

孟祥新, 符淙斌. 2009. 不同陆面过程模式对半干旱区通榆站模拟性能的检验与对比 [J]. 气候与环境研究, 14 (4): 352-362. Meng Xiangxin, Fu Congbin. 2009. Comparative evaluation of land surface models BATS, LSM, and CoLM at Tongyu station in semi-arid area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (4): 352-362.

不同陆面过程模式对半干旱区通榆站 模拟性能的检验与对比

孟祥新^{1, 2, 3} 符淙斌¹

1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候环境重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 山东省气象科学研究所, 济南 250031

摘要 随着全球气候变化和伴随而来的日益严重的干旱化问题, 干旱/半干旱地区的陆气相互作用引起了越来越多的重视。利用国际协同强化观测期 (CEOP) 观测资料对 3 个不同的陆面过程模式 BATS、LSM 和 CoLM 在半干旱区通榆站进行了模拟检验与对比, 考察了不同陆面过程模式对半干旱地区的模拟性能。结果表明, 3 个模式都可以较好地模拟出半干旱地区地气间的能量通量的季节和日变化, 但模拟性能存在较大差异。对于地表温度和出射长波辐射的模拟, BATS 表现最优; 而对于感热和潜热通量的模拟, CoLM 和 LSM 要好于 BATS, 其中 CoLM 的表现最好。各模式的模拟性能随着季节不同存在着很大的差异, 夏季的模拟要好于冬季, 3 个模式都不能很好地模拟冬季该地区的潜热通量, 说明对半干旱地区冬季地表过程的刻画还有待进一步提高。

关键词 半干旱 陆面过程模式 能量通量

文章编号 1006-9585 (2009) 04-0352-11 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Comparative Evaluation of Land Surface Models BATS, LSM, and CoLM at Tongyu Station in Semi-arid Area

MENG Xiangxin^{1, 2, 3} and FU Congbin¹

1 *Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Shandong Provincial Research Institute of Meteorological Science, Ji'nan 250031*

Abstract With the global climate change and the aridification in northern China, more and more studies have focused on the land-atmosphere interactions in arid/semi-arid areas. The goal of this presentation is to evaluate land surface models BATS, LSM, and CoLM in semi-arid areas using the Coordinated Enhanced Observing Period (CEOP) data, with an emphasis on comparison of the performance of the three models in semi-arid regions. The results show that all of the three models can simulate the diurnal and seasonal cycle of the fluxes between land surface and atmosphere in this region, but the performance varies largely among them. For the simulations of the ground

收稿日期 2008-03-04 收到, 2009-01-15 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400500 和国家自然科学基金项目 40645028

作者简介 孟祥新, 男, 1980 年出生, 博士, 主要从事区域气候模拟方面的研究。E-mail: mengxx@tea.ac.cn

surface temperature and ground emitted longwave radiation, BATS is better than LSM and CoLM. As to sensible and latent heat flux, CoLM and LSM are better, and CoLM is the best. The performance of the three models varies with seasons, with summer better than winter. It is significant that all three models can not simulate the latent heat flux well in winter, which indicates that the current LSMs should pay more attention to improve the simulating performance in semi-arid areas in winter.

Key words semi-arid, land surface model, energy flux

1 引言

干旱/半干旱地区的面积大约占全球陆地面积的 1/3, 近年来, 随着全球气候的变化, 地球环境急剧恶化, 干旱化问题引起了人们越来越多的重视。半干旱地区处于气候和生态系统过渡带, 是对全球气候变化响应的敏感地带 (符淙斌等, 2003), 也是干旱化研究的重点地区之一 (符淙斌等, 2002)。全球地气耦合试验 (GLACE) 揭示出全球地气耦合最强烈的地区大多分布在干旱/半干旱地区 (Koster et al., 2004), 然而目前的区域气候模式对该地区的模拟性能还相对较差 (Fu et al., 2005)。限于观测资料的缺乏, 目前对半干旱区陆气相互作用的认识还存在着很多不确定性。如何提高区域气候模式对半干旱地区的模拟能力, 为研究半干旱地区陆气相互作用的机理, 预测干旱化趋势提供可靠的定量分析工具就成为一个重要的问题。

陆面作为下垫面, 与其上的大气进行着物质、能量和动量的交换, 是大气重要的能量来源, 在不同的时空尺度上影响着区域和全球的气候变化。作为区域气候模式的下垫面条件, 陆面过程模式对模拟性能的优劣起着重要的作用。提高陆面模式对半干旱区的模拟性能应该是减小目前区域气候模式在该地区误差的一个重要手段, 因此考察不同的陆面过程模式对半干旱区的模拟能力, 检验它们的长期模拟效果就显得非常重要。为了改进大气与陆地间的能量和水汽交换的参数化方案, 国际上开展了陆面参数化方案的相互比较计划 PILPS (Henderson-Sellers et al., 1993), 结果表明模式间差别较大。近年来在观测研究的基础上, 陆面过程模式的检验在我国开展了很多工作, 其中不少分布在干旱/半干旱区 (张晶等, 1998; 刘和平等, 1999; 周锁铨等, 2003; 朱德琴等,

2005)。这些模拟检验大都集中在加强观测期的几天到几周内, 缺乏对陆气相互作用的长期模拟性能的检验, 尤其是不同陆面过程在半干旱区的模拟能力的对比。比较现有的陆面过程模式能否较好地模拟陆面过程的日变化、季节变化以及年际变化, 为区域气候模式在半干旱区提供一个比较准确和合理的下边界条件就显得非常重要。

近年来国际上开展了协同强化观测计划 CEOP (<http://www.ceop.net/>), 旨在获取全球尺度上不同典型下垫面下的连续的地球能量平衡和水循环资料, 其中在我国半干旱地区吉林通榆建有 CEOP 基准站, 并于 2002 年 10 月开始长期的连续观测 (刘辉志等, 2004), 这就为在半干旱区的地气相互作用的长期模拟和检验提供了资料基础。

本文利用 CEOP 通榆站 2002~2004 年的长期观测资料, 对 3 个陆面过程模式 BATS、LSM 和 CoLM 在半干旱地区的长期模拟性能进行了检验和对比, 旨在比较各陆面模式对半干旱地区模拟性能的优劣, 为下一步改进区域气候模式的下垫面过程提供参考依据。

