brightness temperatures and their directional fractions. Their fractions in the scene depend on sun-view geometry and the geometry of buildings. In the simulation of urban areas DBT, the results reveal an evident row-direction-oriented stripe in DBT polar map, where no hot spot appears. As an initial attempt, the research only focus on the simplified conditions, more complicated structure may be considered in the further researches.

收稿日期: 2006-04-10 修订日期: 2006-04-26

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (编号: G2000077902), 国家高技术研究发展计划项目 (编号: 2002AA130010), 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (编号: CX020011) 资助, 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJ950401)。

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。E-mail: yutao@irsa.ac.cn

At last we compared the solution of model with the experiment solution. The research showed that the solution revealed the phenomenon in experiment to a certain extent.

Key words urban area; directional brightness temperature; classification; modeling

1 引 言

随着大型城市建设的飞速发展,超高层建筑的数目日益增多,总体建筑高度不断提升。高层建筑对城市环境气候产生的影响日益显著,其中之一是大型建筑群的能耗过大,如空调、取暖和照明等需要较大的能量供应,从而产生大量的热量,改变了区域原有的热平衡关系,加剧了城市的热岛现象,恶化了市民的生存环境。为了使城市在未来的发展中保持良好的热环境,形成人与自然、与环境协调发展的局面,保证城市可持续发展,有必要利用遥感技术对城市热景观做出全面定量的观测,并在此基础上开展热状态的评价工作。几十年来,城市热红外遥感定量研究不断发展,并广泛应用在城市生态环境分析中,如利用卫星收集地面表面温度分布,研究城市气候、城市地面热场对大气污染的影响、城市空间结构和城市规模发展变化等^[1-6]。

近年来,作为遥感科学研究的一个新的重要组成,反映目标三维热结构特性的多角度遥感,为城市热环境监测提供了更大的希望。大量的文献表明,由于视场角的变化,多个角度的观测,传感器可以获得同一目标比较全面的信息,相对于单角度影像,提供了更多的目标结构特性和温度分布特性。为了能有效地利用多角度遥感提供的目标信息,目标温度的获取需建立在遥感量化反演模型的基础上。由于城市目标的三维空间结构、目标材料热特性的不同和地表能量交换的复杂性和多样性,造成了城市热红外辐射的复杂空间分布。在实际模型模拟应用中,通常将目标亮温进行分类处理,形成有限个组,以便代入模型,展开进一步的定量分析^[7,8]。

遥感传感器可以直接获取的物理参数是地表目标的热辐射,用辐射亮温表示。目前已有多种方法对城市亮温空间分布进行分类。一般地,以温度范围划分,或以物质特征划分,或以这两者的结合进行划分。

在研究农作物热辐射方向特性中, François 等人^[9]将农田分为土壤与植被两个类别。Kimes 等人^[7]将农田分为被阳光照亮的土壤与植被、暗影中的土壤与植被等 4 个分量。Kustas 等人^[8]在棉花地温度分类研究中将棉花地温度分为植被、被阳光照

亮的土壤与暗影中的土壤等三个分量。

植被温度分类分析中,许多研究者已经揭示出组分的数值和分布随观测时间产生变化。Kimes^[7]和 Kustas 等人^[8]的农田温度观测显示,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而改变,但浮动范围分别缩小为 20℃ 和 10℃。

相对于农田温度分类研究,由于城市热场变化的复杂性,以城市为研究目标的温度分类研究还未见明确的结果。2003 年作者利用一套热红外测温仪对哈尔滨工业大学图书馆及周边区域的亮温分布及随时间的变化进行了观测。本项研究的目的是研究部分城市区域组分温度分类的可行性,并对组分温度在数目和数值上随观测时间的变化规律作初步的探讨。

另一方面,城市热场受人类活动及气候条件等多个因素的影响,表现出非常复杂的变化特点。经过几十年的发展,利用遥感手段监测城市热场变化已取得了长足的进步,并在此基础上,开展了城市生态等多个方面的研究。例如,陈云浩、周红妹等运用遥感和 GIS 手段对城市热场分布规律和城市热环境的空间格局进行了研究。Gerhard Meiste 等建立了大尺度下的城市地区双向反射率模型,结果表明有热点效应产生^[10]。Voog 和 Oke 等分析了地表结构对城市地表温度的影响^[11]。但是,针对城市目标三维空间结构的遥感应用理论与技术的发展存在某种程度的滞后,使目前尽管热红外遥感在城市环境应用中取得了某些进展,但发展缓慢,未能脱离定性描述和建立简单统计关系的范畴^[12-15]。

本研究针对居民区行状排列建筑物,建立了一种简单情况下的城市方向亮温模拟模型。模型中,提取行结构空间分布特点,将建筑表面亮温进行简单分类,得到不同观测角度下城市方向亮温的数值,对遥感定量监测城市复杂表面热辐射分布做了初步的探索。

