杨扬,杨启东,孙旭映,等. 2016. 三个陆面过程模式在西北半干旱区的模拟性能对比 [J]. 气候与环境研究, 21 (4): 405-417. Yang Yang, Yang Qidong, Sun Xuying, et al. 2016. A comparative research of the simulation capability of NOAH, SHAW, and CLM models in semi-arid areas of Northwestern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (4): 405-417, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15105.

三个陆面过程模式在西北半干旱区的模拟性能对比

杨扬1 杨启东2 孙旭映1 王丽娟1

1 中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省(中国气象局)干旱气候变化与减灾重点实验室,兰州 730020 2 云南大学大气科学系,昆明 650091

摘 要 利用 NOAH (The Community Noah Land Surface Model)、SHAW (Simultaneous Heat and Water)和 CLM (Community Land Model) 3 个不同的陆面过程模式及兰州大学 (Semi-Arid Climate Observatory and Laboratory, SACOL) 2007 年的观测资料,对黄土高原半干旱区的陆面过程进行了模拟研究。通过与观测值间的对比,考察不 同陆面过程模式在半干旱区的适用性。研究结果表明:3个模式在半干旱区的模拟性能有较大差异。其中,CLM 模式模拟的 20 cm 以上的浅层土壤温度最优, SHAW 模式模拟的深层土壤温度最优; SHAW 模式模拟的土壤含水 量与观测值最为接近,而 NOAH 和 CLM 模式模拟值有较大偏差: 3 个模式均能较好地模拟地表反射辐射,其中 SHAW 模式模拟值与观测值的偏差最小;对地表长波辐射的模拟,CLM 模式的模拟最优;3个模式均能较好地反 映感热、潜热通量的变化趋势,其中 CLM 模式对感热的模拟性能优于其他两个模式,在有降水发生后的湿润条 件下,CLM 模式对潜热的模拟性能最优,而无降水的干燥条件下,CLM 模式的模拟偏差最大,NOAH 模式对冬 季潜热的模拟最优。总体而言,CLM 模式能够更好地再现半干旱区地气之间的相互作用,但模式对土壤含水量及 干燥条件下的潜热通量的模拟较差,模式对半干旱区陆气间的水文过程还有待进一步的研究和改进。 关键词 陆面过程 NOAH 模式 SHAW 模式 CLM 模式 半干旱区 半干旱气候与环境监测站(SACOL) 文章编号 1006-9585 (2016) 04-0405-13 中图分类号 P435 文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15105

A Comparative Research of the Simulation Capability of NOAH, SHAW, and CLM Models in Semi-Arid Areas of Northwestern China

YANG Yang¹, YANG Qidong², SUN Xuying¹, and WANG Lijuan¹

1 Gansu Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster/Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020

2 Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091

Abstract Single point simulation experiments have been conducted using NOAH (The Community Noah Land Surface Model), SHAW (simultaneous Heat and Water) and CLM (Community Land Model) respectively. Results are compared with observed data from Semi-Arid Climate Observatory and Laboratory (SACOL) to study the land surface process in the Loess Plateau. The goal of this paper is to evaluate the simulation capability of different models in semi-arid areas by

收稿日期 2015-04-29; 网络预出版日期 2016-03-30

作者简介 杨扬,女,1988年出生,硕士研究生,助理工程师,主要从事陆面过程研究。E-mail: yangmeng07.happy@163.com.

资助项目 中国气象局兰州干旱气象研究所基本科研业务费,公益性行业(气象)科研专项(重大专项)GYHY201506001-4,国家自然科学基金 41305103,云南省青年基金 2013FD005

Funded by Basic scientific research service fee of Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou, China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Major projects, GYHY201506001-4), National Natural Science Foundation of China (Grant 41305103), Yunnan Science Youth Fund (Grant 2013FD005)

comparing model simulations with observations. The results show large differences in the performance of the three models. For soil temperature at the top 20 cm, the simulation capability of CLM 4.0 is the best, while the performance of SHAW is the best for simulation of temperature in deep soil layers. For soil water content, the simulated results of SHAW are the closest to observed values, while large biases are found in simulations of NOAH and CLM. All the three models can well simulate upward shortwave radiation, and the performance of SHAW is the best. The performance of CLM for upward longwave radiation simulation is the best. All the three models can simulate variations of sensible and latent heat fluxes, and the performance of CLM for sensible heat flux simulation is better than that of NOAH and SHAW. As to latent heat flux, CLM performance is the best under wet condition after precipitation, whereas there are large biases in CLM simulation under dry condition without precipitation. The performance of NOAH for latent heat flux simulation is the best in the winter. Relatively, CLM can better represent the interaction between land and atmosphere in semi-arid areas, but its performance for soil water content and latent heat flux simulation under dry condition grocess between land and atmosphere described in CLM is needed in semi-arid areas. **Keywords** Land surface process, NOAH model, SHAW model, CLM model, Semi-arid area, Semi-Arid Climate

Observatory and Laboratory (SACOL)

1 引言

干旱半干旱区约占全球陆地面积的 40%(符淙 斌和温刚, 2002),是全球降水率变化最大的地区, 并且是气候和生态系统的过渡带,因而也是全球气 候变化研究的重点区域。与其他下垫面相比,干旱 半干旱区地表具有植被稀少,反照率大,表层土壤 含水量低,生态环境脆弱等特点,其陆面过程变化 对气候影响较为敏感(Knorr et al., 2001; Narisma et al., 2007)。因此,研究干旱半干旱区陆气间的相互 作用,开展陆面过程数值模拟研究非常必要。

