

文章编号: 1007 4619(2006)05 0670 06

## 基于 3D 真实植被场景的全波段辐射传输模型研究

赵 峰<sup>1,2,3</sup>, 顾行发<sup>1,2,4</sup>, 刘 强<sup>1</sup>, 余 涛<sup>1,2</sup>, 陈良富<sup>1,2,5</sup>, 高海亮<sup>1,2,3</sup>

(1 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2 国家航天局 航天遥感论证中心, 北京 100101;  
3 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 4 电子科技大学 自动化工程学院, 四川 成都 610054  
5. 江西师范大学地理学院, 江西 南昌 330027)

**摘 要:** 本文基于 3D 真实场景 CLAMP 模型模拟的植被冠层, 对冠层在可见-近红外波段和热红外波段的辐射传输进行了综合建模。针对 CLAMP 模型生成场景的通用和近似特征, 在可见-近红外波段, 对植被和土壤的单次散射贡献利用光子逆向追踪算法进行了精确计算, 多次散射的贡献则采用四流近似理论来计算, 以提高运算效率。模型结果与 SAILH 模型结果进行了比较, 具有较好的一致性, 并且体现出了优于一维辐射传输模型的模拟结果。在热红外波段, 采用几何光学原理, 冠层方向亮度温度由可视光照叶片、遮荫叶片、光照土壤和遮荫土壤的比例与对应组分亮温乘积之和得到, 模拟结果体现了合理的变化趋势。对冠层主要结构参数 LAI 和 ALA 的敏感性进行了比较分析, 不同波段模型模拟的方向性辐射结果, 很好地反映了结构参数对冠层辐射特性的影响。

**关键词:** 植被 3D 场景模拟; CLAMP 模型; 二向性反射分布因子 (BRF); 方向亮度温度 (DBT)

中图分类号: TP702 文献标识码: A

## Modeling of 3D Canopy's Radiation Transfer in the VNIR and TIR Domains

ZHAO Feng<sup>1,2,3</sup>, GU Xing-fa<sup>1,2,4</sup>, LIU Qiang<sup>1</sup>, YU Tao<sup>1,2</sup>, CHEN Liang-fu<sup>1,2,5</sup>, GAO Hai-liang<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China  
2. The Center for National Spaceborne Demonstration, Beijing 100101, China  
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
4. School of Automation Engineering, the University of Electronic Science and Technology of China, Sichuan Chengdu 610054, China  
5. Geography and Environment College, Jiangxi Normal University, Jiangxi Nanchang 330027, China)

**Abstract** In this paper a synthetic strategy has been employed to model 3D canopy's radiation transfer in the whole optical spectral domains. 3D plant architecture model (the Clumped Architecture Model of Plants, CLAMP) is used to generate the realistic vegetation scene. In the visible and NIR region, the canopy BRDF was decomposed into three parts: single scattering contribution from leaves, single scattering contribution from the soil, and multiple scattering part of the canopy. The single scattering contributions come from illuminated leaves and soil components which are computed by the reverse ray-tracing procedure with their corresponding reflectance. The multiple scattering contribution is approximated by the four stream theory. As a result, the modeling of VNIR region is more efficient and fairly accurately describes the anisotropically scattering features of vegetation. Simulation results show good consistency with SAILH's, and more details can be simulated than the

收稿日期: 2006-04-10 修订日期: 2006-05-26

基金项目: 中国科学院百人计划项目 (编号: KZCX0415), 国家教育部留学回国人员科研启动基金重点项目 (编号: HX040013), 国防科学技术工业委员会项目 (编号: KJSX0401)。

作者简介: 赵 峰 (1978—), 男, 中国科学院遥感应用研究所在读博士生, 研究方向为植被定量遥感。

one dimensional radiative transfer models. In the TIR region, the directional brightness temperature of canopy is calculated as the linear combination of four components (illuminated leaves, illuminated ground, shadowed leaves, and shadowed ground) brightness temperature multiplied by its fractional cover computed by the reverse ray tracing procedure. Initial modeling results show typical features of vegetation's anisotropic scattering and directional temperature distributions, for example, hot spot, bowl shape, and reach a good agreement with theoretical results in those three domains. This strategy shows potential of exploring the impact of canopy structure on the radiometric response measured by remote sensors.

