

FPAR 的 Monte Carlo 模拟研究

周 彬^{1,2}, 陈良富¹, 舒晓波³

(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. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 江西师范大学 地理学院, 江西 南昌 330043)

摘 要: FPAR(fraction of photosynthetically active radiation absorbed by the canopy)是植被冠层阻截太阳光合有效辐射的比例,是遥感估算陆地生态系统植被净第一性生产力(NPP)的重要参数。利用 Monte Carlo 方法模拟光子在植被冠层中的辐射传输过程,以植被冠层二向反射分布函数的模拟来验证模拟的正确性;在此基础上对 400—700nm 光合作用波段范围内的植被叶片吸收光子辐射比例的 FPAR 进行模拟。FPAR 的 Monte Carlo 模拟结果,揭示了 FPAR 与太阳天顶角及植被冠层参数之间的关系。

关键词: FPAR; Monte Carlo; 叶面积指数

中图分类号: TP701 **文献标识码:** A

1 引 言

陆地生态系统 NPP 的遥感估算模型如“CA-SA”(the carnegie ames stanford approach)模型^[1],“Glo-PEM”(global production efficiency models)全遥感模型^[2],MODIS 年 NPP 算法^[3]和 VPM(vegetation photosynthetic model)模型^[4]主要采用 Monteith 提出的光能利用模式^[5],其中植被吸收的光合有效辐射“IPAR”(intercepted photosynthetically active radiation),又是地表光合有效辐射(PAR)和 FPAR 的乘积。由此可知,FPAR 是一个非常重要的参数,FPAR 模型是否能真实反映植被冠层吸收光合有效辐射状况,将直接影响遥感估算 NPP 的不确定性程度。目前 FPAR 的主要获取方法是建立 FPAR 和植被指数之间的关系^[1,2],或者基于冠层反照率与叶面积指数等参数建立基于冠层能量平衡的 FPAR 模式。由于植被指数如 NDVI 在叶面积指数大于 3 很容易就达到饱和,基于冠层反照率的模型,很难从机理上透彻分析 FPAR 与相关参数的关系。

Monte Carlo 方法,又称随机抽样技巧或统计试验方法。这一方法一般用于处理两类问题:一是确定性的数学问题,二是随机性问题,如粒子在某种

介质中的传输、扩散等问题,就属于随机性问题,由于光子在植被冠层中的辐射传输过程完全是一个随机过程, Monte Carlo 方法在可见光遥感中已被广泛用于植被冠层 BRDF 的模拟计算^[6-9]。结合 FPAR 的基本内涵,本文试图利用 Monte Carlo 方法,模拟太阳发出的光子在植被冠层中的辐射传输过程,并统计植被冠层吸收的光子数比例,分析不同参数对 FPAR 的影响。

2 植被冠层辐射传输的 Monte Carlo 模拟

2.1 Monte Carlo 模拟原理与假定

辐射传输理论最初是从研究光辐射在大气中传播的规律和粒子在介质中输运规律时总结出来的。植被冠层中适用辐射传输理论需对植被冠层与光的相互作用方式进行了一些假定:(1)光与植被体的相互作用包含吸收、反射和透射三种方式;(2)具有一定形状和面积元的叶子是植被冠层中的主要散射介质;光子在植被冠层辐射传输中的消光作用主要与光子的传输方向和叶子特性有关,如 LAI 和叶倾角分布函数(LAD)等;(3)由于和大气中的粒子散射介质特性的差异,叶子的散射特性依

收稿日期:2007-05-27;修订日期:2007-06-13

基金项目:国家自然科学基金(编号:40471092);国家重大基础研究项目(编号:2002CB412506)。

作者简介:周 彬(1982—),女。2004 年毕业于中国农业大学应用物理系,现为中国科学院遥感应用研究所获理学硕士学位。主要从事定量遥感研究。E-mail:lfchen@irsa.ac.cn。

赖于叶子面积元表面特性,以及叶子内部的结构与组成成分。在利用 Monte Carlo 模拟冠层的辐射传输过程中,为了使模拟过程简化而且不失一般性,(1)本次模拟仅将每片作为一个单元,光子不进入叶片组织内部,叶片对光子吸收和散射的强度,由叶片光谱性质确定;(2)假定叶片为朗伯体,光子在叶片表面的反射与透射具有各向同性;(3)假定植被冠层在水平和垂直方向的分布密度一致;(4)假定叶片在方位角上具有随机分布特点。

