

文章编号: 1007-4619(2000)增-0053-06

# 水平均匀冠层热辐射的计算机模拟 和模型验证

苏理宏<sup>1</sup>, 李小文<sup>2,3</sup>, 王锦地<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 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;

3. 波士顿大学遥感中心, Boston Univ. USA)

: 讨论使用蒙特卡罗方法模拟非同温水平均匀冠层热辐射的方向性特征。模拟中, 水平均匀冠层用叶面积指数、叶倾角分布函数和叶面积指数廓线描述, 设土壤和叶片均为朗伯体, 蒙特卡罗模拟基于光子在非同温冠层中的传输过程, 并且考虑了光子在冠层内的多次散射。现有的计算机模拟结果验证了李小文等提出的非同温地表有效比辐射率概念模型。

关键词: 热辐射方向性; 蒙特卡罗方法; 模型验证

中图分类号: TP701/TP722.5 文献标识码: A

陆地表面热辐射的方向性受到越来越多的关注<sup>[1-4]</sup>。影响植被冠层热辐射方向性的因素有冠层组分、冠层结构、组分温度和组分发射率。水平均匀冠层是一类基本的冠层结构, 当它只保留叶片和土壤两种组分时, 便成为最简单的冠层。针对复杂像元建立的热红外方向性模型应该能很好地解释这种简单混合像元的热辐射方向性。由于冠层内的叶片和下垫面的土壤受到来自各个方向的入射辐射, 所以即便组分热辐射是有方向性的, 这种不均匀性也要被平均掉一些。为抓住主要矛盾, 本模拟模型假设叶片与土壤的发射和反射都是朗伯的, 叶片的正面和背面有相同的性质。蒙特卡罗方法自60年代就已引入遥感领域<sup>[5-13]</sup>, 用于研究植被冠层的反射特征。陈良富等<sup>[14]</sup>基于 Kirchhoff 定律—— $\epsilon_e(\theta) + \rho_{\theta \rightarrow \Omega} = 1$  也使用蒙特卡罗方法模拟混合像元的热辐射方向性, 他们的主要技术路线是, 让光子沿某一方向入射冠层, 计数被冠层吸收的份额, 吸收率被认为是冠层在该角度的有效发射率。这种基于冠层反射的模拟只能得到冠层在同温状态下的有效发射率。为了真正模拟非同温冠层的方向热辐射, 光子的发射和多次散射应当是直接基于非同

温组分的。在我们的模拟中, 光子在冠层中传输的过程是, 具有不同温度的叶片和土壤发射光子, 光子在冠层中被叶片和土壤多次反射, 直到光子被吸收或逸出冠层。这样就可以直接模拟非同温水平均匀冠层的热辐射。

## 1 水平均匀冠层热辐射的计算机模拟方法

### 1.1 植被结构

计算机模拟中我们采用叶面积指数、叶角分布、叶面积指数廓线和冠层密度4个参数来设置水平均匀冠层。其中, 冠层密度参数是模拟运行的需要; 叶面积指数、叶角分布和叶面积指数随植被高度的分布廓线是刻画冠层的需要。

本次模拟假定叶面积指数沿植被高度是均匀分布的, 密度参数  $S$  取 0.05 (Idso 和 de Wit<sup>[16]</sup>), 根据这一参数将冠层分作  $n$  个薄层,  $n = LAI/S$ 。计算机模拟中把水平均匀冠层划分成若干薄层的理由是: (1)冠层内不同高度可以有不同的叶面积指数和叶片温度, 甚至是不同的叶倾角分布; (2)方便处理

收稿日期: 1999-12-15; 修订日期: 2000-08-10

基金项目: 国家“九·五”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49971059, 和美国 NASA NAG5-7217, NAG5-31369 项目。

作者简介: 苏理宏(1965—), 男, 1986年新疆大学数学系毕业。现为中国科学院遥感应用研究所博士生, 主要从事遥感机理方面的研究工作。

光子在冠层内的多次散射。

假设叶角分布是关于方位对称的, 叶倾角  $\theta$  分布采用 Goel 和 Strebel 划分的 6 类模型<sup>[15]</sup>。注意, 这 6 个叶倾角分布函数实际是叶倾角分布的概率密度函数, 而直接用于蒙特卡罗抽样的须是叶倾角的概率分布函数。

