陆面模式中不同植被辐射模式的对比

周文艳^{1*}, 罗勇², 李伟平¹, 史学丽¹, 张艳武¹

1. 国家气候中心, 北京 100081;

2. 清华大学地球系统科学系, 全球变化研究院, 北京 100084

* 联系人, E-mail: zhouwy@cma.gov.cn

2018-04-24 收稿, 2018-05-07 修回, 2018-05-07 接受, 2018-06-14 网络版发表

国家重点研发计划(2016YFA0602602, 2017YFA0604304)、国家自然科学基金(41075057)和清华大学自主研究项目资助

摘要 针对目前在陆面过程数值模拟研究中对于地表植被冠层辐射传输参数化方案精确性不足的问题, 在植被二流辐射传输模式基础上新发展了一个描述太阳短波辐射在植被中传输的冠层四流辐射传输模式. 为了更好地评估新发展的四流模式在模式应用中的模拟性能, 依据陆面模式中定义的16种植被参数给定四流模式和二流模式独立试验中需要的参数, 开展多组离线的独立理想实验, 计算16种植被冠层在不同太阳高度角以及不同叶面积指数时的反照率、透射率以及吸收率. 独立试验结果表明, 太阳高度角对于短波在植被内的辐射传输过程影响比较显著, 两个模式对于反照率、透射率和吸收率的模拟差别随不同种类植被呈现不同特征. 将四流模式耦合到陆面模式中进行数值实验, 结果表明, 采用四流模式后, 能够改善陆面模式在全球多数区域对陆面地表反照率、叶面积指数和净初级生产力的模拟结果.

关键词 辐射传输模式, 二流模式, 四流模式, 陆面模式, 模拟

植被占陆地表面积的一半左右, 植被物理和生理特征对陆气之间的能量和物质的输送方面有重要影响. 植被冠层内叶片吸收的辐射能是控制光合作用、蒸腾作用和能量分配的主要因子之一, 植被吸收的有效辐射影响着光合作用过程中形成的产量, 植被冠层对太阳短波的吸收, 反射、透射过程还直接影响地表能量的分配, 改变叶子的温度及下垫面的反照率. 因此在陆面过程物理生化模型的发展研究中, 发展一个真实可以描述辐射在冠层内传播过程的植被辐射模式对于陆面过程模拟植被的物理和生态过程具有重要的研究意义.

太阳短波辐射在冠层中的传输遵循植被冠层基本方程, 包括植被一次散射, 多次散射过程, 由于冠层结构的复杂性, 对冠层辐射传输没有精确的描绘方法, 不同的植被辐射模式通过不同方式描述辐射的传播过程. 冠层辐射传输计算方法的简单或复杂

程度随其应用的领域而不同, 到目前为止, 已经发展了数十种辐射传输计算方法. 二十世纪七八十年代, Myneni等人^[1,2]系统总结了冠层辐射传输的一些理论和方法. 在以前冠层辐射研究中, 许多学者研究运用各种方法计算或者测定叶子的各种几何参数, 叶面积密度分布函数, 叶子在空间的取向分布, 测量植被叶面积指数, 研究如何得到叶面积密度函数等, 这些参数能够反映植被几何结构和光学特性, 这些工作是建立冠层辐射传输模式的基础. 同时, Lemeur^[3], Monteith^[4], Ross^[5,6]和Norman^[7,8]等根据大量的冠层辐射观测资料, 建立了多种冠层辐射模型, 使冠层辐射的研究得到了长足的发展. Dewit^[9], Norman等人^[10,11], Goudriaan^[12], Ross等人^[13]根据大量的冠层辐射观测资料, 按照几何光学原理、冠层几何结构和叶片的光学特性, 把植物的冠层分成许多薄层分别处理, 建立分层模型. 戴秋丹等人^[14,15]在前人的基础上

引用格式: 周文艳, 罗勇, 李伟平, 等. 陆面模式中不同植被辐射模式的对比. 科学通报, 2018, 63: 2772–2784

Zhou W Y, Luo Y, Li W P, et al. Comparative studies of different radiation schemes within vegetation in land model (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2772–2784, doi: 10.1360/N972018-00398

继续发展分层模式,建立完整的冠层辐射传输理论模式,推导出了数值解. 分层模式可以从物理机理上更好理解太阳短波辐射在冠层中的传输过程,它考虑光叶几何学,叶角分布的多样性,光线入射到不同叶倾角冠层时,冠层接受和透射的辐射能量. Yuan等人^[16]发展了用于全球气候模拟的3D辐射传输模式,假设植被是单个或者多个冠层球体,考虑植被冠层内叶片重叠等对辐射吸收和散射的影响. Ross^[5,6]和Myneni等人^[1,2]分别对植被冠层辐射传输理论作过详细的描述,并发展了复杂冠层结构内的辐射传输的基本方程,而求解植被冠层基本方程的近似解模型的计算速度比数值解快,模型需要的参数较少,并对一些模型参数比如G-函数、单次反射率等进行简化,从而有广阔的应用前景. Liang等人^[17]发展的基于离散纵标法的四流模型; Tian等人^[18]发展的树冠近似均匀的四流模型都属于近似解模型. 近似解模型实质就是把辐射亮度都转化为辐射通量密度,从而列出了一组一阶线性微分方程组去代替冠层辐射传输基本方程的微分-积分方程,不同的近似解模型本质上是求解植被冠层基本方程,分别处理刻画散射辐射和直接辐射,只是在确定参数的方式上与确定边界条件上存在差别. 然而这些模式放在陆面模式里进行应用和检验工作却是缺乏的,目前陆面模式中被广泛应用的仍旧是Dickinson等人^[19-21]植被二流辐射传输模式(简称二流模式). 二流模式就是近似解模型的代表. 随着气候模式需要高效较准确的辐射模式,罗勇、周文艳等在二流模式的基础上发展了新的植被四流辐射传输模式^[22,23](简称四流模式),四流模式继承了二流模式的优点,在模型中分别考虑散射辐射和直射辐射过程,适合耦合到陆面模式中,同时改善陆面过程中辐射在植被中的传输过程. 本研究利用的陆面模式是国家气候中心发展研制的BCC_AVIM陆面模式,在该模式中定义了16种植被并给出了叶片反射率、叶片透射率以及叶角分布与球形分布的偏离指数等. 在数值实验之前,我们对16种植被进行了几组独立试验,利用陆面模式中定义的16种植被参数,考察在给定叶面积指数和太阳高度角等驱动条件下两个模式计算的整个冠层的反照率、透射率及吸收率. 其后,将四流模式耦合到陆面模式里进行数值试验,利用MODIS反照率资料^[24]检验采用两个植被辐射模式时陆面模式模拟的16种植被的反照率以及陆表面反照率,并考察耦合四流模式后对叶面积指

数和净初级生产力等的影响.