**Key word:** 3D canopy scenery; CLAMP; bidirectional reflectance factor (BRF); directional brightness temperature (DBT); reverse ray-tracing

## 1 引言

植被是地表最重要的覆盖类型之一,其与太阳入射光源的辐射传输相互作用,影响地气系统的水、气、碳等多种物质的循环,是全球变化的重要环节。而且相对于地表其他地物来说,植被的二向性辐射特征更为复杂。因此从植被定量遥感的机理出发,研究其反射(主要指可见、近红外波段)和发射(热红外波段)特征具有迫切和现实的意义。

近20—30年来,各国科学家对冠层反射、热辐射模型进行了大量的研究,提出和发展了不同复杂程度的模型。根据模型所用的理论和假设,冠层反射模型可以分为4种不同的学派:混浊介质模型,几何光学模型,混合模型和计算机模拟模型,详细内容可参考文献[1—4]。但很少有研究者将可见、近红外与热红外波段的辐射特性进行综合研究。这一方面是由于植被在不同波谱区域的辐射特性不同,可见和近红外波段以植被对光辐射的吸收、反射和透射作用为主,而在热红外波段则以冠层组分的自身发射特性为主;另一方面,受限于将不同波谱区域辐射特性有机联系起来的纽带。

研究表明,植被冠层在可见光和近红外波段的二向性反射主要由植被的三个特征所决定<sup>[1]</sup>,即(1)植被元素(叶、茎等)的光学及散射特征;(2)植被元素冠层的生理状况(水状况、色素含量);(3)单个植物及整个冠层的结构特征(叶角度和叶分布)。同样的,植被在热红外波段的方向热辐射特性也是由植被组分的波谱辐射特性和植被空间结构的构成共同决定的<sup>[5]</sup>。可见,植被组分和冠层结构是决定冠层辐射各向异性特征的基础,如何将冠层结构进行模型参数化,满足不同波谱区域建模的需要,是协同全波段辐射传输模型的关键。

本文基于通用、真实的植被3D结构模拟CLAMP<sup>[6]</sup>(the Clumped Architecture Model of Plants)

模型,针对植被在不同波段的辐射特性,运用光子逆向追踪算法,结合成熟的辐射传输模型和几何光学模型原理,模拟了植被冠层在可见近红外波段的二向性反射分布因子(BRF),及热红外波段的方向亮度温度分布(DBT),并对主要结构参数的敏感性进行了分析。

## 2 模型算法原理

### 2.1 植被真实结构场景的生成

植被的3D场景是通过CLAMP模型生成的,该模型的特点是输入参数少,且都是和农学及遥感应应用直接相关的一些参数,这些参数为:种植模式 $R$ ( $=1$ 表行播作物, $=0$ 表植株随机分布),植株相对密度( $d^*$ ),叶面积指数(LAI),平均叶倾角(ALA,用单参数的椭圆分布函数描述<sup>[7]</sup>),叶片相对大小( $S^*$ ),叶片形状参数 $B$ ( $b/h$ ,叶片为等腰三角形, $b$ 为三角形底边, $h$ 为三角形底边对应的高)和叶茎距离( $\chi$ 用以调整叶片的集聚程度, $\chi=1$ 时叶片在冠层内随机分布, $\chi=0$ 时叶片紧贴虚拟的茎生长)。CLAMP模型建立的初衷是能普适、通用地描述各种植被冠层,因此只选择了几个关键的农学结构参数,根据具体的植被类型可调整参数,具有较大的灵活性。

### 2.2 全波段辐射特性模拟

植被3D场景生成后,成熟的光子正向追踪算法可用来计算植被与电磁波的辐射作用<sup>[8]</sup>,但此方法运算量巨大,很耗费机时。在该研究中,针对CLAMP模型生成的植被场景通用、近似的特点,以及不同波谱区域植被辐射特性的差异,采取了合理的近似运算,来达到运算效率与模拟精度之间的折衷,这表现在以下方面:

在可见近红外波段,借鉴针对植被辐射传输方程的经典解法<sup>[9]</sup>,将冠层BRF分解为植被的单次散

射贡献,土壤的单次散射贡献及冠层的多次散射贡献三个部分,表示为:

$$R = R_c^1 + R_s^1 + R^M \quad (1)$$

式中,  $R_c^1$  与  $R_s^1$  分别表示植被和土壤对冠层 BRF 的一次散射贡献,即冠层内可视光照叶片和可视光照土壤的贡献,可通过光子逆向追踪算法实现,其核心是先将三角形叶片投影到与观测方向垂直的平面(称之为观测平面),得到能被直接观测到的三角形叶片的部分,再将这些可视的三角形叶片部分投影到与光线入射方向垂直的平面,若目标叶片和光线入射源之间无叶片阻挡,则该叶片部分为光照叶片,否则为阴影叶片,同理可确定光照土壤与阴影土壤。程序计算中场景都被离散化为足够小的网格,叶片假设为双朗伯体<sup>[8]</sup>,算法细节请参考文献[10]。确定了可视光照叶片和可视光照土壤的比例,就可按下式计算  $R_c^1$  与  $R_s^1$ :

$$R_c^1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n S_{Li} \cdot f_i(\Omega_L; \Omega' \rightarrow \Omega) \quad (2)$$

式中,  $N$  为观测平面离散化网格数目,  $n$  为可视光照叶片数目,  $S_{Li}$  为第  $i$  个可视光照叶片像素,  $f_i(\Omega_L; \Omega' \rightarrow \Omega)$  为对应的叶片的半球反射率或透过率纠正因子<sup>[11]</sup>, 计算式如下:

$$f(\Omega_L; \Omega' \rightarrow \Omega) = \begin{cases} r_L |(\Omega' \cdot \Omega_L)|, & (\Omega \cdot \Omega_L)(\Omega' \cdot \Omega_L) < 0 \\ t_L |(\Omega' \cdot \Omega_L)|, & (\Omega \cdot \Omega_L)(\Omega' \cdot \Omega_L) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\Omega$  为光线入射方向矢量;  $\Omega_L$  为叶片法线方向矢量;  $\Omega'$  为观测方向矢量; 判断条件  $(\Omega \cdot \Omega_L)(\Omega' \cdot \Omega_L)$  用于区分叶片的反射或透射作用;  $r_L$  和  $t_L$  分别为叶片的半球反射率和透过率,可由实测数据设定或通过 PROSPECT 模型模拟。同样的方法可计算土壤的单次散射贡献:

$$\rho_s^1 = \frac{1}{N} \sum (f_{si} \cdot r_s \cdot |\cos\theta_s|) \quad (4)$$

式中,  $N$  为观测平面离散化网格数目,  $f_{si}$  为第  $i$  个可视光照土壤像素,  $r_s$  为土壤半球反射率,  $\theta_s$  为太阳天顶角。

$R^M$  是冠层的多次散射贡献,若继续用光子追踪的方式来求解,将极大地耗费机时,降低运算效率,针对 CLAMP 模型生成场景的通用、近似的特点,本文采用成熟的植被辐射传输模型计算多次散射的算法来求解,使用的模型是基于四流近似理论的 SA IL 模型<sup>[12]</sup>。通过设置合适的边界条件和散射系数,可以求得冠层的多次散射贡献,算法细节见文献[13],此处不再赘述。

在热红外波段, DBT 由冠层体现的组分(植被或土壤)热辐射特性和光照条件决定(光照或遮荫),多次散射对体系的辐射分布影响较弱。因此本文借鉴几何光学原理进行模拟,即冠层的方向亮温由 4 分量(可视光照叶片、遮荫叶片、光照土壤和遮荫土壤)亮温和其组分比例决定<sup>[14]</sup>, 计算公式如下:

$$DBT = f_{ill} \cdot T_{ill} + f_{shl} \cdot T_{shl} + f_{ilg} \cdot T_{ilg} + f_{shg} \cdot T_{shg} \quad (5)$$

