

# 农牧交错带陆面过程的数值模拟研究

赵海英<sup>1,2,4</sup> 郭振海<sup>2</sup> 张宏昇<sup>3</sup> 何金海<sup>1</sup>

1 南京信息工程大学大气科学系, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

3 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

4 山西省气象台, 太原 030006

**摘要** 利用 CLM (Common Land Model) 模式对我国内蒙古奈曼旗农牧交错带沙漠和农田两种不同典型下垫面的陆面过程进行了数值模拟试验, 并与外场试验观测结果进行了对比分析。结果表明: 无论是沙漠还是农田试验, CLM 都能够较好地模拟其辐射通量和土壤中的热传导特征, CLM 的模拟结果能够真实地再现试验期间土壤热传导过程对天气过程的响应。相比而言, 模式对沙漠地区长波辐射通量和干燥时期短波辐射通量的模拟结果好于农田, 其原因可能是因为农田下垫面植被及土壤特征较沙漠复杂, 有着很大的不确定性, 造成了农田地表反照率和温度模拟的偏差。而对农田热传导的模拟结果好于沙漠, 反映了 CLM 对含水量较大、持水力较强的农田下垫面的热传导模拟能力较好, 而对含水量较小、持水力较弱的沙漠下垫面的热传导模拟能力相对较差。

**关键词** 陆面过程 CLM 模式 农牧交错带 热传导

**文章编号** 1006-9585 (2006) 04-0535-11 **中图分类号** P435 **文献标识码** A

## Numerical Simulation Research of Land Surface Process in the Region between Cropland and Pasture

ZHAO Hai-Ying<sup>1,2,4</sup>, GUO Zhen-Hai<sup>2</sup>, ZHANG Hong-Sheng<sup>3</sup>, and HE Jin-Hai<sup>1</sup>

1 *Department of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

2 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029*

3 *Department of Atmospheric Science, College of Physics, Peking University, Beijing 100871*

4 *Weather Forecast Station of Shanxi Province, Taiyuan 030006*

**Abstract** In this paper, CLM (common land model) is introduced and numerical simulation test is carried out in desert and cropland respectively, and comparing analysis with observational data of corresponding sites is also made in the region between cropland and pasture in naiman of neimeng province in China. The results of this test show that CLM can effectively simulate the characteristics of radiation flux and thermal conduction of soil in both desert and cropland tests. Furthermore, the simulation of CLM can realistically reproduce the response of thermal conduction in soil to weather process which happened during the test period. But in comparing, as for the simulation of longwave radiation flux in whole test period and shortwave radiation flux in dry period, the result of desert test is better than that of the cropland test, because vegetation and soil feature of cropland is more complicated than those

**收稿日期** 2005-06-06 收到, 2006-04-19 收到修定稿

**资助项目** 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-218

**作者简介** 赵海英, 女, 1973 年出生, 硕士, 工程师, 主要从事陆面过程和地气相互作用研究。E-mail: zhy@mail.iap.ac.cn

of desert, and to specify them exactly is unpractical, which cause the simulative difference of albedo and land surface temperature in cropland test. But for the simulation of thermal conduction, the result of cropland test is better. This indicate that CLM has a better thermal conduction simulating ability to such land surface as cropland which has big water content and is good at maintain water while has a worse ability to those dry land surface as desert.

**Key words** land surface process, CLM model, region between cropland and pasture, thermal conduction

## 1 引言

陆面过程在气候系统中的重要性已成为各国气象学家的共识<sup>[1~7]</sup>。近 30 年来,由最初的简单桶式模式到当今包含土壤-植被-大气相互作用的第 3 代模式<sup>[8~10]</sup>,世界上已有陆面模式 30 多种,我国也有为数不少的陆面模式相继发展<sup>[11~16]</sup>。但是,尽管陆面模式本身发展迅速,其在应用上还是存在不少有待深入研究的问题。PILPS(国际陆面参数化方案比较计划)通过对 20 多种有代表性的陆面模式的比较发现,即使使用相同的大气强迫资料和相同的陆面参数,不同的陆面模式仍然会得出明显不同的模拟结果<sup>[17~21]</sup>。其原因一方面是由于各个参数化方案的差异造成,另一方面也因为模式数值计算过程的不同所引起<sup>[21]</sup>。而地气之间能量交换过程的计算和土壤中水热传导的过程是陆面模式中最为基本的内容之一,因此,如何深入研究和改进这两个方面的计算方案有重要的应用价值和理论意义。

影响土壤水热传导过程模拟效果的因素很多,下垫面特征的不确定性是主要因素之一。下垫面特征的不确定性对地表能量平衡有显著的影响,这些不确定性包括植被覆盖指数、下垫面土壤的水热传导特征等。植被覆盖指数直接影响下垫面反照率的计算,而土壤的水含量影响土壤内的热传导特征参数,进而影响土壤的热传导过程。

以外场观测试验为基础,在不同气候生态区和不同类下垫面区进行陆面过程数值模拟试验,是验证和发展陆面模式的有效途径<sup>[22]</sup>。为了研究,我国已相继开展了以黑河野外观测试验(HEIFE)和第二次青藏高原气象科学试验(TIBEX),淮河流域能量与水分循环试验(HUBEX)为代表的多个大型研究。但我国下垫面情况复杂,气候类型迥异,以上的研究还远远不够。内蒙古奈曼农牧交错带是干旱半干旱地区

的典型代表,其特殊的气候条件和陆面特性,在全球能量与水分平衡中具有重要的作用,直接影响着人类的生存环境。因此,在该地区开展陆面过程的数值试验,对认识干旱半干旱气候形成和变化的机理以及改进陆面参数化方案和提高气候预测能力都具有极为重要的意义。本文利用该地区的外场观测资料,引进目前世界上发展较为完善的陆面过程模式 CLM(Common Land Model),该模式的一个特点是对土壤中的水热传导过程进行了非常详细的描述<sup>[23,24]</sup>,目前对该过程进行如此详细描述陆面过程模式并不多见,例如,SIB 模式土壤分为 3 层<sup>[8]</sup>,BATS 则为 2 层<sup>[25]</sup>。本研究将利用 CLM,进行 off-line 数值模拟试验,以农牧交错地区的观测分析为基础,进行土壤热传导过程的研究,发现陆面模式的土壤热传导过程模块的不足以及可能的解决方案。

## 2 模式介绍

CLM 由 BATS<sup>[25]</sup>、IAP94<sup>[26]</sup> 和 LSM<sup>[27]</sup> 发展而来,综合了 3 个模式参数化方案的优点,引入了水文过程,逐步改进了一些物理过程的参数化,形成一个较为完善的模式研究和应用系统,并成功地应用于气候模式或区域气候模式中<sup>[28]</sup>。关于 CLM 的详细描述,可参阅模式用户手册,在此,仅介绍与本研究相关的土壤热传导相关的部分。

为了详细描述土壤内水热传导过程,在垂直方向上,CLM 分为 1 个具有光合-传导特征的植被层和 10 个深度不均匀的土壤层(土壤层深度由上而下依次为 1.75、2.76、4.55、7.5、12.36、20.38、33.6、55.39、91.33、113.7 cm),另外还有层数不固定(最多为 5 层)的雪层。在不同层次上,热传导方程为

$$\sum_{k=i,l,d} [\rho_k c_k \theta_k] \Delta z_j \frac{\partial T_j}{\partial t} =$$

$$R_{N,j} = [L_f M_{il} \Delta z] - H - LE + \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right]_{z_{h,j}}^{z_{h,j-1}},$$

式中，i、l、d 分别代表冰、液态水和土壤 3 种介质， $\rho_k$ 、 $c_k$ 、 $\theta_k$  分别为这 3 种介质的密度、热容量和各部分的相对体积， $\Delta z_j$  为层次厚度，方程左边的项表示能量收支，具体表现是温度对时间导数  $\partial T_j / \partial t$  的变化。方程右边第 1 项为净辐射，第 2 项为物态变化引起的能量收支，第 3 项为感热，第 4 项为潜热，第 5 项为热传导，其中  $\lambda$  为土壤热传导系数。方程中的净辐射由下式给出：

$$R_{N,j} = S^\downarrow - S^\uparrow + L^\downarrow - L^\uparrow,$$

式中， $S^\downarrow$ 、 $S^\uparrow$  分别为向下和向上短波辐射， $L^\downarrow$ 、 $L^\uparrow$  分别为向下和向上长波辐射。

### 3 观测概况

本文的资料来源于国家 973 研究计划“我国未来生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”

