论文

植被二向性反射统一模型

徐希孺^{1,2}, 范闻捷^{1,2*}, 李举材^{1,2}, 赵鹏^{1,2}, 陈高星^{1,2}

1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871;

2. 北京大学空间信息集成与 3S 工程应用北京市重点实验室, 北京 100871

* 通讯作者, E-mail: fanwj@pku.edu.cn

收稿日期: 2016-08-01; 接受日期: 2016-11-10; 网络版发表日期: 2017-01-21

国家自然科学基金项目(批准号: 41271346、41571329 和 41230747)和国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2013CB733402)资助

摘要 植被二向性反射模型是植被定量遥感的基础. 植被反射率可以且必须表达成一次散射贡献项 ρ^1 与多次散射贡献项 ρ^m 之和, 两者在 2π 空间中的行为特征不同, 只有这样才能正确阐明太阳直射与天空漫射对 ρ^1 与 ρ^m 的不同贡献. 在对现有模型分析的基础上, 本文取长补短给出了适用于不同入射光条件和植被类型的 ρ^1 与 ρ^m 解析表达. 首先, 基于几何光学原理, 把立足点由树冠移至植被元素, ρ^1 的非各向同性特征可以归因为太阳-目标-传感器三者间的几何关系、多尺度群聚叠加和太阳直射与天空散射对目标辐照度之比三个方面. 视不同植被类型为多尺度群聚叠加的结果, 以泊松分布为基础, 本文重新给定了四分量面积比例的求取方法, 使之适用于各种植被类型, 进而获得 ρ^1 的近似解析表达式. 假定 $G=0.5$, 借助“再碰撞概率”理论, 考虑了冠层内部、冠层与土壤间的多次散射过程, 本文也获得了不同天空散射光条件下 ρ^m 的近似解析式, 并揭示了 ρ^m 的形成原理. 利用玉米冠层 BRDF 数据及加拿大黑杉林 BRDF 数据对模型的可靠性进行了初步验证, 结果表明统一模型可行.

关键词 植被BRDF, 统一模型, 聚集指数, 太阳直射与天空漫射辐照度比例, 再碰撞概率

1 引言

植被对太阳短波辐射(波长 $0.3\sim 2.5\mu\text{m}$)的反射属于二向性反射. 通常用双向反射率分布函数(BRDF, Bidirectional reflectance distribution function)表述, 其定义为

$$\rho(\theta_i, \varphi_i, \theta_v, \varphi_v, \lambda) = \frac{L(\theta_v, \varphi_v, \lambda)}{\mu_i F(\theta_i, \varphi_i, \lambda) + E(\lambda)}, \quad (1)$$

式中, L 为传感器所接收到的来自目标的反射辐射亮度, $\mu_i F$ 和 E 分别为太阳直射与天空漫射对目标构成的

辐照度, $\mu_i = \cos \theta_i$, θ_i 为太阳天顶角. φ_i 、 θ_v 、 φ_v 分别是太阳方位角、观测天顶角和观测方位角, λ 为波长. 为从卫星所测信号中反演叶面积指数(LAI, Leaf Area Index), 首要任务是要建立一个正确的植被BRDF模型(朱小华等, 2012). 到目前为止, 植被BRDF模型可以概括为几何光学模型(Geometric optical model, GO)、辐射传输模型(Radiation transfer model, RT)和计算机模拟模型等几类(Verhoef, 1984; 徐希孺, 2005; Liang, 2005).

GO模型主要针对离散植被, 把每一个树冠设想

中文引用格式: 徐希孺, 范闻捷, 李举材, 赵鹏, 陈高星. 2017. 植被二向性反射统一模型. 中国科学: 地球科学, 47: 217–232. doi: 10.1360/N072016-00082

英文引用格式: Xu X R, Fan W J, Li J C, Zhao P, Chen G X. 2017. A unified model of bidirectional reflectance distribution function for the vegetation canopy. Science China Earth Sciences, 60: 463–477. doi: 10.1007/s11430-016-5082-6

为某种规则的几何体, 且假定树冠表面和背景对外来辐射的反射满足朗伯反射要求, 在仅考虑太阳直射的条件下, 传感器视场中的四分量, 分别是光照树冠与地表, 阴影树冠和地表, 它们在视场中所占面积比例可分别为 K_c 、 K_g 、 K_l 和 K_z (Li和Strahler, 1985).

$$L = K_c L_c + K_g L_g + K_l L_l + K_z L_z, \quad (2)$$

式中, L_c 、 L_g 、 L_l 和 L_z 分别为光照树冠、光照地表、阴影树冠及阴影地表的朗伯反射辐射亮度值. 如果树冠在空间分布稀疏, K_c 、 K_g 、 K_l 和 K_z 就可以通过简单的几何投影关系求得. GO模型指出光源-目标-传感器三者几何关系, 是决定地物二向性反射的主要动因, 因此合理地解释了热点现象, 被广泛接受. 四尺度几何光学模型(Chen和Leblanc, 1997)仍以式(2)为立足点, 但是指出植被元素(如叶、枝等)在树冠内以及树冠在大于树冠尺度的空间中分布是不均一、非随机的, 不同尺度的群聚对森林BRDF的形成有着不可忽视的作用. 群聚孔隙率增大, 它不仅使四分量面积比例发生改变, 也因孔隙率的增大影响到多次散射的贡献量, 所以群聚成为决定植被BRDF特征的另一个重要原因.

以式(2)为基础的GO模型在下列几个方面受到质疑: (1) 当树冠过于密集时, 求取四分量面积比例变得异常困难. 如何简明地处理重叠效仍有待深化. (2) 树冠表面是一个三维曲面, 其面积元(ds)的法线方向不断变化, 投射到面积元的辐照度也逐点随之改变. 即使假定ds具有朗伯反射特征, 树冠表面的反射辐射亮度也很难具有各向同性性质. (3) 要实现植被参数的精确反演, 必须充分应用近红外波段的信息. 但由于近红外波段的多次散射贡献不可忽略(Chen和Leblanc, 1997), 凸显了GO模型的波段适应性不足. 总之, 如何继承GO模型的成功之处, 又要合理地解决它所面临的难题, 是推进植被BRDF模型研究的关键问题之一.

RT模型基于能量守恒原理, 建立碰撞过程中能量转移所必须服从的规律, 称之为辐射传输方程(Chandrasekhar, 1960). 把RT方程作为求解总散射量出发点的前提条件是辐射过程在各散射点之间彼此独立, 互不干扰. 这只有粒子尺度小于电磁波波长; 且散射点的间距约大于十倍电磁波波长(λ), $D > 10\lambda$ 时才能成立(周秀骥等, 1991). 换言之, 衍射才能使上

述限制性条件得到满足. RT方程之所以成功地应用于太阳直射与大气的相互作用过程, 是因为大气中主要的散射粒子为各种气体分子和气溶胶等粒子, 均满足上述两个前提条件. 无阴影、无热点是RT方程成立前提条件的必然推论, 这与植被BRDF的基本特征相矛盾. 人们曾试图解决RT模型无热点的困惑, 提出种种补救办法, 但它们都立足于求取四分量间的相关关系(Jupp和Strahler, 1991; Kuusk, 1991), 本质上是GO模型. 把GO模型与RT模型相结合, 实际上严重地破坏了演绎推理的一致性原则. 植被BRDF存在阴影与热点确认了它的一次散射服从几何光学原则. 但鉴于二次以上散射的随机性, ρ^m 近似各向同性, 必将 ρ^1 与 ρ^m 分离. 故 $\rho = \rho^1 + \rho^m$.

随着计算机技术的快速发展, 蒙特-卡罗模拟(Monte Carlo method, MC)算法和真实场景模拟算法两类BRDF数值模拟计算方法也得到普遍应用, 它们利用计算机强大的计算功能, 对现实的物理过程进行大量的模拟计算, 以此获得模拟像元平均结果, 数值模拟有助于指导物理实验, 为建模提供参数数据, 但与演绎推理结果相比, 它很难得出满足一般条件下的规律性要求.

