

# 陆面过程中冠层四流辐射传输模式的模拟性能检验<sup>\* 1</sup>

周文艳<sup>1,2</sup> 罗 勇<sup>1,2</sup> 李云梅<sup>3</sup>  
ZHOU Wenyan<sup>1,2</sup> LUO Yong<sup>1,2</sup> LI Yunmei<sup>3</sup>

1. 中国气象局气候研究开放实验室,北京,100081
2. 国家气候中心,北京,100081
3. 南京师范大学,南京,210046

1. *Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2. *National Climate Center, Beijing 100081, China*

3. *Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China*

2008-01-18 收稿,2008-11-14 改回.

**Zhou Wenyan, Luo Yong, Li Yunmei. 2010. Validation of the radiative transfer parameterization scheme in land surface process model. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(1): 12–18**

**Abstract** The experiments were carried out to evaluate the simulations of the four-stream radiative transfer scheme within the vegetation canopy. The numerical results by use of vegetation canopy field observation of Chinese Zhejiang university and two models indicate that the simulations modeled by the two-stream and the four-stream models are mostly consistent in the visible band with small leaf scattering. The simulations of two models are close to canopy albedo observation in this band. This indicates that the two-stream model can simulate the canopy albedo very well and the improvement of four-stream model is limited. The results also show that the albedo of the canopy modeled by the four-stream model is greatly improved than that of the two-stream model in the NIR band.

To evaluate the simulations of the four-stream model for solar radiative flux reflected by land surface in land surface model, the four-stream model and the two-stream model were coupled into land surface process model. Two numerical experiments were carried out by use of BERMS open site and BERMS forest site observation in Canada from the Second Snow Model Inter-comparison Project. The results indicate that the simulated solar radiative flux reflected by land surface for four-stream model is closest to observation beyond three radiative schemes coupled into land surface process model. The results proved the four-stream radiative transfer scheme can gain access to accurate canopy albedo. The tests indicate that the simulation of the land surface process model coupled four-stream model is the best among other radiative transfer models.

**Key words** Four-stream radiative, Transfer model, Evaluate, Simulation, Land surface process, Canopy

**摘 要** 利用实际观测资料检验新发展的植被冠层四流辐射传输模式的模拟性能。将浙江大学田间观测数据用于模式试验,其结果表明:在可见光波段,因叶片散射率值较小,四流模式和二流模式模拟结果差别不大,模拟的冠层反照率都接近观测值。这表明在可见光波段,二流模式已经能够较好模拟冠层反照率,四流模式能够提高的精度范围有限;在近红外波段,因叶片散射率值较大,两个模式模拟结果差别较明显,四流模式模拟的冠层反照率相对二流模式的模拟结果更接近观测值。利用第2次雪模式比较计划 SNOWMIP 资料和改进的 10 层陆面模式 BATS 进行耦合试验,将四流模式以及二流模式均耦合到该陆面模式中,其目的是为考察四流模式对陆面模式模拟地表反射太阳短波辐射通量的影响。耦合后得到的结果与 SNOWMIP 中加拿大 BERMS 草地站和森林站的观测资料进行了对比。对比结果表明,采用四流模式、二流模式、BATS 原辐

\* 资助课题:国家自然科学基金项目(40375026)。

作者简介:周文艳,从事陆面过程模拟研究。Email:zhouwy73@cma.gov.cn。

射传输模式后,耦合四流模式的陆面模式模拟地表反射太阳短波辐射通量最接近观测值。说明采用四流模式能够改善陆面模式对地表反射太阳短波辐射通量的模拟。

**关键词** 四流辐射,传输模式,检验,模拟,陆面过程,冠层

**中图法分类号** P404 P435<sup>+1</sup>

## 1 引言

地表由多种下垫面组成,其中植被占了陆地表面积的一半左右。植被冠层内叶片对太阳短波辐射的拦截、吸收、反射、透射过程将直接影响地表能量的分配,决定地表的反照率。因此,真实描述太阳辐射在植被中的传输过程,可以改善陆面模式对地表反照率的模拟,从而得到精确的地表反射净短波辐射通量值。这对于长时间积分的气候模式的模拟性能的提高将会起到重大作用。