1 陆面模式、辐射模式介绍和资料

1.1 陆面模式

研究中所用陆面模式为国家气候中心的陆面模式BCC_AVIM^[25]. 该模式与大气数值模式耦合,为大气模式提供表面反照率、向上长波辐射、感热通量、潜热通量、水汽通量,以及大气模式所需要的纬向和经向表面应力. 模式考虑了陆面的次网格特征,考虑不同植被类型间的生态差异,不同土壤类型间的水文和热力差异,允许在一个网格点内存在多种地面覆盖类型. 同一网格中的各下垫面类型受相同的大气强迫,各下垫面的通量独立计算,最后按各类型下垫面类型所占权重作加权平均总的反馈给大气. 有植被覆盖的表面包括4~16种可能的植被和裸土,在沙漠地区仍然考虑有稀疏植被存在. 7种主要的植被包括常绿或落叶针叶林、常绿或落叶阔叶林、灌木、草地和作物. 这7种植物类型PFT根据气候规律分为北极、北方(boreal)、温带和赤道PFT, C₃和C₄草,以及常绿和落叶灌木,共扩展为16个生理变量. 这些植物类型的叶和茎光学特性不同,决定着不同的太阳辐射反射、透射和吸收参数,在陆面模式里每一个陆面网格点给定每一种植被每月的叶面积和茎面积指数,叶面积指数的初值是叶面积和茎面积指数的加权平均. 模式描述的物理过程包括能量和水文循环过程. 在垂直方向上,有一个植被层和10层厚度不一的土壤层,根据雪的厚度分为不多于5层的雪层. 在这些层次控制热量传输的是能量平衡方程. 能量平衡方程代表的物理含义就是到达地面的太阳辐射被吸收后除了增加土壤和植被的温度,一部分以感热、潜热等形式返回大气. 水分传输也是陆面模式中重要的组成部分,降水发生时,一部分落在地面,还有的被叶面截留,落在地面的降水和叶面截留后滴落在地面的部分渗入土壤或形成表面径流. 地表整体的反照率是土壤反照率和冠层反照率的加权平均,而其中土壤反照率是通过简单的参数化公式求得,冠层反照率的计算采用Dickinson^[19-21]二流模式计算得到.

1.2 冠层辐射传输模式

在陆面模式BCC_AVIM中,植被辐射模式采用二流模式. 二流模式是20世纪80年代Dickinson^[14,19-21]发

展起来的植被冠层辐射传输参数化模式,现在许多陆面模式中都采用它来计算植被反射的太阳短波辐射通量.二流模式是Dickinson将大气辐射计算的二流近似方法引入到植被冠层内辐射研究,将散射相函数展开成勒让德函数,然后截断到某一阶数而求得快捷的二阶近似解,在求解过程中,考虑冠层上下边界条件,参数化叶片的单次散射率等,经过复杂的推导,得到植被在只有散射辐射和只有直射辐射下的植被向上和向下的辐射通量,从而可以计算冠层整体的反照率、透射率和吸收率,具体求解过程和解比较复杂,详见参考文献[14,15].

四流模式^[22,23]参照二流模式的模型思路,通过引入大气辐射计算的四流近似方法^[26,27]求解冠层辐射传输基本方程,辐射传输取四阶的近似,得到冠层任一处向上向下的辐射通量,从而计算冠层反照率、透射率等,本文重点介绍四流模式求解过程.

冠层辐射传输是一个非常复杂的过程,太阳短波辐射在冠层中传输过程分为三部分,分别是消光、一次散射、多次散射过程.综合这三部分辐射过程,得到冠层辐射传输基本方程为

$$\begin{aligned} \mu_i \frac{dI(\tau, \mu_i)}{d\tau} = & G(\mu_i)I(\tau, \mu_i) - \frac{\omega}{2} \sum_{l=0}^N v_l P_l(\mu_i) \\ & \times \sum_{j=-n}^n a_j P_l(\mu_j) G(\mu_j) I(\tau, \mu_j) \\ & - \frac{\omega}{4\pi} \sum_{l=0}^N v_l P_l(\mu_i) G(\mu_0) P_l(\mu_0) \pi I_0 e^{-G(\mu_0)\tau/\mu_0}. \end{aligned} \quad (1)$$

方程(1)中 I 表示散射辐射强度, μ 是入射光线天顶角余弦, $G(\mu)$ 及 $G(\mu')$ 表示冠层中单位叶面积在入射方向和散射方向上的投影,实质上就是面积消光系数, τ 表示叶面积指数, ω 为叶子散射系数,它等于叶子反射率和透射率之和, $P(\mu)$ 是散射相函数, μ_0 表示直接太阳辐射天顶角余弦, $G(\mu_0)$ 表示叶子在直接太阳辐射方向的投影面积.

二流模式是考虑在上下半球各有一个辐射流(即上下共两个辐射流 $j=-1,1$),同时散射相函数按照两个辐射流展开成2项(即 $N=1, L=0,1$),构成二流近似,从而对冠层辐射基本方程进行求解.而四流模式是考虑在上下半球各有两个辐射流(即上下共4个辐射流 $j=-1,-2,1,2$),同时散射相函数按照4个辐射流展开成4项(即 $N=3, L=0,1,2,3$),构成四流近似,从而对冠层辐射基本方程求解,其中 μ_1 和 μ_2 是高斯求积点, a_1

和 a_2 是权重值.

