

文章编号: 1007-4619(2000)增-0071-010

# 三维非同温表面热辐射方向性模型的 室内模拟实验验证

苏红波<sup>1</sup>, 王锦地<sup>2</sup>, 李小文<sup>2</sup>,  
张仁华<sup>1</sup>, 唐新斋<sup>1</sup>, 孙晓敏<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 北京师范大学 遥感与地理信息系统研究中心, 北京 100875)

**摘 要:** 基于室内模拟实验, 对遥感像元尺度地表热辐射方向性模型进行验证。当考虑地表像元具有明显的三维结构且像元内温度非均一时, 像元辐射亮温的方向性取决于像元结构和像元组分的温差, 对三维非同温表面的室内模拟和观测实验验证了基于这一思路建立的表面热辐射方向性模型。

**关键词:** 热红外遥感; 比辐射率; 热辐射方向性模型; 非同温像元

**中图分类号:** TP722.5/O4-34      **文献标识码:** A

## 1 引 言

温度是描述物质的存在状态和能量传输一个基本要素, 是7个基本物理量之一。要对地学中的能量流、物质流和信息流进行基于物理机制的定量研究, 就离不开地面温度这一重要的环境变量。地面温度随时随地都处于动态的变化过程中, 它不仅是地表能量平衡的结果, 而且给后继的能量交换提供了初始条件。对研究地面温度的变化进行大范围的监测, 是在遥感技术, 特别是热红外遥感技术发展到一个阶段才成为可能。这种监测不仅有助于我们对全球气候变化(如温室效应、厄尔尼诺效应和拉尼娜效应等)的理解, 而且可为GCM模型的模拟提供足够精度的下垫面数据, 提高天气预报的准确率。从中小尺度来讲, 区域的CO<sub>2</sub>通量估算、光合作用效率、作物的缺水状况等亦需要精确的地面温度数据。

虽然对测量地面温度的需求如此迫切, 但由于热红外遥感本身的特殊性和复杂性, 遇到了可见光和近红外遥感不曾遇到的困难。首先, 热红外遥感

传感器的空间分辨率低的问题至今未取得突破, 从卫星上通过热红外波段传感器得到像元大约是120m×120m(以TM为例)的区域, 由于自然界的复杂性, 在这样的区域内地物的分布完全均匀、温度完全一致、比辐射率完全相等的可能性几乎不存在。其次, 即使是百分之百的同种地物, 其比辐射率方向性和温度分异的影响仍是不得不考虑的, Dozier 和 Warren 应用辐射传输理论计算了雪面的方向比辐射率, 给出了忽略方向比辐射率所带来的亮温误差<sup>[1]</sup>, 张仁华<sup>[2]</sup>用CO<sub>2</sub>激光测量了几种材料的方向比辐射率随角度的变化情况。总的来说, 热红外遥感的困难在于自然界的方向性热红外辐射和半球热红外辐射的关系的不确定性, 而星载热红外传感器所获取的仅仅是而且只能是方向性辐射信息。在现实和需要之间出现了差距, 为了获得亚像元的地面温度, 许多科学家投身于对这一问题的研究。Norman 和 Becker 在各种温度和比辐射率的定义上做了很精细的工作<sup>[3]</sup>, 给出了空气动力学温度、亮温、冠层温度、方向亮温、方向比辐射率、方向辐射温度、半球辐射温度、动力学温度和热力

收稿日期: 1999-12-15; 修订日期: 2000-08-10

基金项目: 国家攀登预选项目(95-预-38), 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077900), 国家自然科学基金项目(49971059)和国家自然科学基金项目(49890330)共同资助

作者简介: 苏红波(1976—), 男, 1997年毕业于武汉测绘科技大学摄影测量和遥感专业, 获工学学士学位。现为中国科学院地理科学与资源研究所博士研究生, 对定量遥感、数字图像处理、可视化计算方面的研究感兴趣。

学温度、肤面温度、表面温度等术语的定义, 这些定义对于本领域的研究工作具有指导意义, 理清了与温度有关的名目繁多的术语的概念。地面温度反演方面, 也提出了几种有名的算法, 如改进劈窗算法<sup>[4,5]</sup>, 白昼—黑夜方法<sup>[6,7]</sup>。

对于现实世界中存在的非同温、非同比辐射率区域的温度和比辐射率定义, 在热红外遥感领域正处于热烈的讨论之中。Norman 和 Becker 提出 e-比辐射率、r-比辐射率以及它们对应的 e-辐射温度和 r-辐射温度<sup>[3]</sup>。Li Xiaowen、Strahler 和 Friedl 针对热辐射的方向性对热红外遥感的影响, 提出了在遥感像元尺度上有效比辐射率的新定义, 并进而给出了一个非同温像元热辐射方向性的概念模型。他们认为 Norman 和 Becker 关于 e-比辐射率和 r-比辐射率的定义无论是在理论上还是在实践上都是不完备的<sup>[8]</sup>。