2 模式和资料介绍

2.1 模式介绍

本文用 3 个陆面过程模式, 即目前大多数区域气候模式耦合的 BATS、LSM 和 CoLM, 在半干旱地区进行长期的模拟检验和对比。

生物圈大气圈输送方案 BATS (Dickinson et al., 1986, 1993) 是由 Dickinson et al. (1986) 发展的土壤、植被与大气间的输运模型。它具有 1 层植被、3 层土壤 (0.1、1 和 10 m) 和 1 层雪。土壤温度的计算采用的是强迫恢复法 (Force-restore), 土壤湿度采用的是 Darcy 定律。它将全球陆地表面分为 18 类 (12 种植被和 6 种非植被覆

盖), 每种地表覆盖的性质由 15 个参数决定。全球土壤质地分为 12 种 (每种 8 个参数), 土壤颜色有 8 种 (每种有 4 个基本的反照率)。

NCAR 的陆面过程模式 LSM 是由 Bonan (1996) 发展起来的一个陆地大气间能量、动量、水和 CO₂ 交换的一维模式, 它具有 6 层土壤 (0.05、0.20、0.50、1.10、2.30 和 4.70 m)。模式考虑了不同植被生态上的差异, 允许在一个网格点存在多种植被类型, 包括湖泊和湿地, 以此来刻画陆面特征的次网格非均匀性, 它对生物过程和碳循环过程进行了详细的描述。LSM 将地表类型分为 28 类 (由 12 类植被类型组成), 每个类型都包含多种植被类型和裸土, 湖泊和湿地也占据一个次网格。一个网格点最多可以有 5 个次网格组成, 它们都由整个格点平均的大气驱动场驱动, 每个次网格独立运算, 计算出的地表通量等变量则按面积加权平均方法得到网格平均的地表各通量。

通用陆面过程模式 CoLM (Common Land Model) 是由 Dai et al. (2003) 综合现有各陆面过程的优点, 以 BATS、LSM 和 IAP94 为原型, 发展的新一代通用陆面过程模式。模式中一个网格点被分为几个次网格, 每一个次网格拥有一个单一的地表覆盖类型, 并于次网格内保持能量和水分交换的平衡, 计算出来的热量和水汽通量通过面积加权平均得到整个网格点的数值。CoLM 拥有 1 层植被、10 层土壤 (0.007、0.028、0.062、0.119、0.212、0.366、0.620、1.038、1.728 和 2.865 m) 和 5 层雪, 采用的是 25 类 USGS 植被覆盖、17 类土壤质地和 8 种土壤颜色。模式采用了与半分布式水文模型 TOPMODEL 相近的径流方案, 加入了处理气孔光合作用阻抗的两个大叶模型及基于二流近似方法的辐射传输方案 (Dai et al., 2004), 每个时间步长拥有完美的能量和水分平衡。

2.2 资料介绍

本文主要采用协同加强观测计划 (CEOP) 在中国半干旱区基准站吉林通榆站的资料驱动和检验陆面模式。自 1995 年始, 世界气候研究计划 (WCRP) 和世界气象组织 (WMO) 以及地球观测卫星委员会 (CEOS) 在全球集成观测战略伙伴关系 (IGOS-P) 框架下建立了 CEOP, 并于 2007

年开始与全球能量与水循环试验 (GEWEX) 水文气象工作组合并, 更名为能量与水循环协同观测计划 (CEOP), 其目的是获取连续高质量的地球能量平衡与水循环资料。在国家重点基础研究发展规划项目“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测”的支持下, 中国科学院大气物理研究所典型半干旱区吉林通榆建立了“干旱化和有序人类活动”长期观测实验站 (刘辉志等, 2004), 加入了 CEOP 观测网, 并于 2002 年 10 月开始连续观测。

通榆站 (44.42°N, 122.87°E) 位于吉林省白城市通榆县新华乡境内, 地处白城至双辽沙丘覆盖的冲击平原区, 属于典型半干旱区, 平均海拔 184 m, 土壤质地主要为沙土和淡黑钙土。该站设有两个不同的下垫面观测点: 农田和退化草地, 两者相距 5 km 左右。试验站采用涡动相关法进行观测, 主要在近地面层进行, 观测项目包括平均场和湍流场两部分, 主要的观测变量有近地面基本气象要素、土壤温湿度和近地面物质、能量通量。农田和草地下垫面的观测项目完全一致并且同步进行。本文采用通榆站从 2002 年 10 月~2004 年 12 月的观测资料, 包括地表气象和辐射资料, 将其作为驱动场驱动陆面模式 (如表 1 所示), 地面通量资料用来检验模式 (如表 2 所示)。

2.3 试验设计

本文利用通榆站每隔 30 min 一次的资料驱动 3 个陆面模式进行积分, 模式步长都设定为 30 min, 主要模拟的变量为地表热通量 (感热和潜热)、地表辐射通量 (净辐射、反射短波辐射和出射长波辐射) 和地表温度。各模式分别采用农田和

表 1 模式驱动资料
Table 1 Forcing data of the models

驱动资料	观测高度 /m		单位
	农田	草地	
向下的短波辐射	3.00	2.00	W · m ⁻²
向下的长波辐射	3.00	2.00	W · m ⁻²
降水	1.00	1.00	mm · (1800 s) ⁻¹
地表气温	1.95	1.35	°C
地表纬向风速	17.06	17.46	m · s ⁻¹
地表经向风速	17.06	17.46	m · s ⁻¹
地表气压	1.50	1.50	hPa
地表比湿	1.95	1.35	g · kg ⁻¹

表 2 模式验证资料
Table 2 Validation data of the models

验证资料	观测高度 /m		单位
	农田	草地	
感热通量	3.50	2.00	$W \cdot m^{-2}$
潜热通量	3.50	2.00	$W \cdot m^{-2}$
净辐射	3.00	2.00	$W \cdot m^{-2}$
反射短波辐射	3.00	2.00	$W \cdot m^{-2}$
出射长波辐射	3.00	2.00	$W \cdot m^{-2}$
地表温度	-0.02	-0.02	$^{\circ}C$

退化草地两个不同的下垫面进行模拟。农田下垫面土壤主要为沙土和淡黑钙土, 主要作物为高粱和玉米, 每年的 5~9 月是生长季, 冬春季节则为裸土覆盖, 无作物; 草地下垫面的土壤主要为盐碱土和淡黑钙土, 植被覆盖度大约在 60% 左右。为了与观测相比较, 各模式也是每隔 30 min 输出一次结果。