MC模拟算法立足于对一个光子生命过程的连续追踪, 模拟光子能量在一次碰撞过程中散射与吸收的能量之比(North, 1996; 徐希孺, 2005), 而不追究散射光强在空间的分布. 把众多光子与植被冠层间的相互作用视为对单个光子生命追踪的千万次重复, 直到取得平稳的统计平均值. 所以MC的前提条件是每一次追踪相互独立. 植被冠层整体对外来辐射的散射(反射)与吸收之比只取决于植被元素的光学特性(叶片单次散射反照率 ω_0)和再碰撞概率(recollision probability), 与植被光照与否无关(Knyazikhin等, 1998, 2011; Huang等, 2007). 因此MC没有热点, MC模拟可以用于植被层, 但不能用于求解一次散射项. 多次散射本来就具有近似各向同性的性质, 所以MC模拟可用于多次散射的计算. 如果假定 $G=0.5$, 在“再碰撞概率”理论上可获得 ρ^m 的近似解析式.

真实场景模拟模型有两个基本组成部分, 一是植被冠层结构场景的虚拟模拟, 有许多方法或软件可产生视觉上逼真的植被结构场景(Liang, 2005). 二是模拟电磁波与植被元素间的相互作用过程, 主要有光线追踪算法和辐射度模拟算法, 后者比较典型

的有RGM(Radiosity-Graphics combined Model)(Qin和Gerstl, 2000; Huang等, 2013). 模型要求输入每片叶子的空间位置及其取向等要素, 计算叶子间及叶子与地表间的相互遮阴比例, 最终得出整体辐照度在 2π 空间中的分布. 故辐射度模型模拟的BRDF可以产生热点(Qin和Gerstl, 2000; Huang等, 2013).

本文在分析、总结已有各类模型的基础上, 将从植被冠层反射率的行为特征出发, 在假设 $G=0.5$, 植被元素近似朗伯反射和投射的假设前提下, 通过聚集指数和孔隙率实现不同类型植被的统一, 利用植被元素尺度的几何光学模型给出 ρ^1 的近似解析表达基于再碰撞概率给出 ρ^m 的近似表达, 以期得到适用于不同入射光条件、不同类型植被的植被冠层二向性反射统一模型.

2 植被 BRDF 统一模型的基本思想

植被二向性反射率可以且必须表达为 $\rho=\rho^1+\rho^m$, 其中, ρ^1 代表一次散射对BRDF的贡献, ρ^m 代表多次散射对BRDF的贡献(Qin和Jupp, 1993; Chen和Leblanc, 1997; Fan等, 2014). 二者在 2π 空间中的行为特征完全不同, 前者是各向异性的主要载体, 表现出热点效应与碗边效应等, 而后者在 2π 空间中呈现近似各向同性. 二者的驱动因素不同, 所服从的规律不同, 求解方法也不同. 只有这样才能正确阐明直射与天空漫射对一次与多次散射贡献的机理与数量.

相应地, 传感器接收到的辐射亮度也可以表达为: $L=L^1+L^m$, L^1 与 L^m 分别代表对外来辐射与植被——土壤体系经历一次或多次散射后, 穿出冠层上表面后被传感器所接收的辐射亮度. 因此可以推导得到: $\rho^1=L^1/(\mu_i F_i+E)$, $\rho^m=L^m/(\mu_i F_i+E)$. 按几何光学原理 L^1 可用式(2)表达, 不过本文提出的统一模型把立足点由树冠转至植被元素(主要指叶子), 四分量为光照叶子, 光照地表, 阴影叶子与阴影地表, 它们在地表的投影面积比例仍用 K_c 、 K_g 、 K_l 和 K_e 表示. 假定叶子在空间取向近似为各向同性(即 $G=0.5$), 假设叶片拥有双朗伯反射及透射特性. 即使假定体系元素为朗伯反射面, 四分量反射辐射亮度亦不具备各向同性的性质, 因而避免了原几何光学模型中假定树冠四分量具有朗伯反射的困境. 泊松概率公式是本文计算植被冠层孔隙率的出发点, 在此基础上同时考虑重

叠效应和群聚效应, 既可以避免原几何光学模型对浓密森林重叠效应计算的困难, 又可以将群聚效应计入公式之中. 进而获得 L_c 、 L_g 、 L_l 和 L_e 的近似解析表达, 在统一模型的一次散射中正确阐明了太阳入射与天空散射对BRDF的不同影响.

L^m 为传感器所接收的由多次散射构成的辐射亮度, 具有近似各向同性的性质 $L^m=M^m/\pi$, M^m 为植被土壤体系的多次散射出射度, 由太阳直射和天空漫射共同构成. $M^m=u_i F_i \rho_{i \rightarrow \Omega}^m + E \rho_{\Omega \rightarrow \Omega}^m$, $\rho_{i \rightarrow \Omega}^m$ 和 $\rho_{\Omega \rightarrow \Omega}^m$ 分别为植被冠层多次散射的方向-半球和半球-半球反射率, $\rho^m=[(1-\beta)\rho_{i \rightarrow \Omega}^m + \beta\rho_{\Omega \rightarrow \Omega}^m]/\pi$, 建立多次散射模型的实质就是求取 $\rho_{i \rightarrow \Omega}^m$ 和 $\rho_{\Omega \rightarrow \Omega}^m$ 的解析表达式(网络版附录1, <http://earthcn.scichina.com>, 下同).

对植被而言, 如果植被元素(主要是叶子)的散射相位函数可表达成朗伯反射加镜面反射, 假定 $G=0.5$, 那么对植被冠层平均值的计算, 元素的反射和透射可以近似为朗伯散射(包括). 光子经碰撞后逸出冠层的概率(再碰撞概率)完全决定于冠层的平均孔隙率(Knyazikhin等, 1998, 2011; Möttus, 2007), 则再碰撞概率完全决定于植被的几何结构参数, 与电磁波波长无关(Panferov等, 2001; Stenberg, 2007; Huang等, 2007). 而再碰撞概率决定着吸收与散射间的比例及 ρ^1 和 ρ^m 间的比例关系, 并可用于 $\rho_{i \rightarrow \Omega}^m$ 与 $\rho_{\Omega \rightarrow \Omega}^m$ 的计算(Smolander和Stenberg, 2005; Fan等, 2014).

3 ρ^1 的近似解析式

3.1 孔隙率计算公式

假定叶子在空间作随机分布, 根据泊松概率分布, 二维叶片对光子的平均拦截率为 $G_{i,v} LAI_a$, 对水平无限延伸植被冠层, 其 θ_i 方向的孔隙率(Nilson, 1971)为

$$P(\theta_{i,v}) = e^{-\frac{G_{i,v} LAI_a}{\mu_{i,v}}}, \quad (3)$$

G_i 及 G_v 分别为射向(i)与视向(v)的 G 函数值, $\mu_i=\cos\theta_i$, $\mu_v=\cos\theta_v$, LAI_a 为像元的平均真实叶面积指数. 事实上, 对光子产生拦截作用的不仅有叶子, 还有枝干、花、穗等, 所以此处的 LAI_a 就不是严格意义下的真实叶面积指数. 由于非叶成分组成复杂, 不具备二维平面特征, 故借助等效概念命名为植被面积指数(Plant

Area Index, PAI), 替代真实叶面积指数.

如果偏离随机分布, 基于等效概念, 可引入聚集指数 ξ 做修正.

$$P(\theta) = e^{-\xi(\theta) \frac{G}{\mu} PAI}, \quad (4)$$

$\xi(\theta) \frac{G(\theta)}{\mu} PAI$ 为无因次拦截率, 由此可知, $\xi(\theta)$ 与 PAI 的取值方法对式(4)的正确应用非常重要.

3.2 聚集指数 ξ 随 θ 角的变化规律

群聚并不改变像元平均叶面积指数值, 只改变叶片在空间的分布. 可以证明群聚必使像元的平均孔隙率增加, 故可用参数 $\xi \leq 1$ 描述群聚条件下的孔隙率. 设总叶面积为 LA , 随机分布于像元内(无群聚), 像元面积为 A , 则 $LAI_a = LA/A$. 在 $\theta=0^\circ$ 方向上, 其孔隙率为 $P(0) = e^{-GLAI_a}$.

