

文章编号: 1007-4619 (2004)03-0193-08

基于多次散射的植被-土壤二向反射模型

邓孺孺^{1,2}, 田国良¹, 柳钦火¹

(1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中山大学 地理学院, 广州 510275)

摘 要: 运算过于复杂是目前多数植被二向反射模型存在的一个突出问题。对冠层的各次散射、透射和地面土壤反射分别进行分析和考虑, 建立各次反射光谱分量与叶面积指数的函数关系。在 Verstraete (1986) 的物理模型的基础上加上多次散射和土壤反射的分量, 建立了基于多次散射的植被-土壤二向反射模型, 并证明仅考虑前三次散射即可满足一般精度要求。该模型克服了原模型的不足, 并可根椐叶面积指数等参量直接计算二向反射率, 避免了运算量巨大的叠代运算, 故便于应用。实验证明, 该模型具有较高的精度。

关键词: 二向反射模型; 植物冠层模型; 多次散射; 叶面积指数; 土壤含水量

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

1 引 言

植被二向反射模型的建立对定量遥感有重要意义, 是进行土壤含水量调查、作物长势调查、作物估产及地表反照率反演等方面定量遥感必须解决的问题。在过去的 30 年中, 国际上针对植物的光谱特征进行了大量的研究, 建立了为数众多的植被冠层模型。目前占主流地位的是辐射传输模型和几何光学模型以及近几年发展起来的核驱动模型。辐射传输模型以辐射传输方程为基础, 假定植被冠层为一层或数层水平无限延伸的介质, 每层中的植被元素可以看作吸收和散射微粒, 这些微粒的几何光学特性参数可以给定。然后用辐射传输方程的近似来研究冠层的二向辐射传输特性或反演植被元素特征值。辐射传输模型中最典型的是 Suits 模型和 SAIL 模型。Suits 模型^[1]将叶片、树杆等植被分解成水平和垂直两个分量, 然后根据辐射传输方程对向下、向上的直射光与散射光进行迭代运算, 至数值稳定时得到冠层方向反射率。Suits 模型对植被生长状态等方面有较好反映。SAIL 模型^[2]假定植被冠层中叶片倾向为随机分布, 而倾角服从某种特定的分布, 然后根据入射方向和观测方向上叶片分布的统计几何关系计算冠层中 9 个辐射传输分量的系数。再通过

迭代运算求整个冠层的方向反射率。较之 Suits 模型, SAIL 模型反映更一般的情况, Suits 模型相当于 SAIL 模型的一个特例。辐射传输模型适合于对农作物、草地及密林的遥感, 但对稀疏的林地, 其效果不好。辐射传输模型无论是 Suits 模型还是 SAIL 模型, 即使在所有参数已知的情况下对地表二向反射率的求解仍要通过迭代运算, 不但运算量巨大, 而且稳定性不好。

几何光学模型以几何光学理论为基础, 从植株等宏观个体入手, 将地面目标假定为一定形状的几何体, 引入了光照植被、阴影植被、光照地面和阴影地面 4 个分量的概念, 根据该 4 个参数在不同光照和观测条件下的几何光学关系建立二向反射分布模型。该模型的代表为 Li-Strahler 几何光学模型^[3]和 Jupp 等人提出的模型^[4]。几何光学模型能够解释热点现象, 且能够较好地描述稀疏林地和粗糙地表的二向性反射特征。但初期的模型没有考虑多次散射的影响, 对浓密的林地效果不如辐射传输模型。为了能够使适用于浓密的林地, 李小文等进一步提出了考虑树冠相互阴影效应的 GOMS 模型^[5]。其后为进一步更好考虑冠层多次散射的影响, 李小文等人在间隙率模型的基础上, 进一步提出了几何光学-辐射传输 (GO-RT) 混合模型^[6], 从而实现了几何光学模型向辐射传输模型的逼近。

收稿日期: 2002-11-01; 修订日期: 2003-01-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (49899271 和 49971062) 和国家基础研究计划项目 (G2000077900) 资助。

作者简介: 邓孺孺 (1963—), 男, 副教授, 1984 年本科毕业于武汉地质学院, 1989 年于中国地质大学获理学硕士学位, 现在中山大学任教并在中国科学院遥感应用研究所攻读博士学位。目前主要从事辐射传输模型和环境遥感方面的研究, 已发表论文 20 余篇。

近年来又出现了将物理模型与统计模型相结合的“半经验模型”。“半经验模型”将 BRDF 等价于体散射“核”、表面散射“核”和一个表征各向同性常量的加权和,于是称为“核驱动模参数”,操作起来较为容易。

核驱动模型虽然有效地考虑反射率角度的变化,但是这 3 个参数无法反演地表组分。而前两类模型由于需要复杂运算或对地表已知参数要求过高,不便于实际运用。提高遥感的定量水平,需要一个能根据遥感数据定量地求解地面参数,又便于实际应用的植被遥感模型。本文对冠层的各次散射、透射和土壤反射分别进行分析,建立各次反射光谱分量与叶面积指数的函数关系。在 Michel M. Verstraete 等^[9]的物理模型的基础上增加了多次散射和土壤反射的分量,建立一个基于各次散射的植被-土壤二向反射模型。模型的求解无需迭代运算,便于实际运用。