的大气边界层试验观测。试验观测站位于在内蒙古奈曼旗农牧交错带地区 (42.5°N, 119.5°E) 的沙漠和农田，观测项目主要包括辐射通量 (向上和向下的长、短波辐射)，感热通量，波恩比，风廓线，1、5、10、20、40、80 cm 6 个不同深度的土壤温度等资料。2001 年的观测时段为 7 月 21 日到 8 月 18 日共 28 天。

图 1 给出沙漠和农田 2 m 高度的部分观测气象要素场时间变化，a、b 和 c 图分别显示农田的向下太阳辐射、比湿和气温。该观测的沙漠站与农田站相距几公里，观测项目和手段类似，这里不再给出。由图 1 所示，在观测时段内，7 月 25~27 日有一个较强的降雨过程，8 月 6~8 日有一次明显的冷空气过程过境。

### 4 数值试验

为了研究土壤中热传导过程以及土壤中热传

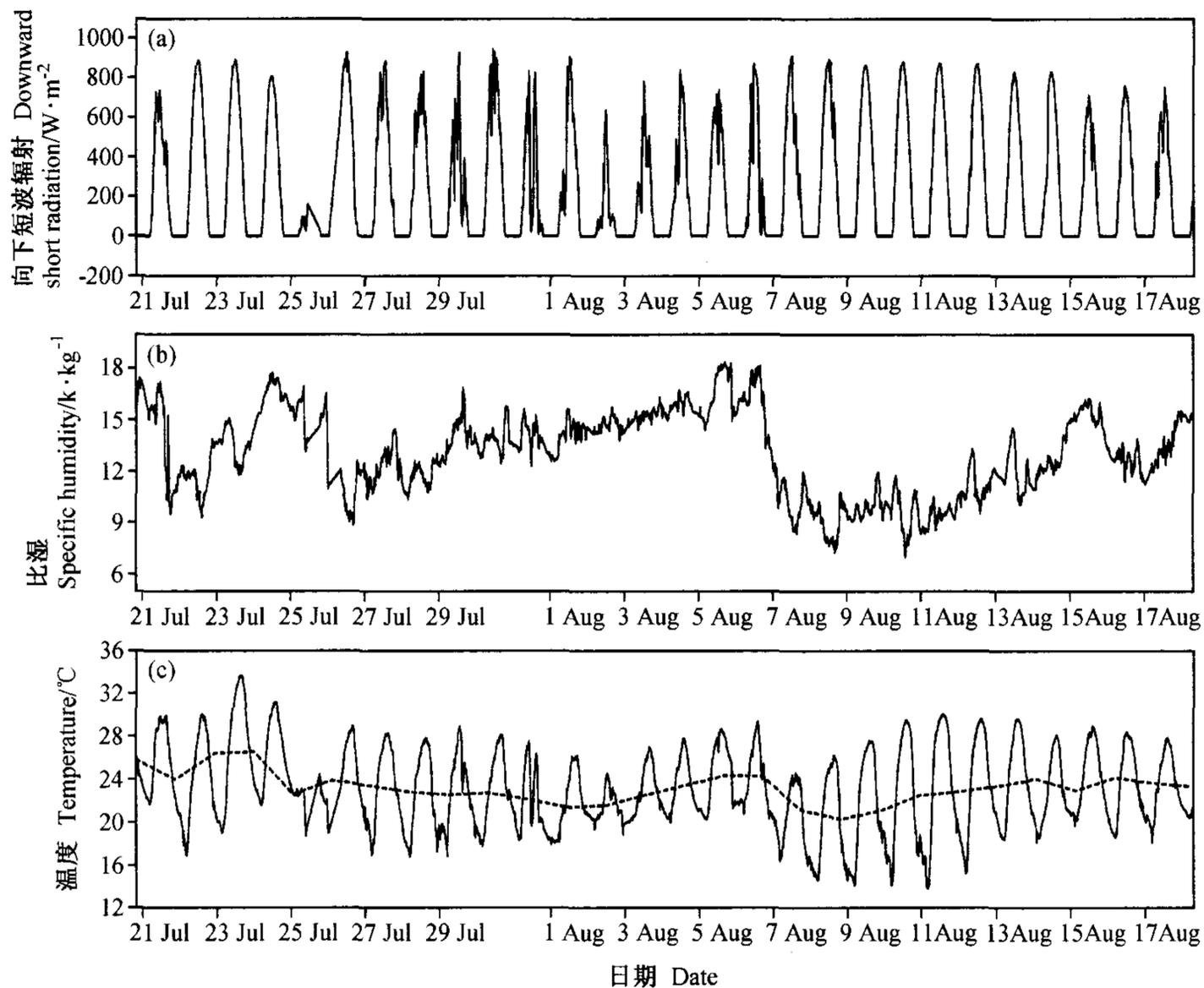


图 1 7 月 12 日~8 月 18 日观测的农田 (a) 向下太阳短波辐射、(b) 比湿、(c) 气温 (实线) 和日平均气温 (虚线)  
Fig. 1 Observation of cropland from 12 July to 18 August (a) downward short solar radiation; (b) specific humidity; (c) air temperature (solid line) and daily average temperature (dash line)

导过程对天气过程过境的响应, 本文利用 CLM 进行相关的 off-line 数值试验。驱动 CLM 的气象要素场由实际观测提供, 这些要素包括向下短波和长波辐射、4 m 高的大气温度、风速和比湿等。模式的预报气象要素为感热通量、潜热通量、向上的长、短波辐射及土壤中体积水含量和土壤温度等。本文所选的时段为 7 月 27 日~8 月 18 日。

#### 4.1 地表辐射特征的对比分析

CLM 中地表反照率由裸地反照率和植被反照率两部分按各自的比例组成, 其参数化公式为

$$\bar{\alpha}_{\Delta, \mu} = (1 - F_{veg}) \bar{\alpha}_{\Delta, \mu(g)} + F_{veg} \bar{\alpha}_{\Delta, \mu(c)},$$

式中,  $\bar{\alpha}_{\Delta, \mu}$  为农田地表反照率,  $\bar{\alpha}_{\Delta, \mu(g)}$  和  $\bar{\alpha}_{\Delta, \mu(c)}$  分别为裸地表和植被反照率,  $F_{veg}$  为植被覆盖率。裸地表反照率的表达式为

$$\bar{\alpha}_{\Delta, \mu(g)} = \alpha_{sat} + \min[\Delta \alpha_g(\theta_{1,l}), \alpha_{sat}],$$

式中,

$$\Delta \alpha_g(\theta_{1,l}) = \max[0.01 \times (11 - 40 \theta_{1,l}), 0],$$

$\alpha_{sat}$  为饱和土壤反照率,  $\theta_{1,l}$  为表层土壤体积含水量。因此, 植被覆盖率在反照率和辐射的计算中是一个很重要的参量。

##### 4.1.1 沙漠辐射的模拟

图 2 给出沙漠地区向上短、长波辐射通量的观测和模拟对比结果。观测和模拟均可以分为 7 月 27 日~8 月 3 日的雨后和 8 月 5~18 日的冷空气过境后的两个阶段。向上短波辐射的观测和模

拟对比显示, 雨后的模拟结果比冷空气过境后的模拟结果偏差。图 2a 显示, 雨后的几天里, 短波辐射通量的观测和模拟相差较为显著, 中午时段, 模拟值比观测值大  $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  左右, 由于沙漠几乎没有植被覆盖, 反照率在很大程度上依赖于土壤表面的水含量, 因此, 这种误差反应了 CLM 对沙漠这种下垫面表层含水量模拟能力的不足。而在冷空气过境后下垫面相对比较干燥的第二个阶段, 短波辐射通量的观测和模拟几乎一致。由图 2b 可见, 在观测期间, CLM 均较好地模拟出了沙漠向上长波辐射的变化, 这反应了 CLM 对沙漠的地表温度有较强的模拟能力。

##### 4.1.2 农田辐射日变化

图 3 给出了农田向上短波和向上长波的观测与模拟的比较。图 3a 表明 CLM 模拟的农田向上短波辐射偏小, 在中午时段, 模拟比观测值小  $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  左右, 反映了地表反照率模拟偏小, 由于下垫面特征的局地性很强, 植被覆盖或土壤特征有较大的不确定性, 所以很难用统一参数化方案准确地描述这种局地特征, 由此可能造成计算误差。图 3b 显示向上长波辐射的模拟和观测的对比, 结果表明: 在整个模拟期间, CLM 模拟的农田向上长波辐射白天较观测偏大  $30 \sim 40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 而夜间则偏小  $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  左右, 影响向上长波辐射的直接因素是下垫面的温度, 而影