已有的植被辐射传输模式(Liang, et al,1996; Tian, et al,2007; Norman, et al,1975; Ross,1975,1981; Dai, et al, 2005, 2006)虽然在精度上可以满足陆面模式的要求,但是由于这些模式在建模过程中需要的一些参数缺乏详细的观测资料,因此,不能广泛应用到陆面模式中;而目前在陆面模式中广泛使用的二流模式精度不高,因此,仍然需要建立一个精度较高而且可以普遍应用到陆面模式中的辐射传输参数化方案。通过数年研究,我们在冠层二流辐射传输模式(简称二流模式)的基础上发展了冠层四流辐射传输模式(简称四流模式),它承继了二流模式的计算高效的特点,模式中需要的一些参数参照二流模式设定,因此可以广泛应用到陆面模式中,该模式精度较高,将对提高模式性能起到一定作用。

由于验证资料的缺乏,在植被辐射传输模式建立之后,研究者多把模式结果与认为较精确的辐射模式模拟结果进行对比,分析新发展模式对模拟精度的提高范围。依照这种模式间对比方法,四流模式和二流模式模拟的比较结果表明四流模式在精度上比二流模式有较大提高(周文艳等,2008),因此,可以认为四流模式对二流模式有改进作用。但模式对实际物理量的模拟性能如何,还需要通过实际观测试验进行检验。本文通过使用1999年浙江大学田间观测资料和SNOWMIP资料来检验四流模式的模拟性能,检验结果说明新的四流辐射传输方案能够得到更高的计算精度,有益于提高气候模式整体的模拟精度。

## 2 模式介绍

本文采用了四流模式、二流模式及陆面模式BATS中的原辐射传输参数化方案。

### 2.1 冠层二流和四流辐射传输模式

二流模式是20世纪80年代Dickinson(1983)发展起来的植被冠层辐射传输参数化方案,现在许多陆面模式中都采用二流模式来计算植被反射的太阳短波辐射通量。

四流模式(周文艳等,2008)就是求解冠层辐射传输基本方程,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。冠层辐射传输基本方程为

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

式(1)中  $G$ -函数为叶面积消光系数、 $P(\mu_i)$  为散射相函数、 $K$  为直射光消光系数、 $\tau$  为叶面积指数、 $\omega$  为叶片散射率、 $\mu_i$  为高斯积点、 $a_i$  为权重值( $i$ 取1,2)、 $\pi I_0$  为太阳直射消光系数由大气模式或观测给定。

Goudriaan(1977)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  $X_L$  的函数关系式表示为

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

其中  $\phi_1 = 0.5 - 0.633X_L - 0.33X_L^2$ ,  $\phi_2 = 0.877(1 - 2\phi_1)$ 。 $\mu$  是入射光线太阳天顶角的余弦。 $X_L$  为叶角分布与球形分布的偏离指数,与叶子平均叶倾角关系为

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

在陆面模式中  $X_L$  由观测给定,从而可以计算出叶子平均叶倾角  $\bar{\lambda}$ 。

冠层散射相函数  $P(\mu_i)$  采用 Henyey-Greenstein 相函数。

即

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

根据 Norman 等(1975) 的推论可得到式中参数  $g$

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

$\rho$  为叶片反射率、 $t$  为叶片透射率, 在模式中均由观测资料给定。

$$\text{直射光消光系数 } K = \frac{G(\mu)}{\mu}。$$

在方程(1)中各项参数化后, 考虑冠层顶部和底部边界条件, 可求得冠层向上及向下辐射强度以及整个冠层的反照率。

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。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 BATS 中植被辐射传输方案一致, 四流模式考虑可见光和近红外两个波段, 并且短波辐射以直射光和散射光两种方式入射, 因此四流模式能够替换原有的辐射参数化方案, 耦合到陆面模式 BATS 中。