陆地约占地球表面的 30%, 其与大气间的动量、 能量及物质的交换对气候有着重要的影响 (Yang, 2004)。地表陆面过程是地球科学系统中非常重要的 组成部分,不同的地表特征决定着陆气间的能量和 物质平衡,从而影响着不同时空尺度的大气环流及 气候的基本特征(Giorgio and Avissar, 1997; Pielke, 2001)。作为描述陆面过程的数值模式,陆面过程模 式是气候模式中各个圈层间相互作用、相互联系的 纽带。因此,开展陆面过程模式在不同下垫面的适 用性研究,进而不断优化和发展陆面过程模式,对 于改进气候预测和提高中短期数值模式的预报水平 都具有重要的意义 (Chen and Dudhia, 2001)。

随着陆面过程野外观测试验和陆面过程模式 的发展和相互促进,目前的陆面过程模式已取得了 长远的发展,并进行了众多的模拟研究。国际陆面 过程模式比较计划(Project for Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes, PILPS)通过 对 20 多个模式进行陆面过程数值试验比较表明,

目前的陆面过程模式还存在许多不足,在相同的大 气强迫下不同的陆面过程模式的模拟结果并不相 同,模拟的水热通量不一致甚至还出现了显著的差 别,并指出不同的模式对不同的下垫面模拟效果各 有优劣,很难找出一个最优的模式 (Liang et al., 1998; Wood et al., 1998; Jin et al., 2003; Nijssen et al., 2003)。近年来,随着大量观测试验的展开,国内研 究者(朱德琴和高晓清, 2005; 房云龙等, 2010; 柳媛普等, 2013; 杨启东和王丽娟, 2014; 杨扬, 2014)也利用不同的陆面过程模式在干旱半干旱区 开展了模拟研究,结果表明,不同的陆面过程模式 在不同的地区能较好地模拟出陆面各特征参量的 变化趋势,但各模式的模拟性能并不相同,模拟仍 然存在较大的偏差。孟祥新和符淙斌(2009)利用 BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme), LSM (Land Surface Model) 和 CoLM (Common Land Model) 模式对中国半干旱区通榆站的陆面过 程进行了模拟,结果表明,3个模式均能模拟出地 气间能量通量的季节和日变化,但模拟性能存在较 大差异。因此,针对同一地区下垫面,在相同的大 气强迫下进行模拟试验,进一步检验不同模式对于 旱半干旱区的模拟性能,可以为中短期数值模式及 气候模式提供相对准确和合理的下边界条件,以便 为今后气候预测提供科学依据。

本文利用在陆面过程研究中较为常用的 3 个模 式 NOAH (The Community Noah Land Surface Model)、SHAW (Simultaneous Heat and Water) 和 CLM (Community Land Model) 模式,并结合兰州 大学半干旱气候与环境监测站 SACOL (Semi-Arid Climate Observatory and Laboratory) 的 2007 年观测 资料,对黄土高原半干旱区典型荒草下垫面的陆面 过程进行了模拟研究。通过与观测值的对比分析, 检验不同模式在半干旱区的模拟性能。研究结果为 改进陆面过程模式对半干旱区陆面过程的模拟性 能及气候模式具有积极意义。

2 资料和模式

2.1 站点和资料介绍

兰州大学半干旱气候与环境监测站 SACOL 位 于甘肃省榆中县兰州大学萃英山顶 [(35.946°N, 104.137°E), 1961 m], 观测场占地约 0.08 km², 下 垫面较为平坦,夏秋季节有短草生长。SACOL 站 位于中国黄土高原地区,代表了方圆几百公里的半 干旱区气候状况 (Huang et al., 2008; Guan et al., 2009)。该站的观测项目主要包括:太阳辐射,大气、 地表长波辐射;风速和风向、温度、湿度梯度;湍 流通量; 土壤温度、含水量及热通量等。为此, 在 观测场内架设了辐射表、微气象塔、超声风速仪、 脉动温湿仪及土壤监测系统等,仪器的描述及安装 情况可参考文献 (Huang et al., 2008)。SACOL 站自 2006年4月仪器安装调试成功后,已获取了大量的 观测资料。目前, SACOL 站已加入国际协同加强 观测计划 (Coordinated Enhanced Observing Period, CEOP)、国际气溶胶监测网络 (Aerosol Robotic Network, AERONET) 和微波脉冲雷达监测网 (Micro-Pulse Lidar Network, MPLNET) 等国际大气 观测网,观测资料广泛应用于黄土高原半干旱区气候、区域能量和水分循环等研究,对于预测研究我国西北半干旱区气候环境变化等有重要作用。

本文主要使用 SACOL 站 2007 年的近地层观测 资料,包括 4 m 处测得的空气温度、相对湿度、风速、大气压强,向下和向上的短波和长波辐射,感 热通量和潜热通量及土壤温度和湿度。由于 SACOL 站降水资料误差较大,因此采用兰州市气象局提供的榆中县观测站[(35.87°N, 104.15°E), 1875 m,与 SACOL 站的直线距离约为 8 km]的日降水量(如图 1)。

2.2 模式介绍

NOAH 模式 (version2.7.1) 是在美国俄勒冈州 大学的 OSU 陆面过程模式的基础上发展来的 (Mahrt and Pan, 1984)。 NOAH 陆面过程模式描述 了土壤—积雪—植被与大气的相互作用,可以用于 模拟土壤温度、土壤含水量、冠层含水量、雪深、 水汽、能量通量、向上长短波辐射强度等。该模式 可以作为一维单点模式独立运行,也可以耦合到各 种气候模式中,模拟研究陆面过程对气候的影响 (LeMone et al., 2008; Chen et al., 2010)。

SHAW 模式 (version23) 是由美国农业部建立 的最初用于模拟土壤的冻结与融化的模式 (Flerchinger and Saxton, 1989; Flerchinger, 2000),后 来经过不断的改进和完善,逐渐发展成为包含土壤 一积雪一残留层一植被一大气相互作用的一维模 式 (Flerchinger and Pierson, 1991, 1997)。SHAW 模