式中,  $f$  表示相应组分比例,  $T$  表示组分亮温, 下标  $ill$   $shl$   $ilg$  和  $shg$  分别表示可视光照叶片、遮荫叶片、光照土壤和遮荫土壤。

在对植被 3D 场景全波段辐射传输建模的过程中,利用光子逆向追踪计算 4 个分量是第一步,也是耗时最多的模块,而冠层的可视光照、遮荫状况是独立于组分波谱辐射特性的因子,因此一旦确定了场景的四分量比例,就可根据研究的需要选择对应的波谱反射率、透射率或组分亮温,很方便地来模拟高光谱、多角度辐射分布。

### 3 模拟结果及分析

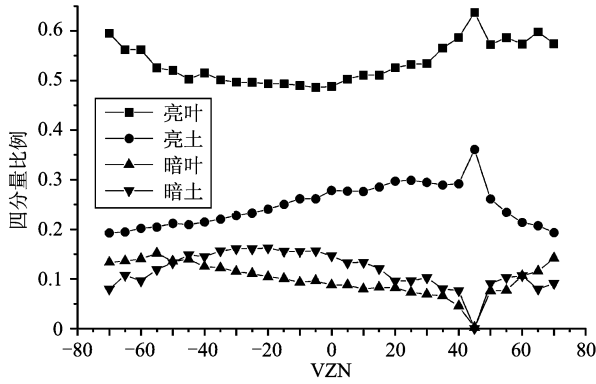
对模型的验证是重要的但也是较为困难的一件事,地面实验数据受制于空间采样的代表性,视场角效应和实验误差等因素的影响<sup>[15]</sup>,因此 RAM I 目前已进行的第一和第二阶段模型比较工作都是基于计算机模拟模型来开展的<sup>[2,3]</sup>。在本文中由于缺乏合适的计算机模拟模型和地面实测数据,故选择应用广泛的经过热点纠正的 SA IL 模型<sup>[12]</sup>(即 SA ILH<sup>[16]</sup>)来与本文针对连续植被的冠层方向性反射模型进行比较。

SA ILH 模型实质上是一维辐射传输模型,对植被冠层结构进行了大量简化和近似,严格地讲只适合应用于均匀连续、在水平方向无限扩展的植被冠层。其结构参数(LAI, AIA 和热点因子参数)少于本文基于三维场景模型的结构参数数目(7个,见 2.1 节),参数间难以完全匹配。为减少由于场景描述的不同而带来的模型结果的差异,本文选择偏向于水平型叶倾角分布(AIA = 15°),较大叶片尺寸( $S^* = 0.1$ ),中等密度的冠层(LAI = 3)来进行比较,另外在使用 CLAMP 模型生成场景时,也尽量设置均匀连续性冠层参数:  $R = 0$ (植株随机分布),  $\chi = 1$ (叶片在冠层内随机分布),  $d^* = 10$   $B = 0.25$ 。本文选择了植被的特征光谱波段红光(680nm)和近红外波段(860nm)的组分光谱参数来进行可见光波段 BRF 的模拟和比较(表 1)。模拟结果如图 1 所示。