## 2.2 BATS 陆面模式中原辐射传输参数化方案介绍

论文采用的陆面模式是改进的 10 层陆面过程模式 BATS, 它对于地面短波反照率的计算仍是 Dickinson(1993)使用的方法。

地表反照率计算公式为

$$F = (1 - \sigma_f)A_{\text{LBG}} + \sigma_f F_{\text{leaf}} \quad (6)$$

其中  $F_{\text{leaf}}$  是叶子的散射系数, 在 BATS 使用手册 (Dickinson, 1986, 1993) 中分别列出了各类植被叶片在可见光和近红外波段的反照率值。

式(6)中  $A_{\text{LBG}}$  为裸地对可见光的反照率, 表达式为

$$A_{\text{LBG}} = A_{\text{LBGO}} + \Delta\alpha_g(S_{\text{sw}}) \quad (7)$$

式中  $A_{\text{LBGO}}$  是饱和土壤反照率, 数值在土壤参数表中列出(见 BATS 使用手册)。

式(7)中  $\Delta\alpha_g(S_{\text{sw}})$  与表层土壤含水量  $S_{\text{sw}}$  和表层土壤深度  $Z_1$  有关。即

$$\Delta\alpha_g(S_{\text{sw}}) = 0.01(11 - 40S_{\text{sw}}/Z_1) \quad (8)$$

对每一模式格点区域及每积分时间步长定义  $\sigma_f$  为植被覆盖率。

可见在 BATS 原辐射传输参数化方案中, 植被冠层反照率就等于叶片散射率, 没有考虑植被冠层对太阳辐射的吸收、散射、透射等过程对冠层反照率的影响, 模拟方案方法简单但是描述方式不尽合理。

## 3 四流模式模拟能力验证试验

周文艳等(2008)从理论上证明了四流模式在精度上比二流模式有较大提高, 为了更好地说明四流模式的改进效果, 衡量四流模式对实际物理量的模拟性能, 本文利用 1999 年浙江大学田间观测资料对四流模式进行检验。

需要说明的是用来检验植被辐射传输模式的资料除了要求有冠层辐射观测数据外, 还需要有植被冠层几何结构参数和光学性质参数的测量数据, 而目前综合这两方面的资料非常缺乏, 导致用实际观测资料来衡量植被辐射传输模式计算精度方面的研究工作非常少。

1999 年田间观测试验(李云梅, 2005)提供了冠层反照率、叶面积指数、叶片反射率和透射率等观测数据。试验地点(30°14'N, 120°10'E)。光谱数据的测量选用 FieldSpec 光谱仪, 波段值为 350—1050 nm, 光谱分辨率为 3 nm。冠层反射率的测量选择晴朗无风的天气, 在田间测量冠层垂直反射率。试验品种是水稻, 平均叶倾角取 75°。

田间观测试验选择了 1999 年 8 和 9 月之间的 4 天进行观测。在验证试验中尽量使四流模式与二流模式的驱动条件与观测条件一致。

从 1999 年 8 月 19 日的验证结果(图 1)可以看出, 在可见光波段(400—720 nm), 两个模式对冠层反照率的模拟结果基本一致, 只是比观测值略偏低, 而在近红外波段(720—940 nm), 四流模式和二流模式对冠层反照率的模拟结果都比实测值偏低, 而四流模式模拟的冠层反照率更接近实测值。

8 月 28 日的验证结果(图 1b)表明, 在可见光波段两个模式对冠层反照率的模拟结果基本一致, 但是都比观测值略偏低, 而在近红外波段, 四流模式模拟的冠层反照率结果略高于实测值, 而二流模式模拟结果比实测值明显偏低, 在这一波段四流模式对冠层反照率的模拟结果明显比二流模式模拟结果好。

