

文章编号: 1001-8166(2005)10-1075-08

地表温度和地表辐射温度差值分析*

黄妙芬^{1,2}, 刘绍民², 刘素红², 朱启疆²

(1. 大连水产学院海洋工程学院, 辽宁 大连 116023; 2. 北京师范大学地理学与遥感科学学院遥感与地理信息系统研究中心, 遥感科学国家重点实验室, 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要: 依据实验数据, 研究利用标准黑体源对红外辐射计测定值进行标定的方法, 分析天空比辐射率的变化特性, 计算天空环境辐射, 与长波辐射计测定值进行比较, 推算考虑天空环境辐射和地表比辐射率后的地表温度, 研究地表温度与地表辐射温度的差值。结果表明: 地表辐射温度未经标准黑体源标定与标定后的差值绝对值在 0.1 ~ 1 之间; 天空比辐射率的变化范围为 0.75 ~ 0.85, 不同下垫面天空比辐射率日变化趋势非常一致; 用空气温湿度计算的天空环境辐射与长波辐射计测定值的差值较小, 相对误差平均为 3.1%, 但是天空³⁷热红外辐射计观测值与长波辐射计测定值差值较大, 相对误差平均值达到 38.1%; 地表温度高于地表辐射温度, 差值在 0.2 ~ 1.5 之间。

关键词: 红外辐射计, 天空比辐射率, 天空环境辐射, 地表温度, 地表辐射温度
中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

遥感定量化研究是遥感应用的一个难点和热点。目前, 遥感手段可直接提供的信息很有限, 除了可见光—近红外波段可以为我们提供地表反照率参数, 热红外波段可以为我们提供地表温度参数外, 其它参数都需要建立各种模型反演得到。因而, 只能围绕这两个基本参数建立各种遥感定量模型来反演我们所需的其它地表参数, 如土壤含水量、地表水热通量、叶绿素含量和叶面积指数等。这些模型中大都需要地表温度作为输入参数, 因而用遥感方法获取的地表温度精度直接影响到模型的估算精度。如何对遥感反演的地表温度精度进行验证, 这需要在地面试验场对地表温度进行同步观测。红外辐射计为遥感反演地表温度的精度验证、热红外遥感图像的定标, 以及建立地表通量的遥感定量模型提供了一种手段^[1]。

目前, 在与地表温度有关的问题研究中, 主要集

中在辐射表面温度的测量值随着观测角度的变化方面^[2-5], 以及用一点或若干点的测量值来代表某一范围的地表辐射温度的研究^[6-9]。在许多已经建立的遥感模型中, 一些学者直接用地表辐射温度^[8, 10, 11], 也有一些学者用考虑天空环境辐射和地表比辐射率后的地表温度^[12, 13]。关于地表辐射温度未经标准黑体源标定与标定后的差值, 以及地表温度和地表辐射温度差值的研究鲜见报道。

本文利用 2004 年 6 月 5 日至 7 月 6 日北京市小汤山镇国家精准农业示范基地红外巡回温度观测值研究地表辐射温度未经标准黑体源标定与标定后的差值, 结合自动气象站观测资料, 分析天空比辐射率的变化特性, 用空气温湿度资料和³⁷天空红外辐射计实际观测值计算天空环境辐射, 并与测定值进行比较, 推算考虑天空环境辐射和地表比辐射率后的地表真实温度, 研究地表真实温度和地表辐射温度的差

* 收稿日期: 2004-12-27; 修回日期: 2005-06-13。

* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“地球表面时空多要素的定量遥感理论与应用”(编号: G2000077900); 国家自然科学基金项目“北京城市绿地生态效益的遥感定量研究”(编号: 40271081); 中国地质调查项目“城市环境地球化学调查方法技术 & 污染影响机理研究”(编号: 20032013004)资助。

作者简介: 黄妙芬(1963-), 女, 广东汕头人, 副研究员, 博士, 主要从事城市生态环境、RS 与 GIS 研究。E-mail: hm808@163.com

