

宋耀明, 郭维栋, 张耀存, 等. 2009. 陆面过程模式 CoLM 和 NCAR _ CLM3.0 对中国典型森林生态系统陆气相互作用的模拟 I. 不同模式模拟结果的初步分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (3): 229 - 242. Song Yaoming, Guo Weidong, Zhang Yaocun, et al. 2009. Performances of CoLM and NCAR _ CLM3.0 in simulating land - atmosphere interactions over typical forest ecosystems in China. Part I: Preliminary analysis of the simulations based on different models [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (3): 229 - 242.

陆面过程模式 CoLM 和 NCAR _ CLM3.0 对中国典型森林生态系统陆气相互作用的模拟

I. 不同模式模拟结果的初步分析

宋耀明^{1,2} 郭维栋² 张耀存¹ 陈永立³

1 南京大学大气科学学院, 南京 210093

2 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, 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029

3 河北省定州市环保局, 定州 073000

摘 要 CoLM (Common Land Model) 和 NCAR _ CLM3.0 (NCAR Community Land Model 3.0) 是目前国际上广为应用的两个发展比较完善的陆面过程模式。本研究利用中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 在长白山温带混交林和千烟洲亚热带人工针叶林观测站点的长期连续强化观测资料, 对这两个模式在上述地区的模拟性能进行了初步评估。同观测资料的对比表明, 两个模式均能较好地模拟出观测站点地表能量和水分平衡的基本特征, 其中, CoLM 对潜热通量的模拟性能更好。以对潜热通量为期 1 年的日均值的模拟为例, CoLM 和 CLM3.0 在长白山观测站模拟值和观测值时间序列的相关系数分别为 0.80 和 0.65, 在千烟洲站分别为 0.69 和 0.64, 均通过了 0.01 的信度检验; 两个模式对全年平均的模拟与观测日平均值的比值在长白山分别为 1.21 和 0.86, 在千烟洲分别为 0.83 和 0.60。研究结果表明, 这两个陆面过程模式可以作为研究这两种典型森林生态系统陆气交换的基本工具。同时, 对模式模拟性能差异的深入分析将有助于进一步改进陆面模式的参数化过程, 为相关研究奠定更坚实的基础。

关键词 陆面过程模式 森林生态系统 陆气交换 潜热通量 模式评估

文章编号 1006-9585 (2009) 03-0229-14 **中图分类号** P461+.7 **文献标识码** A

收稿日期 2008-02-05 收到, 2009-04-30 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400501、国家自然科学基金资助项目 40775050、中国科学院知识创新工程项目 IAP07210 以及公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY200706025

作者简介 宋耀明, 男, 1981 年出生, 博士研究生, 从事陆面模式应用及参数优化研究。E-mail: songym@nuist.edu.cn

通讯作者 郭维栋, E-mail: guowd@tea.ac.cn

Performances of CoLM and NCAR _ CLM3.0 in Simulating Land – Atmosphere Interactions over Typical Forest Ecosystems in China

Part I. Preliminary Analysis of the Simulations Based on Different Models

SONG Yaoming^{1,2}, GUO Weidong², ZHANG Yaocun¹, and CHEN Yongli³

1 College of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

2 Key Laboratory of Regional Climate – Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; START Regional Center for Temperate East Asia, Beijing 100029

3 Environmental Protection Bureau of Dingzhou, Dingzhou 073000

Abstract Common land model (CoLM) and NCAR Community Land Model 3.0 (NCAR _ CLM3.0) are currently two sophisticated land surface models. For the purpose of validating these two models in studying land – atmosphere interaction over different underlying surfaces, two sets of simulations were conducted by using enhanced long term observations at the temperate mixed forest station of Changbai Mountain and the subtropical coniferous forest station of Qianyanzhou, which are the reference sites of Chinese Terrestrial Ecosystem Flux Observational Research Network (ChinaFLUX). Compared with the field observations, the two models can well reproduce the basic characteristics of surface energy and water budget, and CoLM can better simulate latent heat flux than CLM3.0. For CoLM and CLM3.0, correlation coefficients between the simulated and observed daily latent heat flux are 0.80 and 0.65, respectively, at Changbai Mountain station, and 0.69 and 0.64, respectively, at Qianyanzhou station, both above the 99% significance level. In addition, the rate between annual averaged observed and simulated latent heat flux are 1.21 and 0.86 at Changbai Mountain station, and 0.83 and 0.60 at Qianyanzhou station. The results show that the two models can be used as a basic tool of investigating land – atmosphere interactions at the two typical forest ecosystems. Moreover, the differences between the simulations have been analyzed, which would be helpful for improving the parameterization schemes in the land surface model and lays substantial foundation for the subsequent related researches.

Key words land surface model, forest ecosystem, land – atmosphere interaction, latent heat flux, model assessment

1 引言

陆面过程是影响大气环流和气候变化的基本物理、化学过程之一。陆地表面由构成多样、性质复杂且分布很不均匀的下垫面组成,是整个气候系统中一个既重要又复杂的分量,陆面与大气及其他圈层之间进行着各种时空尺度的相互作用,在某些局部或某个时段内甚至还起着关键性的作用。深入研究陆地上各种下垫面与大气之间相互作用的物理、生化过程,不断改进和发展陆面过程模式,力求使之接近真实情况,能更精确地预报陆气间动量、能量、物质(水汽及 CO₂等)、辐射等的交换,以及模拟地表温度、湿度和大气边界层的发展变化等与气候研究密切相关的信息,已成为全球气候变化研究的迫切需要(牛国跃等, 1997; 孙菽芬, 2005)。

自 20 世纪 80 年代中期以来,在 WCRP (World Climate Research Programme) 和 IGBP (International Geophyere-Biosphere Programme) 的协调组织下,国际间在全球不同的生物带开展了一系列大型陆面过程合作观测研究。其中具代表性的有 FIFE、LBA、HAPEX/MOBILMY、EFEDA、BOREAS、NOPEX、GAME 等,我国在同期也相继开展了以 HEIFE 和 TIPEX 为代表的试验研究(王介民, 1999; 杨兴国等, 2003)。

为了更好地研究陆地生态系统的碳循环和水循环以及地圈—生物圈—大气圈之间的相互作用,1997 年,全球陆地通量观测网络 (FLUXNET) 开始组建。2002 年,中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 全面建设完成,进行典型陆地生态系统和大气间 CO₂ 和水热通量的长期观测研究(于贵瑞等, 2004)。ChinaFLUX 依托于中国科学院生态系统研究网络 (CERN),以微

气象学的涡度相关技术和箱式/气相色谱法为主要技术手段, 进行典型生态系统与大气间 CO_2 和水分通量长期观测研究。ChinaFLUX 拥有 8 个微气象和 16 个箱式/气相色谱观测站, 覆盖了 10 种不同类型的陆地生态系统。在进行长期通量观测的同时, 还开展了生态系统碳循环和水循环过程的综合研究, 并系统收集观测站区的植被、土壤、水文和气象等科学数据 (温学发等, 2004; www.ChinaFLUX.org), 为陆面模式的参数获取、参数化方案等的发展提供了重要的数据基础 (孙鸿烈, 2006; 傅伯杰等, 2007)。

陆面模式的发展经历了 3 个阶段: 1) 20 世纪 60 年代末到 70 年代, Manabe et al. (1965) 和 Manabe (1969) 的简单“吊桶 (Bucket)”模式; 2) 70 年代末到 90 年代初的第二代模式显形地引入了植被的生物圈物理过程, 计算了土壤、植被与大气间复杂的交换, 如生物圈-大气圈输运方案 (Dickinson, 1983, 1984) 和简单生物圈模式 (SiB) (Sellers et al., 1986) 等; 3) 90 年代以后的第三代模式引入了考虑植被吸收 CO_2 进行光合作用的生物化学过程, 如 SiB2 (Sellers et al., 1996a, 1996b)、LSM (Bonan, 1995) 等。

为综合现有模式的优点, Dai et al. (2003) 以 LSM、BATS、IAP94 为原型, 发展了新一代通用陆面过程模式 CoLM (Common Land Model), 并利用全球不同气候带的不同下垫面类型的野外观测试验结果进行了大量的验证试验 (如俄罗斯的 VALDAI 草原、巴西的亚马逊雨林等), 结果表明 CoLM 对上述典型下垫面陆气相互作用具有良好的模拟能力 (Dai, 2005)。