2 基于多次散射的植被二向反射模型

植被反射光主要为许多叶子反射光的贡献之和,由于叶子的位置、倾角和倾向不同,相当一部分光经叶子反射或透射后又被其它叶子所阻挡,再次发生反射或透射。这一过程可重复多次,即发生多次散射作用,我们分别将经历一次散射,两次散射和 n 次散射后的入射光称为一次散射光,二次散射光和 n 次散射光。散射光的能量主要集中在第 1 次散射。随散射次数的增加,散射强度近呈等比级数锐减。故一些辐射传输模型中,只考虑一次散射,忽略多次散射,如 Michel M. Verstraete^[9]的物理模型。该模型当叶面指数较大时,会产生明显的误差。尤其在近红外波段,由于叶子是透射率和反射率都很高,多次散射光是不应忽略的。

研究表明^[10-12],植物叶在可见光波段反射率和透射率极低,在红外波段无论是反射或透射都很高,而且均接近于朗伯体。假设植被叶在所有波段是朗伯体,植被冠层由无数倾角、倾向均随机分布的叶子组成,植被层是水平均匀(但垂向上可能是不均匀的),且是无限延伸的。植被覆盖区被传感器探测到的地面光谱由植被冠层散射光和土壤散射光组成。植被冠层和土壤散射光由一至多次散射组成。植被冠层的反射率 R_p 为:

$$R_p = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \dots + \rho_n \quad (1)$$

其中: ρ_1 为叶丛的一次散射率, ρ_2, ρ_3 和 ρ_n 分别为

冠层的第 2, 3 和 n 次散射率。

2.1 一次散射的二向反射率

设植被冠层的厚度为 h , 叶面积指数为 L , 垂向坐标用 z 表示。植被层顶点 z 为零, 冠层底部 $z = h$; 太阳天顶角和仪器观测天顶角分别为 θ_s 和 θ_v 。入射光进入冠层后受到叶子的阻截而削弱, 当通过的冠层厚度为 z 时, 其透过率为:

$$T_1 = \exp\left[-\frac{\tau_1(z)}{\mu_1}\right] = \exp\left[-\int_0^z \frac{\kappa_1(z')\Lambda(z')}{\mu_1} dz'\right] \quad (2)$$

其中: $\tau_1(z)$ 是高度在 z 以上部分冠层的光学厚度; $\Lambda(z) = dL/dh$ 叶面指数密度, 即单位面积之上单位厚度的叶面积, 单位为 m^2m^{-3} , $\kappa_1(z)$ 是冠层在入射方向上的消光系数:

$$\kappa_1(z) = \langle \cos\Theta_1 \rangle_z$$

式中: Θ_1 为阳光与叶面法线之间的夹角, $\langle \cos\Theta_1 \rangle_z$ 为垂向坐标 z 之上对所有叶片计算 $\cos\Theta_1$ 的平均值, 可以根据植物叶倾角分布函数计算出; $\mu_1 = \cos\theta_s$ 。

如入射光强为 I_0 , 那么进入水平冠层的光强在冠层顶部为: $I = I_0\mu_1$, 进入厚度为 z 的冠层后, 未被叶片拦截的光强为 $IT(z)$, $T(z)$ 为透过率。

根据 Hapke's^[8] 等的推导, 阳光直接照射到冠层高度为 $z + dz$ 部分的光强为:

$$\begin{aligned} IT_1(z + dz) &= I_0\mu_1 T_1(z) \exp\left[-\int_z^{z+dz} \frac{\kappa_1(z')\Lambda(z')}{\mu_1} dz'\right] \\ &= I_0\mu_1 T_1(z) \exp\left(-\frac{d\tau_1(z)}{\mu_1}\right) \end{aligned}$$

其中:

$$d\tau_1(z) = \int_z^{z+dz} \langle \cos\Theta_1 \rangle_z \Lambda(z) dz = \kappa_1(z)\Lambda(z) dz$$

冠层中 z 到 $z + dz$ 的水平薄层所拦截的太阳直射光为:

$$\begin{aligned} IT_1(z + dz) - IT_1(z) &= I_0\mu_1 T_1(z) \exp\left[1 - \exp\left(-\frac{d\tau_1(z)}{\mu_1}\right)\right] \\ &\approx I_0\mu_1 T_1(z) \frac{d\tau_1(z)}{\mu_1} = I_0 T_1(z) d\tau_1(z) \end{aligned}$$

设 ω 为单张叶片的一次散射反照率, $\mu_2 = \cos\theta_v$, $P(g)$ 散射相函数, 散射角 g 为入射光与散射光的夹角, 有以下关系:

$$\cos g = \cos\theta_s \cos\theta_v + \sin\theta_s \sin\theta_v \cos(\varphi_s - \varphi_v) \quad (3)$$

