

佟华, 刘辉志, 赵琳娜. 2009. 半干旱区陆面模式参数对水分循环的敏感性研究 [J]. 气候与环境研究, 14 (6): 621-630. Tong Hua, Liu Huizhi, Zhao Linna. 2009. Sensitivity research of parameters to water cycle in land surface model in semi-arid area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 621-630.

## 半干旱区陆面模式参数对水分循环的敏感性研究

佟华<sup>1</sup> 刘辉志<sup>2</sup> 赵琳娜<sup>1</sup>

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

**摘要** 植被覆盖对陆气之间物质和能量交换过程具有极其重要的影响, 但植被覆盖对于交换过程的影响因子很多, 关系复杂。作者研究了各种植被因子对陆气之间水分循环的作用和相对重要性。首先通过单点 NOAH 模式对吉林通榆农田下垫面 2004 年土壤和边界层各物理量进行模拟, 并与观测结果比较和评价, 肯定了单点 NOAH 模式模拟能力。使用这一模式进行敏感试验, 将与植被有关的参数分别在其取值范围取较大与较小值, 比较水分循环各物理量如土壤湿度、土壤蒸发、植被蒸腾等的变化情况。试验表明在各参数中植被气孔阻抗、根系深度、土壤湿度初值和反照率对水分循环的影响较大, 而叶面积指数、粗糙度和冠层阻抗则影响较小。

**关键词** 植被 陆气间相互作用 水分循环

**文章编号** 1006-9585 (2009) 06-0621-10 **中图分类号** P463 **文献标识码** A

## Sensitivity Research of Parameters to Water Cycle in Land Surface Model in Semi-Arid Area

TONG Hua<sup>1</sup>, LIU Huizhi<sup>2</sup>, and ZHAO Linna<sup>1</sup>

1 *National Meteorological Center, Beijing 100081*

2 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**Abstract** Vegetation cover has important impact on the exchanges of substance and energy between land and atmosphere. But the impact factors of vegetation cover on exchange are complex. The variables in soil surface and boundary layer of grass land in Tongyu County, Jilin Province by using stand-alone NOAH LSM (Land Surface Model) are simulated. In comparison with the observations, the simulation capability is proved. Sensitivity test is done by using this model, selecting the maximum and minimum of vegetation-related parameters in the value ranges, comparing the variety of several quantities, such as soil moisture, soil evaporation, and vegetation transpiration. The test shows that among these quantities, stomatal resistance, root depth, initial value of soil moisture, and albedo have significant impact on the water cycle, while the leaf area index, roughness, and canopy resistance have little impact.

**Key words** vegetation, land and atmosphere interaction, water cycle

**收稿日期** 2008-07-02 收到, 2009-08-30 收到修定稿

**资助项目** 国家科技支撑计划 2006BAC02B01、国家自然科学基金 40575069 和北京市自然科学基金 8062015

**作者简介** 佟华, 女, 1973 年出生, 博士, 高级工程师, 主要从事数值预报模式中物理过程研究。E-mail: tongh@cma.gov.cn

## 1 引言

陆地约占地球表面 1/3 的面积,是天气和气候系统中不可分割的成员之一。一方面,发生于陆面的各种过程受全球气候变化及区域气候分布特征的制约,另一方面,作为大气运动的下边界条件陆面通过交换水汽和能量等特定的方式与大气发生复杂的相互作用,从而对区域乃至全球的天气和气候产生重大影响。随着经济和社会的发展,人类活动越来越频繁地改变着植被的覆盖率和类型,而植被覆盖的改变及其通过改变反照率、粗糙度及土壤湿度等地表属性对天气和气候产生极其重要的影响,它在物质和能量交换过程中的作用是陆面过程的核心问题。

陆面为不同类型的植被所覆盖,植被的存在使得陆面过程变得更加复杂。植被的生理及形态特性对陆面过程具有十分重要的影响,植被覆盖变化通过改变地表反照率、粗糙度和土壤湿度等地表属性,从而影响辐射平衡、水分平衡等过程,最终可以导致区域降水、环流形势及大气温度、湿度等气候因子发生变化,是陆面过程的核心问题。其影响主要表现为:1) 降水和辐射的拦截作用;2) 辐射的吸收;3) 蒸散;4) 土壤湿度;5) 改变动量输送(改变地表粗糙度);6) 生物通量等方面。

近 20 年来,陆面过程模型与世界各国的 GCM 模型相耦合所进行的敏感性试验结果表明,气候对植被覆盖特征是很敏感的。Charney (1975) 从理论上提出了沙漠化问题的地球生物—物理反馈机制:陆面状况的变化→反照率的异常→地面辐射平衡→气候变化。之后,大量研究从反照率、粗糙度及土壤湿度等地表属性的变化探讨植被变化对气候影响的机制。植被退化后,反照率增加使更多的太阳辐射从地表反射,气柱失去辐射热量,为了保持热平衡,空气补偿下沉,上升运动减少,水汽辐合减弱,导致大范围的降水减少 (Sellers, 1992)。反照率变化引起的云辐射强迫在地面温度初始的冷却中也有一个负的反馈,与降水变化后引起的蒸发减少共同导致地表温度变化 (Lean et al., 1997)。植被变化引起的粗糙度变化是影响地气湍流输送的关键参数,它