通讯作者: 刘素红(1967-), 女, 副教授, 主要从事遥感图像信息提取和识别方法研究。E-mail: liush@bnu.edu.cn

值。研究结果可为进一步利用遥感技术反演地表温度和研究地表热量平衡提供科学的参考依据。

1 原理

1.1 红外辐射计原理

红外辐射计接收到的地表辐射,不仅包括目标物本身发出的红外辐射,而且包括一部分周围环境辐射^[14],即:

$$M(T) = B(T_s) + (1 - \epsilon)E(T_e) \quad (1)$$

其中 $M(T)$ 为传感器接受到的地表辐射($W / (m^2 \cdot \mu m)$); T 为地表辐射温度(K); ϵ 为地面比辐射率(无量纲); $B(T_s)$ 为普朗克函数($W / (m^2 \cdot \mu m)$); T_s 为地表(真实)温度(K); $E(T_e)$ 为环境辐射度($W / (m^2 \cdot \mu m)$); 野外测量时,如果没有其它高大障碍物阻挡,那么环境辐射就是大气向下的长波辐射,即天空环境辐射 R_{id} (W / m^2); T_e 为环境温度(K)。

将斯蒂芬—波尔兹曼定律代入公式(1)得:

$$T^4 = T_s^4 + (1 - \epsilon)R_{id} \quad (2)$$

为斯蒂芬—波尔兹曼常数($5.6693 \times 10^{-8} W / (m^2 \cdot K^4)$)。

将公式(2)变形得到求地表(真实)温度的表达式:

$$T_s = \sqrt[4]{T^4 - (1 - \epsilon)R_{id}} \quad (3)$$

由公式(3)可见,要推算地表温度,除了要知道地表辐射温度 T 外,还需考虑地表比辐射率 ϵ 和天空环境辐射 R_{id} 的影响。

在野外观测时,由于太阳照射,红外辐射计的机壳内壁温度和调制片温度不一致,会使测得的数据产生漂移;另外,红外辐射计使用时间长了,也会产生漂移现象。因而使用红外辐射计进行野外观测时,黑体源的标定工作是非常重要的^[1]。

黑体源的标定方法是:第一步将黑体源遮阴或将其温度调至室温,读取黑体源自身的温度(Y_1),然后用红外辐射计测量黑体的温度(X_1),获取第一组标定数据(X_1, Y_1)相当于定标的最低点;第二步用红外辐射计测量野外地物表面温度,作为 X 值;第三步,将黑体源朝阳或将其温度设置为高温($70^\circ C$);第四步读取黑体自身的温度,作为 Y_2 值,然后用红外辐射计测量黑体的温度,作为 X_2 值,获取第二组标定数据(X_2, Y_2)(相当于定标的最高点)。我们假定在 $t_1 \sim t_2$ 这个时间段内,被测物温度变化和黑体温度变化是线性关系^[2]。

根据获取的 2 组标定数据(X_1, Y_1)和(X_2, Y_2),我们可以求出直线的斜率,建立直线方程。将用红外辐射计获取的物体温度值(X)代入直线方程就可求得经过标准黑体源订正的地表辐射温度(Y)。

1.2 天空辐射的计算

目前获取天空辐射的方法主要有 3 种,第一种是用大气纠正软件,如 MODTRAN 和 LOW TRAN 等,这种方法需要实时的探空资料,无探空资料则只能用一种平均的大气模式来模拟出平均值;第二种是根据 2 m(或 1.5 m)高度的空气温度和湿度来估算^[15, 16],Brusaert 给出了利用实际水汽压和空气温度的关系式来计算天空比辐射率的关系式:

$$= 1.24(e / T)^{1.7} \quad (4)$$

其中, ϵ 是大气比辐射率(无量纲); T 为空气温度(K); e 为水汽压(hPa)。

在无云天气条件下,天空辐射主要来自覆盖在地表的大气与空气湿度,根据斯蒂芬—波尔兹曼定律得:

$$R_{id} = T^4 \quad (5)$$

式中 T 为离地面 2 m 处的空气温度(K)。

将公式(4)代入公式(5),可推出用空气温湿度求天空辐射的经验式:

$$R_{id} = 1.24 e^{0.14T} T^{3.86} \quad (6)$$

第三种是用窄视角的红外辐射计对天空不同方位角、不同高度角进行测量,再进行加权平均,或是在天空十分均匀的时候,只测量³⁷一个高度角来代表整个天穹的大气下行辐射^[14]。多角度加权平均值获得天空辐射温度值的计算式^[14]。

$$T_e = \frac{T_e(\theta) \sin \theta \cos \phi}{\int \sin \theta \cos \phi} \quad (7)$$