2 实验与分析

实验于 2003 年 8 月 13 日 9 时至 18 时在哈尔滨工业大学图书馆及周边区域开展。测量目标包括了图书馆不同朝向的墙体、窗户玻璃、广场砖地面、路边柳树、草地、沥青马路等。在整个观测阶段,由于太阳

位置、目标几何结构和周围环境等原因, 形成了明亮区与遮蔽区。其中, 被遮蔽的暗区的形成有多种原因, 图书馆墙体和柳树的暗区由朝向形成, 广场砖地面和沥青马路的暗区由柳树遮挡形成, 草地的暗区由楼体遮挡形成。在测量中对每一个目标被阳光照到的亮区域和被遮蔽的暗区域分别进行了观测。

对实验结果主要分两方面分析, 一是对城市地表温度分布进行分类, 另一是给出一种简单分类下的城市方向亮温模拟模型。

2.1 实验定标

测量当日为晴空天气, 有时有少量的对流云, 测量中最大云量小于 15%。图 1 所示为当日空气温度随时间变化的曲线。

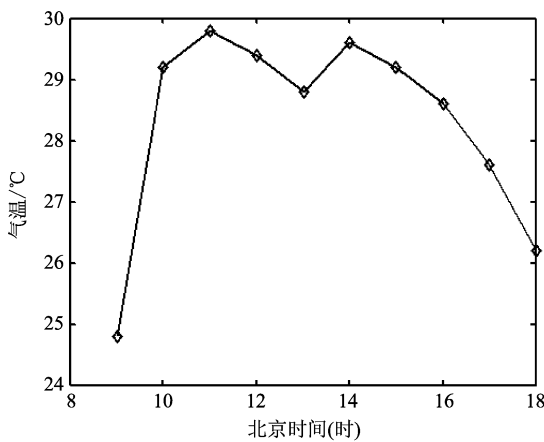


图 1 测量当日空气温度随时间的变化曲线

Fig 1 The variational curve of air temperature along with time on experiment day

测量采用的设备为 M inolta HT11D 热红外点温计, 其视场角为 2°, 波段范围为 8—14 μ m。用水体作测量前的定标, 在 25°C至 70°C的测量范围内, 温度偏差小于 1°C(图 2)。

测量时, 传感器方向垂直于目标表面, 距目标约 5m, 这时的视场不大于 0.25m。每次观测持续约 20s, 取 3 次测量的平均值作为测量结果。

2.2 组分温度分类

图 3 显示的是不同目标温度随时间的变化趋势。其中, 图 3(a)为沥青路面和广场砖地面的温度变化曲线, 范围从 20°C到 50°C; 图 3(b)为草地和柳树的温度变化曲线, 范围从 15°C到 30°C; 图 3(c)为图书馆 4 个墙面的温度变化曲线, 范围从 15°C到 40°C; 图 3(d)为图书馆窗户玻璃的温度变化曲线,

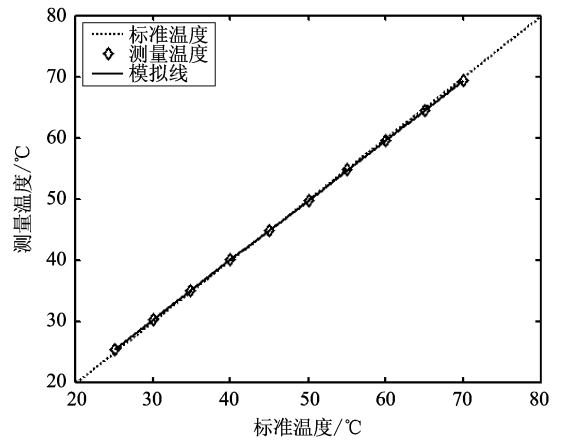


图 2 M inolta HT11D 热红外点温计定标曲线

Fig 2 The Calibration curve of M inolta HT11D

范围从 20°C到 35°C。

从数值大小和变化上分析, 沥青路面和图书馆朝南的墙面能达到最高的温度值, 并有最大的温度变化范围。沥青路面在整个观测期间的各个观测值均高于其他的目标, 在 13 时前后达到最大值 47°C。图书馆朝南墙面的温度在所有朝向的墙面中的温度为最高, 在 13 时前后达到最大值 40°C。对于其他方向的墙面, 无论被阳光直接照射或处于遮蔽状态, 温度的变化比较平缓, 互相之间的温差也比较小。对于图书馆墙面上的玻璃窗, 温度变化在大多数测量中趋于一致, 互相之间的差别较小, 除南向玻璃温度稍高外, 基本不随朝向改变。对于草地和柳树等植被, 温度变化与墙面上的玻璃窗相近, 但变化幅度较宽。