通过改变地表热通量及风速而影响水汽通量辐合。植被变化导致的土壤湿度变化通过改变地表热容量和向大气输送的感热、潜热等,从而影响气候的变化。另外,植被阻抗、土壤热传导系数等下垫面的性质对能量分配、水分输送也是很重要的,这方面也有很多的工作。但是,植被变化导致的气候变化决不是单一因子作用的结果,植被变化将导致众多的地表参数发生变化,这些因子通过改变复杂的能量和水汽收支,最终影响气候变化。由于植被覆盖的复杂的地理分布、季节变化和物理化学过程,使得植被覆盖对陆气之间物质交换和能量交换影响的机制研究至今还没有统一的认识,有时甚至存在较大差异。大部分工作认为植被退化将导致退化区域降水减少,地表温度升高 (Shukla et al., 1990; Henderson et al., 1993),但也有些研究显示降水变化不大 (Zeng et al., 1999),地表温度在不同季节、不同区域有升有降或基本不变 (Dirmeyer et al., 1994)。另外,植被退化的气候响应在邻近地区也存在很大差别。所以通过对植被各个因子在循环过程中的作用进行详细的对比分析来研究植被对气候的影响是非常必要和急迫需要解决的。

目前对于在陆气之间物质和能量交换过程中,植被的各个因子具体起到了什么作用、作用大小,也就是植被及其相关的众多参数在物质能量交换中的相对重要性和影响机理是进行陆面过程参数化时非常关心的问题。本文拟通过长期的陆面观测站观测资料使用陆面模式 NOAH,来研究植被各个因子如反照率、粗糙度、叶面积指数和根系深度等在水分循环过程中的作用和相对重要性。

## 2 陆面模式 NOAH 简介

统一陆面模式 NOAH 是由美国几家研究单位合作共同开发的 (Chen et al., 1997)。它可以作为一维单点模式单独运行,也可以耦合在气象模式中用来模拟土壤湿度、土壤温度、雪深、冠层水含量、陆面水分和能量通量。模式使用有限差分空间分裂方法和 Crank-Nicholson 时间分裂方法来数值积分土壤—植被—雪盖等各层的物理过程控制方程。NOAH 陆面过程模式从 1996 年起开始在美国国家环境预报中心 (NCEP) 业务运

行，如今仍在不断改进 (Ek et al., 2003)。

### 3 观测站点及观测资料描述

吉林通榆长期观测实验站 (44°25'N, 122°52'E) 位于吉林省白城市通榆县新华乡的行政地域内，处在白城至双辽沙丘覆盖的冲积平原区，平均海拔高度为 184 m，实验区地形非常平坦。实

验区年降水量 404.3 mm，1999~2002 年的年降水量只有 340 mm 左右。通榆属中温带半干旱大陆性季风气候，植被主要为半干旱气候条件下的草原植被，现在基本已被开垦，沙化、退化和盐碱化严重。实验区以新华乡为中心，分别针对半干旱区农业和退化草地生态系统建立了两个观测点，两点空间距离在 5 km 左右。