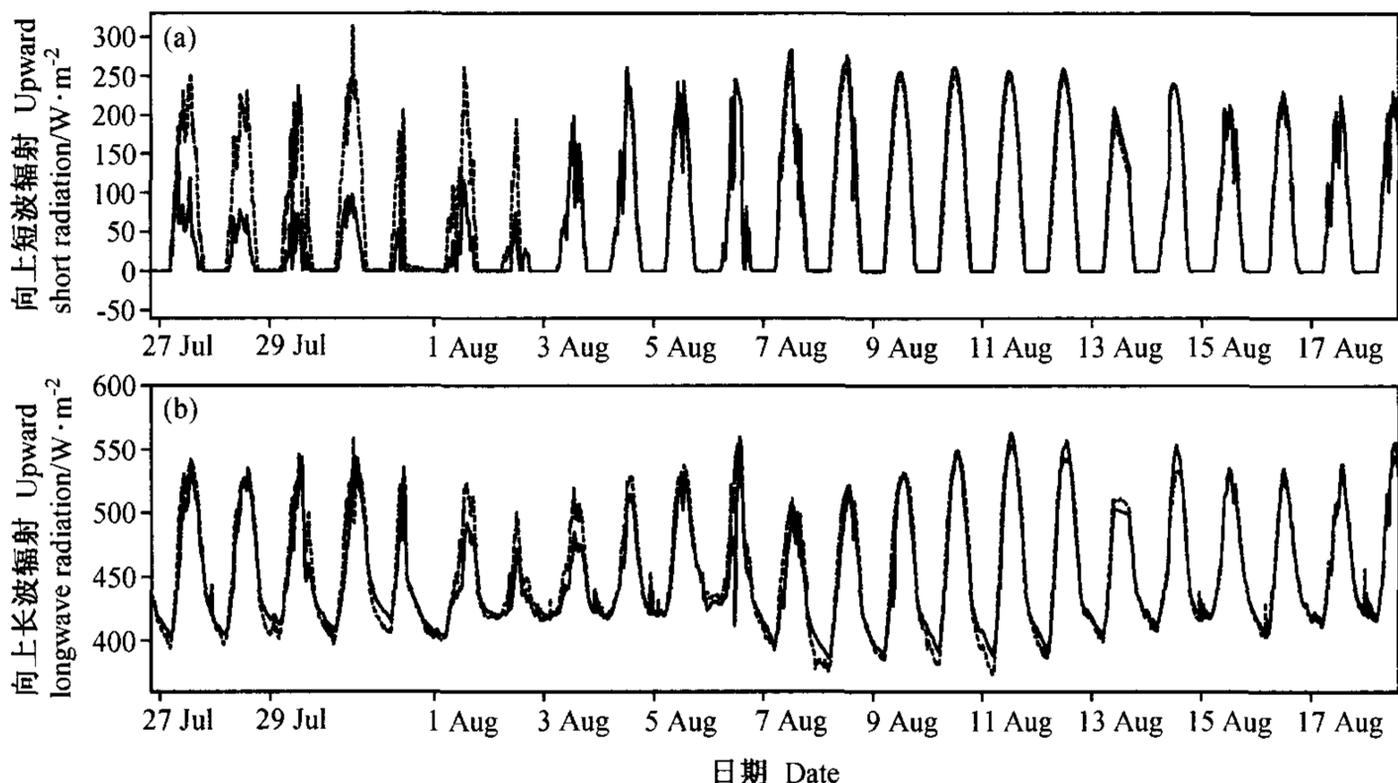


图 2 沙漠 7 月 27 日~8 月 18 日辐射观测 (实线) 与模拟 (虚线) 对比: (a) 向上短波辐射; (b) 向上长波辐射

Fig. 2 Comparison between observation (solid line) and simulation (dash line) of desert from 27 July to 18 August: (a) upward short-wave radiation; (b) upward longwave radiation

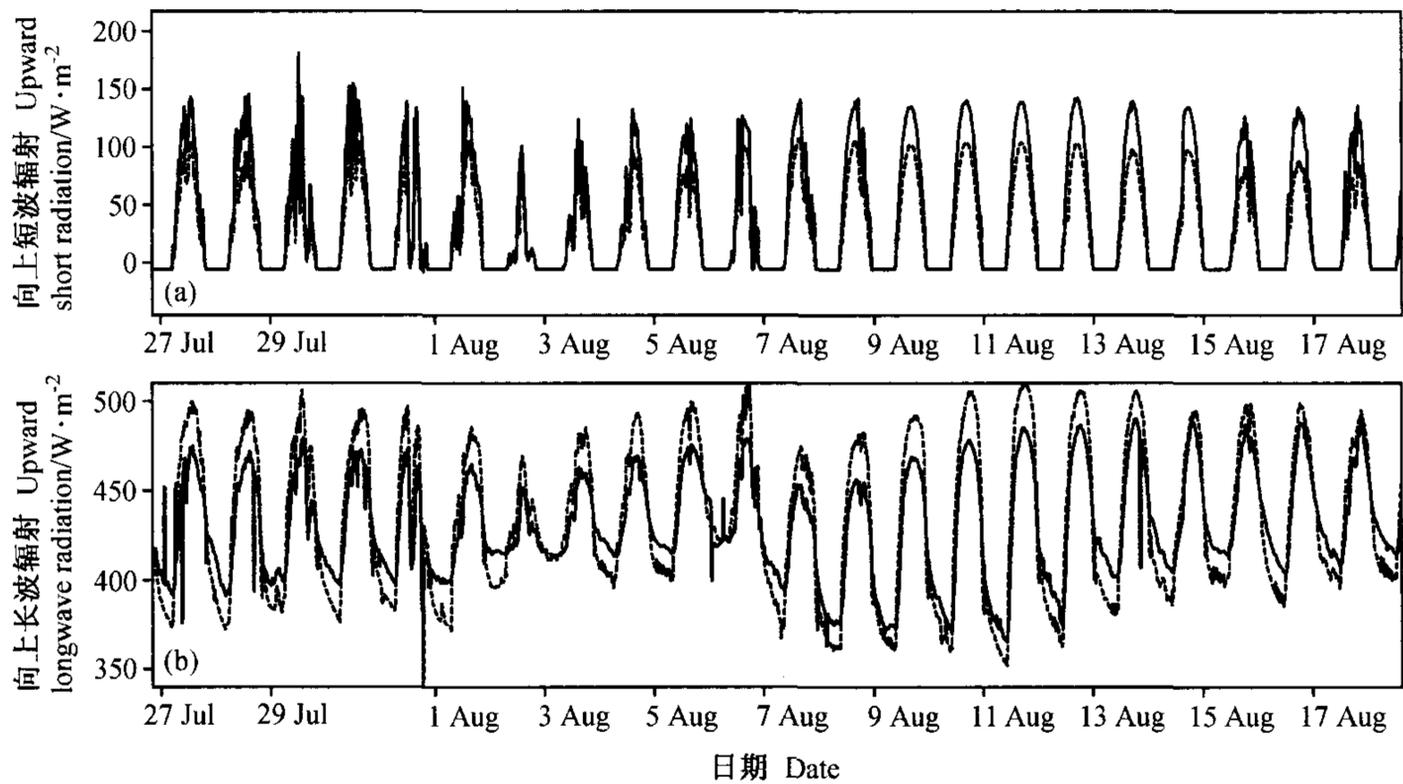


图3 农田7月27日~8月18日辐射观测(实线)与模拟(虚线)对比:(a)向上短波辐射;(b)向上长波辐射  
Fig. 3 Comparison between observation (solid line) and simulation (dash line) of cropland from 27 July to 18 August: (a) upward short-wave radiation; (b) upward longwave radiation

响下垫面的温度的因素是非常复杂的,几乎涉及了地表能量收支的各分量的计算。就农田而言,影响其向上长波辐射通量计算的直接要素是植被温度和土壤表面温度,目前,植被温度的计算及其主要的特征参数化等还存在问题,仍然需要一定的外场观测研究支持和大量的敏感性试验证实,改进其参数化。