假设发生了群聚, 叶子全部集中到面积为 a_1 的子像元内, 并服从随机分布, 则

$$LAI_{a_1} = \frac{LA}{a_1} = \frac{A}{a_1} LAI_a. \quad (5)$$

此时, 子像元 a_2 为空集($a_2 = A - a_1$)像元 A 的平均孔隙率为

$$\bar{P}(0) = P(LAI_{a_1}) + \frac{a_2}{A} [1 - P(LAI_{a_1})], \quad (6)$$

当 $a_2=0$, $\bar{P} = P(LAI_{a_1}) = P(LAI_a)$; 当 a_2 趋近于 A 时, $\bar{P}$ 趋近于 1(图1).

当 a_2 由 0 逐渐变为 A 时, 群聚强度由零变到最大, 只要 $\partial \bar{P} / \partial a_2 > 0$, $\bar{P}$ 由 $P(LAI_a)$ 单调地升至“1”, 这表明群聚必然使像元的平均孔隙率增大(证明见网络版附

图1 像元的平均孔隙率与群聚的关系

录2). 群聚使叶子分布偏离随机分布, 增加叶子的重叠度, 使孔隙率增加.

式(4)同时含有两个未知数 $\xi(\theta)$ 和 PAI , 如何求解? 以行播作物为例, 取垂直茎向方向剖面图如图2所示. 若在 y 方向取单位距离, 则 $\mu_l = LA / (a_1 \cdot H \cdot 1)$, 0° 天顶角时冠层孔隙率为

$$P(0) = \frac{a_2}{A} (1 - e^{-GLAI_l}) + e^{-GLAI_l}, \quad (7)$$

$$\xi(0) = -\frac{1}{GLAI_a} \ln P(0), \quad (8)$$

当 $\theta = \theta_c$, $\theta_c = \tan^{-1} \left(\frac{A}{H} \right)$, 称 θ_c 为临界角. 很容易证明

$\xi(\theta_c) = 1$ (证明见网络版附录3).

当 $\phi < (\pi/2)$ 时, a_1 , a_2 , A 同步增长, H 不变, θ_c 向 $\pi/2$ 方向移动时, $\xi(\theta)$ 与 θ 的关系如图3所示(闫彬彦等, 2012).

图2 行播作物垂直面(a)和水平剖面图(b)

图3 $\xi(\theta)$ 与 θ 的关系图(闫彬彦等, 2012)

对离散植被, 由于树冠在平面空间中分布的自由度很大, 很难进行一般性的模拟计算. Chen和Leblanc(1997)实测了黑杉树孔隙率, 实测结果表明当 $\theta > 15^\circ$ 时, 所测 $P(\theta)$ 与泊松公式拟合相近; 当 $\theta > 7.5^\circ$ 时, $P(7.5^\circ)$ 可用纽曼分布拟合. 根据平均树高和树间距获得 θ_c 接近 15° . 实测表明当 $\theta < \theta_c$ 时, $\xi < 1$; 当 $\theta \geq \theta_c$ 时, $\xi \equiv 1$, 因为此时树冠内元素尺度的群聚仍然存在, 但树冠间的孔隙已消失. 可用泊松分布近似.

根据 $\xi(\theta)$ 随 θ 变化的规律, 只要知道植被冠层平均高度 H 和树冠(或植株)平均间距, 就可以估算 θ_c 的值. 若非叶成分的 G 值已知(Müller-Linow等, 2015), 则可利用 $\theta > \theta_c$ 的孔隙率实测值去反推 PAI , 因为此时 $\xi(\theta) \equiv 1$, 再由 PAI 的值倒推 $\theta < \theta_c$ 时的 $\xi(\theta)$ 值. 用上述方法获得黑杉树像元平均 PAI 为1.87($G=0.5$). 而原文提供的传统实测单株真实叶面积指数为4.5($G=0.5$), 像元平均真实叶面积指数为1.145. 显然, 其间的差别体现了树干等非叶成份对光子的拦截作用, 这表明遥感反演获得的叶面积指数与传统定义下的叶面积指数是有差别的(Chen和Leblanc, 1997). 但由于叶子反射与非叶元素反射对BRDF的贡献并不相同, 它们与四分量 K_g 、 K_c 、 K_z 、 K_t 之间的关系复杂, 四分量可扩展为六分量, 增加光照与阴影条件下的树干. 总之, 遥感反演所获得的植被面积指数为非传统意义下的 LAI , 为由多角度孔隙率测值所获得的 PAI 近似值.

3.3 四分量的计算

3.3.1 四分量计算公式

四分量以地表为计算的基准面, 以面积比例的

形式(无因次拦截率)表达了每一个事件在一次散射中的发生概率. 显然, 它们的取值与孔隙率及视线与射线间的相关性有关. 其相关性可用图4来表示.

根据 K_g 的定义以及孔隙率与无因次拦截率之间的泊松关系, K_g 可表达为

$$K_g = e^{-(l_i + l_v - l_c)} = e^{-l_i} \cdot e^{-l_v} \cdot e^{l_c}, \quad (9)$$

e^{-l_i} 和 e^{-l_v} 分别为入射向和视向的孔隙率, e^{l_c} 描述了两者的相关性. l_c 的取值有三种可能, 可分别用图5的a、b、c1、c2、c3表示.

根据四分量的定义,

$$\begin{aligned} K_z + K_g &= e^{-l_v} \\ K_c + K_t &= 1 - e^{-l_v}, \\ K_c + K_g + K_t + K_z &= 1. \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)表明, 四分量同时发生是一个必然事件, 这正是几何光学模型的基本立足点.

$$\begin{aligned} K_g + K_t + K_z &= e^{-l_v} = 1 - K_c, \\ K_c &= 1 - e^{-l_v}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$K_z = e^{-l_v} - K_g, \quad (12)$$

$$K_t = (1 - e^{-l_v}) - K_c = e^{-l_c} - e^{-l_v}. \quad (13)$$

根据式(10)~(13), (1) $0 \leq K_c, K_g, K_t, K_z \leq 1$; K_c, K_g, K_t, K_z 各自代表四分量的发生概率; (2) $K_c + K_g + K_t + K_z = 1$; 为几何光学的必要条件, 但不充分. 因为外来光源的性质(即 β 的取值及其变化的规律)对BRDF的形成至关重要; (3) 如何求取 l_c 是几何光学模型的核心, 它决定于射线与视线方向上的无因次拦截率之间的相关性. 相关性表现在水平面内, 而射线与视线的无因次拦截率则分别是对射线和视线各自

图4 视线与射线间的相关性对四分量的影响

i, v 分别代表光线射向与传感器视向. 两个椭圆形分别代表植被元素(主要是叶子)在地表像元中投影总面积的比例(排除重叠). 设 l_i, l_v 分别代表入射方向和视向的无因次拦截率

图5 l_c 的取值

当图 5a 时, $l_c=0$; 当图 5b 时, l_c 取值居中; 当图 5c 时, l_c 取最大值. 当 $l_c=0$ 时, $K_g = e^{-l_i} \cdot e^{-l_v}$, 代表 i 与 v 不相关. 在 a, b, c 三种情况下, 均满足 $l_i + l_v - l_c \geq 0$, 所以 $0 \leq K_g^{(a)} < K_g^{(b)} < K_g^{(c)} < 1$. a: 不相关; b: 部分相关; c: 完全相关(最大相关). e^{l_c} 在此作用为相关系数. 当 $PAI \rightarrow \infty$ 或 $\theta_{i,v} \rightarrow \pi/2$, 则 $K_g \rightarrow 0$; 当 $PAI \rightarrow 0$, $K_g \rightarrow 1$

的垂直面而言的, 这就需要进行有关投影转换的相关计算.