与此同时, 以 CoLM 为基础, 在综合了 NCAR_LSM 在碳循环、动态植被和河流汇流过程的改进, 同时用卫星数据可表现的植被功能类型代替生物群落类型, 并在植被反照率、冠层尺度、叶生理过程、土壤水含量对光合作用的限制等方面做了进一步的改进后, NCAR 于 2002 年推出了 CLM2.0 (Community Land Model), 主要将其用于和 CAM2.0, CCM3 的后续版本 (NCAR Community Atmosphere Model) 以及 CCSM2.0 (NCAR Community Climate System Model) 相耦合, 作为其中的陆面分量。2004 年, NCAR CLM 正式推出了该模式的 3.0 版本 (Oleson et al., 2004)。

近 20 年陆面过程模式与 GCM 耦合进行的敏感性试验表明, 陆气相互作用特征对不同的下垫面特性十分敏感 (孙菽芬, 2005)。CoLM、NCAR_CLM3.0 是当今陆气相互作用研究领域尽可能详细地考虑了发生在土壤-植被-大气间的生物物理、生物化学等过程, 并有众多来自世界各国活跃在科研一线的科学家的参与, 在不同地表覆盖类型下得到广泛检验的两个典型陆面模式 (Oleson et al., 2004; 黄伟等, 2004; Dai, 2005; 刘少峰, 2005; 辛羽飞等, 2006; 赵海英等, 2006)。所以有必要采用这两个模式, 对其在 ChinaFLUX 长白山温带混交林观测站和千烟洲亚热带混交人工林观测站的模拟性能进行验证对比, 从而为加深对不同下垫面陆气相互作用物理机制的认识, 改进这两个模式的参数化方案及相关参数, 进一步提高模式的模拟能力提供科学基础。

2 观测站点介绍及资料说明

2.1 观测站点介绍

长白山温带红松阔叶林观测站 ($41^{\circ}41'49''\text{N}$ ~ $42^{\circ}25'18''\text{N}$, $127^{\circ}42'55''\text{E}$ ~ $128^{\circ}16'48''\text{E}$) 位于长白山自然保护区的 CERN (Chinese Ecosystem Research Network) 长白山森林生态系统定位研究站内。实验区属于受季风影响的温带大陆性气候, 具有显著的中纬度山地气候特征, 春季干旱多风, 夏季炎热多雨, 冬季干燥寒冷, 年平均气温 3.6°C , 年平均降水量 713 mm, 主要集中在 6~8 月, 全年日照时数为 2 271~2 503 h, 无霜期 109~141 d。土壤为山地暗棕色森林土。以红松为主的红松阔叶混交林为该地区的地带性植被, 其分布高度为 500~1 100 m, 主要建群树种有红松、椴树、蒙古栎、水曲柳、色木等, 平均树高 26 m。观测塔设置于 ($42^{\circ}24'9''\text{N}$, $128^{\circ}05'45''\text{E}$, 海拔 738 m) 处, 高 61.8 m, 其上共安装了 7 层常规气象系统、开路式涡度相关通量观测系统、闭路式涡度相关通量观测系统、7 层 CO_2 廓线系统。同时, 该站还配备了土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放量的箱式法观测系统 (Webb et al., 1980; 李正泉等, 2004)。

千烟洲人工林通量观测站 ($26^{\circ}44'29.1''\text{N}$, $115^{\circ}03'29.2''\text{E}$) 位于中国陆地生态系统通量观测

研究网络的千烟洲红壤丘陵农业综合开发实验站内,微气象观测塔建立于2002年8月。站点下垫面坡度为 $2.8^{\circ}\sim 13.5^{\circ}$,四周的森林覆盖率在90%以上。千烟洲试验站具有典型的亚热带季风气候特征,根据1985~2002年本站地面气象观测数据统计,站区年平均气温 17.9°C ,平均年降水量 $1\,542.4\text{ mm}$,年蒸发量 $1\,110.3\text{ mm}$,年均相对湿度84%。试验站现有林分大多是1985年前后营造的人工针叶林,常绿植被覆盖面积占土地总面积的76%。试验站的主要观测高度设计为23 m,次要高度为3倍于冠层高度的39 m位置。在这两个高度上安装有三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific Ltd, USA)、快速响应红外 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪(Li-7500, Li Cor. Inc., USA);7层 CO_2 廓线观测系统(Li-820, Li Cor. Inc., USA)以及常规气象仪器(HMP45C等, VAIS-ALA等公司的产品)分别安装在1.6、7、11、15、23、31和39 m处;总辐射、净辐射、点状光合有效辐射及降水测量仪器均安装在41 m处;红外测温仪分别安装在2和41 m处;土壤温度表

安装在地表0 cm和地下1、5、20、50和100 cm处;土壤湿度仪安装在地下5、20和50 cm处;土壤热通量板安装在地下3和5 cm处。 CO_2 、 H_2O 湍流通量数据采集器(CR10XTD、CR23XTD、CR5000)以10 Hz频率采集观测数据,在采集实时数据的同时在线计算30 min的平均通量数据(李正泉等,2004; www.ChinaFLUX.org)。

2.2 资料说明

(1) 气温、比湿、降水、风速、太阳辐射、大气压强等气象变量作为模式的主要驱动变量采用2003年全年30 min一次的强化观测数据。其中气温、比湿、风速在长白山观测高度为32 m,千烟洲观测高度为41 m,观测数据均经过了数据质量控制。

长白山观测站对3月25~27日缺测的气象变量进行了插值处理,3月25~27日、8月30日~9月1日的降水均取为0;千烟洲观测站4月2日~5月21日缺测的地面大气压采用附近气象观测站的数据。

图1给出了2003年长白山的降水和32 m高

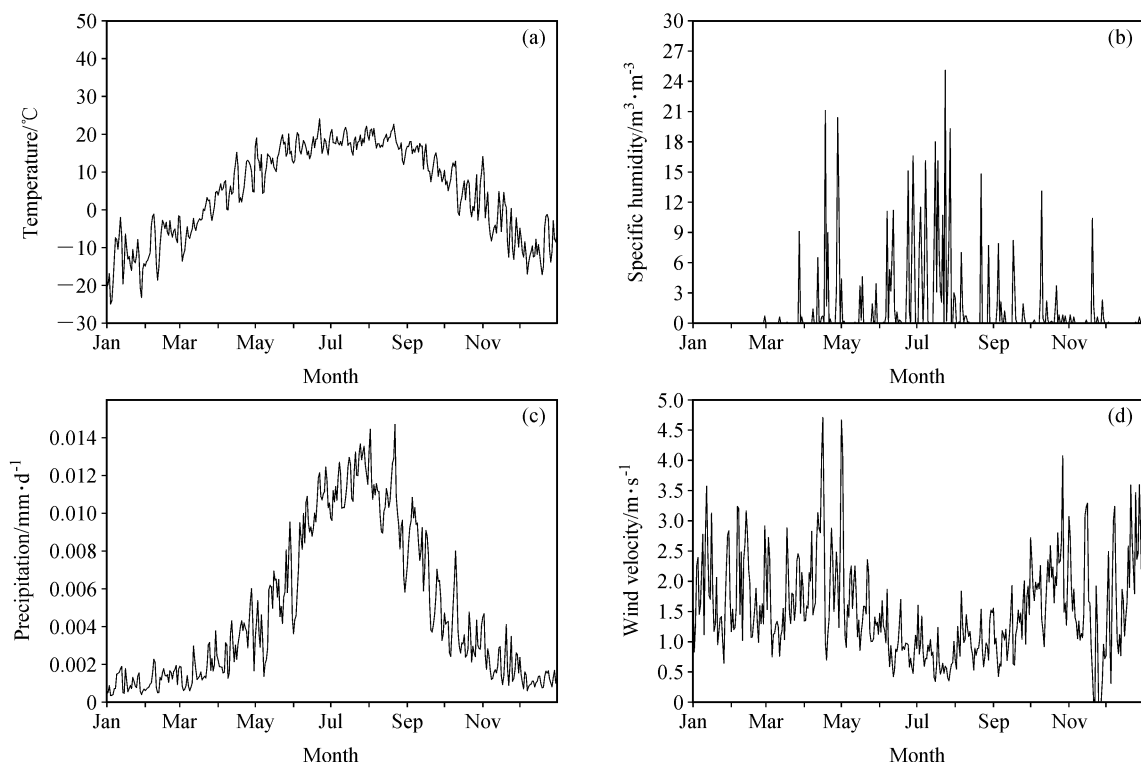


图1 2003年长白山观测站的气象条件:(a) 大气温度日均值;(b) 降水日均值;(c) 大气比湿日总量;(d) 风速日均值

Fig. 1 Meteorological conditions in Changbai Mountain observation station in 2003: (a) daily mean air temperature; (b) daily mean precipitation; (c) daily specific humidity; (d) daily mean wind velocity