无论是卫星上的热红外传感器还是地面上的红外测温仪, 都能观察到自然界中物体热辐射的方向性。对于物体辐射的方向性, 我们实验室曾用 CO<sub>2</sub> 激光观察到很明显的现象, 即使是一贯被认为比辐射率高, 具有近于各向同性性质的橡胶皮也测到了变化很大的辐射温度曲线。Dozier 和 Warren 指出雪面的方向亮温差可达 3K<sup>[1]</sup>, Balick 和 Hutchinson 在落叶森林里观察到 7K 的方向辐射温度温差<sup>[9]</sup>。现有的观察数据要么是在自然条件下的影响因素太多, 要么是实验条件与所提出的模型条件不匹配, 从而无从对模型进行检验, 理论和实际脱了节。我们对李小文提出的模型产生兴趣, 设计了特定的实验装置进行模拟实验。实验的目的是研究非同温、非同比辐射率区域的方向辐射特性, 得到影响地表热红外辐射方向性的主要因素和规律, 能更精确地反演地表温度。

## 2 非同温像元表面热辐射方向性模型

### 2.1 辐射亮温的方向性模型

在遥感像元的尺度上, 像元表面的非同温是普遍存在的情况, 基于表面同温的普朗克公式, 很难不加修正地用于地温遥感。像元表面的热辐射模型常表达为:

$$L_{\lambda}(T_0) = \varepsilon_0 B_{\lambda}(T_0) \quad (1)$$

考虑具有三维结构的非同温混合像元, 设像元内仅有两种组分, 组分 1 和组分 2。对于给定的观察方向  $\nu$ , 像元内两组分的面积占总面积的比例分

别为  $a_1(\nu)$ ,  $a_2(\nu)$ ; 假定组分的材料发射率分别为  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ; 组分温度分别为  $T_1$ ,  $T_2$ 。在实验观测条件下若忽略组分之间多次散射的影响, 则像元的总方向辐射可以写为:

$$L_{\lambda}(T_0, \nu) = a_1(\nu) \varepsilon_1 B_{\lambda}(T_1) + a_2(\nu) \varepsilon_2 B_{\lambda}(T_2) \quad (2)$$

式中  $\varepsilon_0$  为像元的有效比辐射率;  $T_0$  为在像元尺度上定义的参考温度, 独立于波长和观察方向, 可以根据应用的需要定义, 也可以定义为考虑像元三维结构、用组分方向性面积比加权的组分温度的半球平均:

$$T_0 = \int_0^{\pi/2} [a_1(\nu)T_1 + a_2(\nu)T_2] \sin 2\theta_{\nu} d\theta_{\nu} \quad (3)$$

式中  $\theta_{\nu}$  为观察方向的天顶角, 这里假定组分面积比对方位角而言各向同性。

在实验条件下, 环境辐射对像元总方向辐射的影响不能忽略。如在野外观测, 在某个方向观测到的总辐射, 除了有组分的热辐射以外, 大气下行辐射经反射进入传感器现场的部分必须考虑。在室内观测也有类似的情况。设环境辐射  $L_{env}$  各向同性, 则(2)式可改写成:

$$L_{\lambda}(T_0, \nu) = a_1(\nu) \varepsilon_1 B_{\lambda}(T_1) + a_2(\nu) \varepsilon_2 B_{\lambda}(T_2) + (1 - \varepsilon_0(\nu)) L_{env} \quad (4)$$

对像元有效比辐射率  $\varepsilon_0$  的定义, 从不同的角度考虑有不同的定义方法。Li-Strahler-Friedl 的概念模型<sup>[8]</sup>明确地将非同温像元表面的有效发射率, 表示为同温条件下由表面的方向反射导出的发射率 ( $\varepsilon_{BRDF}$ ) 与由像元内不同组分温差导致的附加的视在发射率增量 ( $\Delta \varepsilon_{GO}$ ) 之和的形式, 即:

$$\varepsilon_0(\nu) = \varepsilon_{BRDF}(\nu) + \Delta \varepsilon_{GO}(\nu) \quad (5)$$

式中, 由表面的方向反射导出的发射率:

$$\varepsilon_{BRDF}(\nu) = 1 - \int_{2\pi} BRDF(\nu, i) d\Omega_i \quad (6)$$

当非同温像元内组分间的多次散射可以忽略时,  $\varepsilon_{BRDF}(\nu)$  可近似表示为:

$$\varepsilon_{BRDF}(\nu) = a_1(\nu) \varepsilon_1 + a_2(\nu) \varepsilon_2 \quad (7)$$

式(5)中由像元内不同组分温差导致的附加的视在发射率增量, 在给定参考温度  $T_0$  时可由几何光学模型计算:

$$\Delta \varepsilon_{GO}(\nu) = [a_2(\nu) \varepsilon_2 \Delta T_2 - a_1(\nu) \varepsilon_1 \Delta T_1] K_{\lambda}(T_0) \quad (8)$$

这里,  $\Delta T_1 = T_0 - T_1$ ,  $\Delta T_2 = T_2 - T_0$ ,  $K_{\lambda}(T_0)$  是从对普

朗克公式的泰勒级数展开的一阶近似中导出的，是波长和参考温度  $T_0$  的函数：

$$K_\lambda(T_0) = \frac{D_\lambda e^{D_\lambda/T_0}}{T_0^2 (e^{D_\lambda/T_0} - 1)} \quad (9)$$