3.3.2 l_c 的计算方法

决定 l_c 的因素有三个: l_i 与 l_v 的大小, l_i 与 l_v 的形状, 以及 l_i 与 l_v 之间的距离. l_i 与 l_v 的大小决定于 $\frac{\xi_{i,v} G_{i,v}}{\mu_{i,v}} PAI$. 为分析 l_i 与 l_v 形状的影响, 鉴于假定植被元素在空间呈随机分布, 当 $\theta_{i,v}=0$, 假设 l_i 与 l_v 呈圆形, 其半径为

$$r_{i,v,0} = \sqrt{\frac{\xi(0)G(0)PAI}{\pi}}, \quad (14)$$

当 $\theta_{i,v} \neq 0$ 时, 在垂直 i 或 v 的平面内仍为圆形. 但投影到水平面则呈椭圆形, 其短轴仍为 r_0 , 长轴用 $r_{i,v,l}$ 表示(如图 6a 所示), 其取值为

$$r_{i,v,l} = \frac{r_{i,v,0}}{\mu_{i,v}}, \quad (15)$$

如果用 a_i 与 a_v 来表示椭圆 l_i 与 l_v 中心点在 x 轴(为椭圆长轴的取向)上的位置(如图 6b 所示), 则

$$a_{i,v} = \frac{1}{2} H \mu_l \tan \theta_{i,v}, \quad (16)$$

式中, $H=H_1+H_2$, H_1 代表冠层厚度, H_2 为基底(树干)高, μ_l 为叶子(植被元素)体密度函数.

如何将有因次的高度 H 无因次化是理解式(16)的关键. 在有因次空间与无因次空间之间进行转换, 就是在两个空间中的数值间建立起一一对应的关系. 叶子的浓密程度是表征植被几何特性的关键参数之一, 可用单位截面积柱体内叶子总面积值来描述. 但它是有因次的, 有因次量会因为所取计算单位不同而不同, 故引入体密度函数 μ_l , $\mu_l = LA/D$. LA 代表柱体内总叶面积值, D 代表柱体体积. μ_l 仍为有因此量, 它的因次为 $[L]^{-1}$, 如果定义叶面积指数 $PAI = \mu_l \cdot H$, 则 PAI 为无因次量, 它取值唯一. 所以一旦 μ_l 取值确定, 则在有因次量 H 和无因次量 PAI 间就确立了一一对应的关系. $1/\mu_l$ 可以解释为在无因次空间取值为“1”时, 对应有因次空间的取值. 所以, $H/(1/\mu_l) = H\mu_l = PAI$, 值得注意的是, 当植被为森林时对应无因次空间的取值为 $(H_1+H_2)\mu_l$. 对于一般情形如图 5b, 当太阳入射方向和观测方向都在主平面内, 则首先通过联立两个椭圆方程, 求得交点的坐标值(即图 7 中 (x, y) 值),

图 6 垂直投影图(a)和垂直剖面图(b)重叠面积计算示意图

 图 7 主平面 $l_{c,i}$ 和 $l_{c,v}$ 示意图

$$\frac{(x-a_i)^2 \mu_i^2}{r_{i,0}^2} + \frac{y^2}{r_{i,0}^2} = 1, \quad (17)$$

$$\frac{(x-a_v)^2 \mu_v^2}{r_{v,0}^2} + \frac{y^2}{r_{v,0}^2} = 1, \quad (18)$$

l_c 是由 i 与 v 方向两个椭圆的部分截面积(可用 $l_{c,i}$ 和 $l_{c,v}$ 表示)构成为图7所示:

$$\left. \begin{aligned} l_{c,i} &= 2 \cdot r_{i,0} \cdot r_{i,l} \cdot \left(\frac{1}{2} t_0 - \frac{1}{4} \sin 2t \right) \\ l_{c,v} &= 2 \cdot r_{v,0} \cdot r_{v,l} \cdot \left(\frac{1}{2} t_0 - \frac{1}{4} \sin 2t \right) \\ \sin t &= \frac{|y|}{r_{i,v,0}}, t = \sin^{-1} \frac{|y|}{r_{i,v,0}} \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

t_0 是用弧度值表示的 t 值, 故 $t_0 = \frac{t}{180^\circ} \cdot \pi$. 当交点 x 位于

a_i 和 a_v 之间, 则 t_0 就按上述方法取值; 当交点 x 位于 a_i 和 a_v 的一侧, 则需要视两椭圆的相对位置和所求得 $l_{c,i}$ 和 $l_{c,v}$ 位置的具体情况, 对其中的一个 t_0 需要进行 $(\pi - t_0)$ 处理, 得到新的 t_0 .

鉴于水平面上的 $l_{c,i}$ 和 $l_{c,v}$ 分别被放大了 $\cos \theta_v$ 和 $\cos \theta_i$ 倍, 所以

$$l_c = l_{c,i} \cos \theta_i + l_{c,v} \cos \theta_v. \quad (20)$$

当观测方向位于非主平面内时, l_c 的求解方法见网络版附录4.

3.4 考虑天空光条件下 ρ^1 的近似解析表达

如果用 $\rho_{v, i-v}$ 和 $\rho_{g, i-v}$ 分别代表叶子及土壤的方向-方向反射率, 对平均状况而言, $\rho_{v, i-v}$ 及 $\rho_{g, i-v}$ 均可用漫反射率 $\rho_{v, L}$ 和 $\rho_{g, L}$ 代替, 如果忽略入射光路径的漫散射辐射对光照面辐照度的贡献, 则 $L_c = \mu_i F_i \rho_{v, L}$, $L_g = \mu_i F_i \rho_{g, L}$.

对于阴影面, 用 $L_a^\downarrow$ 代表天空下行辐射亮度, 某方向天空对地表的辐射通量贡献为

$L_a^\downarrow \cdot \cos \theta_i \cdot e^{\frac{\lambda(\theta) GPAI}{\cos \theta_i}} \cdot \cos \theta_i d\Omega$. 天空光在 2π 空间的平均贡献 S_g 可表达为

$$S_g = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi^+} L_a^\downarrow \cos \theta \cdot e^{\frac{\xi(\theta) GPAI}{\cos \theta}} \cos \theta d\Omega. \quad (21)$$

由于 $L_a^\downarrow \cos \theta$ 与 $e^{\frac{\xi(\theta) GPAI}{\cos \theta}} \cdot \cos \theta$ 不相关, 并假定 $L_a^\downarrow$ 各向同性, 则

$$\begin{aligned} S_g &= \int_{2\pi^+} L_a^\downarrow \cos \theta d\Omega \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi^+} e^{\frac{\xi(\theta) GPAI}{\cos \theta}} \cdot \cos \theta d\Omega \\ &= E \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \sin \theta \cdot e^{\frac{\xi(\theta) GPAI}{\cos \theta}} d\theta. \end{aligned} \quad (22)$$

令 $S' = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \sin \theta \cdot e^{\frac{\xi(\theta) GPAI}{\cos \theta}} d\theta$, 则 $S_g = S'E$, 用

$\rho_{g, \Omega \rightarrow v}$ 代表地表半球-方向反射率, 则 $L_c = S'E \cdot \rho_{g, \Omega \rightarrow v}$. 对冠层的平均辐射度 S_v 应为 $S_v = E - S'E = (1 - S')E$,

$L_t = (1 - S')E \cdot \rho_{v, \Omega-v}$, 其中 $\rho_{v, \Omega-v}$ 为叶子的平均半球——方向反射率. 令 $\beta = \frac{E}{\mu_i F_i + E}$, 则

$$\rho^1 = (1 - \beta)K_g \rho_{g, i-v} + (1 - \beta)K_c \rho_{v, i-v} + S' \beta K_z \rho_{g, \Omega-v} + (1 - S')K_t \rho_{v, \Omega-v}. \quad (23)$$

基于两个近似:

(1) 忽略直射光路径上的散射光强对光照面辐照度的影响, 同时也忽略直射光路径上的散射光对阴影面辐照度的无贡献. 增加与减少两者不能相互抵消, 故该假设只是近似.