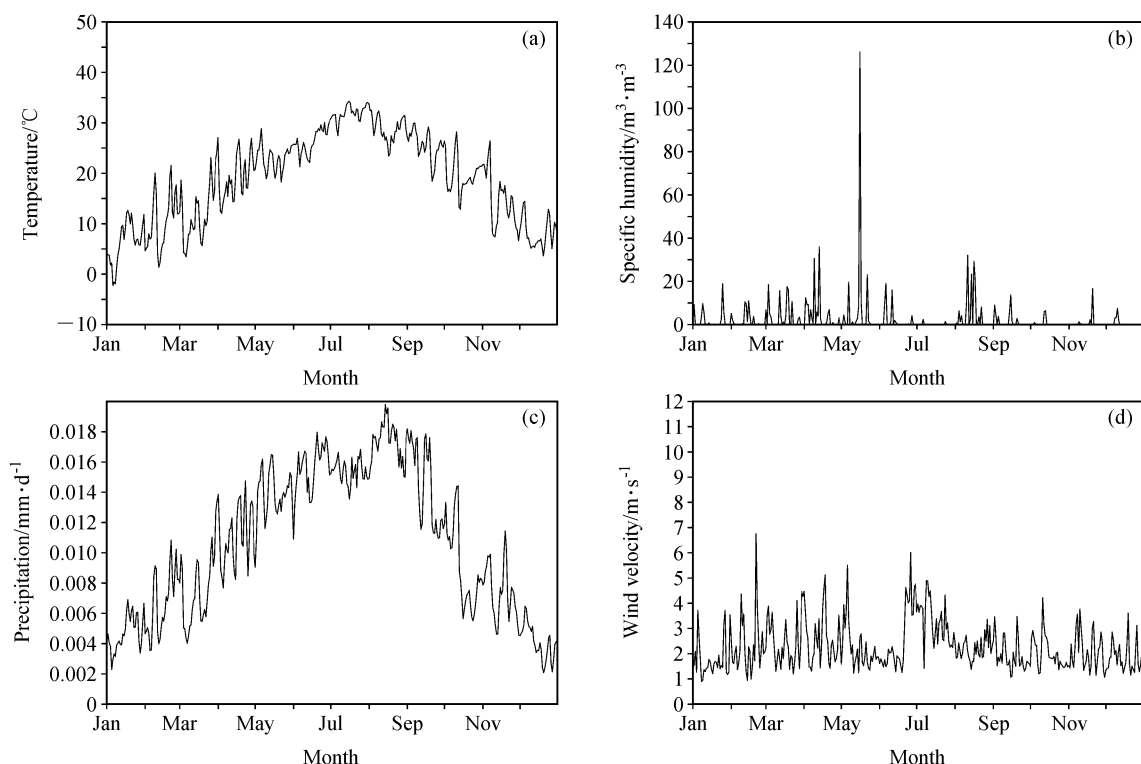


图 2 同图 1, 但为千烟洲
Fig. 2 Same as Fig. 1, but for Qianyanzhou

度处的大气温度、比湿和风速情况。年平均气温为 4.8°C , 高于多年平均值的 3.6°C , 最高气温为 30.7°C , 最低气温为 -27.4°C ; 年降水量约为 537 mm , 低于多年平均值, 60% 以上的降水集中在生长季的 6~8 月期间。与历史平均值相比, 2003 年长白山的气候特征为偏暖偏干年份。

图 2 给出了 2003 年千烟洲的降水和 41 m 高度处的大气温度、比湿和风速情况。年平均气温为 18.9°C , 高于多年平均值的 17.8°C , 最高气温为 39.74°C , 最低气温为 -5.68°C , 其中 7 月平均气温达到 31.2°C , 比历年同期高出 2.4°C ; 全年降水量约为 854 mm , 比多年平均减少 40%, 除 5 月和 8 月外均明显低于历年同期平均值, 尤其是 7 月出现了严重的干旱, 该月降雨量仅 3.2 mm 。与多年平均值比较, 2003 年千烟洲的气候特征为少见的高温干旱, 以 7 月最为严重。

(2) 模式验证数据为 2003 年全年的潜热通量强化观测数据, 数据经过了 WPL (Webb-Pearman-Leuning) 校正 (Webb et al., 1980)。

由于水汽和感热对空气密度的影响, 引起空

气密度产生扰动。如果测量的是某物理属性的标量混合率, 则不需对湍流通量进行水汽和感热订正。但是, 多数传感器测量的是标量浓度, 因此需要进行相应的订正。采用 Webb 等的订正公式分别对水汽通量和 CO_2 通量进行订正, 简称 WPL 法:

$$F_v = (1 + \mu\sigma) \cdot \left(\overline{w'\rho_v'} + \overline{\rho_v} \cdot \frac{\overline{w'T'}}{\overline{T}} \right),$$

$$F_c = \overline{w'\rho_c'} + \mu \cdot \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_a}} \cdot \overline{w'\rho_v'} + (1 + \mu\sigma) \cdot \overline{\rho_c} \cdot \frac{\overline{w'T'}}{\overline{T}},$$

其中, F_v 与 F_c 分别为水汽通量和 CO_2 通量, $1/\mu = m_v/m_a = 0.6222$, $\sigma = \overline{\rho_v}/\overline{\rho_a}$, ρ_a 、 ρ_c 和 ρ_v 分别为干空气、 CO_2 和水汽密度, w' 、 ρ_c' 、 ρ_v' 、 T' 为相应变量的脉动量。

3 模式介绍及数值试验设计

3.1 模式历史

CLM (Community-developed land surface model) 的概念最初在 1996 年 2 月的 LMWG (CCSM Land Model Working Group) 会议上提

出,最初目的是为 NCAR CAM 和 CCSM 提供陆面支持 (Dai et al., 2001)。

戴永久、曾旭斌、Dickinson R、Bonan G 等基于已有的 3 个陆面过程模式 BATS、IAP94 以及 CCM3 和 CCSM 最初版本中,采用的 NCAR LSM 最好的特征设计和发展了最初的 CLM (Dai et al., 2001; Dai, 2005),并由来自 NCAR、大学和政府实验室的各个学科的专家 (Dickinson R, Bonan G, Zeng X, Dirmeyer P, Famiglietti J, Foley J 和 Houser P 等) 组成了一个指导委员会,为该陆面模式中未能较好地表现的一些过程 (如碳循环、生态过程模拟、水文和河流汇流过程等) 提供专家意见和指导 (Dai, 2005)。

1998 年 2 月,在 CCSM Workshop LMWG 会议上该模式被集中讨论,对其各个过程的模拟达成一致意见,命名为 CoLM。戴永久发展了最初的代码,并在 1999 年 3 月由 Bosilovich M、Dirmeyer P 和 Houser P 对程序进行了检验。随后,广泛的模式验证工作开始,在 1999 年 6 月的 CCSM Workshop LMWG 会议上 Oleson K、戴永久、Schlosser A 和 Houser P 报告了模式最初的 offline 评估结果。1999 年 9 月,在 COLA 主持的 LMWG 会议上,由戴永久、Schlosser A、Oleson K、Bosilovich M、杨宗良、Baker I、Houser P 和 Dirmeyer P 报告了更广泛的 offline 评估,野外评估数据来自 PILPS (Project for Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes) 和其他计划 (FIFE, BOREAS, HAPEX-MOBILHY, ABRACOS, Sonoran Desert, GSWP) 采用的观测站点。

2002 年 6 月,在 CCSM Workshop LMWG 会议上,曾旭斌报告了 CCM3 和 CoLM 的耦合结果,表明该模式能成功耦合到气候模式中 (Zeng et al., 2002)。与 NCAR LSM 模拟和观测的比较显示该模式主要在径流的季节变化、夏天模拟的温度偏低和雪的厚度等方面有了改善,找到了与径流和反照率相关的一些不足,对其进行了进一步的研究。杨宗良和 Baker I 的研究显示该模式在土壤和雪的温度的模拟上有很大提高 (Oleson et al., 2004)。

