

不连续植被二向性反射的几何光学 与辐射传输一体化综合模型初探*

李小文 王锦地 刘毅

(中国科学院遥感应用研究所)

朱晓艳

(中国科学院长春地理所)

A.H. Strahler

(美国波士顿大学遥感中心)

1992 年 12 月 15 日收稿

摘 要

本文论述作者对不连续植被冠层与辐射间相互作用机理研究的最新进展,提出了建立不连续植被二向性反射分布函数的几何光学与辐射传输一体化综合模型设想和基本理论。该综合模型的建立以 Li-Strahler 间隙概率模型为基础,在大尺度上用纯几何光学模型反映植被的结构特征,在适于辐射传输模型的尺度上则以冠层内的间隙概率处理叶丛的截获辐射与散射。本文详细说明了冠层内任意高度的间隙率模型,也介绍了多次散射的建模方法。

关键词 二向性反射分布函数 不连续植被 间隙概率

一、前 言

七十年代以来,卫星对地观测主要采取垂直收集数据的方式,获得地面目标的二维信息。对这种数据的解释主要依据目标个体的光谱特征,并且是基于漫反射的假定。这显然是不合理的,也是遥感技术应用理论上的一严重缺憾,同一时期, G. Suits, Goel, A. H. Strahler 及李小文等基于辐射与目标整体性相互作用行为的研究,特别是植物冠层与辐射相互作用机理的研究,证实关于目标作为漫反射体的假定与实际相去甚远,需用二向性反射分布函数(BRDF)来描述,并各自形成了二向性反射的辐射传输模型,几何光学模型和计算机模拟三大流派,使遥感应用基础研究出现了新的生机。这一情景使空间遥感技术方法及应用发生质的飞跃,科学家追求的已不仅仅是地面目标的平面位置和大小,而是目标的三维空间的结构特征的获取。遥感图像信息的应用将从传统的图像判读、分类走向目标空间结构特征的反演,定量遥感前景已呈现在科学的地平线上。

辐射传输(RT)模型是在大气传输模型基础上发展起来的,但由于植被的叶面和土壤对电磁波的散射与大气分子或气溶胶的散射有显著的不同,RT模型必需加入几何光

* 本文的工作,获国家自然科学基金 4880050,美国国家自然科学基金(NSF) INT-9014263 及 NASA NAGW-2082 的资助,谨此致谢。

学的因素,以正确的反映植被结构和土壤结构的影响,RT 模型的优点是能考虑多次散射作用,在均匀植被,尤其在红外和微波段比较重要。其缺点是复杂的三维空间微分方程即使对均匀植被,通常都只能得到数值解,很难建立植被结构与 BRDF 之间明晰的解析表达式。

几何光学模型由于抓住了地物散射与大气散射的主要差别,有简单明晰的优点,特别适用于不连续植被及粗糙地表等 RT 模型难以适用的地物。其不足之处是迄今尚未考虑多次散射对构成“阴影区”地物反射强度的影响,因而在植被趋于连续,阴影区与非阴影区之间反差较小时,不及带几何光学修正的 RT 模型严密。

由于几何光学模型和 RT 模型分别在不同的尺度上具有各自的优点,我们充分利用几何光学模型在解释阴影投射面积和地物表面空间相关性上的基本优势,同时引入 RT 模型在解释均匀媒质中多次散射上的优势,分两个层次来建立承照面与阴影区反射强度的 RT 模型。

根据目前 BRDF 模型研究的进展,建立 RT 模型和几何光学一体化综合模型的时机已经成熟, Myneni 的三维空间 RT 模型已开始放弃叶面在同一高度上均匀分布的概念,开始在大尺度上引入植株的概念。但由于其微分方程的解仍需引入所有植株在三维空间的位置而且计算量极大,迄今尚未能用森林的实测数据进行验证。另一方面,几何光学模型由于引入 Li-Strahler 的间隙率模型^[1,2],不再必需假定植株为不透明的实体,也正向小尺度上的 RT 模型逼近。间隙率模型可以简述如下:

$$P_{gap} = P(0) + \sum_{i=1}^{\infty} P(i)e^{-\tau Si}$$

其中 $P(i)$ 是从给定方向光线穿越 i 个基本颗粒的概率,是由基本颗粒(如树冠)的宏观大小和分布确定的统计量。 Si 是光线穿越基本颗粒的平均路径, τ 是由基本颗粒内部构造(如树叶大小、密度)等决定的衰减常数。这一模型自 1988 年发表之后,已经进行过多次实验验证,它同时也可以视作入射电磁波未经散射部分的微分方程: $\mu \frac{\partial I_0}{\partial \tau} = I_0$ 的统计解。这一统计解极大的简化了在三维空间中复杂边界条件下求解的复杂性,而在实用中我们并不需要知道水平面上每一点的 I_0 的强度,只需要知道一个像元上的平均值。仿此,如果我们知道了穿越基本颗粒路径随高度的分布,以及入射路径与逸出路径的相关性,我们即可求出一次散射的强度沿高度的分布以及对植被 BRDF 的贡献。从而我们也能根据一次散射的分布依次计算二次和多次散射在植被内的分布以及对 BRDF 的贡献。

