

对于定量热红外遥感的一些思考

张仁华

摘要 作者根据在热红外遥感工作中的长期实践经验,介绍了热红外遥感的现状,特别指出了定量反演地表温度的难点——地物比辐射率的测定和区域范围内的比辐射率估算。文中提出了定量热红外遥感研究中常见的一些问题。最后,讨论了定量热红外遥感的未来发展趋势和目前现实工作的对策,旨在抛砖引玉,以求得热红外定量遥感的发展。

关键词 热红外遥感 地表温度

分类号 TP 722.5

SOME THINKING ON QUANTIATIVE THERMAL INFRARED REMOTE SENSING

Zhang Renhua

(Institute of Geography, Chinese Academy of Science Beijing 100101)

Abstract In terms of the practice of author for long time, development and situation in thermal infrared remote sensing research field were introduced in the paper. Particularly, major difficult in quantitatively investing of ground surface temperature, measurement of emissivity and its estimation in regional scale, was presented. Some problems in the quantitative application of thermal infrared remote sensing for some researchers were also pointed out. Finally, developing tendency in future and countermeasure for recent works were discussed. The goal in the paper is "to cast brick and to attract jade" in order to promote the development in quantitative thermal infrared remote sensing.

Key words Thermal infrared remote sensing Surface temperature

1 生存环境的要素

定量热红外遥感研究的主要目的是精确地获取地表(包括植被、土壤、岩石和水体的表面)温度。作为环境温度之一的空气温度虽不能被太阳辐射所直接加温,但是太阳辐射首先加热地表后通过大气湍流和地表非大气窗口的热红外辐射间接地加热空气。因此,地表温度是环境温度的主体。

环境温度是人类生存环境的基本要素。人类生活在地球上，与环境温度的关系非常密切。天气的寒暑涉及到每个人的生活，气温过高或过低，人们都会感到不舒服。环境温度同样影响到植物的生长，春天当日平均气温超过 12°C ，植物就开始生长。生命与环境的温度确实息息相关。自然界的许多信息都与温度有关，作物冠层温度蕴含了作物水分和土壤水分信息〔1〕。土壤水分含量是土壤热惯量的基本变量，而土壤热惯量的最基本参数就是地表最高温度和最低温度〔2,3〕。作物冠层温度、作物叶子上气孔的开启程度与土壤水分构成一条信息链。土壤水分状况与地温信息密切相关。森林火灾的检测，地热位置的判别，军事伪装的应用，石油和铀矿的寻找都离不开地物表面温度信息。从70年代末，上述的热红外遥感应用已经广泛地开展，热红外遥感与可见光遥感几乎同时引起我国各应用部门的关注。地表温度的定量遥感研究已被列为我国攀登项目的研究任务〔4〕。随着地学定量化的发展，热红外遥感应用也更加广泛，同时对它的要求也随之更加严格，将从定性、半定量研究向量化全面铺开。美国宇航局和我国科技部几乎同时立项研究地表温度，绝对精度拟达到 1K 〔5〕。从当前世界水平衡量，这是相当难以攻克科学堡垒，它的攻克将全面推动我国相关研究领域的进展，将大幅度提高大气环流模型(GCM)的预报精度，将使区域水平衡分量的估算精度推向一个新的高度。同时，也必将使遥感作物估产的精度上一个新的台阶。

2 热量平衡的产物

地表温度的重要性及其丰富的内涵并不是为所有人所了解。在目前人们以全球和区域尺度研究生存环境及其对策之际，深刻理解生存热环境和热红外遥感的核心参数——地表温度的概念和作用是十分必要的。

控制地球系统热状况的基本能源是辐射通量。电磁波辐射是由于电场和磁场的大小和方向随时间变化而产生的。它也是物体表面加速的电荷发射的辐射，有两种原因产生这种加速运动的电荷，从而导致两种发射过程：一种是热发射，是指根据物体自身的平衡问题所产生的发射辐射，是直接发射，其平衡温度取决于分子运动的平均动能；另一种是冷发射，是被外部能源激发而产生的间接辐射。在被动遥感中，冷发射物体受太阳照射后，改变物体表面电荷的加速从而导致发射，这种发射是一种再发射，这一过程相当于反射〔6〕。