这里  $D_\lambda$  仅为波长的函数，与温度无关。

公式(4)为考虑了环境辐射影响的非同温像元的方向性辐射亮温表达式。由于我们假设组分温度均一，普朗克公式在像元组分的尺度上可以适用。

### 2.2 像元组分的方向性观察面积比

实验中观测目标的三维结构像元，由具有规则形状的圆锥体在视场中随机分布放置而成。式(4)中在不同观察方向  $\nu$  像元组分在视场中所占的面积比例  $a_1(\nu)$ 、 $a_2(\nu)$  可用几何光学模型计算。圆锥体在视场总面积  $A$  中放置的总数为  $n$ ，密度为  $\lambda = n/A$ 。圆锥体的圆锥底面半径为  $R$ ，顶角为  $2\alpha$ ，给定观察方向的天顶角  $\theta_\nu$ ，由 Li-Strahler 几何光学模型<sup>[10]</sup>，可观察到的背景组分面积比为：

$$a_1(\theta_\nu) = e^{-\lambda R^2 \Gamma} \quad (10)$$

式中：

$$\Gamma = \cos \gamma + \gamma + \pi/2$$

$$\gamma = \sin^{-1}(\tan \alpha / \tan \theta_\nu)$$

视场中可以观察到的圆锥体面积比为：

$$a_2(\theta_\nu) = 1 - e^{-\lambda R^2 \Gamma} \quad (11)$$

至此，我们给出了适用于具有三维结构的非同温像元表面热辐射方向性模型。下文介绍采用室内实验观测数据对模型的验证。

## 3 室内模拟实验和模型验证

### 3.1 实验描述

为了研究物体的辐射温度随观察角度而变化的规律，我们设计了这样的实验：

在一个长和宽分别为 50.0cm，厚为 2.5cm，导热良好的方形金属板外表面喷上一层黑漆，以增加金属板表面的比辐射率；金属板的内部是空的，形成水循环的通道，这样可保持金属板的表面温度均匀，通过控制循环水的温度来使其表面温度恒定。循环水是由一恒温槽提供，恒温槽内有电机对水进行搅拌，并有温控表控制电热丝的启动与否。

把此金属板放置到一个可以转动的水平圆桌面上，在桌面上标上角度刻度。当金属板随桌面一起转动时，就能读出金属板的方位角(方位角的起始方向是我们自定义的，只在本实验中适用)。

在金属板的上表面中 45cm×45cm 的区域内，按照表 1 中的 64 对坐标值，一一标出所对应的位置。这 64 对坐标值是按照泊以松分布用计算机算出的，是对自然界植物群体中个体位置的近似。

表 1 几何体的坐标位置

Table 1 Coordinates of the geometrical models

单位：cm

No.	X	Y	No.	X	Y	No.	X	Y	No.	X	Y
1	4.725	5.625	17	27.675	7.65	33	36	17.55	49	17.55	34.335
2	9	2.34	18	31.365	8.55	34	41.85	18.765	50	27.36	40.275
3	13.725	1.845	19	33.885	8.1	35	40.5	19.575	51	28.35	32.85
4	16.965	2.475	20	38.205	9.9	36	40.5	27.225	52	37.35	32.85
5	28.575	1.485	21	41.85	10.575	37	32.625	26.55	53	43.2	32.4
6	29.925	2.25	22	43.425	16.2	38	24.75	29.025	54	39.15	40.725
7	35.1	2.43	23	33.075	10.35	39	23.175	29.115	55	44.1	43.875
8	37.125	1.8	24	31.95	11.925	40	17.775	13.5	56	33.93	0
9	41.85	2.475	25	24.975	17.1	41	13.95	29.97	57	29.925	37.575
10	43.065	6.165	26	16.2	18.675	42	1.935	35.1	58	11.7	10.8
11	43.335	3.42	27	4.05	23.625	43	8.145	34.875	59	17.55	23.85
12	27.45	4.185	28	8.55	24.75	44	6.39	40.5	60	22.5	22.05
13	25.65	6.255	29	11.475	22.275	45	14.715	39.6	61	27.9	4.275
14	15.75	4.5	30	20.25	21.825	46	13.5	36.9	62	2.25	41.85
15	10.53	14.4	31	25.425	20.7	47	15.975	34.65	63	9.45	6.3
16	17.73	12.375	32	34.425	18.225	48	17.55	32.85	64	9.675	26.1

本实验使用的几何体模型有 3 种,分别是锥体、球体和椭球体。锥体的底面半径为 1.0cm, 高为 3.5cm, 材料是尼龙 (聚酰胺); 球体的半径是 2.0cm, 材料是乒乓球 (赛璐珞); 椭球体的短轴平均 2.0cm, 长轴平均为 5.5cm, 材料是棉花。做实验时, 把几何体模型一一放到金属板上标好的位置上。

