

文章编号: 1007-4619 (2000)-04-0261-05

用 Monte Carlo 方法模拟连续植被热辐射方向性

陈良富¹, 庄家礼¹, 徐希孺¹, 柳钦火², 项月琴³

(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 遥感应用研究所, 北京 100101;
3. 中国科学院 地理研究所, 北京 100101)

摘要: Monte Carlo 方法在可见光遥感中被广泛用于植被冠层的 BRDF 模拟。论述如何应用蒙特卡罗方法模拟连续植被冠层的热辐射方向性, 并用野外实验观测数据对模拟结果进行验证对比。

关键词: 蒙特卡罗方法; 热辐射方向性

中图分类号: TP702 **文献标识码:** A

1 引言

Monte Carlo (蒙特卡罗)方法, 又称随机抽样技巧或统计试验方法。这一方法一般用于处理两类问题: 一是确定性的数学问题, 二是随机性问题, 如粒子在某种介质中的传输、扩散等问题就属于随机性问题, 因为粒子在某种介质内部不仅受到某些确定性的影响, 而更多的是受随机性的影响。由于光子在水平冠层中的输运过程完全是一个随机过程, 所以蒙特卡罗方法在可见光遥感中已被广泛用于植被冠层 BRDF 的模拟计算^[1-4]。处理随机性问题的主要步骤是: (1) 构造或描述问题的概率过程。对于本身就具有随机性质的问题, 主要是正确地描述和模拟这个概率过程。(2) 实现从已知概率分布的抽样。有了明确的概率过程后, 为了实现过程的数字模拟, 必须实现从已知概率分布的随机数的抽样。根据已知分布律(密度或分布密度)产生的随机变量具体值的序列, 即从已知分布率实现抽样的问题。其中最基本的一个概率分布是(0, 1)上的均匀分布。随机数就是具有这种均匀分布的随机变量。在计算机上一般用数学方法按一定的递推关系产生子样, 称为伪随机数(Pseudo-random Numbers)。伪随机数与真正的随机数具有相近的性质, 可把它作为真正的随机数来使用。(3) 建立各种统计量的估计。

在热红外波段, Siegel 等用蒙特卡罗方法从物体主动辐射光子的角度, 模拟了用两块等宽的平行板以 90°角相连接结构的热辐射交换机理^[5]。并对蒙特卡罗方法应用于热辐射交换问题时作了这样的评价: 对热辐射交换问题, 蒙特卡罗程序的复杂性粗略地随问题的复杂性成比例地增加, 而采用惯用方法的求解困难粗略地随问题的复杂性的平方增加。由于热辐射过程本质上属于粒子的传输和散射过程, 是随机性问题。对任意结构的目标, 热辐射中的多次散射问题无法用一个普遍意义的解析表达式。但对于一个结构确定的多组分目标体系, 不论其结构和性质多么复杂, 各组分有效比辐射率特性可以通过蒙特卡罗方法直接进行模拟获得。

2 蒙特卡罗模拟原理与方法

2.1 模拟原理

连续植被的热辐射过程从微观上可以描述为以量子形式的辐射传输和散射过程。在热红外辐射范畴中, 仍可用植被的水平冠层透射理论来建立冠层对辐射的阻截模型, 但在机理上和可见光有一定区别。即热红外辐射中, 冠层组分既是辐射的阻截体(对其底层的土壤辐射和底层植被辐射的阻截), 其自身又是辐射体。由于光子在植被冠层中的碰撞过程是一个随机过程, 而且基尔霍夫定律表明吸收率

收稿日期: 1999-05-25; 修订日期: 1999-09-10

基金项目: 国家“九五”攀登计划资助项目(项目编号: 95-预-38)。

作者简介: 陈良富(1965-), 男, 浙江淳安人, 汉族, 1999年毕业于北京大学遥感与地理信息系统研究所, 获理学博士学位。目前主要从事热红外遥感模型与反演理论和方法研究。已发表多篇学术论文。

等于比辐射率,所以基于互逆原理,统计从传感器方向发出的光子被植被冠层或背景土壤直接或经多次散射后间接吸收的比例,就可得到各个方向的组分有效吸收率。组分有效吸收率等于组分有效比辐射率 $\epsilon_{e1}(\theta)$ 和 $\epsilon_{e2}(\theta)$,在组分温度 T_1 和 T_2 已知的情况下,根据非同温混合像元热辐射方向性模型^[6]:

$$L(\theta) = \epsilon_{e1}(\theta) \cdot L_{bi}(T_1) + \epsilon_{e2}(\theta) \cdot L_{bi}(T_2) \quad (1)$$