对于由于阳光照射产生亮暗变化带来的影响, 沥青路面表现得最为明显。中午被照亮的路面比被遮挡路面的温度高 17°C。相反地, 对于柳树, 亮暗两个部分的温差就非常不明显, 最大温度差小于 2°C。至于草地, 阳光产生的影响介于两者之间, 观测期间的温差在 5°C左右。阳光对墙体和玻璃的影响比较复杂, 由于受测量条件所限, 未能得到同一面墙体明暗两种情况同时出现的全程观测结果。对于东面朝向的墙体, 有一段时间明暗两种情况同时出现, 温差很小, 仅 2°C左右。

以上测量均在 11 时左右出现了一个向下的波动。除沥青路面的温度表现不明显外, 其余各目标的温度浮动均非常明显。与图 1 气温随时间的变化比较, 地表温度与气温表现出的变化趋势稍有不同。气温在 11 时达到了最大值, 随后逐渐下降, 在 13 时左右出现了一个极小值。这可能与城市目标温度变

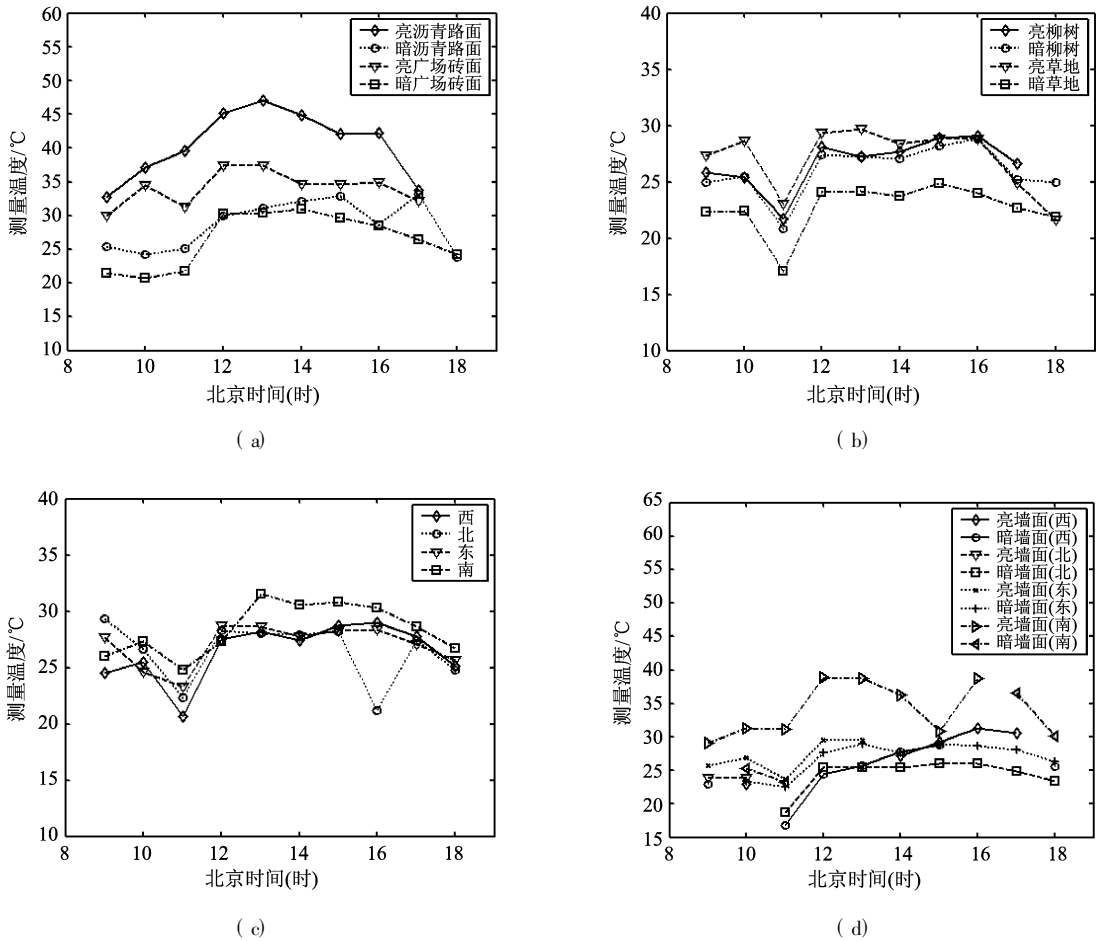


图 3 不同目标温度随时间的变化趋势
 (a) 沥青路面和广场砖地面; (b) 草地和柳树; (c) 图书馆 4 个墙面; (d) 图书馆窗户玻璃

Fig 3 The variational trend of different objects' temperature

(a) Presents asphalt road and brick road in square; (b) Presents grass and willow; (c) Presents four wall of library; (d) Presents window of library