我们在实验中使用的传感器的型号是 BS-32T, 响应波段范围是 7—13  $\mu\text{m}$ , 响应时间为 0.5s, 视场角为 10.8°, 灵敏度达到 0.01 K, 精确度为 0.5 K。传感器装在机械杆上, 机械杆可以在  $\pm 44.0^\circ$  天顶角的范围内匀速转动, 机械杆转动的轴心与金属板的上表面在同一平面内, 传感器的视线中心一直对准金属板的中心。当传感器天顶角为 0° 时, 传感器与金属板上表面的距离是 157.0cm, 传感器在金属板上的视场范围是一个圆, 半径为 14.8cm ( $157.0\text{cm} \times \tan 5.4^\circ$ )。图 1 是传感器天顶角为  $\pm 44.0^\circ$  时的示意图, O 表示传感器的位置, C 表示金属板表面的中心点, A 是传感器在金属板面上的垂足, B 和 D 分别是传感器在金属板上的视场边缘。由几何关系可以得到:

$$|BC| = |OC| \times \cos 44.0^\circ \times (\tan 44.0^\circ - \tan(44.0^\circ - 5.4^\circ)) = 18.9\text{cm}$$

$$|CD| = |OC| \times \cos 44.0^\circ \times (\tan(44.0^\circ + 5.4^\circ) - \tan 44.0^\circ) = 22.7\text{cm}$$

(12)

由(12)式的计算可知, 即使传感器的天顶角达到最大时, 其视场范围仍在金属板上表面的 45.0cm  $\times$  45.0cm 方形域之内, 传感器所能测量到的仍是我们所布置的实验区域。

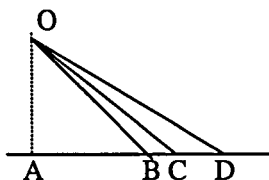


图 1 观测范围示意图 (天顶角为  $\pm 44.0^\circ$ )

Fig. 1 Sketch of field of view for the observation

传感器随机械杆从天顶角  $-44.0^\circ$  匀速转动到天顶角  $44.0^\circ$ , 需要 23—24s 的时间, 数据采集速率为 1 次/s, 从天顶角  $44.0^\circ$  转回到天顶角  $-44.0^\circ$  亦然。采样间隔用天顶角的变化来衡量就是每隔  $4^\circ$  的天顶角就可采集到一个数据。运动中的机械杆在停止时有抖动的现象, 所以天顶角为  $\pm 44.0^\circ$  时采集的数据是不可靠的, 要去掉, 仅在  $\pm 40.0^\circ$  天顶角之内的数据有效。

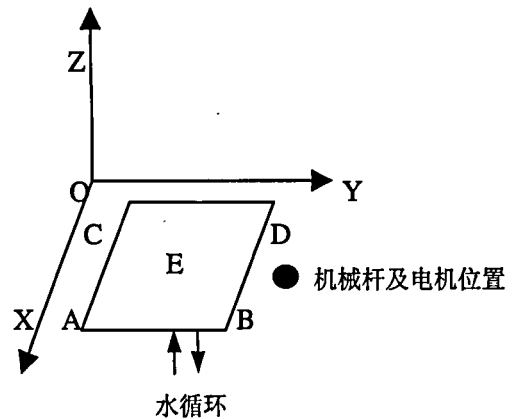


图 2 实验采用的坐标系

Fig. 2 The coordinate system adopted in the experiment

图 2 是我们采用的坐标系, ABCD 表示金属板面, C 为坐标原点, CA 为 X 轴, CD 为 Y 轴, 其坐标正向如 XOY 所示。水循环的进出水管位置、机械杆及电机位置如图。我们规定当机械杆在 AB 一侧时天顶角为负, 在 CD 一侧时为正。E 为金属板的中心, 是传感器所要瞄准的位置。方位角的规定见上图, 金属板 ABCD 绕点 E 顺时针方向转动, 方位角从  $0^\circ$  到  $360^\circ$ 。

为了检查金属板的温度是否均匀一致, 先调节恒温槽的水温达到  $50^\circ\text{C}$ , 待水循环稳定后用便携式红外测温仪测量金属板的辐射温度, 测量的角度垂直与板面, 距离 5.0cm, 共测量了 5 个点的温度分布, 每个点读 3 次数。得到下面的数据, 见表 2。其中 A、B、C、D 和 E 点的位置分别是金属板的四角和中心, 见图 2 所标的位置。这说明板的温度分布在我们所要求的精度范围内, 完全可以认为是温度均匀的等温体。

表 2 金属板表面温度的分布

Table 2 Surface temperature distribution of

	the metallic board				单位: $^\circ\text{C}$
	A	B	C	D	E
1	49.8	49.9	49.9	49.8	49.9
2	49.7	49.9	49.8	49.6	50.0
3	49.9	50.0	49.7	49.7	49.8

### 3.2 实验测量数据

为了计算出几何体模型表面的动力学温度, 不可避免要用到模型构成材料的比辐射率。在比辐射率测量中我们使用了封闭黑体腔法<sup>[11]</sup>。测量结果

是: 尼龙(聚酰胺)比辐射率为 0.938, 乒乓球(赛璐珞)的比辐射率为 0.946, 棉花的比辐射率为 0.87。需要指出的是, 在棉花的比辐射率测量中, 当给棉花加以热的辐射环境时, 棉花本身有很强的增温现象, 在两秒之内可使温度增加 2 K, 用 CO<sub>2</sub> 激光照射也有明显的增温现象。

实验室的环境温度用一水银温度计得到, 读数是 16.0℃, 用便携式红外测温仪瞄准实验室的四壁、天花板和地板, 其辐射温度为 15.0—17.0℃之间, 假设为均匀分布, 则平均辐射温度为 289.0 K。金属板表面的动力学温度经水循环的作用, 稳定在 50.0℃。