对于缺测资料的处理, 如果是短时间 (2 h 以内) 的缺测, 采用前后线性插值的办法补齐, 长时间 (2 h 以上) 的缺测则采用该月的月平均值进行补齐处理。

3 模拟结果分析

分别从季节变化和日变化两个方面探讨 3 个模式对半干旱区地表温度、辐射通量和热通量的模拟性能, 重点在比较几个模式对半干旱区陆面过程模拟的优劣。

3.1 地表温度

地表温度是地气相互作用过程中的重要物理

参量之一, 其作为下垫面强迫是导致气候异常的一个重要因子 (李跃凤等, 2002)。3 个模式对地表温度的处理有所不同, BATS 采用强迫—恢复法 (Dickinson, 1988), 而 LSM 和 CoLM 则用直接求解土壤热传导方程的方法。在 BATS 中, 土壤表层温度以日变化周期为主, 其地表温度的计算可表示为:

$$C\Delta t \frac{\partial T_{gl}}{\partial t} + 2AT_{gl} = B,$$

其中, T_{gl} 为地表温度, C 为土壤热容量, Δt 为时间步长, $A=0.5v_d\Delta t$, v_d 为日变率, B 表示地表能量净收支。LSM 和 CoLM 的土壤温度的热传导方程可写为:

$$c_j\Delta z_j \frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} = \omega(f_j^n - f_{j-1}^n) + (1-\omega)(F_j^{n+1} - F_{j-1}^{n+1}),$$

其中 c 、 Δz 、 T 和 F 分别为土壤容积热容量、土壤分层厚度、土壤温度和土壤热通量, 权重系数 $\omega=0.5$, $j=l_{sn}+1, \dots, -1, 0, \dots, l_s$, l_{sn} 为积雪层数, l_s 为土壤层数。在表层 ($j=l_{sn}+1$) 有边界条件 $F_{j-1}=-G$, G 为地表的土壤热通量。

分别从长期的季节变化和日变化两方面比较对地表温度的模拟, 如图 1 和 2 所示。图 1 是 3 个模式对地表温度的日平均值的模拟以及与观测的对比 (以农田下垫面为例, 时间段为 2002 年 10 月~2003 年 9 月)。3 个模式都能很好地模拟出地表温度的季节变化, 但模拟的振幅偏大。与观测值相比, BATS 模拟效果较好, 模拟值的均方根误差为 $2.98^{\circ}C$, 而 LSM 和 CoLM 的均方根误差

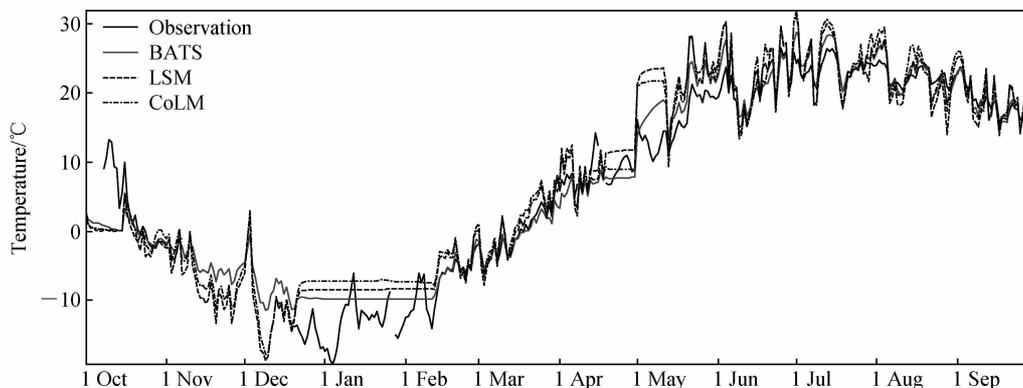


图 1 陆面模式对通榆农田下垫面地表温度季节变化的模拟与观测对比

Fig. 1 Seasonal variation of cropland surface temperature at Tongyu from the three models and observations

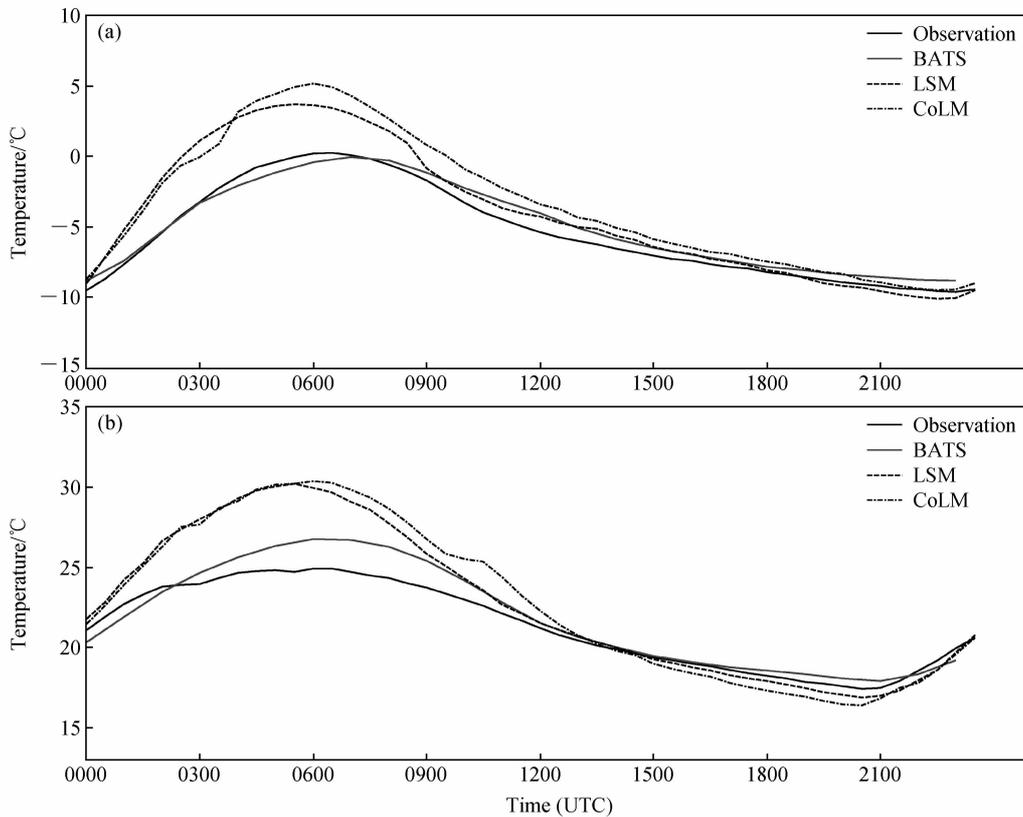


图2 同图1, 但为日变化: (a) 冬季; (b) 夏季

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for diurnal variation: (a) winter; (b) summer