其中 T_e 为天空温度的加权平均值; $T_e(\theta)$ 是各个方向的各个观测角度的天空温度; θ 是角度(弧度)。

2 试验

2.1 试验设计

试验时间为 2004 年 6 月 5 日至 7 月 7 日,试验场设在北京小汤山国家精准农业示范基地(40°40'~40°42'N, 116°26'~116°28'E, 海拔高度 40 m)为东西方向 360 m,南北方向 1 km 的长方形农田。该试验场沿南北方向分成两部分,北边地 500 m \times 360 m, 5 月 5 ~14 日为长势较好俗称“刺疤秧”的杂草植被(平均株高 26 cm),南边 500 m \times 360 m 为裸地或刚出苗的玉米地, 5 月 16 日后,北边地为裸地,南

边地为长势较好植株较高的玉米地(平均株高 70 cm)。

在南北两部分各取了 2 条样带,共 4 条样带(见图 1)在每个样带上 2 m 设置一个观测点。观测时间选择在 8:30、10:15、10:55、14:30、16:30 几个时间段左右,观测方式采用垂直向下,观测高度为 1 m,观测时避开阴影。每个样带的长度、观测点数以及下垫面状况的描述见表 1。

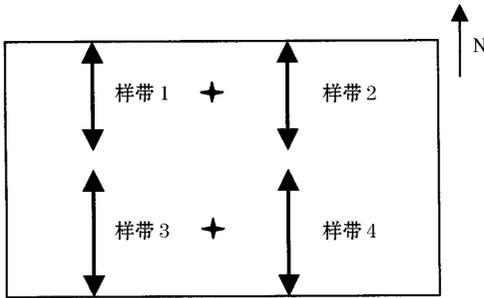


图 1 红外巡回测温样带分布示意图(为自动气象站位置)
Fig.1 Schematic diagram of observation sample belts with infrared thermometers (Position of automatic weather stations)

表 1 4 条观测样带概况

Table 1 Description of four observation sample belts

样带序号	长度 (m)	观测点数	下垫面状况
1	454	228	6 月 15 日前,裸土和野草混合,6 月 15 日后基本裸地
2	492	247	6 月 15 日前基本为长势很好的野草,6 月 15 日后基本裸地
3	508	255	6 月 15 日前基本为裸地,6 月 15 日后有一些玉米苗
4	506	254	6 月 15 日前基本为裸地和玉米苗混合,6 月 15 日后基本为长势很好的玉米苗

表 2 红外辐射计与黑体源温度的平均偏差及标准误差()

Table 2 Mean differences and root mean square error of temperature observed with infrared thermometers and standard blackbody source

红外辐射计序号	标准型(27 个样本)				低温型(29 个样本)			
	低温		高温		低温		高温	
	平均偏差	标准误差	平均偏差	标准误差	平均偏差	标准误差	平均偏差	标准误差
1	0.29	0.22	0.25	0.28	-0.23	0.15	-0.14	0.23
2	0.20	0.28	0.39	0.28	-0.17	0.21	-0.46	0.33
3	0.33	0.28	0.74	0.27	-0.16	0.19	-0.37	0.36
4	0.43	0.27	0.54	0.27	-0.21	0.14	-0.32	0.23
平均值	0.31	0.26	0.47	0.27	-0.19	0.17	-0.32	0.28

2.2 仪器

本试验 6 月 5 ~16 日使用的是 4 台标准型红外辐射计,6 月 17 日至 7 月 6 日使用的是 4 台低温型红外辐射计,标准型和低温型红外辐射计除了观测的最低温度范围不同(标准型: - 30 ,低温型: - 50)外,其余技术参数都是相同的(Taytek MX4TM TD, Raytek Corporation 德国柏林);一台可控温的标准黑体源(BDB15, SR93, SHIMADEN CO., LTD, 日本东京);一台中国科学院地理科学与资源研究所自制的比辐射率测定仪;在南北两块地的中心位置各安置了一台自动气象站(探头型号 HMP45C-L, 高度为 1.5 m)和一台净辐射(复合)表(CNR-1, Kipp & Zone Net Radiometer)。