2.2 植被冠层辐射传输的 Monte Carlo 随机模拟过程

Monte Carlo 模拟以连续植被为例,从太阳方向发出的光子进入植被冠层后,模拟该光子在植被冠层中的散射过程,以及光子最后从植被冠层出射后,统计各辐射方向的光子数,获得主平面的 BRDF 随观测角的分布情况。具体随机模拟过程如下:

(1)从太阳方向 (θ, φ) 发出一个单位能量的光子射向植被冠层。产生一个随机数 r_1 ,根据冠层 LAI 和叶倾角分布函数(用 G 函数值表示),计算光子的自由路程 L_1 。

(2)计算光子运行方向在冠层中的最大可能运行距离 $L_{\max 1}$,比较光子自由路程 L_1 和 $L_{\max 1}$ 。若 $L_1 > L_{\max 1}$,且光子天顶角大于 90° 时,则光子将向下穿过植被冠层直接击中背景土壤,直接进行过程(7);若 $L_1 > L_{\max 1}$,且光子天顶角小于 90° ,则光子将向上穿过植被冠层上界后射出冠层,然后统计该方向上的光子数;若 $L_1 < L_{\max 1}$,则光子与叶片发生碰撞。

(3)如果光子与冠层叶片发生碰撞,则根据叶子倾角概率密度函数产生随机数 r_2 ,确定叶片的倾角分布。由于叶片的方位角在 2π 空间随机分布,产生第三个随机数 r_3 ,确定叶子的方位角: $2\pi r_3$ 。

(4)产生随机数 r_4 确定光子与叶片碰撞后的相互作用类型:反射、透射还是被叶子吸收。如果被吸收,则光子消亡,重新发射和追踪新光子。如果是反射和透射,进一步判断光子的反射方向或透射后的运动方向。

(5)以光子入射方向和叶片的法向构造该叶片局部坐标系,根据叶片的朗伯假设,在叶片局部坐标系计算光子散射方向,并将坐标转换到冠层坐标系,在冠层坐标系继续光子的模拟过程。

(6)根据光子散射后的方向,产生随机数 r_5 ,计算光子的自由路程 L_2 ,并计算在这一散射方向上从碰撞点到冠层边缘的距离 $L_{\max 2}$,然后重复过程(2),

直到光子被吸收,或射出冠层后在该方向上进行光子数的统计。

(7)光子与土壤表面发生碰撞,假设土壤表面为朗伯反射特性,产生随机数 r_6 ,确定光子的散射方向,然后重复过程(2)。

(8)利用足够统计量的光子对上述随机过程进行模拟,记录在植被冠层半球空间每个单位立体角上出射光子的个数,并计算获得植被冠层 BRDF。

2.3 Monte Carlo 方法模拟的关键算法

2.3.1 光子自由路程的确定

光子自由路程应用 House 等人光子自由路径模型^[8]:即光子经过光学距离 l 而不发生碰撞的概率为 $P(l) = e^{-l}$,光学距离 l 是由 $0-l$ 光学距离光子不发生碰撞的概率分布决定的,有 $l = |\ln(1-r)|$,这里 r 是 $0-1$ 之间均匀分布的一个随机数。通过产生随机数就可以获得光学距离 l 。而 l 又可表达为自由路径长度 L 和消光系数的乘积,即: $l = L \times (-G \times \text{LAI}/\cos\theta)$,这里 G 是叶面沿光子方向 (θ, φ) 的投影系数。所以每次产生一个随机数就可获得光子能够运行的自由路程。

2.3.2 G 函数

冠层 G 函数的物理意义是冠层中某高处单位叶面积在光子运动方向上的投影,冠层的 G 函数由叶子倾角分布密度函数决定。

2.3.3 光子与叶子相互作用方式的确定

光子与叶片发生碰撞有三种情况发生:吸收、反射和透射。具体某一次发生何种过程由随机数决定。即在 $0-1$ 范围内建立叶片吸收、反射和透射的累计函数,

$$y = \begin{cases} [0, \alpha) \\ [\alpha, \alpha + \rho) \\ [\alpha + \rho, \alpha + \rho + \tau] \end{cases} \quad (1)$$

式中, α, ρ 和 τ 分别是叶片的吸收率、发射率与透过率,有 $\alpha + \rho + \tau = 1$ 。随机数的取值落在不同的累计函数值域中时,就分别发生不同的相互作用过程。