(2) 假定 $\rho_{v, i-v} = \rho_{v, \Omega-v} = \rho_{v, L}$, $\rho_{g, i-v} = \rho_{g, \Omega-v} = \rho_{g, L}$. 则 ρ^1 可以近似表达为

$$\rho^1 = (1 - \beta)K_g \rho_{g, L} + (1 - \beta)K_c \rho_{v, L} + S' \beta K_z \rho_{g, L} + (1 - S')\beta K_t \rho_{v, L}. \quad (24)$$

4 ρ^m 的近似解析式

4.1 再碰撞概率的计算

令光子从天顶角 θ 方向射向植被冠层, 在植被冠层内某处被植被元素拦截, 拦截后剩余光子能量在冠层内继续进行第二次碰撞的发生概率叫“一次再碰撞概率”, 用 p^1 表示. 由于孔隙率与 $-\zeta(\theta)G(\theta)LAI/\mu_\theta$ 呈负指数函数关系, 所以光子被拦截的概率与 H 成负指数关系, 表层拦截光子比底层拦截光子多, 所以被拦截的光子从上表面逸出的概率大于从下表面逸出的概率. 这种不对称性使 p^1 成为 θ 的函数.

设有 N_0 个光子从天顶角 θ_i 方向射向植被冠层, 并在冠层某深度 h 处与植被元素发生碰撞, 此时分别从上界面、下界面逸出冠层的光子数为 $E'_{u, h}$ 与 $E'_{d, h}$, 以及留在植被冠层内的光子数为 E'_h . 其中, $q_{u, h}^1$ 和 $q_{d, h}^1$ 分别为 h 深度处的薄层 dh 一次散射的光子向上和向下直接穿出冠层的概率, e_h^1 为 h 深度处经一次散射后的光子仍留在冠层中的概率. 整层的三类光子数分别为

$$E_u^1 = \int_0^H N_0 e^{-\frac{\zeta(\theta_i)G(\theta_i)u_i \cdot h}{\mu_i}} \cdot \frac{\zeta(\theta_i)G(\theta_i)u_i}{\mu_i} \cdot \omega \cdot q_{u, h}^1 \cdot dh, \quad (25)$$

$$E_d^1 = \int_0^H N_0 e^{-\frac{\zeta(\theta_i)G(\theta_i)u_i \cdot h}{\mu_i}} \cdot \frac{\zeta(\theta_i)G(\theta_i)u_i}{\mu_i} \cdot \omega \cdot q_{d, h}^1 \cdot dh, \quad (26)$$

$$E^1 = \int_0^H N_0 e^{-\frac{\zeta(\theta_i)G(\theta_i)u_i \cdot h}{\mu_i}} \cdot \frac{\zeta(\theta_i)G(\theta_i)u_i}{\mu_i} \cdot \omega e_h^1 \cdot dh. \quad (27)$$

如果用 Q_u^1 、 Q_d^1 与 p^1 分别代表整层向上, 向下逸出和再碰撞的概率, 三者之和为 1. 则

$$\begin{aligned} E_u^1 + E_d^1 + E^1 &= N_0 \omega (1 - e^{-\frac{\zeta(\theta_i)G(\theta_i)u_i H}{\mu_i}}), \\ Q_u^1 &= E_u^1 / N_0 \omega (1 - e^{-\frac{\zeta(\theta_i)G(\theta_i)u_i H}{\mu_i}}), \\ Q_d^1 &= E_d^1 / N_0 \omega (1 - e^{-\frac{\zeta(\theta_i)G(\theta_i)u_i H}{\mu_i}}), \\ p^1 &= E^1 / N_0 \omega (1 - e^{-\frac{\zeta(\theta_i)G(\theta_i)u_i H}{\mu_i}}), \\ p^1 &= 1 - (Q_u^1 + Q_d^1). \end{aligned} \quad (28)$$

$q_{u, h}^1$ 与 $q_{d, h}^1$ 应该为向上或向下 2π 空间中的平均孔隙率, 可表达为

$$q_{u, h}^1 = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi^+} \mu_v e^{-\frac{\zeta(\theta_v)G(\theta_v)u_i \cdot h}{\mu_v}} d\Omega_v, \quad (29)$$

$$q_{d, h}^1 = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi^-} \mu_v e^{-\frac{\zeta(\theta_v)G(\theta_v)u_i \cdot (H-h)}{\mu_v}} d\Omega_v, \quad (30)$$

式中, $\zeta(\theta_v)$ 与 $G(\theta_v)$ 可以通过实测获得, $d\Omega_v = \sin\theta_v d\theta_v d\phi_v$, 故 $q_{u, h}^1$ 与 $q_{d, h}^1$ 可以表达为 $q_{u, h}^1 = ae^{-bh^c}$, $q_{d, h}^1 = ae^{-b(H-h)^c}$, a 、 b 、 c 为参数. 当 $\zeta(\theta_v)=1$, $G(\theta_v)=0.5$, $u_i=1$ 时, $a=0.5$, $b=1.1$, $c=0.8$. 式(28)可通过 MC 模拟检验(图8):

图8中实线代表基于解析式(28)获得的再碰撞概率, 点代表基于蒙特卡罗模拟的结果. 模拟过程中部分参数设置为: 叶片透过率 $t(\lambda)=0.44$, 反射率

图8 不同入射方向一次再碰撞概率 p^1 随 LAI 变化

$r(\lambda)=0.4$.

经历一次碰撞之后, 光子逸出上界面或下界面的概率表达式为

$$Q_u^m(LAI_a) = \frac{0.5}{LAI_a \cdot 2\pi} \int_0^{LAI_a} dh \int_{2\pi^+} e^{-G(\theta_i)h/\mu_v} d\Omega_v \quad (31)$$

$$= \frac{0.5}{LAI_a} \int_0^{LAI_a} e^{-bh^{0.8}} dh,$$

$$Q_d^m(LAI_a) = \frac{0.5}{LAI_a} \int_0^{LAI_a} e^{-b(H-h)^{0.8}} dh, \quad (32)$$

$$p^m = 1 - (Q_u^m + Q_d^m)p^m, \quad (33)$$

$Q_u^m(LAI_a)$ 与 $Q_d^m(LAI_a)$ 以及 p^m 与 LAI_a 的函数关系见图9.

4.2 多次散射项 p^m 的解析表达式

植被冠层对外来辐射之吸收和散射过程可以分解为两个独立过程之和(图10). (1) 土壤背景的反射率为零, $\rho_g=0$, 植被冠层直接对光子的吸收和散射过程. (2) 设土壤背景的反射率不为零, $\rho_g \neq 0$, 光子在植被、土壤间经多次反弹, 再经植被吸收与散射. 考虑天空光的影响和光子多次散射过程, 多次散射项 p^m 可以解析为6项之和.

图9 $Q_u^m(LAI_a)$ 与 $Q_d^m(LAI_a)$ 以及 p^m 与 LAI_a 的函数关系

图10 吸收与散射过程分解

4.2.1 忽略土壤影响, 冠层多次散射贡献的解析表达

当 $\rho_g=0$ 时, 对直射光而言, 总散射 $S_{bsD}(\lambda)$ 与总吸收 $a(\lambda)$ 概率之和:

$$S_{bsD}(\lambda, \theta_i) + a(\lambda, \theta_i) = i_0(\theta_i), \quad (34)$$

式中, 冠层拦截率 $i_0(\theta_i) = 1 - e^{-\frac{\xi_i G_i LAI_a}{\mu_i}}$.