在 CoLM 发展的同时,NCAR LSM 在碳循环、动态植被和河流汇流过程中也得到了进一步

的发展。将 NCAR LSM 的改进引入到 CoLM 中,同时用卫星数据可表现的植被功能类型代替生物群落类型,并对一些参数化过程进行了修改。2002 年 5 月,该模式作为 Community Land Model (CLM2.0) 被 Community Atmosphere Model (CAM2.0, CCM3 的后续版本) 和 Community Climate System Model (CCSM2.0) 采用 (Oleson et al., 2004)。

2001 年 6 月, Oleson K 在 CCSM Workshop LMWG 会议上报告了 CLM2.0 同 CCM3 耦合的最初模拟结果,结果显示, CLM2.0 保存了 Common Land Model 的大部分改进,尤其是空气温度、径流和雪。2002 年 5 月, CLM2.0 公布 (Oleson et al., 2004)。

Thornton P 为更好地模拟碳、氮循环,将模式结构改为次网格组成的空间向量的形式。此后,模式考虑了不同植被对水分的竞争。2003 年 2 月, CLM2.1 公布 (Dai et al., 2001)。

2004 年, NCAR CLM 模式系列的新版本 CLM3.0 正式发布 (Mariana et al., 2004)。该版本在软件设计方面做了进一步的提高,以支持向量计算平台,并在生物地球物理参数化过程上做了一些修改以改善同气候模式耦合中出现的不足。

在 Community Land Model 发展的同时, Common Land Model 在乔治亚理工学院和北京师范大学也得到了进一步的发展。主要的发展表现在植被辐射传输、气孔导度、光合作用、能量通量等各个方面。为了同 Community Land Model (CLM2.0、CLM3.0) 和 Common Land Model 初始版本相区别,该模式命名为 CoLM (Dai, 2005)。

3.2 两个模式的共性与差异

CoLM 和 CLM3.0 共同的特点是将土壤进行足够的非平均分层以充分刻画不同层次上土壤温度和湿度的演变特征,同时采用了雪的多层参数化方案。显式地表达了水和冰质量的变化以及雪和土壤中的相变,并采用描述 CO₂ 和水汽同时进出植被的冠层光合作用—气孔导率模型。处理能量和水分平衡时均采用次网格百分比平铺的方案,并在径流过程的参数化中采用 TOPMODEL 方案。同时,二者之间还存在一些显著的区别,例如:

在计算叶面温度、光合作用—气孔导度时, CoLM 采用单层双大叶模型, CLM3.0 采用单层单叶模型; 对冠层反照率、辐射传输以及通量交换的计算, CoLM 考虑了植被光照与阴影部分的不同, CLM3.0 则没有详细区分; 在土壤水文和热力过程中, CoLM 考虑岩床的作用, CLM3.0 没有考虑; 在计算叶面温度时, 迭代方案不同, CoLM 以叶面温度、植被吸收的长波辐射、潜热通量和感热通量的变化做为迭代的标准, 而 CLM3.0 只以叶面温度和水汽通量的变化作为迭代标准; CLM3.0 采用河流汇流方案将径流水导向海洋, CoLM 没有相关处理 (Dai et al., 2003; Oleson et al., 2004)。

此外, CLM3.0 中用植被功能类型 (PFT) 代替了 CoLM 中采用的生物群落陆面覆盖分类方案。CLM3.0 还引入了动态植被 (DGVM)、挥发性有机物 (VOC) 的相关过程, 相比之下, CoLM 对植被变化的处理相对简略, 没有对挥发性有机物进行模拟 (Dai et al., 2003; Oleson et al., 2004)。

3.3 数值试验设计

为检验陆面过程模式 CoLM 和 NCAR_CLM3.0 对长白山和千烟洲两处典型森林生态系统地表—大气间相互作用的模拟性能, 利用两个站点的加密气象要素观测作为强迫场, 驱动陆面过程模式进行独立 (off-line) 的数值试验。模式积分时段为 2003 年 1 月 1 日~12 月 31 日, 时间步长为 30 min。每 30 min 更新一次大气强迫场 (大气温度、大气湿度、太阳辐射输入、大气长波辐射、降水、风速)。模式输出结果主要包括反映土壤—植被—大气间能量和水分收支的土壤温度/湿度以及地表感热/潜热通量、辐射通量和 CO₂ 通量等, 输出周期为 30 min。

3.3.1 初始场

正确提供土壤各层温度、湿度的初值分布对于陆面过程模式的模拟结果有很大影响。由于观测站点缺乏深层的土壤温度、湿度观测, 基于从国家气象信息中心得到的全国 178 个站的土壤湿度和 740 个站的土壤温度资料, 取地理位置距所研究的测站最近的 3 个站点加权平均, 提供一个“初始的”土壤湿度、温度场, 进而用观测站 2003 年全年的气象强迫资料循环驱动模式, 进行为期

10 年的 spin-up, 直至各层土壤温度、湿度分布与地表和大气强迫状态相协调, 取第 11 年初的土壤温度、湿度场值作为数值试验的土壤温度和湿度的初始场。

长白山观测站用到的邻近几个土壤温度参考站为蛟河 (43.42°N, 127.20°E)、松江 (42.32°N, 128.15°E)、敦化 (43.22°N, 128.12°E); 而其土壤湿度的参考站为五常 (44.54°N, 127.09°E)、宁安 (44.20°N, 129.28°E)、敦化 (43.22°N, 128.12°E)。千烟洲观测站邻近的土壤温度参考站为宜春 (27.48°N, 114.23°E)、吉安 (27.07°N, 114.58°E); 而土壤湿度参考站为南康 (25.40°N, 114.45°E)、莲塘 (28.33°N, 115.57°E)。

3.3.2 地表参数

模式需要的地表参数主要包括土壤质地参数和植被参数。

土壤质地参数: 土壤组分参照中国土壤系统分类参比数据库, 长白山、千烟洲观测站分别采用将筒育冷凉淋浴土、普通筒育湿润富铁土的土壤组分转换为模式运行所需的土壤各层砂土比例 (龚子同, 1999)。模式中土壤颜色由浅到深分为 8 个等级, 试验中长白山、千烟洲站点均采用第 8 级。

植被参数: 根据观测站点提供的资料, 最大叶面积指数长白山站为 5.8, 千烟洲站为 3.6。最大冠层高度长白山站为 26 m, 千烟洲为 12 m (李正泉, 2004)。植被冠层高度、叶茎面积指数的时间变化采用扩充的 Logistic 模型进行计算 (徐克学, 1999)。

4 模拟结果分析

4.1 两个陆面过程模式在长白山的模拟性能评估

整体而言, CLM3.0、CoLM 模拟的地气热交换 (潜热通量、感热通量之和) 无论大小还是波动位相变化几乎完全一致, 与观测非常接近, 且与入射太阳辐射随时间的波动变化有很好的对应关系。地气热交换占入射太阳辐射的比例在非生长季约为 0.5, 在生长季约为 0.7, 非生长季与生长季相比略小, 波动更大。CoLM、CLM3.0 吸收的太阳辐射占总入射太阳辐射的比在 5~10 月约为 0.92, 在其余时间较低。CLM3.0 模拟的净长

波辐射值在冬春季节略大, 其余时间两者几乎完全一致, 以 7 月为中心呈倒“V”型分布, 与气温的年变化一致 (图略)。

由于没有地面温度的观测值, 将地面温度的模拟值同参考高度的气温观测值 (参考高度的观测值在模拟中作为大气对陆面的强迫场) 进行比较。整体上看, 在生长季, CoLM 的模拟值高于 CLM3.0, 但二者均略低于参考高度的观测值; 而在非生长季, 模拟值则略高于参考高度的观测值。同时, 观测值的波动更大 (图 3)。

据统计, 全球地表吸收的太阳辐射约 60% 以感热、潜热的形式释放到大气中 (Sellers, 1965)。感热、潜热对大气稳定度、大气边界层和地表的平均廓线有着非常重要的影响 (Holtslag et al., 1986; Beljaars et al., 1991)。此外, 感热、潜热交换是低对流层能量汇集的主要影响机制 (Repapis et al., 1978; Cayan, 1992a, 1992b; Doran, 1992; Lolis et al., 2004)。所以