则冠层的 z 到 $z + dz$ 的水平薄层在 θ_v 方向反射并透出冠层的一次散射光为:

$$dE_1 = I_0 \frac{\omega P(g)}{4\pi} T_1(z) T_2(z) d\tau_1(z)$$

整个冠层的一次散射光 E_1 是上式的积分:

$$E_1 = I_0 \frac{\omega P(g)}{4\pi} \int_0^h T_1(z) T_2(z) d\tau_1(z)$$

其中:

$$T_2(z) = \exp\left[-\frac{\tau_2(z)}{\mu_2}\right] = \exp\left[-\int_0^z \frac{k_2(z)\Lambda(z)}{\mu_2} dz\right]$$

式中: $\tau_2(z)$, $k_2(z)$ 分别为沿 θ_v 方向的光学厚度和消光系数:

$$k_2(z) = \langle \cos\Theta_2 \rangle_z$$

Θ_2 为观测方向与叶面法线之间的夹角。故得冠层一次散射的二向反射率为:

$$\begin{aligned} \rho_1(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v) &= \frac{E_1}{I_0 \mu_1 \mu_2} \\ &= \frac{\omega P(g)}{4\pi \mu_1 \mu_2} \int_0^h T_1(z) T_2(z) d\tau_1(z) \end{aligned}$$

Michel M. Verstraete^[9]等给出了上式积分结果的一般式,我们对其进行了简化。实验表明,当入射天顶角不是很大时,叶片的正面反射率、背面反射率和透射率在可见光波段反射率均很低,而在红外波段很接近^[10,12]并接近朗伯反射。为方便起见,设叶子为朗伯体,且其正、反面的反射率和透射率相等,叶子的方向为均匀分布,则有

$$\frac{\omega}{4\pi} = \frac{2\pi\rho_l}{4\pi} = \frac{\rho_l}{2}$$

ρ_l 为叶子上面的反射率。令 $R_l = \frac{\rho_l}{2}$; κ_1, κ_2 分别为 $\kappa_1(z)$ 和 $\kappa_2(z)$ 的平均值; $\Lambda(z) = L/h$, 有:

$$\rho_1(\theta_s, \varphi_s; \theta_v, \varphi_v) = \frac{R_l P(g)}{\kappa_1 \mu_2 + \kappa_2 \mu_1} \left[1 - e^{-\left(\frac{\kappa_1}{\mu_1} + \frac{\kappa_2}{\mu_2}\right)L} \right] \quad (4)$$

κ_1, κ_2 和 $P(g)$ 取决于叶子角度分布,可根据叶倾角分布函数导出。当叶倾角为随机(均匀)分布时,有:

$$\kappa_1 = \kappa_2 = \frac{1}{\pi}$$

$$P(g) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} |\cos(\vec{s}, \vec{n}_i) \cos(\vec{v}, \vec{n})| d\theta_i d\varphi_i \quad (5)$$

\vec{s}, \vec{v} 和 \vec{n}_i 分别为入射方向,观测方向和叶面法线方向的单位矢量。

2.2 二次和多次散射的散射率

因叶片反射与透射率接近,且反射与透射均近于各向均匀,故植物冠层反射与透射方向纷纭杂乱,接近于朗伯体,散射的次数越多,其各向均匀的程度越高。设二次以上的散射为朗伯体散射。对于半球散射,冠层消光系直接取决于叶面积指数密度,而与

叶倾角无关^[2]。将某次散射分为向上半球散射 E_{n+} 和向下半球散射 E_{n-} 两部分(n 为散射次数),这时对于一水平薄层的冠层,有 3 种情况的散射:其一是半球入射光来自上方,散射方向为上半球方向(向上),相当于水平冠层薄层的上表面对上球面入射光的球面反射,我们用 ω_{r+} 表示其半球散射率;其二是半球入射光来自下方,散射方向为下半球方向散射,相当于水平冠层薄层的下表面对下球面入射光的球面反射,用 ω_{r-} 表示其半球散射率;其三是半球入射光来自上方,散射方向为下半球方向(向下),或半球入射光来自下方,散射为上半方向,相当于球面入射光穿过水平冠层薄层后产生的球面透射光,用 ω_t 表示其半球散射率。

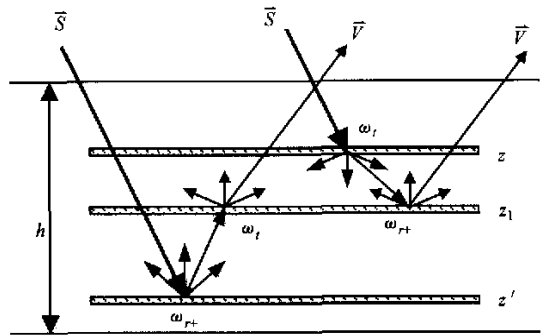


图 1 水平冠层二次散射几何关系示意图

Fig.1 Sketch map for geometric relationship of scattering of the second time

如图 1,对于冠层高度为 z 的水平薄层,其二次散射是将来自各高度的冠层一次反射光进行散射,可分为上半球入射和下半球入射两部分。上半球入射光 E_{1+} 是 z 以上的冠层的下向散射光(相应的散射率为 ω_t)的积分,可表示为:

$$E_{1+} = I\omega_t \int_0^{z_1} T(z) T(z_1 - z) d\tau(z)$$

$I = I_0 \cos\theta_s$ 。下半球入射光 E_{1-} 是 z 以下的冠层的上向散射光(相应的散射率为 ω_{r+})的积分,可表示为:

$$E_{1-} = I\omega_{r+} \int_{z_1}^h T(z') T(z' - z_1) d\tau(z')$$

高度为 z 的水平薄层对上半球入射光再次散射(二次散射),对上向散射光,其散射率为 ω_{r+} ,而对于下半球入射光,其再次散射(二次散射)的上向散射光所对应的散射率为 ω_t 。该冠层薄层总的二次散射强度为:

$$dE_2 = \left[I \int_{z_1}^h \omega_{r+} \omega_t T(z') T(z' - z_1) d\tau(z') + \omega_r \omega_t \int_0^{z_1} T(z) T(z_1 - z) d\tau(z) \right] d\tau(z_1)$$

等式右边第一项为下半球入射光的二次散射强度,第二项为上半球入射光的二次散射强度。再次散射的散射光传播出冠层还要受冠层叶片的阻截削减,即乘以 $T(z_1)$,故向上透出冠层的二次散射光为:

$$dE_{2+} = IT(z_1) \left[\int_{z_1}^h \omega_{r+} \omega_t T(z') T(z' - z_1) d\tau(z') + \omega_r \omega_t \int_0^{z_1} T(z) T(z_1 - z) d\tau(z) \right] d\tau(z_1)$$

式中: $\tau(z)$, $T(z)$ 分别为高度在 z 以上冠层部分垂直向上的光学厚度和透射率。因对于半球散射,冠层消光系直接取决于叶面积指数密度,而与叶倾角无关^[1],故:

$$d\tau(z) = \Lambda(z) dz \quad (6)$$

$$T(z) = \exp[-\tau(z)] = \exp\left[-\int_0^z \Lambda(z) dz\right] \quad (7)$$

整层冠层的二次散射率为:

$$\rho_{2+} = \int_0^h T(z_1) \left[\int_{z_1}^h \omega_{r+} \omega_t T(z') T(z' - z_1) d\tau(z') + \omega_r \omega_t \int_0^{z_1} T(z) T(z_1 - z) d\tau(z) \right] d\tau(z_1) \quad (8)$$

因设叶片的正面反射率、背面反射率和透射率三者相等,其值为 ρ_l ,则有

$$\omega_{r+} = \omega_{r-} = \omega_t = \omega = \frac{\rho_l}{2} = R_l,$$

上式可写成:

$$\rho_{2+} \approx R_l^2 \int_0^h T(z_1) d\tau(z_1) \int_0^h T(z) T(|z - z_1|) d\tau(z) \quad (9)$$

同理可得三次散射光的反射率贡献为:

$$\rho_{3+} = R_l^3 \int_0^h T(z_2) d\tau(z_2) \int_0^h T(|z_1 - z_2|) d\tau(z_1) \times \int_0^h T(z) T(|z - z_1|) d\tau(z) \quad (10)$$

$n+1$ 次散射光的反射率贡献为:

$$\rho_{n+1} = R_l^{n+1} \int_0^h T(z_n) d\tau(z_n) \int_0^h T(|z_{n-1} - z_n|) \times d\tau(z_{n-1}) \cdots \int_0^h T(|z_1 - z_2|) d\tau(z_1) \times \int_0^h T(z) T(|z - z_1|) d\tau(z) \quad (11)$$

将(6),(7)式分别带入(9),(10)式积分得:

$$\rho_{2+} = \frac{R_l^2}{2} [1 - e^{-2L} - 2Le^{-2L}] \quad (12)$$

$$\rho_{3+} = \frac{R_l^3}{8} [5 - e^{-2L}(4 + 12L + 8L^2) - e^{-4L}] \quad (13)$$

如只考虑三次散射,观测方向冠层反射率为:

$$R_p(\theta_1, \theta_2, \varphi_1 - \varphi_2) = \rho_1(\theta_1, \varphi_1; \theta_2, \varphi_2) + \rho_{2+} + \rho_{3+} \quad (14)$$