#### 4.1.3 沙漠与农田的比较

通过对上述沙漠和农田辐射通量试验的比较发现,CLM对沙漠的长波辐射通量和干燥时段的短波辐射通量模拟较好,而对雨后几天里的短波辐射通量的模拟较差,体现了CLM对沙漠雨后表层含水量的模拟能力的不足,从而导致雨后反照率的模拟偏高。CLM模拟的农田向上短波辐射偏小,反映了地表反照率模拟偏小。而模拟的农田向上长波辐射白天较观测偏大 $30\sim 40\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,夜间则偏小 $30\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右,这是由植被温度和土壤表面温度模拟的偏差引起的。而农田反照率和地表温度模拟的偏差则都是由于农田地表特征较沙漠复杂,土壤和植被特征有很大的不确定性造成的。

### 4.2 土壤热传导的模拟

土壤热量的储存与释放起着调节气候系统能量平衡的关键作用,在日变化上表现为白天热量

储存和夜间热量释放,由于土壤中水含量及一些特征参数不确定性的影响,本文采用土壤某时刻的温度 $T_i$ 减去相应的日平均温度 $\bar{T}_d$ ,作为一天内的温度距平:

$$\Delta T_i = T_i - \bar{T}_d,$$

这样,在一天内, $\Delta T_i$ 为正,表示能量储存,相反,则表示能量释放。

#### 4.2.1 沙漠土壤温度的垂直分布

图4给出了8月7~11日共5天的沙漠0~80 cm深度土壤温度距平 $\Delta T_i$ 的垂直分布。结果显示,CLM总体上模拟出了沙漠内能量收支的日变化特征,模拟的沙漠热量交换随着深度的增加而减弱,并且随深度的增加,热量交换又有显著的相位滞后。但在土壤内热交换的深度方面,模拟结果表现得不足,以8月9日为例,不论白天或夜间,图4a的观测结果显示,温度距平为 $(\pm) 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 的深度为80 cm,这说明在80 cm的深度,沙漠中仍然有较强的热交换;而图4b的模拟结果显示,温度距平为 $(\pm) 0.2\text{ }^\circ\text{C}$ 的深度接近40 cm,这说明模拟的沙漠土壤热交换在40 cm以下就不再明显。图4还表明,除8月7日外,模拟的温度距平大小(即热量交换的强度)与观测基本一致,地表观测和模拟的温度距平均为 $(\pm) 10\text{ }^\circ\text{C}$ 。

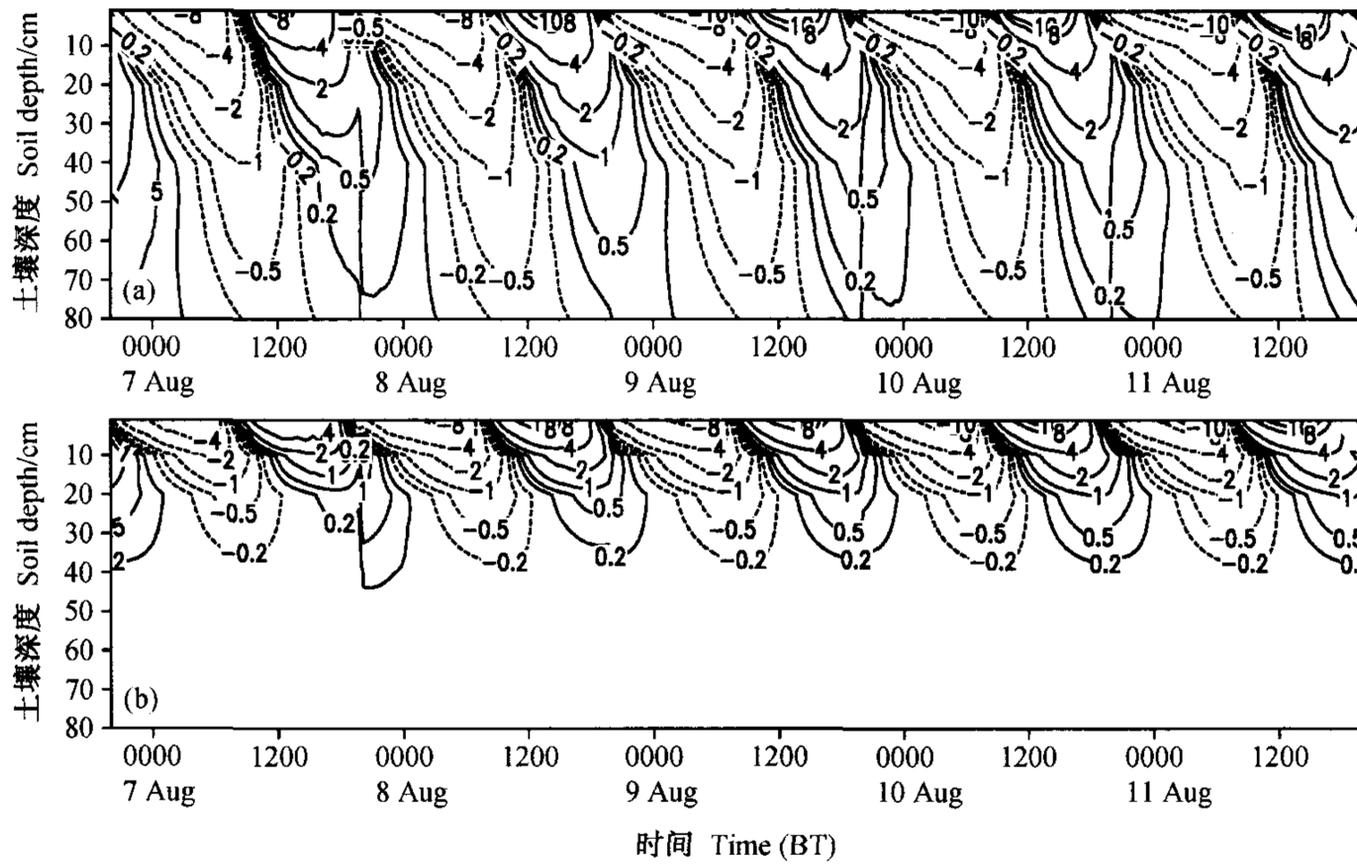


图4 沙漠8月7~11日0~80 cm土壤温度距平的垂直分布(单位:°C): (a) 观测; (b) 模拟

Fig. 4 Vertical distribution of soil temperature anomaly of desert in 7-11 July (units: °C): (a) observation; (b) simulation

#### 4.2.2 农田土壤温度的垂直分布

图5显示了农田8月7日到8月11日土壤温度距平  $\Delta T_i$  的垂直分布。图5a和5b结果对比显示, CLM基本模拟出了土壤内热传导的日变化过程。土壤内热交换过程的深度较沙漠有显著的改善, 与观测结果更为接近, 图5a显示, 观测的温度距平为(±)0.2°C的深度为50~60 cm, 而图5b模拟的温度距平0.2°C的深度约40 cm, 模拟与观测的差距不是很大。图5进一步显示, 与沙漠相比, 模拟的农田土壤表层热交换强度比观测明显变强, 图5a中观测的地表温度距平为(±)2~4°C, 图5b中模拟的地表温度距平为(±)4~6°C, 模拟的地表温度距平比观测的高2°C, 但在10 cm以下, 农田模拟的土壤热交换强度与观测较为接近。

#### 4.2.3 沙漠与农田的对比

对上述沙漠和农田土壤热传导的试验比较可以看出, 无论沙漠与农田, CLM总体上模拟出了土壤内热传导的日变化特征。但对沙漠和农田的模拟也表现出了不同的特性, 模拟的沙漠热量交换的强度与观测基本一致, 但对土壤内热交换的深度, 沙漠的模拟结果表现得不足。沙漠地区80 cm的深度仍然有较强的热交换, 而沙漠模拟结果

显示在40 cm以下热交换就不再明显。农田模拟的土壤内热交换的深度以及10 cm以下土壤中热交换的强度较沙漠都有显著的改善, 与观测结果更为接近, 这反映了CLM对含水量较大、持水力较强的农田下垫面的土壤热传导特性的模拟能力较好, 而对持水力较弱、热容量较小的沙漠下垫面模拟能力较差。但与沙漠相比, 模拟的农田地表的热交换强度比观测明显偏强, 其原因同样可能是农田下垫面复杂的植被覆盖等因素造成的地表温度模拟的偏差引起的。