要稍大一些, 分别为 4.16 和 4.20 °C。对于退化草地下垫面 (图略), 模式对季节变化的模拟结果类似, 同样是 BATS 的模拟效果要稍好于其他两个模式, BATS、LSM 和 CoLM 在退化草地下垫面的均方根误差分别为 2.92、3.70 和 3.36 °C, 整体模拟效果要好于农田下垫面。

各模式对不同季节的模拟效果不同, 图 2 是 3 个模式对地表温度日变化的模拟及与观测的对比 (仍以农田下垫面为例), 分别考察了冬季和夏季的模拟效果。为了便于比较, 选取了冬、夏季资料连续性非常好的两个时段: 冬季取 2003 年 2 月 13~28 日, 夏季取 2003 年 7 月 1~25 日。模式能较好地模拟出冬季地表温度的日变化 (图 2a), 但对地表温度峰值的模拟要偏高, 晚间的模拟要好于白天, 其中 BATS 与观测值最为接近。与冬季类似, 夏季 (图 2b) 日变化模拟的振幅比观测偏大, 主要体现在白天峰值的模拟偏高, BATS 的模拟与观测最为接近。

总体上看, 3 个陆面模式都能较好地模拟地

表温度的季节和日变化, 日变化的模拟峰值偏高, BATS 相对效果较好, 其计算地表温度的强迫恢复法能更好地表述该地区的地表温度的变化特征。另外各模式对退化草地下垫面的模拟要稍好于农田下垫面。

3.2 地表辐射通量

地面接收的能量来自太阳的短波辐射和大气的长波辐射, 并向上反射短波和出射长波辐射, 对辐射通量的模拟好坏关系到地表能量平衡的模拟以及对感热和潜热的分配。模式中地面裸土的直射反照度和散射反照度由土壤和雪的反照度加权平均得到, 而对于植被反照度的计算, 3 个模式有较大的不同: BATS 根据植被类型指定植被的反照度, LSM 和 CoLM 则采用了二流近似模型进行计算, CoLM 进行了较为详细的处理。3 个模式都能较好地模拟辐射通量长期的季节变化, 这里只讨论它们对日变化的模拟情况, 如图 3~5 所示。

3 个模式都能较好地模拟出射长波辐射的日变化 (图 3), 但不论冬季还是夏季, 峰值都较观

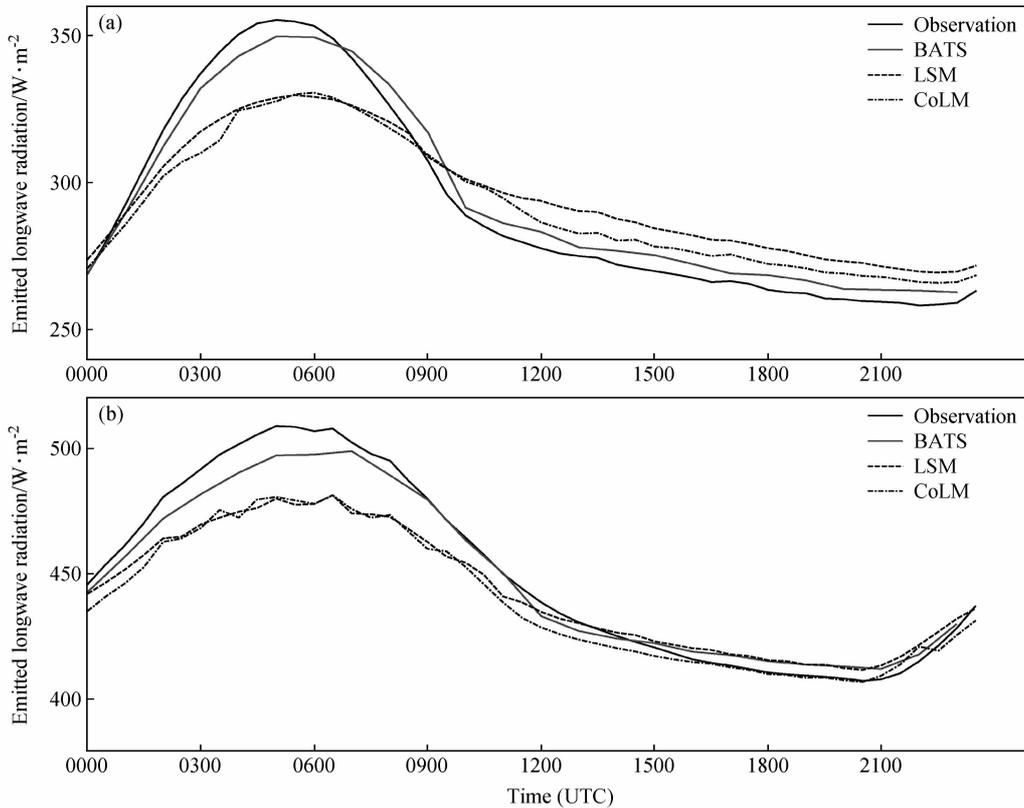


图3 同图2, 但为出射长波辐射

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for emitted longwave radiation

测偏低。BATS 效果较好, 偏低不到 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, LSM 和 CoLM 则偏低 $30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; 晚间的模拟值偏差较小, 尤其是夏季 BATS 和 CoLM 在晚间的模拟与观测非常接近, 而冬季 3 个模式在晚间的模拟相对于观测值偏高。总体来看, BATS 对出射长波辐射的模拟最好, 与观测偏差较小, 而 LSM 和 CoLM 的模拟值相接近, 这与上节地表温度的模拟结果是吻合的, 说明地表温度的模拟好坏对出射长波辐射的模拟有重要的作用。对退化草地下垫面的模拟类似, 只是 BATS 在夏季日变化峰值的模拟要偏高 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 而其他两个模式的峰值则偏低 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