2.3 植被冠层的透射

2.3.1 透射光的组成

即使在密林区,也有一部分阳光透过树冠层射到地面。透射出冠层的光有两种,一种有直接透射光,即直接从叶丛间隙射到地面的阳光,另一种为以叶片散射后再透射到地面的散射光。后者包括了多次散射的透射光。故冠层透射率 T_p 可由下式表示:

$$T_p(\theta_1) = T_1(\theta_1) + T_2 + T_3 + \cdots + T_n \quad (15)$$

其中: T_1 为入射光的直接透射率, T_2, T_3 和 T_n 分别为第 2, 3 和 n 次散射光透射到地面的光的比率。

2.3.2 一次透射光和散射透射光的求解

第一次透射率为:

$$T_1 = \exp\left[-\frac{\tau_1(h)}{\mu_1}\right] = \exp\left[-\int_0^h k_1(z) \Lambda(z) dz\right] \quad (16)$$

$$T_1(\theta_1) = e^{-L \frac{\kappa_1}{\mu_1}} \quad (17)$$

第二次散射透率:

$$T_2 = R_l \int_0^h T(h-z) T(z) d\tau(z)$$

即:

$$T_2 = R_l L e^{-L} \quad (18)$$

第三次散射透率:

$$T_3 = R_l^2 \int_0^h T(h-z_1) d\tau(z_1) \int_0^h T(z) T(|z_1 - z|) d\tau(z)$$

积分得:

$$T_3 = R_l^2 \left(\frac{1}{4} e^{-3L} - \frac{1}{4} e^{-L} + L e^{-L} + \frac{1}{2} L^2 e^{-L} \right) \quad (19)$$

第 $n+1$ 次散射透射率:

$$T_{n+1} = R_l^{n+1} \int_0^h T(h-z_n) d\tau(z_n) \int_0^h T(|z_{n-1} - z_n|) \times d\tau(z_{n-1}) \cdots \int_0^h T(|z_1 - z_2|) d\tau(z_1) \times \int_0^h T(z) T(|z - z_1|) d\tau(z) \quad (20)$$

2.4 植被冠层-土壤的综合反射

植被覆盖区的反射光谱是由植被冠散射光和透出冠层的下伏土壤反射光谱之和,即:

$$R = R_p + \rho_s \quad (21)$$

土壤的入射光部分为冠层的直接透射光,这部分光有方向性;另一部分为多次散射的透射光,这部分光为半球方向入射。直接透射光经土壤反射后仍会与冠层发生作用:一方面因叶阻截而削弱,另一方面也有一部分被冠层散射回地面,而这种反射反复进行。散射下地面的光为半球方向的,故总的土壤表面入射光为:

$$I_s = I T_p(\theta_1) + I T_p(\theta_1) R_s R_p(\theta_0) + I T_p(\theta_1) [R_s R_p(\theta_0)]^2 + \dots + I T_p(\theta_1) [R_s R_p(\theta_0)]^n$$

$n \rightarrow \infty$ 时:

$$I_s = I T_p(\theta_1) \left[\frac{1}{1 - R_s R_p(\theta_0)} \right]$$

其中: $\theta_0 = 0$,为垂向上的人射天顶角。向上透射出冠层的土壤反射光为:

$$E_s = I_s T_p(\theta_0) R_s = I T_p(\theta_0) T_p(\theta_1) \left[\frac{R_s}{1 - R_s R_p(\theta_0)} \right]$$

之所乘以 $T_p(\theta_0)$ 是因为经土壤反射后,入射光已变为半球散射光,可不考虑其方向性。又因 T_p 已考虑了多次散射的透射,故 E_s 已包含了土壤反射光经冠层散射并透射出冠层的那一部分光。写成反射率形式为:

$$\rho_s = \frac{T_p(\theta_0) T_p(\theta_1) R_s}{1 - R_s R_p(\theta_0)} \quad (22)$$

其中: $\theta_0 = 0$ 。 R_s 为土壤反射率,当考虑土壤湿度时可将下式^[13]代入:

$$R_s = R_{s0} e^{-\alpha_{ws} V_{ws}} \quad (23)$$

R_{s0} —干土反射率, α_{ws} —土壤水吸收率, V_{ws} —土壤含水量。

将(14),(22)和(23)式代入(21)式可求植被冠层-土壤的综合反射率 R 。

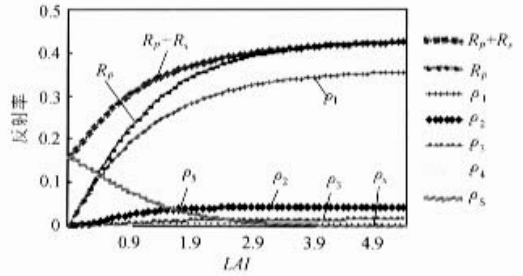
$$R(\theta_1, \varphi_1; \theta_2, \varphi_2) = \rho_1(\theta_1, \varphi_1; \theta_2, \varphi_2) + \rho_2 + \rho_3 + \frac{T_p(\theta_0) T_p(\theta_1) R_s}{1 - R_s R_p(\theta_0)} \quad (24)$$

2.5 植被冠层-土壤反射率的组成特征分析

2.5.1 冠层直接反射光与二、三次散射及土壤反射光贡献的比较

以红外波段为例,假设植物叶反射率为0.6(为便于与其它文献对比,比实际反射率稍大),叶倾角为均匀分布,入射天顶角为 45° ,观测天顶角为 0° ,并分别代入(4),(12),(13),(11)和(4)式得冠层 ρ_1 — ρ_4 和冠层总的反射率 R_p 随面积指数的变化曲线如图2。

