

文章编号: 1007-4619(2000)增-0048-05

# 非同温离散体热辐射方向性模拟与验证

陈良富<sup>1</sup>, 庄家礼<sup>1</sup>, 徐希孺<sup>1</sup>, 张仁华<sup>2</sup>, 苏红波<sup>2</sup>

(1. 北京大学 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 自然界中的离散植被类型是广泛存在的, 用离散圆锥体代替单棵树冠, 详细说明了用蒙特卡罗方法模拟非同温离散体热辐射方向性规律的过程。模拟结果经室内实验结果对比表明: 对较为光滑的目标作朗伯体假设, 以及只考虑目标物的直接辐射而忽略多次散射, 其模拟结果与实验结果相差稍大。

**关键词:** 非同温像元; 热辐射方向性; 蒙特卡罗方法

**中图分类号:** TP701/O572.31 **文献标识码:** A

## 1 引言

陆地表面的地物覆盖类型是多种多样的, 人们通常根据覆盖物的边界特点将植被类型分为连续植被类型、离散植被类型和连续与离散之间的过渡类型。如稀疏的森林就属于离散植被类型。为了提高地表温度的遥感反演精度, 实现组分温度的反演, 我们必须要了解各类地物在非同温状态下的热辐射方向性规律。本文以圆锥体来代替单个树冠, 用蒙特卡罗方法模拟非同温状态下离散体的热辐射方向性规律, 并在室内进行实验验证。

## 2 模拟原理与方法

### 2.1 原理

为了探讨非同温离散体的热辐射方向性规律, 我们选取一块能控制温度的加热平台, 将同样大小的圆锥体放置平台上构成混合像元。假设加热平台背景和圆锥体的温度分别为  $T_b$  和  $T_c$ , 比辐射率分别为  $\epsilon_b(\theta)$ 、 $\epsilon_c(\theta)$ , 则这一目标物就构成了非同温混合像元。根据非同温混合像元热辐射方向性的一般规律<sup>[1]</sup>, 不同视角方向上的传感器所接收到的热辐射值  $L(\theta)$  由背景辐射和圆锥体辐射两部分组成 (图 1):

$$L(\theta) = \epsilon_{eb}(\theta) \cdot L_b(T_b) + \epsilon_{ec}(\theta) \cdot L_b(T_c) \quad (1)$$

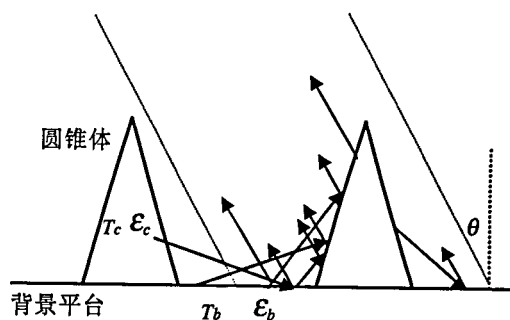


图 1 非同温离散圆锥体热辐射机理示意图

Fig.1 Sketch of infrared radiance of non-isothermal discrete cones

其中  $\epsilon_{eb}(\theta)$  和  $\epsilon_{ec}(\theta)$  分别是背景和圆锥体在  $\theta$  方向上的有效比辐射率, 其只取决于圆锥体与背景之间的结构和比辐射率。由于热辐射是光子的直接辐射及其在组分之间的多次散射辐射的总和, 而蒙特卡罗方法适合于描述粒子在介质中的这种传输过程<sup>[2]</sup>。对于确定的加热平台和圆锥体构成的目标, 组分有效比辐射率  $\epsilon_{eb}(\theta)$  和  $\epsilon_{ec}(\theta)$  可以用蒙特卡罗方法来模拟获得。在地球温度范围内比辐射率不随温度变化和“局地热平衡”条件下, 基于基尔霍夫定律和互逆原理跟踪从传感器方向射向目标物的光子与背景或圆锥体碰撞过程, 统计光子被背景或圆锥体吸收的有效吸收比例, 就可以得到组分有效比辐射率