冬季 3 个模式对反射短波辐射的模拟 (图 4) 差异较大, 峰值模拟偏低。相对于观测值, CoLM 的模拟最好, 峰值偏低 $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, BATS 次之, 峰值偏低 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 而 LSM 的模拟较差, 峰值偏低达到了 $80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。夏季各个模式的模拟性能都有很大的提高, 最明显的是 CoLM 的模拟值与观测非常吻合, BATS 和 LSM 峰值的模拟则

偏差 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 左右。这说明 3 个模式对夏季地表反射太阳辐射的模拟性能比冬季明显提高, CoLM 对该地区地表反照度的刻画是最好的, 夏季最为明显。对于退化草地下垫面, 同样是 CoLM 的模拟效果最好, 冬季峰值偏低 $40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 夏季与观测基本吻合; 与农田下垫面不同, 冬季 BATS 和 LSM 的模拟非常接近, 峰值偏低 $60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 而夏季 LSM 的模拟效果与 CoLM 和观测都非常吻合, BATS 则偏低 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 这说明 LSM 对草地下垫面地表反照度的模拟要明显优于农田下垫面。

如图 5 所示, 3 个模式同样较好地模拟了净辐射的日变化, 对地表能量平衡的描述都较为准确。由于对出射长波辐射和反射短波辐射的模拟, 夏季都好于冬季, 在净辐射方面, 夏季的模拟也明显好于冬季。冬季净辐射模拟峰值偏差较大, 这是由于冬季各模式模拟的出射长波辐射和反射的短波辐射都偏低, BATS 和 CoLM 的模拟值很接近, LSM 与观测偏差最大。3 个模式对夏季净辐

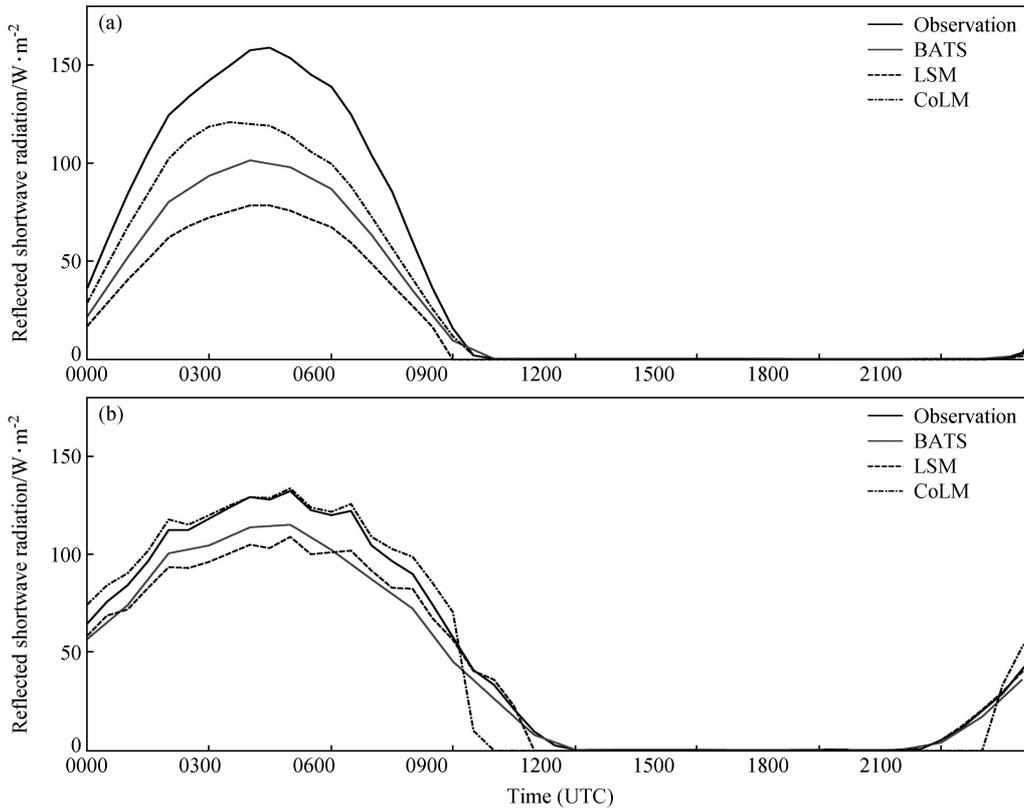


图4 同图3, 但为反射短波辐射

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for reflected shortwave radiation

射的模拟与观测都非常接近, CoLM 和 BATS 偏差较小。

总的来说, 3 个模式都能较好地模拟出地表辐射通量的季节和日变化, 但模拟效果随季节差异较大, 特别是反射短波辐射的模拟夏季明显好于冬季, 模式对冬季植被稀疏情况下的反照度的刻画还较为粗糙。模式间也有较大差异, BATS 对地表出射长波辐射的模拟要好于其他两个模式, 这应该与 BATS 在地表温度的模拟方面表现较好有关, 而 CoLM 处理植被冠层辐射传输的二流近似方案刻画地较为细致, 使得其对地表反照度的刻画是最好的, 尤其在夏季与观测值非常吻合。

3.3 地表热通量

地表作为大气重要的能量来源, 主要以感热和潜热的形式将吸收的能量返回大气, 所以陆面模式对地表热通量的模拟将直接关系到大气模式的模拟效果。模式对地表热通量的计算采用 Monin-Obukhov 相似性理论, 以 LSM 为例, 模式计算的感热和水汽通量可写成如下形式:

$$H = -\rho_a c_p \frac{(\theta_a - \theta_s)}{r_{ah}},$$

$$E = -\rho_a \frac{(q_a - q_s)}{r_{aw}},$$

其中, ρ_a 为空气密度, c_p 为空气的质量定压热容, θ_a 和 θ_s 分别为参考高度和地表面的位温, q_a 和 q_s 分别为参考高度和地表面的比湿, r_{ah} 和 r_{aw} 表示感热和潜热通量的动力学阻尼系数。

各模式对感热的模拟(图6)差别较大, 冬季的模拟值都要偏高, 而夏季要相对好一些。总体来说, CoLM 对感热的模拟是最好的, 尤其是在夏季; 其次是 LSM, 夏季的模拟值与观测也较为接近, 但冬季偏差较其他两个模式大; 而 BATS 对感热的模拟值在夏季明显偏大, 特别是 8 和 9 月偏差最大。5 月农田下垫面从非生长季过渡到生长季时, BATS 和 CoLM 对感热的模拟偏差都较大, 而 LSM 在该月模拟地最好。对于潜热的模拟, 同样是 CoLM 与观测最为接近, 效果最好, 与感热的模拟相对应, BATS 对潜热的模拟在夏季偏低, 同样 BATS 对 5 月潜热的模拟偏差较大。