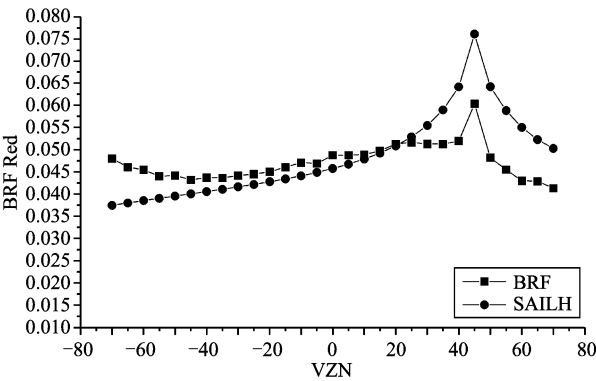
表 1 冠层组分光学特性

Table 1 Spectral characteristics of leaf and soil used in the model

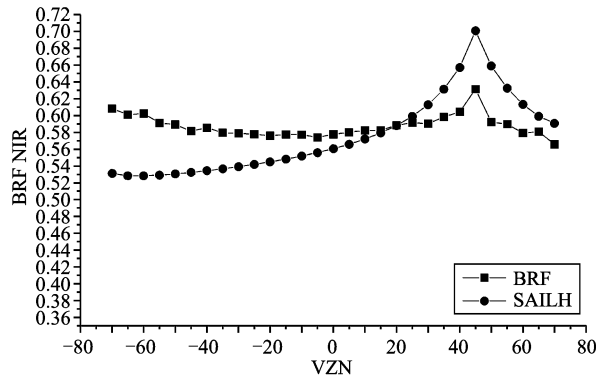
		红光 (680nm)	近红外 (860nm)
叶片	反射率	0.07806	0.40069
	透射率	0.03494	0.56407
土壤	反射率	0.15	0.20



(a)



(b)



(c)

图 1 主平面内四分量模拟结果分布图

(a)和本文模型模拟的 BRF 与 SAILH 模型结果比较 (b), (c)

Fig 1 The area fraction of the modeled shadowing components in the principal plane with a solar zenith angle of 45°

(a) The comparisons of our model's BRFs with the SAILH's in the red (b) and NIR (c) bands

首先模拟了太阳天顶角 (SZN) 为 45°, 太阳主平面内的四分量比例随观测天顶角 (VZN) 从 -70° (负号表前向) 到 70° (正号表后向) 变化的分布图, 如图 1 (a) 所示。由于冠层叶片以水平型分布为主, 且 LAI 较大, 导致四分量中亮叶的比例远大于其他分量。在热点方向, 亮叶和亮土比例各自达到最大值, 暗叶和暗土的比例为 0 与理论值吻合。

SAI LH 模型和本文基于 3D 场景的方向性反射模型的结果绘于图 1 (b) 和图 1 (c) 中, 在红光波段, 除了前向较大观测角度和热点方向附近外, 这两个模型结果较为一致。热点附近 SAILH 模型值偏高, 这是由于采用了指数热点纠正函数的缘故<sup>[17]</sup>, 同样在近红外波段也出现这种情况, 说明本文中的模型更好地模拟了热点附近的冠层反射状况。在近红外波段, 两个模型模拟值差异相对较大, 这与 SAILH 模型本身对冠层的理想结构描述有关, Goel 和 Kuusk<sup>[18]</sup> 通过与计算机模拟模型比较发现, 一维解析模型由于对冠层结构的简化, 较难真实地模拟出近红外波段的方向性反射分布。可见, 本文中的方向性反射模型较好地模拟了冠层的方向性反射。

下面考察太阳天顶角为 45° 时, 主平面内的 BRF 和 DBT 随参数取值不同的变化状况。使参数 LAI 和 ALA 分别在一定的范围内变化 (见表 2), 固定其他参数的值,  $d^* = 10$ ,  $S^* = 0.1$ ;  $b/h = 0.25$ ,  $Rang = 0$  (植株随机分布模式);  $\chi = 1$  (叶片随机分布), 来研究这两个主要结构参数对方向辐射分布的影响。在考察这两个参数中的某一个参数时, 另一个参数也取缺省值: LAI = 3, ALA = 58°。冠层组分光谱参数同表 1 中的设置, 组分亮温以常规午时大田热像仪测量经验值来设置, 亮叶: 25°, 暗叶: 20°, 亮土: 45°, 暗土: 30°。

表 2 LAI 和 ALA 的变化范围

Table 2 Range of variations of three parameters in CLAMP to generate the canopy scene

参数	取值		
LAI	1	3	5
ALA (°)	15	58	70

图 2 给出了 LAI 取不同的值时, 红光和近红外波段 BRF 和 DBT 在太阳主平面的分布曲线。在红光波段, 由于土壤反射率大于叶片反射率, 因此在相同观测天顶角 (VZN) 时, LAI 最小对应 BRF 最大, LAI 最大则 BRF 最小。在近红外波段, 土壤反