就可以得到各方向的总亮度值,从而获得各方向的辐射亮度值。(1)式中的 $L_{bi}(T)$ 代表第 i 通道的黑体辐射值。用于蒙特卡罗模拟验证的热红外辐射仪的响应函数见图 1,经多项式拟合得到通道 1 的宽通道黑体辐射公式为:

$$L_{b1}(T) = 25.466 + 0.2866(T - 240) + 0.0018(T - 240)^2 \quad (2)$$

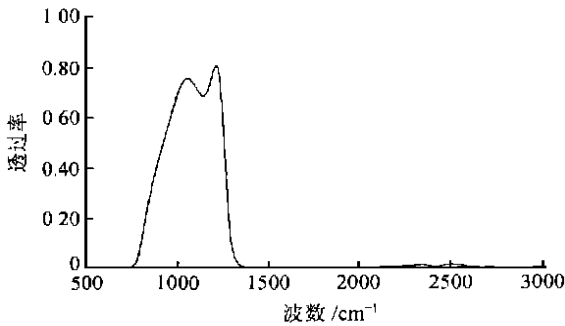


图 1 通道 1 的波长响应函数

Fig. 1 The respond function of channel one

2.2 随机过程描述

用蒙特卡罗方法进行连续植被热辐射的方向性模拟,必须首先准确描述光子在冠层介质中传输的随机过程。假设植被冠层叶子在方位角上是均匀分布的,且视整个冠层厚度为一个单位,不进行分层。光子的运行方向用一个统一的坐标体系(定义垂直向上为天顶角 0° ,垂直向下为 180° ;方位角确定一个 0° 为起始点,逆时针方位角增加,回到起点时为 360°)来控制,所有叶子倾角分布和光子入射、反射方向都基于这一坐标系来表示。连续植被热辐射方向性的模拟是对独立进行地各个方向模拟结果的组合,每个方向上的蒙特卡罗模拟要遵循以下模拟过程:

(1) 一个单位能量的光子从某个方向(某天顶角和方位角)射向冠层。产生一个随机数 r_1 ,根据光子的运行方向和冠层 LAI 与 G 函数值,计算光子的自由路程 L_1 。

(2) 计算光子运行方向在冠层中的最大可能运行距离 L_{max1} ,将光子自由路程 L_1 和 L_{max1} 比较。若 $L_1 > L_{max1}$,光子天顶角大于 90° 时,则光子将穿过植被冠层直接击中背景土壤,进行过程(7);若 $L_1 > L_{max1}$,而光子天顶角小于 90° ,则光子将穿过植被冠层上界而死亡。当若 $L_1 < L_{max1}$,则光子将被冠层中的组分拦截,与冠层组分相碰撞。

(3) 光子与冠层叶子发生碰撞,则要确定被碰撞叶子的角度分布:即根据叶子倾角概率密度分布函数,产生经 2 个随机数 r_2 确定该叶子的倾角;由于叶子的方位角在 2π 空间内随机分布,产生第 3 个随机数 r_3 确定叶子的方位角。

(4) 计算光子与该叶子的矢量夹角,以及光子与该叶子法向夹角,即入射角。根据入射角度值所对应的叶子吸收率,记录本次碰撞光子被冠层叶子吸收的能量值。

(5) 根据叶子的反射模型和具体的入射角,产生随机数 r_4 ,判断叶子的反射角。并根据这一反射角、叶子的天顶角和方位角,确定光子的反射方向:即在统一坐标体系中的天顶角和方位角。

(6) 根据光子反射后的方向,计算这一方向上从碰撞点离冠层边缘的距离 L_{max2} 。再产生一个随机数 r_5 ,计算光子的自由路程 L_2 和 L_{max2} 比较,若 $L_2 < L_{max2}$,则光子继续与冠层叶子碰撞,重复过程(3)。若 $L_2 > L_{max2}$,当光子天顶角小于 90° ,表明光子向上越出植被冠层,则该光子死亡;当光子的天顶角大于 90° 度,则光子将向下击中土壤。

(7) 光子与土壤表面碰撞时,先计算光子的入射角,根据土壤表面在这一角度值处的比辐射率值,确定并记录光子所剩能量中被土壤吸收的部分。再根据土壤表面的反射模型以及光子的入射角数据,产生随机数 r_6 判断光子的出射方向。光子反射后一定向上运行,并带着剩余的能量从反射方向射向冠层,返回过程(1)。