实验观测项目主要观测近地面层基本气象要

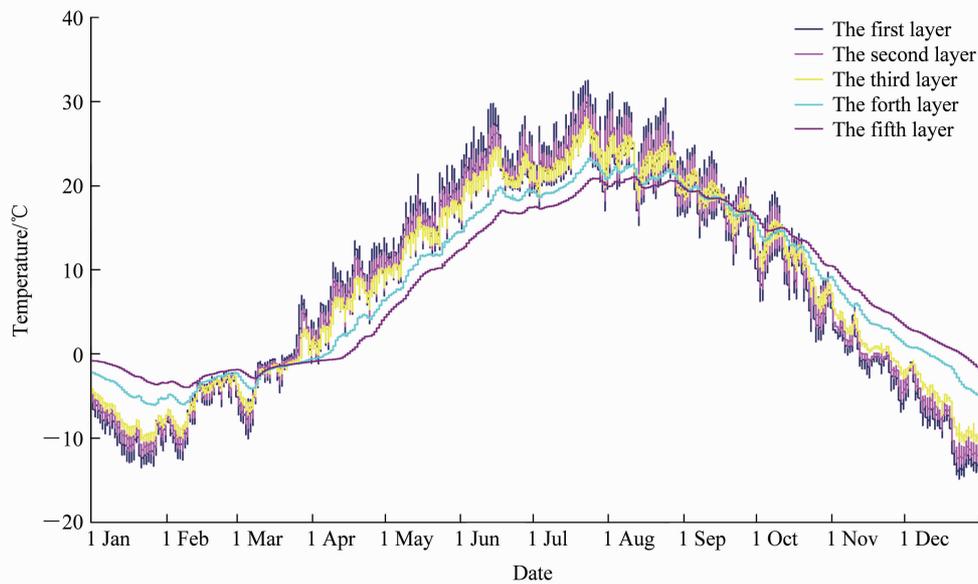


图 1 观测的第一至第五层的土壤温度

Fig. 1 Observed soil temperature from the first layer to the fifth layer

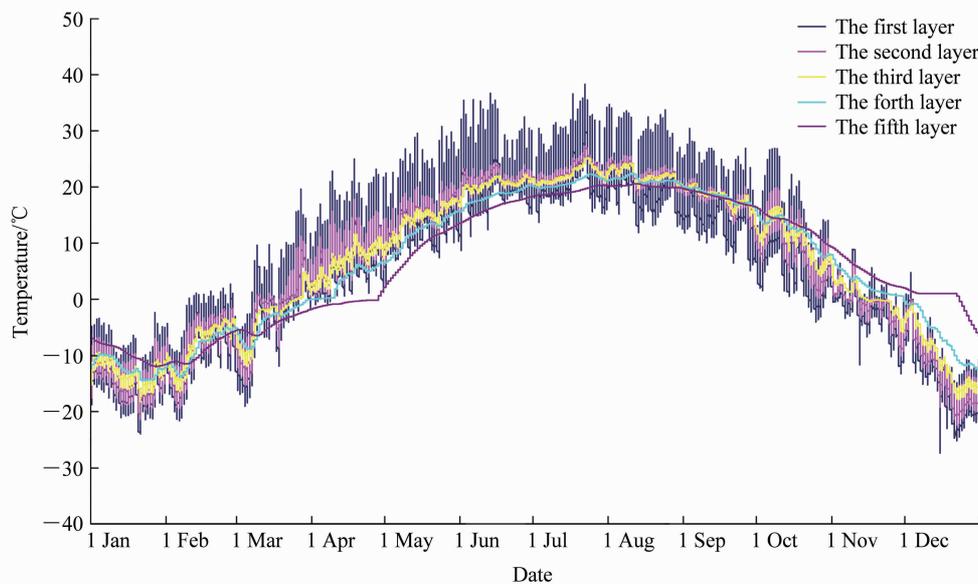


图 2 模拟的第一至第五层土壤温度

Fig. 2 Simulated soil temperature from the first layer to the fifth layer

素、土壤温度、土壤湿度以及近地面层的物质和能量通量。详细的仪器设备情况和观测项目参阅刘辉志等 (2004, 2006) 的研究。

在非生长季农田下垫面无作物, 地表为裸土覆盖; 生长季主要作物为玉米, 最高可达 1.8 m 左右; 退化草地下垫面的草地退化非常严重, 草的覆盖度在 60% 左右, 夏季草最高也不超过 10 cm, 仍在放牧; 在干季, 草的高度在 5 cm 左右, 覆盖度只有 40% 左右。

先进行观测资料质量控制, 去掉不合理或因仪器出现故障、天气等原因产生的缺测点。平均场、湍流场及辐射资料每个样本取样时间长度均为 30 min, 湍流资料的选取要求每个样本内风向变化小于  $45^\circ$ 。

## 4 模拟结果

### 4.1 NOAH 陆面模式模拟性能分析

模式选用通榆农田下垫面观测点 2004 年 1 月 1 日 00 时 (北京时间, 下同) ~ 2004 年 12 月 31 日 23 时 30 分每隔 30 分钟的整年资料, 资料长度为 17568, 土壤观测分为 5 层, 厚度从上至下分别为 0.05、0.1、0.2、0.4、0.8 m。输入模式的大气强迫场包括观测的风速风向、空气温度、相对湿度、气压、向下短波辐射和降水量等; 输入的

控制文件包括土壤各层的初始含水量, 土壤各层的初始温度, 各月平均的地表反照率 ( $A_b$ )、植被覆盖率、植被根系到达的土壤层, 观测点的土壤类型和植被类型等。模式中采用美国 USGS 资料的分类方法 (Gutman et al., 1998), 将土壤类型分为 9 种, 植被类型分为 13 类。试验中通榆农田下垫面观测点的土壤类型取为 5, 即为粗细共存的沙化粘土, 植被类型取为 12, 即农田。模式还通过启用循环调整 (spin-up) 过程对模式进行调整, 仍然使用上述整年资料, 循环调整的次数为 3。

分别使用通榆农田观测点的大气强迫资料和控制文件对单点的 NOAH 陆面模式的性能进行模拟研究。通过观测 (图 1) 和模拟 (图 2) 的第一至第五层全年土壤温度进行比较, 可以看出两者特点都较为相似, 如从表层到深层土壤温度的振动幅度逐层减少, 而全年的温度最高值和最低值也是表层较深层大, 同时从表层到深层波动的位相逐层落后, 这与实际情况相吻合, 即表层温度受大气温度和太阳辐射日变化的影响较大, 深层受影响较小, 而年际波动表层随大气的响应较快, 下层则通过上层的热传导温度逐渐发生变化。其中第一层到第五层的位相相差一个月左右。图 3 为观测和模拟的第二层土壤温度对比图。通过比较发现, 模拟和观测的土壤温度在数值和变化趋

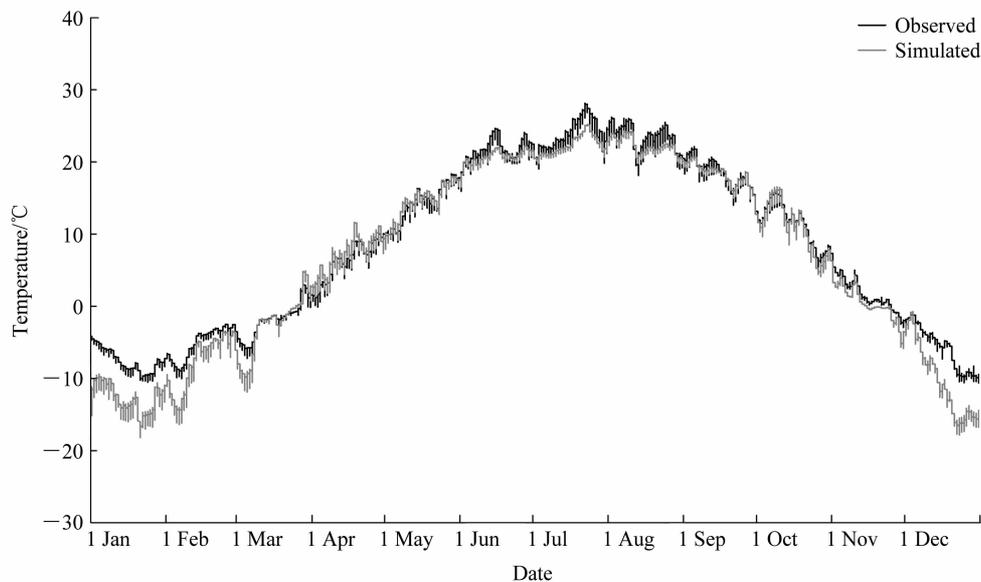


图 3 观测与模拟的第二层土壤温度的比较

Fig. 3 Comparison of simulation and observation for soil temperature in the second layer