则直射光在植被冠层内的多次散射贡献为

$$S_{bsD}^m(\theta_i) = i_0 \frac{\omega_i^2 p^1 (1 - p^m)}{1 - \omega_i p^m}, \quad (35)$$

式中, ω_i 为单叶片反照率. 如果取近似 $p^1 = p^m = p$, 那么,

$$S_{bsD}^m(\theta_i) = i_0(\theta_i) \omega_i^2 \frac{p(\theta_i)(1-p)}{1 - \omega_i p}. \quad (36)$$

实际上, p^1 所起作用大于 p^m . 因 $p p^1$ 的取值与 θ_i 有关, 所以 p 可以表达为 θ_i 的经验函数. 如果假定 $G=0.5$, 叶片具有双朗伯反射透射能力, 多次散射具有近似各向同性性质. 对经历过一次散射的光子而言, 从上、下表面穿出的概率均为

$$\frac{1}{2i_0} S_{bsD}^m = \frac{1}{2} \frac{\omega_i^2 p(1-p)}{1 - \omega_i p}, \quad (37)$$

$\rho_g=0$ 条件下, 太阳直射对 p^m 的贡献用 ρ_1^m 表示(图11), 由于直射光只落在叶子光照面上, 对叶子的平均辐照度为 $\mu_i F_i$, 并以植被冠层上方单位水平面为计算基准面, 故受到拦截率的影响. 因此 ρ_1^m 可以表达为

$$\rho_1^m(\theta_i) = (1 - \beta(\theta_i)) i_0(\theta) \frac{1}{2} \frac{\omega_i^2 p(1-p)}{1 - \omega_i p} \frac{1}{\pi}. \quad (38)$$

$\rho_g=0$ 条件下, 天空散射辐射对 p^m 的贡献, 用 ρ_2^m 表示. 由于天空光只落在叶子的阴影面, 对叶子的平均辐照度为 $E(1 - S')$, 同理, 用冠层半球拦截率 $\tilde{i}_0$ 代替 i_0 ,

$$\text{其中 } \tilde{i}_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} i_0 d\Omega,$$

$$\rho_2^m = \beta(1 - S') \tilde{i}_0 \frac{1}{2} \frac{\omega_i^2 p(1-p)}{1 - \omega_i p} \frac{1}{\pi}, \quad (39)$$

式中, $\beta = E/(\mu_i F + E)$, 为天空光占总入射辐照度的比例. $\mu_i F$ 和 E 分别为太阳直射与天空漫射对目标构成的辐照度. S' 为植被冠层对天空散射辐射的平均孔隙率.

图 11 ρ_1^m 示意图

4.2.2 考虑土壤与植被相互作用, 冠层多次散射贡献的解析表达

当地表反射率不为零时, 需要分别考虑太阳直射光和天空散射光入射两种情况. 当太阳直射光入射时, 入射光子与土壤相互作用并最终从冠层上部散射出的多次散射项分为2部分(图12): (1) 通过孔隙入射到地表, 经过土壤-冠层之间多于1次的反弹后最终透过孔隙散射或漫透射出冠层, ρ_3^m ; 其中太阳直射直接穿越植被到达地表, 经反弹后又直接穿出冠层的反射贡献为 $(1-\beta)(1-i_0(\theta_i))\rho_g(1-\tilde{i}_0)$, 属于 ρ^1 的一部分. (2) 光子入射到冠层, 经过冠层-土壤一次或多次反弹后最终透过孔隙散射或由冠层漫透射出冠层, ρ_4^m . 在此过程中, 另一部分则经植被一次或多

次漫透射向上穿出冠层, 前者(一次)归属 ρ^1 , 后者属 ρ_1^m .

$$\begin{aligned}\rho_3^m &= \frac{1}{\pi} \left(\sum n + \sum n' \right) \\ &= (1-\beta)(1-i_0) \frac{\rho_g \tilde{i}_0 r_c^*}{1-\rho_g \tilde{i}_0 r_c^*} \left(1 + \rho_g (1-\tilde{i}_0) \right) \frac{1}{\pi}.\end{aligned}\quad (40)$$

$$r_c^* = \frac{1}{2\tilde{i}_0} S_{bs}.\quad (41)$$

与 ρ_3^m 类似, ρ_4^m 也由两部分构成, 可表达为

$$\begin{aligned}\rho_4^m &= \frac{1}{\pi} \left(\sum n + \sum n' \right) \\ &= (1-\beta) i_0 r_c^* \frac{\rho_g}{1-\rho_g \tilde{i}_0 r_c^*} \left(1 - \tilde{i}_0 + \tilde{i}_0 r_c^* \right) \frac{1}{\pi}.\end{aligned}\quad (42)$$

天空下行漫辐射经地表、植被多次反弹, 对 ρ^m 的贡献可分别表达为 ρ_5^m 和 ρ_6^m , 其表达式为

$$\rho_5^m = \beta \cdot S' (1-\tilde{i}_0) \frac{\rho_g \tilde{i}_0 r_c^*}{1-\rho_g \tilde{i}_0 r_c^*} \left[1 + \rho_g (1-\tilde{i}_0) \right] \frac{1}{\pi},\quad (43)$$

$$\rho_6^m = \beta (1-S') \frac{\tilde{i}_0 r_c^* \rho_g}{1-\rho_g \tilde{i}_0 r_c^*} \left[1 - \tilde{i}_0 + \tilde{i}_0 r_c^* \right] \frac{1}{\pi}.\quad (44)$$

植被冠层反射率的多次散射项就是以上六项之和:

$$\rho^m = \rho_1^m + \rho_2^m + \rho_3^m + \rho_4^m + \rho_5^m + \rho_6^m.\quad (45)$$

4.2.3 对 ρ^m 变化规律的分析

植被面积指数是描述冠层特征, 影响多次散射项的最主要参数. 对于水平无限延伸冠层, 随着植被

图 12 ρ_3^m 和 ρ_4^m 示意图

面积指数的增大, 多次散射项首先持续增大, 但增大的速度逐渐放慢, 待多次散射项达到最大值以后, 则保持稳定, 并有轻微下降. 连续植被冠层的多次散射项及其各分项随PAI增大的变化情况如图13a所示.

当LAI不变时, 群聚也可以使冠层孔隙率发生明显变化, 也是多次散射项的重要影响因子. 实际上, 聚集指数 ξ 决定了多次散射项随PAI变化的形状, 聚集指数越大, 冠层越均匀, 则随着真实PAI的增长, 多次散射项越快达到最大值, 如图13b所示. 导致这种差异的主要是 ρ_1^m 、 ρ_2^m 、 ρ_3^m 和 ρ_4^m , ρ_5^m 和 ρ_6^m 对总体变化的贡献十分微弱, 数量级是 ρ_3^m 和 ρ_4^m 的十分之一, 可以忽略不计.

单叶片反照率对多次散射项值的大小影响最为显著. 模拟表明, 随着单叶片反照率 ω_l 由0.2增加至0.8, 多次散射项 ρ^m 大小持续显著增加, 峰值增加近20倍, 如图14a所示. 多次散射项中不同分项对总体变化的贡献幅度不同, 其中贡献最大的为 ρ_1^m , 如图

15b所示, 随 ω_l 由0.2增加到0.8, ρ_1^m 的峰值增长约30倍. ρ_2^m 、 ρ_3^m 和 ρ_4^m 对总体变化的贡献比 ρ_1^m 小一个数量级, 而 ρ_5^m 和 ρ_6^m 对总体变化的贡献比 ρ_2^m 、 ρ_3^m 和 ρ_4^m 还要低一个数量级, 二者对总体变化的贡献比总共不超过2%, 可忽略不计.

土壤背景反射率对多次散射项的影响主要体现在低PAI情况下, PAI介于0和4之间时影响明显. 随着背景反射率由0增至0.5, 多次散射项在PAI等于1时的取值迅速增加, 如图15所示. 当背景反射率发生变化时, ρ_3^m 和 ρ_4^m 对总体变化的贡献比较大, ρ_5^m 和 ρ_6^m 对总体变化的贡献十分微弱, 数量级是 ρ_3^m 和 ρ_4^m 的十分之一. 变化贡献不超过10%, 可以忽略. ρ_1^m 和 ρ_2^m 代表不经地表反射只经冠层散射的部分, 因此不随背景反射率的变化而变化.