式中详细地描述了各圈层中的辐射传输、湍流交换、降水渗透,土壤中的水热传输及土壤冻融等物理过程。SHAW模式灵活设置了物理层,可根据下垫面情况设置相应的物理层,其中土壤分层不超过50层,植被和残留层不超过100层。该模式在不同的下垫面进行了数值模拟,模拟性能较好(Flerchinger,1991; Flerchinger et al., 1998; Flerchinger and Hardegree, 2004)。

CLM 模式 (version 4.0) 是 NCAR 发布的新一 代陆面过程模式,模式主要包括物理地球化学、生 物地球物理、水循环和动态植被过程4个部分。CLM 最新的版本中引入了陆面过程的最新研究结果,更 新了地表和大气强迫数据集;改进了对水文过程和 雪盖的描述;增加了碳氮循环模式(CN Model)和 城市模型(CLMU);并且考虑了地表覆盖和土地利 用的快速变化状况的影响。CLM 模式由嵌套的次网 格层次来描述地表的非均匀性,包括网格单元 (gridcell)、陆地单元(landunits)、土壤柱(columns) 及植被功能类型 (Plant Functional Types, PFTs)。其 中,陆地单元分为植被、湿地、湖泊、冰川和城市

5 类; 土壤柱由 15 层土壤和至多 5 层积雪组成; 植被功能类型用来描述不同植被在生物理化过程 中的差异,每个土壤柱单元可包括 4~17 种植被功 能类型(包括裸土)(Oleson et al., 2010)。CLM 是 公用地球系统模式 CESM(Community Earth System Model)的一个子模块,广泛应用于气候研究的各 个方面(Lawrence et al., 2012;王澄海和孙超, 2013; 杨扬, 2014)。

2.3 试验设计

SACOL 站位于黄土高原半干旱区,有明显的 陆面过程季节变化特征,降水主要集中在夏秋季 节,有稀疏的短草生长,为典型的荒草下垫面。 SHAW 模式中需输入相应的地表参数,其中取1层 植被、10 层土壤, 深度分别为 0、2、5、10、20、 40、80、100、200 cm。相应的参数可见表 1, 没有 列出的参数均使用模式建议的参考值。NOAH 模式 需选择植被和土壤类型,其中,植被选取为常年生 植被 VEGTYP7, 土壤类型为 SOILTYP7, 均取模 式默认值,相应参数可见表1。NOAH模式土壤也 分为10 层,深度与 SHAW 模式设置相同。两个模 式中,土壤温湿的初始值均取为 2007 年 1 月 1 日 观测资料值,没有观测的层利用邻近节点的线性插 值得到。CLM 模式所需的地表参数主要包括植被功 能类型,茎、叶面积指数,植株高度,土壤颜色、 质地、有机质含量等,与植被功能类型有关的数据 来自于中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution

			地表		饱和体					
		植被	动力	饱和水	积含水				Cambell	
		高度	粗糙	导率/m	量 / m 3			粉土百	孔隙度分	
参数	月平均植被反照率	/m	度/m	s^{-1}	m^{-3}	砂土百分比	黏土百分比	分比	布指数	有机质含量/kg m ⁻³
NOAH	0.15 (1月)、0.20 (2	—	_	$4.5 \times$	0.40	60%	—	-	6.77	_
模式	月)、0.20(3月)、0.21			10^{-6}						
	(4月)、0.23(5月)、									
	0.24 (6月)、0.24 (7									
	月)、0.24(8月)、0.25									
	(9月)、0.25(10月)、									
	0.22(11月)、0.15(12									
	月)									
SHAW	0.21 (植被)、0.20	0.1	0.062	$3.25 \times$	0.4	50%	20%	30%、	4.5	_
模式	(干土)			10^{-6}						
CLM	_	—	—	_	—	33%(第一层)、33%	24% (第一层)、24%	—	—	30.674 (第一层)、
模式						(第二层)、33%(第	(第二层)、24%(第			31.255 (第二层)、
						三层)、32%(第四	三层)、25%(第四层)、			26.866 (第三层)、
						层)、30%(第五层)、	27% (第五层)、28%			22.030 (第四层)、
						28% (第六层)、29%	(第六层)、28%(第			17.659 (第五层)、
						(第七层)、30%(第	七层)、25%(第八层)、			13.985 (第六层)、
						八层)、38%(第九	20% (第九层)、40%			11.000(第七层)、8.617
						层)、16%(第十层)	(第十层)			(第八层)、0(第九
										层)、0(第十层)

表 1 NOAH、SHAW 和 CLM 模式中输入的地表参数 Table 1 Input surface parameters of NOAH, SHAW, and CLM models

Imaging Spectrotradiometer, MODIS) 的数据, 而土 壤质地来自于国际地圈生物圈计划 (International Geosphere Biosphere Program, IGBP) 数据 (Oleson et al., 2010), 土壤有机质含量来自于 Lawrence and Slater (2008)。CLM 模式地表温度及各层土壤温度 的初始值取为 274 K, 土壤含水量初始化为 0.3, 而 最下面的 5 层初始化为 0。

考虑到陆面过程模式对初值的敏感性及对土 壤的"记忆性",同时限于观测资料的长度,首先 利用 2006 年 9 月至 2007 年 1 月的资料进行了 5 个 月的"spin-up",使用 2007 年 2~12 月的模拟结果 进行对比分析。

本文利用观测的空气温度、湿度、气压、风速、 降水、太阳短波和大气长波辐射作为3个模式的大 气强迫场(如图2),模拟步长均设定为1h,主要 模拟的变量为反射辐射、地表长波辐射,感热、潜 热通量,土壤温度及土壤含水量。为评估模式的模 拟性能,给出模拟值与观测值的平均偏差(Mean Bias Error, MBE)、均方根偏差(Root Mean Bias Error, RMBE)和归一化标准偏差(Normalized Standard Error of the Estimate, NSEE)定量来评估模拟值与观测值之间的偏差,具体表达式见杨启东等(2012)。