首先对金属板的上表面进行不同方位角、不同天顶角的多角度测量, 得到相应角度下的辐射温度。要对非同温, 非同比辐射率区域的辐射规律进行研究, 背景数据是不可缺少的。测量到的数据见表 3。

图 3 给出了金属板的多角度辐射温度随观测天顶角的变化曲线, 从中可以清楚地看到即便是均匀

单一的金属板也存在辐射温度的方向性, 我们认为这主要是由比辐射率的方向性所引起的。

实验所用的几何体模型开始是放在室温下, 其动力学温度等于室温, 当放到动力学温度为 50℃的金属板后, 有一个能量交换的过程。这个能量交换过程包括几何体模型从下到上的热传导, 空气湍流引起的热交换, 以及几何体模型与空气、金属板的热辐射交换。能量交换的最终结果是几何体模型的动力学温度和辐射温度都达到稳定。我们对这一过程通过便携式红外测温仪进行记录, 测温仪的视场范围是直径 3.5cm 的圆, 为了让测温仪视场范围内充满要研究的对象, 把若干个几何体模型紧密排列在一起。实验当天的 10 点 41 分把几何体放到金属板上, 立即开始测量辐射温度, 到 11 点 5 分结束, 此时的能量交换已经达到平衡状态(图 4)。实验测量数据在表 4 中。从数据可知, 几何体模型的辐射稳定需要 20 分钟的时间, 在 20 分钟内其辐射温度一直在增加, 这种增温现象给我们的实验带来了困难。为了避开几何体模型辐射温度变化所引起的不

表 3 金属板的多角度辐射温度

Table 3 Multi-angle radiant temperature of the metallic board

单位: ℃

方位角 天顶角	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°
-40°	46.81	46.99	46.53	46.7	46.97	46.45	46.5	46.5	46.28
-36°	47.07	47.25	46.89	47.05	47.13	46.82	46.79	46.79	46.58
-32°	47.39	47.29	47.15	47.2	47.32	47.11	47.04	46.98	46.91
-28°	47.55	47.52	47.41	47.4	47.44	47.31	47.31	47.18	47.2
-24°	47.66	47.62	47.6	47.58	47.46	47.53	47.42	47.35	47.42
-20°	47.81	47.73	47.75	47.66	47.58	47.61	47.54	47.44	47.6
-16°	47.85	47.81	47.93	47.72	47.7	47.79	47.63	47.48	47.73
-12°	47.87	47.93	47.9	47.82	47.66	47.84	47.65	47.59	47.82
-8°	47.93	47.94	48.04	47.79	47.72	47.9	47.72	47.65	47.87
-4°	47.89	48.03	48.07	47.75	47.75	47.99	47.75	47.67	47.97
0°	47.86	48.03	48.07	47.75	47.77	47.96	47.74	47.73	47.97
4°	47.90	48.00	48.05	47.75	47.79	47.91	47.68	47.81	48.04
8°	47.88	48.10	47.98	47.77	47.85	48	47.7	47.83	48.01
12°	47.85	48.06	48.02	47.73	47.83	47.87	47.69	47.85	47.9
16°	47.82	48.06	47.91	47.7	47.86	47.85	47.68	47.83	47.95
20°	47.78	47.96	47.88	47.73	47.69	47.69	47.64	47.76	47.87
24°	47.75	47.92	47.81	47.7	47.65	47.58	47.58	47.74	47.75
28°	47.71	47.77	47.62	47.69	47.51	47.43	47.59	47.6	47.58
32°	47.58	47.61	47.5	47.56	47.3	47.24	47.47	47.37	47.45
36°	47.42	47.4	47.24	47.36	47.01	47.05	47.19	47.11	47.31
40°	47.21	46.96	46.93	47.15	46.66	46.73	46.89	46.74	47.02

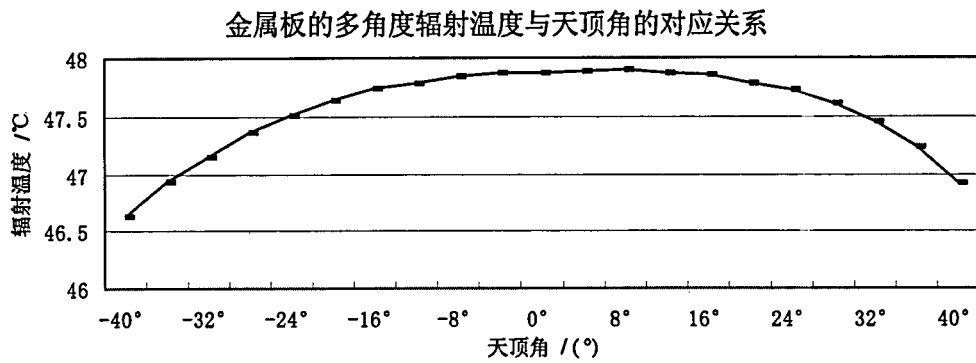


图 3 金属板的多角度辐射温度随观测天顶角的变化曲线

Fig. 3 Radiant temperature variation with the view zenith angles

确定性, 我们利用了几何体模型 20 分钟后辐射温度达到稳定这一性质, 先把几何体模型按位置放到金属板上, 20 分钟后再测量其多角度混合辐射温度。

把各种几何类型的几何体按照给定的位置放置到金属板上后, 我们就获得了模拟的三维非同温

混合像元。我们对于锥体—金属板, 球体—金属板, 椭球体—金属板均进行多方位角、多天顶角辐射温度测量, 限于篇幅, 这里只给出锥体—金属板的详细测量数据。表 4 是锥体—金属板的多角度测量结果。