当单叶片反照率为0.6, 天空散射光比例为0.1, 地表反射率为0.2, 冠层为均匀连续时, 随着太阳天顶角的增大, 多次散射项略有上升, 如图16所示. 入

图 13 多次散射项及各分项随植被面积指数的变化(a)以及聚集指数对多次散射项的影响(b)

单叶片反照率为 0.6, 地表反射率为 0.2, 入射天顶角为 30° , 天空散射光比例为 0.1

图 14 单叶片反照率对多次散射项(a)和 ρ_1^m (b)的影响

天空散射光比例 0.1, 地表反射率 0.2, 太阳入射天顶角 30°

图 15 土壤背景反射率对多次散射项的影响

单叶片反照率 0.6, 天空散射光比例 0.1, 太阳入射天顶角 30°

图 16 不同入射天顶角下多次散射项随植被面积指数的变化规律

单叶片反照率 0.6, 天空散射光比例 0.1, 地表反射率 0.2

射天顶角描述太阳直射光的特征, 因此假如增加天空散射光的比例, 多次散射项因入射天顶角增大而导致的变化将更不明显。

天空散射光比例决定直射辐射和散射辐射的比重, 多次散射项的各分项中, ρ_1^m 、 ρ_3^m 和 ρ_4^m 同直射光相关, ρ_2^m 、 ρ_5^m 和 ρ_6^m 同散射光相关。当天空散射光比

例取小值时, ρ_5^m 和 ρ_6^m 两项, 1 可以忽略。随着天空散射光比例的增大, 散射光所造成的多次散射项值, 逐渐接近直射光造成的多次散射项值, 当天空散射光比例为 0.5 时, ρ_5^m 、 ρ_3^m 和 ρ_6^m 分别同 ρ_1^m 、 ρ_3^m 和 ρ_4^m 十分接近。这表明对于多次散射项的产生, 散射辐射和直射辐射基本无差别。实际上, 当天空散射光比例达到 0.4 以上时, ρ_5^m 和 ρ_6^m 在总多次散射项中的贡献最大处已超过 20%, 不可忽略(图 17)。

4.2.4 ρ^m 的近似

根据上面的分析, 可以将上面的多次散射公式从六项重新简化为三项:

$$\rho^m = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3, \quad (46)$$

$$\rho_1 = \left(\frac{i_0}{2} + \beta \left(\frac{\tilde{i}_0}{2} - S' \frac{\tilde{i}_0}{2} - \frac{i_0}{2} \right) \right) \frac{\omega_l^2 p (1-p)}{1 - \omega_l p} \cdot \frac{1}{2\pi}. \quad (47)$$

当天空散射光比例小于 0.4 时, 可以忽略 ρ_5^m 和 ρ_6^m 的影响, ρ_2 和 ρ_3 多次散射公式可以简化为

$$\rho_2 = (1 - \beta)(1 - i_0) \frac{\rho_g \tilde{i}_0 r_c^*}{1 - \rho_g \tilde{i}_0 r_c^*} (1 + \rho_g (1 - \tilde{i}_0)) \frac{1}{2\pi}, \quad (48)$$

$$\rho_3 = (1 - \beta) \frac{i_0}{2} \frac{\omega_l (1-p)}{1 - \omega_l p} \cdot \frac{\rho_g}{1 - \rho_g \tilde{i}_0 r_c^*} \left(1 - \tilde{i}_0 \left(1 - 0.5 \frac{\omega_l (1-p)}{1 - \omega_l p} \right) \right) \frac{1}{2\pi}. \quad (49)$$

当天空散射光比例达到或超过 0.4 时, ρ_2 和 ρ_3 为

$$\rho_2 = (1 - i_0 + \beta (S' - S' \tilde{i}_0 - 1 + i_0)) \cdot \frac{\rho_g \tilde{i}_0 r_c^*}{1 - \rho_g \tilde{i}_0 r_c^*} (1 + \rho_g (1 - \tilde{i}_0)) \frac{1}{2\pi}, \quad (50)$$

图 17 不同散射光比例时多次散射项各分项对比

(a) 天空散射光比例 0.2, (b) 天空散射光比例 0.4. 单叶片反照率 0.6, 地表反射率 0.2, 太阳入射天顶角 30°

$$\rho_3 = \frac{i_0}{2}(1-\beta S') \frac{\omega_l(1-p)}{1-\omega_l p} \cdot \frac{\rho_g}{1-\rho_g \tilde{i}_0 r_c^*} \left(1 - \tilde{i}_0 (1-0.5 \frac{\omega_l(1-p)}{1-\omega_l p}) \right) \frac{1}{2\pi} \tag{51}$$

5 结果与讨论

5.1 统一模型的实验验证

采用“黑河遥感联合实验(WATER)”2008年7月1日在甘肃省张掖市盈科灌区测量了玉米冠层的BRDF数据(闫彬彦等, 2012)对模型进行了初步验证. 植被类型为已经封垄的玉米, 同步采集了配套冠层结构参数和其他环境参数(表1), 模型模拟结果与实测结果对比见图18.

采用Chen和Leblanc(1997)的实验数据为离散森林植被的BRDF验证数据, 进行模型的初步验证. 植被类型为黑杉(Black spruce), 配套冠层结构参数和其他环境参数见表1. 其中LAI为像元平均叶面积指数, 根据单颗树叶面积指数和树木棵数计算得到, PAI(Plant Area Index)为考虑树干等非叶部分的植物面积指数, 是根据LAI和树干胸径等因素推算得到, 天空散射光比例也为根据实测植被光谱推算得到. 模型模拟结果与实测结果对比见图19.

从图18和19可以看出, 无论是针对农田还是森林, 植被BRDF统一模型可以表达植被的BRDF特征.

但是图18显示, 对于行播玉米, 某些角度的模型模拟值与观测值偏离较大, 这是由于观测对象玉米为制种玉米, 均匀度较差, 且观测所用的地面多角度观测架传感器视场较小, 稳定性不够引起的. 由于模型的主要输入参数如 $a_1(m)$ 、 $a_2(m)$ 、 LAI 、 G 等只能用地面常规非遥感的方法获取, 如果与遥感观测尺度不匹配, 代表性不够将在非均质植被将引起大的误差(张仁华等, 2010).

5.2 直射光与天空漫射光对植被 BRDF 的不同作用

大气透过率决定直射光与散射光的比例, 大气透过率越小, 到达地表的 $\mu_i F_i$ 就越小, 散射光强就越大, β 值增大. θ_i 增加, 大气散射路径增长, 总散射量增加, $\mu_i F_i$ 减少. 所以黑杉林BRDF实测数据表明, $\theta_i=-50^\circ$ 时比 $\theta_i=-40^\circ$ 时热点强度下降, 碗边效应增强(Chen和Leblanc, 1997). β 是 θ_i 的函数, 导致四分量辐射亮度为非各向同性, 即使假定元素为朗伯反射体.

波长的增减亦能引起 $\mu_i F_i$ 与 E 的变化, 只要 $\lambda>0.5\mu m$. 因为太阳辐射可以用6000K的黑体近似, 它与 λ^{-5} 成正比. 而分子散射与 λ^{-4} 成正比, 气溶胶大颗粒散射与 $\lambda^{-3}\sim\lambda^{-1}$ 成正比. 所以, $\beta_{nir}>\beta_{red}$, 故近红外波段热点强度小于红色波段的, 但碗边效应却相反, 同样被黑杉林BRDF实测所证实 $\mu_i F_i$ 与 E 对植被冠层BRDF的此消彼长的影响, 结果如数值模拟(图20).

