

陆面过程模式中植被冠层短波辐射传输参数化方案研究进展

周文艳¹ 郭品文¹ 罗勇²

(1 南京信息工程大学, 南京 210044; 2 中国气象局国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081)

摘要 阐述植被冠层内短波辐射传输模式研究在陆面过程及陆气相互研究中的重要性, 全面地回顾有关冠层短波辐射传输模式的研究进展, 结合目前在陆面过程领域具有代表性的冠层短波辐射传输模式, 指出当前在这一领域研究中存在并有待于解决的问题, 探讨了未来的发展趋势。

关键词 陆面过程 冠层辐射 传输模式

引言

陆面过程会影响局地甚至全球尺度的大气环流和气候变化, 以往许多学者在研究陆面过程、陆面参数化方法以及陆气相互作用方面做了大量的工作, 陆续开展的大型科学试验也极大地促进了陆面模式的发展。对于陆面过程研究而言, 了解和研究植被冠层内短波辐射能量传输和分布具有一定的现实意义和科学性, 而目前介绍陆面过程研究进展的论文很多, 但对于陆面过程的冠层内短波辐射参数化方案研究进展介绍的较少, 因此需要对这一研究方向进行概述, 了解它的研究进展及发展趋势。

1 研究植被冠层辐射传输过程的必要性和意义

现有的科学研究表明, 人类活动导致了全球近 50 年来的普遍增温, 这一增温对全球自然生态系统和各国社会经济已经产生并将继续产生重大而深刻的影响。因此, 气候变化问题得到各国政府与公众的极大关注。

一般认为, 人类活动主要通过 2 个途径引起气候变化: ①化石能源燃烧、农业生产活动, ②土地利用的改变。这 2 个途径都与辐射过程密切相关。地表能量的平衡直接决定了边界层的条件, 地气之间的辐射通量变化又是最重要的, 它不但是地表能量

平衡中的重要组成部分, 也控制着地气感热和潜热通量及其相对大小的变化, 通过植物的光合作用影响碳循环。植被通过辐射过程, 叶面截留和蒸腾作用, 改变能量平衡等方面影响气候, 辐射过程是植被影响气候的最重要的过程之一。由此可见, 植被中的辐射过程在全球气候变化中起着至关重要的作用。植被辐射过程是合理估算光合作用利用的能量从而研究碳循环的关键。冠层中辐射的精确计算和描述与冠层中光合作用的描述紧密联系, 这也是发展陆面模式第 3 代模型陆面生化模式的需要, 因为在第 3 代模型陆面生化模式中除了考虑植被与大气之间交换的物理过程还包括考虑碳循环过程。

从目前国内外的陆面模式描述可以看出^[1~11], 近 20 年来陆面过程模式的发展主要研究生物化学过程、水文过程、雪盖、冻土、干旱区的水热运输过程机制以及下垫面不均匀性等问题, 但对于植被中的辐射过程这一陆气相互作用中最重要物理机制研究却不足。而与此同时, 大气中的辐射过程已得到许多研究人员的关注, 并不断地对气候模式中的辐射参数化方案加以改进^[12~15]。由于大气过程与地面过程之间紧密相连, 且有很强的相互作用, 地面辐射过程中的误差, 不但影响地表本身的能量平衡过程、地表温度以及植被的光合作用, 而且必然反馈到大气过程中, 对大气运动及整个地气系统的能量平

江苏省高校研究生创新计划项目、国家自然科学基金面上项目(40375026)、国家自然科学基金重点项目(40233034)和气候中心陆面模式项目资助

作者简介: 周文艳, 女, 1973 年生, 博士, 从事陆面过程研究, Email: zhouwy73@cma.gov.cn

收稿日期: 2007 年 3 月 15 日; 定稿日期: 2007 年 5 月 29 日

衡产生作用,从而影响模式对气候模拟的精确性。所以陆面过程中辐射传输过程研究成为热门研究课题。

2 植被冠层内辐射传输的研究内容和进展

植被冠层辐射传输过程^[16~18]就是研究植被对光辐射的截获、反射、透射和吸收,研究辐射光能在冠层内的传输和分布。对植被冠层内辐射传输的研究,一方面要从植被群丛的冠层结构和光学特性导出群丛中的辐射状况,从而了解植被群丛内的辐射能量分布、光能利用以及温度分布;另一方面则是根据遥感观测的反射辐射来推断如叶片数量、生物量以及森林资源等大面积生物统计特征信息。目前陆面过程的研究重点基本集中在前一方面。