#### 4.3 土壤中热传导过程对天气过程的响应

土壤的热传导对天气过程过境有一定的响应, 对这方面的研究有助于深入了解CLM的土壤热传导模块的特征。研究的时段为8月5~9日冷空气过境前后共5天, 研究方法与上一节类似, 采用土壤某时刻的温度  $T_i$  减去相应的天气过境期间的平均温度  $\bar{T}_0$ , 作为该时段的温度距平:

$$\Delta T_s = T_i - \bar{T}_0,$$

这样, 在该时段内, 温度距平  $\Delta T_s$  为正, 表示土壤热量储存, 相反, 表示土壤能量释放。

##### 4.3.1 沙漠的热传导过程对天气过程的响应

图6是沙漠8月5~9日冷空气过境前后土壤温度距平  $\Delta T_s$  的垂直分布, 观测结果显示(图

6a), 土壤中的热传导过程明显的响应了冷空气过境过程, 冷空气过境前, 土壤的热储存显著; 过境后, 土壤的热释放占主导地位, 并且具有明显的日变化特征。8月5~7日冷空气过境前的热储存的深度为70~80 cm, 比过境后的40~60 cm深20 cm左右; 8月8~9日天气过程过境后, 土壤

的热释放比过境前显著, 热释放的深度达到了80 cm, 比过境前的深度50 cm也深30 cm左右。图6b的模拟结果显示, CLM模拟的土壤热传导对天气过程过境也有一定的响应, 过境前后土壤热储存和热释放也有显著的差异, 这种差异的趋势与观测一致; 冷空气过境前, 沙漠的白天热

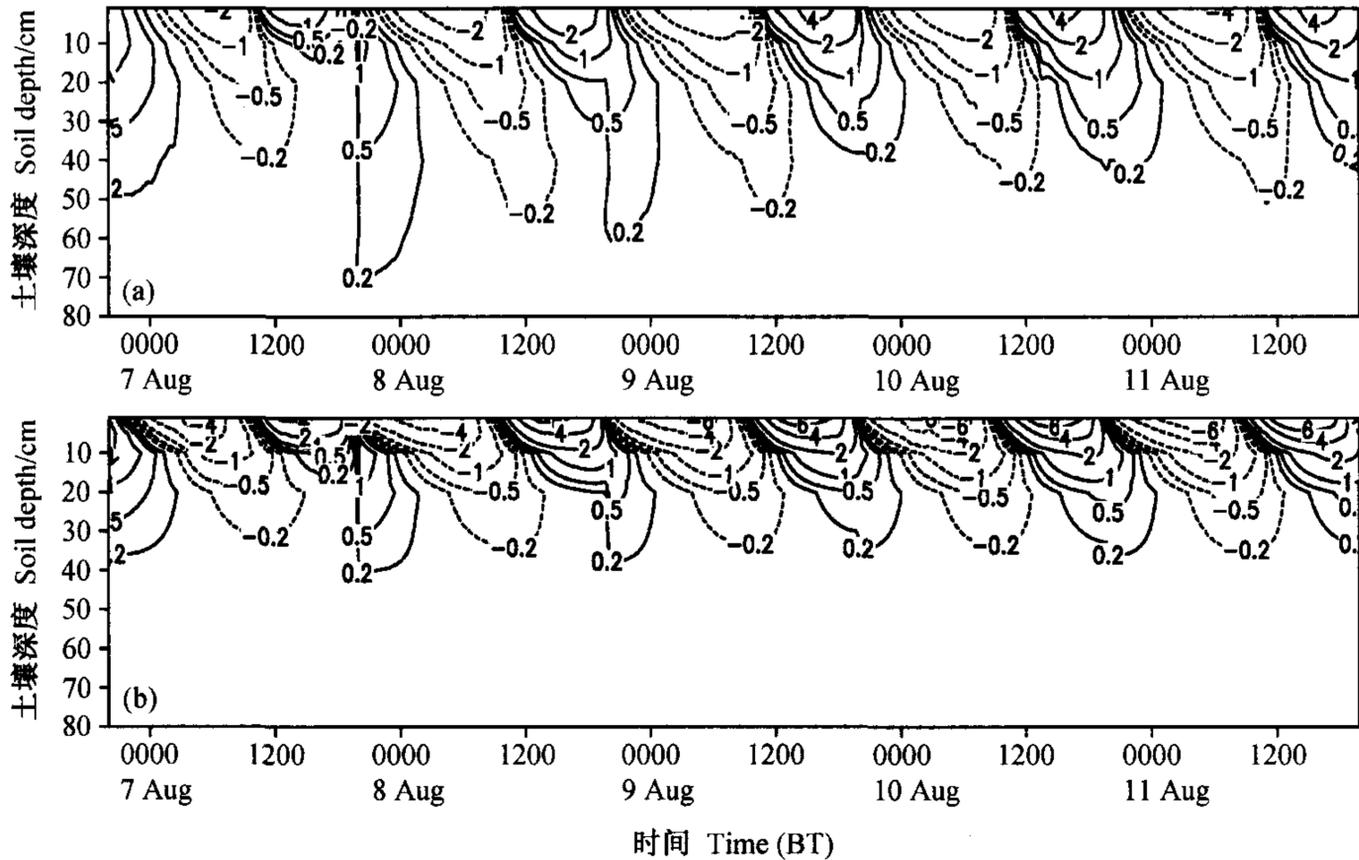


图5 农田8月7~11日0~80 cm土壤温度距平的垂直分布(单位:°C): (a) 观测; (b) 模拟

Fig. 5 Vertical distribution of soil temperature anomaly of cropland in 7-11 July (units: °C): (a) observation; (b) simulation

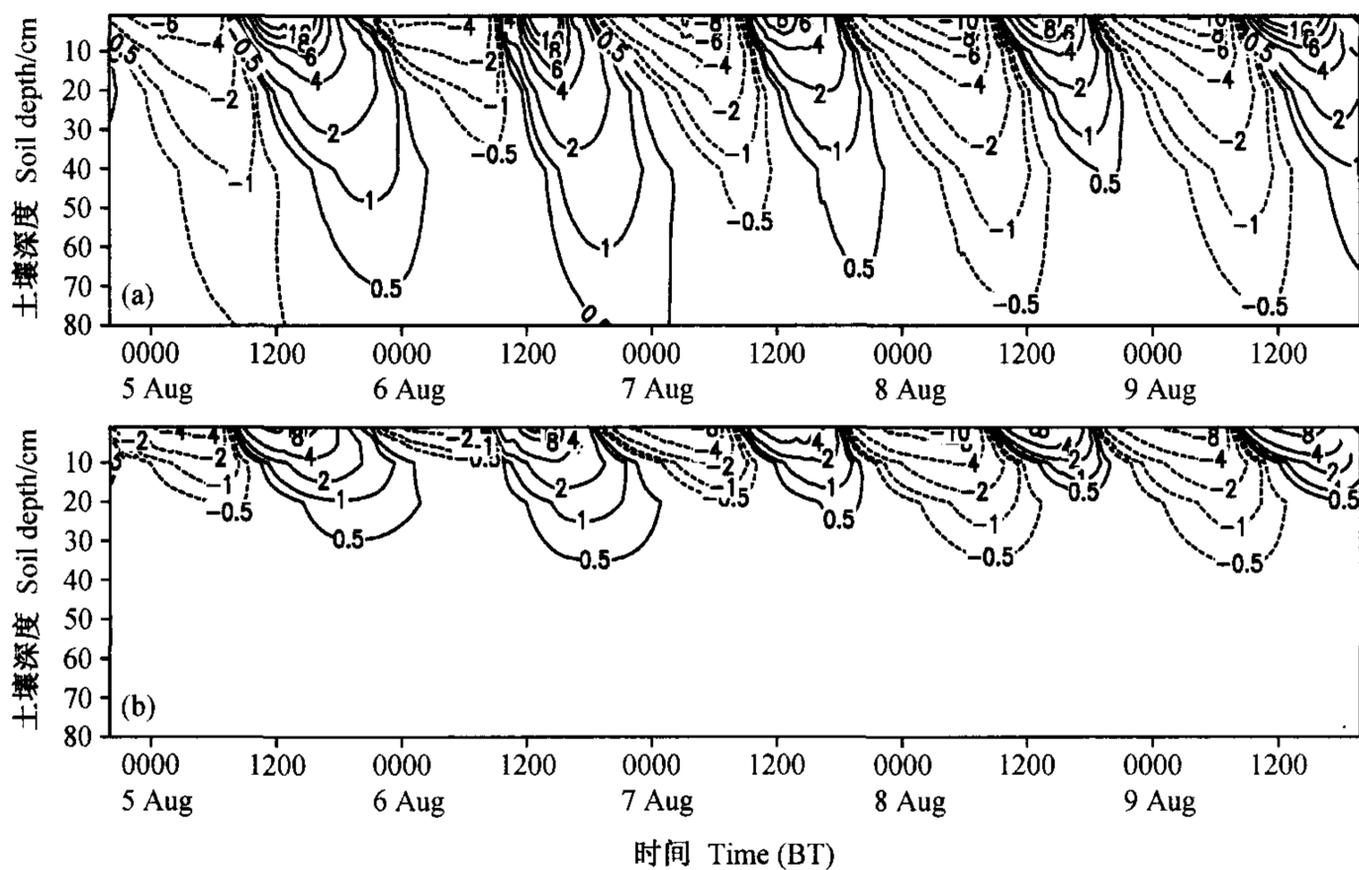


图6 沙漠8月5~9日0~80 cm土壤温度距平的垂直分布(单位:°C): (a) 观测; (b) 模拟

Fig. 6 Vertical distribution of soil temperature anomaly of desert in 5-9 August (units: °C): (a) observation; (b) simulation