研究感热、潜热通量对了解陆气相互作用的过程和机理有着非常重要的作用, 我们对二者的模拟结果进行了详细的分析。

CoLM、CLM3.0 模拟的感热通量在 1 年中没有特别明显的变化, 冬春季节略小。其在 4 月中下旬和 7 月前后均有明显的降低, 原因是此时降水较多 (图 1), 到达地表的太阳辐射减小, 使得地面温度下降, 地气温差减小, 感热通量减小。CoLM、CLM3.0 模拟的感热通量随时间的波动变化几乎完全一致, 但 CLM3.0 的模拟值波动幅度明显高于 CoLM。从数值上看, CoLM 模拟值低于 CLM3.0, 二者模拟的感热通量全年日平均值分别为 36.05 和 $46.04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 3 和图 4)。

由于观测资料包含了强化观测的潜热通量, 可以对这两个模式在该变量的模拟效果上进行评估。整体上看, CoLM 的模拟结果要优于 CLM3.0, 与观测值的变化特征较为一致, 其年变化趋势呈双峰型, 能较好地反映该年度潜热通量

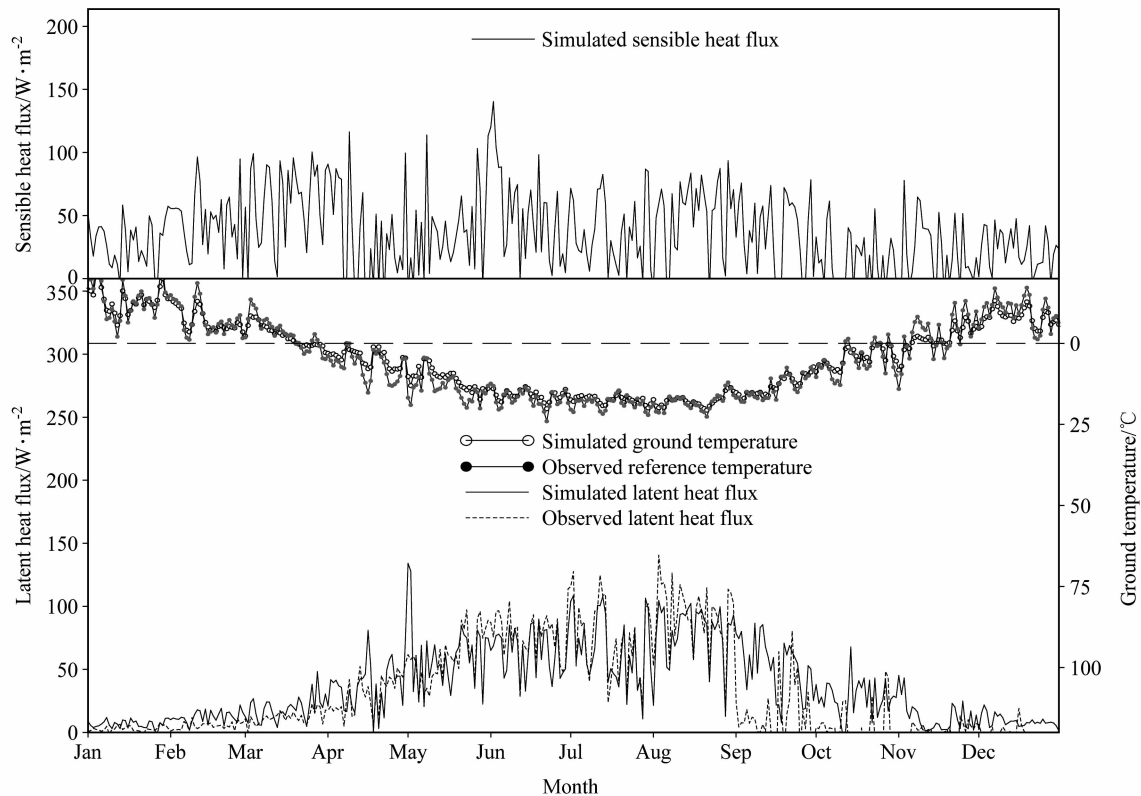


图 3 CoLM 模拟的 2003 年长白山站感热通量、潜热通量、地表温度日变化以及观测的潜热通量和参考高度的气温

Fig. 3 Daily average of simulated sensible heat flux, latent heat flux, and ground temperature by CoLM and observed latent heat flux and temperature at the reference height at Changbai Mountain observation station in 2003

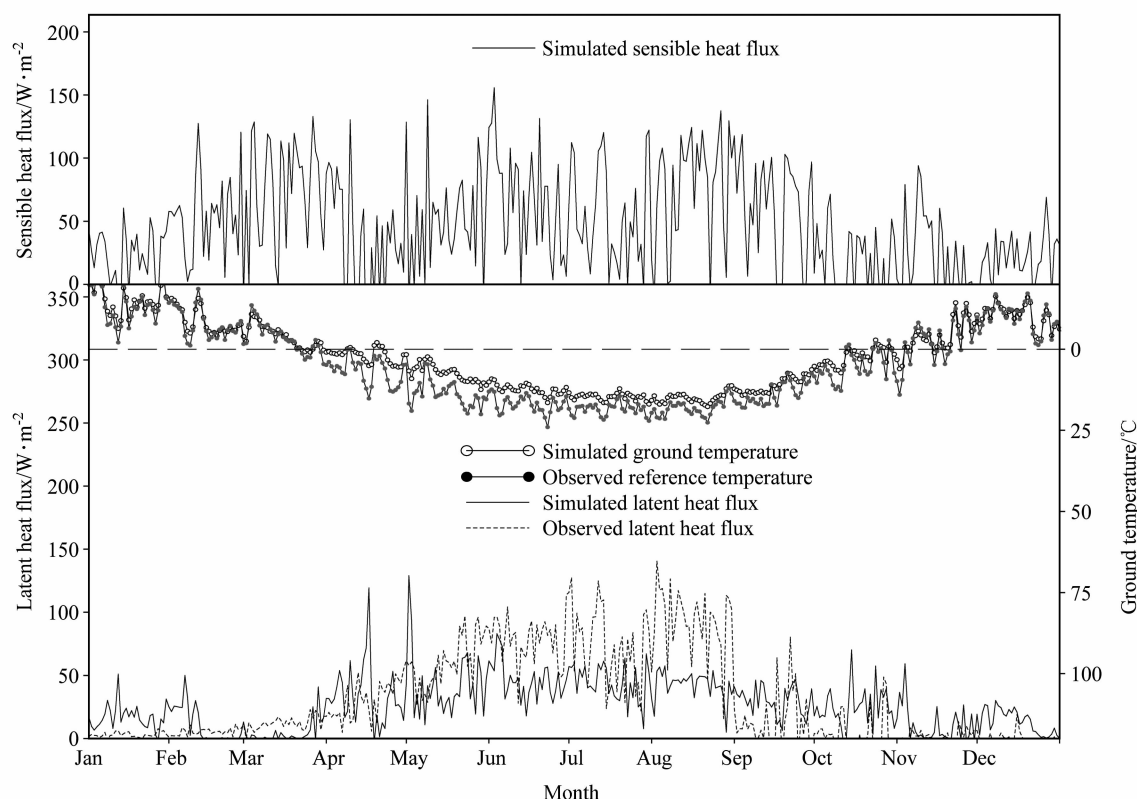


图4 同图3, 但为 CLM3.0 模拟

Fig. 4 Same as Fig. 3, but simulated by CLM3.0

的变化特征。在1~3月及12月期间, 模拟值与观测值相比波动幅度过大, 可能原因是模式对冻土过程未能很好地刻画。7月, 由于降水较多且比较集中(图1), 入射太阳辐射减少, 抑制了地表温度的升高。同时, 7月空气湿度相对较大, 地表湿度差较小, 特别是7月风速较低, 限制了地表蒸发, 使得该月潜热通量较小。相比而言, CLM3.0在生长季的模拟值明显低于观测值。例如, 观测值、CoLM和CLM3.0模拟的全年日平均值分别为31.02、37.44和26.67 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; 而在非生长季, 例如1月与2月上半月, CLM3.0的模拟值则明显高于观测值。CoLM和CLM3.0模拟值与观测值的相关系数分别为0.804和0.647, 均通过了99%的信度检验(图5)。二者存在的共性问题是在5月初以及9~12月潜热通量的模拟值远高于观测值(图3和4)。