植被冠层内辐射传输理论是从研究光辐射在大气中传播规律和粒子在介质中的运输规律的基础上发展起来的。与大气不同的是,光与植被相互作用的辐射传输方程又带有新的特征,冠层辐射性质与入射辐射方向、波段、冠层结构和植被光学性质有关。由于构成植被冠层的组分如叶、枝干等,与大气辐射研究中的介质微粒有着本质的差异,因此,对植被辐射传输理论的研究有其自身的特点,从散射叶元的分布方式,到散射叶元的散射特性(如散射相函数)等都有特定描述,各种参数变量的确定也有特定方式。

冠层辐射学作为一门经典学科,由于植被冠层结构的复杂性以及观测资料的缺乏,研究人员基本都是根据不同的科学目的建立复杂程度不同的辐射模式。科学家们经过几十年的努力,建立了数十种数学模型,用于描述和模拟光辐射在植物群丛中的传播。

1953 年 Monsi 和 Saeki^[19]最早指出了光线经过冠层以后的指数消光率,提出冠层内直接辐射随叶面积指数增加而呈指数衰减遵循比尔规律,并建立了计算叶层消光系数的数学模式。但这种模型对复杂冠层结构内的辐射传输描述显得简单,只能用于分辨率较低的光合作用和热平衡模式中。1959 年,De Wit^[20]第 1 次用分析的方法计算了光的分布,但到 1965 年才使用完整地数值方法。之后,Anderson, Cowan, Lemeur^[21~23]等人在 De Wit 工作的基础上进行扩展,除了简单分析外,开始采用计算机程序。20 世纪 70、80 年代, Myneni, Ross^[24~27]

等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片的各种几何参数,叶面积体密度分布函数,叶片在空间的取向分布,测量植被叶面指数,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,利用大量的辐射观测资料也建立了多种冠层辐射模式,使冠层辐射传输的研究得到了长足的发展。

模型大体可以分为两大类,离散型模型和薄层模型^[17]。对于离散型模型,人们发展了几何光学模型,以森林为典型代表。几何光学模式本质上是单次散射模型,为了使模型更逼近真实,在引入孔隙概率模型后试图把多次散射引入几何光学模型。Li-Stralher 模型^[28], Strahler-Jupp^[29]几何光学模型,由于引入了 Boolean 原理而解决了浓密条件下树冠间相互遮荫问题,使几何光学模型走向成熟。然而其中也有局限性,假设了在任何尺度上树冠间分布具有均匀分布的特征,这个假设与事实并不符合。Kuusk^[30]1995 年发展的 FICR 模型,本质上只考虑了一种尺度的孔隙率问题。几何光学模型目前在遥感领域研究比较深入,它虽然在考虑某种植被,比如塔松、森林等,模拟力图接近于真实,但是因为它对辐射传输中的过程参数化比较复杂,许多参数需要真实观测资料来确定,所以并没有广泛应用到陆面过程模式中。

另一类是可以模拟由均匀散射层所构成的薄层模型,称之为辐射传输模型,它适合于连续植被。辐射传输模式在陆面模式中被广泛应用。根据辐射传输模式的求解方法不同,它又可以分为数值解和解析解。数值解中比较有代表性的有 De Wit^[21]、Goudriaan, Norman^[31~33]等不断完善发展的分层模型、戴秋丹等^[34, 35]的完全模型;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。比较有代表性的近似解模型有 Dickinson 1983 年发展的二流模型^[36]、Liang 等^[37]发展的基于离散纵标法的四流模型, K-M 模型和 Kuusk 模型^[38~41]。Kubelka-Munk 提出 K-M 4 通量 5 参数近似模式,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,

在 K-M 之后,由于在确定参数的方式上与确定边界条件上的差别,便构成了以 K-M 方程为基础的不同模式,代表性的模式有 Suits 模型和 Sail 模型^[41~43]。Suits 模型和 Sail 模型不同之处是 Suits 模型是把冠层元素均投影到水平面与垂直面上,用它们的投影面积去替代任意取向的叶片对光的散射、吸收与投射作用,并确定叶片的反射、散射具有漫反射性质。而 Sail 模型令叶片在空间任意取向的条件下求解 K-M 方程而发展起来的新模型。Kuusk 模型是建立射线方向与观察方向孔隙率间的相关概率模型。由于计算机的飞速发展, Monte-Carlo 模式^[44]的应用也成为可能。