3 模拟结果分析

3.1 土壤温度

土壤温度是衡量陆面过程模式模拟性能的一 个重要参数,因为土壤温度计算的准确性直接影响 模式中地气间的能量和物质的交换,从而影响中尺 度模式及气候模式模拟的准确性。3个模式计算土壤 温度的参数化方案并不相同,SHAW 模式基于土壤 水热耦合方程同步求解土壤温度和土壤湿度, NOAH 和 CLM 模式只利用土壤热传导方程计算土 壤温度。

图 3a-f给出了 3 个模式模拟的各层土壤温度与 观测值的日平均值的比较。从图 3 中可以看到,20 cm 以上的土壤温度受空气温度的日变化影响比较 明显,有较为剧烈的波动,3 个模式均能模拟出这



图 2 2007 年 1~12 月模式输入的大气强迫场(a)气温、(b)相对湿度、(c)风速、(d)降水速率、(e)太阳辐射、(f)气压、(g)大气长波辐射 随时间的变化

Fig. 2 Variations of atmospheric forcing input data (a) temperature, (b) specific humidity, (c) wind speed, (d) precipitation rate, (e) downward shortwave radiation, (f) atmospheric pressure, and (g) downward longwave radiation for land surface models for the period from Jan to Dec 2007



图 3 不同模式模拟与观测的日平均各层土壤温度变化 Fig. 3 Variations of simulated and observed daily mean soil temperature at different soil layers

一变化,模拟值的变化趋势、峰谷值与观测值总体 一致。随着土壤深度的增加,土壤温度受气温日变 化的影响较小,温度曲线较为平滑,模拟值也体现 了这一变化。整体来看,3个模式的模拟值均较好 地再现了各层土壤温度随季节变化的特征,模拟值 的振幅与观测值的基本一致,但模拟值较观测值还 存在不同程度的偏差。冬季, SHAW 和 CLM 模式 模拟的 10 cm 以下土壤温度较观测值明显偏低; 夏 季, SHAW 和 CLM 模式对 20 cm 以上的各层土壤 温度模拟性能较冬季变好,模拟值与观测值较为接 近。与 SHAW 和 CLM 模式不同, NOAH 模式的模 拟值除 12 月外均低于观测值,且模式对土壤温度 的模拟性能冬季要优于夏季。由图 4a-c 给出的 3 个模式模拟的 5 cm 土壤温度与观测值的散点图可 见,CLM 模式模拟的土壤温度与观测值的线性拟合 线更接近于 1:1 线,相关系数也更高。表 2 给出了 模拟值与观测值的偏差统计结果。如表 2 所示, 20 cm 以上, CLM 模式的模拟性能最优,模拟值与观 测值的平均偏差 MBE 不超过1°C,且 RMBE、NSEE 也是3个模式里面最小的; SHAW 模式的模拟性能 次之,两者的 MBE 不超过 1.5 ℃; NOAH 模式的 模拟值与观测值的 MBE 最大,可达到 3 ℃。随着 土壤深度的增加,SHAW 模式的模拟性能要优于 CLM 和 NOAH 模式的,模拟值较观测值的 MBE、 RMBE、NSEE 均小于其他两个模式。

表 2 不同模式模拟的各层土壤温度和观测值的偏差比较 Table 2 Deviations of simulated and observed soil temperature at each soil layer

± 塘深 MBE/℃ RMBE/℃ NSEE	
度/cm NOAH SHAW CLM NOAH SHAW CLM NOAH SHAW	CLM
2 -2.18 -1.34 -0.24 3.74 3.09 2.27 0.245 0.203	0.148
5 -2.15 -1.27 -0.28 3.69 2.24 1.85 0.247 0.150	0.124
10 -2.30 -1.21 -0.45 3.81 1.77 1.40 0.259 0.120	0.096
20 -2.90 -1.24 -0.79 4.25 1.74 1.37 0.294 0.120	0.095
50 -3.98 -1.22 -1.64 5.01 1.68 1.93 0.359 0.120	0.138
80 -6.00 -0.90 -1.86 8.35 1.77 2.11 0.629 0.133	0.160

3个模式模拟的深层(80 cm)土壤温度偏差较 大,这可能与土壤温度相关的参数不准确有关,如 土壤热导率、土壤热容等。土壤热导率参数化方案 与土壤质地、土壤含水量等密切相关,文中所使用 的土壤资料来自模式自带数据,可能与 SACOL 站 实际状况有差别,另外土壤水分模拟存在较大误差,必然影响土壤温度模拟。同时,数值计算中不可避免的误差传播也会影响土壤温度的模拟。另外,从模式分层的角度来看,由于土壤浅层物理量的梯度较大,浅层土壤分层更细,层数多于深层。对土壤温度的表述浅层优于深层,加之浅层模拟的误差随着深度产生累积效应,故深层 80 cm 的土壤温度模拟误差就会更大。

3.2 土壤含水量

图 5a-f给出了 3 个模式模拟的各层土壤含水量 与观测值的日平均值的比较。如图 5 所示, 3 个模 式的模拟值均再现了各层土壤含水量随季节变化 的趋势。夏季模拟的浅层 20 cm 以上土壤含水量对 降水过程有明显的响应, 5 cm 和 10 cm 的土壤含水 量波动较大,与夏季多雨期对应。整体来看,夏季 土壤含水量的模拟性能良好,冬季的模拟性能较 差。SHAW 模式模拟的 40 cm 以上的土壤含水量的 变化趋势、峰谷值与观测值基本一致,深层 80 cm 的模拟效果不理想。NOAH 模式模拟的 5 cm 土壤 含水量的变化趋势、振幅均在不同季节与观测值吻 合; 10 cm 土壤含水量的模拟值在夏季与观测值较 为接近,在冬季的模拟性能稍差; 20 cm 以下, NOAH 模式的模拟值较观测值的偏差小,但模式并 未刻画出土壤含水量的变化趋势。CLM 模拟的 40