3 结果分析与讨论

3.1 未经过黑体订正与经过黑体订正的土壤表面辐射温度差异分析

表 2 给出了红外辐射计在低温和高温情况下与黑体源温度的差异。由表 2 可见,标准型红外辐射计测量值均高于黑体源自身温度值,而低温型红外辐射计测量值均低于黑体源测量值。总体而言,标准型红外辐射计在低温和高温情况下,标准误差相差不大,但是平均偏差相差较大。低温型平均偏差和标准误差相差都较大,表明标准型红外辐射计系统误差小于低温型。4 台标准型红外辐射计之间也有明显的差值,之间的差值在低温情况下较小,平均为 0.0 ~0.2 ,在高温情况下较大,平均为 0.1 ~0.5 。4 台低温型红外测量值也同有差值,低温下平均相差 0.0 ~0.1 ,高温下平均相差 0.0 ~0.3 。因而用黑体源标定可以去除仪器本身的误差,提高观测的表面辐射温度的精度。同时由于整个观测期前后使用的红外辐射计分别是标准型和低温型,经过黑体源标定后,数据系列具有了可比性和连续性。

对 4 个样带的地表辐射温度观测值,采用 1.1 介绍的黑体源标定原理进行标定。标定的结果表明:4 台标准型红外辐射计的观测值均偏高,而 4 台低温型红外辐射计的观测值均偏低。图 2 给出了 2004 年 6 月 7 日晴天 10:55 样带 3 标准型红外辐射计测定值与黑体源标定值的对比曲线,图 3 给出了 2004 年 7 月 5 日晴天 15:35 样带 3 低温型红外辐射计测定值与黑体源标定值的对比曲线。这两张图都很好地显示了这一点。显然直接将未标定的红外辐射温度代入显热通量计算公式中,在其他参数不变的情况下,必然造成显热通量的高估或低估,或者直接将未标定的红外辐射温度用于遥感图像的定标,

也必然造成定标值偏高或偏低,给遥感模型计算值的验证带来误差。进一步对获取的 56 组样本分别用标定的辐射温度值减去未标定的辐射温度,相减的差值表明:表面辐射温度未经标准黑体源标定与标定后的差值的绝对值在 0.1~1 之间,显然红外辐射计测量值进行黑体源标定是非常重要的工作。

3.2 天空比辐射率和天空辐射特征分析

3.2.1 天空比辐射率的变化特征

将 2004 年 6 月 5 日至 7 月 6 日南边和北边自动气象站的观测资料,代入公式(4)计算得到不同天气条件下的天空比辐射率。

从整个计算结果来看,不同天气条件下天空的

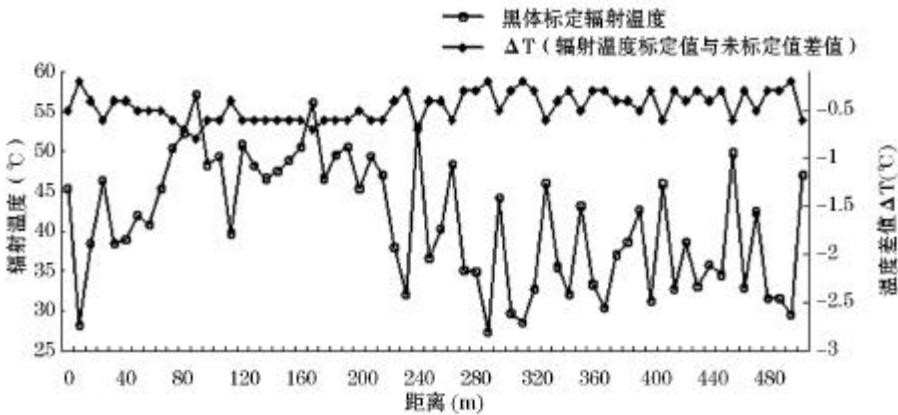


图 2 2004 年 6 月 7 日晴天 10:55 样带 3 标准型红外辐射计测定值与黑体源标定值的对比曲线

Fig. 2 Comparison of temperature between measured with standard infrared thermometer and calibrated with standard blackbody source at 3th sample belt on June 7, 2004 under clear day