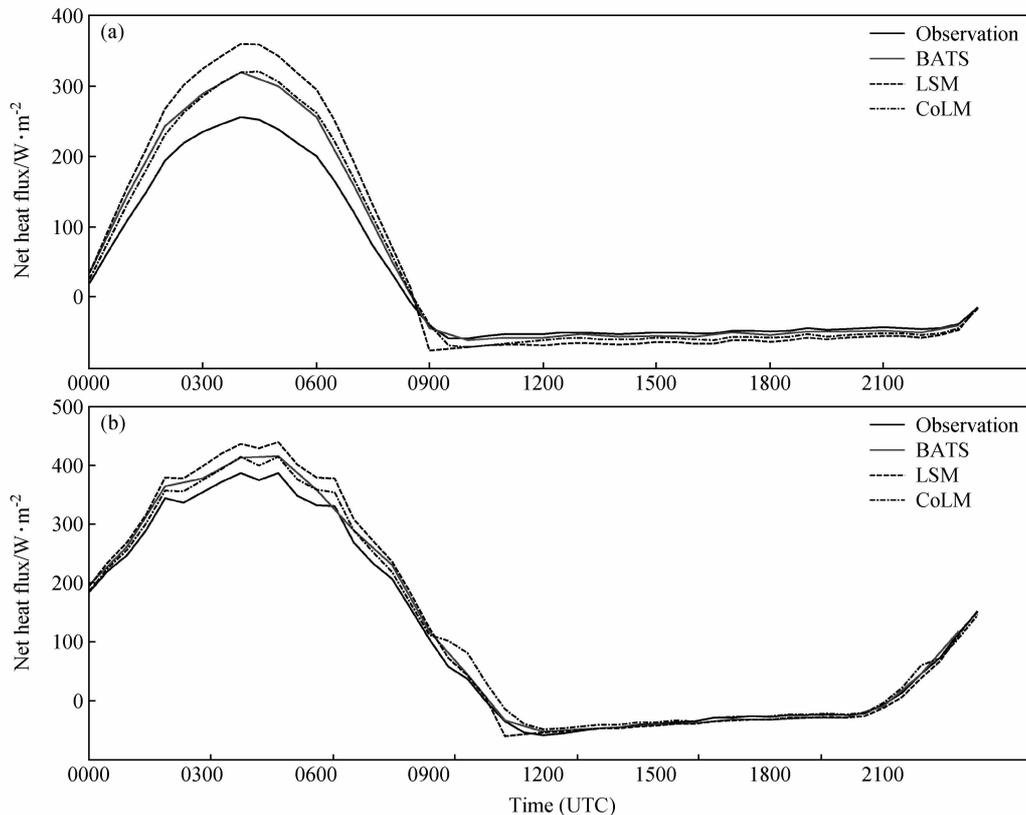


图5 同图3, 但为净辐射

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for net radiation

这说明 CoLM 对该地区热通量的分配刻画地比其他两个模式好, BATS 没有很好地模拟出夏季感热通量的特征。

对感热通量日变化的模拟(图略), 3个模式模拟的白天峰值都偏大, 晚间偏差很小, 同样是 CoLM 表现最好, BATS 模拟的感热峰值在夏季偏大 $100 W \cdot m^{-2}$, 冬季则是 LSM 模拟的峰值偏差最大, 也偏大 $100 W \cdot m^{-2}$ 左右。潜热通量日变化的模拟情况如图 7 所示。冬季, 农田下垫面潜热比较小, 明显地看出, 3个模式都不能很好地模拟出该地区冬季潜热的日变化, BATS 和 CoLM 模拟的潜热都极小, 而 LSM 则偏移较大, 都没能刻画冬季稀疏植被下的潜热日变化。但模式对于夏季潜热的模拟性能都有很大的提高, CoLM 的模拟与观测最为接近, 效果较好, LSM 模拟的潜热峰值偏高, 而 BATS 模拟的潜热峰值偏低。可以看出, CoLM 对地表净辐射能量分配的模拟效果要好于其他两个模式, 尤其体现在对夏季潜热通量的模拟。

为了更好地探讨 3 个模式对该地区感热和潜热的模拟性能, 以农田下垫面为例, 分别计算了感热和潜热 2003~2004 年的均方根误差随季节的变化(图 8)。各模式的模拟效果随季节变化而变化, LSM 模拟的冬季感热偏差比其他两个大, 而 BATS 在夏季的偏差最大, CoLM 的结果在夏季明显好于其他两个模式, 冬季则与 BATS 接近, 效果最好。对于潜热, 3 个模式在冬季的偏差都较为接近(都没能很好地模拟出冬季潜热), 而最大的区别体现在夏季, CoLM 的表现效果要明显好于其他两个模式; 其次是 LSM, 在春末夏初表现较好, 而在秋冬季则与 BATS 相近; BATS 夏季的偏差比其他两个模式大。

总体上看, CoLM 对该地区地表热通量的模拟效果最好, 尤其体现在夏季; BATS 对夏季感热和潜热的分配模拟地较差, 尤其是感热的模拟偏差较大; LSM 则介于两者之间。3 个模式都没能很好地模拟冬季潜热的日变化, 它们对这种半干旱区冬季稀疏植被下垫面的模拟性能还有待进