由于一次散射本身在决定植被光合作用等方面的重要性,本文将介绍建立几何光学与辐射传输一体化的一次反射综合模型的研究进展和结果。

二、不连续植被冠层的间隙率和辐照能量的空间分布

1. 不连续植被冠层内任意高度的间隙率 $P(0)$

本文中除非另行提及,均假定树冠为球型,球心随机分布于高度 h_1 到 h_2 , 半径为 R ,

单位面积内株数为 n 。球形树冠的结果可以很容易推广到椭球树冠，随机分布的假定也不难推广到已知分布，因此这些假定不失其一般性 (Li-Strahler, 1988)^[2]。

在以往的 Li-Strahler 模型和 Strahler-Jupp 模型中，在地面的 $P(0)$ 是由单个树冠在给定方向 θ 在地面的投影面积 Γ 和 n 决定的，

$$P(0) = e^{-n\Gamma} \quad (1)$$

这一公式有时被错误地运用于植被冠层内任意高度。我们的研究表明，在植被冠层内(从 $h_1 - R$ 到 $h_2 + R$)，任意一点可以不受树冠遮挡接受天顶角 θ 方向射线的概率

$$P(0) = e^{-\lambda_v \cdot V_r} \quad (2)$$

其中 λ_v 是 h_1 到 h_2 间单位体积内球心平均数(体密度)，而 V_r 是从给定高度 h ，一个假想的反置的树冠沿 θ 方向的投影被 h_1 和 h_2 平面所夹的体积。也就是说，该点能不受遮蔽的概率等于该点周围树冠大小的体积内不含任一球心，同时该倒置树冠沿 θ 方向投影也不包含任一球心的概率。

图 1 表示几种不同 h_1, h_2 和 h 的情况下 V_r 的几何意义。很明显，末两种情况中，体积的计算等效于投影面积的计算，为 Li-Strahler^[2-4] 中讨论的情况。在其他任何情况下，均应代之以体积计算。

体积 V_r 对任意 h 的公式表达是相当繁杂的，但由于在 Li-Strahler (1992) 文中已给出了任意 h 上该体积的截面积表达， V_r 不难由数值积分得出。用数值积分的另一长处是很容易加入球心密度的高度分布。但这里我们暂不引入这一分布以简化问题。

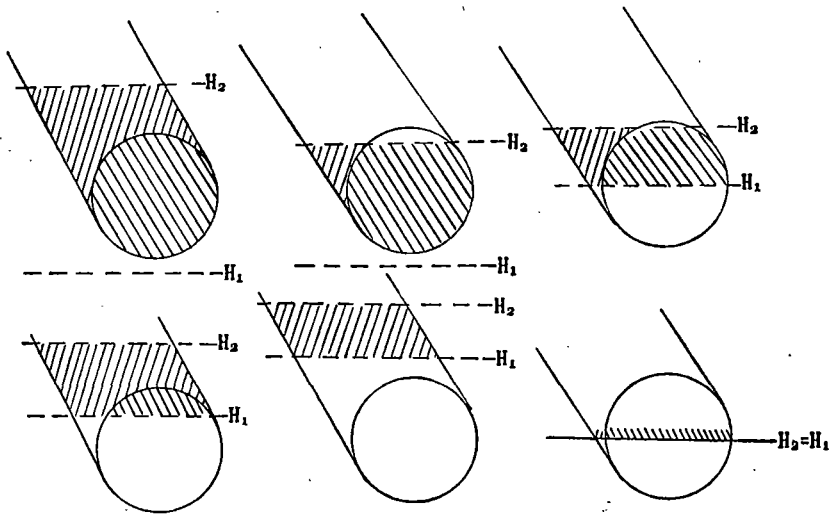


图 1 V_r 的几何意义

Fig. 1 Geometry of V_r

这里需要提及，在公式(2)中，所有的变量， $P(0)$ ， λ_v 和 V_r 均为高度 h 的函数，我们略去了自变量 h 的表达以求简洁。

2. 不连续植被直接承照面积沿高度的分布

在水平均匀连续植被 BRDF 模型中, 入射光在植被的顶部同时进入植被从而开始散射和衰减过程, 从上一节可以看出, 不连续植被与水平均匀植被的一个根本差别就在于入射光在任一高度, 有 $P(0) \times 100\%$ 直接射达而未经衰减和散射。