表 4 锥体—金属板混合辐射温度

Table 4 Mixed radiant temperature of cone models and metallic board

单位: °C

方位角 天顶角	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°
-40°	45.14	45.2	44.77	45.17	45.25	44.62	44.77	44.88	44.86
-36°	45.55	45.54	45.22	45.56	45.54	45.01	45.08	45.19	45.22
-32°	45.88	45.81	45.57	45.78	45.76	45.42	45.42	45.46	45.63
-28°	46.18	46.08	45.88	46.11	45.97	45.72	45.78	45.76	45.92
-24°	46.36	46.26	46.16	46.3	46.15	46.03	46	45.91	46.16
-20°	46.52	46.37	46.42	46.4	46.24	46.19	46.11	46.11	46.41
-16°	46.57	46.5	46.57	46.54	46.34	46.36	46.25	46.21	46.49
-12°	46.58	46.55	46.66	46.55	46.48	46.49	46.34	46.32	46.65
-8°	46.65	46.63	46.77	46.58	46.49	46.56	46.32	46.47	46.77
-4°	46.59	46.65	46.8	46.57	46.46	46.61	46.26	46.53	46.82
0°	46.59	46.74	46.83	46.53	46.52	46.72	46.38	46.53	46.81
4°	46.61	46.73	46.8	46.52	46.6	46.74	46.33	46.57	46.81
8°	46.57	46.73	46.8	46.51	46.52	46.63	46.41	46.65	46.81
12°	46.6	46.73	46.81	46.48	46.54	46.63	46.32	46.56	46.81
16°	46.55	46.68	46.76	46.47	46.49	46.58	46.33	46.61	46.76
20°	46.49	46.63	46.67	46.4	46.45	46.5	46.29	46.56	46.63
24°	46.47	46.48	46.54	46.29	46.32	46.34	46.22	46.45	46.44
28°	46.41	46.28	46.32	46.1	46.02	46.18	46.07	46.21	46.23
32°	46.3	46.09	46.13	45.99	45.81	45.96	45.84	45.99	45.98
36°	46.07	45.78	45.87	45.71	45.5	45.72	45.62	45.59	45.73
40°	45.74	45.35	45.5	45.35	45.07	45.39	45.23	45.2	45.41

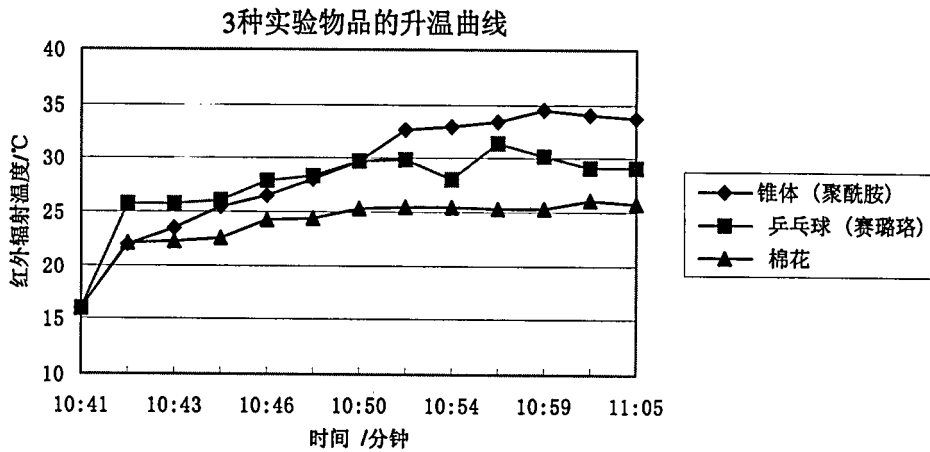


图 4 能量交换过程中的辐射温度变化

Fig. 4 Variation of radiant temperature during energy exchange

### 3.3 非同温像元热辐射方向性模型的验证结果

#### 金属黑板组分方向性比辐射率的估计

从对金属黑板表面的方向辐射观测数据中，我们看到，金属黑板背景不是黑体，其方向性比辐射率可以从观测的方向辐射亮温中估计。实验中，用温控循环水保持恒温的金属板的表面温度为 323.15K，其表面亮温随观测角的变化如表 3，同时观测实验室内的平均环境辐射亮温  $BT_{env}$  为 289.15K。对于这一同温体，其表面辐射满足 Planck 公式的应用条件。将表面辐射表示为观察方向的函数，我们有：

$$L_1(\theta) = \epsilon_1(\theta) B(T_1) + (1 - \epsilon_1) L_{env} \quad (13)$$