我们采用 Nilson 1968 年提出的  $G$  函数描述冠层单位叶面积在给定方向上的投影系数<sup>[17]</sup>, 该投影与冠层的叶倾角密度分布有关, 表示冠层对光的总拦截效果。用如下积分计算:

$$G(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} g(\Omega_L) |\Omega_L \cdot \Omega| d\Omega_L \quad (1)$$

其中  $G(\Omega)$  为冠层叶表面在  $\Omega$  方向上的平均投影,  $g(\Omega_L)$  是该冠层叶角分布的概率密度函数。积分是对上半球  $2\pi$  空间的, 采用 20 点的 Gauss 双精度积分算法可以较精确地计算出 6 类叶倾角分布的  $G$  函数<sup>[18]</sup>。

薄层间隙率  $P_{gap}(\theta)$  为沿  $\theta$  方向射线穿透薄层的概率, 我们采用经典模型:  $P_{gap}(\theta) = e^{-k(\theta) \cdot LAI / \cos\theta}$ , 其中  $\theta$  为射线方向的天顶角;  $LAI$  为该薄层的叶面积指数;  $k$  为冠层叶表面在射线方向上的投影系数, 即 Nilson 的  $G$  函数。 $\theta$  方向薄层的半层间隙率  $P'_{gap}(\theta) = \sqrt{P_{gap}(\theta)}$ 。

## 1.2 冠层的热红外辐射

假定叶片和土壤均以朗伯方式发射和反射光子, 这样光子运动方向与叶片或土壤法向的夹角  $\theta$  (即局部坐标系下光子飞行方向的天顶角) 以概率分布函数  $r = \sin^2\theta$  取得。 $\theta = \arcsin(\sqrt{r})$ ,  $r$  为 0-1 间的随机分布, 光子的方位角  $\varphi$  在 0 到  $2\pi$  间均匀分布。

一个光子携带的能量  $Q_0 = h \cdot \nu = hc/\lambda$  焦耳, 这里  $h$  是普朗克常数 ( $6.626 \times 10^{-34}$  Js),  $\nu$  是辐射频率 (1/s), 其中  $\lambda$  是波长 (m),  $c$  是光速 ( $3 \times 10^8$  m/s)。对于一般物体, 已知波长  $\lambda$  (m)、温度  $T$  (K) 和比辐射率  $\epsilon$ , 由普朗克公式可得该物体每单位表面积 ( $m^2$ ), 单位时间 (s) 波长  $\lambda$  附近单位波长间隔 (m) 内半球立体角所发射的能量  $M$  (J)。已知  $Q_0$  可得辐射光子数  $N_{photon}$  (个)。水平均匀冠层中, 每个薄层单面发射的光子数为薄层叶面积乘单位面积叶片发射的光子数, 每个薄层都既向上辐射也向下辐射。

由于标准 C/C++ 提供的伪随机数程序是不适用

于蒙特卡罗模拟的, 我们采用更好的伪随机数生成程序<sup>[19]</sup>。

## 1.3 亮温计算

冠层上方的半球空间先按天顶角  $1^\circ$  间隔划分成 90 个环, 每个环再按方位角  $1^\circ$  间隔划分成 360 个片。从冠层飞出的光子必落入其中的一个片, 完成一次模拟后, 计数每一个片上的光子数就可以得到冠层在  $2\pi$  空间的能量分布, 从而可得天顶角  $\theta$  从  $0^\circ$  到  $90^\circ$ ,  $1^\circ$  间隔的冠层方向亮温。

## 1.4 光子与叶片相互作用

本文蒙特卡罗模拟是基于光子与叶片相互作用的, 因此光子被叶片反射后, 反射方向的确定成为模拟中的关键问题。

这里存在两个坐标系, 一个是基于土壤和冠层的冠层坐标系  $Oxyz$ , 另一个是基于叶片的叶片坐标系  $OXYZ$ 。光子击中叶片并被反射后, 总是在叶片坐标系中按朗伯分布取得下一步的飞行方向, 该飞行方向必须换算成冠层坐标系下的方向。在冠层坐标系中, 用光子飞行方向与叶片法向的点积, 判断光子是否击中叶片, 击中的是上表面还是下表面。光子飞行方向由叶片坐标系到冠层坐标系的转换使用下面两个矩阵完成:

击中叶片的上表面时,

$$\begin{bmatrix} \sin\varphi & \cos\theta \cos\varphi & \sin\theta \cos\varphi \\ -\cos\varphi & \cos\theta \sin\varphi & \sin\theta \sin\varphi \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

击中叶片下表面时,

$$\begin{bmatrix} \sin\varphi & -\cos\theta \cos\varphi & -\sin\theta \cos\varphi \\ -\cos\varphi & -\cos\theta \sin\varphi & -\sin\theta \sin\varphi \\ 0 & \sin\theta & -\cos\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$\theta$  和  $\varphi$  分别为叶片法向 (即叶片坐标系  $OXYZ$  的  $Z$  轴) 在冠层坐标系  $Oxyz$  中的天顶角和方位角。按上述两矩阵的转换保证是从右手坐标系到右手坐标系的。

## 1.5 光子运动

非同温均质植被冠层热辐射蒙特卡罗方法模拟光子的运动如下:

(1) 将植被冠层划分成若干均匀植被薄层, 各薄层有自己的  $LAD$  和  $LAI$ 。

(2) 每一植被薄层辐射的光子数为薄层的叶面积指数乘单位面积叶片辐射的光子数。植被薄层向

上方和向下方都辐射光子。

(3) 假定土壤为水平面，只向上方辐射光子，依朗伯发射的概率分布随机生成光子辐射的初始方向。光子运动的处理与植被薄层相同。

(4) 根据植被薄层的  $LAD$  概率分布用随机数生成叶片法线方向。在以此法线方向为  $Z$  轴的叶片局部坐标系下，根据朗伯发射的概率分布随机生成光子的初始方向，该方向须转换为冠层坐标系下的方向。

(5) 假定光子的发射发生在植被薄层的中央。计算光子飞行方向上的该薄层半层间隙率，用均匀分布随机数决定光子是飞出薄层还是被吸收。如果光子被吸收，跳转(4)步发射下一个光子。

(6) 根据光子的飞行方向，计算相邻的上一植被薄层或下一植被薄层的间隙率。用均匀分布的随机数决定光子是穿过该植被薄层还是击中植被薄层内叶片。

(7) 如果光子穿过该植被薄层，则沿原方向继续飞行。否则跳转(9)步。

(8) 如果光子飞出冠层，则将光子飞出方向的光子数计数器加 1。否则跳转到(6)步。

(9) 如果光子击中植被薄层叶片，用均匀分布的随机数和叶片的反射率确定光子是被吸收还是被反射。

(10) 如果光子被吸收，则此光子死亡。从(4)步开始一个新的光子。

(11) 如果光子被反射，则由叶片法线方向和叶片散射的朗伯属性共同决定光子的新飞行方向。叶片法线方向根据叶倾角分布随机产生，光子与叶法线的夹角根据朗伯反射分布随机产生，光子在叶片局部坐标系下的方向须转换为冠层坐标系下的方向。

(12) 计算该植被薄层在光子新方向上的半层间隙率，用均匀分布的随机数决定光子是否穿过这个半层。

(13) 如果穿过这半个植被薄层，跳转到(6)步。

(14) 如果不能穿过去，则此光子死亡。从(4)步开始一个新的光子。

## 2 热辐射方向性的计算机模拟试验

使用上述模拟模型，我们以叶倾角球面型分布的水平均匀冠层为例做了下面 3 个模拟试验。模拟的基本设置是： $1\text{m}^2$  土壤面积上的冠层在 1s 时间间隔内的热红外辐射。 $1\text{m}^2$  面积和 1s 时间间隔的选择

纯粹是为了物理公式推导的方便。蒙特卡罗方法不可避免的带有随机误差，加大光子试验次数误差会相应地减小。在同样的试验条件下，例如黑体每单位面积发射一千万个光子，给出了 3 个模拟试验的拟合残差和相关系数。冠层热辐射有效模拟范围取天顶角  $0^\circ$  到  $85^\circ$ 。2.1 节和 2.2 节用于验证模拟模型，2.3 节使用验证后的算法验证李小文等的非同温表面热辐射方向性概念模型。