Fig. 5 Variations of simulated and observed daily mean soil water content at different soil layers

cm 以上土壤含水量的几次波动与观测值相对应, 但模拟值较观测值偏大,且偏差较大,模式的模拟 性能夏季优于冬季。总体来看,SHAW 模式模拟的 峰谷值与观测值更为接近,模拟性能最好,模拟值 较观测值的 MBE、RMBE、NSEE 较其他两个模式 的偏小(表 3)。CLM 模式模拟了土壤含水量的变 化趋势,但模拟值较观测值偏高,偏差较大,这可 能与模式土壤导水率及孔隙度的参数化方案有关。

表 3 不同模式模拟的各层土壤含水量和观测值的偏差比较 Table 3 Deviations of simulated and observed soil water content at different soil layers

土壤深	MB	E/mm ³ r	nm ⁻³	RMB	E/mm ³ r	nm ⁻³	NSEE			
度/cm	NOAH	SHAW	CLM	NOAH	SHAW	CLM	NOAH	SHAW	CLM	
5	0.013	-0.012	-0.090	0.039	0.028	0.103	0.252	0.182	0.664	
10	-0.010	-0.028	0.078	0.049	0.040	0.095	0.273	0.223	0.528	
20	-0.036	-0.012	0.109	0.075	0.032	0.122	0.452	0.192	0.734	
40	-0.076	0.003	0.133	0.097	0.029	0.143	0.623	0.188	0.917	
80	-0.029	0.010	0.181	0.049	0.048	0.185	0.446	0.432	1.676	

3.3 辐射通量

地面的能量来源于太阳短波辐射和大气长波辐射,同时地面又向上反射短波辐射和出射长波辐射,因此辐射通量的模拟性能会对地表能量通量分量的 模拟产生影响。在陆面过程模式离线模拟中,太阳辐射和大气长波辐射作为强迫场输入,因此净辐射由反射辐射和地表长波辐射决定。反射辐射主要取决于地表反照率,对于反照率的计算,3个模式有较大的不同:NOAH 模式中土壤和植被反照率采用月平均插值到日平均方法计算,积雪反照率由雪龄等参数化得到(Yang et al., 2011)。在 SHAW 模式中,植被反照率利用短波辐射传输的分层方案确定 (Flerchinger, 2000),土壤反照率与湿度相关,积雪反照率应用积雪粒径等参数化得到。CLM 模式中将短波分为可见光和近红外光分别处理;植被反照率采用二流近似模 型计算, 土壤反照率与土壤湿度相关, 积雪反照率利 用 SNICAR 模型 (Snow, Ice, and Aerosol Radiative Model) 计算得到 (Oleson et al., 2010)。对于长波辐 射的计算, 3 个模式都基于 Stefan- Boltzman 定律计 算, 与地表温度密切相关, 具体方案自有微小差别, 可参考相应文献 (Mahrt and Pan, 1984; Flechinger and Saxton, 1989; Flechinger, 2000; Oleson et al., 2010)。

图 6 给出了 3 个模式模拟的反射辐射与观测值 的日平均值的比较。从图 6 中可以看到, 3 个模式 均能较好地模拟出反射辐射的变化趋势, NOAH 和 SHAW 模式的模拟值较观测值偏高,而 CLM 模式 的模拟值略小于观测值。整体上来看, SHAW 和 CLM 模式的模拟值较观测值的偏差相对较小,不超 过 15 W m⁻²; NOAH 模式的偏差相对较大,最大可 达到 25 W m⁻²。如图 7a-c 给出的 3 个模式模拟的 反射辐射与观测值的散点图可见, SHAW 模式的模 拟值与观测值的线性拟合线与 1:1 线基本重合,相 关系数达到了 0.92; NOAH 和 CLM 模式的线性拟 合线均在1:1线附近, CLM 模式的相关性更好。表 4 给出了观测与 3 个模式模拟的地表能量分量的偏 差的统计结果。如表所示, SHAW 模式的模拟值与 观测值的 MBE、RMBE 均小于 NOAH 和 CLM 模 式。综合来看, SHAW 模式对反射辐射的模拟性能 较好,模拟值与观测值的偏差较小。

图 8 给出了观测与 3 个模式模拟的地表长波辐射日均值变化。如图可见, 3 个模式对地表长波辐射的模拟比较理想,这也从另一个角度说明了模式对地表温度的模拟效果较好。冬季,相对于观测值, NOAH 和 CLM 的模拟效果较好,SHAW 模式模拟的振幅较大。夏季,CLM 模式的模拟性能提高最优,模拟值与观测值的变化趋势、峰谷值基本吻合。如图 9a-c 给出的 3 个模式模拟的地表长波辐射与





观测值的散点图所示,CLM 模式的模拟值与观测值 的线性拟合线最接近于 1:1 线,相关性最高。结合 表 4 中偏差的统计结果来看,CLM 模式的模拟值与 观测值的 MBE 和 RMBE 为-3.23 W m⁻²、20.76 W m⁻²,均比 NOAH、SHAW 模式的小。综上所述, CLM 模式对地表长波辐射的模拟最好,模拟值与观测值的变化趋势一致,相关性较高,且偏差较小。 3 个模式对夏季地表长波辐射的模拟效果要比冬季的好,特别是 CLM 模式在夏季对地表长波辐射的 模拟与观测值最为接近。



图 7 (a) NOAH、(b) SHAW、(c) CLM 模拟的反射辐射与观测值的散点图 Fig. 7 Scatter plots of observed and simulated upward shortwave radiation from (a) NOAH, (b) SHAW, and (c) CLM models





图 9 (a) NOAH、(b) SHAW、(c) CLM 模拟的地表长波辐射与观测值的散点图

Fig. 9 Scatter plots of observed and simulated upward longwave radiation from (a) NOAH, (b) SHAW, and (c) CLM models