收稿日期: 1999-11-15; 修订日期: 2000-08-10

基金项目: 国家攀登预选项目 (95-预-38)。

作者简介: 陈良富 (1965—), 男, 1999年毕业于北京大学遥感与地理信息系统研究所, 获博士学位。现从事遥感基础理论教学与研究工作。

值。再用公式(1)计算获得不同角度的辐射亮度值(以亮度温度表示)。

## 2.2 蒙特卡罗模拟过程描述

蒙特卡罗模拟热辐射传输的关键点是正确的描述光子的输运随机过程。这一随机过程是从光子射向目标直到光子离开目标物或光子完全被目标物吸收的整个过程。本次对离散圆锥体热辐射模拟的随机过程描述如下:

(1)光子从某一天顶角射向目标,产生随机数判断光子是与背景碰撞(过程2)还是与圆锥体碰撞(过程3)。

(2)若光子击中背景,则根据光子入射方向与背景法向的夹角,记录该光子被背景吸收的能量,然后根据 Brakke 等人的反射模型判断光子的反射方向<sup>[3]</sup>。再根据光子的反射方向判断光子是否会击中另一圆锥体。

(3)若光子击中圆锥体,则根据圆锥体在这一视角下不同方位角(以一度为间隔)的面积概率密度分布函数,产生随机数确定光子随机击中圆锥体处的方位角。由于圆锥面的天顶角等于圆锥体的半顶角,计算光子入射方向和被击中处圆锥面法向的夹角,根据这一夹角,记录光子因该次碰撞被吸收的能量。应用 Brakke 的反射模型,判断光子的反射方向。若光子的天顶角大于  $90^\circ$ ,光子向下反射;否则光子平行或向上反射。根据光子出射点的高度和方向,再判断光子向下反射是击中背景还是击中另一圆锥体;光子平行或向上反射后是击中另一圆锥体,还是射入空中而并入反射项  $\rho_{b \rightarrow a}$ 。

(4)若光子反射后击中背景,则重复过程(2),记录光子剩余能量中被背景吸收的部分;若击中另一圆锥体,则重复过程(3)。跟踪这一光子直到该光子剩余能量小于预先给定的阈值而死亡。然后产生新光子并跟踪它从生到死的全过程。

(5)统计出所有光子分别被背景和圆锥体所吸收的能量后,与总光子的能量相比较便得到背景和圆锥体在该视角下对光子的有效吸收率,这一组有效吸收率就等于该组分有效比辐射率。再根据公式(1)由背景和圆锥体的温度值计算得到该视角的热辐射亮度值。同理可以得到其他视角的热辐射值。

## 2.3 模拟参数

我们在中国科学院地理科学与资源研究所红

外遥感实验室进行了室内实验。室内实验的过程如下:(1)把面积为  $50 \times 50 \text{cm}^2$  大小的背景温度控制在  $50^\circ\text{C}$ ,用自动观测架先观测背景的辐射亮度值随角度的变化情况;(2)迅速将 46 个小圆锥体按随机投点确定的坐标放置好后,观测混合目标辐射亮度值随角度的变化。

模拟所用的基本参数来自室内实验测量。背景加热台表面的比辐射率是通过测量值计算得来的。当加热台温度稳定在  $50^\circ\text{C}$  时,安装自动观测架上的热红外辐射仪测得天顶角  $0^\circ-40^\circ$  度的亮度值(图2)。

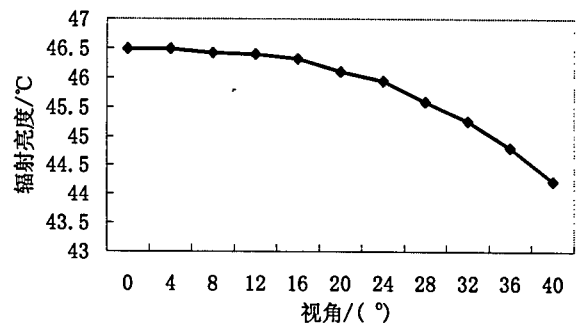


图2 温度为  $50^\circ\text{C}$  时背景的亮度温度值随视角的变化

Fig. 2 Radiance of background changes with view angle at  $50^\circ\text{C}$

由于当时室温为  $27^\circ\text{C}$ ,此亮度值中包含室内环境下行辐射被背景反射部分和加热台与传感器之间  $1.5\text{m}$  的大气层上行辐射值。作近似处理,舍去这一薄层大气的上行辐射值,并假设室内环境为朗伯体辐射,根据大气下行辐射反射效应的近似计算方法<sup>[4]</sup>对传感器的亮度值进行处理,得到加热台的波段平均比辐射率随视角变化的近似值  $\varepsilon_b(\theta)$ 。即

$$L(\theta) = \varepsilon_b(\theta) \cdot L_b(T_b) + [1 - \varepsilon_b(\theta)] \cdot L_b(T_a) \quad (2)$$

$$\varepsilon_b(\theta) = \frac{L(\theta) - L_b(T_a)}{L_b(T_b) - L_b(T_a)} \quad (3)$$