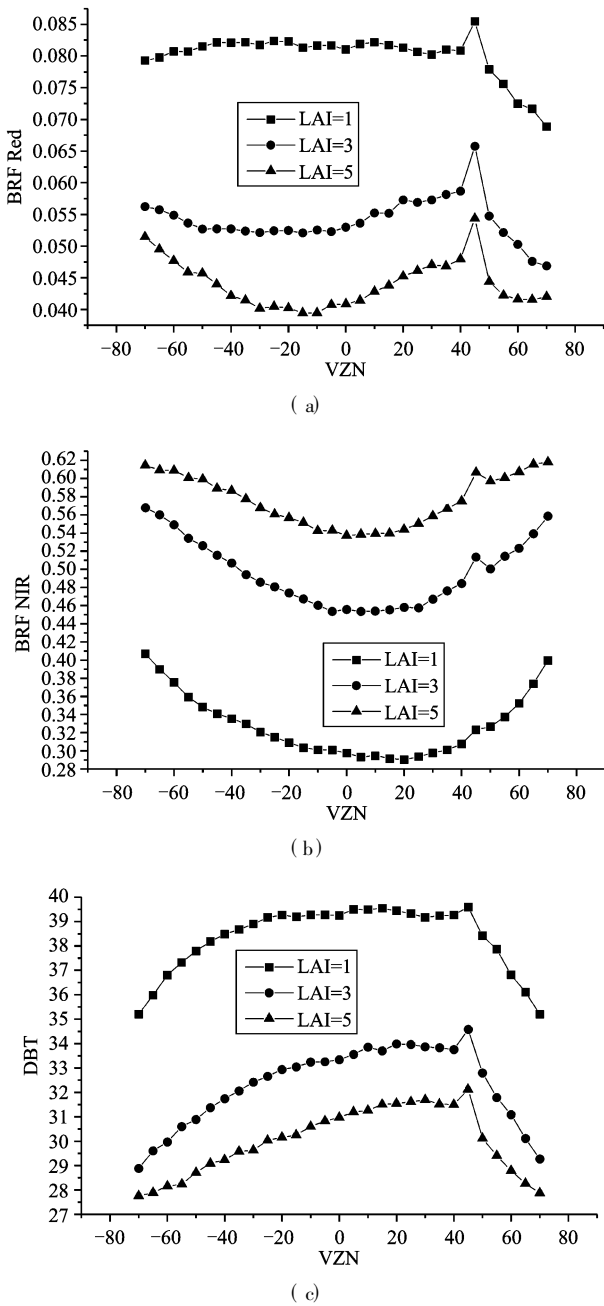


图 2 LAI取不同值时模型模拟的 BRF( a b)和 DBT( c)在主平面内分布图

Fig 2 Directional reflectance and brightness distributions with different LAI in the principal plane with a solar zenith angle of 45 degree (a) BRF in red band (b) BRF in NIR band (c) DBT in TIR band

射率小于叶片反射率, 导致出现相反分布趋势。无论是红光还是近红外波段, 相同 LAI 时 BRF 的分布趋势和文献实测数据趋势一致<sup>[19]</sup>。DBT 的变化情况和红光类似, 由于土壤的温度高于植被, 则 LAI 越小, 冠层 DBT 越大, LAI 越大, 冠层 DBT 越小。相同 LAI 时, VZN 越大, 植被覆盖率越大, 造成 DBT 呈

明显的“丘”状分布, 与实测数据相符<sup>[14]</sup>。

叶倾角分布是另一个决定冠层辐射传输状况的关键参数, 图 3 显示了 ALA 取不同的值时, BRF 和 DBT 分布的异同。在红光波段, 叶片越平展 (ALA 越小), 则土壤贡献越小, BRF 也就越小。在近红外波段, 这种差异表现得更为明显, 并且从变化幅度上