9 月 11 日(图 1c)两个模式在可见光波段的模拟结果表明, 四流模式对冠层反照率的模拟结果没有二流模式模拟的好, 我们并不能很好得解释这个

现象,而在近红外波段,四流模式和二流模式的模拟结果都比实测值明显偏高,四流模式的模拟结果接近实测值。

9月24日(图1d)的验证结果表明,在可见光波段,二流模式对冠层反照率的模拟结果偏高,四流模式的模拟结果偏低,但是四流模式的模拟结果比二流模式的模拟结果略有改进。

本试验结果也表明,在可见光波段,叶片散射率较小,所以二流模式和四流模式模拟结果差别不大,两个模式模拟结果均接近实测值;在近红外波段,叶

片散射率较大,两个模式模拟结果差别较大,而四流模式模拟结果相对二流模式在这一波段改进效果明显,这与以往理论研究结果(周文艳等,2008)一致。另外田间观测试验是在8、9月间进行的,这期间是植被发育生长期,试验田被均匀水稻覆盖,四流模式建立的条件与实际条件较吻合,模拟结果较二流模式有较大提高。而由于冠层辐射传输过程的复杂性,冠层辐射传输模式在建立过程中不可避免地存在一些假设,造成两个辐射模式模拟结果与实际观测值有一定误差。

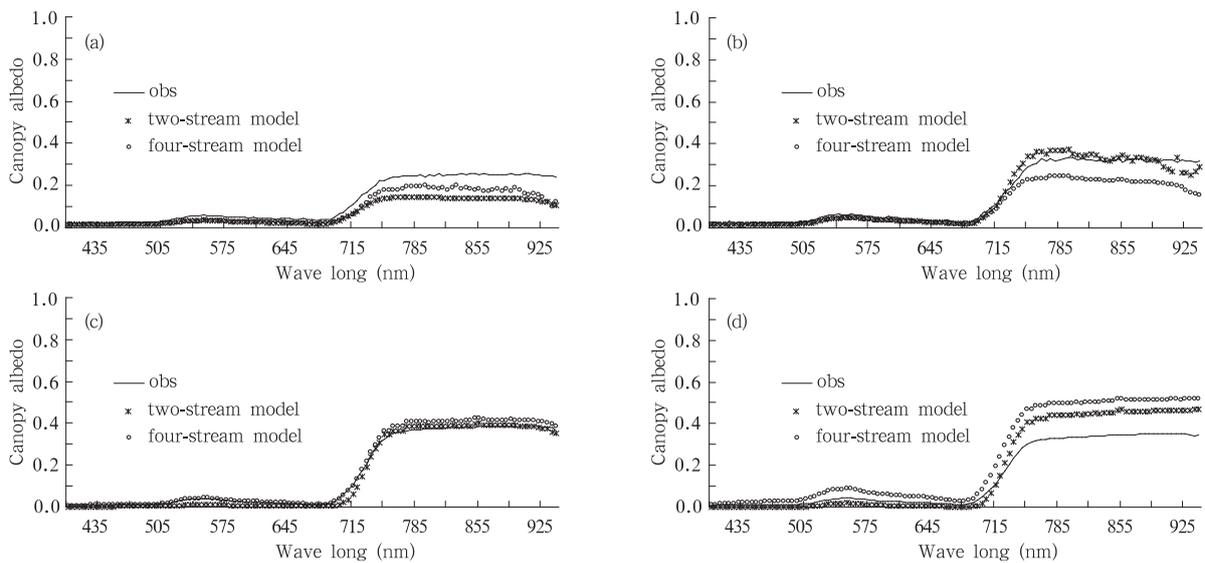


图1 四流模式和二流模式模拟的冠层反照率与田间观测冠层反照率

(a. 8月19日, b. 8月28日, c. 9月11日, d. 9月24日)

Fig. 1 The simulated albedos of canopy by two models comparing to field observations

(a. 19 August, b. 28 August, c. 11 September, d. 24 September)