2.3.4 光子散射方向的确定

在冠层坐标系中光子与叶片的碰撞,光子可能击中叶片的正面,也可能击中叶片反面,具体情况根据入射光线方向和叶片法线方向之间夹角的余弦值来判断。该余弦值大于 0 时,表示光子击中叶子背面,反之击中叶面正面。

2.3.5 坐标转换

光子与叶片的碰撞过程存在两个坐标系统,一

个是描述整个冠层的总体坐标系统,另外一个叶片局部坐标系统。从局部坐标到全局坐标转换时,采用转换矩阵进行^[10]。

2.3.6 热点效应问题

“热点”效应主要采用 Kuusk 的重叠函数^[11]考虑光子与叶片或土壤之间的一次散射,光子初始入射方向与出射方向之间投影关系存在孔隙率互不独立。当光子反射方向和光子入射的方向相反时,则重叠函数只考虑单程路径的削弱影响。

2.3.7 光子出射的统计

光子出射时主要以单位立体角进行光子个数

的统计。在验证植被冠层反射率模拟的可靠性时,本文以植被冠层的 BRDF 模拟来判断。

2.4 植被冠层 BRDF 的 Monte Carlo 模拟

以 30°太阳入射天顶角为例,考虑球面型叶倾角分布,叶子半球在近红外(860nm)和红光(630nm)波段的反射率分别取值 0.41 和 0.05,透过率取 0.41 和 0.01;土壤近红外和红光波段的反射率分别取 0.16 和 0.14;冠层 LAI 取值为 1,光子数选 1.0×10^7 ,则可得到植被冠层红光和近红外 BRF 模拟结果(如图 1 和图 2 所示)。

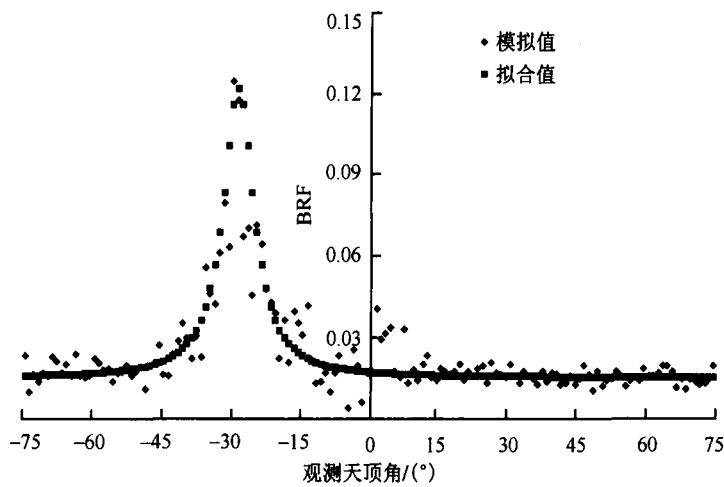


图 1 红光波段 BRF 随观测角度的变化情况

Fig. 1 The distribution of red band BRF simulated using Monte Carlo method with view zenith angle

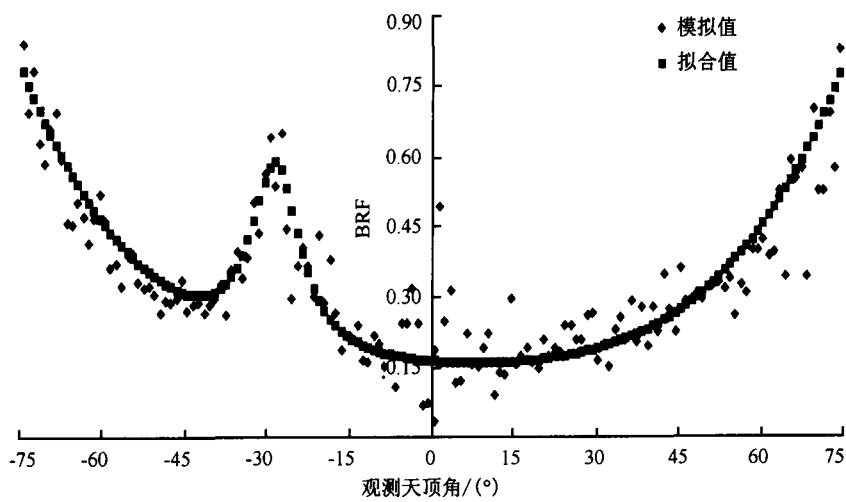


图 2 近红外光 BRF 及其拟合值

Fig. 2 The distribution of near infrared band BRF simulated using Monte Carlo method with view zenith angle