上式中,  $L(\theta)$  为传感器在天顶角为  $\theta$  时的辐射亮度值,  $L_b(T_b)$  为加热台温度为  $T_b$  时的黑体辐射值,  $L_b(T_a)$  为温度为  $T_a$  的室内环境辐射值,由于加热平台的面积和室内空间相比很小,所以室内环境辐射可以作假黑体辐射近似,由此式得到  $\varepsilon_b(\theta)$  的近似计算值(图3)。

背景的比辐射率随角度的变化是比较明显的,因为加热台的光滑的铝板,虽然表面涂以黑体漆明显提高了背景的比辐射率,但不可能成为黑体。圆

锥体材料为塑料，其垂直方向的比辐射率经“双桶法”测得为 0.9373，其表面比辐射率随角度变化情况见图 3。

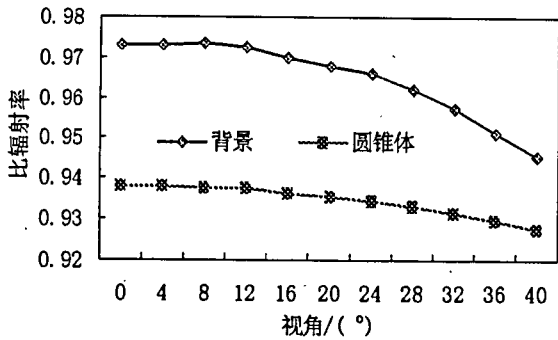


图 3 背景与圆锥体表面比辐射率随视角的变化  
Fig. 3 Emissivities of background and cone change with view angle

2.4 模拟过程中光子与目标物碰撞的随机概率

(1) 光子在射向目标物时首先要回答的是，光子与背景或圆锥体的碰撞概率问题。假设  $n$  个圆锥体按 Poisson 分布放置在面积为  $S$  的背景上，圆锥体为大小尺寸一致，单个圆锥体在  $\theta$  方向上的投影面积为  $S_c(\theta)$ ，则光子击中背景的概率符合 Poisson 分布<sup>[5]</sup>： $P(\theta) = e^{-nS_c(\theta)/S}$ ，其中  $S_c(\theta)$  随视角变化。

(2) 光子击中圆锥体不同方位的概率判断，若光子击中圆锥体（顶角为  $30^\circ$ ），则当光子射向圆锥的天顶角不同时，其击中圆锥侧面不同方位角处的概率不同：当光子从天顶角为  $0^\circ$  垂直向下击中圆锥，则光子击中该圆锥侧面任何方位角的概率是相等的；当光子从天顶角  $1^\circ-15^\circ$  之间射向圆锥体时，则光子击中圆锥侧面不同方位处的累积概率分布满足图 4(a) 显示的规律；当光子的入射角度在  $16^\circ$

$-45^\circ$  时，圆锥顶点的投影出了底面圆范围，不同角度入射的光子击中圆锥体侧面不同方位角处的概率符合图 4(b) 的规律。

2.5 光子与圆锥面和背景碰撞后的反射方向

光子与圆锥面和背景碰撞后的反射方向用 Brakke 等人的反射模型来判断，这一模型表明反射角决定于不同的粗糙度及不同的入射角度。

$$R = R_{\max} \cos^b \left( \frac{\theta - \theta_{\max}}{\omega} \right) \quad (4)$$

其中  $R$  是任意角度  $\theta$  的反射率值， $R_{\max}$  是最大反射率值， $b$  和  $\omega$  是参数：

$$\omega_l = 1 + 2\theta_{\max}/\pi, \quad \omega_r = 1 - 2\theta_{\max}/\pi$$

对朗伯体土壤表面， $b=1, \omega=1$ ，且任何入射角度，光子的出射角分布是相同的。对非朗伯体，参数  $b$  与反射表面的粗糙度有关， $b$  值越大出射角分布范围就越小；同一参数  $b$ ，随着入射角度的增大，出射角的范围变小，反射性质越接近镜面反射特性。