Table 4 Deviations of simulated and observed surface energy fluxes

	MBE/W m ⁻²			RMBE/W m ⁻²			NSEE		
地表能量通量	NOAH	SHAW	CLM	NOAH	SHAW	CLM	NOAH	SHAW	CLM
反射辐射	6.94	3.89	-4.44	19.66	19.01	19.98	0.268	0.531	0.272
地表长波辐射	-9.64	-15.93	-3.23	31.83	34.30	20.76	0.083	0.089	0.054
感热通量	12.19	25.18	10.94	106.84	85.71	55.59	1.468	1.178	0.721
潜热通量	-4.54	-6.26	-0.90	45.64	53.34	40.74	0.699	0.817	0.589

3.4 湍流通量

地表通过湍流运动将热量和水汽输送给大气, 即表现为感热通量和潜热通量的交换。因此,陆面 过程模式对感热和潜热通量的模拟效果将会直接影 响气候及天气的模拟。这 3 个陆面过程模式中湍流 边界层的参数化方案都是基于 M-O 相似性理论计 算,实现方式和参数化过程略有差异,NOAH 利用 了 Chen et al. (1997) 方案,SHAW 模式利用了 Norman(1979) 方案,CLM 利用了 Zeng and Dickinson (1998) 方案来计算感热和潜热通量。

图 10 给出了 3 个模式模拟的感热、潜热通量 与观测的日均值变化。从图 10a 中可以看到, 3 个 模式均能较好地模拟感热通量的变化趋势,但各模 式的模拟值与观测值的偏差不同。秋冬季节,模拟 的感热通量与观测值的偏差较小;春夏季节,3个 模式的模拟值较观测值偏高,且夏季偏差相对较 大。相比较而言, CLM 模式的模拟值与观测值的偏 差较小。从表 4 给出的偏差统计结果来看, CLM 模式模拟的感热通量与观测值的 MBE (12.19)、 RMBE (55.59)、NSEE (0.721) 较 NOAH 和 SHAW 模式的小。如图 10b 给出的潜热通量所示, 3 个模 式模拟出了潜热通量的变化趋势,但模拟值和观测 值存在不同程度的偏差。5月29日, SACOL 站有 一次降水过程发生,潜热变大,3个模式的模拟值 均对降水有响应,其中 CLM 模式的模拟值与观测 值基本吻合,而 NOAH 模式的模拟值的振幅较大。

之后的 6~7 月, SACOL 站基本无降水, 潜热通量 相对减小,3个模式模拟的变化趋势与观测值一致, 但偏差并不相同,其中 CLM 模式较观测值的偏差 最大。8月7日, SACOL 站又出现了一次强降水过 程,累计降水量达到了 68.8 mm,潜热变大,3 个 模式的模拟值均体现了这一变化趋势,其中 CLM 模式的模拟值与观测值最为吻合,模拟性能较好。 8~11 月陆续有降水发生,观测与模拟的潜热对降 水有明显的响应,其中 CLM 模式的模拟最好。冬 季,SACOL站降水较少,潜热变小,3个模式模拟 的变化与观测值一致, NOAH 模式的模拟值与观测 值的偏差最小,而 CLM 模式的偏差最大。春季有 降水发生后,CLM 模式的模拟性能变好。由此可见, CLM 模式对降水发生后的潜热模拟较好,对无降水 状况下的潜热模拟偏差较大,而 NOAH 模式对冬季 的潜热模拟较好。鉴于此, CLM 模式对干燥状况下 潜热的模拟性能还有待改进。表4给出的偏差统计 结果表明, CLM 模式的模拟值较观测值的 MBE、 RMBE、NSEE 最小, NOAH 模式的次之, SHAW 模式的偏差最大。总体而言,3 个模式模拟的感热 和潜热通量较观测值的偏差特别是夏季的稍大,3 个模式对半干旱地区地表感热和潜热通量的模拟 性能还有待改进,模式对有植被覆盖的湍流运动的 刻画和描述还需进一步的研究和完善。

为了进一步比较不同模式间模拟性能的差异, 图 11 给出了 3 个模式模拟的反射、地表长波辐射,



图 10 不同模式模拟与观测的日平均(a) 感热通量、(b) 潜热通量变化 Fig. 10 Variations of simulated and observed daily mean (a) sensible heat flux and (b) latent heat flux



图 11 不同模式模拟的地表能量通量、土壤温度及含水量的泰勒图 Fig. 11 Taylor diagram of surface fluxes, soil temperature, and soil water content simulated by different models

感热、潜热通量,5 cm 土壤温度及含水量与观测值 的泰勒图。泰勒图中,虚弧线表示标准差的大小, 距实弧线越接近表明变化趋势与观测值越吻合,虚 线代表模拟值与观测值的相关性。REF 是一个参考 点,距 REF 越接近,表明模式的模拟性能越好 (http://www-pcmdi.llnl.gov/about/staff/Taylor/CV/Tay lor_diagram_primer.pdf.[2015-04-29])。如图所示, CLM 模式模拟的反射、地表长波辐射,感热、潜热 通量,5 cm 土壤温度与 REF 点相对比较靠近,相 关性较好,说明 CLM 模式的模拟性能最优。对于5 cm 土壤含水量,SHAW 模式模拟的相关系数 (0.925)要高于其他两个模式,但 NOAH 模式的 模拟更靠近实弧线,说明 NOAH 模式的模拟值与观 测值的变化趋势更一致。综合而言,CLM 模式的模 拟性能最优。

4 总结与讨论

本文利用兰州大学半干旱气候与环境监测站 SACOL 的观测资料对 NOAH、SHAW 和 CLM 模 式对半干旱区荒草下垫面陆面过程的模拟性能进 行了评估。模拟研究表明,3 个模式均能模拟出黄 土高原半干旱区陆面各特征量的变化趋势,由于3 个模式对物理生化过程刻画的差异,各模式的模拟 性能并不相同。具体表现如下:

(1) 对于 20 cm 以上的土壤温度的模拟, CLM 模式的模拟性能最优; 20 cm 以下的深层土壤, SHAW 模式的模拟性能最优。

(2) 对于土壤含水量的模拟, SHAW 模式对土 壤含水量的模拟性能最好, 与观测值最为接近; CLM 模式模拟了土壤含水量的变化趋势, 但模拟值 较观测值偏高, 偏差较大, 且模式的模拟性能夏季 优于冬季; NOAH 模式对浅层土壤含水量的模拟性 能较好, 模拟值与观测值基本吻合, 但是对深层土 壤, NOAH 模式并未刻画出土壤含水量的变化趋势。

(3) SHAW 模式对反射辐射的模拟性能最优; CLM 模式的模拟性能次之; NOAH 模式模拟的反 射辐射的偏差较其他两个模式的大。地表长波辐射 的模拟中,CLM 模式的模拟最好,模拟值与观测值 的变化趋势一致,偏差较小,特别是夏季模拟值与 观测值最为接近。

(4)3个模式均能较好地模拟感热、潜热通量的变化趋势。各模式模拟的感热与观测值的偏差在 夏季较大,在冬季偏差较小,CLM模式对感热的模 拟性能最优,SHAW模式对感热的模拟性能优于 NOAH模式。无降水的干燥条件下,NOAH和 SHAW模式对潜热的模拟偏差相对较小,特别在冬 季,NOAH 模式的模拟性能最优;而降水发生后, CLM 模式对潜热的模拟性能变好,模拟值与观测值 较为吻合。

总体而言,CLM 模式能够更好地再现半干旱区 地气间的陆面过程特征,但模式对土壤含水量的模 拟依然较差,模拟值与观测值的偏差较大,这可能 与土壤内部的水热传输过程有关,与之相关的土壤 导水率、土壤孔隙度、土壤质地、有机质含量、植 被根系等参数可能在该地区并不准确。另外,CLM 模式对无降水的干燥条件下的潜热通量的模拟也 并不理想。冠层中的水热传输会影响到土壤含水量 及感热、潜热通量的模拟。那么,如何更准确地刻 画半干旱区陆气间的水文过程及冠层参数化方案, 并且通过更多的观测试验改进和完善相关参数,进 而发展适用的参数化方案,对于半干旱区陆面过程 模式的发展非常重要。

参考文献(References)

- Chen F, Janjié 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 (3): 391–421, doi: 10.1023/A: 1000531001463.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn state-NCAR MM5 modeling system. Part II: Preliminary model validation [J]. Mon. Wea. Rev., 129 (4): 587–604, doi: 10.1175/1520-0493(2001)129<0587:CAALSH>2.0.CO;2.
- Chen Y, Yang K, Zhou D, et al. 2010. Improving the Noah Land Surface Model in arid regions with an appropriate parameterization of the Thermal Rough NSEE Length [J]. Journal of Hydrometeorology, 11 (4): 995–1006, doi: 10.1175/2010JHM1185.1.
- 房云龙, 孙菽芬, 李倩, 等. 2010. 干旱区陆面过程模型参数优化和地气 相互作用特征的模拟研究 [J]. 大气科学, 34 (2): 290–306. Fang Yunlong, Sun Shufen, Li Qian, et al. 2010. The optimization of parameters of land surface model in arid region and the simulation of land–atmosphere interaction [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 290–306.
- Flerchinger G N. 1991. Sensitivity of soil freezing simulated by the shaw model [J]. Transactions of the ASAE, 34 (6): 2381–2389, doi: 10.13031/ 2013.31883.
- Flerchinger G N, Saxton K E. 1989. Simultaneous heat and water model of a freezing snow-residue-soil system I. Theory and development [J]. Transactions of the ASAE, 32 (2): 565–571, doi: 10.13031/2013.31040.
- Flerchinger G N, Pierson F B. 1991. Modeling plant canopy effects on variability of soil temperature and water [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 56 (3–4): 227–246, doi: 10.1016/0168-1923(91)90093-6.
- Flerchinger G N, Pierson F B. 1997. Modelling plant canopy effects on variability of soil temperature and water: Model calibration and validation

[J]. Journal of Arid Environments, 35 (4): 641–653, doi: 10.1006/jare. 1995.0167.