化比气温变化滞后有关。

基于以上分析,考虑空间位置特性和温度变化特性,城市区域亮温组分的划分可分为两个部分:楼体和地面。对于楼体,由于不同方向的墙面有不同的变化趋势,一天中大部分时段接受阳光照射的南向墙体可以分为一类,其他各面墙体可归为另一类。窗体与楼顶也各归为一类。以沥青铺顶的楼顶,其温度变化可参考沥青路面的情况,再分为一类。对于地面,由于沥青路面、砖地、草地亮暗情况差异较大,可按阳光照射情况划分,亮的沥青路面、砖地等材料可大致归为一类,暗的沥青路面、砖地可大致归为一类。同样草地分为亮暗两类,而柳树与亮草归为一类。这样,建筑物墙体温度分为 4 类,地面根据目标热特性而定,按亮暗情况划分,本例中也分为 4 类。每类的温度偏差如图 4 所示。其中,图 4(a)表示的是除南墙以外,其他墙面温度之间的关系,图中

以北向暗墙的温度为横坐标,各个墙面温度为纵坐标;图 4(b)表示的是不同朝向窗体玻璃温度之间的关系,图中以西向玻璃的温度为横坐标,其他朝向的玻璃温度为纵坐标;图 4(c)和图 4(d)分别表示的是被阳光照射和蔽阴处地表沥青和砖面温度之间的关系;图 4(c)中以亮砖面的温度变化为横坐标;图 4(d)中以暗砖面的温度变化为横坐标;图 4(e)表示的是亮草与柳树温度变化之间的关系,图中以亮草的温度变化为横坐标。