热红外遥感传感器瞄准被测目标物的时候，所接收到的信号包括两部分，一部分是被测物体发射的热发射，另一部分是由于地物的比辐射率不等于1而反射了环境辐射的冷发射。这两部分混在一起，我们称为表观温度(也称辐射温度)。为了求得地表真实温度，还必须知道地物的比辐射率和环境辐照度。换言之，影响地表温度的基本因素有三个：地物的辐射温度、比辐射率和环境辐照度。地表各种入射辐射和出射辐射的矢量总和构成了净辐射，也称辐射平衡。人们习惯以温度来衡量热量，而地表温度不仅取决于净辐射，而且取决于热量平衡中的其他三个分量：大气湍流所引起的显热通量，地表水分蒸发蒸腾所引起的潜热通量和土壤性质控制的土壤热通量〔7〕。

由此可知，地表温度是地表热量平衡的产物。它蕴含了丰富的地学信息，是地面与空气界面的能量计数器。地表吸收各种辐射而增温，以及地表自身发射热发射而降温均首先从地表开始，然后通过土壤传导到土壤深层。地表水份通过蒸发逸向空气，带走了潜热，引起地表温度的降低。因而地表温度包含了地表热量平衡各分量的信息。正确获取地表温度或通过上述三个要素反演地表温度，无疑成为热红外遥感的

主要研究内容。

3 困扰人们的难点

热红外遥感的起步虽然并不晚于可见光和近红外遥感，但是取得的进展却落后于可见光和近红外遥感，其主要原因有以下三点：

其一，热红外遥感理论基础是地表热量平衡。在地表热量平衡方程中，除了辐射通量外，还有大气湍流通量，水汽蒸发通量和土壤热通量的总量。在地表热量平衡中，每一分量的变化均可造成地表温度的变化。也就是说，引起地表温度变化的不仅仅是太阳辐射和大气辐射，还有大气湍流和地表性质。因此，地面温度的波动幅度和远远大于太阳辐射的波动幅度。这样，要获得具有时间与空间代表性的真实地表温度就比较困难〔6〕。

其二，在影响地表温度的三大要素中，比辐射率是很难测定的。也许有人会说，把被测物和黑体一起放进恒温箱里进行测定就可以了，但这样做是不行的，因为恒温箱的表面温度与被测物的温度相等，被测物因比辐射率小于1而少发射的那部分辐射，完全由恒温箱的箱壁发射的环境辐射所补偿。这样，被测物就形成了“假黑体”，与真实黑体所测量到的表面温度完全一样。用这种方法根本测量不出比辐射率。因此，长期以来，热红外比辐射率的测定一直被视为难题。在实验室测定如此，在野外测定特别是大面积连续测定比辐射率，困难就更大〔6〕。

其三，热红外遥感传感器的空间分辨率通常远低于可见光及近红外波段。低空间分辨率必然造成不同组分复合的混合像元。这一方面引起理论上分析的困难，也就是对非同温混合像元的比辐射率定义的困难；另一方面，也引起实际测量和定量计算中的困难。以上难点，长期困扰着从事热红外定量遥感的科学家，以致于几十年来没有取得重大的突破〔6〕。

4 闯入误区的回声

在热红外遥感的具体应用中，有些遥感工作者存在着盲目乐观态度。他们缺乏地表温度是基于地表热量平衡这一基本概念，也看不到上述困扰人们的棘手问题，拿到热红外图像就急于开始进行定量分析，从而闯入误区，消耗了很大的精力却达不到预期目标。这种误区大致可以分为两种类型：

(1)把辐射温度视为地表真实温度，不考虑地表比辐射率和环境辐射照度，并把辐射温度和空气温度发生联系，计算地表辐射通量。据粗略计算，在通常的环境辐射照度下(天空平均温度为 20°C)，当比辐射率相差0.01时，辐射温度与真实温度就可相差 1°C 。通常，作物冠层等效比辐射率为0.965~0.970，土壤表面的等效比辐射率为0.90。因此，如果忽略比辐射率的影响，其作物冠层温度误差可达 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ ，土壤表面温度的误差可达 10°C 以上〔8〕。如果仅定性地分析热图像的相对变化，其误差的严重性还没有察觉出来，如果要在地表温度与空气温度相联系进行定量计算地表通量的话，其误差是惊人的，甚至对地表通量的方向也会作出相反的判断。

有部分遥感工作者虽然已经认识到地物比辐射率的重要性，但是他们不去或无法开展现场的测定，只是把已经发表的地物比辐射率数据和地物类型进行“对号入座”。当然，这已经比不考虑地物比辐射率的做法要前进一步，不过，由于地物比辐