模拟结果表明, Monte Carlo 方法比较准确地模拟了植被冠层二向反射的两个重要特性,即“热点”现象和“碗边”效应,而且其值域合理,说明了本文所采用的 Monte Carlo 方法模拟的植被辐射传输过程是合理的。

3 植被冠层 FPAR 的 Monte Carlo 模拟

3.1 FPAR 的 Monte Carlo 模拟方法

FPAR 是植被对 400—700nm 波长范围内的太

阳短波辐射进行拦截的比例, Monte Carlo 方法每次只能模拟某一特定波长上的 FPAR_λ 值, 因此需要对 FPAR_λ 从波长 400nm 到 700nm 进行积分:

$$\text{FPAR} = \int_{400}^{700} \text{FPAR}_\lambda d\lambda \quad (2)$$

在对 FPAR 积分的处理上, 论文采用离散法求算。固定其他参数如光子入射角度、叶面积指数和叶倾角等不变, 在 400—700nm 上, 根据不同波长所对应的叶片反射率、透过率和土壤反射率对 FPAR_λ 进行模拟后, 对模拟 FPAR_λ 值进行积分得到 400—700nm 范围的 FPAR 值。

某一特定波长上 FPAR_λ 的 Monte Carlo 模拟过程和前述的冠层反射率模拟过程是一样的, 其唯一的区别是 FPAR_λ 模拟时主要统计叶片吸收的光子数, 并计算占总光子数的比例。所以具体的随机模

拟详细过程在此不再赘述。

3.2 FPAR 模拟输入参数

FPAR 的 Monte Carlo 模拟参数输入如下: 球面型叶子倾角分布, 冠层叶面积指数 (LAI) 分别取不同的数值, 模拟的光子个数为 100 万个; 叶片反射率和透过率数据采用 LOPEX93 (leaf optical properties experiment 93) 波谱数据库提供的数据库。LOPEX93 (leaf optical properties experiment 93) 数据库是由欧盟联合研究中心 (Joint Research Center, JRC) 在 1993 年建立的。本文选取一组鲜叶片的反射率和透过率数据, 通过采样选择了 18 个点。考虑到曲线的特征, 采样为非均匀采样, 使得选取的点尽可能的模拟原波谱曲线。并同时考虑 400—700nm 土壤反射率图。鲜叶和土壤光谱特性如图 3 所示。

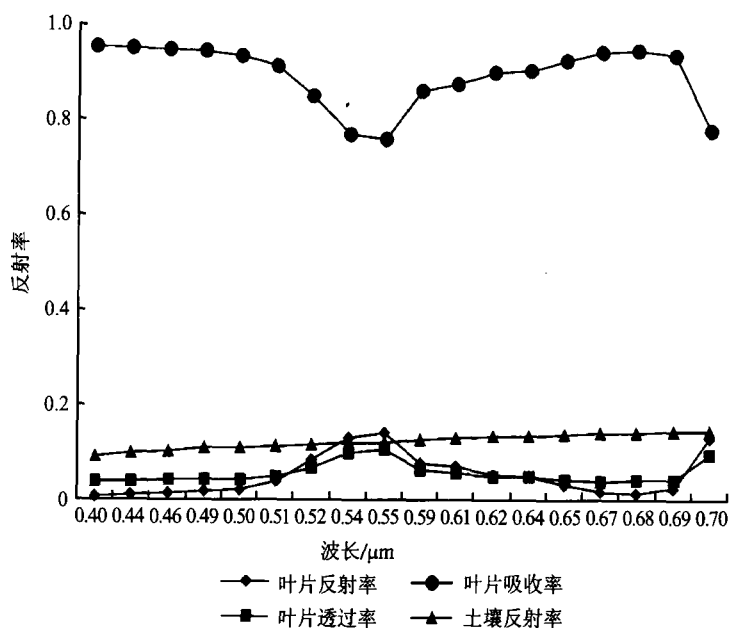


图3 400—700nm 范围叶片反射率, 透过率及土壤反射率采样图

Fig. 3 The distribution of leaf reflectance, leaf transmittance and soil reflectance