在求解方程(1)之前,依据植被独特的几何结构和光学特征,需要定义方程(1)中的各项物理量,具体如下:

Goudriaan^[12]通过实验数据拟合了叶子在入射方向投影面积,即叶面积消光系数 G -函数随叶角分布与球形分布偏离指数 X_L 的变化曲线,其函数关系式可以表示为

$$G(\mu) = \phi_1 + \phi_2 \mu. \quad (2)$$

其中 $\phi_1 = 0.5 - 0.633X_L - 0.33X_L^2$, $\phi_2 = 0.877(1 - 2\phi_1)$. μ 在上文已经介绍, X_L 与叶子平均叶倾角关系为

$$\cos^2(\bar{\lambda}) = \left(\frac{1 + X_L}{2} \right)^2, \quad (3)$$

$\bar{\lambda}$ 为叶子相对于水平面的平均叶倾角.在陆面模式中 X_L 由观测给定,从而可以计算出 $\bar{\lambda}$.

冠层散射相函数 $P(x)$ 采用Henyey-Greenstein相函数.即

$$P(x) = (1 - g^2) / (1 + g^2 - 2g \cos x)^{3/2}. \quad (4)$$

根据Norman和Jarvis^[10]的推论可以分析得到式(4)中参数 g 表达式为

$$g = \frac{1}{2\omega} [\rho + t + (\rho - t) \cos^2 \bar{\lambda}]. \quad (5)$$

式(5)中 ω 为叶片散射率即叶片反射率和透射率之和, ρ 为叶片反射率, t 为叶片透射率,在模式中都由观测资料给定.

令 $K = \frac{G(\Omega_0)}{\Omega_0}$, 它表示叶子对直射光消光系数.

在四流模式中按照不同植被类型给定叶面积指数 τ .高斯求积点 μ_1 和 μ_2 和权重值 a_1 和 a_2 参考大气辐射四流近似方法,根据高斯求积选择向上两个方向辐射强度和向下两个方向辐射强度,对两个离散方向取 $\mu_1=0.2113248$ 和 $\mu_2=0.7886752$,两个方向的权重均为 $a=0.5$.

参照Liou^[26,27]导出的四流近似解法,考虑冠层顶部和底部边界条件,通过求解方程(1),可以得到冠层任何 τ 处冠层上下辐射强度 I_1, I_{-1}, I_2, I_{-2} 以及冠层反照率和透射率.

对于入射只有直接太阳辐射的情形,冠层上层散射辐射为0,到达冠层底部辐射包括植被元素散射光、直射光被散射部分等,以及直射光未被散射直接

透射到冠层底部部分. 该边界条件当冠层顶部辐射强度写成二流时可以表示为

$$I_{-1} \downarrow (0, -\mu_1) = 0 \text{ 冠层顶部 } \tau_0=0 \text{ 处 } \mu_1 \text{ 方向向下辐射强度,} \quad (6a)$$

$$I_{-2} \downarrow (0, -\mu_2) = 0 \text{ 冠层顶部 } \tau_0=0 \text{ 处 } \mu_2 \text{ 方向向下辐射}$$

强度. (6b)

在模式中假设地表按照朗伯定律进行反射, 其反射率(或地表反照率)为 p_s , 这时下界面向上漫射辐射强度为常数, 则冠层底部处向上辐射强度写成二流时可以表示如下(L_T 为冠层总叶面积指数):

$$I_1 \uparrow (\tau_1, \mu_1) = I_2 \uparrow (\tau_1, \mu_2) = \frac{p_s [2\pi a_1 \mu_1 I_{-1} \downarrow (\tau_1, -\mu_1) + 2\pi a_2 \mu_2 I_{-2} \downarrow (\tau_1, -\mu_2) + \pi I_0 \exp(-KL_T)]}{2\pi(a_1 \mu_1 + a_2 \mu_2)}. \quad (6c)$$

冠层反照率 α 和透射率 t 分别由下式计算:

$$\alpha = 2\pi(a_1 \mu_1 I_1 \uparrow (0, \mu_1) + a_2 \mu_2 I_2 \uparrow (0, \mu_2)) / \pi \mu_0 I_0 \downarrow (0, -\mu_0), \quad (6d)$$

$$t = 2\pi(a_1 \mu_1 I_{-1} \downarrow (\tau_1, \mu_1) + a_2 \mu_2 I_{-2} \downarrow (\tau_1, \mu_2)) / \pi \mu_0 I_0 \downarrow (0, -\mu_0). \quad (6e)$$

在入射辐射只是漫射辐射的情形时, 入射到冠层顶部的全部是散射光, 直射光为0, 而下边界向上散射光仅仅是底部反射的散射光, 没有直射光这部分贡献. 该边界条件当冠层顶部处辐射强度写成二流时可以表示为

$$I_{-1} \downarrow (0, -\mu_1) = 1 \text{ 冠层顶部 } \tau_0=0 \text{ 处 } \mu_1 \text{ 方向向下辐射强度,} \quad (7a)$$

$$I_{-2} \downarrow (0, -\mu_2) = 1 \text{ 冠层顶部 } \tau_0=0 \text{ 处 } \mu_2 \text{ 方向向下辐射强度.} \quad (7b)$$

同样假设地表按照朗伯定律进行反射, 则冠层底部处向上辐射强度写成二流时可以表示如下:

$$I_1 \uparrow (\tau_1, \mu_1) = I_2 \uparrow (\tau_1, \mu_2) = \frac{p_s [2\pi a_1 \mu_1 I_{-1} \downarrow (\tau_1, -\mu_1) + 2\pi a_2 \mu_2 I_{-2} \downarrow (\tau_1, -\mu_2)]}{2\pi(a_1 \mu_1 + a_2 \mu_2)}. \quad (7c)$$

冠层反照率和透射率由下式计算:

$$\alpha = (2\pi(a_1 \mu_1 I_1 \uparrow (0, \mu_1) + a_2 \mu_2 I_2 \uparrow (0, \mu_2)) + \mu_0 \pi I_0 \exp^{-\tau G(\mu_0)/\mu_0}) / 2\pi(a_1 \mu_1 + a_2 \mu_2), \quad (7d)$$

$$t = (2\pi(a_1 \mu_1 I_{-1} \downarrow (\tau_1, \mu_1) + a_2 \mu_2 I_{-2} \downarrow (\tau_1, \mu_2)) + \mu_0 \pi I_0 \exp^{-\tau G(\mu_0)/\mu_0}) / 2\pi(a_1 \mu_1 + a_2 \mu_2). \quad (7e)$$

具体的推导过程非常复杂, 由于篇幅限制详细过程见参考文献[22].