但是并不是这一部分直射光全部在这一高度开始进入植被。如果在高度 h 有 $P(0|h)$, 而在高度 $h - \Delta h$ 有 $P(0|h - \Delta h)$, 那末, 在高度 $h - \Delta h$ 到 h 之间, 进入植被的直射光的比例为:

$$P_{s=0}(h) = P(0|h) - P(0|h - \Delta h) \tag{3}$$

$P_{s=0}(h)$ 的几何意义是在高度 $h - \Delta h$ 到 h 之间, 植被直接承照面沿 θ 方向投影到水平面的面积占总面积的比例。这一分布本身在植被光合作用的描述, 植被内能量平衡等

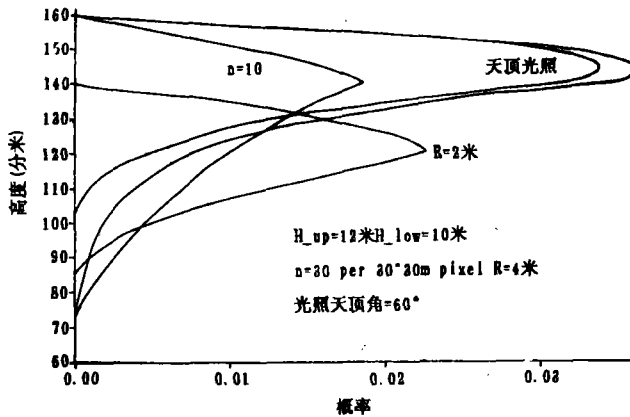


图 2 树冠直接承照面沿高度的分布

Fig. 2 Vertical Distribution of Sunlit Crown Surface

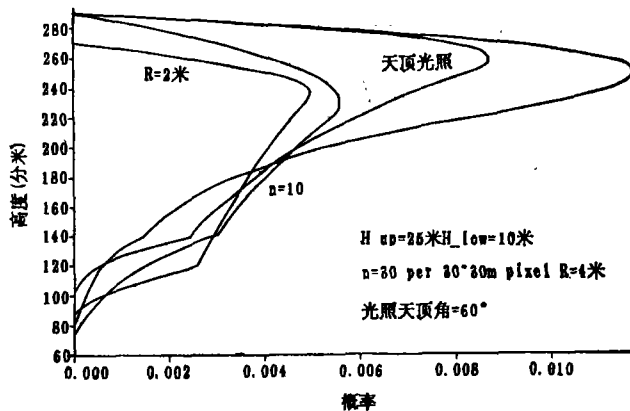


图 3 树冠直接承照面沿高度的分布

Fig. 3 Vertical Distribution of Sunlit Crown Surface

研究中就有极重要的作用。

图 2 和图 3 显示不同植被结构和不同 θ 角时 $P_{s=0}(h)$ 沿高度的分布, 未加标注的曲线表示在缺省值参数时的分布, 其他每一曲线, 表示仅改变某一缺省值参数时的分布, 纵坐标的单位为分米。所有曲线均按 $\Delta h = 1$ 分米作出。

3. 散射路径长度的分布

知道了 $P_{s=0}(h)$, 如果我们假定入射光一旦进入植被, 就可以视作已进入均匀介质, 那么很明显, 在任一高度的散射路径分布:

$$P_{\text{cons}}(s|h) = P_{s=0}(h + s \cdot \cos\theta) \quad (4)$$

然而我们目前没有把握能够作这样的假定而不至于影响模型的精度。幸而, 知道了 $P_{\text{cons}}(s|h)$, 知道树冠的半径和 λ_v , 我们不难把 $P_{\text{cons}}(s|h)$ 转换为不连续植被情况下的 $P(s|h)$ 。(4) 式的物理意义是, 假定入射光进入植被后即可视为进入均匀介质, 则在高度 h 的散射路径长度分布即完全取决于入射光在 h 以上高度进入植被的分布: 有多少光在 $h + S \cos\theta$ 高度上进入植被, 在 h 高度上就有多少光经路径长度 S 衰减与散射, 现在实际上是非均匀介质, 光进入树冠后, 可能逸出树冠, 再进入或者不再进入别的树冠而达到高度 h 平面, 因而 $P(s|h)$ 将不再完全相似于 $P_{s=0}(h + S \cdot \cos\theta)$ 。这个问题在理论上是完全可以解决的 (Li-Strahler, 1988), 但是精确地计算 $P(s|h)$ 似乎并无必要, 因为毕竟最重要的只是 S 较小的部分 (光强沿 S 指数衰减)。因此我们采用一个简化的近似算法。对任一给定的 $P_{\text{cons}}(s|h)$, 首先算出这一给定路径长度上可能穿透的树冠个数的概率 $P(i)$ 。由于我们已经知道至少 S 进入一个树冠, 求出条件概率 ($i > 0$)

$$P'(i) = P(i) / [1 - P(0)] \quad (5)$$

然后将概率 $P_{\text{cons}}(s|h)$ 分配给所有可能的 $P(i)$:

$$P(s'|h) = P'(i) \cdot P_{\text{cons}}(s|h) \quad (6)$$

其中: $S' = S(1 - e^{-3(h) \cdot i/s})$ 而 $\bar{S}(h)$ 是在高度 h 时光线可能穿越单个树冠的平均路径长度。图 4 是给定植被结构下不同高度上散射路径长度的分布, 分布函数本身的值