势上都很相近，如夏季的温度与观测相符，只是在冬季时模拟的温度较观测略有偏低。

从向上的短波辐射的模拟（见图 4）上看，与其观测值在全年都很相符。由图 5 可见，向上的长波辐射的模拟和观测也符合较好，只是每日振动的幅度模拟值较观测值稍小。而感热通量的模拟较观测在夏季偏高（图 6），约为  $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，而观测的感热通量夏季为  $230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，冬季较符

合。潜热通量的模拟全年都较观测偏低（图 7），平均偏低  $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。图 8 为模拟的五层土壤体积含水量图。从模拟的结果看，土壤的体积含水量从顶层到底层是逐层光滑的，到了最底层全年的含水量基本维持不变。而最顶层则变化非常剧烈，与图 9 同时段的降水量对比来看，上层的土壤含水量的起伏与降水的对应关系非常好。

通过将这一模式对能量平衡和物质平衡各物

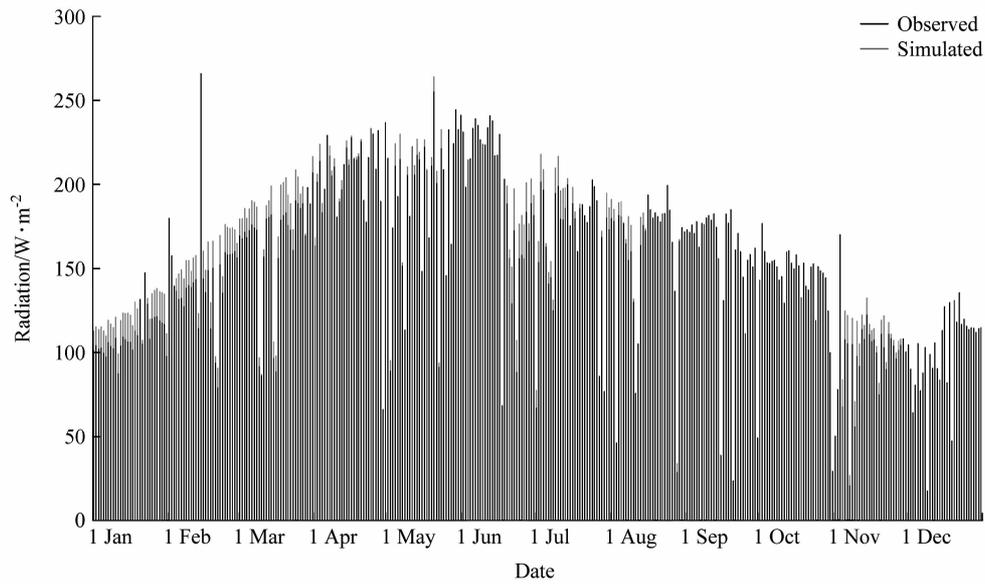


图 4 向上的短波辐射的观测与模拟对比

Fig. 4 Comparison of simulation and observation for upwards short wave radiation

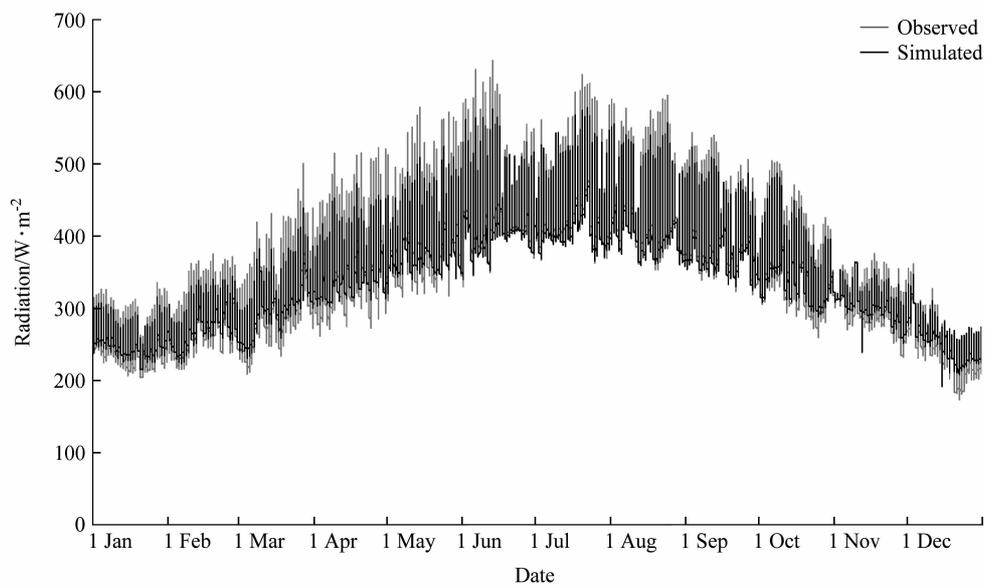


图 5 向上的长波辐射的观测与模拟对比