当然,由于本次城市亮温分类分析是以一处测量为基础,并只开展了一天的试验,不具有广泛的代表性,以后将在大量试验数据基础上作更进一步的分析。

2.3 航空方向特性测量

根据对哈尔滨市做的航空遥感测量(图 5),对

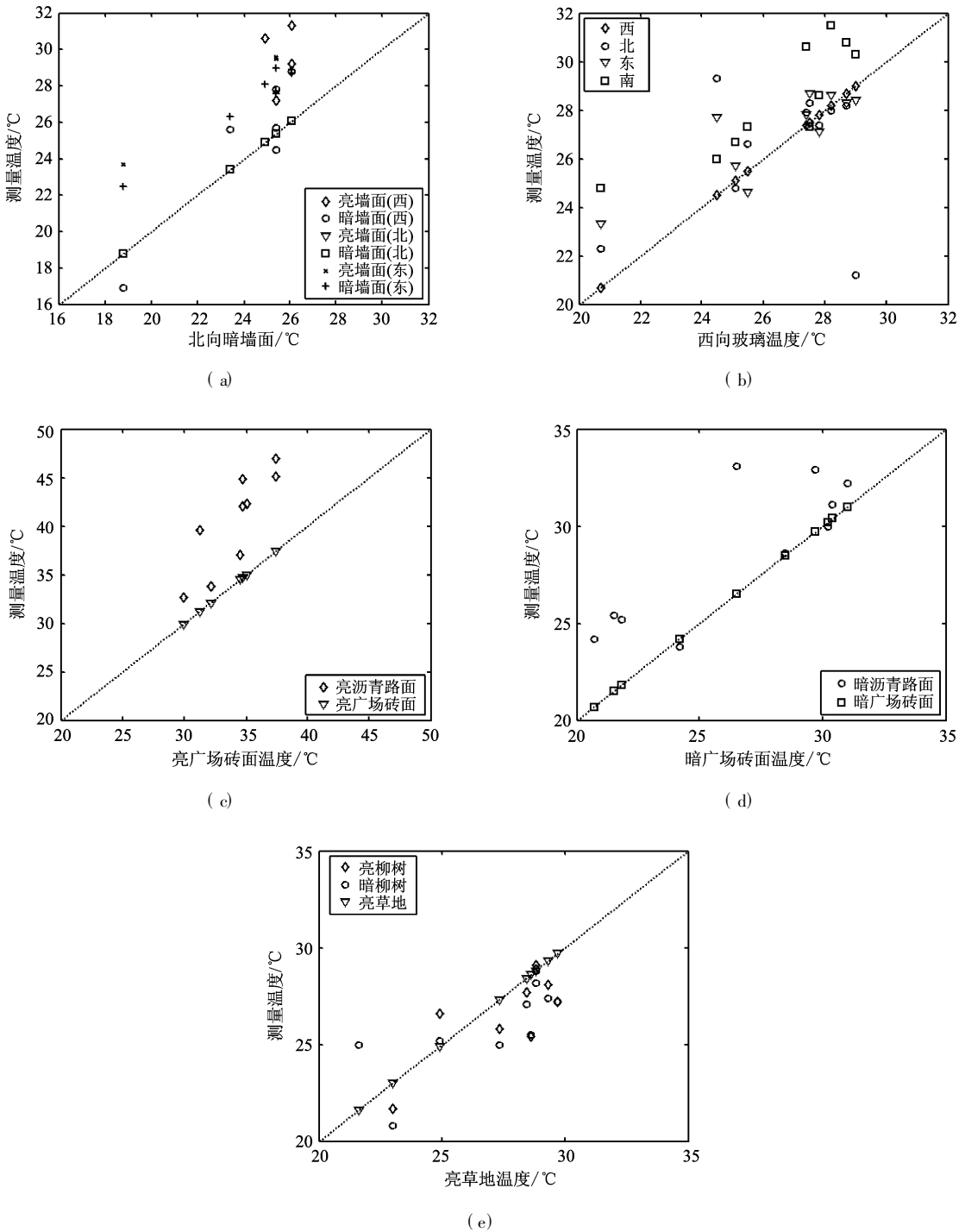


图 4 各类目标温度变化的关系

Fig 4 The relation between kinds of variational temperature

同一目标在不同角度下的方向亮温作了比较。图 6 所示为观测天顶角在 -45° 到 45° 之间时同一类目标的平均亮温值曲线, 可以发现, 在和太阳同一方向观测时目标亮温值随观测天顶角减小而增大, 在近太阳天顶角处观测时达到最大值, 而在太阳的相反方向观测时亮温值又随观测天顶角增大而减小。

3 城市楼区热红外辐射方向特性模拟模型

对于城市地表状况, 应用前面分析的目标亮温分类方法将导致模型非常复杂, 这里仅做比较粗略

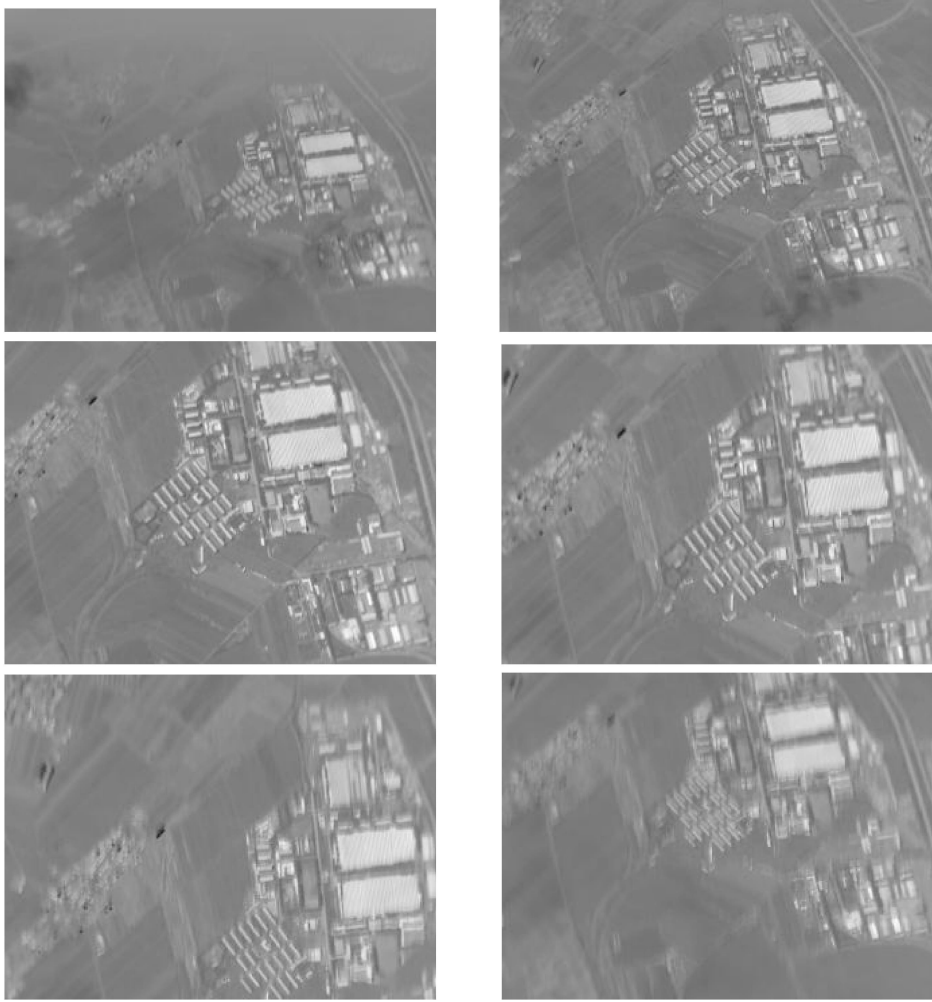


图 5 观测天顶角依次为 -45° , -33.75° , -22.5° , -11.25° , 0° , 11.25° 时哈尔滨市热红外航空图像
 Fig 5 The thermal infrared navigation images in which observation zenith is -45° , -33.75° , -22.5° , -11.25° , 0° and 11.25° in Harbin City