#### 4 耦合试验

发展四流模式的最终目的是为了改进陆面过程模式中的地表辐射参数化方案,提高陆面反照率的计算精度,改善陆面模式对地表辐射通量的模拟能力。因此为了衡量四流模式对陆面过程模式模拟性能的影响,我们将四流模式耦合到改进的陆面模式BATS中,同时将二流模式也耦合到同一陆面模式中,与BATS采用原辐射方案的模拟结果进行对比。本文利用改进的10层陆面模式BATS以及SNOWMIP中加拿大BERMS草地站和森林站的观测资料(史学丽,2006)进行耦合试验。

SNOWMIP是针对存在植被的雪过程模拟和

表面能量平衡的模式间比较计划。计划采用单点试验,进行了针对反照率、长波辐射、新雪密度和土壤热通量的敏感性试验。计划提供了地表向上反射的太阳短波辐射量的观测值。

##### 4.1 加拿大BERMS草地站模拟试验

耦合试验1利用加拿大BERMS草地站的观测资料驱动陆面模式BATS。试验点位于(53°55'N, 104°42'W)。模式需要输入的气象要素强迫场包括气温、气压、比湿、降水及辐射等资料,在观测期间气温、气压、风速、比湿等每半时观测1次,资料比较完整。积分时间从2003年9月1日到2004年4月30日。植被主要是矮草,土壤类型是沙壤土(94%沙, 3%壤土),土壤颜色是中等偏亮。

试验 1 假定叶片散射是各向同性, 叶片为球形分布。虽然在自然界中植被叶子正反面光学性质差别较大, 但由于实验数据的限制, 在实验中仍然假设叶子正反面光学性质一致。

陆面模式模拟的地表反射短波辐射通量与观测值(图 2)表明, 采用 3 种辐射参数化方案后, 陆面模式模拟地表反射短波辐射通量与实际观测的地表反射短波辐射通量的变化趋势都基本一致, 但是模拟结果与实际观测资料都有一定距离, 模拟地表反射短波辐射通量都较观测值偏低。由于地面反射的太阳短波辐射主要由表面反照率决定, 而陆面模式计算的地表反照率直接决定了地表反射短波辐射通量的多少, 因此模拟地表反射短波辐射通量偏低是由于模拟的地面反照率与实际值存在一定的偏差, 使地面反射的太阳辐射过少, 而地面吸收的短波辐射增加。

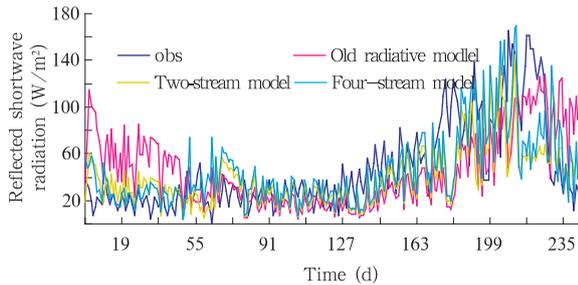


图 2 加拿大 BERMS 草地站耦合二流和四流辐射方案的陆面模式模拟地表反射短波辐射

Fig. 2 The simulations of land surface model for the reflected solar radiative flux by land surface beyond three radiative schemes coupled into land surface process model in BERMS open site

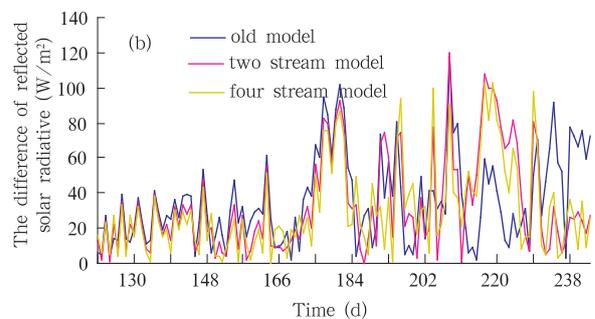
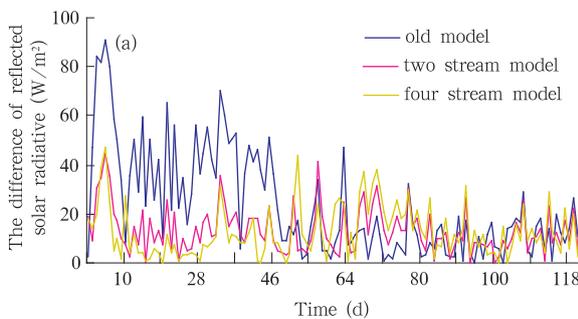