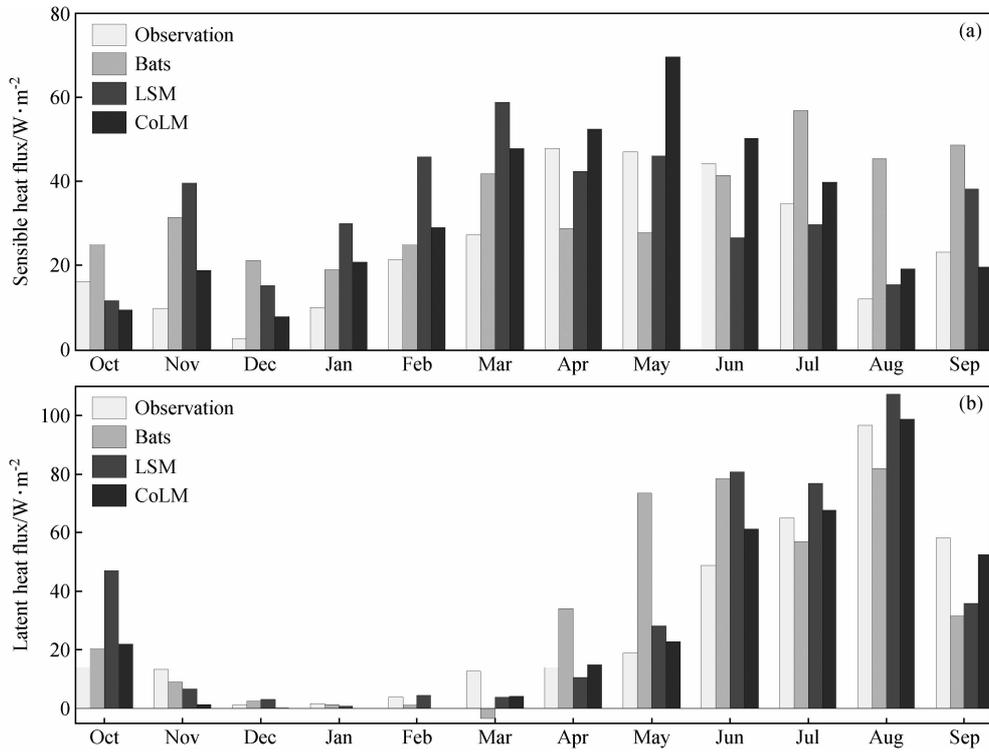


图 6 陆面模式对通榆农田下垫面 (a) 感热和 (b) 潜热季节变化的模拟与观测对比

Fig. 6 Seasonal variation of (a) sensible and (b) latent heat fluxes at cropland surface of Tongyu from the three models and observations

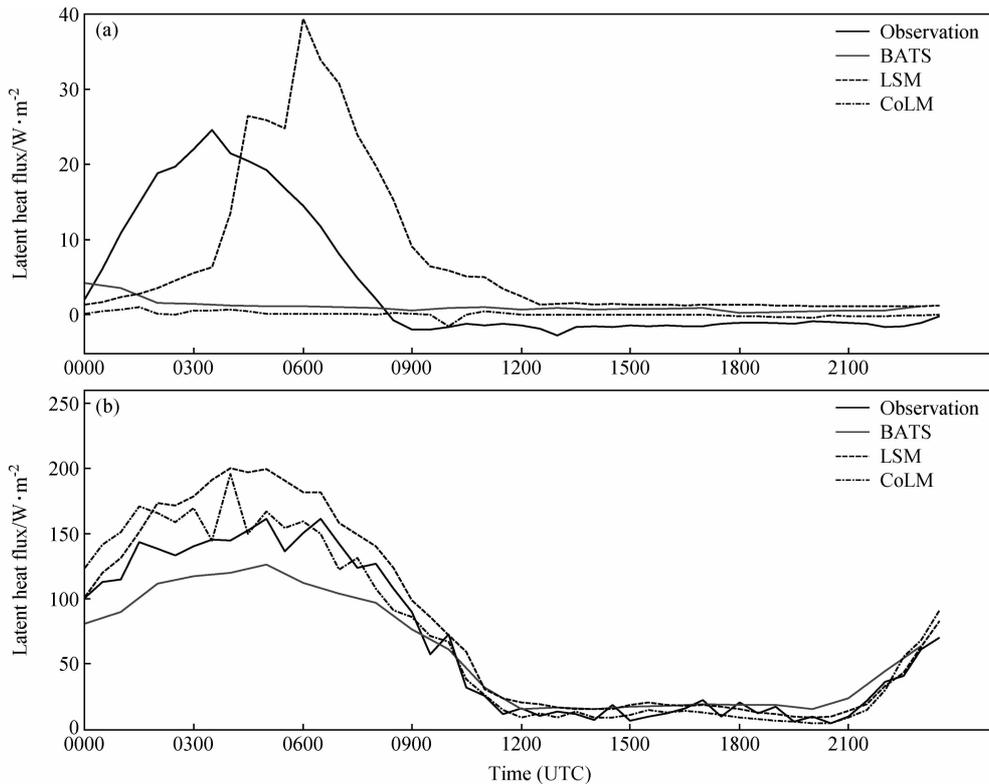


图 7 陆面模式对通榆农田下垫面 (a) 冬季和 (b) 夏季潜热日变化的模拟与观测对比

Fig. 7 Diurnal variation of (a) winter and (b) summer latent heat flux of the three models and observations in cropland