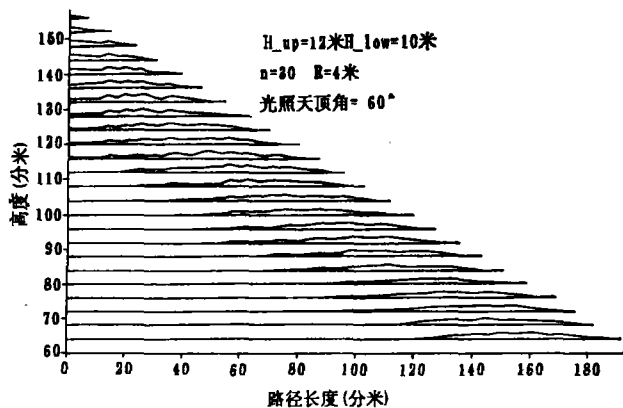


图 4 散射路径长度的分布
Fig. 4 Pathlength Distribution

未标出。图5是其中在3个高度上分布的细部;而两根虚线表示在15米处分布的末端与其余两个高度末端的比较。如果光进入植被后可以视为在连续介质中,则据(4)式,它们应该吻合。从图6中,当树冠株数从每900米²30株,减少到10株时,这个差别增大。

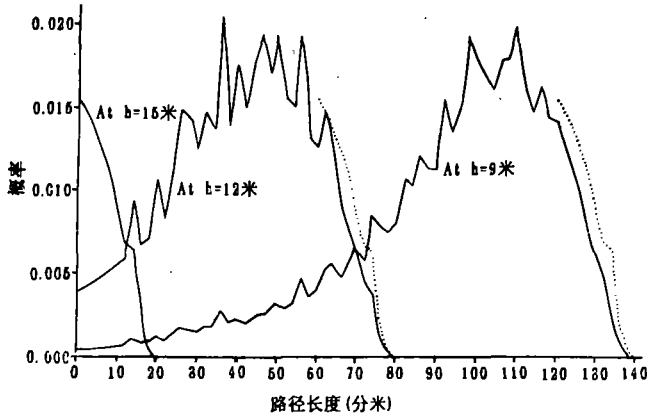


图5 散射路径长度的分布 $n = 30$

Fig. 5 Pathlength Distribution, $n = 30$

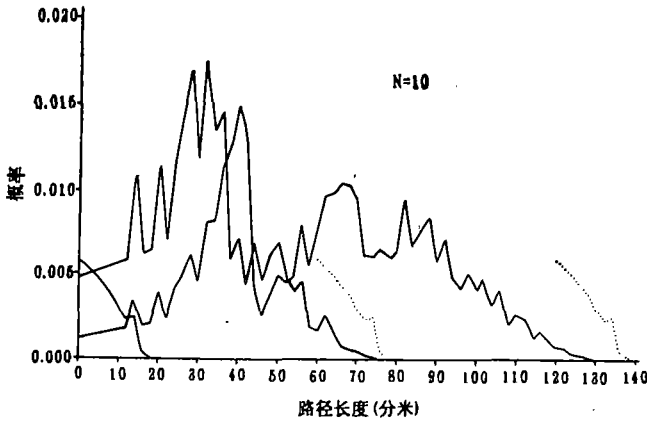


图6 散射路径长度的分布 $n = 10$

Fig. 6 Pathlength Distribution, $n = 10$

从图4—6可以看出由于从 $P_{con}(s|h)$ 到 $P(s|h)$ 的近似变换,分布中产生了很多尖峰,但与采用折积相比,节约了成十倍的计算时间,因而是值得的,这些尖峰不应该对模型的精度造成大的影响。注意在本文中的概率,与计算机程序中一样,均应理解为离散概率,未作从离散到概率密度的变换。

4. 一次散射沿高度的分布

由于

$$\int_0^{(h_1+R-h)\sec\theta} P(s|h) ds = \int_h^{h_2+R} P_{s=0}(h) dh = 1 - P(0)$$

分布 $P(s|h)$ 是平面 h 上阴影区域内所有点的路径长度分布, 包括 h 平面上树冠内和间隙中的点。

分别计算两者的分布是可能的, 但差别甚微而计算繁杂, 所以目前我们假定树冠内和间隙中的阴影区具有同样的分布。

这样, 在植被冠层内高度 h 处树冠内任一点的衰减后的直射光强为 $I_0 e^{-(K \cdot L/D) \cdot s}$ 的概率即为:

$$P[I(h) = I_0 e^{-(K \cdot L/D) \cdot s}] = P(s|h) P_B(h) / [1 - P(0)] \quad (7)$$