图 3 加拿大 BERMS 草地站耦合二流和四流辐射方案的陆面模式模拟地表反射短波辐射通量与观测差值 (a. 2003 年 9 月 1 日至 12 月 31 日, b. 2004 年 1 月 1 日至 4 月 30 日)

Fig. 3 The difference of simulations of land surface model for the reflected solar radiative flux by land surface between two radiative schemes coupled into land surface process model and observation in BERMS open site

(a. 1 September - 31 December 2003, b. 1 January - 30 April 2004)

陆面模式模拟地表反射短波辐射通量偏低, 会造成模拟的地温偏高, 可能影响模式对感热、潜热等物理量的模拟, 但由于比较计划并没有提供感热、潜热等数据, 所以这里不能分析模拟地表反射短波辐射量的变化对感热、潜热模拟的影响。耦合 3 种辐射方案的陆面模式模拟地表反射短波辐射通量与观测值的差值(图 3a 和 3b)表明, 耦合四流模式后, 大体上地表反射短波辐射通量的模拟值与观测值的增量最小, 二流次之, 采用原辐射方案, 地表反射短波辐射通量的模拟结果与观测值差距最大。说明采用四流和二流模式时, 陆面模式模拟地表反射的短波辐射通量均比采用原辐射方案更接近观测值, 而采用四流辐射方案, 陆面模式模拟地表反射的短波辐射通量最接近观测值。

#### 4.2 加拿大 BERMS 森林站模拟试验

耦合试验 2 是利用 2003 年 9 月 1 日到 2004 年 4 月 30 日加拿大 BERMS 森林站的观测资料进行耦合试验。试验点位于 ( $53^{\circ}57'N$ ,  $104^{\circ}39'W$ )。模式需要输入的气象要素强迫场包括气温、气压、比湿、降水及辐射等资料。观测期间气温、气压、风速、比湿等也是每半小时观测 1 次, 资料比较完整。植被主要是森林, 土壤类型是沙壤土 (94% 沙, 3% 壤土), 颜色是中等偏亮。

同样由于没有叶片散射性质的观测资料, 仍然假设叶子表面反射是同性散射, 叶子正反面光学性质一致。在试验中假设叶片倾角为  $70^{\circ}$ , 且叶片反射率和透射率相等。

从 BERMS 森林站的模拟结果与观测值的曲线(图 4)可以看出, 采用 3 种辐射方案后, 陆面模式模

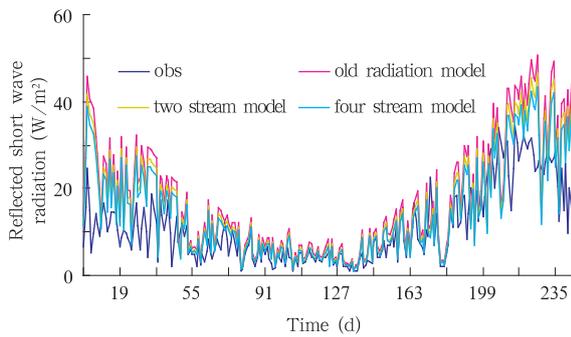


图4 加拿大 BERMS 森林站耦合二流和四流辐射方案的陆面模式模拟地表反射短波辐射结果比较  
Fig.4 The difference of simulations of land surface model for the reflected solar radiative flux by land surface between two radiative schemes coupled into land surface process model and observation in BERMS forest site