(8) 当光子越出冠层上界,或光子经多次碰撞被吸收后,所剩的能量小于一个很小的阈值(表明光子基本被组分吸收),则该光子死亡。然后重新对一个新的光子进行上述过程的跟踪模拟。

(9) 本文用 50 万个光子数分别对各个角度进行模拟。每个角度的模拟完成后,分别将冠层叶子和土壤吸收的光子的能量数与所有光子的总能量相比,就得到该方向上植被和土壤两种组分对光子的有效吸收率,该有效吸收率就等于在该方向上组分的有效比辐射率。

2.3 模拟过程中的技术处理

(1) 光子自由路程的确定

光子自由路程应用 House 等人光子自由路径模型^[4]：即光子经过光学距离 l 而不发生碰撞的概率为 $P(l) = e^{-l}$ ，光学距离 l 是由 $0-l$ 光学距离光子不发生碰撞的概率分布 $r = \int_0^1 P(l)dl = 1 - e^{-l}$ 决定的，这里 r 是 $0-1$ 之间均匀分布的一个随机数。通过产生随机数就可以获得光学距离 l ： $l = |\ln(1-r)|$ 。而光学距离 l 又可表达为自由路径长度 L 和消光系数的乘积：

$$l = L \cdot (-G \cdot LAI / \cos \theta) \quad (3)$$

这里 G 是叶面沿光子 θ 方向的投影系数。所以每次产生一个随机数就可获得光子能够运行的自由路径。

(2) G 函数

G 函数使用 Ross 等最先引入的形式^[7]，即

$$G(z, \Omega_p) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi_l \int_0^1 d\mu_l \cdot g(z, \Omega_l) \cdot |\Omega_l \cdot \Omega_p| \quad (4)$$

其中 Ω_p 是投影方向。 $G(z, \Omega_p)$ 的物理意义是冠层中位置 z 处单位叶面积在 Ω_p 方向上的投影，冠层的叶子倾角分布密度函数由 $g(z, \Omega_l)$ 决定。其中 $g(\mu_l, \varphi_l)$ 是叶子倾角分布密度函数， $\mu_l = \cos \theta_l$ ， θ_l 是叶子倾角， $|\Omega_p \cdot \Omega_l|$ 是光子和叶子的夹角，由矢量的点乘获得：

$$|\Omega_p \cdot \Omega_l| = \cos \theta_p \cos \theta_l + \sin \theta_p \sin \theta_l \cos(\varphi_p - \varphi_l) \quad (5)$$

(3) 光子与叶面、土壤表面碰撞后反射角度的确定

光子与叶面、土壤表面碰撞后的反射方向用 Brakke 的反射模型来判断^[8]，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。

$$R = R_{\max} \cos^b \left[\frac{\theta - \theta_{\max}}{\omega} \right] \quad (6)$$

其中 R 是任意角度 θ 的反射率值， R_{\max} 是最大反射率值， b 和 ω 是参数， $\omega_l = 1 + 2\theta_{\max}/\pi$ ， $\omega_r = 1 - 2\theta_{\max}/\pi$ 。对朗伯体土壤表面， $b=1$ ， $\omega=1$ ， $\theta_{\max}=0$ ，对于任何入射角度，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(图 2)。

令： $s = R/R_{\max}$ ，对出射角概率作归一化处理(s 代表不同出射角度的概率密度)。对每一入射角所形成的出射角度分布图求面积，分别求出 $0^\circ-180^\circ$ 范围内每 2° 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° 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，产生随机数根据累积概率分布反过来确定该区间的角度值，这一角度就是光子出射角度。为了使数值更精确，本文将入射角在 $0^\circ-90^\circ$ 间以 2° 间隔把入射角分为 45 个区间。

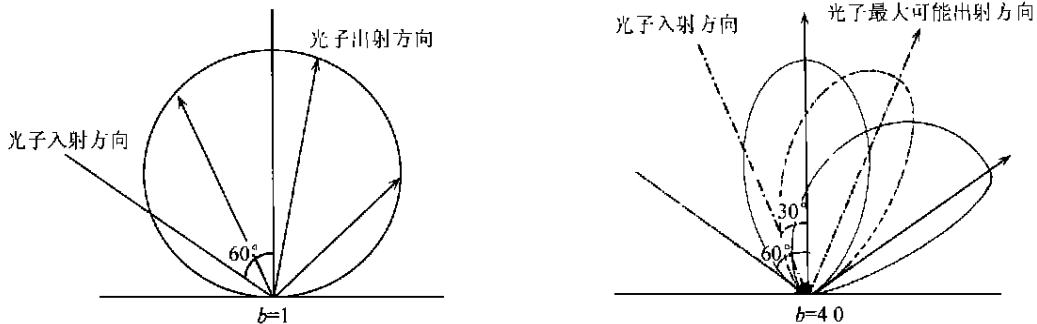


图 2 入射角分别为 30° 和 60° 时的反射强度分布 ($b=1, b=4.0$)