四流模式中采用四流近似方法求解方程, 属于近似解模式, 计算速度快, 满足了陆面过程模式计算高效的要求. 另外四流模式中许多参数是简化的, 容易通过观测资料给定或者计算得到, 使之适合耦合到陆面过程模式中. 同陆面模式BCC_AVIM中植被二流模式一致, 四流模式考虑可见光和近红外两个波段, 土壤反射率和植被叶片反射率等参数在两个波段有不同的光学参数, 四流模式可以计算在这两个波段的辐射通量和冠层反照率等, 短波辐射以直射光和散射光两种方式入射, 这些与二流模式的设计一致, 因此四流模式能够替换原有的二流辐射参数化模式, 耦合到陆面模式中, 重要的是陆面模式采用四流模式后相比二流模式并不增加计算量.

1.3 资料

论文采用普林斯顿大学提供的1948~2008年3 h一次全球大气强迫场资料作为陆面模式的驱动数据. 该数据空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 包括气温、风速、比湿、降水、气压、大气向下长波辐射通量和太阳向下短波辐射通量等近地面气象要素^[28]. 陆面过程模式下垫面资料是利用CLM3陆面模式中自带的土壤植被数据集通过插值等方法得到T106分辨率的植被类型、叶面积指数、土壤类型和土壤颜色等数据.

本文利用MODIS反照率资料^[24]检验陆面模式反照率模拟性能. MODIS的反照率产品是精度较高的观测数据, 空间分辨率为 0.05° (经纬度), 数据时间间隔为8 d, 具有较高的时间和空间分辨率, 经过大量的地面观测数据验证. 利用陆面模式BCC_AVIM进行1998~2008年共11 a的独立模拟实验, 模式选取

1999~2008年的模拟结果进行对比. 文中的叶面积指数LAI资料是MODIS的LAI产品, 由搭载在TERRA卫星上的MODIS传感器红光和近红外波段反射率数据反演, 数据长度从2000~2005年^[29,30], 需要说明的是, 由于云和季节雪盖的存在, 仪器误差, 以及反演算法的不确定性, MODIS的LAI资料存在空间和时间上的不连续和不一致性等^[29], 可能用来对比的LAI资料本身的误差也会对陆面模式评估有一定影响. FLUXNET是国际通量观测研究网络, 为区域或全球尺度的碳水循环模拟提供了强有力的数据基础^[31]. 本文使用基于FLUXNET40个站点的森林生态系统涡度相关通量观测数据(<http://fluxnet.fluxdata.org/>)的全球网格数据, 具体数据包括净初级生产力NPP数据, NPP数据插值到全球尺度, 时间从1982~2005年, 本文取2000~2005年的资料长度进行对比.

2 结果分析

2.1 独立试验设计及结果分析

四流和二流辐射模式的输入变量包括: 叶片反射率、叶片透射率、叶角分布与球形分布的偏离指数、土壤反射率、叶面积指数、太阳高度角. 在独立实验中, 根据陆面模式中定义的16种植被参数(表1)确定

叶片反射率、叶片透射率和叶角分布与球形分布的偏离指数等. 表1是BCC_AVIM陆面模式中关于16种植被光学性质的数据(只列出和植被辐射模型有关的数据). 表1中参数第1列和第5列分别是叶片在可见光波段的反射率和透射率, 第2列和第6列分别是叶片在近红外波段的反射率和透射率. 第3列和第7列分别是茎在可见光波段的反射率和透射率, 第4列和第8列分别是茎在近红外波段的反射率和透射率. 第9列是叶角分布与球形分布的偏离指数, 其中11种植被偏离指数接近0, 表明BCC_AVIM陆面模式中叶片分布多数认为是接近球形分布. 另外在实验中土壤反照率取0.2、叶面积指数从1取到6、太阳高度角从5°~85°. 本文给出叶面积指数较小为1, 叶面积指数中等为3, 叶面积指数较大为5时的结果.

在陆面模式中, 总的短波辐射按照公式(6)分配.

$$forc_solsxy = 0.7 \times 0.5 \times I, \quad forc_sollxy = 0.7 \times 0.5 \times I, \quad (8)$$

$$forc_solsdxy = 0.3 \times 0.5 \times I, \quad forc_solldxy = 0.3 \times 0.5 \times I.$$

式中 x 为总短波辐射, $forc_solsxy$ 和 $forc_sollxy$ 分别表示只有直射光时可见光和近红外两个波段的短波辐射量, $forc_solsdxy$ 和 $forc_solldxy$ 分别表示只有散射光时两个波段的短波辐射量. 可以看出散射光两个波段各占总辐射量的0.15, 直射光两个波段各占总辐射

表1 植被光学特性参数表

Table 1 Plant functional type optional properties

植被种类	rho1(1)	rho1(2)	rho5(1)	rho5(2)	taul(1)	taul(2)	taus(1)	taus(2)	xl
温带常绿针叶林	0.07	0.35	0.16	0.39	0.05	0.10	0.001	0.001	0.01
寒带常绿针叶林	0.07	0.35	0.16	0.39	0.05	0.10	0.001	0.001	0.01
寒带落叶针叶林	0.07	0.35	0.16	0.39	0.05	0.10	0.001	0.001	0.01
热带常绿阔叶林	0.10	0.45	0.16	0.39	0.05	0.25	0.001	0.001	0.10
温带常绿阔叶林	0.10	0.45	0.16	0.39	0.05	0.25	0.001	0.001	0.10
热带落叶阔叶林	0.10	0.45	0.16	0.39	0.05	0.25	0.001	0.001	0.01
温带落叶阔叶林	0.10	0.45	0.16	0.39	0.05	0.25	0.001	0.001	0.25
寒带落叶阔叶林	0.10	0.45	0.16	0.39	0.05	0.25	0.001	0.001	0.25
常绿落叶灌木	0.07	0.35	0.16	0.39	0.05	0.10	0.001	0.001	0.01
温带落叶灌木	0.10	0.45	0.16	0.39	0.05	0.25	0.001	0.001	0.25
寒带落叶灌木	0.10	0.45	0.16	0.39	0.05	0.25	0.001	0.001	0.25
极地C ₃ 矮草	0.11	0.58	0.36	0.58	0.07	0.25	0.220	0.380	-0.30
非极地C ₃ 矮草	0.11	0.58	0.36	0.58	0.07	0.25	0.220	0.380	-0.30
C ₄ 矮草	0.11	0.58	0.36	0.58	0.07	0.25	0.220	0.380	-0.30
玉米	0.11	0.58	0.36	0.58	0.07	0.25	0.220	0.380	-0.30
小麦	0.11	0.58	0.36	0.58	0.07	0.25	0.220	0.380	-0.30