从图2中可以得到以下几方面特征:



$\rho_1 = 0.6, R_s = 0.2$, 太阳天顶角 45° , 观测天顶角 0° , ρ_1 — ρ_4 分别为1—4 散射光; R_p —冠层散射反射率, ρ_5 —土壤反射率贡献, $R_p + \rho_5$ —总反射率, $\lambda = 850\text{nm}$

图2 植被覆盖区各反射组分模拟反射率曲线图

Fig.2 Simulate reflectance curves of different component of reflectance

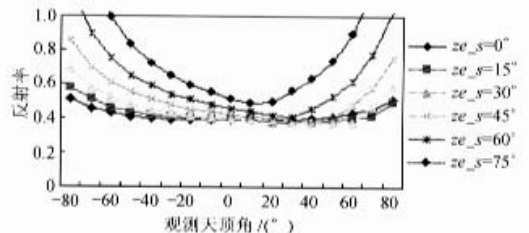
(1) 总的反射率和各次散射反射率在 $LAI < 1$ 时均随 LAI 的增加而快速增加;在 $1 < LAI < 3$ 时,随 LAI 的增加,总的反射率和各次散射反射率增的速率逐渐降低; $LAI > 3$ 后,总的反射率和各次散射反射率趋于稳定,随 LAI 的增加极其缓慢。

(2) 一次散射对总的反射率的贡献最大,随散射次数的增加,各次散射的贡献成近等比级数减小,在 $LAI < 1$ 时,前三次散射与土壤反射之和占总散射的99%以上,当 $LAI > 1$ 时,前三次散射与土壤反射之和也大于总散射的98%。所以一般情况下,仅考虑植被的前三次散射即可满足精度要求。

(3) 土壤反射光对总的反射率贡献随 LAI 的增大而减小,当 $LAI > 3$ 时,土壤反射光趋于0。

2.5.2 模型二向反射率分布特征

设土壤含水量为0,叶面积指数为2的情况下,用公式(24)进行模拟计算。主平面上,不同太阳天顶角下,用(24)式计算的各观测方向的反射率如图3。



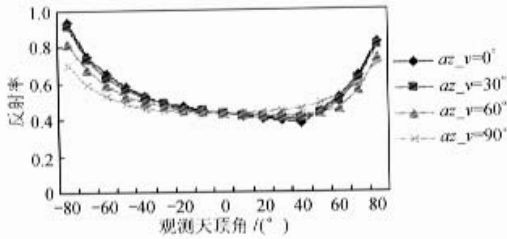
$\rho_1 = 0.6, R_s = 0.2, v_{ws} = 0, LAI = 2, ze_s$ 为观测天顶角

图3 不同太阳和观测天顶角下,太阳主平面上的计算反射率曲线

Fig.3 Calculated reflectance curves in principle plane under different solar zenith

图 3 中太阳一侧观测天顶角为负,相对一侧观测天顶为正,下同。

当太阳天顶角为 50°不同观测方位角反射率曲线如图 4 所示:



$\rho_l = 0.6, R_s = 0.2, v_{sw} = 0, LAI = 2, z_{e-s}$ 为观测天顶角, $\theta = 50^\circ$, α_v 为观测方位与太阳方位角的夹角

图 4 不同观测方位角和天顶角下的计算反射率曲线

Fig.4 Calculated reflectance curves under different observing azimuth and zenith

3 土壤-植被反射模型的验证实验

实验地点为北京市顺义县赵全营镇的冬小麦地,时间为 2001-04-12,所用光谱测量仪器为 ASD 连续光谱仪。共进行了两项实验,其一是检验垂直观测条件下模型对 LAI 和土壤含水量计算精度。另一项实验检验多角度观测情况下模型的二向反射精度。首先测量了干土壤和叶子反射率曲线作为计算的基础数据。

3.1 对 LAI、土壤含水量计算精度检验

该项实验是在垂直观测条件下测量 LAI、土壤含水量不同的 3 个样点的光谱曲线,并测量 LAI、土壤含水量。然后将 LAI、土壤含水量代入公式(23),公式(24)计算出光谱曲线,将计算光谱曲线与测量光谱曲线进行对比,检验模型对 LAI、土壤含水量计算精度。

图 5 为 3 个点的计算光谱曲线和测量光谱曲线,表 1 为该 3 个点测量光谱与计算光谱反射率在 350—2500nm 范围内的平均误差对比。除了水吸收带附近外,二者仍很接近。表 1 为该 3 个点全波段的平均误差。反射率平均绝对误差均在 0.01 内,接近 TM 等仪器的探测精度。

3.2 模型二向反射特征的检验

该项实验的方法是在已量测叶面积指数和土壤

表 1 3 种植被覆盖情况下土壤含水量计算误差对比
Table 1 Calculating errors of water content under three different vegetative coverings