3.3 模拟结果

3.3.1 FPAR 随波长变化的情况

令太阳天顶角为 30° , 输入叶片反射率、透过率、土壤反射率和叶面积指数分别取值为 0.5, 1, 3, 5 和 7 时, 得到的 FPAR_λ 随波长的变化规律 (如图 4 所示)。图 4 表明 FPAR_λ 随波长的变化趋势是一致的, 变化趋势和叶子的吸收率随波长的变化相似。不同波长处的 FPAR 值随 LAI 的增大而增大。

3.3.2 FPAR 随 LAI 变化情况

对 400—700nm 波段范围内的 FPAR_λ 值进行分段积分得到 FPAR 总值。当叶面积指数分别取

0.2, 0.5, 1, 3, 5, 7 等不同值时, 得到 FPAR 随叶面积指数的变化规律如图 5 所示。由图 5 可知, FPAR 随 LAI 增大而增大, 在 LAI 达到 5 以后, FPAR 的变化比较平缓。

3.3.3 FPAR 随太阳天顶角变化情况

叶面积指数仍取 0.1, 0.2, 0.5, 1, 3, 5, 7 等不同值, 同时考虑太阳天顶角的变化情况, 即太阳天顶角在 $0-70^\circ$ 之间每 10° 间隔取值, 获得的 FPAR 随入射太阳天顶角和叶面积指数的变化关系如图 6 所示。由图 6 可知: 随太阳天顶角的增大, FPAR 呈上升趋势, 但增大的幅度视 LAI 而不同; LAI 值越大, FPAR 的值越大; 总体上 FPAR 随着太阳天顶角

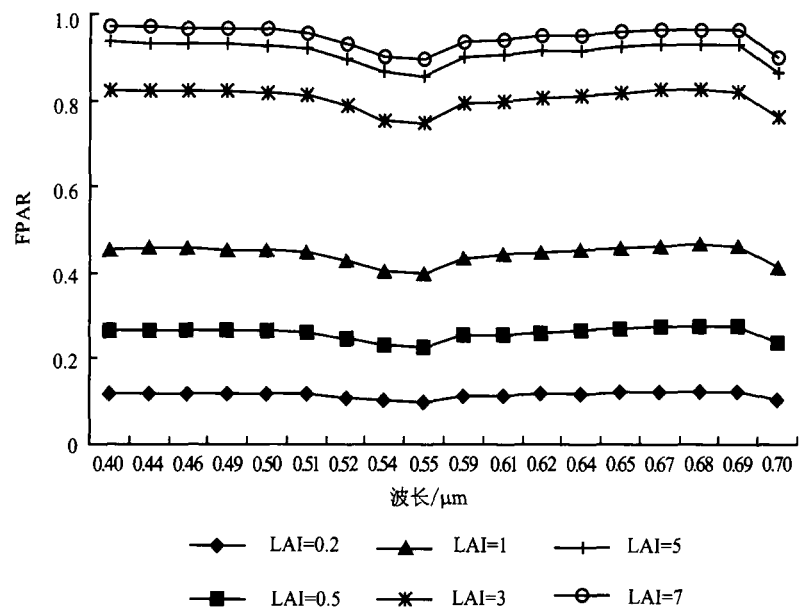


图 4 不同 LAI 时 FPAR 随波长的分布图

Fig. 4 The variation of FPAR with difference wavelength when LAI is set to different value