### 2.1 无多次散射冠层热辐射

不考虑冠层内多次散射的热辐射近似公式为：

$$L_{canopy}(\lambda, T) = L_{soil}(\lambda, T_1) \cdot P_{gap}(\theta) + L_{leaf}(\lambda, T_2) \cdot (1 - P_{gap}(\theta)) \quad (4)$$

这里  $T_1$  为土壤温度， $T_2$  为冠层叶片温度。设土壤  $T_1=300\text{K}$ ，比辐射率为 0.80，该比辐射率设定仅仅为加大土壤和叶片的区别，验证蒙特卡罗方法。叶片  $T_2=296\text{K}$ ，比辐射率为 0.96；波长为  $10\mu\text{m}$ ，冠层  $LAI=3$ ， $LAD$  取球面型分布；冠层密度函数  $S=0.05$ 。式(4)中的间隙率  $P_{gap}(\theta)$  不是冠层某一薄层的间隙率，而是整个冠层在天顶角  $\theta$  方向的间隙率，其值等于冠层所有薄层在天顶角  $\theta$  方向间隙率的积。模拟所得冠层亮温(模拟值)与按(4)式计算的冠层亮温(理论值)如图 1。相关系数为 0.971，拟合残差为 0.129，可以看到两者符合较好。

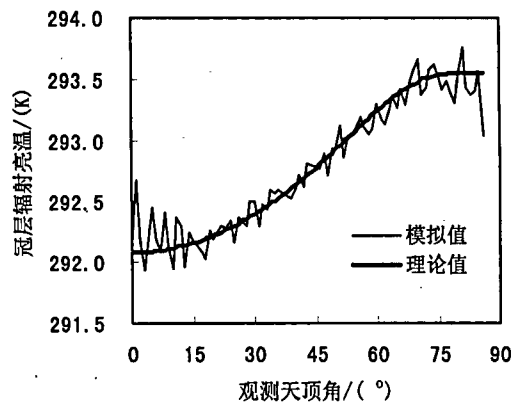


图 1 无多次散射模拟值与亮温近似公式计算值比较

Fig.1 Comparison of simulation with formula for non-multi-scattering case

### 2.2 半无限水平均匀冠层的多次散射

Hapke<sup>[20]</sup>1981 年给出了一组有用的半无限(即仅有上边界而厚度无限)水平均匀混浊介质的辐射传输近似公式，一些结果也被用于植被遥感。Hapke 给出强后向反射(相函数  $P(\xi) = 1 + \cos(\xi)$ )介质的方向-半球反射率为：

$$r(\nu) = (1 - \gamma) / (1 + \gamma \cdot 2 \cdot \mu) + 0.25r\mu / (1 + 2\mu) \quad (5)$$

这里  $\mu$  是入射角的余弦,  $\gamma = \sqrt{1 - r}$ ,  $r$  是微粒的半球反射率。对于水平均匀的半无限冠层, 微粒即是叶片, 如果用相函数来描述光子反射方向与入射方向的关系, 那么当假设叶片无透射且朗伯反射时, 对于球面型叶角分布的冠层, 叶片反射的相函数就是  $P(\xi) = 1 + \cos(\xi)$ , 其中  $\xi$  为入射方向到反射方向的夹角。

根据基尔霍夫定律, 半球-方向发射率为  $\varepsilon(\nu) = 1 - r(\nu)$ , 这意味对叶片反射率  $r = 0.04$  的半无限水平均匀冠层, 方向比辐射率将从 0.99(天顶)变到 0.98(水平)。

用叶片  $T=300\text{K}$ , 比辐射率为 0.96,  $LAI=10$ ,  $S=0.05$ , 球面型叶倾角分布, 土壤为 300K 的黑体, 来模拟半无限水平均匀冠层的热辐射。这里假设土壤为黑体, 目的是简化计算, 因在同温半无限均匀冠层深处, 由于多次散射很难逸出, 已构成同温黑体腔。用  $10\mu\text{m}$  波长, 模拟结果如图 2。相关系数为 0.604, 拟合残差为 0.218, 模拟的冠层亮温(模拟 1)与用 Hapke 公式计算的冠层亮温(Hapke 值)基本符合。模拟 2 是不考虑多次散射时半无限水平均匀冠层热辐射的模拟值, 模拟 2 的设置与模拟 1 完全相同, 唯一的区别是这时忽略了多次散射。可以看出冠层内的多次散射不可忽略。