Fig. 5 Comparison of simulation and observation for upwards long wave radiation

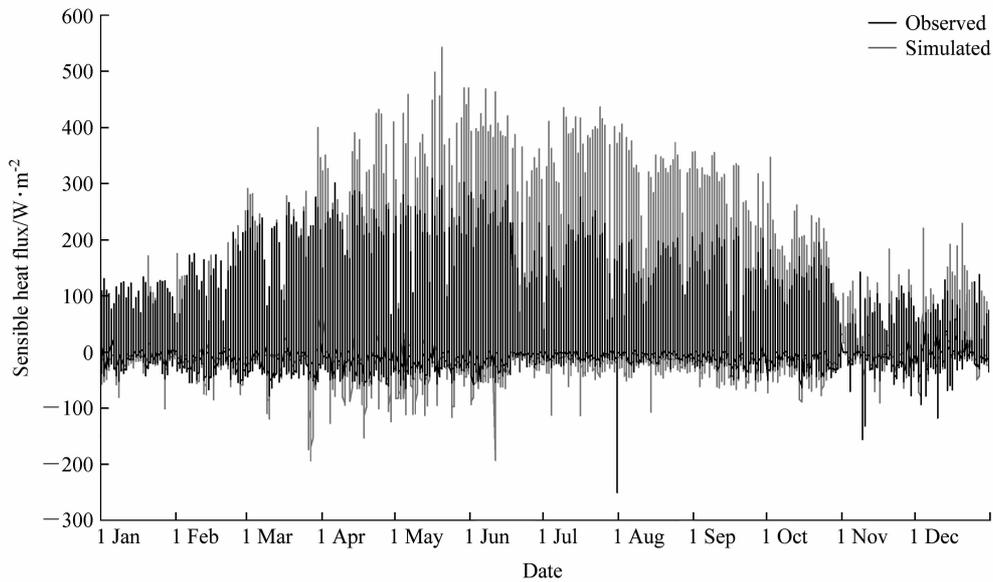


图 6 感热通量观测与模拟的对比

Fig. 6 Comparison of simulation and observation for sensible heat flux

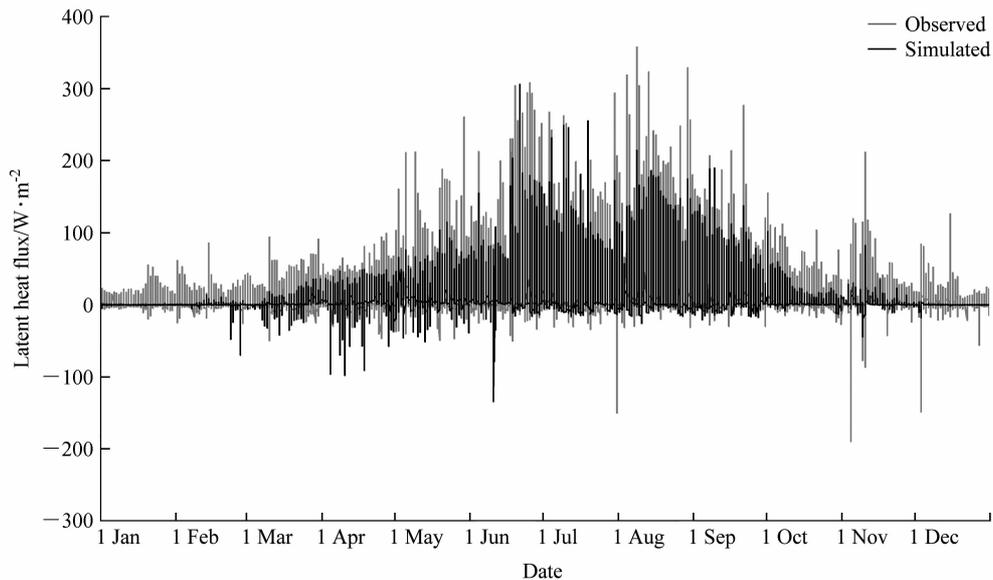


图 7 潜热通量观测与模拟的对比

Fig. 7 Comparison of simulation and observation for latent heat flux

理性的模拟与观测相比较,各物理量的模拟都较合理准确,因此认为可以使用这一模式对植被参数对土壤—大气水分循环的影响进行敏感试验。

#### 4.2 植被参数对土壤—大气间水分循环的影响的敏感试验

植被对土壤—大气间的水分循环的影响非常大。而与植被有关的参数在 NOAH 模式中非常多,如土壤反照率、叶面积指数、粗糙度、初始

土壤湿度 ( $S_m$ )、植被根系深度、太阳辐射项中的冠层阻抗参数、水汽亏缺项中的冠层阻抗参数、植被覆盖率等。表 1 为 NOAH 陆面模式中 与植被相关的参数的取值情况,包括粗糙度  $Z_0$ 、植被的气孔阻抗  $R_{stbl}$ 、太阳辐射项中的冠层阻抗参数  $R_{gtbl}$ 、根系到达的土壤深度  $N_{root}$ 、叶面积指数  $L_{AI}$ 、水汽亏缺项中的冠层阻抗参数  $H_{stbl}$  等。NOAH 陆面模式采用 SSiB 的分类方法,将植被类型