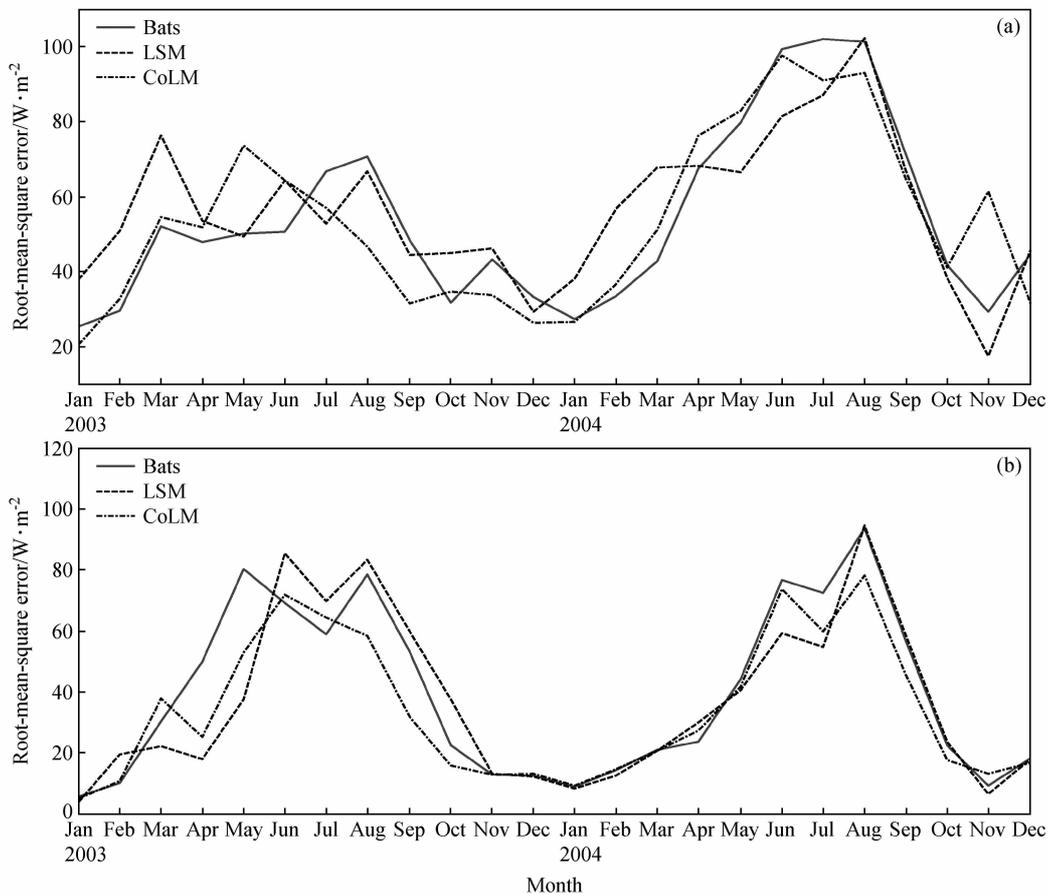


图8 陆面模式对通榆农田下垫面 (a) 感热和 (b) 潜热模拟的均方根误差

Fig. 8 Root-mean-square errors of the (a) sensible and (b) latent heat flux of the three models in cropland

一步提高。

4 总结

利用 CEOP 在半干旱区长期的观测资料对 3 个常用的陆面过程模式对半干旱区的模拟性能作了检验和对比, 由于对物理过程处理的差异以及土壤分层的不同, 3 个模式在半干旱区的模拟性能有较大的差异。对于地表温度的模拟, BATS 模拟效果最好, 出射长波辐射的模拟也较好; LSM 和 CoLM 对土壤温度的计算方法相似, 它们对地表温度和地表出射长波辐射的模拟结果较为接近。对反射短波的模拟, CoLM 的效果非常好, 尤其是夏季, 与观测非常接近, 这与 CoLM 对植被冠层辐射传输的处理较为细致有较大的关系。3 个模式的模拟都能很好地保持能量平衡, 对净辐射的模拟效果都很好, 但是对感热和潜热的分配

却差别较大, CoLM 对热通量的模拟要好于其他两个模式, LSM 次之, BATS 对夏季热通量的模拟误差要比其他两个模式大, 尤其体现在感热的模拟上, 其夏季感热的模拟偏高较大。各模式的模拟效果随季节不同而不同, 夏季明显好于冬季, 冬季半干旱区植被稀疏, 模式对这种情况下的模拟效果还有待进一步提高。

为研究北方干旱化问题的机制, 需要区域气候模式作为定量化的工具, 陆面模式最终要作为下垫面条件耦合到大气模式中去, 它的模拟效果的好坏还要耦合到区域气候模式中去耦合模拟检验, 以进一步提高区域气候模式对半干旱地区的模拟性能。

参考文献 (References)

Bonan G B. 1996. A land surface model (LSM version 1.0) for ec-

- ological, hydrological, and atmospheric studies: Technical description and user's guide [M]. NCAR Tech. Note., NCAR/TN-417+STR; 150pp.
- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84 (8): 1013-1023.
- Dai Y J, Dickinson R E, Wang Y P. 2004. A two-big-leaf model for canopy temperature, photosynthesis, and stomatal conductance [J]. *J. Climate*, 17 (12): 2281-2299.
- Dickinson R E, Hendersonsellers A, Kennedy P J, et al. 1986. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model [M]. NCAR Tech. Note., NCAR/TN-275+STR; 69pp.
- Dickinson R E. 1988. The force-restore model for surface temperatures and its generalizations [J]. *J. Climate*, 1 (11): 1086-1097.
- Dickinson R E, Hendersonsellers A, Kennedy P J. 1993. Biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR community climate model [M]. NCAR Tech. Note., NCAR/TN-387+STR; 72pp.
- 符淙斌, 温刚. 2002. 中国北方干旱化的几个问题 [J]. *气候与环境研究*, 7 (1): 22-29. Fu Congbin, Wen Gang. 2002. Several issues on aridification in the northern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (1): 22-29.
- 符淙斌, 董文杰, 温刚, 等. 2003. 全球变化的区域响应和适应 [J]. *气象学报*, 61 (2): 245-250. Fu Congbin, Dong Wenjie, Wen Gang, et al. 2003. Regional response and adaptation to global change [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (2): 245-250.
- Fu C B, Wang S Y, Xiong Z, et al. 2005. Regional climate model intercomparison project for Asia [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86 (2): 257-266.
- Hendersonsellers A, Yang Z L, Dickinson R E. 1993. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74 (7): 1335-1349.
- Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, et al. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation [J]. *Science*, 305 (5687): 1138-1140.
- 李跃凤, 丁一汇. 2002. 海表温度和地表温度与中国东部夏季异常降水 [J]. *气候与环境研究*, 7 (1): 87-101. Li Yuefeng, Ding Yihui. 2002. Sea surface temperature, land surface temperature and the summer rainfall anomalies over eastern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (1): 87-101.
- 刘和平, 刘树华, 桑建国. 1999. 不同下垫面水分与能量传输模式 [J]. *大气科学*, 23 (4): 449-460. Liu Heping, Liu Shuhua, Sang Jianguo. 1999. A modified SiB to simulate momentum, heat and water transfer over various underlying surfaces [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (4): 449-460.
- 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]. *气候与环境研究*, 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.
- 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第一部分: 陆面过程模式及其“独立 (off-line)”模拟试验和模式性能分析 [J]. *气象学报*, 56 (1): 1-19. Zhang Jing, Ding Yihui. 1998. An improved land-surface processes model and its simulation experiment part1: Land-surface processes model (LPM-ZD) and its “off-line” tests and performance analyses [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 56 (1): 1-19.
- 周锁铨, 代刊, 陈涛, 等. 2003. 陆面过程模式的改进及其检验 [J]. *气象学报*, 61 (3): 275-290. Zhou Suoquan, Dai Kan, Chen Tao, et al. 2003. The improvement and verification of land surface process model (BATS) [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (3): 275-290.
- 朱德琴, 高晓清. 2005. 陆面过程模式 SSiB 在中国西北典型干旱区使用性能的检验 [J]. *高原气象*, 24 (6): 872-879. Zhu Deqin, Gao Xiaoqing. 2005. Validation of SSiB model in typical arid region of northwest China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 24 (6): 872-879.