Fig. 2 The Reflective density distribution at the different incident angles

(4) 光子碰撞后的反射方向在总坐标系中的方向确定

光子碰撞后从反射模型中只能得到相对于碰撞平面的反射角，所以必须将其转换为总坐标系的方向。这可以利用光子反射与入射方向所构成的主

平面的法向矢量和光子入射矢量、叶子的法向等均垂直的关系来获得。

2.4 模拟所用的基本参数

为了有效地对模拟结果进行验证对比，用野外

的观测参数作为模拟的基本参数。模拟以冬小麦为对象,所用的基本参数为:

(1) 冬小麦叶倾角分布密度与 G 函数值

1999 年 4 月 13 日至 18 日在禹城站冬小麦观测地进行了叶倾角分布密度的测量,冬小麦叶倾角的分布状况见图 3,由此得到了冠层的 G 函数值随视角变化数据(图 4)。

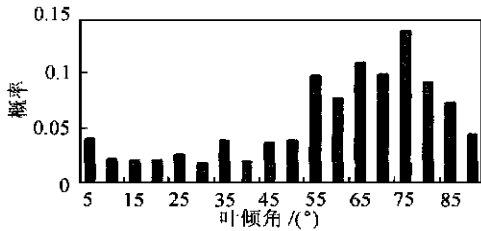


图 3 禹城站观测地冬小麦叶倾角概率密度分布

Fig. 3 Leaf angle distribution probability of winter wheat at Yucheng station

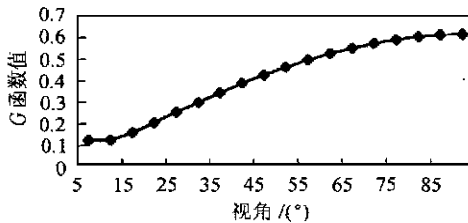


图 4 禹城站观测地冬小麦的 G 函数分布

Fig. 4 The G value of winter wheat at Yucheng Station

(2) 组分比辐射率

把冬小麦单叶面和土壤表面视为朗伯体,在波段 1 范围内冬小麦比辐射率为 0.97 被普遍接受,经“布棚式”比辐射率测量装置¹⁾对禹城站冬小麦观测地土壤比辐射率的测量,其平均值 0.94。

(3) 组分温度

组分温度用天津立文电子有限公司生产的数字温度计测量。该温度计的传感器采用硅半导体材料,分辨力为 0.1℃,测温范围为-50℃-150℃。组分温度测量分别在辐射亮温观测前和观测后进行两次。由于各组分本身存在温度差异,所以要对组分的光照面和背阴面分别进行多点测量,分别统计。测量时要待数字显示比较稳定后才能读数。

3 模拟结果与实验验证

为了有效地验证模拟状况,本文选择了以下二种类型作对比说明:①冠层和土壤的组分温度相近,叶面积指数高;②组分温度差异大,叶面积指数小。

(1) 稠密冬小麦(组分温度相近)

稠密型冬小麦的热辐射方向性观测情况如下:观测时间为北京时 1999 年 4 月 16 日 17 时 43 分。组分温度平均值:冬小麦冠层温度为 16.2℃,土壤平均温度为 16.7℃。观测方位角:南-北。观测天顶角:-81°-0°-+81°。叶面积指数:4.9。

经过蒙特卡罗模拟得到冬小麦的辐射亮度温度随视角的变化数据,模拟结果和观测值相当吻合(图 5)。

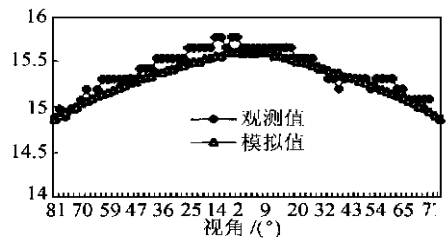


图 5 稠密冬小麦亮温模拟值与观测值对比

Fig. 5 The comparison of the simulated and measured brightness temperature of the dense winter wheat

