

文章编号: 1001-1595(2010)02-0195-07

## 离散植被冠层的解析混合 BRDF 模型——MGeoSAIL

王 强<sup>1,2,3</sup>, 过志峰<sup>1</sup>, 孙国清<sup>1</sup>, 罗传文<sup>2</sup>, 刘丹丹<sup>3</sup>

1. 中国科学院 遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京; 2. 东北林业大学 林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;  
3. 黑龙江工程学院 测绘工程系, 黑龙江 哈尔滨 150040

### Construction of MGeoSAIL: a Hybrid BRDF Model for Discontinuous Vegetation Canopies

WANG Qiang<sup>1,2,3</sup>, GUO Zhifeng<sup>1</sup>, SUN Guoqing<sup>1</sup>, LUO Chuanwen<sup>2</sup>, LIU Dandan<sup>3</sup>

1. The State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China;  
2. Institute of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 3. Department of Surveying Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150040, China

Abstract: A MGeoSAIL model, which is more suitable for multi-angle observations, is constructed based on the improvement of the single-angle model GeoSAIL. The MGeoSAIL model combines the geometric-optical model with the radiation transfer model. Therefore, it has the advantages of the two models, which made it more accurate and practicable. The geometric-optical model calculates the amount of shadowed and illuminated components in a scene, while the radiation transfer model (SAIL) calculates the reflectance and transmittance of the tree crowns. The reflectance of each component in a scene is weighted by its fractional area and summed. The simulation result shows that the MGeoSAIL model could be simple and applicable to describe the “hot” spot in visible and near-infrared bands, and the “bowl” shape in the near-infrared band. Furthermore, the model is demonstrated to be more suitable in the BRDF simulation of discontinuous and open forest with low density and large individuals.

Key words: hot spot; bowl shape; Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF); geometric-optical model; radiation transfer model

摘 要: 根据适合于垂直单角度观测的 GeoSAIL 模型, 改进得到适合于各种角度观测的 MGeoSAIL 模型。它是几何光学模型和辐射传输模型的结合。具备两种模型的优点使 MGeoSAIL 模型更具准确性和实用性。其中几何光学模型用来计算场景内不同情况下阴影和光照成分的比例, 辐射传输模型 (SAIL) 考虑冠层内的辐射传输计算得到树冠的反射率和透射率, 将其权重加和生成场景反射率。模拟结果表明该模型简单实用, 在可见光与近红外波段均能反映出“热点”效应, 在近红外波段能描述出“碗边”效应, 且更适合于低密度、大个体、不连续稀疏林分冠层的 BRDF 模拟。

关键词: 热点效应; 碗边效应; 二向性反射分布函数 (BRDF); 几何光学模型; 辐射传输模型

中图分类号: P237

文献标识码: A

基金项目: 国家 863 计划 (2006AA12Z114); 国家自然科学基金 (40701124); 国家“十·五”科技支撑项目 (2006BAD03A0404); 黑龙江工程学院院基金

## 1 引 言

遥感观测的对象通常是包含多种组分的混合像元, 像元光谱是由像元结构、各组分光谱、光照条件和观测条件共同决定的。为了描述遥感信号与地物性质的关系, 人们建立了各种计算地物双向反射系数的数学模型。目前已经出现了许多物理模型, 按其理论基础可归纳为四类: 李小文和 Strahler 为代表的几何光学模型<sup>[1]</sup>、Verhoef 的 SAIL 为代表的辐射传输模型<sup>[2]</sup>、混合模型和计算机模拟模型。

其中每种模型都有各自的适用范围和优缺点: 几何光学模型更适用于处理非均匀的植被群

体, 特别是低密度、大个体的稀疏群体, 但是对于辐射植冠中的衰减处理过于简单, 没有考虑天空散射光和群体的多次散射作用, 这使得几何光学模型的精度受到影响; 辐射传输模型一般适合于植被组分与群体密度相比很小的群体以及其他稠密、水平均匀的群体, 但没有考虑非叶器官的作用以及植被各组分间的空间距离和非随机的分布现象; 混合模型适用于任何非均匀程度群体, 但是其计算量非常大; 计算机模拟模型能完整地反映出自然植被的真实特征, 但是此方法计算需要大量的试验和重复, 同时也受到群体结构变量数量的限制。

综合上述各种模型的优缺点, 提出集几何光

学模型与辐射传输模型优点于一体的 MGeoSAIL 模型。SAIL 模型是适用于连续冠层的最具代表性的辐射传输模型之一,其特点是在水平均匀的假设下考虑冠层的垂直分层结构和叶倾角分布,而不适用于离散群体<sup>[3-4]</sup>。利用复杂的空间几何关系推导出锥形树冠在不同视线方向情况下四分量比例关系,将四分量及其反射率权重加和生成场景反射率。它考虑了植被群体冠层内部多次散射,天空散射光作用,是几何光学模型和辐射传输模型的良好结合。