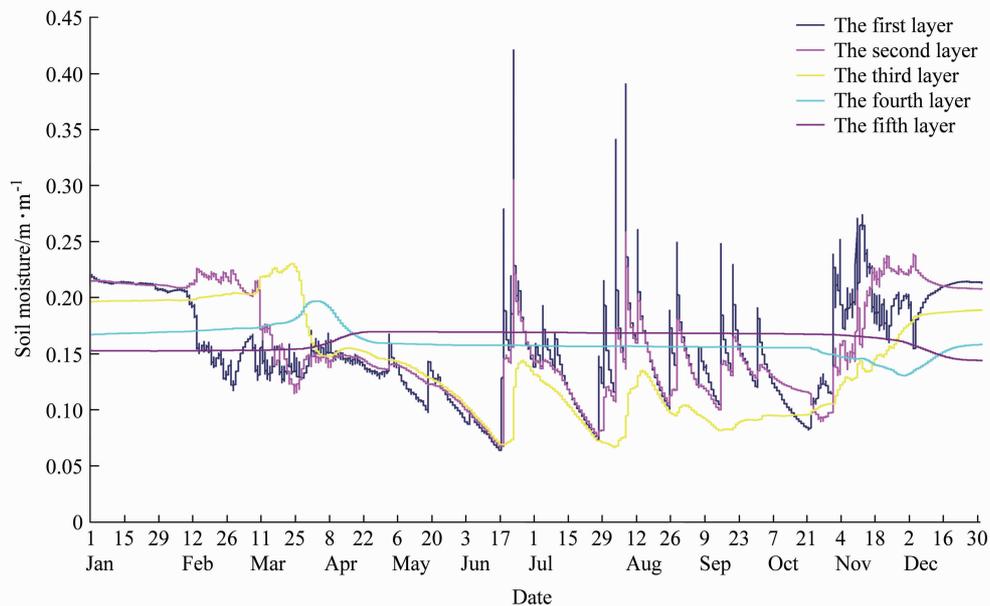


图8 各层土壤湿度模拟

Fig. 8 Simulation of soil moisture in different layers

表1 NOAH 陆面模式中 与植被相关的参数

Table 1 Vegetation-related parameters in NOAH model

植被类型	$Z_0/m$	$R_{smtbl}/s \cdot m^{-1}$	$R_{gltbl}/s \cdot m^{-1}$	$N_{root}$	$L_{AI}$	$H_{stbl}/s \cdot m^{-1}$
常绿阔叶林	2.653	150	30	3	5	41.69
落叶阔叶林	0.826	100	30	3	5	54.53
阔叶针叶林	0.563	125	30	3	5	51.93
常叶针叶林	1.089	150	30	3	5	47.35
落叶针叶林	0.854	100	30	3	5	47.35
带地被阔叶林	0.856	70	65	3	5	54.53
地被	0.035	40	100	3	5	36.35
长久地被上的阔叶灌木	0.238	300	100	3	5	42.00
裸土上的阔叶灌木	0.065	400	100	3	5	42.00
地被上的低矮树木和灌木	0.076	150	100	2	5	42.00
裸土	0.011	400	100	3	5	42.00
农田	0.035	40	100	3	1.5	36.35
冰川	0.011	150	100	2	5	42.00

分为 13 种，根据表 1 可见各种植被类型间在参数取值上的差异很大。这些参数在取值上对水分循环的影响多大、如何影响，则需要进行深入研究。因此设计敏感试验，方法如下：将 NOAH 模式中跟植被有关的参数，分别根据其实际的合理范围，即取其在这 13 种植被类型中的较大值和较小值，进行敏感试验，而将 4.1 中的模拟试验作为控制试验结果，与敏感试验进行比较，分析各项敏感程度。NOAH 模式中的每种植被类型对于粗糙

度、植被的气孔阻抗、太阳辐射项中的冠层阻抗参数、水汽亏缺项中的冠层阻抗参数等都有不同的取值，而这些取值都在一个合理的范围，所以敏感试验将这些项的值取为 13 种植被类型中的最大值和最小值。计算出实际土壤湿度、地表水分蒸发以及冠层的水分蒸腾等反映水分循环的物理量。表 2 为各项敏感试验采用的方法和取值。分别使用这些方案进行敏感试验，其他参数与控制试验相同。

表 2 敏感试验方案  
Table 2 Sensitivity test scheme

方案名称	参数变化
Z <sub>0</sub> 0	土壤粗糙度从原来的 0.035 m 变为 0.011 m
Z <sub>0</sub> 1	土壤粗糙度从原来的 0.035 m 变为 2.653 m
S <sub>m</sub> 0	各层土壤湿度初值均为原第一层初值 0.117 kg · m <sup>-3</sup>
S <sub>m</sub> 1	各层土壤湿度初值均为原第五层初值 0.553 kg · m <sup>-3</sup>
R <sub>smtbl</sub> 0	最小气孔阻抗由原来的 40 s · m <sup>-1</sup> 变为 400 s · m <sup>-1</sup>
R <sub>gltbl</sub> 0	太阳辐射项中的冠层阻抗参数由原来的 100 s · m <sup>-1</sup> 变为 30 s · m <sup>-1</sup>
N <sub>root</sub> 0	根系到达土壤深度由原来的第三层变为第一层
N <sub>root</sub> 1	根系到达土壤深度由原来的第三层变为第五层
L <sub>AI</sub> 05	叶面积指数由原来的 1.5 变为 0.75
L <sub>AI</sub> 2	叶面积指数由原来的 1.5 变为 3.0
H <sub>stbl</sub> 1	水汽亏缺项中的冠层阻抗参数由原来的 36.35 s · m <sup>-1</sup> 变为 54.53 s · m <sup>-1</sup>
A <sub>lb</sub> 0	各月土壤反照率从原值变为各月均为 0.200
A <sub>lb</sub> 1	各月土壤反照率从原值变为各月均为 0.286

表 3 敏感试验与控制试验的偏差的均方根  
Table 3 Root-mean-square of the differences between sensitivity test and control test

方案名称	土壤蒸发 /W · m <sup>-2</sup>	植被蒸腾 /W · m <sup>-2</sup>	顶层土壤湿度
Z <sub>0</sub> 1	7.79	8.89	1.12%
Z <sub>0</sub> 0	12.35	14.23	0.59%
R <sub>smtbl</sub> 0	24.55*	189.74*	6.89%
R <sub>gltbl</sub> 0	6.4	20.42	1.52%
S <sub>m</sub> 1	17.87	40.28	1.25%
S <sub>m</sub> 0	24.0*	42.24	3.35%
N <sub>root</sub> 1	14.36	39.12	2.34%
N <sub>root</sub> 0	19.44	116.45*	6.13%
L <sub>AI</sub> 2	4.45	15.48	1.12%
L <sub>AI</sub> 05	12.35	3104.00	2.84%
H <sub>stbl</sub> 1	1.5	6.75	0.45%
A <sub>lb</sub> 1	61.76*	82.53*	1.86%
A <sub>lb</sub> 0	18.58	41.60	1.78%