测点号	LAI	土壤湿度	平均绝对误差	平均相对误差	最大绝对误差
(a)	1.47	3.3	0.010954	0.0568	0.05814
(b)	0.94	23.1	0.007240	0.0565	0.04616
(c)	0.92	7.5	0.007519	0.0557	0.03313

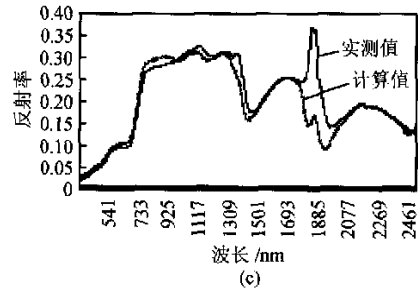
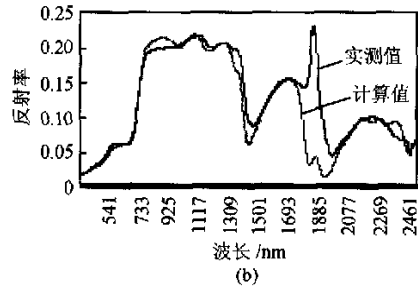
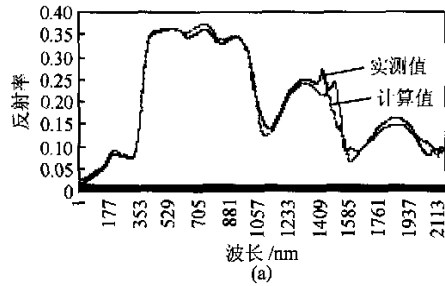
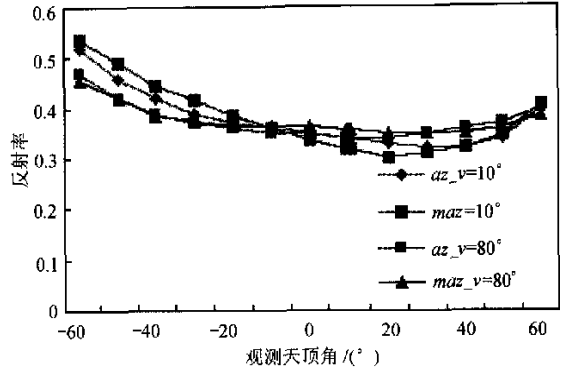


图 5 不同土壤含水量和 LAI 的情况下麦地计算反射率曲线与测量反射率曲线对比((a)至(c)分别为 3 个土壤含水量和 LAI 不同的观测点)

Fig.5 Calculated and measured reflectance curves of wheat fields of different LAI and water content((a) to (c) are three observed points)

含水量的麦地进行主平面和垂直太阳主平面上多角度光谱测量,得到不同观测角下各波段的光谱曲线;然后用以上模型根据叶面积指数和土壤含水量计算

各波段在主平面和垂直太阳主平面上、不同观测角下的反射率,将之与测量值进行对比。为简单起见,本模型未考虑热点的作用,为避免热点的影响,采用与主平面夹角为 10° 的平面代替主平面。图6为叶面积指数 LAI 为1.3,土壤含水量为6%,太阳天顶角为 45° 时,太阳主平面和垂直太阳主平面上850nm波段在不同观测天顶角下的测量反射率曲线与计算反射率曲线,表2为计算反射率和测量反射率的误差分析。从图6可以看出计算曲线和测量曲线均有相同的趋势,在垂直太阳主平面上,二者拟合得很好,平均绝对误差仅为0.01;受热点和观测条件等因素的影响,在主平面上,误差略大,平均绝对误差为0.015。两个平面上的相关系数均大于0.97。事实上由于所测麦地的小麦并不茂密,仪器视域范围有限,在不同观测角度下落入仪器观测范围内的植物-土壤面积比不尽相同,这就不可避免地造成一定的误差。考虑到该方面的影响因素,以上误差是可以接受的。



$\lambda = 850\text{nm}$, $\rho_l = 0.56$, $R_t = 0.24$, $v_w = 6\%$, $LAI = 1.3$, z_{e-s} 为观测天顶角, $\theta_s = 50^\circ$, az_v 为观测方位与太阳方位角的夹角

图6 太阳主平面和垂直太阳主平面上,测量反射率和计算反射率曲线对比

Fig.6 Comparing of calculated and measured reflectance curves in principle plane and the plane perpendicular to principle plane. az_v is the angle between solar azimuth and observing azimuth

表2 太阳主平面和垂直太阳主平面上,850nm 波长测量反射率和计算反射率误差对比

Table 2 Error comparing of calculated and measured reflectance on the spectrum of 850nm in principle plane and the plane perpendicular to principle plane

观测天顶角/(°)	太阳主平面			垂直太阳主平面		
	计算值	测量值	绝对误差	计算值	测量值	绝对误差
-60	0.520	0.537	0.017	0.470	0.457	-0.013
-40	0.420	0.445	0.025	0.390	0.384	-0.006
-20	0.370	0.386	0.016	0.360	0.365	0.005
0	0.350	0.334	-0.016	0.350	0.365	0.015
20	0.330	0.300	-0.030	0.340	0.349	0.009
40	0.320	0.321	0.001	0.360	0.349	-0.011
60	0.400	0.407	0.007	0.400	0.384	-0.016
平均误差		0.015			0.010	
相关系数		0.983			0.973	