## 2 模型描述

### 2.1 MGeoSAIL 模型背景

GeoSAIL 模型是 2000 年由 Huemmrich 提出<sup>[5]</sup>,用于描述不连续冠层反射率的模型,它是几何光学模型(Jasinski, 1990)和辐射传输模型 SAIL 模型(Verhoef, 1984)的结合<sup>[6-8]</sup>。SAIL 模型计算植被冠层内的辐射传输, Jasinski 模型利用 SAIL 模型的结果生成场景反射率。

其总的场景反射率  $\rho$  用下式计算

$$\rho = C\rho_c + S\rho_b + B\rho \quad (1)$$

式中,  $\rho_c$ 、 $\rho_b$ 、 $\rho$ , 分别是冠层、阴影、背景在特定波段的反射率, 它们由 SAIL 模型得到,

$$S = 1 - C - (1 - C)^\eta \quad (2)$$

式中,  $S$  为阴影背景比例;  $C$  为冠层覆盖度;  $\eta$  为单个冠层阴影面积与冠层面积之比。

对于圆锥体

$$\eta = (\tan \beta - \beta) / \pi \quad (3)$$

$$\beta = \arccos(\tan \psi / \tan \theta) \quad (4)$$

式中,  $\psi$  为圆锥的锥顶角,  $\theta$  为太阳天顶角。

$$B = (1 - C)^\eta \quad (5)$$

式中,  $B$  为照亮背景面积比例。如果太阳天顶角大于圆锥的锥顶角, 这时在圆锥体上会出现阴影且这部分面积可以写成  $C_s = \beta / \pi$ , 其反射率  $\rho_s$  由 SAIL 模型得到。

GeoSAIL 模型只适用于垂直观测, 而且不能反映地物 3 维形态特征和结构的信息。为了揭示地物的几何形态和结构的分布与地物光谱的关系, 必须用双向反射分布函数(BRDF)来描述地物的反射分布, 所以需要适合于多角度观测的 MGeoSAIL 模型。

### 2.2 MGeoSAIL 模型中四分量计算

在几何光学模型中, 场景的双向反射率变化完全由四个分量在视场中的面积比随视角变化而

变化所致<sup>[9]</sup>, 定义  $K_g$ 、 $K_c$ 、 $K_t$  与  $K_z$

$$K_g = \frac{A_g}{A}, K_c = \frac{A_c}{A}, K_t = \frac{A_t}{A}, K_z = \frac{A_z}{A} \quad (6)$$

此处,  $A_g$ 、 $A_c$ 、 $A_t$  与  $A_z$  为“可视的”背景光照面、“可视的”树冠光照面、“可视的”树冠阴影面、“可视的”背景阴影面,  $A$  为场景总面积。故场景的总反射率  $\rho$  可用式(7)计算

$$\rho = K_g \rho_g + K_c \rho_c + K_t \rho_t + K_z \rho_z \quad (7)$$

$$K_g + K_c + K_t + K_z = 1 \quad (8)$$

根据统计几何学的 Boolean 原理, 对任意的多边形都有以下规律

$$K_g + K_z = q_v(\theta_v, \varphi_v) = e^{-\lambda_v(\theta_v, \varphi_v)} \quad (9)$$

此处  $\lambda = \frac{n}{A}$  为树冠的密度,  $n$  为场景中树的棵数,

$A_v(\theta_v, \varphi_v)$  为沿视线  $(\theta_v, \varphi_v)$  方向树冠对基准面的平均投影面积, 此处下标  $v$  和  $i$  分别代表视线方向和光线方向, 如图 1。

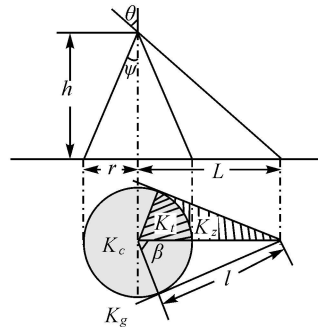


图 1 圆锥在基准面上的投影面积

Fig. 1 Project area of cone in the datum plane

$$K_c + K_t = 1 - q_v(\theta_v, \varphi_v) = 1 - e^{-\lambda_v(\theta_v, \varphi_v)} \quad (10)$$