其中 K 是叶面沿 θ 方向的投影系数, 由叶面倾角分布函数 (LAD) 决定, 本文中假定叶面倾角分布完全随机, 因而 $K = 0.5$; D 是树冠的平均高度, 即 $4R/3$; L 是单株树冠垂直投影面积上的平均叶面积指数, 在我们的 GO-RT 模型中, 我们倾向于定义单位体积的总叶面积为一个独立的参数, 即此处的 L/D , 但这个定义尚有待于大家习惯。

公式(7)中的 $P_B(h)$ 为在高度 h 处任一点包含在树冠内的概率:

$$P_B(h) = 1 - e^{-\lambda_v \cdot V_B} \quad (8)$$

其中 V_B 是中心位于 h 平面上的倒置树冠被 h_1 和 h_2 平面所截取的体积。

公式(7)给出了衰减后直射光强在植被层内任意高度的分布, 在很多问题中均有重要的实用价值。

至此, 我们可以直接得出在高度 h 处一个很薄的层 Δh 截获的辐射强度分布:

$$P(\Delta I = KL/D \cdot I_0 \cdot e^{-(KL/D) \cdot s} \cdot \Delta S) = P(s|h) \cdot P_B(h) / [1 - P(0)] \quad (9)$$

为简化问题, 在此我们假定叶面吸收率为 α , 其余的一半透射, 一半反射, 且各向同性 (即所谓双朗伯散射), 则一次散射沿高度的分布即完全确定。

三、离散植被冠层 BRDF 的一次散射和多次散射

1. BRDF 的一次散射分量

知道了一次散射的空间分布, 我们可以进而计算二次散射。但为稳妥起见, 我们首先检查一次散射对 BRDF 的贡献, 并检查其合理性。

一次散射具有很强的热点效应, 而这种热点效应又发生在两个层次上, 首先, 如果入射光到达树冠某一点时才首次进入植被, 那末, 在该点处发生的一次散射沿入射光反方向的衰减路径长度亦为零。同时, 沿入射光反方向附近的方向和衰减路径也很可能为零。这是在树冠层次上的热点效应。其次, 入射光进入植被之后, 经衰减路径长度 s 到达某一点, 在该点发生的散射沿入射方向的反方向逸出路径名义上应等于 s , 但由于我们已经知道这一部分直射光是透过叶间的缝隙传过来的, 那末严格按入射光反方向逸出的散射不应受进一步的衰减。这是在叶面层次上的热点效应。

由于叶面层次的热点效应通常只产生很窄的热点尖峰而且是一个已经较好解决了的问题, 本文中将有意识忽略这一效应, 以突出研究其它因素的影响。

在树冠层次的热点效应方面, 地面对热点的贡献, 这里称为 K_g 分量在原有的 L_i

Strahler 模型中已较完善解决,本文主要着重于植被层在树冠层次上的热点效应。

仿公式(2), 植被冠层内任一点不受遮挡为 θ_v 方向的观测器直接看到的概率即为一倒置树冠沿 θ_v 方向投影为 h_1 到 h_2 平面所截的体积内不含任一树冠中心的概率:

$$P_v(0) = e^{-\lambda_v \cdot V_{R-v}} \tag{10}$$

而该点即受阳光直射又不受遮挡为观测器所见的概率:

$$P_{00} = e^{-\lambda_v(V_{R+V_{R-v}} - O(\theta, \theta_v))} \tag{11}$$

这里 $O(\theta, \theta_v)$ 是 $V_{R+V_{R-v}}$ 重叠的部分,同 Γ_i, Γ_v 一样,在任意高度的重叠面积可用几何光学方法求出 (Li-Strahler, 1992),则体积的重叠 $O(\theta, \theta_v)$ 用沿高度重叠面积的数值积分得出。

知道了 $P_v(0)$,仿第二节,我们显然可以得出植被直接观察面积沿高度的分布,以及任一高度上直接观察面积中同时直接承照的比例 $P_{00}(h)/P_v(0|h)$ 。