射率随地物类型、地表粗糙度、表层含水量的变化而变化，因此“对号入座”的做法仍然会造成较大的误差。

(2)把热红外图像和可见光波段的图像进行同样处理，往往把影响地表温度的因子单一化、简单化，而认识不到地表温度是地表热量平衡系统中若干个因素共同作用的结果。最典型的例子是有些遥感工作者在开展地质找矿、地热异常分析和地震预报等工作时，把石油和铀矿的开采地区、地热异常地区或地震发生过地方的有关数据与热红外影像图进行相关分析，旨在通过这种相关性分析，寻找到地热资源，找到石油和其他矿产，甚至利用热图像简单地地震预报。他们之所以闯入不考虑地表热量平衡的误区，是因为他们把影响地表温度的要素仅考虑在土壤热通量方面。在上述热红外遥感应用中，如果研究区存在一定的增温机理，要使热红外遥感影像图产生热异常信息，也就是引起地表温度的变化，首先要引起土壤热通量的改变，即地表以下深处的热异常只能在土壤热通量上有所体现：石油从地层深处通过裂缝达到地表，改变土壤颜色和辐射平衡，从而改变土壤热通量；地震前由于板块的挤压而产生的热量也改变了土壤热通量。目前，有些地震工作者提出的地震前有温室气体逸出而增温，其原理也是因为温室气体降低了夜间的辐射冷却所致。然而，从前者分析可知，土壤热通量影响地表温度只是一小部分。在没有植被覆盖时可达辐射平衡的30%，而在有植被覆盖时只有5%~10%。即使已拥有相当大的热通量传递到了土壤表面，也会被大气湍流及地表蒸发所分流或淹没^[6]。因此，在地热异常地区，由于湍流、蒸发和非均匀云层的干扰可能显示不出地表温度的异常，相反，在没有地热异常的地区，由于土壤水分的匮乏、或干热风的侵袭、或非均匀云层的干扰、或者三者共同影响，倒有可能形成“热异常”的图像。由此可见，我们如果不以地表热量平衡为基础，全面分析引起地表温度的各个分量的影响，势必会进入以偏盖全的误区，得到的结果很可能是“相关系数很小”或“进展甚微”，或“试验失败”的回声。

5 未来发展趋势

热红外遥感是复杂的系统工程，虽然最近几十年的研究进展不是令人十分满意，但是向更精确的、定量化的发展趋势是不可逆转的，在这个领域的科学家们已经取得了很大成绩，归纳起来有以下几个方面：

(1)理论反演——地表温度和比辐射率的分离。正如前面的分析，热红外传感器所接受的信号包含了被测目标本身的辐射，大气下行辐射和被测物反射大气的上行辐射。如果结合热红外各个波段的大气光谱辐射，就可以构成单价 $N+1$ 个未知数的 N 个方程组。经过某种假设后，就可求出 $N+1$ 个未知数。也就是可将被测物的比辐射率和地表温度一起求解出来。这种工作已开展了多年。美国和日本科学家已经研制出模拟ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer，高级星载热发射反射成像辐射计)的航空测试系统^[9]，并开展了航天系统的模拟实验。1999年载有ASTER的卫星即将发射，预计该系统将为反演真实地表温度作出贡献。尽管对于上述直接反演的精度和确定性等方面有人持不同意见，认为 N 个方程中的信息源呈高度相关，它们的解很不稳定，应结合多角度遥感信息，各通道的独立性可得到改善。

(2)多角度、多光谱和多极化遥感的结合。这种结合为热红外遥感反演地表温度提供了更好的信息源。由于地表被测物的辐射均具有方向性的特点，因此从不同的方向可以获取不同的地物信息。多角度遥感(BRDF)已在可光、近红外的遥感中取得了令人瞩目的成功。利用多角度角遥感可以明显增加地物三度空间的信息量，可以改善大气

辐射纠正的能力。热红外遥感中的“劈窗技术”的发展就是一个突出的例子。

(3)比辐射率的直接测量。理论上，比辐射率的测定有两种途径，一种是比色法，这种方法目前只能使用在被测物的温度大于50℃ 的场合。因为信噪比太小，不适合常温地球表面的测量。然而，随着传感器技术的发展，如果能测量零度以下物体的话，这种比色法似可取得突破性的发展；另一种是亮度法。也是目前人们所采用的办法。在实验室里，利用封闭式黑体筒可以成功地测量地物的比辐射率。也可以利用主动和被动相结合的方法测量比辐射率，这种方法已在实验室里取得成功。利用二氧化碳激光，可以远距离测量地物的比辐射率〔11〕，目前，已经开始把这一技术向航空和航天遥感扩展，它的可行性已经得到证实，其目标是对区域范围的地物比辐射率进行直接测定。我们深信这种高技术的实现已为期不远了。这种比辐射率的直接测定，不仅可以直接获得比辐射率区域分布，而且可以获得比辐射率的多角度以及地物性质的有关信息〔11〕。这种研究思路的实现，对定量热红外遥感的推动作用巨大的。