令  $r = R/R_{\max}$ ，对出射角概率作归一化处理 ( $r$  代表不同出射角度的概率值)。对每一入射角所形成的出射角度分布图求面积，然后分别求出  $0^\circ-180^\circ$  范围内每  $2^\circ$  间隔内所包含的面积占整个面积的比例及其累积面积比例，则这一面积比例值就是每  $2^\circ$  间隔内所含面积的概率密度，根据这一概率密度得到累积概率分布。根据这一分布，产生一个随机数，根据随机数所在的面积累积概率区间来确定该区间的角度值，这一角度就是光子出射角度。为了使数据更精确，本文将入射角在  $0^\circ-90^\circ$  间以  $2^\circ$  间隔把入射角分为 45 个区段。

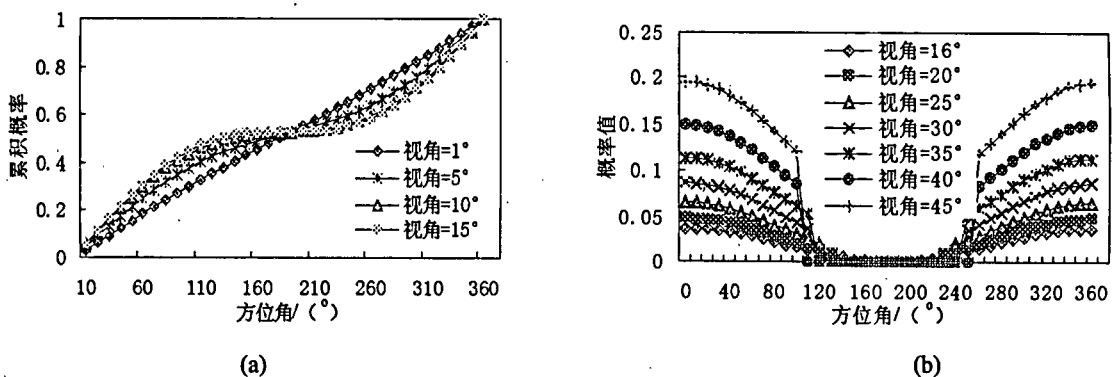


图 4 不同视角时光子击中圆锥侧面不同方位角处的概率分布  
注：(a) 视角在  $1^\circ-15^\circ$  之间；(b) 视角在  $16^\circ-45^\circ$  之间

Fig. 4 Probabilities of photon hitting cone surface of different azimuth change with view angle

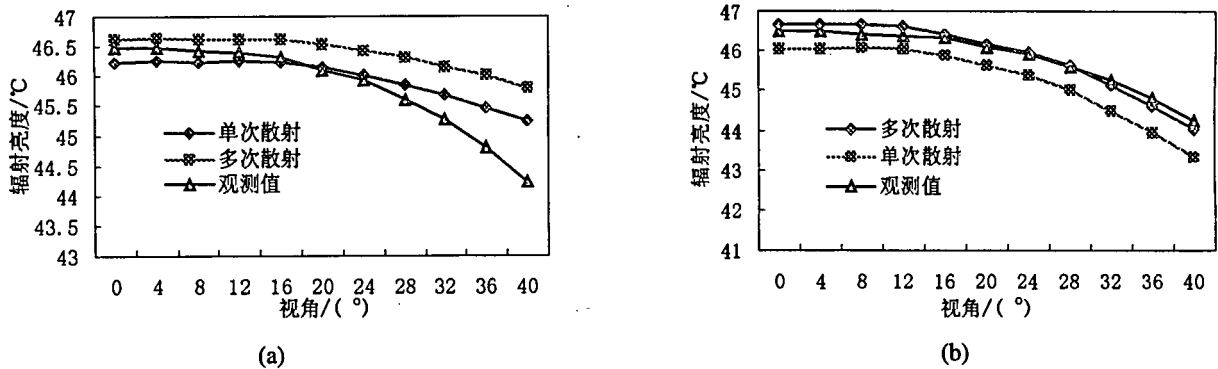


图5 非同温离散圆锥体热辐射亮度模拟值与实验观测值比较

注: (a) 朗伯体假设; (b) 组分比辐射率随角度变化

Fig. 5 Comparison between simulated and test value of infrared radiance of non-isothermal discrete cones