量的0.35。独立实验结果是按照只有散射光和直射光两种入射方式和两个波段分别计算的,为了比较两个模式对整体冠层反射率、透射率和吸收率的模拟性能,论文按照公式(8)合并独立实验模拟结果,得到图1。图1是太阳高度角为 15° 时,四流模式和二流模式模拟16种植被反射率、透射率和吸收率在叶面积指数较小(图1(a))、中等(图1(b))和较大(图1(c))时的差别,土壤反射率取0.2。从图1可以看出,在叶面积指数较小时(图1(a)),四流模式模拟的森林和灌木类植被反射率偏高,而随着叶面积指数的增加(图1(b), (c)),

图1 四流模式和二流模式模拟16种植被反射率、透射率和吸收率的差别。图中差别是四流模式减二流模式结果,太阳高度角为 15° ,土壤反射率0.2。图1中横坐标表示1~16种植被类型,1~8是森林类,9~11是灌木类,12~16是矮草类。纵坐标是四流模式与二流模式模拟植被冠层的反射率,透射率和吸收率的差值。(a) LAI=1, (b) LAI=3, (c) LAI=5

Figure 1 The simulation differences in reflectance, transmittance and absorptivity in the four or two model of 16 plants. The difference is the result of the four minus two models, the solar zenith angle is 15° , and the soil reflectance rate is 0.2. Horizontal coordinates indicates 1–16 vegetation types, 1–8 is forest, 9–11 is shrub, and 12–16 is dwarf grass. Red indicates reflectivity, blue indicates transmissivity, green indicates absorptivity. (a) LAI=1, (b) LAI=3, (c) LAI=5

四流模式模拟的反射率则偏低,四流模式模拟的透射率在叶面积指数较小和中等时(图1(a))较二流模式偏高,在叶面积指数较大时,偏高不明显;四流模式模拟的吸收率也只在叶面积指数较小时有较明显偏差,比二流模式模拟的吸收率偏低,而在其他叶面积指数时偏差不明显。矮草类植被在叶面积指数较小、中等和较大(图1(a)~(c))时,四流模式模拟的反射率较二流模式都偏低,四流模式在叶面积指数较小时模拟的透射率明显偏低,偏差最大接近-0.04,而在叶面积指数中等和偏大时模拟的透射率明显偏高,尤其在叶面积指数中等时,偏差最大值能达到0.03左右;在叶面积指数较小时四流模式模拟的吸收率较二流模式偏高,正偏差基本在0.02左右,随着叶面积指数增加,两个模式模拟结果接近。

图2是太阳高度角为 25° 时,四流模式和二流模式模拟16种植被反射率、透射率和吸收率的差别,坐标同图1。森林和灌木类植被模拟情况类似,四流模式和二流模式模拟16种植被反射率差别不明显,四流模式在叶面积指数较小(图2(a))时模拟结果略偏高,在叶面积指数中等(图2(b))和较大(图2(c))时略偏低;四流模式模拟的透射率比二流模式都偏高,在叶面积指数中等时偏高最明显,正偏差接近0.03;四流模式模拟的吸收率在叶面积指数较小和中等时结果偏低,在叶面积指数较大时偏差不明显。四流模式模拟矮草类植被的反射率比二流模式偏低,在叶面积指数中等和较大时偏差要明显,四流模式模拟的透射率在叶面积指数较小时比二流模式略偏低,在叶面积指数中等和较大时偏高明显,四流模式模拟的吸收率在叶面积指数较小时比二流模式偏高,在叶面积指数中等和较大时偏低。

图3是太阳高度角为 75° 时,两个模式模拟的植被反射率、透射率和吸收率的差别。从图2可以看出,随着太阳高度角变大,四流模式模拟的16种植被的反射率都偏高,透射率偏高,吸收率偏低,两个模式对于矮草类植被的透射率和吸收率的模拟差别比较显著,尤其是在叶面积指数中等时,透射率的差别接近0.04,而在叶面积指数中等和偏大时,吸收率差别非常显著,在叶面积指数中等时偏差也达到0.04。

从独立试验结果可以看出,两个模式对于3类植被在不同叶面积指数和高度角时模拟差别呈现不同特征,太阳高度角对于短波在植被内的辐射传输过程影响还是比较明显的,两个方案在高太阳角时差

图2 四流模式和二流模式模拟16种植被反射率、透射率和吸收率的差别。图中差别是四流模式减二流模式结果，太阳高度角为 25° ，土壤反射率0.2。(a) LAI=1, (b) LAI=3, (c) LAI=5

Figure 2 The simulation differences in reflectance, transmittance and absorptivity in the four or two model of 16 plants. The difference is the result of the four minus two models, the solar zenith angle is 25° , and the soil reflectance rate is 0.2. (a) LAI=1, (b) LAI=3, (c) LAI=5

别比较大，可能是由于叶片受到了更多的太阳辐射，导致两个方案的差异也增加。另外两个模式在矮草类植被时反射率、透射率和吸收率的差别比较大，原因可能是矮草类植被的植被叶片和茎的反射率在可见光和近红外波段较大导致两个方案的差异也比较大。独立试验的结果有利于分析模式在陆面模式中的实际应用，从而对模式进行进一步改进。

2.2 数值实验结果分析

本文利用陆面模式BCC_AVIM进行1998~2008年共11 a的独立模拟实验，选取1999~2008年的模拟结果进行对比。在BCC_AVIM陆面模式里，输出的反射率是网格点内各种下垫面类型反射率的加权平均，为了评估两种植被辐射模式对陆面模式里各种

图3 四流模式和二流模式模拟16种植被反射率、透射率和吸收率的差别。图中差别是四流模式减二流模式结果，太阳高度角为 75° ，土壤反射率0.2。(a) LAI=1, (b) LAI=3, (c) LAI=5