根据  $K_g$  的定义

$$K_g = e^{-\lambda[A_v(\theta_v, \varphi_v) + A_i(\theta_i, \varphi_i) - O(\theta_v, \varphi_v, \theta_i, \varphi_i)]} \quad (11)$$

其中,  $A_i(\theta_i, \varphi_i)$  为沿太阳投射方向树冠对基准面的平均投影面积,  $O(\theta_v, \varphi_v, \theta_i, \varphi_i)$  为  $A_v$  与  $A_i$  的重叠面积。要求解  $A_v$ 、 $A_i$  与  $O(\theta_v, \varphi_v, \theta_i, \varphi_i)$  的值, 必须先确定树冠的形状、光线的来向  $(\theta, \varphi)$  与视线的方向  $(\theta_v, \varphi_v)$ 。

因为 GeoSAIL 模型是在垂直观测条件下根据几何关系计算四分量的, 这为计算锥体树冠在基准面上不同方向的投影面积提供了方法。根据垂直和斜视的几何关系, 得到 GeoSAIL 模型中的  $S$ 、 $C$ 、 $B$  参数和斜视条件下的  $K_g$ 、 $K_c$ 、 $K_t$  与  $K_z$  的关系。

$$A_v(\theta_v, \varphi_v) = \frac{(1 - B_v)A}{n}, A_i(\theta_i, \varphi_i) = \frac{(1 - B_i)A}{n} \quad (12)$$

1-  $B_v$  为圆锥沿视线方向的投影比例; 1-  $B_i$  为圆锥沿太阳光方向的投影比例;  $n$  为场景中树的棵数。通过几何关系将式(9)、式(10)改写。

$$K_g + K_z = e^{-\frac{n(1-B_v)A}{n}} = e^{-(1-B_v)} \quad (13)$$

分析得到在林分稀疏的情况下(即无阴影重叠),  $K_c$  与  $K_t$  的和应该为视线投影面积比, 所以有式(14):

$$(K_c + K_t) = 1 - B_v \quad (14)$$

又因为  $(K_c + K_t) = 1 - e^{-(1-B_v)}$ , 如果  $e^{-(1-B_v)} \approx 1 - (1 - B_v) = B_v$ , 则有  $1 - B_v \rightarrow 0$  且  $B = (1 - C)^{n-1} \rightarrow 1, C \rightarrow 0$ , 此为稀疏条件, 所以上述公式成立的条件为稀疏条件且  $\theta > \phi$ 。

其中, 式(11)中的  $O(\theta, \varphi, \theta, \varphi_i)$  可以按不同的情况根据几何关系求得, 如图 2 所示, 即可根据几何比例关系求得  $K_g, K_c, K_t$  与  $K_z$  各自的表达式。首先按视线天顶角  $\theta$  和圆锥顶角  $\phi$  关系将圆锥体的投影分为两大类情形, 其次在每种情况中再根据太阳天顶角  $\theta$  和圆锥顶角  $\phi$  关系计算四分量。

第一类情形  $\theta \leq \phi$ 。在此情形下又分为两种情况:

1. 当  $\theta \leq \phi$ , 此时无阴影分量

$$K_g = 1 - C, K_z = 0, K_c = C, K_t = 0 \quad (15)$$

2. 当  $\theta > \phi$ , 此时树冠阴影与背景阴影均可视

$$K_g = B_i, K_z = S_i, K_c = (1 - C_s)C, K_t = C_s C \quad (16)$$

第二类情形  $\theta > \phi$ 。此时又分两种情况:

1. 当  $\theta \leq \phi$ , 此时树冠对视线有阻挡

$$K_g = B_v, K_z = 0, K_c = 1 - B_v, K_t = 0 \quad (17)$$

2. 当  $\theta > \phi$  设视线与光线方位角的夹角  $\varphi = \varphi_v - \varphi_i$ , 且以正北为零方位角。此时, 又分为在主平面和不在主平面两种情况。

(1) 在主平面时:

- 1 当  $\varphi = 0^\circ$  时, 太阳与卫星在同一方向

$$i. \theta \leq \theta < 90^\circ, \text{ 根据几何关系有 } O(\theta, \varphi, \theta, \varphi_i) = A_i(\theta, \varphi_i)$$

$$K_g = B_v, K_z = 0, K_c = 1 - B_v, K_t = 0 \quad (18)$$

$$ii. \phi < \theta < \theta, \text{ 根据几何关系有 } O(\theta, \varphi, \theta, \varphi_i) = A_v(\theta, \varphi_i)$$