4 结论与讨论

在现有众多被普遍接受的植被二向反射模型中,普遍存在不便于应用的问题。要么需要进行运算量巨大,且导致不稳定性增加的迭代运算;要么要求已知很多实际上很难获得的参数,使得植被二向反射模型与应用存在相当的距离。本文提出的模型对冠层散射的各分量分别进行考虑,所要求的参数均可通过实验获得,无需进行迭代运算,在实际中易

于应用,且可以根据要求的精度决定考虑的散射次数,以减少模型不必要的复杂性。从以上的模型计算和实验检验中还可得到以下结论:(1)冠层各次散射分量随散射次数的增加而快速减少,一般情况下,只考虑前3次散射即可满足精度要求。(2)反射光谱的方向性由一次散射决定,二次以上的散射对总体反射光的方向性影响很小。

参考文献 (References)

[1] Gwynn H. Suits. The Calculation of the Directional Reflectance of a

- Vegetation Canopy [J]. *Remote Sensing of Environment*. 1972, 2(2): 117—125.
- [2] Verhoef W. Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Modeling: The SAIL Model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, 16(2): 125—141.
- [3] Li Xiaowen, A H Strahler. Geometric-Optical Modeling of a Conifer Forest Canopy [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1985, GE-23(5): 705—721.
- [4] Jupp D L B, Walker, J, Penridge, L, K. Interpretation of Vegetation Structure in Landsat MSS Imagery: A Case Study in Disturbed Semi-arid Eucalypt Woodland. Part2. Model-based Analysis[J]. *J. Environmental Management*, 1986, 23: 35—57.
- [5] Li, Xiaowen, A H Strahler. Geometric-optical Bi-directional Reflectance Modeling of the Discrete Crown Vegetation Canopy: Effect of Crown Shape and Mutual Shadowing [J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1992, GE-30, 276—292.
- [6] Li Xiaowen, A H Strahler. Geometric-optical Bi-directional Reflectance Modeling of a Conifer Forest Canopy[J]. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1986, GE-24, 906—919.
- [7] Wanner W, Li Xiaowen, A H Strahler. On the Derivation of Kernels and Kernel-driven Models of Bi-directional Reflectance[J]. *Journal of Geophysical Research*. 1995, 100(D10): 21077—21089.
- [8] Hapke, B. W. Bi-directional Reflectance Spectroscopy, 4. The Extinction Coefficient and The Opposition Effect [C]. *Icarus*, 1986, 67: 264—280.
- [9] Michel M Verstraete, Bernard Pinty, Robert E Dickinson. A Physical Model of Bi-directional Reflectance of Vegetation Canopies Theory [J]. *Journal of Geophysical Research*. 1995, (D8): 11755—11765.
- [10] David M Gates, Harry J Keegan *et al.* Spectral Properties of Plants [J]. *Applied Optics*. 1965, 4(1): 11—20.
- [11] Joseph T Woolley. Reflectance and Transmittance of Light by Leaves [J]. *Plant Physiology*. 1971, 47(5): 656—662.
- [12] H. T. Breece III, R A Holmes. Bi-directional Scattering Characteristics of Healthy Green Soybean and Corn leaves in Vivo [J]. *Applied Optics*. 1971, 10(1): 119—127.
- [13] Deng Ruru, Tian Guoliang *et al.* Research on Remote Sensing Model for Soil Water on Rough Surface [J]. *Journal of Remote Sensing* [J], (waiting for publish), 邓孺孺, 田国良等. 粗糙表面土壤含水量遥感模型研究 [J]. 遥感学报 (待刊).

Bi-directional Reflectance Model of Canopy and Soil Based on Multi-Scatterings

DENG Ru-ru^{1,2}, TIAN Guo-liang¹, LIU Qin-huo¹

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

2. Center for Remote Sensing Application, Zhong Shan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: It's a primary question for many Bi-directional models of Canopy presently that it's difficult for them to be used in practice due to their complexity. In this paper, multi-scatterings and transmission taking place in canopy of vegetation, and reflectance of soil are analyzed respectively, and then the functions between every component of scattering and LAI are put forward. Improving Verstraete's (1986) Physical Model of Bi-directional Reflectance of Vegetation Canopy by adding multi-scattering and soil reflectance in the model, a Bi-directional reflectance model of canopy-soil as proposed and it was proved that the model's precision can be satisfied only when the first three scattering being taken into account. The shortcoming of the original model has been overcome in this model, and Bi-directional reflectance can be calculated directly according to LAI and some other factors, avoiding overlap calculation which results tremendous amount of computation, so the model is easier applied in practice. The precision of the model was verified by experiments.

Key words: bi-directional reflectance model; canopy model; multi-scattering; LAI, soil water content