储存深度 35 cm (温度距平为 0.5 °C 的深度), 比过境后的热储存深度 25 cm 深 10 cm, 过境后的热释放的深度为 35 cm 左右, 比过境前深 10 cm 左右。观测和模拟结果的进一步分析表明, 冷空气过境前后, 沙漠地表的热交换强度模拟与观测一致。

#### 4.3.2 农田的热传导过程对天气过程的响应

图 7 是农田 8 月 5~9 日冷空气过境前后土壤温度距平  $\Delta T_s$  的垂直分布, 与沙漠相比, 农田中的热传导过程对冷空气过境过程的响应更加明显, 冷空气过境前, 农田几乎都在储存热量, 相反, 冷空气过境后, 农田几乎一直释放热量。观测结果显示 (图 7a), 8 月 5 日 1200 UTC~7 日 1200 UTC 冷空气过境前, 农田热储存占主导地位, 深度大约为 70~80 cm; 而 8 月 8 日 0000 UTC~9 日 0000 UTC 冷空气过境后, 土壤的热释放比较显著, 热释放的深度也达到了 80 cm。图 7b 模拟的结果显示, CLM 模拟的土壤热传导对冷空气过境也有显著的响应, 过境前土壤热量储存, 过境后热量释放, 这种趋势与观测一致; 冷空气过境前, 农田热储存深度 45 cm (温度距平为 0.5 °C 的深度), 冷空气过境后, 农田热释放深度 50 cm (温度距平为 0.5 °C 的深度)。观测和模拟的结果进一步分析表明, 冷空气过境前后, 模拟的农田的热交换强度大于观测的结果, 过境前地表的模拟的

温度距平为 6 °C, 比观测的高 2 °C, 同样, 过境后模拟的地表温度距平也比观测的高 2 °C (绝对值)。

#### 4.3.3 沙漠与农田的对比

以上的对比分析表明, 沙漠和农田的土壤热传导过程对冷空气过境有显著的响应, CLM 较真实地模拟出了这种响应, 这反映了 CLM 热传导过程模块有着优异的性能。但是, 从 4.2 节的讨论可以看出, 模拟的冷空气过境前后的热交换深度不足, 因此, 需要对影响热传导过程的土壤特征参数的参数化或其他过程进行详细的研究, 以期解决这些不足。

### 4.4 平均模拟结果分析

#### 4.4.1 沙漠平均土壤温度日变化

图 8 给出了沙漠 22 天平均的土壤 1、5、20、40 cm 深度的温度日变化。可以看出, 在 10 cm 以上的沙漠浅层, CLM 能够模拟出显著的温度日变化特征, 但白天最高温度的模拟都较观测偏低, 且差距较大。1 cm 最高温度偏低约 6 °C, 5 和 10 cm 偏低约 4 °C, 10 cm 位相滞后约 2 h (图略)。在 20 cm 以下的深层土壤, CLM 模拟的温度日变化不再明显, 但观测的 20 和 40 cm 仍然有明显的日变化, 20 cm 模拟与观测的最大温度差距约为 3 °C, 40 cm 的最大差距不到 2 °C, 80 cm 观测与模拟都没有了

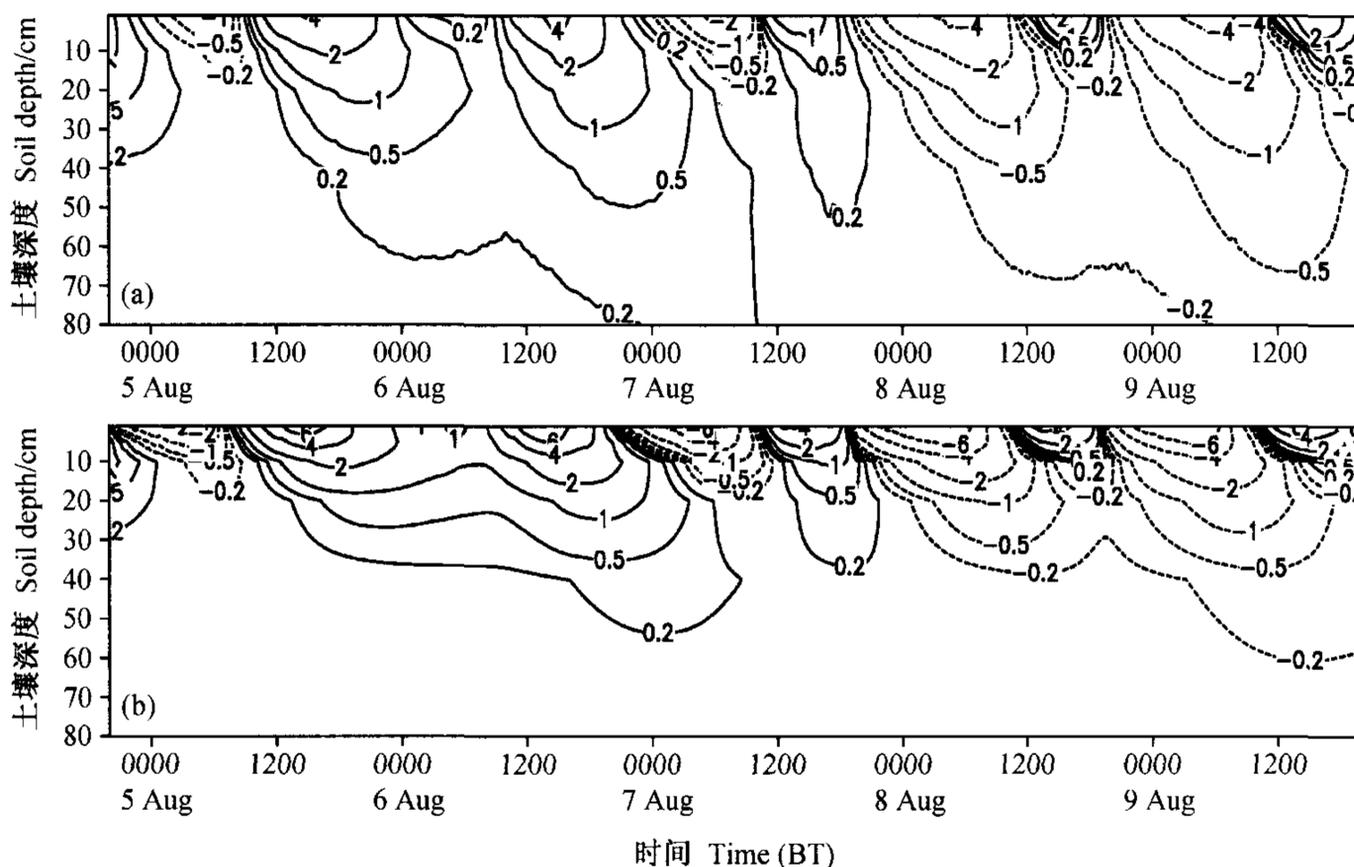


图 7 农田 8 月 5~9 日 0~80 cm 土壤温度距平的垂直分布 (单位: °C): (a) 观测; (b) 模拟

Fig. 7 Vertical distribution of soil temperature anomaly of cropland in 5-9 August (units: °C): (a) observation; (b) simulation