$$\left. \begin{aligned} K_g &= B_i \\ K_z &= B_v - B_i \\ K_c &= (1 - B_v) \frac{\pi - \beta_i + \frac{\sin \beta_i}{\cos \beta_i}}{\tan \beta_i - \beta_i + \pi} \\ K_t &= 1 - B_v - K_c \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{④ 当 } \varphi = \pi \text{ 时, 太阳与卫星在不同方向。当 } \phi < \theta \leq 90^\circ, \text{ 根据几何关系有 } O(\theta, \varphi, \theta, \varphi_i) &= C \\ K_g &= B_v + B_i + C - 1 \\ K_z &= 1 - C - B_i \\ K_c &= (1 - B_v) \frac{\pi - \beta_i - \beta_v + \tan \beta_i + \frac{\sin \beta_i}{\cos \beta_i}}{\tan \beta_i - \beta_i + \pi} \\ K_t &= 1 - B_v - K_c \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

(2) 不在主平面时, 根据圆锥在太阳与视线方向上基准面的投影所构成的多边形关系又分为以下 3 种情况:

$$\left. \begin{aligned} 1. (\beta_i + \beta_v) \leq \varphi \leq (2\pi - \beta_i - \beta_v) \text{ 时, 设 } \gamma &= \varphi - \beta_i - \beta_v, \tau = \varphi + \beta_i + \beta_v \\ K_g &= B_v + B_i + C - 1 \\ K_z &= 1 - C - B_i \\ K_c &= (1 - B_v) [2\pi - 2\beta_i - 2\beta_v - \sin \gamma + \tan \beta_i (1 - \cos \gamma) + \sin \tau + \tan \beta_i (1 - \cos \tau)] / 2(\tan \beta_i - \beta_i + \pi) \\ K_t &= 1 - B_v - K_c \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{④ } 0^\circ \leq \varphi \leq \beta_i - \beta_v \text{ 或者 } 2\pi - (\beta_i - \beta_v) \leq \varphi \leq 2\pi \text{ 时, 设 } \gamma &= \beta_i - \beta_v + \varphi, \tau = \beta_i - \beta_v - \varphi \\ K_g &= B_v + B_i + C - 1 \\ K_z &= 1 - C - B_i \\ K_c &= (1 - B_v) [2\beta_i - 2\beta_v - \sin \gamma + \tan \beta_i (1 - \cos \gamma) - \sin \tau + \tan \beta_i (1 - \cos \tau)] / 2(\tan \beta_i - \beta_i + \pi) \\ K_t &= 1 - B_v - K_c \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{④ 其余角度情况, 设 } \gamma &= \beta_i + \beta_v - \varphi, \tau = \beta_i - \beta_v + \varphi \\ K_g &= \frac{C \left[ \tan \left( \frac{1}{2} \gamma \right) - \left( \frac{1}{2} \gamma \right) + \pi \right]}{\pi} + B_v + B_i + - 1 \\ K_z &= 1 - C - B_i \\ K_c &= (1 - B_v) \{ \tau - \sin \tau + \tan \beta_i [1 - \cos \tau] / 2(\tan \beta_i - \beta_i + \pi) \} \\ K_t &= 1 - B_v - K_c \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

图 2 中虚线部分为阴影部分, 则  $E$  点与树冠在基准面上投影的圆构成多边形  $BCDEFB$  为  $O(\theta, \varphi, \theta, \varphi_i)$ , 点  $A$  与弧  $BC$  构成的部分  $ABCA$  为  $K_c$ , 点  $A$  与弧  $CD$  构成的部分  $ACDA$  为  $K_t$ , 多边形  $EDCGE$  为  $K_z$ , 其余部分为  $K_g$ 。

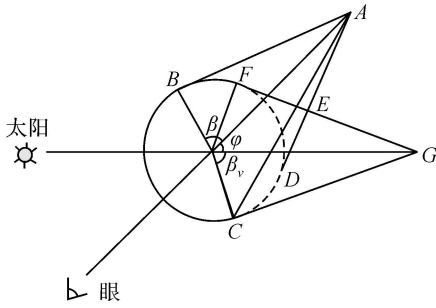


图2 MGeoSAIL 模型中的各个阴影、光照分量说明  
Fig.2 Shadowed and illuminated components of MGeoSAIL model

### 3 模型模拟与验证

#### 3.1 DART 模型

本文使用的 DART 模型是由法国的生物圈空间研究中心 (Center for the Study of the Biosphere from Space) 开发的一款模型, 该模型采用多种模拟方法, 如光线跟踪, 确切核或者离散坐标技术, 可以在可见光和近红外区域同时模拟包括自然地表在内的复杂 3 维场景。场景是由体元, 也称 3 维像素 (voxels) 构成的, 体元是一种基于立体概念的像素。通常的普通像素只需要 X、Y 轴两个坐标来定位它在空间中的方位, 而它还需要加入一个额外的 Z 轴坐标, 相当于空间中一个非常小的立方体, 包括叶、草、空气等任何场景元素都是成分为混浊介质的体元, 如图 3。这种技术应用的模拟效果很好, 但是主要问题在于它的运算量相当大。