从地表能量分配的角度看, CoLM和CLM3.0模拟的Bowen比(感热通量/潜热通量)在非生长季较大, 生长季较小。CoLM模拟的

Bowen比在生长季低于1, 地气热交换以潜热为主; 非生长季高于1, 地气热交换以感热为主。CLM3.0模拟的Bowen比全年均高于1, 地气热交换以感热为主。CoLM、CLM3.0模拟的全年Bowen比分别为0.96、1.72(图略)。

由上可以看出, CoLM和CLM3.0对长白山观测站陆气相互作用过程的模拟在感热通量和潜热通量上有较大差别, CoLM表现出更好的模拟性能。CLM3.0模拟的感热通量的值和波动幅度均大于CoLM的模拟值; 而CLM3.0模拟的潜热通量在生长季明显低于CoLM的模拟值, 在非生长季明显高于CoLM的模拟值。

4.2 两个陆面过程模式在千烟洲的模拟性能评估

和长白山站的气候状况不同, 千烟洲站表现为较典型的亚热带季风气候, 其主要特点是5月中旬至6月上旬的“江南雨季”(或“华南前汛期”)。2003年的前汛期降水主要集中在5月中下旬至6月初。其后随着副热带高压北跳, 此处进入一段相对高温少雨期。8月中旬以后, 随着副

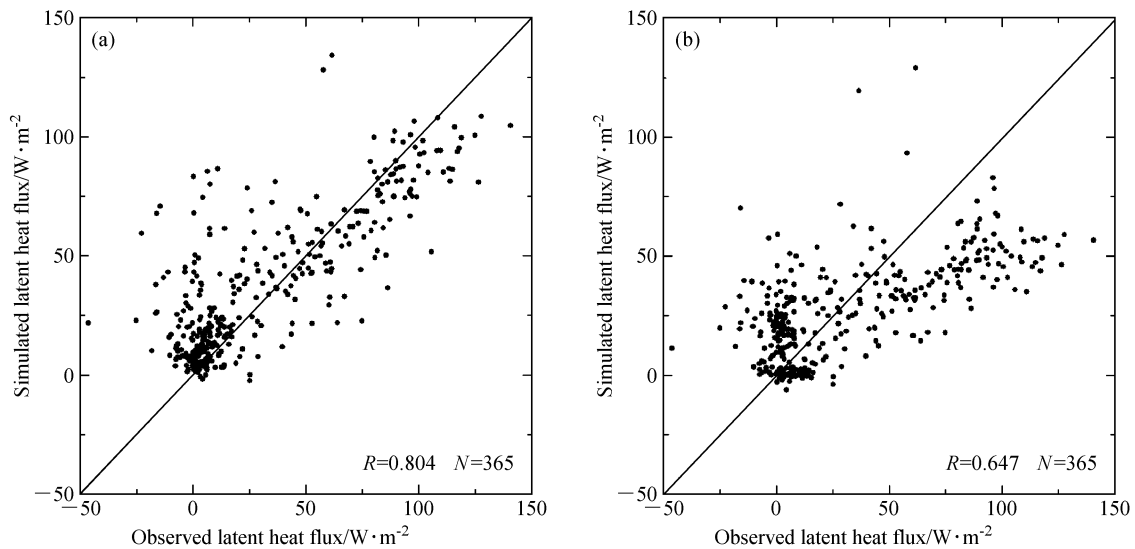


图5 2003年长白山观测站潜热通量模拟值与观测值的比较: (a) CoLM; (b) CLM3.0

Fig. 5 Comparison between observed and simulated latent heat flux by (a) CoLM and (b) CLM3.0 at Changbai Mountain station in 2003

高北退, 此处又经历了几次降水过程, 但强度不及梅雨期降水。上述季节演变特点势必会影响到不同时段地表的能量平衡特征和分配状况, 也更有利于进一步检验和评估陆面过程模式的模拟性能。

从地气热量交换的总体特性看, CLM3.0 和 CoLM 模拟的潜热通量及感热通量之和无论大小还是波动变化都非常接近, 且与入射太阳辐射随时间的波动变化几乎完全一致。其占入射太阳辐射的比例在非生长季为 0.2 左右, 在生长季为 0.5 左右, 非生长季比生长季略小, 波动却更大。地表吸收的太阳辐射占总入射太阳辐射的比在上半年约为 0.9, 下半年较低, 可能与模式下半年的潜热通量模拟值偏小有关。CoLM 和 CLM3.0 模拟的净长波辐射几乎完全一致, 以 7 月为中心呈“W”型分布。其中, 6 月下旬到 7 月底降水很少 (图 2), 潜热通量较小, 地气热交换以感热为主 (图略)。与长白山站的情形类似, 由于没有地面温度的观测值, 我们将模拟的地面温度同参考高度的气温观测值进行比较。整体上看, 在生长季, CoLM 的模拟值高于 CLM3.0 的结果, 二者均高于参考高度的观测值; 在非生长季, 二者的模拟值与参考高度的观测值非常接近 (图 6)。

由于本站降水季节变化的调制作用, CoLM、CLM3.0 模拟的感热通量年变化趋势呈单峰型分布, 1~5 月很小, 6 月下旬到 8 月上旬模拟值较

高。其原因是在盛夏季节几乎没有降水, 地气间的热量交换以感热为主。此外, 模式对这段时间潜热通量的模拟偏低也是一个原因。对比两个模式的输出结果, 可见 CoLM、CLM3.0 模拟的感热通量随时间的波动变化几乎完全一致, CoLM 的模拟值在上半年略低于 CLM3.0, 可能与 CLM3.0 模拟的潜热通量偏小及 Bowen 比偏高有关。二者模拟的感热通量全年日平均值分别为 32.56 和 $44.09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 6 和 7)。

同观测值的对比表明, CoLM 对潜热通量的模拟结果要优于 CLM3.0。具体表现为前者与观测值的变化趋势较为一致, 年变化趋势呈双峰型, 能较好地反映潜热通量随时间的变化特征。分时段看, 1~6 月的模拟值与观测值相比波动幅度过大; 6 月下旬到 8 月上旬, 由于几乎没有降水, 潜热通量变小, 模拟值远低于观测值; 8 月中旬到 12 月底, 潜热通量的模拟值明显低于观测值。CLM3.0、CoLM 在生长季的潜热通量模拟值明显低于观测值, 可能原因是模式对土壤水文过程的模拟不够完善 (下文将具体阐述)。观测值、CoLM 和 CLM3.0 模拟的全年日平均值分别为 59.73 、 49.56 和 $35.93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。两个模式的模拟值时间序列与观测值的相关系数分别为 0.692 、 0.642 , 均远远高于 99% 的信度检验 (图 8)。