- Flerchinger G N. 2000. The simultaneous heat and water (SHAW) model: Technical documentation [R]. Technical Report NWRC 2000-10, Northwest Watershed Research Center, USDA Agricultural Research Service, Boise, Idaho, USA.
- Flerchinger G N, Hardegree S P. 2004. Modelling near-surface soil temperature and moisture for germination response predictions of post-wildfire seedbeds [J]. Journal of Arid Environments, 59 (2): 369–385, doi: 10.1016/j.jaridenv.2004.01.016.
- Flerchinger G N, Kustas W P, Weltz M A. 1998. Simulating surface energy fluxes and radiometric surface temperatures for two arid vegetation communities using the shaw model [J]. J. Appl. Meteor., 37 (5): 449–460, doi: 10.1175/1520-0450(1998)037<0449:SSEFAR>2.0.CO;2.
- 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.
- Giorgio F, Avissar R. 1997. Representation of heterogeneity effects in earth system modeling: Experience from land surface modeling [J]. Rev. Geophys., 35 (4): 413–437, doi: 10.1029/97RG01754.
- Guan X D, Huang J P, Guo N, et al. 2009. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 26 (4): 692–700, doi: 10.1007/s00376-009-8198-0.
- Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, et al. 2008. An Overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the Loess Plateau [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 25 (6): 906–921, doi: 10.1007/s00376-008-0906-7.
- Jin J, Gao X, Sorooshian S. 2003. Impacts of model calibration on high-latitude land-surface processes: Pilps 2 (E) calibration/validation experiments [J]. Global and Planetary Change, 38 (1–2): 73–80, doi: 10.1016/S0921-8181(03)00006-7.
- Knorr W, Schnitzler K G, Govaerts Y. 2001. The role of bright desert regions in shaping North African climate [J]. Geophys. Res. Lett., 28 (18): 3489–3492, doi: 10.1029/2001GL013283.
- Lawrence D M, Slater A G. 2008. Incorporating organic soil into a global climate model [J]. Climate Dyn., 30 (2–3): 145–160, doi: 10.1007/ s00382-007-0278-1.
- Lawrence D M, Oleson K W, Flanner M G, et al. 2012. The CCSM4 land simulation, 1850–2005: Assessment of surface climate and new capabilities [J]. J. Climate, 25: 2240–2260, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00103.1.
- LeMone M A, Tewari M, Chen F, et al. 2008. Evaluation of the Noah land surface model using data from a fair-weather IHOP_2002 day with heterogeneous surface fluxes [J]. Mon. Wea. Rev., 136 (12): 4915–4941, doi: 10.1175/2008MWR2354.1.
- Liang X, Wood E F, Lettenmaier D P, et al. 1998. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) Phase 2 (C) Red-Arkansas River Basin experiment: 2. Spatial and temporal analysis of energy fluxes [J]. Global and Planetary Change, 19 (1–4): 137–159, doi: 10.1016/S0921-8181(98)00045-9.

- 柳媛普, 张强, 王胜. 2013. 黄土高原半干旱区夏季晴天陆面特征模拟 与观测对比分析 [J]. 干旱气象, 31 (3): 457–463. Liu Yuanpu, Zhang Qiang, Wang Sheng. 2013. Comparative analysis of land surface characters between observed and simulated results on clear days in summer in semi-arid Loess Plateau [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 31 (3): 457–463.
- Mahrt L, Pan H. 1984. A two-layer model of soil hydrology [J]. Bound. -Layer Meteor., 29(1): 1–20, http://dx.doi.org/10.1007/BF00119116.
- 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 a semi-arid area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (4): 352–362.
- Narisma G T, Foley J A, Licker R, et al. 2007. Abrupt changes in rainfall during the twentieth century [J]. Geophys. Res. Lett., 34 (6), doi: 10.1029/2006GL028628.
- Nijssen B, Bowling L C, Lettenmaier D P, et al. 2003. Simulation of high latitude hydrological processes in the Torne-Kalix Basin: PILPS Phase 2 (e): 2: Comparison of model results with observations [J]. Global and Planetary Change, 38 (1–2): 31–53.
- Norman J M. 1979. Modeling the complete crop canopy [M]// Barfield B J, Gerber J F. Modification of the Aerial Environment of Plants. St. Joseph, MI: ASAE Monograph, 249–277.
- Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. 2010. Technical description of version 4.0 of the Community Land Model (CLM) [R]. NCAR Technical Note NCAR/TN-478+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, USA.
- Pielke R A. 2001. Influence of the spatial distribution of vegetation and soils on the prediction of cumulus convective rainfall [J]. Rev. Geophys., 39 (2): 151–177, doi: 10.1029/1999RG000072.
- 王澄海, 孙超. 2013. 一个基于 WRF+CLM 区域气候模式(WRFC)的建立 及初步试验 [J]. 高原气象, 32 (6): 1626–1637. Wang Chenghai, Sun Chao. 2013. Design and preliminary test of the Regional Climate Model (WRFC) based on coupling WRF3.2 and CLM4.0 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32 (6): 1626–1637.

- Wood E F, Lettenmaier D P, Liang X, et al. 1998. The project for intercomparison of land-surface parameterization schemes (PILPS) Phase 2 (C) Red-Arkansas River Basin experiment: 1. Experiment description and summary intercomparisons [J]. Global and Planetary Change, 19 (1–4): 115–135, doi: 10.1016/S0921-8181(98)00044-7.
- 杨启东, 左洪超, 杨扬, 等. 2012. 近地层能量闭合度对陆面过程模式影响 [J]. 地球物理学报, 55 (9): 2876–2888. Yang Qidong, Zuo Hongchao, Yang Yang, et al. 2012. On the effect of the near surface layer energy closure degree on land surface process simulations [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55 (9): 2876–2888.
- 杨启东, 王丽娟. 2014. SHAW 模式的改进及其在黄土高原半干旱区的 模拟研究 [J]. 干旱气象, 32 (4): 527–536. Yang Qidong, Wang Lijuan.
 2014. Improvement of the land surface model SHAW and simulation analysis in the Loess Plateau [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 32 (4): 527–536.
- 杨扬. 2014. 干旱区荒漠草原过渡带快速变化的陆面过程的观测与数值 研究 [D]. 兰州大学硕士学位论文. Yang Yang. 2014. Observation and simulation of transient land surface process over desert-steppe transitional zone in the arid areas [D]. M. S. thesis (in Chinese), Lanzhou University.
- Yang Z L. 2004. Modeling land surface processes in short-term weather and climate studies [M]// Observation, Theory and Modeling of Atmospheric Variability. World Scientific Series on Meteorology of East Asia. New Jersey: World Scientific, 288–313.
- Yang Z L, Cai X T, Zhang G, et al. 2011. The Community Noah Land Surface Model with multi-parameterization options (Noah-MP) [R]. Center for Integrated Earth System Science, Department of Geological Sciences, The University of Texas at Austin, Austin, TX, USA.
- 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.
- Zeng X B, Dickinson R E. 1998. Effect of surface sublayer on surface skin temperature and fluxes [J]. J. Climate, 11 (4): 537–550, doi:10.1175/1520-0442(1998)011<0537:EOSSOS>2.0.CO;2.