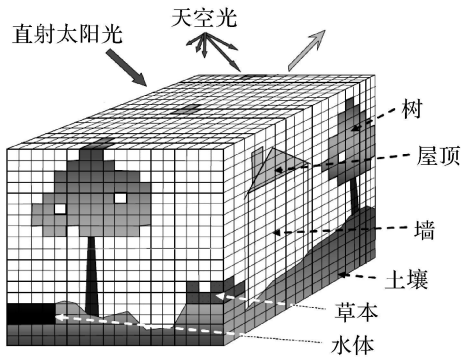


图3 DART 模型 3 维场景模拟

Fig.3 Three-dimension scene simulation of DART model

#### 3.2 模拟结果分析

DART 模型能真实的模拟森林场景, 细致地反映不同因子对地物 BRDF 曲线的影响, 在国际

RAMIS 中得到肯定, 所以本文采用 DART 模型与 MGeoSAIL 模型比较衡量。DART 模型能通过详细的参数设置来创建森林 3 维场景。本文通过参数设置使 DART 模型和 MGeoSAIL 模型描述的森林场景一致以适合两模型相互比较, 环境参数变量如表 1。

表 1 森林场景环境参数

Tab. 1 Parameters of forest scene

环境参数变量	变量值
太阳方位角	0°
太阳高度角	40°
叶片反射率 (红光/近红外)	0.08/0.468
叶片透射率 (红光/近红外)	0.03/0.386
茎干反射率 (红光/近红外)	0.14/0.24
茎干透射率 (红光/近红外)	0/0
背景发射率 (红光/近红外)	0.078/0.321
场景叶面积指数	1.0
郁闭度	0.05, 0.2
场景大小	50 m × 50 m

由图 4~ 图 6 比较可知一次散射和多次散射 BRDF 曲线基本重叠在一起, 说明在稀疏林分情况下红光波段受多次散射的影响可以忽略, 这是因为植被和土壤在红光波段的吸收作用较大而反射作用较小, 加之林分比较稀疏所以树冠内部、树冠与树冠之间、树冠与背景之间的多次散射可以忽略。由图 4 可知 MGeoSAIL 模型模拟的曲线与 DART 模型模拟的曲线形状一致, 变化趋势一致且基本相互平行, 这说明 MGeoSAIL 模型能很好地反映冠层 BRDF 的热点现象。由图 5 发现随着林分郁闭度的增加虽然曲线变化趋势一致但偏离较大, 这是由于本模型没有考虑树冠之间随郁闭度增大引起的相互遮蔽影响, 说明 MGeoSAIL 模型比较适合于稀疏林分情况, 与前文公式(14)推导相符合。图 6 可以看出, 曲线吻合的非常理想, 由此可得出 MGeoSAIL 模型更适合于低密度、大个体的稀疏群体, 这正是几何光学模型的优点。表 2 每行分别为图 4~ 图 6 中 MGeoSAIL 模型模拟 BRDF 曲线散点图上的点与 DART 模型模拟多次散射 BRDF 曲线散点图的相应的点的拟合方程与  $R^2$  值, 可以进一步证明以上结论,  $R^2$  大小表明曲线之间的相似程度大小, 拟合方程表明曲线之间的离散程度。图 4~ 图 6 的  $R^2$  值都较大, 说明 MGeoSAIL 模拟的 BRDF 曲线与 DART 模拟的 BRDF 曲线变化趋势基本一致, 拟合方程表明图 6 中曲线吻合程度最好。

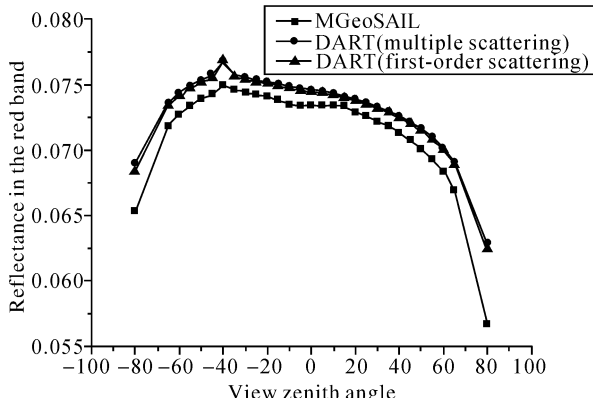


图 4 红光波段、郁闭度 0.05、太阳天顶角 40°、MGeoSAIL 与 DART 一次散射、多次散射结果比较

Fig. 4 The results of comparing MGeoSAIL with DART model in red band, crown cover 0.05, solar zenith angle 40°