就地表能量的分配而言, CoLM 和 CLM3.0 均一致性地表现出模拟的 Bowen 比上半年较小而

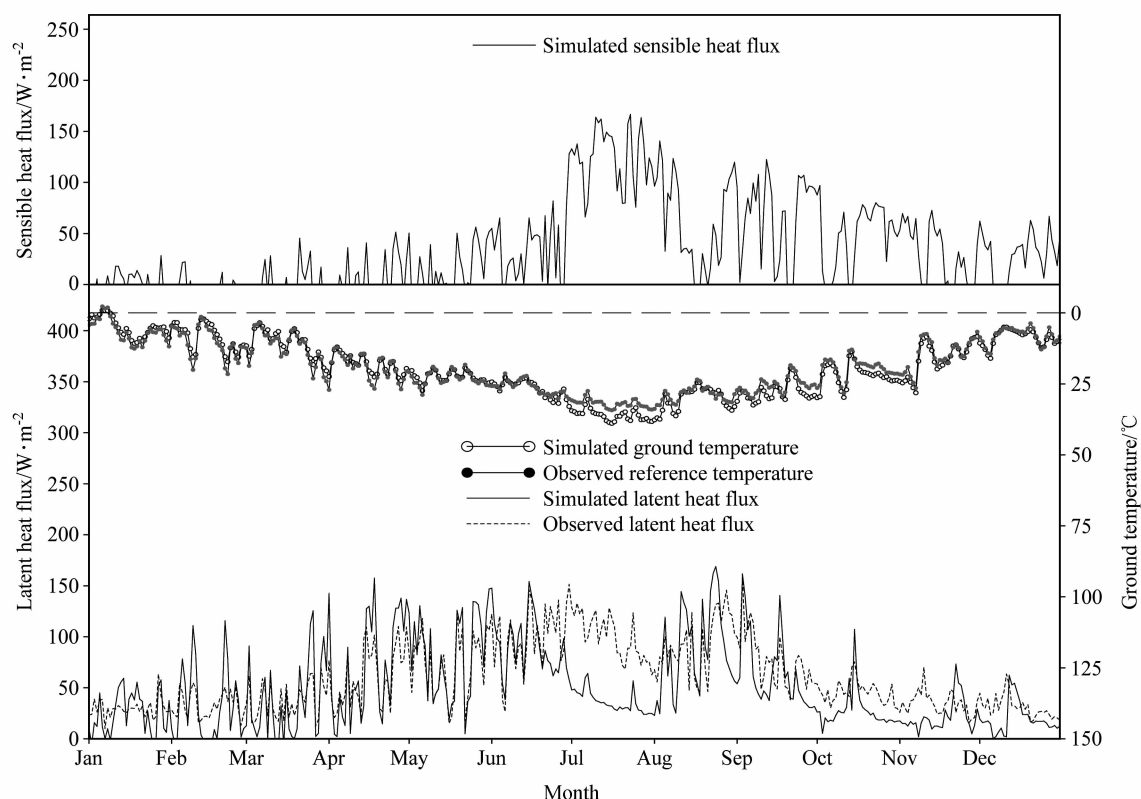


图 6 同图 3, 但为千烟州站
Fig. 6 Same as Fig. 3, but for Qianyanzhou observation station

下半年较大的特征。其中, CoLM 模拟的 Bowen 比在上半年约为 0.1, 地气热交换以潜热为主; 下半年约为 2, 地气热交换以感热为主。而 CLM3.0 模拟的 Bowen 比上半年为 0.5 左右, 地气热交换以潜热为主, 下半年为 5 左右, 地气热交换以感热为主。CoLM 和 CLM3.0 模拟的全年 Bowen 比分别为 0.66 和 1.23, 后者模拟的潜热通量偏低与其 Bowen 比偏高有直接的关系, 说明 CLM3.0 对千烟洲站的地表能量分配方案还有待改进。限于篇幅, 我们针对此问题的若干尝试将在下文讨论。对千烟洲观测站陆面过程的模拟中, CoLM 和 CLM3.0 的差别主要体现在 CoLM 模拟的感热通量低于 CLM3.0, 模拟的潜热通量高于 CLM3.0, 更加接近观测值。

5 结论和展望

本文利用 ChinaFLUX 在长白山温带混交林和千烟洲亚热带人工针叶林观测站点的强化观测资

料对陆面过程模式 CoLM 和 CLM3.0 的模拟性能进行了验证分析。总体而言, 这两个模式均能较好地模拟出 2003 年长白山、千烟洲观测站地表能量分配和水汽收支的变化特征。与观测资料的对比表明, CoLM 对潜热通量的模拟性能要优于 CLM3.0。

本文的研究说明, 这两个陆面过程模式可以作为研究这两种典型森林生态系统陆气相互作用的基本工具。同时, 我们也认识到这两个模式对一些物理过程的模拟存在着不足, 特别是对不同季节地表能量分配的差异。对两个模式模拟性能差异的深入分析将有助于进一步理解陆面模式对各种物理过程的描述, 发展相关的参数化过程, 为后续研究奠定更坚实的基础。有关这方面的内容将另文讨论。

致 谢 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (www.chinaflux.org) 提供了基础研究数据, 在此表示衷心感谢。

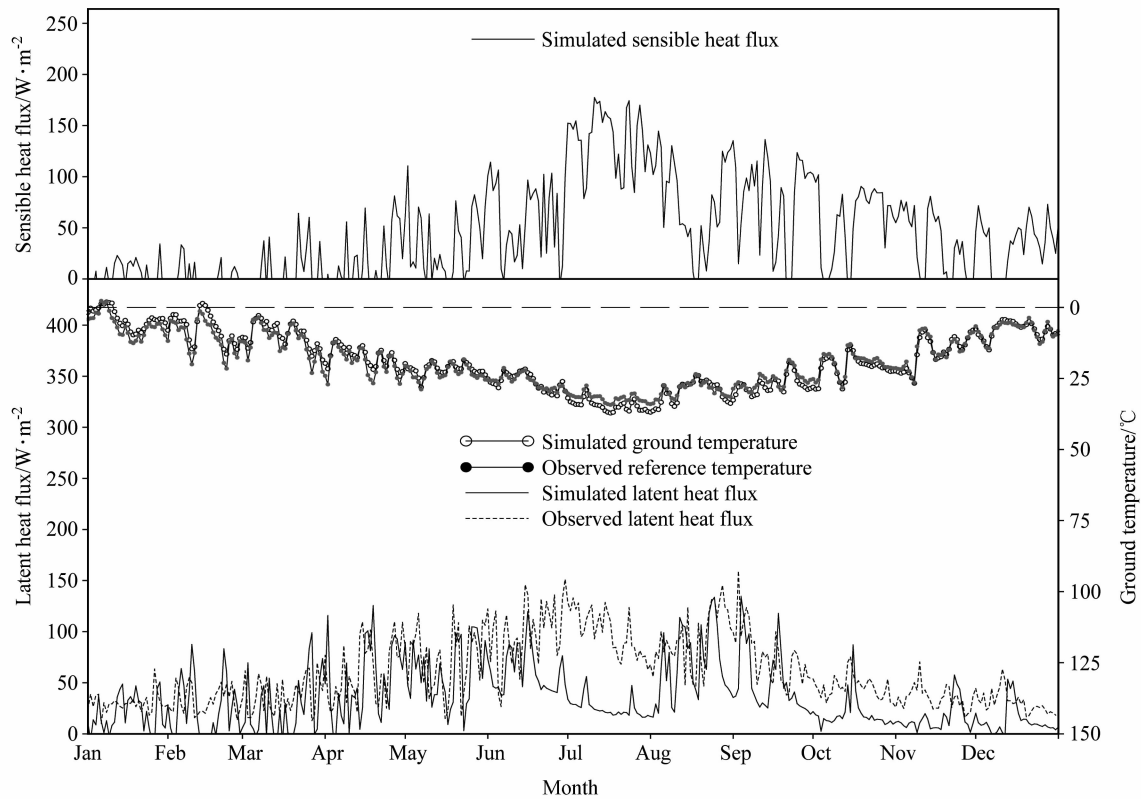


图7 同图6, 但为 CLM3.0 模拟

Fig. 7 Same as Fig. 6, but simulated by CLM3.0

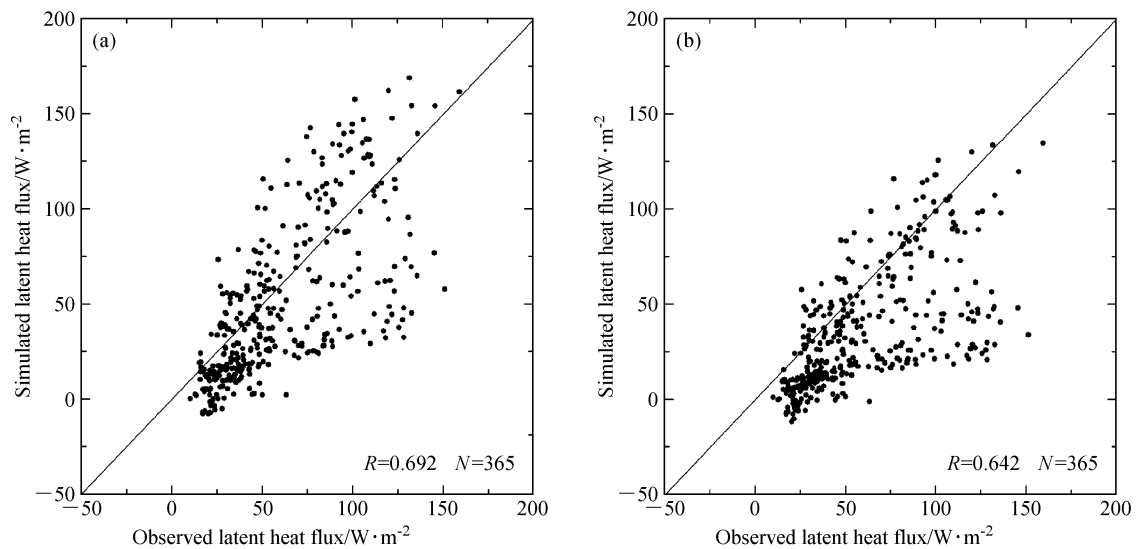


图8 同图5, 但为千烟洲观测站

Fig. 8 Same as Fig. 5, but for Qianyanzhou station

参考文献 (References)