表 1 植被 BRDF 模型输入参数

植被	$a_1(m)$	$a_2(m)$	$H(m)$	LAI	$G(\theta)$	θ_i	φ_i	φ_v	β	$\rho_{v, red}$	$\rho_{g, red}$	$\rho_{v, nir}$	$\rho_{g, nir}$
玉米	0.48	0.14	1.52	4.52	0.5	27°	13°	10°	0.3	0.078	0.14	0.40	0.22
植被	$H_1(m)$	$H_2(m)$	PAI_a	LAI_a	$G(\theta)$	—	—	—	β	$\rho_{v, red}$	$\rho_{g, red}$	$\rho_{v, nir}$	$\rho_{g, nir}$
黑杉	6.5	0.5	1.87	1.145	0.5	—	—	—	0.15	0.13	0.06	0.53	0.2

图 18 农田植被模型模拟结果与实测结果对比

(a) 红波段; (b) 近红外波段

图 19 离散森林植被模型模拟结果与实测结果对比

(a) 红波段($\theta_s=-40^\circ$); (b) 近红外波段($\theta_s=-40^\circ$); (c) 红波段($\theta_s=-55^\circ$); (d) 近红外波段($\theta_s=-60^\circ$)

图 20 主平面内反射率受 β 影响变化图

(a) 主平面内红色波段的 BRDF 随 β 变化图; (b) 主平面内近红外波段的 BRDF 随 β 变化图

假定 $\xi_i \cong 1$, $G=0.5$, 有效叶面积指数为 1.87. 令 $b=G_i LAI_e$, $x=\mu_i$, $K=0.5867$. 太阳天顶角为 -40° , 观测天顶角从 -75° 变到 75° ; 红色波段 β 的值由 0.1 变到 0.5, 变化间隔为 0.05; 近红外波段 β 的值由 0.1 变到 0.5, 变化间隔为 0.05. 不同波段的组分反射率如表 1 所示. 通过求解 K_c 、 K_g 、 K_t 、 K_e , 根据式(24)和假定的四分量反射率, β 的变化对主平面内 BRDF 的影响如图 20 所示. 事实证明以往许多研究忽视了 β 对 BRDF 的深刻影响.

表 2 各组分反射率

	红色波段	近红外波段
叶子反射率 ρ_v	0.13	0.53
地表反射率 ρ_g	0.06	0.20

5.3 聚集指数对一次散射项的影响

同一植被类型, 不同的聚集指数会有不同的孔隙率, 这样就会造成一次散射项的不同. 取 Chen 和 Leblanc(1997) 的实验参数为例, 计算了 $\theta_s=-40^\circ$,

$\theta_v = -40^\circ$ 处 ρ_{red}^1 值与 ξ 值的关系. 其中离散植被的 PAI 为 1.87, LAI 为 1.1451, 树的整体高度为 7m, 冠层高度为 6.5m. 聚集指数取值范围为 0.1~1, 间隔为 0.1. 利用模型进行模拟, 代入不同的聚集指数计算相应的孔隙率, 进而得到不同聚集指数在热点方向上的一次散射项, 如图 21 所示. 显然 ξ 的正确取值对 BRDF 具有重要意义.

6 结论

植被 BRDF 统一模型有如下几个特点: (1) 立足于植被元素, 使植被的 BRDF 用近似解析公式表达成为可能, 为植被参数遥感反演创造了更有利的条件. (2) 把植被 BRDF 分解为一次散射与多次散射贡献之和, 并分别获得了正确的求解方法. 为理解植被 BRDF 提供了坚实的物理基础. (3) “统一”是模型最显著的特征, 它可以适用于多种植被类型, 适用于全部太阳短波范围 (0.3~2.5 μm). 适用于不同大气条件, 为植被定量遥感模型能融入全球变化过程模拟创造了有利条件.

植被 BRDF 统一模型目前还仅仅是初步建立, 需要大量的实测数据进行验证, 这将是我们的下一步的工作重点. 建立 BRDF 模型的最终目的是反演叶面积指数. 因为统一模型为解析模型, 且所用参数较少, 适用于各类植被, 但需要引入高效的反演方法进行各类植被参数的反演研究, 才能充分发挥模型的优势. 这也是我们下一步的工作. 然而遥感数据均是像元尺度, 有些结构参数如植株高度、 G 函数值, 很

图 21 一次散射项随聚集指数变化关系图

难从被动光学遥感获取, 往往只能使用地面点测量结果, 或者根据先验知识提出近似值, 大大限制了模型的实际应用价值. 如何引入其他遥感手段, 例如激光雷达等实现主被动协遥感同反演, 将是今后的研究趋势.

在本文中, 聚集指数是将各种植被类型统一起来的重要参数, 如何实现对聚集指数的定量表达, 给出聚集指数与冠层结构参数的函数关系是反演植被结构参数特别是植被面积指数的重要前提, 因为本文的篇幅所限, 这部分内容将另外成文专门论述.

参考文献

- 徐希孺. 2005. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社. 45–121
- 闫彬彦, 徐希孺, 范闻捷. 2012. 行播作物二向性反射(BRDF)的一体化模型. 中国科学: 地球科学, 42: 411–423
- 张仁华, 田静, 李召良, 苏红波, 陈少辉. 2010. 定量遥感产品真实性检验的基础与方法. 中国科学: 地球科学, 40: 211–222
- 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 1991. 高等大气物理(上、下). 北京: 中国气象出版社
- 朱小华, 冯晓明, 赵英时. 2012. 基于LAI空间知识的多尺度多阶段目标决策反演. 中国科学: 地球科学, 42: 246–255
- Chandrasekhar S. 1960. Radiative Transfer. New York: Dover Publications Inc. 53
- Chen J M, Leblanc S G. 1997. A four-scale bidirectional reflectance model based on canopy architecture. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 35: 1316–1337
- Fan W L, Chen J M, Ju W, Zhu G. 2014. GOST: A geometric-optical model for sloping terrains. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 52: 5469–5482
- Huang D, Knyazikhin Y, Dickinson R E, Rautiainen M, Stenberg P, Disney M, Lewis P, Cescatti A, Tian Y, Verhoef W, Martonchik J V, Myneni R B. 2007. Canopy spectral invariants for remote sensing and model applications. Remote Sens Environ, 106: 106–122
- Huang H G, Qin W H, Liu Q H. 2013. RAPID: A radiosity applicable to porous individual objects for directional reflectance over complex vegetated scenes. Remote Sens Environ, 132: 221–237
- Jupp D L B, Strahler A H. 1991. A hotspot model for leaf canopies. Remote Sens Environ, 38: 193–210
- Knyazikhin Y, Martonchik J V, Myneni R B, Diner D J, Running S W. 1998. Synergistic algorithm for estimating vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from MODIS and MISR data. J Geophys Res, 103: 32257–32275
- Knyazikhin Y, Schull M A, Xu L, Myneni R B, Samanta A. 2011. Canopy spectral invariants. Part 1: A new concept in remote

- sensing of vegetation. *J Quant Spectrosc Ra*, 112: 727–735
- Kuusk A. 1991. The hot spot effect in plant canopy reflectance. In: Myneni R B, Ross J, eds. *Photon-Vegetation Interactions: Application in Optical Remote Sensing and Plant Physiology*. New York: Springer-Verlag. 139–159
- Li X, Strahler A H. 1985. Geometric-Optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, GE-23: 705–721
- Liang S. 2005. *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. New York: John Wiley and Sons. 76–134
- Möttus M. 2007. Photon recollision probability in discrete crown canopies. *Remote Sens Environ*, 110: 176–185
- Müller-Linow M, Pinto-Espinosa F, Scharr H, Rascher U. 2015. The leaf angle distribution of natural plant populations: Assessing the canopy with a novel software tool. *Plant Methods*, 11, doi: 10.1186/s13007-015-0052-z
- Nilson T. 1971. A theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. *Agric Meteorol*, 8: 25–38
- North P R J. 1996. Three-dimensional forest light interaction model using a Monte Carlo method. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 34: 946–956
- Panferov O, Knyazikhin Y, Myneni R B, Szarzynski J, Engwald S, Schnitzler K G, Gravenhorst G. 2001. The role of canopy structure in the spectral variation of transmission and absorption of solar radiation in vegetation canopies. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 39: 241–253
- Qin W, Gerstl S A W. 2000. 3-D scene modeling of semidesert vegetation cover and its radiation regime. *Remote Sens Environ*, 74: 145–162
- Qin W, Jupp D L B. 1993. An analytical and computationally efficient reflectance model for leaf canopies. *Agric For Meteorol*, 66: 31–64
- Smolander S, Stenberg P. 2005. Simple parameterizations of the radiation budget of uniform broadleaved and coniferous canopies. *Remote Sens Environ*, 94: 355–363
- Stenberg P. 2007. Simple analytical formula for calculating average photon recollision probability in vegetation canopies. *Remote Sens Environ*, 109: 221–224
- Verhoef W. 1984. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model. *Remote Sens Environ*, 16: 125–141