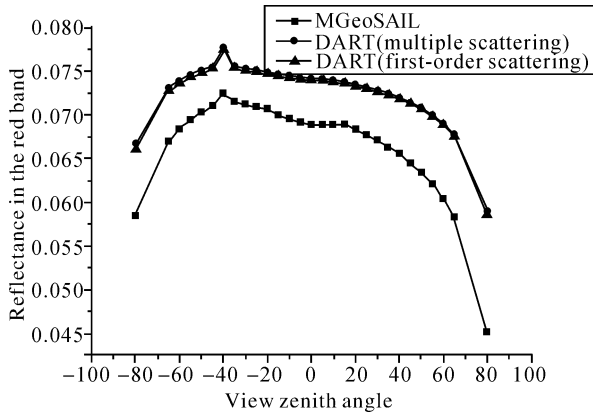


图 5 红光波段、郁闭度 0.20、太阳天顶角 40°、MGeoSAIL 与 DART 一次散射、多次散射结果比较

Fig. 5 The results of comparing MGeoSAIL with DART model in red band, crown cover 0.20, solar zenith angle 40°

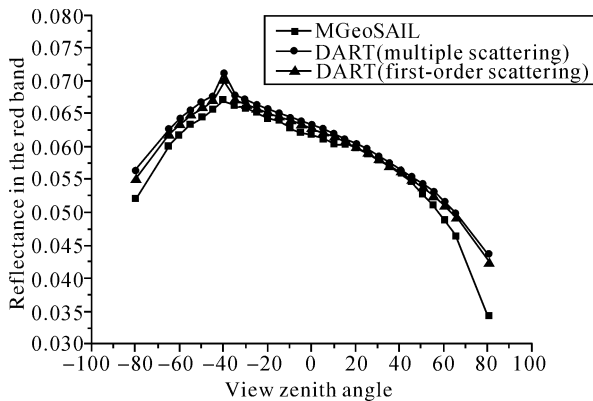


图 6 红光波段、郁闭度 0.05(树冠棵数减少、个体增大)太阳天顶角 40°、MGeoSAIL 与 DART 一次散射、多次散射结果比较

Fig. 6 The results of comparing MGeoSAIL with DART model in red band crown cover 0.05 (reduce number, increase volume), solar zenith angle 40°

表 2 参数比较

Tab. 2 The parameters comparison

拟合方程	R <sup>2</sup>
$y = 0.8982x + 0.0087$	0.9762
$y = 0.6341x + 0.0303$	0.9705
$y = 0.9319x + 0.0031$	0.9821

图 7~ 图 9 从不同郁闭度描述了近红外波段范围两模型模拟的 BRDF 曲线分布情况。可以看出一次散射和多次散射 BRDF 曲线相差较大, 这是因为在近红外波段叶片的吸收作用减小而反射作用增加, 导致树冠内部、树冠与树冠之间、树冠与背景之间的多次散射作用增加。而 MGeoSAIL 模型只考虑了树冠内部的多次散射, 所以造成在近红外波段 BRDF 曲线偏离程度大于红光波段。因为 MGeoSAIL 模型考虑树冠内部的多次散射, 所以其曲线介于 DART 一次散射、DART 多次散射曲线之间。但图 8 显示 MGeoSAIL 模型随郁闭度增加在前向 BRDF 值小于 DART 模拟的值, 这是由于郁闭度的增加导致树冠之间相互重叠面积增加引起的, MGeoSAIL 模型尚未考虑重叠影响, 这导致在前向方向阴影树冠面积增加 BRDF 值降低, 说明冠层内部的多次散射对阴影树冠的反射率贡献可以忽略<sup>[10]</sup>, 而在背向方向考虑冠层内部多次散射故出现“碗边”效应, 说明多次散射主要来自于光照树冠表面<sup>[11]</sup>。