这里  $L_{env}$  为平均环境辐射，假定为各向同性。则由式 (13) 可得：

$$\epsilon_1(\theta) = [L_1(\theta) - L_{env}] / [B(T_1) - L_{env}] \quad (14)$$

式中： $L_1(\theta)$ 和  $L_{env}$  可以从观测亮温计算得到：

$$L_1(\theta) = B[BT_1(\theta)] \approx \sigma BT_1^{n\lambda}$$

$$L_{env} = B(BT_{env}) \approx \sigma BT_{env}^{n\lambda}$$

这里  $n\lambda$  是随波长范围变化的，根据唐新斋的实验<sup>[11]</sup>，在 7—13  $\mu\text{m}$  的观测波长范围内，我们取  $n\lambda$  为 3.849。由式(14)计算得到了金属板组分比辐射率的方向性变化  $\epsilon_1(\theta)$ ，见表 5 和图 5。其天顶方向与实验中最大天顶角 40°观测的方向比辐射率的最大差别为  $\Delta\epsilon_1$  是(0.9856—0.9465)，为 0.0391。

这里要注意，我们假定金属黑板具有恒定的表面温度  $T_1$ ，因而金属黑板表面辐射的方向性主要

来自于  $\epsilon_1(\theta)$ 。但实际上观测实验表面有辐射亮温 0.5K 之内的变化，那么表面的非同温是否会有一定的影响，影响程度如何，还有待于进一步研究。

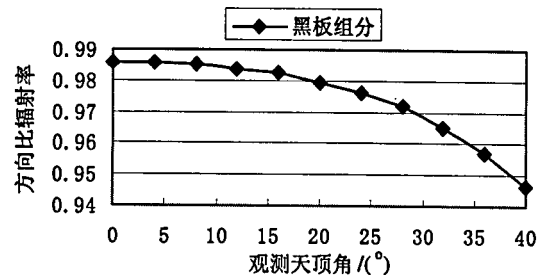


图 5 黑板组分比辐射率的方向性

Fig. 5 Directionality of the emissivity for metallic board

表 5 金属黑板组分观测亮温和比辐射率的方向性

Table 5 Directionality of the temperature and emissivity of metallic board

温度单位: K		
$\theta$	$BT_1$	$\epsilon_1(\theta)$
0	321.03	0.985581
4	321.03	0.985581
8	321.02	0.985224
12	320.98	0.983798
16	320.94	0.982373
20	320.86	0.979523
24	320.77	0.976320
28	320.64	0.971698
32	320.45	0.964953
36	320.23	0.957156
40	319.93	0.946549

锥体组分表面温度的估算

实验中锥体组分表面温度的测量，是采用了辐射亮温的间接测量方法。将处于室温的尼龙锥体簇集于恒温金属黑板上，放上 20 分钟后辐射温度观测值基本稳定，在天顶方向观测到的平均辐射亮温  $BT_2 = 307.05K$  (4 次观测平均)。此时平均环境辐射  $BT_{env} = 289.15K$ 。另外方法测得  $\epsilon_2 = 0.938$ ，并设尼龙材料比辐射率不随观察方向变化，从下式：

$$L_2 = \epsilon_2 B(T_2) + (1 - \epsilon_2) L_{env} \quad (15)$$

就有：

$$T_2 = B^{-1}\{1/\epsilon_2 [L_2 - (1 - \epsilon_2) L_{env}]\} \quad (16)$$

由式 (16) 反演得到组分温度  $T_2 = 312.29K$ 。

非同温像元辐射的方向性

在采用前两步所述方法获得组分参数的基础上，根据已有的实验数据，我们采用第 2 节中的模型计算了像元的方向辐射，计算中假定方向辐射随

方位均匀分布。从像元结构的几何光学模型，根据实验目标组分的空间分布和单个锥体的几何尺寸，计算不同观察方向上两组分在像元中的面积比  $a_1(\theta)$  和  $a_2(\theta)$ 。其中  $a_1(\theta)$ ，即黑板背景所占的面积在天顶观测时为像元总面积的 90.5%，在观察角为  $40^\circ$  时，面积比减少到 86.3%，详见表 6。可见此实验中锥体组分所占的面积比较小，某一锥体对环境辐射的反射和锥体本身热辐射在周围锥体间的多次散射，对观察视场内的总辐射而言，相对影响较小，大部分被附近的黑板背景吸收。因此我们在这里的计算中略去多次散射的影响是合理的。

用模型计算的像元在  $7-13\mu m$  波段内的总辐射亮温与观测数据的比较见表 6、图 6，二者吻合很好。模型计算中参考温度用式 (3)，计算得到  $T_0 = 320.97K$ 。表 6 中  $BT_v$  为模型计算的方向辐射亮温， $BT_{meas}$  为相同方向的观测值。

表 6 锥体—金属板像元辐射温度模型计算结果及其与观测数据的比较

Table 6 The computed radiant temperature for the cone models and metallic board and its comparison with observed data

comparison with observed data							温度单位: K
$\theta$	$a_1(\theta)$	$\epsilon_{BRDF}$	$\Delta \epsilon_{GO}$	$\epsilon_0(v)$	$L_v$	$BT_v$	$BT_{meas}$
0	0.905480	0.981	0.013	0.994	78.932	319.722	319.780
4	0.905480	0.981	0.013	0.994	78.932	319.722	319.760
8	0.905480	0.981	0.013	0.994	78.923	319.713	319.750
12	0.905480	0.979	0.013	0.992	78.888	319.677	319.710
16	0.905474	0.978	0.013	0.991	78.853	319.640	319.660
20	0.902022	0.975	0.013	0.988	78.740	319.520	319.560
24	0.896339	0.972	0.012	0.984	78.590	319.362	319.420
28	0.889427	0.968	0.011	0.979	78.391	319.152	319.220
32	0.881504	0.962	0.010	0.972	78.131	318.877	318.980
36	0.872571	0.955	0.009	0.963	77.837	318.564	318.680
40	0.862529	0.945	0.007	0.953	77.468	318.171	318.310