(4)热红外激光雷达的开发和更广泛应用。利用主动热红外辐射源——红外激光雷达是推动热红外遥感发展的新思路，在空间分辨率和信息源的信息量方面将会得到突破性的发展，探测地物结构方面的能力也将大幅度的提高。美国已准备投资60亿美元制造这种红外激光雷达(LIDER)，这从一侧面证明了上述观点。

6 现实工作的对策

时间是宝贵的，谁也不愿意进入误区而耽误宝贵的研究时间。然而对于这么复杂的热红外遥感，应该如何有效地开展定量研究呢？特别是在上述的各项研究目标尚未达到之前，还不可能提供有效的方法和模型来开展精确的定量遥感应应用，而许多应用部门的要求正在呼唤遥感工作者。在这种过渡时期，我们应该如何现实地开展定量热红外遥感应应用研究？我们认为有如下几种工作可以大大改善目前的状况：

(1)普及使用黑体筒封闭法和折叠黑篷法，对关键的地物进行比辐射率的现场测定。如上所述，由于地物表面状态的千变万化，不可以利用已经发表的各种比辐射率的数据进行对号入座。而利用双黑体筒和折叠黑篷法开展比辐射率的测定是改善定量热红外遥感精度比较现实的措施。这种方法所需设备投资少，只要正确地掌握使用方法，可使地物的比辐射率测量精度达到0.01〔8〕。

(2)积极开展地面—卫星，地面—飞机的同步观测。在地面建立高、中、低三个温度均匀的地面靶标，当卫星飞过当地上空的时候，开展与遥感平台上相同波段、相似的传感器的地面同步观测，对航空和航天的热红外图像进行直接定标〔6〕。这种方法可以帮助绕过各种复杂的不确定过程，获取定量遥感所需的有用信息，从而定量反演地表温度。就像玻璃温度表的定标一样，人们不管玻璃毛细管的粗细以及水银膨胀系数，而是直接将玻璃温度表插入冰水溶合的容器中定出0℃，又插入沸水中订出100℃一样。

(3)在地面建立具有热红外辐射测量的台站网络，以及相辅助的各种地面热量平衡的测定。这种网络实际上已在中国科学院建立起来了。利用网络系统的支撑，可以获得定标热量平衡各个分量的比例，从而开展热红外信息的时间扩展与空间扩展，大大克服现有的不确定性。

作者简介：张仁华 研究员，长期从事定量热红外遥感研究，对定量反演地表温度

和地物比辐射的航空和航天遥感模型直接测定有兴趣。先后发表学术论文近60篇，专著三册。最近发表的专著“实验遥感模型及地面基础”获1997年中国科学院自然科学二等奖。

作者单位：张 仁 华(中国科学院地理研究所，北京 100101)

参 考 文 献

- [1] 张仁华.以热红外信息为基础的估算作物缺水指数的新模型.中国科学，B辑，1986，(4)
- [2] Price J C. Thermal inertia mapping, a new view of the earth. Journal of geophysical Research, 1982,87:2582 ~ 1590
- [3] Zhang Renhua. Investigation of remote sensing on soil moisture, Proceedings of 14th International Symposium on Environmental Remote Sensing, 1980
- [4] 李小文等.地球表面热量交换遥感定量研究.国家攀登项目合同，1998
- [5] NASA， Announcement
- [6] 张仁华.实验遥感模型及地面基础.北京：科学出版社，1996
- [7] 张仁华.真实地表温度的获取及普通玻璃温度表的初步订正.见：农田水分与能量试验.北京：科学出版社，1987
- [8] 张仁华，田国良.常温比辐射率测量.科学通报，1981，26(5)：297 ~ 300
- [9] Alan Gillespie et al. Temperature and emissivity separation from Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) image. International Land_Surface Temperature Workshop, September, 1996
- [10] 张仁华.利用二氧化碳激光较远距离测量物体比辐射率.科学通报，1985，30(23)：1444 ~ 1447
- [11] Zhang Renhua et al. Validation of possibility using CO₂ laser to measure territorial emissivity on airborne and spaceborne,Proc. IGARSS'97, 1997

收稿日期：1998-10-23。