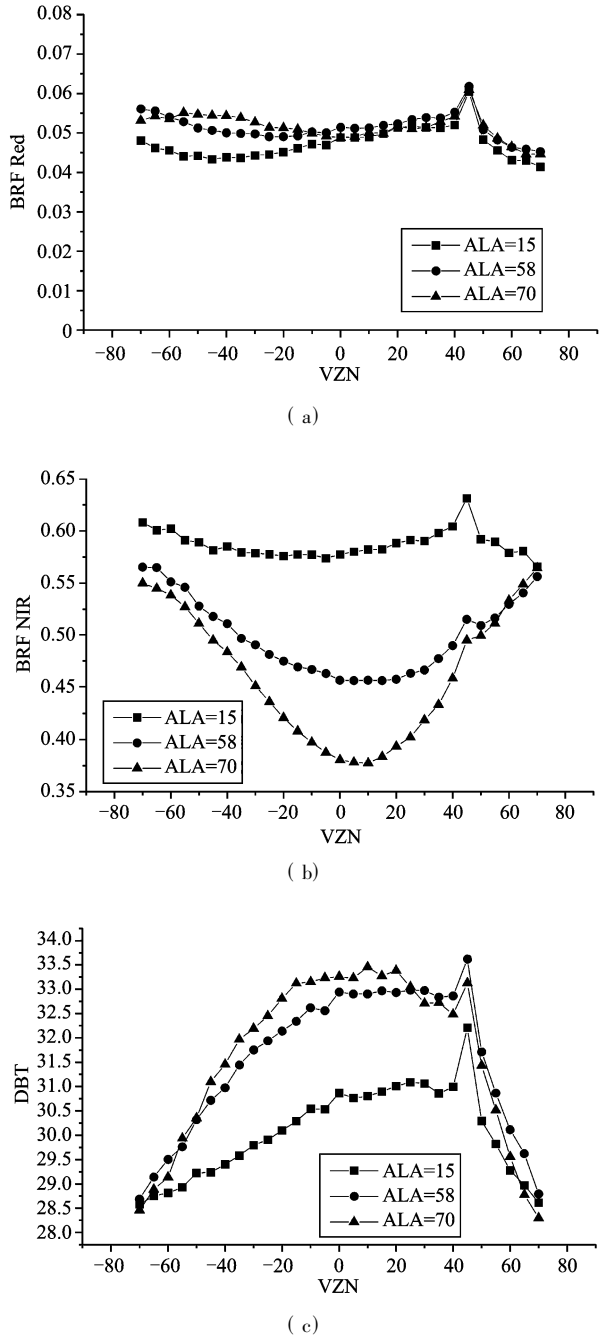


图 3 ALA 取不同值时模型模拟的 BRF( a), (b)和 DBT( c)在主平面内分布图

Fig 3 Directional reflectance and brightness distributions with different ALA in the principal plane with a solar zenith angle of 45 degree (a) BRF in red band (b) BRF in NIR band (c) DBT in TIR band

讲, 叶片越倾向于直立分布, BRDF分布变化越大, 各向异性特征表现得越为明显。DBT的分布也体现了类似的特征。

## 4 结 论

本文基于3D真实场景CIAMP模型模拟的植被冠层, 采用光子逆向追踪算法, 辐射传输和几何光学模型的基本原理, 根据植被组分(文中为叶片)的光学特性, 对植被在可见-近红外和热红外波段的辐射传输进行了综合建模。根据场景的通用、近似特征, 建模过程中采用了合理的近似, 以达到运算效率和模拟精度间的折衷。可见-近红外波段模拟的结果和一维辐射传输SAIH模型结果较为一致, 并且体现出了优于一维模型的模拟结果, 热红外波段的模拟结果也体现了合理的变化趋势, 说明了该模型算法的有效性。模型主要结构参数LAI和ALA的敏感性分析很好地反映了结构参数对冠层辐射特性的影响。

模型还有需要改进的地方, 比如多次散射近似采用的是基于均匀连续植被RT模型的结果, 因此当应用于异质性较为明显的冠层时, 模型仍需要改进。此外, 进一步与实测数据或正向光子追踪算法模拟结果的比较验证是下一步工作的重点。

## 参 考 文 献 (References)

[ 1 ] Myneni R B, Ross J K, Asrar G. A Review on the Theory of Photon Transport in Leaf Canopies[ J ]. *Agricultural and Forestry Meteorology*, 1990 **45**: 1—153.