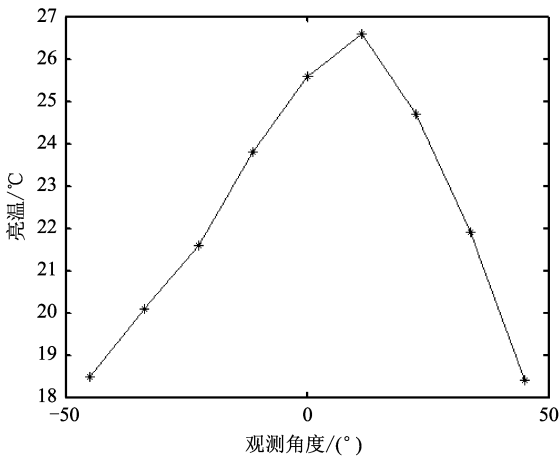


图 6 同一类目标随观测天顶角变化时的亮温值
 Fig 6 The brightness temperature of the same objects with observation zenith

的分类。对目标进行简化:成排的楼房可被简化处理成截面为矩形的无限长实心墙体,这些墙体几何尺寸相同,相互之间距离相等,互相平行,图 7 给出了在垂直于行方向上的平面内的坐标和变量的定义。其中 x 轴的原点,设为建筑物的左边墙, H 为建筑物的高, a 定义为建筑物的宽度, L 为两排建筑物之间的间距,太阳光照的方向与传感器观测方向在平面中的投影分别为 α_s 和 α_o 。

同样地,对建筑物温度的分布也需作一定的简化。假设地面由一种材料组成,其温度可以根据阳光照射情况分为两个组分,即被阳光照亮的地面和被建筑物遮挡的暗地面,每一个组分有不同的温度平均值。对于建筑物,其温度可以分为三个组分:直接受阳光照射的楼顶、被阳光照亮的墙面和阳光照不到的暗墙体。这样某一角度目标的方向亮温 T 为:

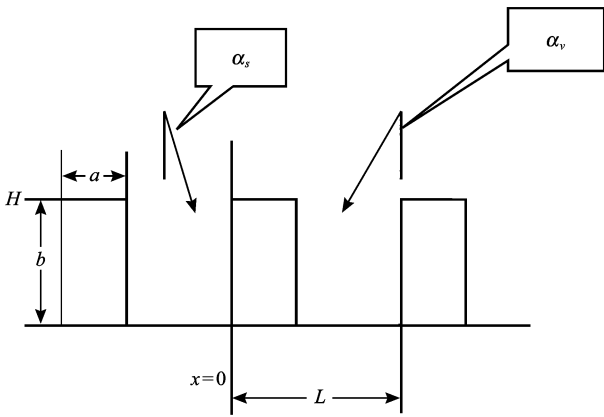


图 7 在垂直于行方向上的平面内的坐标和变量的定义
Fig 7 Coordinate and define of variable in plane perpendicular to row direction

$$T^4 = f_{sb} T_{sb}^4 + f_{ss} T_{ss}^4 + f_{wb} T_{wb}^4 + f_{wt} T_{wt}^4 + f_{ws} T_{ws}^4$$

式中, T_{sb} , T_{ss} , T_{wb} , T_{wt} , T_{ws} 分别为亮地面、暗地面、亮墙面、亮楼顶、暗墙面的组分温度; f_{sb} , f_{ss} , f_{wb} , f_{wt} , f_{ws} 为各组分在传感器视场中的权重。

经过以上简化, 模型的输入包含了三部分参数: 首先是太阳位置参数 (天顶角 α 和方位角 ϕ) 和楼

体朝向, 反映太阳、传感器、目标三者之间的空间位置关系; 其次是目标的几何尺寸 (L , a , b) 和组分温度值 (T_{sb} , T_{ss} , T_{wb} , T_{wt} , T_{ws}), 反映目标的结构特性和物理热特性。表 1 列出了模型输入的模拟值。其中, 地面平均亮温高于建筑物的平均亮温。

图 8 为行状建筑物目标的热红外亮温极化图。星号代表了太阳的位置, 每一个点表示了传感器观测位置, 颜色表示了观测到的亮温数值。观测的天顶角和方位角的变化范围分别为 $0-70^\circ$ 和 $0-360^\circ$ 。楼体朝向为 $0-180^\circ$ 方向。图中的亮温分布沿着 $0-180^\circ$ 方向呈条带状。由于地表温度大于墙体温度, 当以小角度顺着楼向观测时, 大量的温度较高的地表在传感器的视场中, 所以方向亮温就较高。当以较大角度观测时, 楼体遮挡住温度较高的地表, 使得视场基本为温度较低的楼体, 这样, 方向亮温值就较低。由图中可以看出, 未有明显的温度较高的热点出现在太阳方向, 取而代之的是一条穿过太阳位置的温度较高的弧线。从弧线所穿过的所有位置代表的观测角度观测, 可以看到温度较高的地面、墙体和楼顶。这样, 这些角度观测的亮度温度值也就比较高。