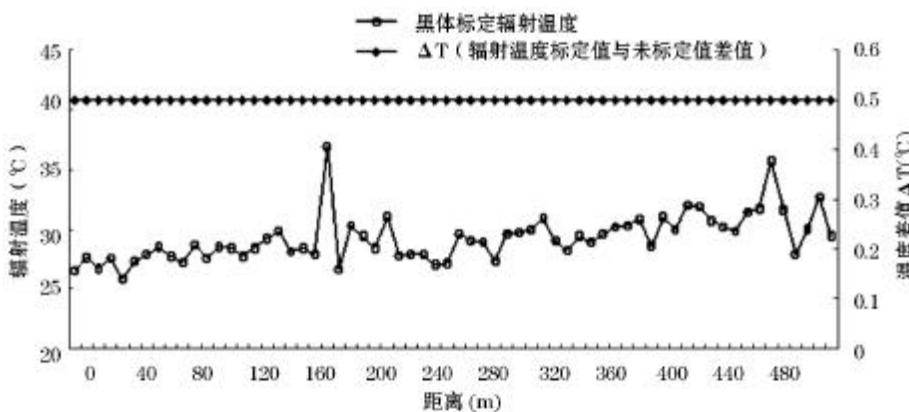


图 3 2004 年 7 月 5 日晴天 15:35 样带 3 低温型红外辐射计测定值与黑体源标定值的对比曲线

Fig. 3 Comparison of temperature between measured with infrared thermometer and calibrated with standard blackbody source at 3th sample belt on June 7, 2004 under clear day

比辐射率变化范围为 0.75 ~0.85 ,非均匀下垫面天空比辐射率之间的差值非常小 ,差值绝对值一般都小于 0.004 ,而且南北观测场非均匀下垫面天空比辐射率的日变化趋势非常一致(图 4)。假定天空温度为 15 ,那么 $\epsilon = 1$ 时 ,计算的天空环境辐射 R_{id}

为 392.94 W /m^2 ,而 变化在 0.75 ~0.85 之间时 , R_{id} 计算值为 $294.71 \sim 334.01 \text{ W /m}^2$,因而把天空比辐射率近似作为 1 来计算 ,将导致 $58.94 \sim 98.23 \text{ W /m}^2$ 的误差。

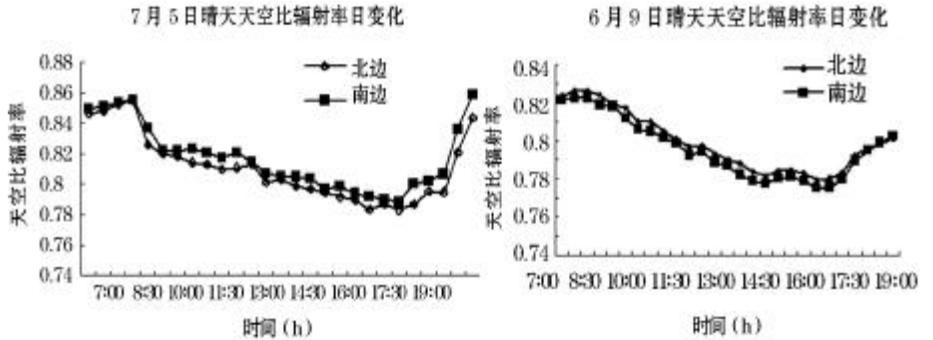


图 4 晴天天空比辐射率的日变化图

Fig.4 Diurnal variation of atmospheric emissivity under clear day

3.2.2 天空环境辐射

用北边自动气象站的空气温度和实际水汽压资料 ,代入公式(6) ,计算得到天空环境辐射 R_{id} 。表 3 给出了净辐射(复合)表观测的天空环境辐射、空气温湿度计算值以及 37°C 红外辐射计测定值的比较。

表 3 7 月 6 日晴 3 种方法的大气下行辐射比较

Table 3 Comparison of downward atmospheric irradiance obtained with three methods under clear day on July 6, 2004

时间	A	B	C	相对误差 (%)	相对误差 (%)
8:38	356.5	377.6	229.5	5.9	35.6
9:10	361.2	380.2	222.3	5.2	38.4
10:10	378.2	392.9	226.7	3.8	40.1
10:46	383.5	387.2	228.1	0.9	40.5
11:20	387.3	392.8	238.1	1.4	38.5
15:40	394.1	398.5	244.8	1.13	7.9
16:21	392.7	403.8	235.7	2.8	39.9
16:56	390.8	404.5	238.7	3.53	8.9
平均值				3.1	38.1

A 测定值(W /m^2) , B 用空气温度和湿度计算值(W /m^2) ;