\* 表示均方根的前三个高值。

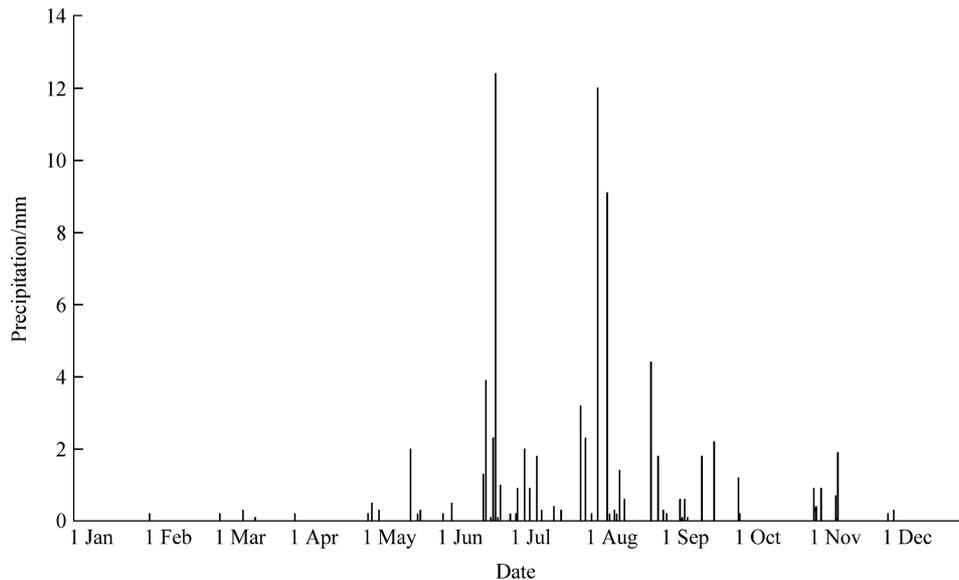


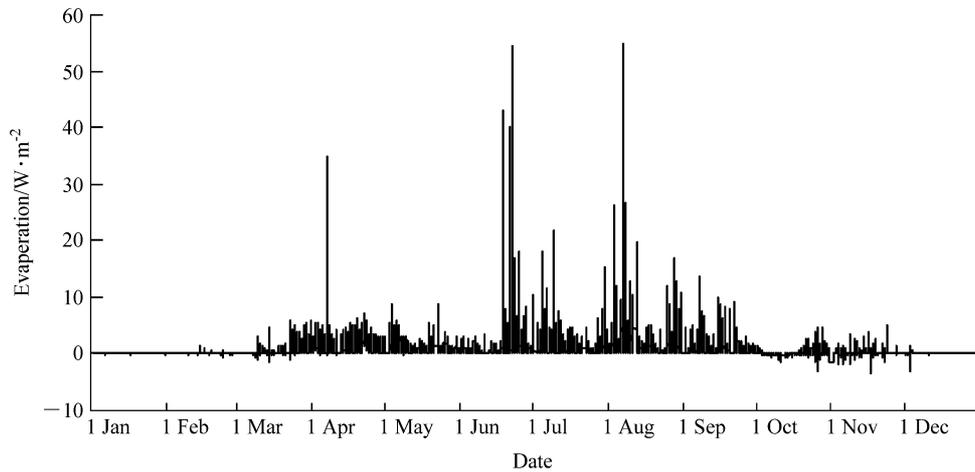
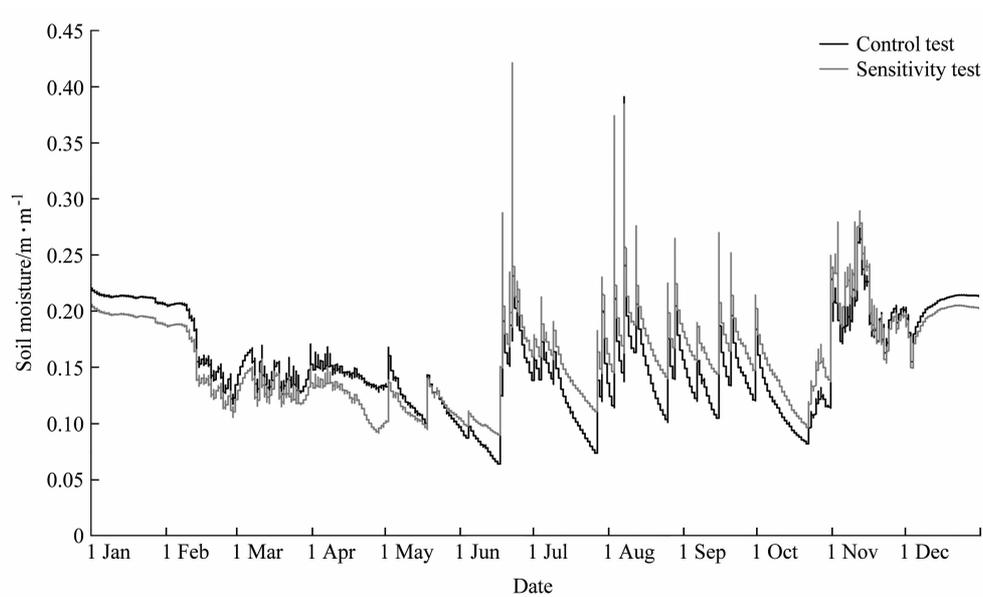
图 9 2004 年全年降水量