Figure 3 The simulation differences in reflectance, transmittance and absorptivity in the four or two model of 16 plants. The difference is the result of the four minus two models, the solar zenith angle is 75° , and the soil reflectance rate is 0.2. (a) LAI=1, (b) LAI=3, (c) LAI=5

植被反射率模拟影响，我们将模式模拟的16种植被次网格反射率分别输出，图S1是在陆面模式里采用两种植被辐射模式后模拟的16种植被反射率的差别，可以看到，在3月采用植被四流模式陆面模式模拟的第7种植被常绿阔叶林、第8种植被阔叶落叶林和第11种植被常绿阔叶灌木，植被反射率比采用二流模式模拟结果偏高，而模拟其他植被的反射率都偏低，在7月，采用植被四流模式陆面模式模拟的植被反射率比采用二流模式几乎偏低。从上面独立实验的结果也可以发现，在太阳高度角比较低的情况下，在叶面积指数比较小时，四流模式模拟植被反射率比二流模式偏高，随着植被叶面积指数增加时，四流模式模拟的植被反射率比二流模式偏低，这与陆面模式3月植被叶面积指数较小而7月植被生长较好叶

面积指数较大时采用两个方案的植被反照率偏差状况基本一致. 独立实验中太阳高度角在 75° 时, 叶面积指数从较小逐渐增加时四流模式模拟的植被反照率都比二流模式偏高, 而采用四流模式后陆面模式模拟3月的阔叶林和灌木的植被反照率比采用二流模式偏高.

图4是陆面模式模拟的全球平均反照率, 图4(a)是Modis数据, 图4(b)是采用二流模式后陆面模式的反照率模拟结果, 图4(c)是采用二流模式后陆面模式模拟的全球反照率与观测的差别, 图4(d)是采用四流模式与采用二流模式后陆面模式模拟反照率的相对差别, 对所有下垫面反照率加权平均得到的整体反照率模拟结果表明, 采用二流模式(图4(b))和四流模式(图略)后, 陆面模式模拟全球地表反照率大体一致, 模拟结果都表明, 模拟最大反照率在高纬地区, 在北半球高纬地区, 反照率高达0.7左右. 模式能够模拟出沙漠地带的反照率特征, 即反照率略高于植被地区, 如非洲的撒哈拉沙漠等, 中亚一些地区, 中国西部沙漠地区, 模拟地表反照率较高, 在0.3~0.4之间. 一般植被的反照率较低, 比如热带雨林地区,

赤道附近, 澳大利亚的部分地区, 南美的雨林地带, 中国南部植被较好地区, 欧洲一些地区, 由于常年较好的植被生长, 模拟的地表反照率相对较低, 在0.1~0.2之间. 其他陆地表面, 模拟反照率一般在0.1~0.3之间. 但是我们也发现, 无论采用哪种辐射模式, 除了一些沙漠地区, 在其他大部分地区, 模拟结果都比观测(图4(c))明显偏高, 而采用四流模式陆面模式模拟地表反照率比采用二流模式后减小(图4(d)), 更接近观测值. 另外在沙漠地区, 考虑了稀疏植被, 所以导致采用计算植被反照率的两种模式后, 陆面模式在沙漠地区模拟的反照率也有变化. 从图4(c)可以看出, 在沙漠地区尤其是撒哈拉地区, 采用两种模式后, 陆面模式得到的反照率都偏低, 而采用四流模式后会导致陆面模式模拟的反照率在这一地区偏高(图4(d)), 改善模拟结果. 对比独立试验的结果可以发现, 采用两种植被辐射模式后对陆面模式模拟地表反照率的影响符合独立试验的结果, 在独立试验里, 在叶面积指数比较小时, 四流模式的模拟结果多数情况下是偏高的, 而在沙漠地区, 由于在模式初值里也给了比较小的叶面积指数, 在沙漠地区采用四流

图4 全球地表反照率观测和模拟结果. (a) Modis资料; (b) 陆面模式采用二流模式的结果; (c) 采用二流模式模拟结果与观测的差别; (d) 采用四流模式与采用二流模式的相对差别

Figure 4 Observation and simulation of global land surface albedo. (a) Modis data; (b) the results using two model; (c) the difference between simulated and observed albedo using two model in land surface model; (d) relative difference between four and two model in land surface model

图5 叶面积指数的观测和模拟结果. (a) Modis资料; (b) 采用二流模式陆面模式模拟结果; (c) 采用四流模式与采用二流模式的相对差别
Figure 5 Observation and simulation of leaf area index. (a) Modis data; (b) the results using two model; (c) relative difference between four and two model in land surface model

模式后陆面模式模拟反照率偏高. 在独立试验里, 在叶面积中等和偏大时, 四流模式模拟结果基本偏低, 而在次网格分离出的16种植被的反照率结果和全球

植被比较好的区域, 陆面模式模拟结果也都偏低, 和独立试验结果也是吻合的.

从独立试验结果(图1~3)可以看出, 采用两种植

图 6 净初级生产力观测和模拟结果. (a) FLUXNET资料; (b) 采用二流模式陆面模式模拟结果; (c) 采用四流模式与采用二流模式的相对差别
Figure 6 Observation and simulation of net primary productivity. (a) FLUXNET data; (b) the results using two model; (c) relative difference between four and two model in land surface model