仿第三节,我们可以得到任意高度 h 的冠层截面向 θ_v 方向的逸出路径长度分布。

知道了散射能量的分布和逸出路径的分布,如果假定这两个分布是完全独立的,冠层向 θ_v 方向的逸出辐射即可以完全确定。

然而,入射路径和逸出路径的分布不是完全独立的。可以想像,一束从直接观察到的

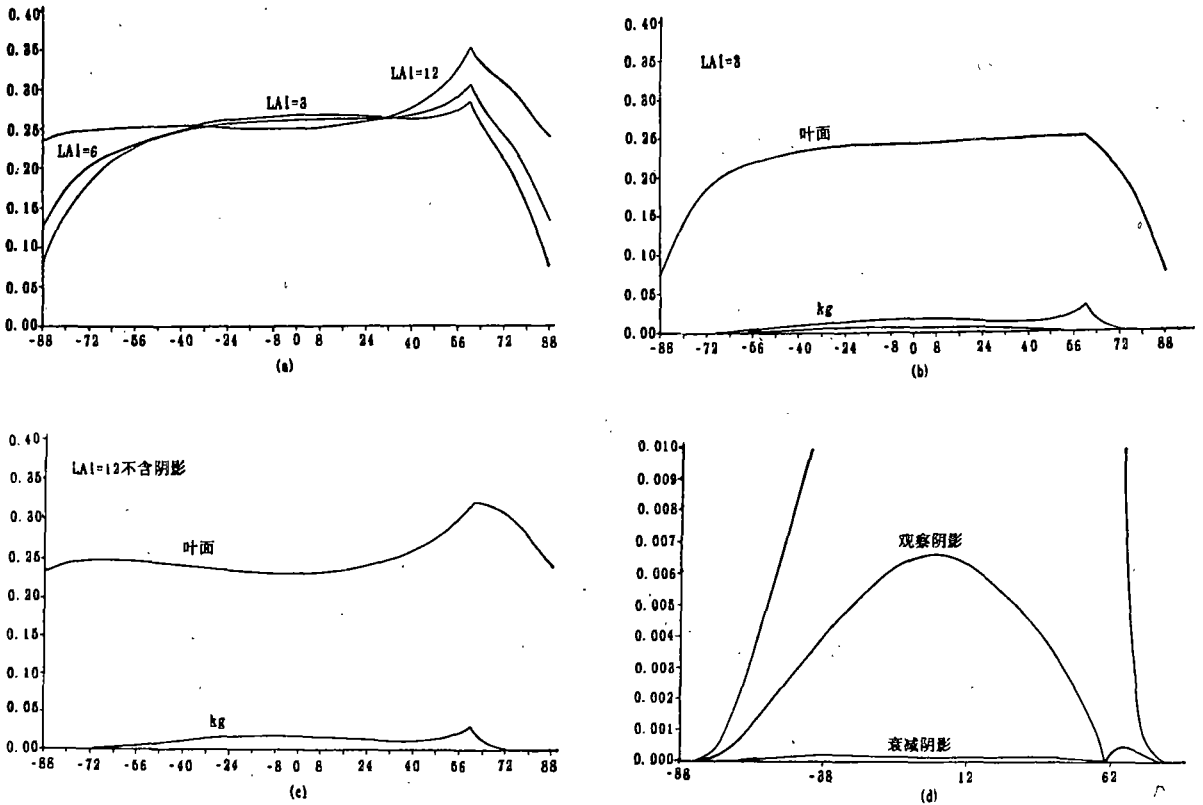


图 7 BRDF 一次散射分量

Fig. 7 Single-scattered source radiance contribution to BRDF

表面射入树冠的光线在一个较短的距离内,不太可能有很长的向观察方向的逸出路径。因此,我们定义在高度 h 处直接观察的承照面沿观察方向的投影为相关区,而定义单株树冠在此高度以上到该平面的平均入射路径为相关长度,在此范围之内,我们假定逸出路径与入射路径成正比,比例因子为单株树冠在此高度以上的平均逸出路径与平均入射路径之比。

在相关区相关路径之外,我们则假定射入路径和逸出路径是独立的。这样, BRDF 的一次散射分量即可表达为:

$$BRDF_1(\theta, \theta_v) = I_c + I_g + I_z + I_{zz} \quad (12)$$

其中 I_c 是植被冠层内一次散射向 θ_v 方向的逸出,包括相关区和非相关区,如前文所述。 I_g 是阳光直射地面又为观察者直接看到的反射。 I_z 是阳光经冠层平均间隙率衰减后到地面为观察者直接看到的反射。而 I_{zz} 是阳光经冠层衰减后到达地面的反射再经冠层衰减而为观察者所见的部分,并考虑叶热点。

我们用以下的参数产生了在主平面 BRDF 的一次散射分量;树冠密度: 每 30 米 \times 30 米像元上 10 或 30 株; 树冠水平半径: 4 米; 树冠垂直半径: 2 米、4 米、8 米, (标为 $b = 0.5, b = 1$ 或 2); 树冠中心高度分布相应为 5—6 米, 10—12 米或 20—24 米(高度