表 1 模型输入参数值

Table 1 Parameters input model

α ($^\circ$)	ϕ ($^\circ$)	L	a	b	T_{sb} / $^\circ\text{C}$	T_{ss} / $^\circ\text{C}$	T_{wt} / $^\circ\text{C}$	T_{wb} / $^\circ\text{C}$	T_{ws} / $^\circ\text{C}$
30	30	1	0.3	0.5	45	30	35	31	27

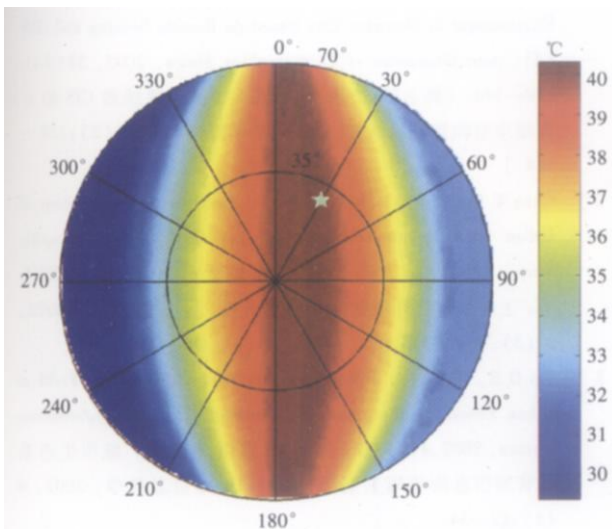


图 8 行状建筑物目标的热红外亮温极化图, 地面平均亮温高于建筑物的平均亮温

Fig 8 Polar map for thermal infrared brightness temperature of row-oriented structure objects average temperature of ground more than average temperature of objects

对于相反情况, 当楼体平均亮温大于地面温度, 模型输入参数如表 2 所示时, 得到了温度分布相反的行状建筑物目标热红外亮温极化图 (图 9)。当以小角度顺着楼向观测时, 方向亮温较低。特别是逆着太阳方向观测, 当视场充满了楼体暗面和地表暗面的时候, 温度值达到最低。而当以较大角度观测时, 方向亮温值较高。特别是顺着太阳方向观测, 在视场中, 随着楼体顶部在视场中的权重加大, 地表权重的减小及消失, 温度达到了最大值。

4 比较与分析

本文对组分温度在数目和数值上随观测时间的变化规律做了初步的探讨。对于楼体把南向墙体分为一类; 其他各面墙体归为另一类, 窗体与楼顶各归为一类; 对于地面, 把亮的沥青路面、砖地等材料大致归为一类, 暗的沥青路面、砖地大致归为一类; 草

表 2 模型输入参数值

Table 2 Parameters input model

α ($^{\circ}$)	ϕ ($^{\circ}$)	L	a	b	T_b ($^{\circ}\text{C}$)	T_{ss} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{wt} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{wb} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{ws} ($^{\circ}\text{C}$)
30	30	1	0.3	0.5	30	15	35	31	27

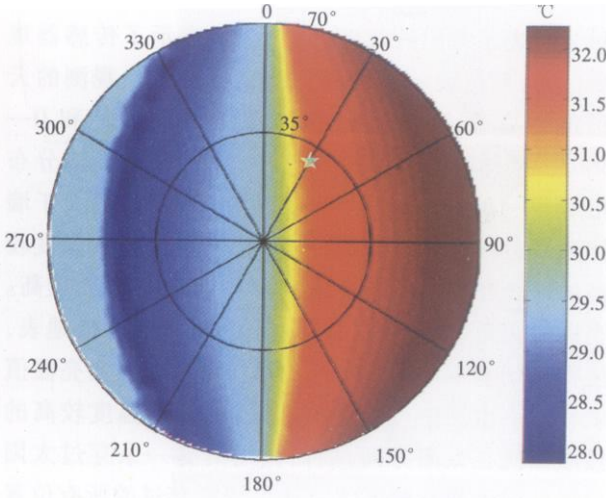


图 9 行状建筑物目标的热红外亮温极化图，
地面平均亮温低于建筑物的平均亮温

Fig 9 Polar map for thermal infrared brightness temperature
of row-oriented structure objects, average temperature of
ground less than average temperature of objects

地分为亮暗两类，而柳树与亮草归为一类。这样，建筑物墙体温度分为 4 类，地面根据目标热特性而定，按亮暗情况划分，本例中也分为 4 类。这样归类后为建立楼区的方向亮温模型提供了简单的方法，但组分还是很多，在计算各组分在视场中所占比例时会比较复杂，这是今后需要考虑的。

楼区的方向亮温模拟模型把视场中的目标分成亮土地、暗土地、亮楼顶、亮墙面和暗墙面，分别计算各组分比例，得到整个楼区的亮温分布情况。这里的组分与上面的分类相比已经简化了很多，必然带来一些误差，怎样减少这些误差也是今后要讨论的问题。模型模拟的结果在热红外亮温极化图中并没有热点出现，其主要原因可能是城市热岛效应掩盖了楼体本身与地面（包括草地、树木等）的温度差别。