3 陆面模式中主要的冠层辐射传输模式

在陆面过程研究中,发展辐射传输模式的目的一是为了得到计算准确的辐射通量,有利于气候模式模拟能力的提高,二是研究冠层内辐射能量分布,更好地研究光合作用和碳循环。所以对于辐射模式的选择要求计算高效,并且较精确。下面介绍几种在陆面过程研究中广泛应用的短波辐射参数化方案。

3.1 二流模式和四流模式

20 世纪 80 年代,由于气候模式需要高效较准确的辐射模式,Dickinson(1983)^[35]将用于大气辐射计算的二流模式^[45]引入到植被冠层内辐射研究,建立二流辐射传输模式。它是一种近似解模式,模式基于大气是均一混浊介质的假设上建立的,能够得到较准确的解析解。Sellers^[46~49]利用二流近似模式,考虑了叶片的多次反射,计算可见光和近红外波段的半球植被冠层反射率,在一定条件下有精确解,简单经济,目前广泛应用于陆面过程的植被研究中。但二流传输模式应用中有很多局限,无法处理非均匀散射光,没有植物叶片正反面特性不一致的情况。而观测资料表明,叶片正反面光学性质差别明显。最近罗勇、周文艳等在二流模式的基础上发展了新的四流辐射传输模式^[50, 51],除了精确度提高之外,在模式中考虑了叶片正反面性质不同对模拟结果的影响,对冠层辐射传输过程考虑的更合理。

3.2 分层模式

De Wit^[18]、Ross^[26, 27]、Goudriaan^[31]、Norman^[33]等根据几何光学原理、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,考虑叶

倾角和方位角在不同高度有不同分布,此类模型又称为分层模型。分层模式可以更细致精确地研究冠层之间的相互作用,可以处理非均匀散射光,考虑叶片正反面不同的光学性质。模式物理机制比较清楚,适用性强。但由于历史上没有详细的观测资料和计算机的限制,分层辐射传输模型并没有在陆面过程模型研究中得到很好应用。

戴秋丹等^[34, 35]在前人的基础上继续发展分层模式,建立完整的冠层辐射传输理论模式,推导出了数值解,并根据光线传输的线性叠加原理,推导出一种根据基本解可以快速求解不同下垫面情况的冠层辐射传输的简化解析解公式,使模式灵活而且减少了计算量。

3.3 Monte-Carlo 模式

由于计算机的飞速发展, Monte-Carlo 模式^[17, 44](M-C 模式)的应用也成为可能。M-C 模式是一种计算机模拟模型,它通过随机变量的统计试验去求解具有统计性质的数学-物理问题。M-C 方法要求独立试验次数相当大,所以如何提高计算效率,降低方差,加速收敛速度是 M-C 方法的重要内容。M-C 模型建立的关键问题是如何将一个具体问题设计成一个概率试验模型。M-C 方法的特点是对被积函数没有任何要求,而在二流或四流模式中,用解析法去求积分值,只能对一些特定的函数形态给出其相应的积分值,或者函数形态需应用各种近似方法求值,所以 M-C 方法是一种适应性极大的数值计算方法。

4 存在的问题和发展趋势

从冠层辐射传输方案的发展历程可以看到,冠层辐射模式得到了很大的发展,但在陆面过程的植被冠层辐射参数化方案的研究中仍存在许多需要进一步探讨的问题。

(1)在目前众多的陆面模式中,对于辐射过程的描述有的是采用经验公式或者根据观测资料简单给定反照率,或者采用二流模式。而在上面的介绍中我们也表述了二流模式还存在不少的缺陷,而经验公式一般也需要在特定条件下应用。

(2)目前冠层辐射传输模型很多,但是真正能够应用到陆面模式中的却不多。

(3)冠层辐射过程非常复杂,精确描述也存在很多困难,为了方便求解,模型建立时设定了一些并不

符合实际的假设条件。

(4) 缺乏冠层辐射传输研究所需要的观测资料,影响冠层传输模式的发展,模型模拟能力的验证做的很不够。

(5) 根据不同植被几何结构和光学性质,对辐射过程的某些参量的参数化采取不同的方式,而在陆面模式中对于不同的植被都采用一种辐射方案。

(6) 目前利用的几种辐射方案,一般都适用于表面水平平均一的植被,而对稀疏植被并不合适。

因此,在以后的研究中还需要做以下工作:

(1) 现有的模型中对于辐射过程有一些不合理的假设,所以需要进一步完善和改进现有的辐射传输方案,使它更符合实际情况。

(2) 利用多种手段获得更多的冠层观测资料,加强对模型的验证工作。卫星等遥感探测技术,光谱仪的观测可以使我们得到较全面的数据。

(3) 针对不同类型的植被可以采用合适的辐射传输方案,所以需要做一些敏感性试验,考察辐射传输方案对不同植被的模拟能力。

(4) 目前运用在陆面模式中的冠层辐射传输模式主要针对水平均匀植被冠层,考虑植被参数在垂直方向的变化,对于稀疏植被模拟并不合适。而几何光学模型对于稀疏植被有一定的适用性,但是并没有应用在陆面模式中,所以如何利用几何光学模型也是以后陆面过程冠层辐射传输模式重要的研究工作。

(5) 研究冠层辐射传输模式的目的之一是为了研究光合作用和碳循环,所以这也是未来研究的目标之一。

参考文献

- [1] Ji J J, Hu Y C. A simple land surface processes model for use in climate study [J]. *Acta Meteor. Sinica.*, 1989, 3(3): 344-353.
- [2] 茅宇豪,刘树华. 不同下垫面空气动力学参数的研究[J]. *气象学报*, 2006, 64(3): 325-334.
- [3] 孙菽芬,金继明,吴国雄. 用于 GCM 耦合的积雪模型的设计[J]. *气象学报*, 1999, 57(3): 293-300.
- [4] 孙菽芬,金继明. 陆面过程模式研究中的几个问题[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(增刊): 50-57.
- [5] 刘树华,邓毅,胡非,等. 森林下垫面陆面物理过程及局地气候效应的数值模拟试验[J]. *气象学报*, 2005, 63(1): 1-12.
- [6] 周文艳,罗勇,郭品文. 10 层陆面过程模式及其 Offline 独立试验[J]. *南京气象学院学报*, 2005, 28(6): 730-738.
- [7] 孙菽芬. 陆面过程研究的进展[J]. *新疆气象*, 2002, 25(6): 1-6.
- [8] 张宇,吕世华. 藏北高原陆面过程的模拟试验[J]. *大气科学*, 2002, 26(3): 387-393.
- [9] Yang Xiaosong, Lin Chaohui, Dai Yongjiu, et al. Validation of IAP94 Land Surface Model over the Huaihe River Basin with HUBEX field experiment data [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18(1): 139-154.
- [10] 徐枝芳,龚建东,王建捷,等. 地面观测资料同化初步研究[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(增刊): 1-10.
- [11] 胡小明,刘树华. 山丘地形的陆面过程及边界层特征的模拟[J]. *应用气象学报*, 2005, 16(1): 13-23.
- [12] Fu Q, Liou K N. On the correlated k-distribution method for radiative transfer in nonhomogeneous atmospheres [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1992, 49: 2139-2156.
- [13] Fu Q, Liou K N. Parameterization of the radiativ properties of cirrus clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1993, 50: 2008-2025.
- [14] Gu Y, Liou K N. Interactions of radiation, microphysics, and turbulence in the evolution of cirrus clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 2000, 57: 2463-2479.
- [15] Gu Y, Liou K N. Radiation parameterization for three-dimensional inhomogeneous cirrus clouds: Application to climate models [J]. *J. Climate*, 2001, 14: 2443-2457.
- [16] 黄洪峰. 土壤植物大气相互作用原理及模拟研究[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 1-43.
- [17] 徐希孺. 遥感物理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [18] 李云梅. 植被辐射传输理论与应用[M]. 南京: 南京师范大学出版社, 2005.
- [19] Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. Biosphere-atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model [R]. NCAR/TN387+STR, 1993.
- [20] Idso S B, deWit C T. Light relations in plant canopies [J]. *Appl. Opt.*, 1970, 9: 177-184.
- [21] Anderson M C. Stand structure and light penetration. II. A Theoretical Analysis [J]. *Appl. Ecol.*, 1966, 3: 41-54.
- [22] Lemeur R, Blad B L. A critical review of Light models for estimating the short-wave radiation regime of plant canopies [J]. *Agric. Meteor.*, 1974, 14: 255-286.
- [23] Cowan I R. The interception and absorption of radiation in plant stands [J]. *J. Appl. Ecol.*, 1968, 5: 367-379.
- [24] Myneni R B, Ross J, Asrar G. A review on the theory of photon transport in leaf canopies [J]. *Agric. For. Meteor.*, 1989, 45: 1-153.
- [25] Myneni R B, Gutschick V P, Asrar G. Photon transport in vegetation canopies with anisotropic scattering [J]. *Agric. For. Meteor.*, 1988, 42: 1-40.
- [26] Ross J. The radiation regime and the architecture of plant stands [M]. Dr. W. Junk Publish, Netherlands, 1981.
- [27] Ross J. Radiative transfer in plant communities [G]// *Vegetation and the Atmosphere*. Academic Press, 1975: 13-52.