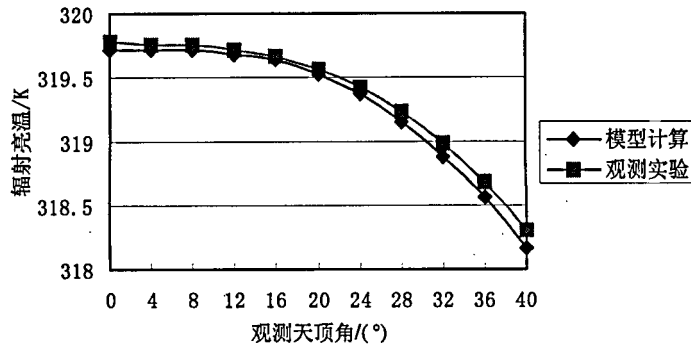


图 6 锥体—金属板像元辐射温度测量值与模型计算结果的比较

Fig. 6 The comparison between the computed results and the observed data

## 4 结论与讨论

通过室内模拟实验和热辐射方向性模型的分析, 我们认为, 用热红外遥感的手段进行像元尺度的陆地表面温度提取时, 既需要考虑非同温像元内各组分的比辐射率方向性, 又要考虑各组分间温差而引起的像元有效比辐射率修正问题。Li-Strahler-Friedl 的概念模型在实验的基础上得到了验证。

下一步所要做的工作将是加入地面的先验知识, 以提高像元组分参数反演的精度。然后应用到陆面温度的遥感中去。

## 参考文献 (References)

- [1] Dozier J., Warren S.G. Effect of Viewing Angle on the Infrared Brightness Temperature of Snow [J]. *Water Resour. Res.*, 1982, 18(5): 1424—1434.
- [2] Zhang Renhua. Far Distance Emissivity Measurement of Object by CO<sub>2</sub> Laser [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1987, 2: 108—113.
- [3] Norman J.M., Becker F. Terminology in Thermal Infrared RemoteSensing of Natural Surfaces [J]. *Remote Sensing Review*, 1995, 12: 159—173.
- [4] Price J.C. Estimating Surface Temperature from Satellite Thermal Infrared Data—a Simple Formulation for the Atmospheric Effect [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1983, 13: 353—361.
- [5] Becker F., Z.L. Li. Toward a Local Split Window Method Over Land Surface [J]. *Int. J. Remote Sens.* 1990, 11(3): 369—393.
- [6] Li Z.L., Becker F. Feasibility of Land Surface Temperature and Emissivity Determination from AVHRR Data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1993, 43: 67—85.
- [7] Wan Z., Z.L. Li. A Physics-bases Algorithm for Retrieving Land Surface Emissivity and Temperature from EOS/MODIS data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997, 35(4): 980—996.
- [8] Li Xiaowen, Strahler A.H., Friedl M. A Conceptual Model for Effective Directional Emissivity from Non-Isothermal Surface [J]. *IEEE Trans. On GARS*, 1999, 37(5): 2508—2517.
- [9] Balick L., Hutchinson B. Directional Thermal Infrared Exitance Distributions from a Leafless Deciduous Forest [J]. *IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, GE-24(5): 693—698.
- [10] Li, X., A. Strahler. Geometric-Optical modeling of a conifer forest canopy [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1985, GE-23(5): 705—721.
- [11] Tang Xin-zhai, Zhang Ren-hua, Su Hong-bo, Sun Xiao-min. The Sealing-cavity Method for Determining Emissivity and Its Deviation Analysis [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(1): 1—7. [唐新斋, 张仁华, 苏红波, 孙晓敏. 比辐射封闭法测定技术及误差分析[J]. *遥感学报*, 2000, 4(1): 1—7.]

## The Indoor Simulation and Validation of Thermal Radiation Directionality Model for Three Dimensional Surface with Heterogeneous Temperature

Su Hong-bo<sup>1</sup>, Wang Jin-di<sup>2</sup>, Li Xiao-wen<sup>2</sup>, Zhang Ren-hua<sup>1</sup>, Tang Xin-zhai<sup>1</sup>, Sun Xiao-min<sup>1</sup>

*(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;*

*2. Research Centre of Remote Sensing and Geography Information System, Beijing Normal University, Beijing 100875)*

**Abstract:** Based on the experiment of Indoor simulation in the laboratory, this paper applied the thermal radiation directionality model to verify its effectiveness on pixel scale. When the corresponding ground surface is primarily composed of three dimensional structure and is of heterogeneous temperature in a pixel, the observing data and analysis show that the directionality of radiant temperature of one pixel is due to the geometrical construction and the temperature difference between the sub-components in the pixel. In the indoor simulation experiment of three dimensional heterogeneous surface, it proved that the thermal radiation directionality model worked well in temperature inverting on pixel scale.

**Key words:** thermal infrared remote sensing; emissivity; thermal radiation directionality model; pixel of heterogeneous temperature