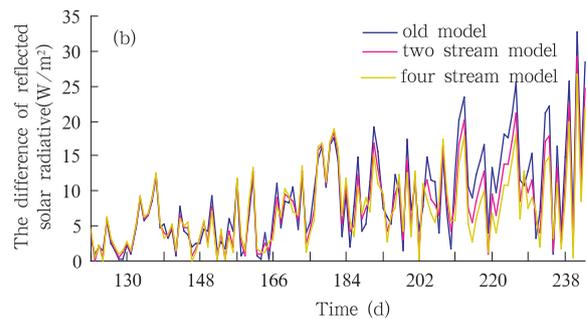
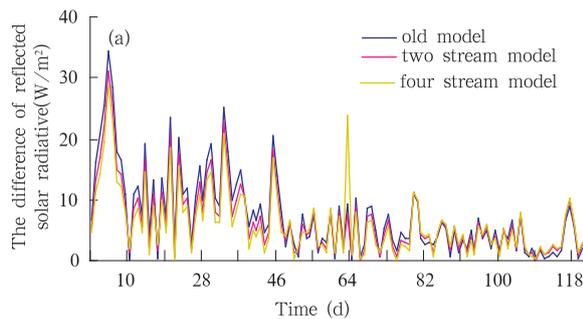


图5 加拿大 BERMS 森林站耦合二流和四流辐射方案的陆面模式模拟地表反射短波辐射通量与观测差值  
(a. 2003年9月1日至12月31日;b. 2004年1月1日至4月30日)

Fig.5 The difference of simulations of land surface model for the reflected solar radiative flux by land surface between two radiative schemes coupled into land surface process model and observation in BERMS forest site  
(a. 1 September - 31 December 2003, b. 1 January - 30 April 2004)

案,阐述了四流模式能够比较合理地描述植被对太阳短波辐射的拦截、散射、反射、透射等过程。在将四流模式耦合到陆面模式之前,本文利用浙江大学试验田的田间观测试验资料对它进行了验证,结果表明,在可见光波段,四流模式和二流模式对冠层反照率的模拟结果均接近实际观测值,而在近红外波段,四流模式和二流模式的模拟结果存在非常明显的差别,四流模式模拟结果相对于二流模式有明显改进。浙江大学田间观测试验是在8、9月间进行的,这期间是植被发育生长期,试验田被均匀水稻覆盖,植被四流模式建立的条件与实际条件较吻合,模拟结果较二流模式有较大提高。而由于冠层辐射传输过程的复杂性,冠层辐射传输模式在建立过程中不可避免地存在一些假设,造成两个辐射模式模拟

拟地表反射的短波辐射通量也都与地表反射短波辐射通量观测值的变化趋势基本一致,而陆面模式模拟地表反射短波辐射通量偏高,表明在试验2中陆面模式模拟地表反照率都偏大。耦合3种辐射参数化方案后,陆面模式模拟地表反射短波辐射通量与观测值的增量(图5a和5b)最小,二流次之,采用原辐射方案,地表反射短波辐射通量的模拟值与观测值差距最大。表明采用四流和二流辐射方案,能改善陆面模式对地表反射短波辐射通量的模拟,并且采用四流辐射方案时陆面模式能得到精确的地表反射短波辐射通量。

### 5 结论

本文简要地介绍了3种陆面辐射传输参数化方

结果与实际观测值有一定误差。

在加拿大 BERMS 草地站和森林站进行的耦合试验结果表明,采用3种辐射方案后,陆面模式模拟地表反射短波辐射通量都与观测的地表反射短波辐射通量的变化趋势基本一致,陆面模式采用四流和二流辐射方案时模拟地表反射短波辐射通量都比采用原辐射方案结果要好,而采用四流辐射方案的陆面模式模拟结果更接近实际观测值。说明四流模式和二流模式模拟的冠层反照率比原辐射方案接近实际冠层反照率,而四流模式的计算结果更接近真实值。SNOWMIP 计划提供的资料是在冬季观测的,植被表面有积雪覆盖,而四流模式以及二流模式均假设叶片正反面光学性质一致,使得两个模式模拟的辐射在植被中的传输状况与植被冬季实际情况不