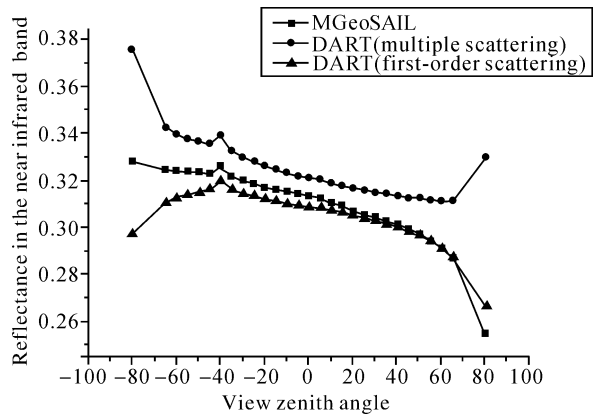


图 7 近红外波段、郁闭度 0.05、太阳天顶角 40°、MGeoSAIL 与 DART 一次散射、多次散射结果比较

Fig. 7 The results of comparing MGeoSAIL with DART model in near infrared band, crown cover 0.05, solar zenith angle 40°

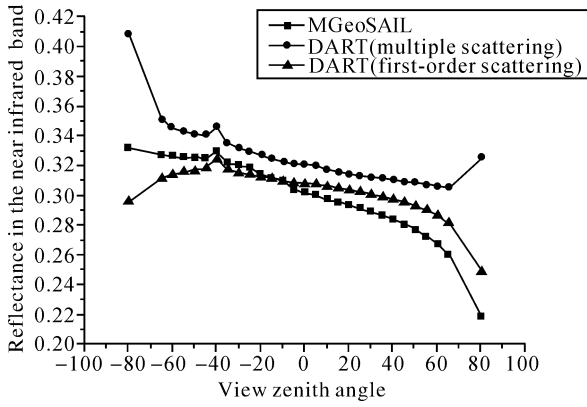


图 8 近红外波段、郁闭度 0.20、太阳天顶角 40°、MGeoSAIL 与 DART 一次散射、多次散射结果比较

Fig. 8 The results of comparing MGeoSAIL with DART model in near infrared band, crown cover 0.20, solar zenith angle 40°

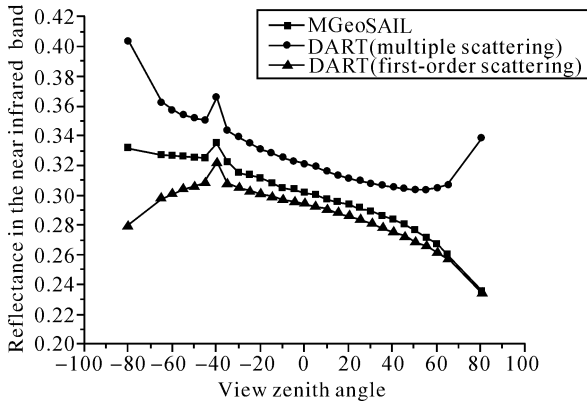


图 9 近红外波段、郁闭度 0.05(树冠棵数减少、个体增大) 太阳天顶角 40°、MGeoSAIL 与 DART 一次散射、多次散射结果比较

Fig. 9 The results of comparing MGeoSAIL with DART model in near infrared band, crown cover 0.05 (reduce number, increase volume), solar zenith angle 40°

表 3 参数比较

Tab.3 The parameters comparison

拟合方程	R <sup>2</sup>
$y = 0.8306x + 0.065$	0.9011
$y = 0.6425x + 0.1292$	0.8745
$y = 0.8294x + 0.0554$	0.9013

## 4 结论与讨论

本文描述一种集几何光学模型和辐射传输模型优点于一体的混合模型,模拟冠层结构对双向反射分布函数的影响,利用复杂的空间几何关系

得到适合于各种角度观测的锥体树冠四分量比例。公式推导完全由几何比例关系出发,所以 MGeoSAIL 模型得到的四分量比值均为解析值,而其他几何光学模型在非主平面时为近似值,这是该模型的优点之一。针对几何光学模型对辐射在植被冠层内衰减处理过于简单的问题, MGeoSAIL 考虑了辐射在植被冠层内的衰减与多次散射作用,使得模型的精度有一定的提高,这是该模型的优点之二。

与 DART 模型模拟比较,结果表明该模型简单实用,尤其在红光波段曲线模拟非常理想。在红光与近红外波段均能反映出“热点”效应,在近红外波段能描述出“碗边”效应。该模型是描述不连续冠层反射率的模型,是几何光学模型和辐射传输模型良好的结合,体现了两种模型各自的优点。

但由于该模型是在 GeoSAIL 模型基础上演变而来,加之 GeoSAIL 模型的假设条件,现在 MGeoSAIL 模型仅适用于不连续、稀疏林分冠层的 BRDF 模拟。后期需要改进的工作是利用方向遮蔽度指数来推导适合于浓密林分条件下的 MGeoSAIL 模型,而且由于树木的空间分布对四分量的影响非常显著<sup>[12-14]</sup>,所以在后期模型建立中要考虑林分空间分布格局(均匀格局、随机格局、集聚格局)对森林冠层 BRDF 曲线的影响。