被辐射模式模拟的植被透射率和吸收率会有差别, 这会影响陆面模式模拟的植被温度以及植被的生长. 陆面模式里采用植被四流模式与采用二流模式时植

被温度有一定模拟差别(图略). 在非洲的撒哈拉沙漠地区、中亚一些地区、中国西部沙漠地区等, 采用四流模式后模拟的植被温度偏低, 在0.2°范围内, 而在

植被生长比较好地区,采用四流模式后模拟的植被温度略偏高,虽然模拟的植被温度的变化并不是很大,但这也会影响植被生长.图5是陆面模式观测(图5(a))和采用二流模式的后陆面模式模拟的叶面积指数LAI(图5(b))以及采用两种模式后陆面模式模拟的LAI的相对差别(图5(c)).从图5可以看出,在全球多数地区,陆面模式采用二流模式模拟的LAI偏高(图5(b)),尤其是欧亚大陆北部,中国东南部,赤道热带地区,南美的雨林地带,陆面模式模拟的LAI明显偏高.在全球植被生长的大部分区域,尤其是陆面模式模拟偏高地区,采用植被四流辐射模式后陆面模式模拟的LAI减小,相对差别接近1%~3%,对陆面模式模拟有一定程度改善.图6是陆面模式观测(图6(a))和采用二流模式后陆面模式模拟的净初级生产力NPP(图6(b))以及采用两种模式后陆面模式模拟的NPP的相对差别(图6(c)),选取陆面模式2000~2005年NPP的模拟结果与同时段的观测进行对比.从图6可以看出,在全球多数地区,陆面模式采用二流模式模拟的NPP明显偏高(图6(b)),偏高地区同LAI模拟偏高的地区基本一致.全球植被生长的大部分区域,尤其是陆面模式模拟偏高地区,在采用植被四流辐射模式后陆面模式模拟的NPP减小,对陆面模式的NPP模拟也有一定程度改善. Lawrence等人^[32]等对CLM3的植被类型PFT进行订正,对陆面模式的模拟有一定改进,所以对BCC_AVIM的PFT进行合理的订正可能对改善陆面模式对LAI和NPP的模拟结果有一定帮助.

3 结论

利用陆面模式中定义的16种植被的参数和两种植被辐射模式即四流模式和二流模式进行了多组独立实验,考察两个模式计算的植被冠层的反射率、透射率和吸收率,计算两个模式的模拟差别.并将两个模式耦合到BCC_AVIM陆面模式中,进行数值实验,选取BCC_AVIM模式运行10年的结果,比较采用不

同植被辐射传输模式对BCC_AVIM陆面模式模拟地表反照率以及叶面积指数和NPP等的影响,得到以下主要结论:

(1) 对于不同类型植被在不同叶面积指数和太阳高度角时四流模式和二流模式模拟差别呈现不同特征,太阳高度角对于短波辐射在植被内的传输过程影响还是比较明显的.总体来说,四流辐射模式模拟的植被反射率在叶面积指数较小时模拟结果偏高,在叶面积指数较大时偏低,四流模式在多数情况下模拟的透射率偏高,吸收率偏低.

(2) 在BCC_AVIM陆面模式里,输出16种植被次网格反照率,结果表明在3月除了个别植被外采用四流模式的陆面模式模拟的植被反照率比采用二流模式偏高,模拟的其他植被的反照率都偏低,在7月,陆面模式采用植被四流模式后模拟的植被反照率比采用二流模式几乎偏低,模拟结果与独立实验结果基本一致.

(3) 采用两种辐射模式的陆面模式在沙漠地区模拟的反照率都偏低,在其他大部分地区,模拟结果都比观测明显偏高,而陆面模式采用四流模式后对于植被稀疏区域的反照率比采用二流模式模拟结果偏高,一些常年较好的植被生长区域,模拟的地表反照率偏低,能够改善陆面模式对地表反照率在全球的模拟结果.

(4) 从独立试验结果可以看出,采用两种植被辐射模式后,植被透射率和吸收率会有差别,这会影响陆面模式植被温度以及植被LAI等的模拟结果.在植被稀疏的沙漠地区,采用四流模式后模拟的植被温度偏低,而在植被生长比较好地区,采用四流模式后模拟的植被温度略偏高,模拟的植被温度的差别在0.2范围内.陆面模式采用二流模式模拟的LAI和NPP都明显偏高,采用植被四流辐射模式后能够减少陆面模式的LAI和NPP的模拟误差,对陆面模式的LAI和NPP模拟有一定程度改善.

参考文献

- 1 Myneni R B, Gutschick V P, Asrar G, et al. Photon transport in vegetation canopies with anisotropic scattering. *Agric For Meteorol*, 1988, 42: 1-40
- 2 Myneni R B, Ross J, Asrar G. A review on the theory of photon transport in leaf canopies. *Agric For Meteorol*, 1989, 45: 1-153
- 3 Lemeur R. A method for simulating the direct solar radiation regime in sunflower, Jerusalem artichoke, corn and soybean canopies using actual stand structure data. *Agric Meteorol*, 1973, 12: 229-247
- 4 Monteith J L. *Principles of Environmental Physics*. London: Edward Arnold Press, 1973. 241