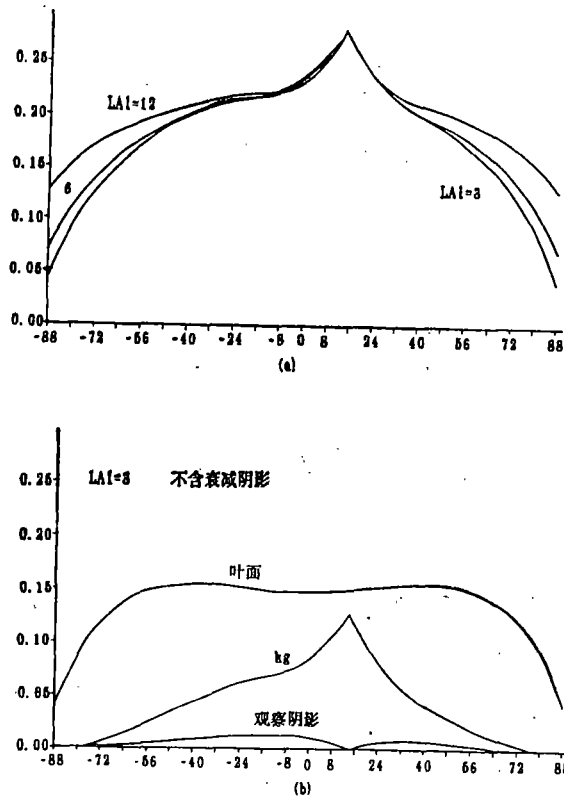


图 8 BRDF 一次散射分量, $\theta = 14^\circ$

Fig. 8 Single-scattered source radiance contribution to BRDF, $\theta = 14^\circ$

分布的上、下限分别标作 $H-up$ 、 $H-low$); 树冠内(单边)叶面积的体积密度: 0.56/米(标为 $LAI = 3$) 或 2.25/米 ($LAI = 12$); 太阳天顶角: 14 度或 60 度; 波段为红外或红光; 叶面各向同性反射 97.2% 的红外和 13.7% 的红光。地面向上半球各向同性反射 24.2% 的红外和 15.1% 的红光。

图 7a、b、c、d 分别是在给定: $N = 10$, $\theta = 60$, $b = 2$, 红外的情况下, $LAI = 3$ 和 12 时的 BRDF 一次散射分量及其分解。

图 8a、b 是相应太阳角变为 14 度时的结果。

图 9 和图 10 分别是 $b = 2$, 红光时 $\theta = 14$ 度和 60 度的结果。限于篇幅, 不能罗列所有的比较结果, 欢迎有兴趣的读者联系索取。

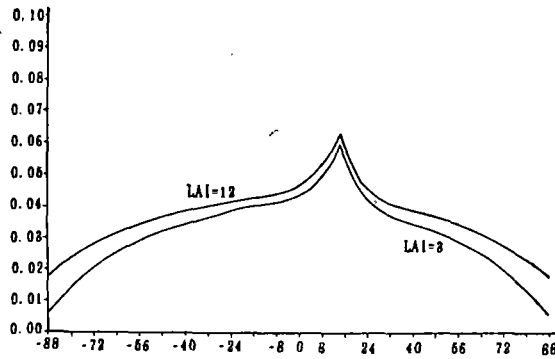


图 9 BRDF 一次散射分量(红光, $\theta = 14^\circ$)

Fig. 9 Single-scattered source radiance contribution to BRDF, Red, $\theta = 14^\circ$

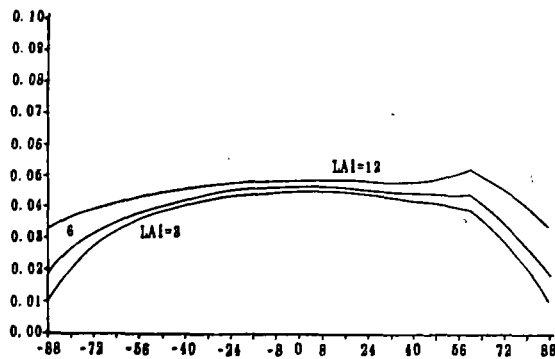


图 10 BRDF 一次散射分量(红光, $\theta = 60^\circ$)

Fig. 10 Single-scattered source radiance contribution to BRDF, Red, $\theta = 60^\circ$

2. 离散植被冠层的“开放度”分布和多次散射

树冠承照面积的高度分布对于描述直照阳光和树冠间的相互作用是十分有用的, 但它要直接取决于特定的太阳光照入射角 θ , 而通常更需要知道树冠表面对漫散射天空光

的“开放”程度,为此定义在高度 h 水平截面的“开放度”系数 $K_{open}(h)$,用来描述各向同性的半球天空光辐射不受树冠遮挡地穿过该平面的百分比:

$$K_{open}(h) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} P(n=0|h, \theta) \sin 2\theta d\theta.$$

在 $h - \Delta h$ 到 h 之间的水平薄层,各向同性的半球漫散射天空光进入树冠中该层的比率为:

$$\Delta K_{open}(h) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} P(s=0|h, \theta) \sin 2\theta d\theta,$$