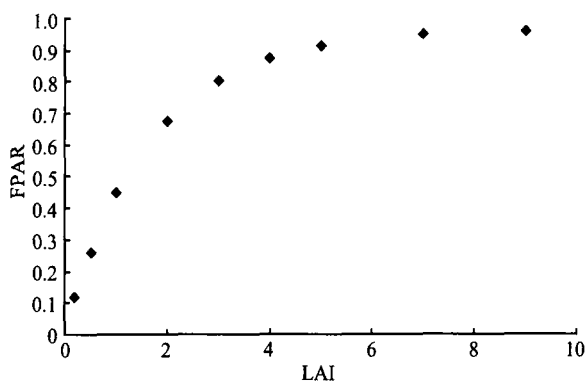


图 5 FPAR 随 LAI 变化图

Fig. 5 The variation of FPAR with LAI

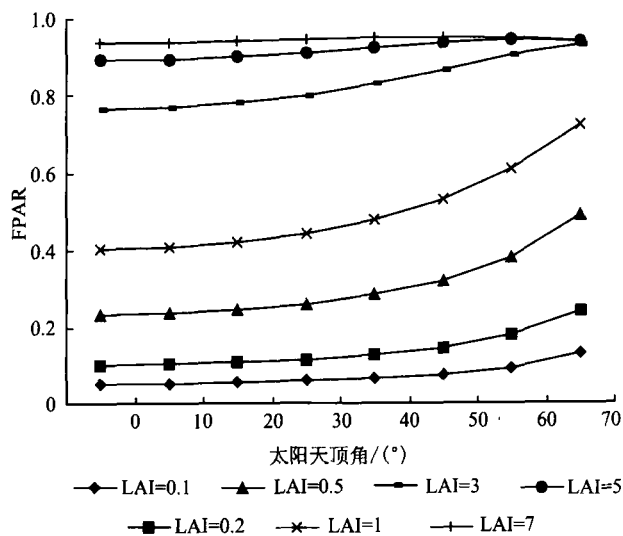


图 6 不同 LAI 下 FPAR 随太阳入射天顶角变化图

Fig. 6 The variations of FPAR with solar zenith angle when LAI is set to different value

的增加而增加。不同的叶面积指数下,FPAR 随太阳天顶角增加的程度不一样。

将这个结果用图 7 表示时,可很清楚地看出 FPAR 值随 LAI 值的增大是有饱和度的,但这个饱和度又受太阳天顶角的限制。在太阳天顶角比较小时,FPAR 要在 LAI 达到“7”左右才达到饱和,而在太阳天顶角比较大时,如 70°左右,则 FPAR 在 LAI 为“3”时就达到了饱和。

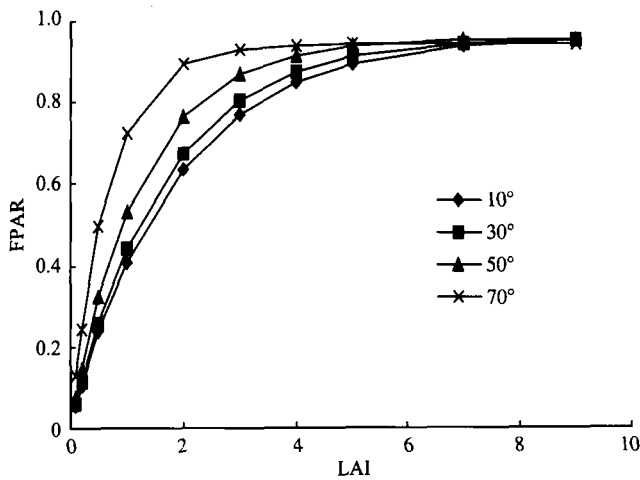


图 7 不同太阳天顶角下 FPAR 随 LAI 变化图

Fig. 7 The variations of FPAR with LAI when solar zenith angle is set to different value

4 结论与讨论

FPAR 是植被冠层阻截太阳光合有效辐射的比例,FPAR 是遥感估算 NPP 中的一个重要参数。由于 FPAR 的计算多数直接利用植被指数,而对

FPAR 本身特点的研究不多。本文利用 Monte Carlo 方法能准确模拟光子在植被冠层中辐射传输的特点,对 400—700nm 光合作用波段范围内的植被叶子吸收光子辐射比例的 FPAR 进行模拟分析,可以很好地反映 FPAR 与太阳天顶角和植被冠层参数之间的关系。

模拟结果表明:(1)FPAR 随波长的变化趋势主要与叶子的吸收率有关;(2)随太阳天顶角的增大,FPAR 呈上升趋势,但增大的幅度视 LAI 不同而有差异;(3)LAI 值越大,FPAR 的值越大;(4)FPAR 值随 LAI 值的增大是有饱和度的,但这个饱和度又受太阳天顶角的限制,在太阳天顶角比较小时,FPAR 要在 LAI 达到 7 左右才达到饱和,而在太阳天顶角比较大时,如 70° 左右,则 FPAR 在 LAI 为 3 时就达到了饱和;(5)FPAR 的模拟表明,FPAR 与观测角度无关。

参考文献 (References)