Fig. 9 Total precipitation in 2004

在表 3 中, 土壤蒸发对土壤的反照率最敏感, 其次分别是气孔阻抗和顶层的土壤湿度, 最不敏感的是冠层阻抗参数以及叶面积指数, 可见土壤蒸发主要取决于土壤性质。图 10 为 A<sub>lb</sub>1 方案与控制试验计算出的土壤蒸发的差值在一年中的变化。可见增加了反照率后土壤的蒸发量增加, 在夏季增加显著, 冬天的土壤蒸发变化很小。

植被蒸腾对气孔阻抗最敏感, 其次是根系深

度和反照率, 最不敏感的是水汽亏缺项中的冠层阻抗以及粗糙度, 即蒸腾作用主要与植物特征(如叶面气孔和根系)的有关参数的敏感性最大, 最不敏感的是粗糙度和冠层阻抗参数。有关顶层土壤湿度对气孔阻抗最敏感, 其次是根系深度和初始土壤深度, 最不敏感的也是冠层阻抗和粗糙度。图 11 为 N<sub>root</sub>1 方案与控制试验计算出的第一层土壤湿度的对比。根系到达土壤深度由原来的

图 10  $A_{1b,1}$  方案与控制试验计算出的土壤蒸发的差值在一年中的变化Fig. 10 Difference of soil evaporation between control test and sensitivity test with scheme  $A_{1b,1}$ 图 11  $N_{root,1}$  方案与控制试验计算出的第一层土壤湿度的对比Fig. 11 Comparison of soil moisture in the first layer between control test and sensitivity test with scheme  $N_{root,1}$ 

第三层变为第五层时, 土壤湿度的变化幅度变小了, 其中冬季土壤湿度降低, 夏季增加。综合全部 3 个物理量来看, 对模式的水分循环影响较大的因子有气孔阻抗、初始土壤湿度、根系深度和反照率。而敏感程度较低的是叶面积指数、冠层阻抗和粗糙度。每个模式都存在误差, 所以上述结果对 NOAH 是适用的, 但也大致反映了基本情况, 即植被对于水分循环的影响主要是通过根系对土壤水分的吸收、土壤含水量的多少、气孔阻抗对植被蒸腾的影响来进行的。而叶面积指数、

冠层阻抗和粗糙度主要是与边界层的动力过程关系更大, 而对于水分循环的影响较小。当然这是一个模式在一个地区 (半干旱区) 个别年份的结果, 不一定适用于其他情况, 如  $L_{AI}$  的变化在半干旱区影响不显著, 在湿润区则不同。

## 5 讨论

植被覆盖对于陆气之间水分循环的影响很大, 过程和相互作用也较复杂。同时对于有植被覆盖

的陆面过程的模拟也存在很多不准确的地方,而土壤和边界层物理量的观测也存在一定误差,这都使得这方面的研究存在一定的难度。随着陆面模式的不断发展和观测资料的不断丰富,这一问题正逐步得到解决,而植被因子敏感性的研究也通过不断调整参数和丰富观测资料更加深入研究下去。

### 参考文献 (References)

- Charney J G. 1975. Dynamics of deserts and drought and in the Sahel [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101 (428): 193-202.
- Chen F, Janjic Z, Mitchell K. 1997. Impact of atmospheric surface-layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale ETA model [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 85: 391-421.
- Dirmeyer P A, Shukla J. 1994. Albedo as a modulator of climate response to tropical deforestation [J]. *J. Geophys. Res.*, 99 (D10): 20863-20877.
- Ek M, Mitchell K, Lin Y, et al. 2003. Implementation of Noah land surface Model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D22): 8851-8867.
- Gutman G, Ignatov A. 1998. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR for use in numerical weather prediction models [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 1533-1543.
- Henderson-Sellers A, Dickinson R E, Durbidge T B, et al. 1993. Tropical deforestation: Modeling local-to-regional scale climate change [J]. *J. Geophys. Res.*, 98 (D4): 7289-7315.
- Lean J, Rowntree P R. 1997. Understanding the sensitivity of a GCM simulation of Amazonian deforestation to the specification of vegetation and soil characteristics [J]. *J. Climate*, 10 (6): 1216-1235.
- 刘辉志,董文杰,符淙斌,等. 2004. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验 [J]. *气候和环境研究*, 9 (2): 378-389. Liu Huizhi, Dong Wenjie, Fu Congbin, et al. 2004. The long-term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongyu northeast China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9 (2): 378-389.
- 刘辉志,涂刚,董文杰,等. 2006. 半干旱地区地气界面水汽和二氧化碳通量的日变化及季节变化 [J]. *大气科学*, 30 (1): 108-118. Liu Huizhi, Tu Gang, Dong Wenjie, et al. 2006. Seasonal and diurnal variations of the exchange of water vapor and CO<sub>2</sub> between the land surface and atmosphere in the semi-arid area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (1): 108-118.
- Sellers P J. 1992. Biophysical models of land surface processes [C] // Trenberth K E. *Climate System Modeling*. Cambridge: Cambridge University Press, 451-490.
- Shukla J, Nobre C, Sellers P J. 1990. Amazon deforestation and climate change [J]. *Science*, 247 (4948): 1322-1325.
- Zeng N, Neelin J D. 1999. A land-atmosphere interaction theory for the tropical deforestation problem [J]. *J. Climate*, 12 (3): 857-872.