C 用 37°C 角度角红外辐射计测量温度的计算值(W /m^2)

从表 3 可以看到 ,用空气温湿度的计算值与长波辐射计测定值差值较小 ,早晚差值大 ,中午差值小 ,相对误差为 3.1% ;天空 37°C 热红外辐射计观测值比长波辐射计测定值都低 ,相对误差达到 38.1%。天空 37°C 热红外辐射计观测值比长波辐射计测定值低的主要原因是红外辐射计的滤光波段为 $8 \sim 14$

μm ,虽然经过黑体的校正 ,但是对大气并没有完全校正过来 ,因而用天空多角度或 37°C 红外辐射观测值计算天空辐射的方法有待进一步研究。

通过对空气温湿度的计算值与长波辐射计测定值的差值进一步的研究 ,结果表明在万里无云时 ,计算值高于测定值 ,晴偶尔有云时 ,有云计算值低于测定值 ,无云计算值高于测定值 ,交替出现 ;阴天时 ,全部计算值都低于测定值 ,其原因是天空有云时 ,长波辐射会增强 ,此时地面长波辐射计测量到的大气下行辐射还包括云对地面长波辐射的反射 ,以及云本身的辐射 ,因而测量值明显高于晴空模型估算值。鉴于有云时长波辐射计测量值偏高 ,以及利用经验公式来计算天空下行辐射与测定值误差较小 ,本文天空辐射的计算采用空气温湿度经验公式。

3.3 地表温度与地表辐射温度差值分析

在巡回观测的 4 个样带上 ,下垫面非均匀性较强 ,我们在测量时对下垫面的每个测点状况进行了详细记录 ,这为仔细地处理这些不均匀地表提供了保证。采用逐个观测点处理的方法 ,根据经过黑体源标定的表面辐射温度 ,以及根据公式(6) 求出天空环境辐射 ,代入公式(3) 求出每个观测点对应的地表真实温度。观测下垫面主要是由植被(杂草、玉米苗)和干湿裸土组成 ,根据试验中使用的比辐射率测定结果 ,植被的比辐射率取 0.98 ,干燥土取 0.974 ,湿润土取 0.985。

地表温度与地表辐射温度的差值可以用下式来

计算^[14]：

$$E_{\text{。}} = \frac{M(T) - (M(T) + (1 -)E(T_e))}{M(T)} \times 100\%$$

$$= \frac{(1 -)(M(T) - E(T_e))}{M(T)} \quad (8)$$

当 $E(T_e) = M(T)$ 且 $E(T_e) = 0$ 时,观测误差由环境辐射照度和比辐射率共同决定。 $E(T_e) < M(T)$,即为冷环境时,误差为负值,地表辐射温度小于地表真实温度,而且大气下行辐射越小,被测地物的比辐射率值越小,地表辐射温度与地表真实温度的差值越大。由此可见,在野外冷环境下测量到的地表辐射温度

总是小于地表温度。

图 5 显示了 2004 年 7 月 5 日 10:15 至 10:45 四个观测样带中样带 1 和样带 3 地表温度和地面辐射温度之间的差值。由图 5 可见,地表温度高于地表辐射温度,差值在 0.2 ~ 0.4 之间,事实上,我们利用 2002 年和 2004 年手持式红外辐射计的观测值(观测样本 3 000 个),以及 2004 年自动红外辐射计观测值(观测样本 2 400 个),计算结果表明,在整个观测期,不论是阴天还是晴天,不论下垫面是干土、湿土、杂草还是玉米苗,表面温度均高于表面辐射温度,差值在 0.2 ~ 1.5 之间。