- [28] Li X, Strahler A H. Geometric-optical bidirectional reflectance modeling of the diacrete-crown vegetation canopy [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1992, 30:276–292.
- [29] Strahler A H, Jupp D L B. Modeling directional reflectance of forests and woodland using Boolean models and geometric optics [J]. Remote Sens. Environ., 1990, 34:153–166.
- [30] Kuusk A E. Scattering of direct solar radiation by the crown of a tree [J]. J. Remote Sensing, 1990, 7(2):361–370.
- [31] Goudriaan J. Crop Micrometeorology: A Simulation Study. Pudoc Publish [M], Wageningen, Netherlands, 1977.
- [32] Ross J, Marshak A. Calculation the canopy bi-directional reflectance using the Monte Carlo method [J]. Remote Sens. Environ., 1988, 24:213–225.
- [33] Norman J M. Simulation of microclimate [G]// Hatfield J L, Thompson I J. Biometeorology Integrated Pest Management. New York: Academic Press, 1982:62–99.
- [34] Dai Qiudan, Sun Shufen. A generalized layered radiation transfer model in the vegetation canopy [J]. Advanced in Atmospheric Science, 2006, 23(2):243–257.
- [35] 戴秋丹. 陆面过程中冠层辐射传输模式研究(D). 北京:中国科学院, 2004.
- [36] Dickinson R E. Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance [J]. Advances in Geophysics, 1983, 25:305–353.
- [37] Liang S, Strahler A H. Four-stream solution for atmospheric radiative transfer over an non-lambertian surface [J]. Appl. Opt., 1994, 33(5): 745–753.
- [38] Krook M. On the solution of equations of transfer [J]. Astronomical Journal, 1955, 122:488–497.
- [39] Kuusk A. The angular distribution of reflectance and vegetation indices in barley and cover canopies [J]. Remote Sens. Environ., 1991, 37:143–151.
- [40] Kuusk A A. Fast Invertible Canopy Reflectance Model [J]. Remote Sens. Environ., 1995, 51: 342–350.
- [41] Kuusk A. A multispectral canopy reflectance model [J]. Remote Sens. Environ., 1994, 50:75–82.
- [42] Suits G H. The calculation of the directional reflectance of vegetative canopy [J]. Remote Sens. Environ., 1972, 2:153–166.
- [43] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the Soil model [J]. Remote Sens. Environ., 1984, 16:125–141.
- [44] Antyufeev V S, Marshak A L. Inversion of Monte Carlo model for estimating vegetation canopy parameters [J]. Remote Sens. Environ., 1990, 33:201–209.
- [45] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004: 313–327.
- [46] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models [J]. J Atmos. Sci., 1986, 43(6):505–531.
- [47] Henderson-Sellers A, Yang Z L, Dickinson R E. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1993, 74(7):1335–1349.
- [48] Henderson-Sellers A, Pitman A J, Love P K, et al. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS): phases 2 and 3 [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1995, 76(4): 489–503.
- [49] Sellers P J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration [J]. Int. J. Remote Sens., 1985, 6(8): 1335–1372.
- [50] Liou K N. A simple formulation of the delta four stream approximation for radiative transfer parameterizations [J]. J. Atmospheric Science, 1988, 45(13): 1940–1947.
- [51] 周文艳, 郭品文, 罗勇. 陆面模拟中植被四流辐射参数化方案研究[J]. 气象学报, 2008, 66(待发表)

Review of Advances in Parameterization Schemes for Short-Wave Canopy Radiative Transfer in Land Surface Process Models

Zhou Wenyan¹ Guo Pinwen¹ Luo Yong²

(1 Nanjing University of Information of Science & Technology, Nanjing 210044; 2 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: The importance of developing the short-wave canopy radiative transfer models in land surface process and air-land interaction researches is described. A detailed review is made of advances in short-wave radiative transfer models. In combination with the current representative short-wave radiative transfer models in the land surface process research field, the problems needing further exploration are pointed out and the developmental tendencies of land surface process models are discussed.

Key words: land surface process; radiation within canopy, radiative transfer model