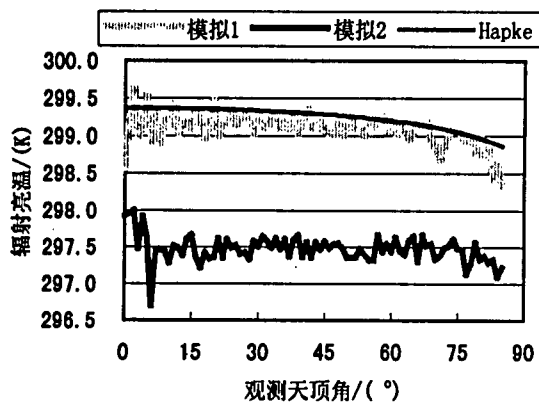


图 2 同温半无限水平均匀冠层模拟值与 Hapke 值比较

Fig.2 Comparison of simulation with Hapke model for semi-infinite canopy case

### 2.3 非同温表面有效比辐射率概念模型的验证

李小文等<sup>[4]</sup>的非同温表面有效比辐射率概念模型(LSF模型)认为非同温地表的热辐射方向性由地表结构和视在温差决定。对遥感像元, 从应用的角度定义一个介于各组分温度之间的平均地温  $T_0$ ,

它独立于波长和观测方向, 则该像元的有效比辐射率  $\varepsilon_0(\nu, \lambda)$  为源于地表结构 BRDF 的  $\varepsilon_{BRDF}$  与地表非同温所致的表观比辐射率增量  $\Delta\varepsilon_{GO}(T|T_0)$  之和:

$$L_\lambda(\nu, T_0) = [\varepsilon_{BRDF} + \Delta\varepsilon_{GO}(T|T_0)] \cdot B_\lambda(T_0) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{BRDF}(\nu) = 1 - r(\nu) = 1 - \int_{2\pi} BRDF(\nu, i) d\Omega_i \quad (7)$$

$r(\nu)$  是方向-半球反射率,  $d\Omega_i$  是微分立体角。

$$\Delta\varepsilon_{GO}(T|T_0) = K_\lambda(T_0) \sum_i a_i(\nu) \varepsilon_i \Delta T_i \quad (8)$$

$\Delta T_i = T_i - T_0$  是组分  $i$  的温度  $T_i$  与平均地温  $T_0$  的差,  $\varepsilon_i$  是组分  $i$  的比辐射率,  $a_i(\nu)$  是观测方向  $\nu$  视场内组分  $i$  的分额,  $\sum_i a_i(\nu) = 1$ 。

使用此概念模型, 有两个温度层的半无限水平均匀冠层的热辐射可表达为:

$$L_\lambda(\nu, T_0) = \left\{ (1 - r(\nu)) + 0.96 \cdot [(1 - X(\nu))(T_u - T_0) + X(\nu)(T_l - T_0)] \cdot K_\lambda(T_0) \right\} \cdot B_\lambda(T_0) \quad (9)$$

其中  $r(\nu)$  为 Hapke 的方向-半球反射率,  $X(\nu)$  为层间间隙率,  $B_\lambda(T_0)$  为普朗克公式中的黑体辐射,

$$K_\lambda(T_0) = \frac{D_\lambda \exp(D_\lambda / T_0)}{T_0^2 [\exp(D_\lambda / T_0) - 1]} \quad (10)$$

$$X(\nu) = e^{-K \cdot \Delta LAI / \cos(\theta)} \quad (11)$$

我们用下述设置来模拟有两个温度层的冠层: 冠层的底下为土壤, 土壤设为是 300K 的黑体, 冠层的下半部分为 LAI 为 10 的叶片层, 叶片温度 300K, 冠层的上半部分是 LAI 为 1 的叶片层, 叶片温度 296K, 冠层叶片的比辐射率为 0.96。模拟中冠层的  $S$  设为 0.05, 冠层的叶倾角分布是球面型。