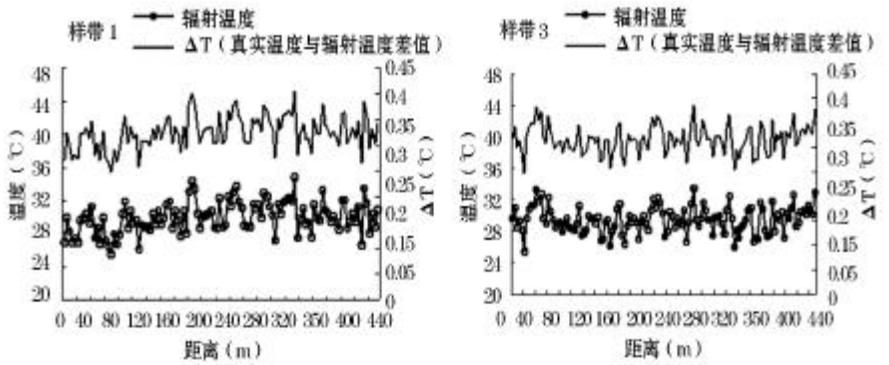


图 5 2004 年 7 月 5 日观测样带 1 和样带 3 地表温度和地表辐射温度之间的差值

Fig. 5 The difference between surface "true" temperature and surface radiative temperature of the two observational sample strips on July 5, 2004 (at 1st and 3rd sample belt)

根据遥感热红外波段,直接得到的是地表辐射温度,但是在许多热红外应用研究中,需要的是地表温度,而不是地表辐射温度,这是因为地表温度不仅取决于地表净辐射通量,而且取决于地表热平衡方程中的各分量(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)^[17]。因此,只有地表温度才能作为一个重要的基本参数直接参与相关模型的计算。显然在遥感估算地表通量时,在其它参数不变的情况下,如果直接用地表辐射温度代替地表温度进行反演,必将低估显热通量值,高估潜热通量。在需要地表温度作为输入参数的遥感模型中,如果用地表辐射温度代替,造成的误差是不可忽略的。

4 结 语

地表真实温度和辐射温度的差值研究对于进一步利用遥感技术反演地表温度和地表热量平衡,提高输入参数的精度,是不可缺少的工作。研究

结果表明：

(1) 利用红外巡回温度观测值对非均匀下垫面表面辐射温度未经标准黑体源标定与标定后的差值的研究表明,非均匀下垫面辐射温度未经标准黑体源标定与标定后的差值的绝对值在 0.1 ~ 1 之间,很显然对红外辐射计测量值进行黑体源标定是必须进行的工作,可以减小将红外测温值作为输入参数代入遥感模型参与计算所带来较大的误差。

(2) 利用自动气象站观测资料分析了天空比辐射率的变化特性,天空比辐射率的变化在 0.75 ~ 0.85 之间,非均匀下垫面天空比辐射率的日变化趋势非常一致,这表明将天空比辐射率作为 1 来处理,也会带来误差,实际上天空比辐射率的变化取决于大气中的水汽和温度,因而不同季节不同天气状况,天空比辐射率不同。

(3) 利用空气温湿度资料和 37 天空红外辐射计观测值计算的天空环境辐射,与长波辐射测定值的比较结果表明,在晴天,用空气温湿度的计算值与

长波辐射计测定值差值较小,相对误差平均为 3.1%,但是天空³⁷热红外辐射计观测值与长波辐射计测定值差值大,相对误差平均值达到38.1%,因而用天空³⁷热红外辐射计观测值来计算大气向下长波辐射需要进一步进行修正。

(4) 对非均匀下垫面表面真实温度和表面辐射温度的差值研究表明:非均匀下垫面表面真实温度均高于表面辐射温度,差值在 0.2 ~1.5 之间。由此可见,在地表温度作为输入参数的遥感模型中,如果用地表辐射温度代替,带来的误差是不可忽略的。

致谢 感谢北京师范大学地理学与遥感科学学院遥感中心所有参加实验的同学。

参考文献(References):