比较模型模拟与航空实验测量的结果，可以发现结果很吻合。顺着太阳方向观测时亮温值随天顶角减小而变大，在近太阳天顶角方向时亮温值达到最大，然后又随着天顶角的增大减小。这与极化图所表现的现象相同。

5 结 论

本研究以哈尔滨野外试验数据为基础，对城市表面的亮温分布情况进行了分析，结果表明，城市典型目标的选择，需要把目标的材料特性和阳光与周围环境的变化结合起来考虑。而且，城市典型目标的亮温在数值上均随测量时间改变，并且变化比较复杂，需进一步深入研究。

另外，通过对城市建筑温度分布进行有效的分类，建立了一种简单情况下的城市方向亮温模拟模型。模型针对以行结构为主要空间分布特征的部分建筑区楼房，对建筑表面亮温进行简单分类，得到不同观测角度下城市方向亮温的数值。模拟结果显示，方向亮温极化图中出现了条带结构，但未能发现热点效应，进一步深入地模拟研究将在后期展开。

最后，把模型结果和实验测量结果作了比较，结果显示，模型很好地反映了实验测量观测到的现象。

参 考 文 献 (References)

- [1] Chen Y H, Shi P J, Li X B. Research on Spatial Thermal Environment in Shanghai City Based on Remote Sensing and GIS [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica* 2002, 31(2): 139-144 [陈云浩, 史培军, 李晓兵. 基于遥感和 GIS 的上海城市空间热环境研究 [J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 139-144.]
- [2] Chen Y H, Li X B, Shi P J et al. Study on Spatial Pattern of Urban Heat Environment in Shanghai City [J]. *Geographic Sciences* 2002, 22(3): 317-323 [陈云浩, 李晓兵, 史培军等. 上海城市热环境的空间格局分析 [J]. 地理科学, 2002, 22(3): 317-323.]
- [3] Shi D R, Tao K H. Researches into Thermal Radiation Field of Urban Ecosystem Management Information [J]. *Geo-information Sciences* 2002, 4(1): 32-34. [石登荣, 陶康华. 城市生态系统管理信息的热辐射场研究 [J]. 地球信息科学, 2002, 4(1): 32-34.]
- [4] Qian W, Tang M F, Zheng H L. Thermal Comfort Research of Urban Outdoor Environment [J]. *Chongqing Environmental Sciences* 2002, 24(2): 88-89 [钱炜, 唐鸣放, 郑怀礼. 城市户外热环境的舒适性研究 [J]. 重庆环境科学, 2002, 24(2): 88-89.]
- [5] Tao K H. Symptom and Countermeasure of Urban Ecological

- Development in Shanghai [A]. China Association For Science and Technology Annual Conference in 2000 [C]. Beijing Science Press, 2000 [陶康华. 上海城市发展生态的症结与对策 [A]. 2000 年中国科协年会论文集 [C]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [6] Xu X R, Chen L F, Zhuang J L. Component Temperatures Evolution Inversion Method for Mixed Pixels Based on Multangular Thermal Infrared Remote Sensing [J]. *Science in China* 2001, **31**(1): 81—88 [徐希孺, 陈良富, 庄家礼. 基于多角度热红外遥感的混合像元组分温度演化反演方法 [J]. *中国科学*, 2001, **31**(1): 81—88]
- [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 G, Ouffé G, Pévot 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] Gerhard Meister, Andre Rothkirch, Hartwig Spitzner et al. Large scale Bidirectional Reflectance Model for Urban Areas [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**: 1927—1942
- [11] Voogt J A, Oke T R. Effects of Urban Surface Geometry on Remotely sensed Surface Temperature [J]. *International Journal of Remote Sensing* 1998, **19**: 895—920.
- [12] Zhou H M, Ge W Q, Zhou C H, et al. The Surveying on Thermal Distribution in Urban Based on GIS and Remote Sensing [J]. *Journal of Geographical Sciences* 2001, **56**(2): 189—197 [周红妹, 葛伟强, 周成虎等. 基于遥感和 GIS 的城市热场分布规律研究 [J]. *地理学报*, 2001, **56**(2): 189—197.]
- [13] Xu G H. Basic Science Research on Thermal Infrared Remote Sensing [J]. *Science in China* 2000, **30**(Supp): 1—50. [徐冠华. 论热红外遥感中的基础研究 [J]. *中国科学*, 2000, **30**(增刊): 1—50]
- [14] Voogt J A, Oke T R. Thermal Remote Sensing of Urban Climates [J]. *Remote Sensing of Environment* 2003, **86**: 379—384.
- [15] Liso Albert. Estimating the Difference between Brightness and Surface Temperature for a Vegetal Canopy [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 1995, **72**: 237—242.