黑体土壤与半无限叶冠层, 再加上一个小 LAI 的不同温叶冠层, 是为了利用已公认的理论成果(Hapke 公式)来计算 LSF 模型中的  $\varepsilon_{BRDF}$ , 并验证该小 LAI 不同温层对整个冠层热辐射方向性的贡献。这里的关键改进在于本文模拟的多次散射直接源于非同温组分, 而非仅用 Kirchhoff 定律来计算同温结构的多次散射分量。我们忽略了冠层与环境的相互作用, 首先, 本文模型着重模拟冠层温差对冠

层热辐射的影响，并不考虑其对环境辐射的反射或多次反射的影响；其次，冠层叶片温度和土壤温度都是它们与环境（空气、太阳辐照等）作用的综合结果，瞬间可认为处于平衡状态。

模拟的冠层亮温和用李小文概念模型计算的冠层亮温分别是图3中模拟值和LSF值两条曲线，概念模型的 $T_0$ 取298K。相关系数为0.984，拟合残差为0.185，模拟曲线和概念模型曲线符合较好。此时Hapke值是按 $T_0$ 取298K计算的，可以看出与模拟值有显著不同。从这个结果可以看出温差的影响必须考虑。这里模拟值是，包括不同温组分间多次散射在内的全部多次散射时，像元热辐射方向性变化；而LSF值是，忽略像元组分温差对多次散射影响时，像元热辐射LSF模型计算值；显然忽略组分温差对多次散射的影响而带来的误差并不大，是可以忽略的。

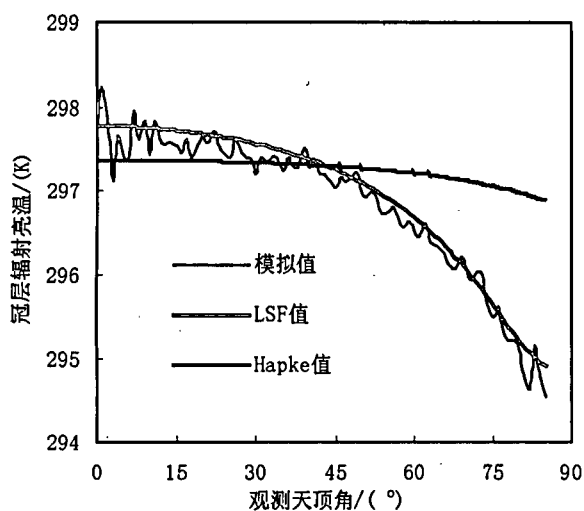


图3 非同温水平均匀冠层模拟值与LSF模型值比较

Fig.3 Comparison of simulation with LSF model for non-isothermal canopy case

### 3 结论

从非同温水平均匀冠层热辐射的蒙特卡罗模拟可以看出，在冠层热辐射方向性中多次散射和温差的贡献都不可忽略。但忽略温差对多次散射的影响而带来的误差并不大，可以忽略。李小文等的非同温表面有效比辐射率概念模型较好地解释非同温像元热辐射的方向性。

### 参考文献 (References)

[1] Jeff Dozier, Stephen G.Warren. Effect of Viewing Angle on the Infrared Brightness Temperature of snow[J]. *Water Resource*

*Research*, 1982, 18(5):1424—1434.