- [1] Zhang R H, Li Z L, Tang X Z, et al. Study of emissivity scaling and relativity of homogeneity of surface temperature[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(1): 245-259.
- [2] Lagouarde J P, Kerr Y H, Brunet Y. An experimental study of angular effects on surface temperature for various plant canopies and bare[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1995, 77: 167-190.
- [3] Voogt J A, Oke T R. Radiometric temperature of urban Canyon Walls obtained from vehicle traverses[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 1998, 60: 199-217.
- [4] Chehbouni A, Nouvellon Y, Kerr Y H, et al. Directional effect on radiative surface temperature measurements over a semiarid grassland site[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76: 360-372.
- [5] Li Z L, Zhang R, Sun X, et al. Experimental system for the study of the directional thermal emission of natural surface[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(1): 195-204.
- [6] Zhang Yiping, Li Yourong. A study on the characteristic of temperatures on the different surface of building in the urban area[J]. *Urban Environment Urban Ecology*, 1997, 10(1): 39-42. [张一平, 李佑荣. 城市区域内建筑物表面温度特征[J]. *城市环境与城市生态*, 1997, 10(1): 39-42.]
- [7] Voogt J A, Oke T R. Complete urban surface temperature[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36: 117-132.
- [8] William P Kustas, John M Norman. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1999, 94: 13-29.
- [9] Chehbouni A, Nouvellon Y, Lhomme J P, et al. Estimation of surface sensible heat flux dual angle observations of radiative surface temperature[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2001, 108: 55-65.
- [10] Zhan W P, Kustas W P, Humes K S. An intercomparison study on models of sensible heat flux over partial canopy surfaces with remotely sensed surface temperature[J]. *Remote Sensing Environment*, 1996, 58: 242-256.
- [11] Wang Pengxin, Wan Zhengming, Gong Jianya, et al. Advanced in drought monitoring by using remotely sensed normalized difference vegetation index and land surface temperature products[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(4): 527-533. [王鹏新, 王 安 正 明, 龚 健 雅, 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(4): 527-533.]
- [12] Norman J M, Kustas W P, Humes K S. Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observation of directional radiometric surface temperature[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1995, 77: 263-293.
- [13] Chehbouni A, Seen D Lo, Njoku E G, et al. Estimation of sensible heat flux over sparsely vegetated surface[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, (188-189): 855-868.
- [14] Zhang Renhua. *Remotely Sensing Model Based on Experiment and the Basis of Land Surface* [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.]
- [15] Brutsaert W H. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies[J]. *Water Resource Research*, 1975, 11: 742-744.
- [16] Isdo S B. A set of equation for full spectrum, 8 ~14 μm and 10.5 ~12.5 μm thermal radiation from cloudless skies[J]. *Water Resource Research*, 1981, 17: 295-304.
- [17] Guo Xiaoyin, Cheng Guodong. Advances in the application of remote sensing to evapotranspiration research[J]. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(1): 107-114. [郭晓寅, 程国栋. 遥感技术应用用于地表面蒸散发的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 107-114.]

A STUDY OF THE DIFFERENCE BETWEEN TRUE SURFACE TEMPERATURE AND RADIOMETRIC SURFACE TEMPERATURE

HUANG Miao-fen^{1,2}, LIU Shao-min², LIU Su-hong², ZHU Qi-jiang²

(1. School of Marine Engineering, Dalian Fisheries University, Dalian 116023, China; 2. Research Center for Remote Sensing and GIS, School of Geography, Beijing Normal University, State Key Laboratory of Remote Sensing Science; Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875, China)

Abstract: The measurements of air temperature and air humidity were utilized to analyze the diurnal variation of atmospheric emissivity over heterogeneous surfaces and to calculate downward atmospheric longwave irradiance, from June 5th to July 6th, 2004, in Xiaotangshan area, Beijing. Moreover, sky radiometric temperature at 37° and land surface radiometric temperature with thermal infrared thermometers were employed to study the differences between surface radiometric temperature over heterogeneous surfaces without being calibrated and calibrated with standard blackbody source and the differences between surface "true" temperature, which were calculated with the downward longwave irradiance and surface emissivity, and surface radiometric temperature, which were calibrated by standard blackbody source. The results may be served as scientific reference to invert land surface temperature with remote sensing and to study land surface energy balance.

The results indicated: (1) the differences of surface radiometric temperature between without being calibrated and being calibrated by standard blackbody sources ranged from 0.1 to 1.0; (2) the diurnal variation range of atmospheric emissivity ranged from 0.75 to 0.85; (3) the differences of downward atmospheric longwave irradiance between being calculated by air temperature and air humidity and being measured by pyranometer were small with the average mean error being 3.1%, while those of downward atmospheric longwave irradiance between being calculated by sky radiometric temperature at 37° with thermal infrared thermometer and being measured by pyranometer were larger, with the average mean error being 38.1%; (4) the differences between surface true temperature and surface radiometric temperature calibrated with standard blackbody ranged from 0.2 to 1.5 over various surfaces under variable sky conditions, and the higher surface radiometric temperature was, the larger the differences were. Therefore, the differences had the diurnal variation rule.

Key words: Thermal infrared thermometers; Atmospheric emissivity; Downward atmosphere longwave irradiance; Surface radiometric temperature; Surface true temperature.