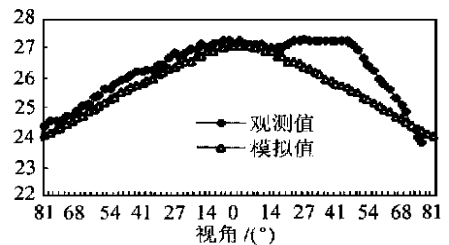


图 6 稀疏冬小麦亮温模拟值与观测值对比

Fig. 6 The comparison of the simulated and measured brightness temperature of the sparse winter wheat

(2) 稀疏型冬小麦(组分温度差异大)

稀疏型冬小麦的热辐射方向性观测情况如下:观测时间为北京时 1999 年 4 月 17 日 13 时 43 分。组分温度平均值:冬小麦冠层温度为 25.5℃(高温

1) 本装置由中国科学院地理研究所张仁华研究员设计制做。

达26.5),土壤平均温度为30.1°C。为了得到较均一的土壤背景温度,在观测前在冬小麦的茎间土壤上铺上一层报纸,观测前迅速撤掉报纸。观测方位角:北-南。观测天顶角:−81°−0°−+81°。叶面积指数:1.4。

模拟得到冬小麦的辐射亮度值随角度变化情况,和通道1的观测结果对比表明:模拟结果和从北方向上观测的数据比较吻合,而和从南方向上观测的数据差异大(图6)。这是因为在下午观测时冬小麦冠层的向阳面叶子组分温度明显偏高,而模拟计算只应用了随机测量的几个温度值均值。

4 结论

在准确描述光子在植被冠层中碰撞、散射的随机过程基础上,用蒙特卡罗方法能很好地模拟热辐射机理。在冠层结构和其他参数确定的情况下,蒙特卡罗方法能很好地描述热辐射在植被冠层中的多次散射过程,统计出连续植被中的各个视角方向上的组分有效比辐射率值,从而获得热辐射亮度值随角度变化的数据,模拟结果表明,对冬小麦叶倾角在方位角上作均匀分布的假设是可行的。

致谢:王锦地教授、张霞、苏理宏、刘强等同志参与了禹城冬小麦叶倾角分布野外测量工作;野外

自动观测架控制器的操作得到了唐亲斋的帮助;在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Smith J A., Oliver R E. Effects of changing canopy directional reflectance on feature selection. *Applied Optics*, 1974, **13**: 1599—1604.
- [2] Idso S B., de Wit C T. Light relations in plant canopies. *Applied Optics*, 1970, **9**: 177—184.
- [3] Kimes D S., Kirchner J A. Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes. *Appl.* 1982, **21**: 4119—4129.
- [4] House L., L. Avery. The Monte Carlo technique applied to radiative transfer. *J. of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1969, **9**: 1579—1591.
- [5] Siegel, R., J. R. Howell. Thermal radiation heat transfer. Second Edition. McGraw-Hill; New York, 1981.
- [6] Chen Liang-fu. The model of radiant directionality of non-isothermal mixed-pixel. Doctoral Dissertation of Peking University, 1999 (In Chinese)[陈良富.非同温混合像元热辐射方向性模型.北京大学1999届博士学位论文.]
- [7] Ross J., T. Nilson. A mathematical model of the radiation regime of vegetation. in: V. K. Pyldmaa (Ed.), *Actinometry and atmosphere of productive systems*, Israel Prog. Sci. Transl. Jerusalem, Israel, 1966, 86—99.
- [8] Brakke T. W., J. A. Smith, J. M. Harnden. Bidirectional scattering of light from tree leaves. *Remote Sens. Environ.*, 1989, **29**: 175—183.

The Simulation of Thermal Radiant Directionality of Continuous Vegetation Using Monte Carlo Method

CHEN Liang-fu¹, ZHUANG Jia-li¹, XU Xi-ru¹, LIU Qin-huo², XIANG Yue-qin³

(1. Institute of Remote Sensing & GIS, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China; 3. Institute of Geography, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Monte Carlo method has been widely used to simulate the BRDF value of vegetation canopy in the field of visible remote sensing. This paper discusses how to use Monte Carlo method to simulate the thermal radiant directionality of the continuous vegetation. Based on two preconditions: the local thermal equilibrium is satisfied and emissivities do not change with temperature, the component effective emissivities of winter wheat and soil had been calculated by Monte Carlo method which can describe the transfer process of photon. Then the radiance $L(\theta)$ of non-isothermal mixed pixel can be calculated according the following model:

$$L(\theta) = \epsilon_{e1}(\theta) \cdot L_b(T_1) + \epsilon_{e2}(\theta) \cdot L_b(T_2)$$

The simulated result were well proved by measured radiance in the field of Yucheng Station of CAS in Shandong province.

Key words: Monte Carlo method; radiant directionality