- Beljaars A C M, Holtslag A A M. 1991. Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models [J]. J. Appl. Meteor., 30: 327 - 341.
- Bonan G B. 1995. Land-atmosphere CO₂ exchange simulated by a land surface process model coupled to an atmospheric general cir-

- culation model [J]. *J. Geophys. Res.*, 100: 2817-2831.
- Cayan D R. 1992a. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans; The connection to monthly atmospheric circulation [J]. *J. Climate*, 5: 354-369.
- Cayan D R. 1992b. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans; Driving the sea surface temperature [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 22: 859-881.
- Dai Yongjiu, Zeng Xubin, Dickinson R E. 2001. Common Land Model (Technical Documentation and User's Guide) [R]. The Georgia Institute of Technology, 69pp.
- Dai Yongjiu, Zeng Xubin, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model (CLM) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84 (8): 1013-1023.
- Dai Yongjiu. 2005. The Common Land Model (CoLM) User's Guide [R]. School of geography Beijing Normal University, 23pp.
- Dickinson R E. 1983. Land surface processes and climate-surface albedo and energy balance [J]. *Advances in Geophysics*, 25: 305-353.
- Dickinson R E. 1984. Modeling evapotranspiration for three-dimensional global climate models [M] // Hansen J E, Takahashi T, Eds. *Climate Processes and Climate Sensitivity*. Geophysical Monograph 29, American Geophysical Union, Washington D.C., 58-72.
- Doran J C. 1992. The Boardman regional flux experiment [J]. *ARM Outreach*, 1: 13-16.
- 傅伯杰, 牛栋, 于贵瑞. 2007. 生态系统观测研究网络在地球系统科学中的作用 [J]. *地理科学进展*, 26 (1): 1-16. Fu Bojie, Niu Dong, Yu Guirui. 2007. The roles of ecosystem observation and research network in earth system science [J]. *Progress in Geography* (in Chinese), 26 (1): 1-16.
- 龚子同. 1999. 中国土壤系统分类·理论·方法·实践 [M]. 北京: 科学出版社, 967pp. Gong Zitong. 1999. *Theory, Methodology and Application of Chinese Soil Taxonomy* [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 967pp.
- Holtslag A A M, Nieuwstadt F T M. 1986. Scaling the atmospheric boundary layer [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 36: 201-209.
- 黄伟, 郭振海, 宇如聪. 2004. CLM 在淮河流域数值模拟试验 [J]. *气象学报*, 62 (6): 764-775. Huang Wei, Guo Zhenhai, Yu Rucong. 2004. Numerical simulation of CLM over HUIHE basin [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (6): 764-775.
- 李正泉, 于贵瑞. 2004. 中国通量观测网络 (ChinaFLUX) 能量平衡闭合状况的研究 [J]. *中国科学 (D辑)*, 34 (增刊 II): 46-56. Li Zhengquan, Yu Guirui. 2004. Research on the energy balance closure in Chinese Terrestrial Ecosystem Flux Observational Research Network (ChinaFLUX) [J]. *China Science (Ser. D)* (in Chinese), 34 (Suppl. II): 46-56.
- Lolis C J, Bartzokas A, Katsoulis B D. 2004. Relation between sensible and latent heat fluxes in the mediterranean and precipitation in the Greek area during winter [J]. *Int. J. Climatol.*, 24: 1803-1816.
- 刘少峰. 2005. 通用陆面模式 CLM 在东亚不同典型下垫面的验证试验 [J]. *气候与环境研究*, 10 (3): 684-699. Liu Shaofeng. 2005. Validation of common land model using field experiment data over typical land cover types in East Asia [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (3): 684-699.
- Manabe S, Smagorinsky J, Strickler R F. 1965. Simulated climatology of a general circulation model with a hydrological cycle [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 93: 769-798.
- Manabe S. 1969. Climate and ocean circulation: 1. The atmospheric circulation and the hydrology of the earth's surface [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 97: 939-805.
- Mariana Vertenstein, Oleson K, Levis S, et al. 2004. Community Land Model Version 3.0 (CLM3.0) User's Guide [R]. National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO. 38pp.
- 牛国跃, 洪钟祥, 孙菽芬. 1997. 陆面过程研究的现状与发展趋势 [J]. *地球科学进展*, 12 (1): 20-25. Niu Guoyao, Hong Zhongxiang, Sun Shufen. 1997. Status and developmental trends of land surface processes study [J]. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 12 (1): 20-25.
- Oleson K W, Dai Yongjiu, Bonan G B, et al. 2004. Technical Description of the Community Land Model (CLM) NCAR Technical. Note-461+STR, 173pp.
- Repapis C C, Metaxas D A, Zerefos C S. 1978. A contribution to climatology of sensible heat flux over the Mediterranean Sea [J]. *Bulletin of the Hellenic Meteorological Society*, 3 (2): 1-20.
- Sellers W D. 1965. *Physical Climatology* [M]. Chicago, IL: University of Chicago Press, 272pp.
- Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. 1986. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models [J]. *J. Atmos. Sci.*, 43: 505-531.
- Sellers P J, Randall D A, Collatz G J, et al. 1996a. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation [J]. *J. Climate*, 9: 676-705.
- Sellers P J, Los S O, Tucker C J, et al. 1996b. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data [J]. *J. Climate*, 9: 706-737.
- 孙鸿烈. 2006. 中国生态系统研究网络为生态系统评估提供科技支撑 [J]. *资源科学*, 28 (4): 2-3. Sun Honglie. 2006. Science and technology support are provided for ecosystem assessment by Chinese Terrestrial Ecosystem Flux Observational Research Network [J]. *Resources Science* (in Chinese), 28 (4): 2-3.
- 孙菽芬. 2005. 陆面过程的物理、生化机制和参数化模型 [M]. 北京: 气象出版社, 307pp. Sun Shufen. 2005. *Biophysical and Biochemical Mechanisms and Their Parameterization in Context of Land Surface Processes* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 307pp.
- 王介民. 1999. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE

- 到 IMGRASS 和 GAME-Tibet/TIPEX [J]. 高原气象, 18 (3): 280 - 294. Wang Jiemin. 1999. Land surface process experiments and interaction study in China—from HEIFE to IMGRASS and GAME-TIBET/TIPEX [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (3): 280 - 294.
- Webb E K, Pearman G I, Leuning R. 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 106: 85 - 100.
- 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 2004. 复杂地形条件下森林植被湍流通量测定的分析 [J]. 中国科学 (D 辑), 34 (增刊 II): 57 - 66. Wen Xuefa, Yu Guirui, Sun Xiaomin, et al. 2004. Analysis of forest turbulent flux measurement in the complex topography [J]. China Science (Ser. D) (in Chinese), 34 (Suppl. II): 57 - 66.
- 辛羽飞, 卞林根, 张雪红. 2006. CoLM 模式在西北干旱区和青藏高原区得适用性研究 [J]. 高原气象, 25 (4): 567 - 574. Xin Yufei, Bian Linggen, Zhang Xuehong. 2006. The application of CoLM to arid region of Northwest China and Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (4): 567 - 574.
- 徐克学. 1999. 生物数学 [M]. 北京: 科学出版社, 382pp. Xu Kexue. 1999. Biological Science [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 382pp.
- 杨兴国, 牛生杰, 郑有飞, 等. 2003. 陆面过程观测试验研究进展 [J]. 干旱气象, 21 (3): 83 - 89. Yang Xingguo, Niu Shengjie, Zheng Youfei, et al. 2003. Advance in land surface process experimental study [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 21 (3): 83 - 89.
- 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 等. 2004. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展 [J]. 中国科学 (D 辑), 34 (增刊 II): 15 - 29. Yu Guirui, Zhang Leiming, Sun Xiaolei, et al. 2004. Advances in carbon flux observation and research in Asia [J]. China Science (Ser. D) (in Chinese), 34 (Suppl. II): 15 - 29.
- Zeng Xubin, Shaikh M, Dai Yongjiu, et al. 2002. Coupling of the common land model to the NCAR community climate model [J]. J. Climate, 15: 1832 - 1854.
- 赵海英, 郭振海, 张宏昇. 2006. 农牧交错带陆面过程的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 11 (4): 535 - 545. Zhao Haiying, Guo Zhenhai, Zhang Hongsheng. 2006. Numerical simulation research of land surface process in the region between cropland and pasture [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (4): 535 - 545.