### 3 模拟结果与实验对比

模拟中分别进行了两种情况的处理,一是假设背景和圆锥体表面为朗伯体,其吸收率取天顶角为零度时的比辐射率值,以此与比辐射率随角度变化的模拟结果进行对比;二是进行了多次散射和单次散射的对比,多次散射如上述过程所描述,单次散射则是只考虑光子与背景或圆锥体发生一次碰撞的贡献,即只考虑背景和圆锥体的直接辐射,忽略多次散射辐射的贡献,模拟结果见图5。

模拟得到的辐射亮度值随角度变化结果与实验结果对比表明:

(1) 把圆锥和背景看作朗伯体,比辐射率取垂直方向上的值,则单次散射和多次散射模拟的亮温结果随角度的变化与观测值的走势相差较大(图5(a)),这表明对粗糙度较小的人为加工物进行朗伯体假设与事实不符。

(2) 用随角度变化的圆锥和底板比辐射率数据分别进行单次散射和多次散射进行了模拟,发现多次散射的结果最接近观测值(图5(b))。

(3) 图5(b)中多次散射模拟值与观测值之间仍存在一定的误差,原因有多种,或因模拟所用的背景与圆锥体的比辐射率值与实际有一点差距,或消除环境辐射误差的精度不够高等。

### 4 结论

在局地热平衡和比辐射率与温度无关的前提下,在准确描述离散圆锥体热辐射机理的前提下,用蒙特卡罗方法能很好地模拟计算圆锥体和背景两种组分的有效比辐射率值,并进而采用公式(1)

得到非同温像元的辐射亮度值。虽然圆锥体与单棵树冠还有一定差别,但原理上应是相同的,只是在光子击中树冠时,除了要考虑被树冠反射外,还需考虑在光子穿过树冠或在树冠中运行后击中组分等机制。从辐射亮度的模拟值和实验结果对比可以看出,热辐射中多次散射的贡献是不可忽略的。而且在考虑组分的非朗伯体特性时,要根据组分具体的粗糙度来判断,否则盲目的朗伯体假设会引起较大的误差。

### 参考文献(References)

- [1] Chen Liangfu, Zhuang Jiali, Xu Xiru, Niu Zheng, Zhang Renhua, Xiang Yueqing. The concept of effective emissivity of non-isothermal mixed pixel and its test[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(7):788—795.
- [2] V. S. Antyufeev, A. L. Marshak. Monte Carlo method and transport equation in plant canopies[J]. *Remote Sensing Environ.*, 1990, 31:183—191.
- [3] T. W. Brakke, J. A. Smith, J. M. Harnden. Bidirectional scattering of light from tree leaves[J]. *Remote Sens. Environ.*, 1989, 29:175—183.
- [4] Chen Liangfu, Xu Xiru. An Approximate Numeration and Error Estimation on Atmospheric Downward Radiance Effect in Thermal-infrared Remote Sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1999, 3(3):165—170. [陈良富, 徐希濡. 热红外遥感中大气下行辐射效应的一种近似计算与误差估计. *遥感学报*, 1999, 3(3): 165—170.]
- [5] L. Xiaowen, Strahler H. Modeling the Gap Of a Discontinuous Vegetation Canopy[J]. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(2):161—170.

## Simulation and Test of Radiant Directionality of Non-Isothermal Discontinuous Target

CHEN Liang-fu<sup>1</sup>, ZHUANG Jia-li<sup>1</sup>, XU Xi-ru<sup>1</sup>, ZHANG Ren-hua<sup>2</sup>, SU Hong-bo<sup>2</sup>

( 1. Institute of Remote Sensing & GIS, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, CAS, Beijing 100101, China )

**Abstract:** The discontinuous vegetation canopy widely exists in the world, and the cone has been substituted for discontinuous vegetation canopy in this paper, in order to describe the Monte Carlo method used to simulate the radiant directionality of non-isothermal discontinuous target. Comparing the simulated result with that of indoor experiment, it shows a large difference when the relatively smooth target has been assumed to be Lambertian and only directive radiance of targets has been taken into account while the multi-scattering is ignored.

**Key words:** non-isothermal pixel; radiant directionality; Monte Carlo method