- [2] Francois Becker, Zhao-liang Li. Surface Temperature and Emissivity at various Scales: Definition, Measurement and Related Problems[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1995, 225—253.
- [3] William C.Snyder, Zhengming Wan. BRDF Models to Predict Spectral Reflectance and Emissivity in the Thermal Infrared[J]. *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(1):214—225.
- [4] Li Xiaowen, A.H.Strahler, M.Friedl. A conceptual model for effective directional emissivity from nonisothermal surface[J]. *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5):2508—2517.
- [5] J.A.Smith, R.E.Oliver. Effects of Changing Canopy Directional Reflectance on Feature Selection[J]. *Applied Optics*, 1972, 13(7):1599—1604.
- [6] I.Szwarcbaum, G.Shaviv. A Monte Carlo Model for the Radiation in Plant Canopies[J]. *Agricultural Meteorology*, 1976, 17:333—352.
- [7] J.K.Ross, A.L.Marshak. Calculation of Canopy Bidirectional Reflectance Using the Monte Carlo Method[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24:213—225.
- [8] Kevin D.Cooper, James A.Smith. A Monte Carlo Reflectance Model for Soil Surfaces with Three-Dimensional Structure[J]. *IEEE Trans. On Geosci. and Remote Sensing*, 1985, 23(5): 668—673.
- [9] D.S.Kimes, J.A.Smith. Simulation of solar radiation absorption in vegetation canopies[J]. *Applied Optics*, 1974, 19(16):2801—2811.
- [10] D.S.Kimes, K.J.Ranson, J.A.Smith. A Monte Carlo Calculation of the Effects of Canopy Geometry on PhAR Absorption[J]. *Photosynthetica*, 1980, 14(1):55—64
- [11] Peter R.J.North. Three-Dimensional Forest Light Interaction Model Using a Monte Carlo Method[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 34(4):946—956.
- [12] Yeys M.Govaerts, Michel M.Verstraete. Raytran: A Monte Carlo Ray-Tracing Model to Compute Light Scattering in Three-Dimensional Heterogeneous Media[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(2):493—505.
- [13] Victor S.Antyufeev. Monte Carlo Method and Transport Equation in Plant Canopies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 31:183—191.
- [14] Chen Liangfu, Zhuang Jiali, Xu Xiru, Niu Zheng, Zhang Renhua, Xiang YueQing. Concept and validation of non-isothermal heterogeneous pixel[J]. *Science Bulletin*, 2000, 45(1):22—29. [陈良富, 庄家礼, 徐希儒, 牛铮, 张仁华, 项月琴. 非同温混合像元热辐射有效比辐射率概念及其验证. 科学通报, 2000, 45(1):22—29]
- [15] LI Xiaowen, Wang Jindi. Vegetation Optical Remote Sensing Models and Vegetation Structure Parameterization. Beijing: Science press 1995(In Chinese)[李小文, 王锦地著. 植被光学遥感模型与植被结

- 构参数化. 北京: 科学出版社, 1995]
- [16] Idso,B, deWit,C.T. Light Relations in Plant Canopis[J]. *Applied Optics*, 1970, 9:177—184.
- [17] Nilson,T. On the Optimum Geometric Arrangment of Foliage in the Plant Cover. In:Solar Radiation Regime in Plant Stand Acad Sci ESSR, Inst Phys. Astron, Tartu, USSR, 1968.
- [18] Myneni,R.B,Asrar,G, Gerstl,S.A.W. Radiative Transfer in Three Dimensional Leaf Canopy[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1990, 205—250.
- [19] W.H.Press, S.A.Teukolsky, W.T.Vetterling, B.P.Flannery. Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing[M], Second Edition.Cambridge University Press 1988, 1992.
- [20] Bruce Hapke. Bidirectional Reflectance Spectroscopy 1.Theory[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(B4): 3039—3054.

## Simulation of Thermal Exitance from Homogeneous Canopy

SU Li-hong<sup>1</sup>, LI Xiao-wen<sup>2,3</sup>, WANG Jin-di<sup>2</sup>

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Research Center of Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Department of Geography and Center for Remote Sensing, Boston University, Boston, MA 02215, USA)

**Abstract:** A model for thermal IR exitance of a plant canopy based on Monte Carlo simulation of photon transport is developed. The canopy is defined by leaf area index, leaf angle distribution, and leaf area profile. Canopy is divided into some layers by layer density. Every layer can have itself leaf area index and leaf angle distribution. Soil and leaf are assumed as Lambertian source, and they also do Lambertian response for photon scattering. The Monte Carlo simulation included mutli-scattering of photon. The LSF conceptual model of effective emissivity for non-isothermal surface is validated. Simulation showed that the multi-scattering between components and component temperature differences of a canopy are two key factors for directional thermal emission of the canopy. Component temperature differences influence effective emissivity weakly, thus the effect can be ignored.

**Key words:** directional emissivity; Monte Carlo simulation; model validation