- 5 Ross J. The Radiation Regime and the Architecture of Plant Stands. Netherlands: Dr W Junk Publish, 1981. 392
- 6 Ross J. Radiative transfer in plant communities. In: Monteith J L, ed. *Vegetation and the Atmosphere*. London: Academic Press, 1975. 3–52
- 7 Norman J M. Interfacing leaf and canopy light interception models. In: *Predicting Photosynthesis Production and Use For Ecosystem Models*, Vol. II. West Palm Beach: CRC Press, 1980. 49–67
- 8 Norman J M. Modeling the complete canopy. In: Barfield B J, Gerber J F, eds. *Modification of the Aerial Environment of Crops*. Michigan: America Society of Agricultural Engineers, 1979. 249–277
- 9 Dewit C T. Photosynthesis of leaf canopies. *Agric Res Reports*, Pudoc, Wageningen, 1965. 663
- 10 Norman J M, Jarvis P G. Photosynthesis in Sitka Spruce (*Picea Sitchensis* (Bong.) Carr.) V. Radiation penetration theory and a test case. *J Appl Ecol*, 1975, 12: 839–878
- 11 Norman J M. Simulation of microclimate. In: Hatfield J L, Thompson I J, eds. *Biometeorology Integrated Pest Management*. New York: Academic Press, 1982. 62–99
- 12 Goudriaan J. *Crop Micrometeorology: A Simulation Study*. Centre for Agricultural Publishing and Documentation. Netherlands: Wageningen, 1977. 249
- 13 Ross J, Marshak A. Calculation the canopy bidirectional reflectance using the Monte Carlo method. *Remote Sens Environ*, 1988, 24: 213–225
- 14 Dai Q D. The Radiative Transfer in Canopy (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004. 97 [戴秋丹. 陆面过程中冠层辐射传输模式研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2004. 97]
- 15 Dai Q D, Sun S F. A generalized layered radiation transfer model in the vegetation canopy. *Adv Atmos Sci*, 2006, 23: 243–257
- 16 Yuan H, Dickinson R E, Dai Y, et al. A 3D canopy radiative transfer model for global climate modeling: Description, validation and application. *J Clim*, 2014, 27: 1168–1192
- 17 Liang S, Townshend J R G. A parametric soil BRDF model: A four stream approximation for multiple scattering. *Int J Remote Sens*, 1996, 17: 1303–1315
- 18 Tian Y H, Dickinson R E, Zhou L M. Four-stream isosector approximation for canopy radiative transfer. *J Geophys Res*, 2007, 112: 1–12
- 19 Dickinson R E. Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance. *Adv Geophys*, 1983, 25: 305–353
- 20 Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model, NCAR Techn. Note-275+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, 1986. 69
- 21 Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. Biosphere-atmosphere Transfer Scheme(BATS)Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model, NCAR/TN387+STR, Colorado, 1993. 72
- 22 Zhou W Y, Guo P W, Luo Y, et al. A study on the radiative transfer parameterization scheme within canopy in land surface process model (in Chinese). *Acta Meteor Sin*, 2008, 66: 359–370 [周文艳, 郭品文, 罗勇, 等. 陆面过程中植被四流辐射传输模型研究. 气象学报, 2008, 66: 359–370]
- 23 Zhou W Y, Luo Y, Li Y M. Validation of the radiative transfer parameterization scheme in land surface process model. *Acta Meteorol Sin*, 2010, 68: 12–18
- 24 Zhang X Z, Zheng J Y, He F N, et al. Application of MODIS BRDF/Albedo dataset in the regional temperature simulation of China. *Acta Geogr Sin*, 2011, 66: 356–366
- 25 Wu T W, Li W, Ji J, et al. Global carbon budgets simulated by the Beijing Climate Center Climate System. *J Geophys Res*, 2013, 118: 1–22
- 26 Liou K N. *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 313–327
- 27 Liou K N. A simple formulation of the delta four stream approximation for radiative transfer parameterizations. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 1940–1947
- 28 Chen H S, Xiong M M, Sha W Y. Simulation of land surface processes over China and its validation Part I: Soil temperature (in Chinese). *Sci Meteor Sin*, 2010, 30: 621–630 [陈海山, 熊明明, 沙文钰. CLM 3.0 对中国区域陆面过程的模拟试验及评估 I: 土壤温度. 气象科学, 2010, 30: 621–630]
- 29 Yang W Z, Tan B, Huang D, et al. MODIS Leaf Area Index products: From validation to algorithm improvement. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2006, 44: 1885–1898
- 30 Yuan H, Dai Y, Xiao Z, et al. Reprocessing the MODIS Leaf Area Index products for land surface and climate modelling. *Remote Sens Environ*, 2011, 115: 1171–1187
- 31 Friend A D, Ameth A, Kiang N Y, et al. FLUXNET and modelling the global carbon cycle. *Glob Change Biol*, 2007, 13: 610–633
- 32 Lawrence P J, Chase T N. Representing a new MODIS consistent land surface in the Community Land Model (CLM 3.0). *J Geophys Res*, 2007, 112: G01023

补充材料

图 S1 陆面模式中 16 种植被次网格植被反照率模拟结果(3 月)

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “陆面模式中不同植被辐射模式的对比”

Comparative studies of different radiation schemes within vegetation in land model

Wenyan Zhou^{1*}, Yong Luo², Weiping Li¹, Xueli Shi¹ & Yanwu Zhang¹

¹ National Climate Center, Beijing 100081, China;

² Department of Earth System Science, Institute for Global Change Studies, Tsinghua University, Beijing 100084, China

* Corresponding author, E-mail: zhouwy@cma.gov.cn

The lower boundary condition in the atmosphere is provided by a land surface process model. One of the directions of research of the land surface model is to perfect land surface model in existence. Since the accurate estimation of the albedo is required in climate modeling and there are some shortages in either the accuracy or the application area for radiative transfer scheme within a canopy, it is necessary to develop an accurate and simple four-stream radiation transfer model within a canopy based on the second vegetation radiative transfer model. The four-stream model can simulate the process of short-wave solar radiative transfer within a canopy.

The four-stream model utilizes the four-stream approximation method in the atmosphere to provide analytical solutions to the basic equation of radiative transfer within a canopy.

The four-stream solar radiative transfer model within a canopy in the land surface process model is based on the two-stream short-wave radiative transfer model. The two-stream model developed by Dickinson is computational efficiency and can gain accurate analytical solution. Sellers ever calculate the canopy hemisphere albedo in visible band and near infrared band by use of the two-stream model and can gain analytical solution. Many land surface models still use the two-stream model. But the two-stream model is not very accurate, thus it is necessary to develop more accurate four-stream radiative model.

The radiative transfer theory within a canopy is based on the radiative transfer theory in the atmosphere. Each parameter in the basic canopy equation canopy accounts for the special geometry and optical character of the leaf or canopy. The upward or downward radiative fluxes are related to the diffuse phase function, *G*-function, leaf reflectivity and leaf transmission, leaf area index, and the solar angle of incident beam direction. The four-stream model and the two-stream model can simulate the reflectance, transmittance and absorption of the canopy. The newly developed the four-stream model can reduce the calculate difference of land surface radiative in theory.

To compare and determine differences between the results predicted by the two models, several experiments were carried out to examine the effects on the canopy albedo by varying the leaf area index, leave angle distribution and the optical properties of the leaf and ground surface under the canopy. To better assess the simulation performance of the new four-stream model in the application for a land surface model, we needed to determine the parameters for the four-stream scheme and the second-stream scheme to utilize in an off-line test. These parameters also included calculating the reflectance, absorbance and transmission at different sun angles and different leaf area indexes for the 16 kinds of vegetation canopy. The offline test results showed that the sun angle had a significant impact on the solar radiative transfer process within vegetation and on the simulations of two schemes for reflectance and transmittance and absorption varies with different vegetation types. The offline test results show that the sun angle has significantly impact on the solar radiative transfer process within vegetation, and the simulations of two schemes for reflectance and transmittance and absorption varies with different vegetation types.

To evaluate the simulations of the four-stream model for solar radiative flux reflected by the land surface in the land surface model, the four-stream model and the two-stream models were coupled into a land surface process model. These tests indicated that the simulation of the land surface process model coupled to the four-stream scheme outperformed two-stream scheme radiative transfer models regarding the global surface albedo, leaf area index and net primary productivity.

radiative transfer model, two-stream model, four-stream model, land surface model, simulation

doi: 10.1360/N972018-00398