- [1] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial Ecosystem Production: A Process Model Based on Global Satellite and Surface Data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7 (4): 811—841.
- [2] Prince S D, Goward S J. Global Primary Production: A Remote Sensing Approach [J]. *Journal of Biogeography*, 1995, 22: 815—835.
- [3] Running S W, Hunt E R, Nemani R, et al. MODIS LAI and FPAR [R]. MODIS Algorithm Document, NASA, 1994.
- [4] Xiao X, Boles S, Liu J Y, et al. Characterization of Forest Types in Northeastern China, Using Multi-Temporal SPOT-4 Vegetation Sensor Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82: 335—348.
- [5] Monteith J L. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1972, 9: 747—766.
- [6] Smith J A, Oliver R E. Effects of Changing Canopy Directional Reflectance on Feature Selection [J]. *Applied Optics*, 1974, 13: 1599—1604.
- [7] Idso S B, de Wit C T. Light Relation in Plant Canopies [J]. *Applied Optics*, 1970, 9: 177—184.
- [8] Szvachbaum I, Shaviv G. A Monte Carlo Model for the Radiation Field in Plant Canopies [J]. *Agricultural Meteorology*, 1976, 17 (5): 333—352.
- [9] Huang J X, Wu B F, Zeng Y, et al. Forest Canopy BRDF Simulation Using Monte Carlo Method [J]. *Journal of System Simulation*, 2006, 18 (6): 1671—1676. [黄健熙, 吴炳方, 曾源等. 基于蒙特卡罗方法的森林冠层 BRDF 模拟 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18 (6): 1671—1676.]
- [10] Cooper K D, Smith J A. A Monte Carlo Reflectance Model for Soil Surfaces with Three-Dimensional Structure [J]. *IEEE Transactions on Geo-Science and Remote Sensing*, 1985, 23 (5): 668—673.
- [11] Kuusk A. The Hot Spot Effect of a Uniform Vegetative Cover [J]. *Soviet Journal of Remote Sensing*, 39: 645 ~ 658.

The Monte Carlo Study on FPAR

ZHOU Bin^{1,2}, CHEN Liang-fu¹, SHU Xiao-bo³

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications, and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Geography and Environment College, Jiangxi Normal University, Jiangxi Nanchang 330043, China)

Abstract: For the missing carbon sink problem, terrestrial ecosystems are recognized as the biggest unknown field. Thus, to determine the role of terrestrial ecosystems in the global carbon cycle and understand its short-and long-term dynamics is a matter of high practical and scientific importance. Remote sensing has been attached increasingly more attention regarding the regional or global scale net primary production (NPP) estimation. The light-use efficiency model elaborated by Monteith has been widely used to estimate NPP based on remotely sensed data. In those NPP models based on remotely sensed images, NPP can be represented as the light-use efficiency multiplying absorbed photosynthetically active radiation. The absorbed photosynthetically active radiation is linear to the fraction of incident photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (FPAR). So FPAR is a very important parameter in the NPP model. For the existing remote sensed NPP models, FPAR is calculated respectively from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) used in Glo-PEM NPP model and Enhanced Vegetation Index (EVI) in VMP model, so it is influenced by VI characteristic property, which VI varies with view angle and bands of sensors. In fact, According to its definition, FPAR only depends on the solar incident angle and the canopy parameters. In this paper, Monte Carlo algorithm will be used to simulate the radiance transfer process in canopy. In this paper, the spherical distribution of leaf angle distribution is taken as an example. On the one hand, we can get the function of bidirectional reflectance distribution at different wavelength, which can be used to calculate the vegetation index, such as Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) used in Glo-PEM NPP model and Enhanced Vegetation Index (EVI) in VMP model. So the VIs can be used to study the property of FPAR value applied in Glo-PEM and VMP model. On the other hand, the Monte Carlo algorithm can be directly applied to simulate the fraction of active radiance absorbed by canopy, which is the FPAR. After the simulation of FPAR at different wavelength between 400—700nm, an averaged FPAR is integrated. It has been proved that the FPAR is function from solar zenith angle for the research of the leaf area index and the leaf angle distribution. Our simulated results show that the FPAR increases with the solar zenith angle, but the increasing range of FPAR depends on LAI. But when the LAI is up to 5, the FPAR is getting saturation and the FPAR changes smoothly with different solar zenith angles. The simulated results also show that the FPAR variations with LAI depend on solar zenith angle. For example, when solar zenith angle is set at a low value 10, the FPAR is saturated while LAI is up to 7. But when solar zenith angle is set at a big value, for example 70 degree, FAPR is easily saturated when LAI is getting to 3. Our simulated results also show FPAR does not dependent on view angle. It is consistent with definition of FPAR, which is defined as the fraction of incident solar energy between wavelength of 400 nm and 700 nm absorbed by canopy.

Key words: FPAR; Monte Carlo; LAI