[ 2 ] Pinty B, Gobron N, Wilow ski J L, et al. The Radiation Transfer Model Intercomparison (RAMI) Exercise[ J ]. *Journal of Geophysical Research* [ Atmospheres ], 2001 **106** ( 11 ): 11937—11956

[ 3 ] Pinty B, Wilow ski J L, Taberner M, et al. Radiation Transfer Model Intercomparison (RAMI) Exercise Results from the Second Phase[ J ]. *Journal of Geophysical Research*, 2004 **109** (D6): D06210. DOI: 10.1029/2003JD004252. 25 March 2004.

[ 4 ] Dash R, Gottsche F M, Olesen F S, et al. Land Surface Temperature and Emissivity Estimation from Passive Sensor Data: Theory and Practice Current Trends[ J ]. *Int. J. Remote Sens.*, 2002 **23**(13): 2563—2594

[ 5 ] Otterman J, Brakke T W, Fuchs M, et al. Longwave Emission from a Plant/soil Surface as a Function of the View Direction: Dependence on the Canopy Architecture[ J ]. *Int. J. Remote*

*Sensing*, 1999 **20**(11): 2195—2201.

[ 6 ] Rochdi N, Baret F, Combard B, et al. CLAMP: A Model of Leaf Clumping in Canopies[ A ]. Sobrino J A. *Recent Advances in Quantitative Remote Sensing: 1st International Symposium*[ C ]. Torremontana (Valencia) Spain: Publications de la Universitat de Valencia, 2002.

[ 7 ] Campbell G S. Derivation of an Angle Density Function for Canopies with Ellipsoidal Leaf Angle Distributions[ J ]. *Agric. for Meteorol.*, 1990 **49**: 173—176

[ 8 ] Govaerts Yves M, Verstraete Michel M. Ray tracing Monte Carlo Ray Tracing Model to Compute Light Scattering in Three dimensional Heterogeneous Media[ J ]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1998 **36**(2): 493—505

[ 9 ] Pinty B, Verstraete M M. Modeling the Scattering of Light by Vegetation in Optical Remote Sensing[ J ]. *J. Atmos. Sci.*, 1997 **55**: 137—150.

[ 10 ] Gu X F, Zhao F, Gao H L, et al. Modeling 3D Canopy's Four Components and Gap Fraction at the Sub Leaf Level Using Ray Tracing Method[ A ]. ISPRS S05[ C ], Beijing, China, 2005: 655—658

[ 11 ] Antyufeev V S, Moshak A L. Monte Carlo Method and Transport Equation in Plant Canopies[ J ]. *Remote Sensing of Environment*, 1990 **31**: 183—191

[ 12 ] Verhoef W. Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling—the SAHLMODEL[ J ]. *Remote Sens. of Environ.*, 1984 **16**: 125—141.

[ 13 ] Kuusk A. A Two layer Canopy Reflectance Model[ J ]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2001 **71**: 1—9

[ 14 ] Yu T, Gu X F, Tian G L, et al. Modeling Directional Brightness Temperature over a Maize Canopy in Row Canopy[ J ]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004 **42**(10): 2290—2304

[ 15 ] Yu T, Gu X F, Tian G L, et al. Analyzing the Errors Caused by FOV Effect on the Ground Observations of Directional Brightness Temperature over a Row Structured Canopy[ J ]. *Journal of Remote Sensing*, 2004 **8**(5): 443—450. [余涛, 顾行发, 田国良等. 垄行作物玉米方向亮温野外测量中视场角影响的简单分析[ J ]. *遥感学报*, 2004 **8**(5): 443—450]

[ 16 ] Kuusk A. The Hot Spot Effect of a Uniform Vegetative Cover[ J ]. *Sov. J. Remote Sens.*, 1985 **3**(4): 645—658

[ 17 ] Qin W H, Goel N S. An Evaluation of Hotspot Models for Vegetation Canopies[ J ]. *Remote Sensing Reviews*, 1995 **13**: 121—159

[ 18 ] Goel N S, Kuusk A. Evaluation of One Dimensional Analytical Models for Vegetation Canopies[ A ]. *IGARSS*[ C ]. 1992

[ 19 ] Sandmeier St Müller, St Hosgood B, Andreoli G. Physical Mechanisms in Hyperspectral BRDF Data of Grass and Watercress[ J ]. *Remote Sens. Environ.*, 1998 **66**(2): 222—233.