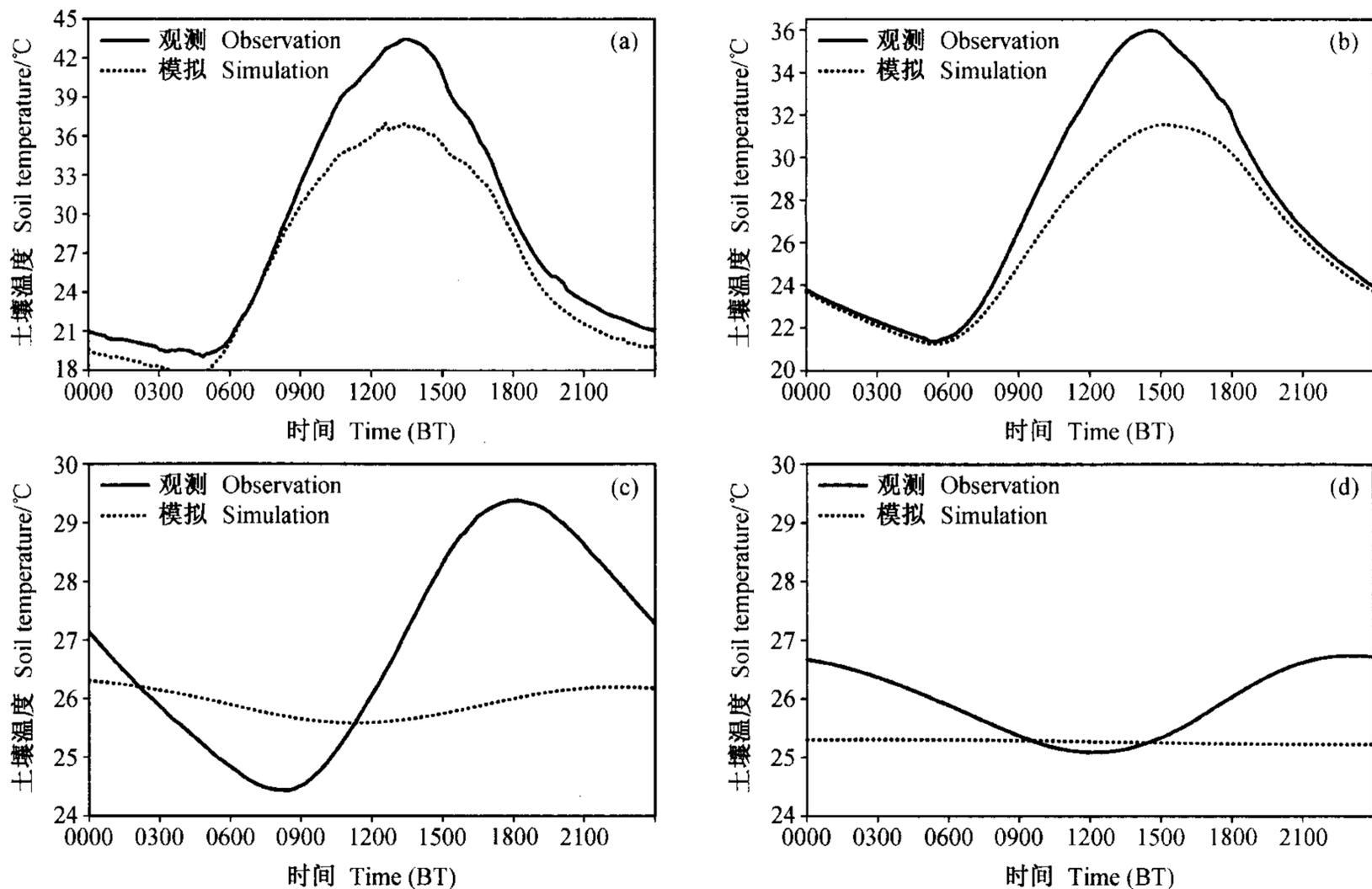


图 8 沙漠各层土壤温度平均日变化观测与模拟的比较：(a) 1 cm；(b) 5 cm；(c) 20 cm；(d) 40 cm

Fig. 8 Comparison of observed and simulated average daily change of soil temperature each layer of desert: (a) 1 cm; (b) 5 cm; (c) 20 cm; (d) 40 cm

日变化，模拟与观测相差不到 1 °C (图略)。

#### 4.4.2 农田平均土壤温度日变化

图 9 给出的是农田 22 天的平均土壤温度日变化模拟与观测的比较，图中的土壤深度与沙漠相同。1 cm 深度，模拟与观测的温度差距较大 (约为 2 °C)，位相偏移也明显；5 cm 和 10 cm 模拟与观测的差距不到 1 °C，10 cm 的位相滞后约 1 h (10 cm 图略)；20 cm 模拟的温度日变化幅度小于观测，日最高温度模拟偏低约为 1 °C；40 cm 的观测还有微小的日变化，模拟已基本没有了，模拟与观测量值的最大差距不到 1 °C；80 cm 观测与模拟差距很小，都没有日变化 (图略)。

#### 4.4.3 沙漠与农田的对比

图 8 与图 9 对比发现，沙漠各层土壤温度的模拟与观测的差距都较大。而农田除了表层温度模拟与观测差距较大外，其他各层模拟与观测的差距都较小。这同样说明 CLM 对农田土壤的水热传导特征的模拟能力较沙漠强，但对农田地表特征的描述不够准确。

## 5 结果讨论

本文利用 CLM 模式对内蒙古奈曼农牧交错带沙漠和农田两种典型下垫面的陆面过程进行了数值试验，并将试验模拟结果与外场观测资料进行了对比分析。研究表明：CLM 模式能够较好地模拟出沙漠与农田两种下垫面辐射通量和土壤中的热传导，以及各层土壤温度的日变化特征。但相比而言，对沙漠辐射通量的模拟结果好于农田；而对农田热传导的模拟结果则好于沙漠。

对辐射通量的模拟结果显示：沙漠的向上长波辐射和冷空气过境后干燥时期的向上短波辐射模拟较好，但在雨后湿润时期的向上短波辐射模拟偏大，说明 CLM 对沙漠干地表反照率的模拟较好，而对雨后湿地表的反照率模拟偏大。由于反照率的计算依赖于表面含水量，因此，沙漠雨后湿润时期向上短波辐射模拟的偏差，反映了 CLM 对沙漠这种下垫面表层含水量模拟能力的不足。农田的向上短波辐射在整个试验期间模拟都偏小，