## 参考文献:

- [1] LI Xiaowen, STRAHLER A H. Geometric Optical Modeling of Conifer Forest Canopy [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1985, 22(5): 705-721.
- [2] LI Xiaowen, STRAHLER A H, FRIEDL M A. A Conceptual Model for Effective Directional Emissivity from Nonisothermal Surfaces [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1999, 37(5): 2508-2517.
- [3] LIU Qiang, CHEN Liangfu, LIU Qinghuo, et al. A Radiation Transfer Model to Predict Canopy Radiation in Thermal Infrared Band [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(3): 161-167. (刘强,陈良富,刘钦火,等.作物光冠层的热红外辐射传输模型 [J]. 遥感学报, 2003, 7(3): 161-167.)
- [4] VERHOEF W. Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: The SAIL Model [J]. Remote Sensing of Environment, 1984, 16(2): 125-141.
- [5] HUENNRICH K F. The GeoSAIL Model: A Simple Addition to the SAIL Model to Describe Discontinuous Canopy Reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2001,

- 75: 423-431.
- [6] JACQUEMOUD S, USTIN S L, VERDEBOUT J, et al. Estimating Leaf Biochemistry Using the Prospect Leaf Optical Properties Model[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 56(3): 194-202.
- [7] JASINSKI M F, EAGLESON P S. Estimation of Subpixel Vegetation Cover Using Red-infrared Scattergrams [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(2), 253-267.
- [8] NILSON T, KUUSK A. A Reflectance Model for the Homogeneous Plant Canopy and its Inversion[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 27: 157-167.
- [9] XU Xiru. Remote Sensing Physics[M]. Beijing: Peking University Press. (徐希孺. 遥感物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 103.)
- [10] JING M C, SYLVAIN G. Leblanc Multiple-Scattering Scheme Useful for Geometric Optical Modeling[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2001, 39(5): 1061-1071.
- [11] NI Wenge, LI Xiaowen, WOODCOCK C E. An Analytical Hybrid GORT Model for Bidirectional Reflectance over Discontinuous Plant Canopies [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1999, 37(2): 987-998.
- [12] LI Xiaowen, STRAHLER A H. Geometric-Optical Bidirectional Reflectance Modeling of a Conifer Forest Canopy [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1986, 24(6): 906-919.
- [13] GERARD F F, NORTH P R J. Analyzing the Effect of Structural Variability and Canopy Gaps on Forest BRDF Using a Geometric-optical Model[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62: 46-62.
- [14] SUN G, RANSON K J. Radar Modeling of Forest Spatial Patterns[J]. Int J Remote Sens. 1998, 19(9): 1769-1791.

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2009-02-09

修回日期: 2009-08-06

第一作者简介: 王强(1980—), 男, 博士, 讲师, 主要从事遥感数据信息提取等方面的研究。

First author: WANG Qiang(1980—), male, PhD, Lecturer, majors in information extraction from remote sensing data.

E-mail: hahaxiaoye@yahoo.com.cn

## 《中国性别平等与妇女发展地图集》出版

中国第| 本以性别为主题的地图集——《中国性别平等与妇女发展地图集》日前由中国地图出版社出版发行。

《中国性别平等与发展地图集》是继英国出版的《世界妇女地图集》、美国出版的《美国妇女地图集》、印度出版的《印度女人和男人地图集》之后的又| 以性别为主题的地图集。该图集全面系统地反映了中国性别平等与妇女在参政、就业、教育、婚姻家庭、生育健康、法律等方面的状况。作为| 部多学科相结合的专题地图集, 其以地图形式全面反映了中国性别平等与妇女发展的基本特征、空间结构以及发展变化。它既是性别平等与妇女发展研究成果的直观表现形式, 也是性别与妇女研究的重要手段, 它将为各级领导与有关部门了解性别和妇女发展状况, 制定有关具体政策和措施提供科学依据, 也将激发妇女参加各项经济建设与社会发展的热情, 促进中国社会实现经济、政治、文化、社会等各个领域的性别平等。《中国性别平等与发展地图集》不仅为性别平等与妇女发展及人口地理学的深入研究提供了重要参考, 在地图出版领域, 图集也还将促进性别专题地图研究, 提高中国性别专题制图的水平和中国在国际性别专题地图研究中的地位。

《中国性别平等与妇女发展地图集》为 16 开本, 有各类地图 70 余幅, 文字说明约 6 万字, 统计图表 100 余个, 共计 13 个张。该图集由福特基金会资助, 武汉大学与青岛大学共同组织编制, 主编于冬梅, 黄仁涛。