因而,直射或漫散射到达树冠表面及其散射的部分过程就可以用光照表面的分布和开放度分布的概念来描述。

由于已获得了一次散射源的分布,借助于 $K_{open}(h)$, $\Delta K_{open}(h)$ 以及散射路径长度的分布可求得在高度 h 全部一次散射的通量,以及到达另一高度 $z(z > h)$ 的全部通量,也就可以得到在以 z 为中心的薄层中对下一次散射的贡献(即到达高度 z 的下次散射)。进而定义一个散射源的稀释度函数来确定对高度 h 的给定散射源而言,其下次散射源的垂直分布。由此,可以直接从光照产生的原始光源分布,逐一获得下次散射源的分布。

总之,离散冠层的特征首先由其光照和观察到的表面积垂直分布以及相应的散射路径长度的分布决定。其次从几何光学模型出发,入射光照方向和逸出方向的相关性的建模可在树冠和树叶两个尺度上完成,而一次散射和多次散射的计算则依据散射路径长度的分布。

四、结 束 语

本文第一次较严格地解决了不连续植被阳光承照面积的高度分布和一次散射辐照能量的空间分布问题,在森林生态的研究上有重要的意义,同时也在建立几何光学与辐射传输一体化综合模型方面迈出了重要的一步。

虽然建模工作还有很多不足之处,例如多次散射的加入以及相关长度更严密的确定等,但现有的结果表明在大叶面体积密度和大 b/R 比值时收敛于几何光学模型,小叶面密度和小 b/R 值高树冠密度时收敛于辐射传输模型的结果,从而证明了我们的建模方向是正确的。

参 考 文 献

- [1] X. Li and A. Strahler, Geometric-Optical Bidirectional Reflectance Modeling of a Coniferous Forest Canopy, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-24, No. 6, pp. 281—293, 1986.
- [2] X. Li and A. Strahler, Gap Frequency in Discontinuous Canopies, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-26, No. 2, pp. 161—170, March 1988.
- [3] X. Li and A. H. Strahler, Geometric-Optical Bidirectional Reflectance Modeling of Mutual Shadowing Effects of Crowns in a Forest Canopy, IEEE trans on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 30, No. 2, p276—292, March 1992.
- [4] X. Li and A. H. Strahler, Mutual Shadowing and Directional Reflectance of Rough Surface: A geometric-Optical Model, IGARSS proceeding, p766—768, 1992.

A Hybrid Geometric Optical and Radiative Transfer Approach for Modeling BRDF of Discontinuous Canopies

Li Xiaowen, Wang Jindi, Liu Yi

(*Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences*)

Zhu Xiaoyan

(*Changchun Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences*)

Alan H. Strahler

(*Center for Remote Sensing, Boston University, USA*)

Abstract

This paper presents new ideas and recent progress in our joint effort to model the interaction mechanism of radiant flux with discontinuous canopies. At the scale of a small volume in which leaves can be regraded as homogeneously distributed, some recently developed RT (Radiative Transfer) theories are the best to model the phenomenon by using descriptors such as leaf scattering characteristics, leaf size, volume density of leaf area, etc. However, at the scale of a stand or TM pixel, GO (Geometric Optical) models catch the basic features of such stands under sunlight, i.e., foliage are clustered into crowns and crowns cast shadows. Hence in present practice, simple pure GO models are the only models which can be applied for natural discontinuous canopies.

However, pure GO models require signatures of sunlit and shaded crown surface and background as known parameters under given situation or to be determined in situ. This has been proven a major restricting factor in applications and model inversion. And it is also a drawback that these signatures have not been related to leaf descriptors, wavelength, and sky conditions.

In this paper, we proposed an integrated GO-RT approach to model the radiation climate in a discontinuous canopy. A key link in this approach is gap probability (P_{gap}) model which we developed earlier. Gap probability, on one hand, can be obtained through pure GO model which reflects the structure at the stand scale. On the other hand, gap probability within crown is closely related to the process that radiation collides and is scattered by foliage at the scale of RT models. Hence it becomes a natural link between two kinds of models best at the corresponding scales.

In Li and Strahler (1988), P_{gap} was modeled at the ground only. In this paper, the way to model P_{gap} at any height within canopies is developed. Vertical distributions of sunlit crown surface and within-crown pathlength distributions for different canopy structures are demonstrated. Since the penetration depth of direct sunlight into canopies play an important role in many fields other than remote sensing, we present here the results at this early stage of our modeling work to share with our colleagues in China for comments and possible validations.

The way to model multiple scattering is also suggested in this paper. The concept of "Openness(K_{open}) distribution" is introduced, and the (K_{open}) at ground has been applied to shrub sites in HAPEX-II-Sahel experiment and got good results. (Franklin et al. submitted to Agricultural and Forest Meteor., Feb., 1993). The approach is still under development, though the initial results are encouraging.

Key words Bidirectional Reflectance Distribution Function Discontinuous canopy Gap probability