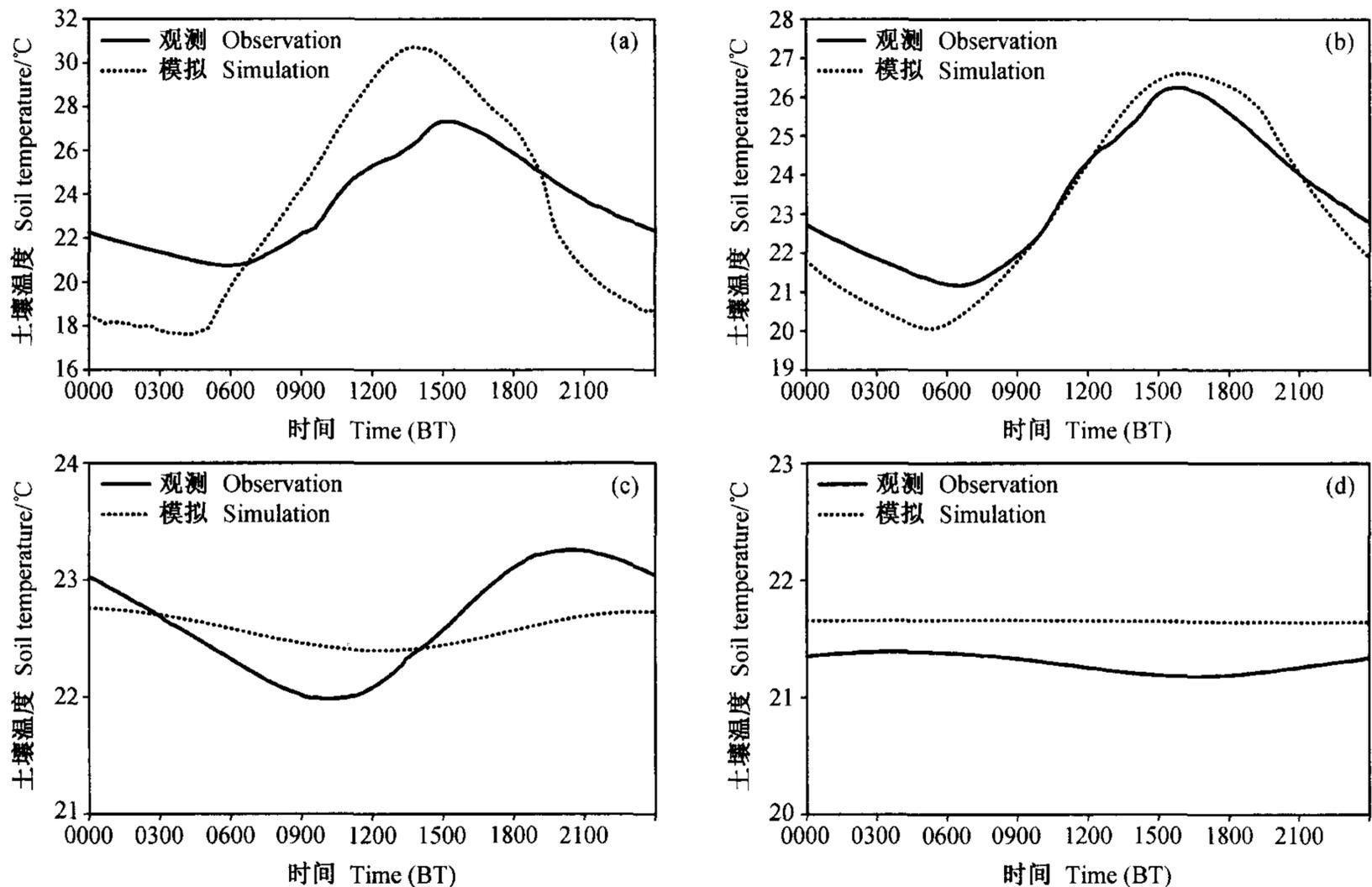


图9 农田各层土壤温度平均日变化观测与模拟的比较: (a) 1 cm; (b) 5 cm; (c) 20 cm; (d) 40 cm

Fig. 9 Comparison of observed and simulated average daily change of soil temperature each layer of cropland: (a) 1 cm; (b) 5 cm; (c) 20 cm; (d) 40 cm

反映了农田地表反照率的模拟偏低。农田向上长波辐射的模拟白天较观测偏大, 夜间较观测偏小, 反映了CLM对农田植被温度和地表温度的模拟存在偏差。而农田反照率和植被、地表温度模拟的偏差则都是由于农田地表特征较沙漠复杂, 土壤和植被特征有很大的不确定性造成的。

热传导的模拟结果显示: 模拟的沙漠地区热量交换的强度与观测结果基本一致, 但对土壤内热交换到达的深度, 沙漠的模拟结果表现得不足。农田模拟的土壤内热交换的深度以及10 cm以下土壤中热交换的强度较沙漠都有显著的改善, 与观测结果更为接近, 但与沙漠相比, 模拟的农田地表的热交换强度比观测明显偏强。对土壤平均温度日变化的对比研究也表明, 农田除了表层温度的模拟与观测差距较大外, 其余各层模拟的温度与观测的差距都较沙漠小, 说明CLM对农田这类下垫面的热传导模拟能力较强, 而对沙漠这类干燥下垫面的热传导模拟能力相对较差。

试验结果还表明, 对8月6~8日出现的冷空气过境过程, 沙漠和农田的土壤热传导过程均有

着显著响应, CLM也能较真实地模拟出这种响应。

**致谢** 感谢国家973研究计划“我国未来生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”的大气边界层试验提供观测资料, 感谢戴永久博士提供CLM源程序。

#### 参考文献 (References)

- [1] Charney J G, Quirk W J, Chow S H, et al. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. *J. Atmos. Sci.*, 1977, **34**: 1366~1385
- [2] Shukla J, Mintz Y. Influence of land surface evapotranspiration on the earth's climate. *Science*, 1982, **215**: 1498~1501
- [3] Sud Y C, Smith W E. The influence of surface roughness of deserts in the July circulation. *Bound-Layer Meteor.*, 1985, **33**: 15~40
- [4] 殷达中, 陈家宜. 一个陆面过程参数化模式与MM5的耦合. *大气科学*, 2000, **24**: 177~186
- [5] Dickinson R E, Henderson-Sellers A. Modelling tropical

- deforestation: a study of GCM land-surface parameterizations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1988, **114**: 439~462
- [6] Bonan G B. The land surface climatology of the NCAR land surface model coupled to the NCAR community climate model. *J. Climate*, 1998, **11**: 1307~1326
- [7] Sato N, Sellers P J, Randall D A, et al. Effects of implementing the simple biosphere model in a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46** (18): 2757~2782
- [8] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SiB) for use within GCMs. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43** (6): 505~531
- [9] Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. A revised land-surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *J. Climate*, 1996, **9** (4): 676~705
- [10] Dickenson R E. The force-restore model for surface temperature and its generalizations. *J. Climate*, 1988, **1** (10): 1086~1097
- [11] Ji Jinjun, Hu Yuchun. A simple land surface process model for use in climate study. *Acta Meteor. Sinica.*, 1989, **3** (3): 344~353
- [12] 郭维栋, 孙菽芬. 土壤热异常对地表能量平衡影响初探. *气象学报*, 2002, **60** (6): 706~714  
Guo Weidong, Sun Shufen. Preliminary study on the effects of soil thermal anomaly on land surface energy budget. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (6): 706~714
- [13] Ji Jinjun. A climate-vegetation interaction model: Simulating physical all biological process at the surface. *J. Biogeography*, 1995, **22**: 445~451
- [14] 孙岚, 吴国雄, 孙菽芬. 陆面过程对气候影响的数值模拟: Ssib 与 IAP/LASG L9R15 AGCM 的耦合及其模式性能. *气象学报*, 2002, **58** (2): 179~193  
Sun Lan, Wu Guoxiong, Sun Shufen. Numerical simulations of effects of land surface processes on climate: implementing of Ssib in IAP/LASG AGCM L9R15 and its performance. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **58** (2): 179~193
- [15] 胡国权, 丁一汇. HUBEX 试验期间不同地面的能量收支研究. *气候与环境研究*, 2001, **6** (2): 228~233  
Hu Guoquan, Ding Yihui. A study on energy budget over Huaihe river basin during HUBEX. *Climate and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (2): 228~233
- [16] 苏凤阁, 郝振纯. 一种陆面过程模式对径流的模拟研究. *气候与环境研究*, 2002, **7** (4): 423~432  
Su Fengge, Hao Zhenchun. A study of streamflow simulations using a land surface model. *Climate and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (4): 423~432
- [17] Qu Weiqing, Henderson-Sellers A, Pitman A J, et al. Sensitivity of latent heat flux from PILPS land-surface schemes to perturbations of surface air temperature. *J. Atmos. Sci.*, 1998, **55** (11): 1909~1927
- [18] Adam Schlosser, Andrew G S, Alan Robock, et al. Simulations of a boreal grassland hydrology at Valdai, Russia: PILPS phase 2 (d). *Monthly Weather Review*, 2000, **128**: 301~321
- [19] Garratt J R. Sensitivity of Climate Simulation to Land-Surface schemes to perturbation of surface air temperature. *J. Atmos. Sci.*, 1993, **55** (11): 1909~1927
- [20] Henderson-Sellers A, Yang Z L, Dickinson R E. The project for intercomparison of land surface parameterization schemes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1993, **74**: 1335~1349
- [21] Henderson-Sellers A, Pitman A J, et al. The project for intercomparison of land surface parameterization scheme (PILPS): phase 2 and 3. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1995, **76** (4): 489~503
- [22] 林朝晖, 杨小松, 郭裕福. 陆面过程模式对土壤含水量初值的敏感性研究. *气候与环境研究*, 2001, **6** (2): 240~248  
Lin Zhaohui, Yang Xiaosong, Guo Yufu. Sensitivity of land surface model to the initial condition of soil moisture. *Climate and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (2): 240~248
- [23] Dai Yongjiu, Zeng Xuebin, Dickenson R E, et al. The common land model. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2003, **84**: 1013~1023
- [24] Dai Yongjiu, Zeng Xuebin, Dickenson R E, et al. Common Land Model (Technical Documentation and User's Guide). 2001
- [25] Dickenson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as coupled to the NCAR Community Climate Model. NCAR Tech. Note NCAR/TN-378+STR, 1993, 72pp
- [26] Dai Yongjiu, Zeng Qingcun. A land surface model (IAP94) for climate studies. part I: Formulation and validation in off-line experiments. *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14**: 433~460
- [27] Bonan G B. A land surface model (LSM version 1.0) for ecological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user's guide. NCAR Tech. Note NCAR/TN-417 +STR, 1996, 150pp
- [28] Zeng Xuebin, Muhammad Shaikh, Dai Yongjiu, et al. Coupling of the common land model to the NCAR community climate model. *J. Climate*, 2002, **15**: 1832~1854