太一致,从而造成陆面模式模拟出的地表反射短波通量与观测值有一定差距。

## 参考文献

- 戴秋丹. 2004. 陆面过程中冠层辐射传输模式研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 97pp
- 黄洪峰. 1997. 土壤植物大气相互作用原理及模拟研究. 北京: 气象出版社, 1-43
- 李云梅. 2005. 植被辐射传输理论与应用. 南京: 南京师范大学出版社, 1-223
- 罗勇. 2001. 国家气候中心大气环流模式基本原理和使用说明-陆面过程. 北京: 气象出版社, 99-132
- 史学丽. 2006. 雪模型比较计划 SNOWMIP. 气候变化研究进展, 2(5): 254
- 徐希孺. 2005. 遥感物理. 北京: 北京大学出版社, 25-160
- 张宇, 吕世华. 2002. 藏北高原陆面过程的模拟试验. 大气科学, 26(3): 387-393
- 周文艳, 罗勇, 郭品文. 2005. 10层陆面过程模式及其 Off-line 独立试验. 南京气象学院学报, 28(6): 730-738
- 周文艳, 郭品文, 罗勇等. 2008. 陆面模拟中植被辐射参数化研究. 气象学报, 66(3): 359-370
- 张晶, 丁一汇. 1998. 一个改进的陆面过程模式及其模拟试验研究. 气象学报, 56(1): 1-19
- Dai Qiudan, Sun Shufen. 2006. A generalized layered radiation transfer model in the vegetation canopy. *Adv Atmos Sci*, 23(2): 243-257
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J, et al. 1986. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme(BATS) for the NCAR Community Climate Model. NCAR Techn. Note-275+STR
- Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. 1993. Biosphere-atmosphere Transfer Scheme(BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR/TN387+STR
- Dickinson R E, 1983. Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance. *Adv Geophys*, 25: 305-353
- Goudriaan J. 1977. *Crop Micrometeorology: A Simulation Study*. Wageningen, The Netherlands: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 249pp
- Henderson-Sellers A, Yang Z L, Dickinson R E. 1993. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes. *Bull Amer Meteor Soc*, 74(7): 1335-1349
- Henderson-Sellers A, Pitman A J, Love P K, et al. 1995. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes(PILPS): phases 2 and 3. *Bull Amer Meteor Soc*, 76(4): 489-503
- Li J, Dobbie J S. 1998. Four-Stream isosector approximation for solar radiative transfer. *J Atmos Sci*, 55: 558-567
- Li J, Ramaswamy V. 1996. Four-stream spherical harmonic expansion approximation for solar radiative transfer. *J Atmos Sci*, 53(8): 1174-1186
- Norman J M, Jarvis P G. 1975. Photosynthesis in Sitka Spruce(*Picea Sitchensis* (Bong.) Carr.) V. radiation penetration theory and a test case. *J Appl Ecol*, 12: 839-878
- Ross J. 1975. Radiative transfer in plant communities // Monteith J L. *Vegetation and the Atmosphere*. Academic Press, 13-52
- Ross J. 1981. *The Radiation Regime and the Architecture of Plant Stands*. The Netherlands: Dr W Junk Publish, 392pp
- Sellers P J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int J Remote Sense*, 6: 1335-1372
- Liang S, Townshend J R G. 1996. A parametric soil BRDF model: a four stream approximation for multiple scattering. *Int J Remote Sensing*, 17(7): 1303-1315
- Tian Yuhong, Robert E Dickinson, Zhou Liming. 2007. Four-stream isosector approximation for canopy radiative transfer. *J Geophys Res* 112(2): 1-12
- Yang Xiaosong, Lin Chaohui, Dai Yongjiu, et al. 2001. Validation of IAP94 land surface model over the Huaihe river basin with HUBEX field experiment data. *Adv Atmos Sci*, 18(1): 139-154