

王 胜,张 强,赵建华,等. 典型干旱区陆面模式模拟检验[J]. 干旱气象,2018,36(6):921-926. [WANG Sheng, ZHANG Qiang, ZHAO Jianhua, et al. Validation of Land Surface Model in Arid Region[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(6):921-926], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0921

典型干旱区陆面模式模拟检验

王 胜¹,张 强¹,赵建华¹,王 兴²,徐 燕³,白国强⁴

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室,甘肃 兰州 730020;
2. 西北区域气候中心,甘肃 兰州 730020;3. 甘肃省庆阳市气象局,甘肃 庆阳 745000;4. 甘肃省人工影响天气办公室,甘肃 兰州 730020)

摘 要:利用2000年9月至2001年8月“我国西北干旱区陆-气相互作用试验(NWC-ALIEX)”敦煌站的陆面过程观测资料,基于已有的参数化结果,模拟了敦煌主要陆面特征。结果表明:典型干旱区敦煌夏季感热通量与潜热通量差异显著,感热几乎是潜热的4倍,冬季二者都很小。模式对地表温度模拟较好,但高估了浅层土壤湿度峰值;对向上辐射模拟较好,但对净辐射的模拟存在较大偏差;同时高估了地表能量的峰值。模式结果表明参数化方案对干旱区陆面过程模式具有一定的改进作用。

关键词:陆面特征;典型干旱区;可利用能量;参数化方案

文章编号:1006-7639(2018)06-0921-06 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0921

中图分类号:P404

文献标志码:A

引 言

世界上38%的人口居住在干旱地区,且干旱区是对气候变化和人类活动最敏感的地区^[1],也是全球陆-气耦合强烈的地方^[2]。该地区独特的陆面过程会对气候产生重要影响^[3]。由于干旱区极易荒漠化,因此无论在气候变化研究中,还是生态、环境的研究对干旱区都极为重视。其中干旱区陆气相互作用作为气候变化研究中的重要组成部分,对气候变化有深刻影响^[4]。

我国西北干旱区地域广大,不仅是欧亚大陆的极旱区,而且是全球最重要的干旱气候区之一。这样一个广大区域不仅直接影响到中国干旱地区的气候变化,而且会影响东亚甚至全球的气候和环境变化^[5]。

1970年代,通过在非洲萨赫勒地区进行的试验,CHARNEY等^[6]提出了著名反照率正反馈理论,使人们对干旱区反照率的作用认识深刻。随后国际上进行了HAPEX/MOBILMY、FIFE等^[7-8]著名大型

试验用于研究陆面过程。我国于1980年代针对干旱区也开展了HEIFE试验^[9],随后又进行了“西北干旱区陆-气相互作用野外观测试验”^[10]。黑河流域开展的大型试验HiWATER中也有不少与陆面过程相关的观测^[11]。目前,对西北干旱区陆面过程的研究已有很多^[12-18],其中陆面过程模拟是重要的组成部分,如高艳红等^[19]通过改进Noah模式发展了一个耦合模式,发现陆面水循环过程对近地层大气影响很大;刘金婷等^[20]分别用3个不同模式对新疆地区的陆面过程进行了模拟,发现模式各有优缺点;王莉莉等^[21]用Noah模式中加入汇流模式研究了陆面水循环过程对近地面气象要素的影响,发现加入汇流模式后对模拟结果有一定改进;王超等^[22]对敦煌夏季典型晴天进行模拟,发现CoLM模式对干旱区感热模拟的峰值偏大,改进模式的反照率后,一定程度上改进了模拟结果;杨扬等^[23]用干旱荒漠草原过渡带的资料对CLM4进行了检验,但没有检验其中的参数化方案;马迪等^[24]通过改进BATS陆面过程模式的地表发射率发现可以提高模式模拟精度;

收稿日期:2018-03-27;改回日期:2018-08-16

基金项目:国家自然科学基金(41630426,41875022)、公益性行业(气象)科研重大专项(GYHY201506001)、国家重点基础研究发展计划项目(2013CB430206)、甘肃省气象局创新团队项目(GSQXCXTD-2017-02)及中国气象局兰州干旱气象研究所干旱基金项目(IAM201714)共同资助

作者简介:王胜(1973—),男,新疆奎屯人,研究员,主要从事陆气相互作用研究. E-mail:totrump@126.com。

叶丹等^[25]通过分析相关物理过程和模拟试验来研究陆面模式偏差的来源,发现同时采用2组新的参数化方案组合可以进一步减小模拟的地表感热和潜热通量的均方根误差。上述工作从不同的角度对模式进行了检验,但目前对于干旱区参数化方案的检验依然不足。本文将已有的参数化方案加入到干旱区陆面过程模式中,从而检验已有的参数化方案能否提高陆面过程模式的模拟结果。

1 数据及试验设计

所用资料来自“西北干旱区陆-气相互作用野外观测试验”敦煌站。该站位于敦煌绿洲西侧的双墩子戈壁(40°10'N,94°31'E),海拔1150 m,距敦煌绿洲边缘的最近距离约7 km。敦煌年平均降水量约39 mm。试验场地为平坦的沙石戈壁滩,主要观测项目有:铁塔的风、温、湿梯度,分别在1、2、8、18 m的高度上;地表辐射包括总辐射、反射辐射、天空长波辐射及地面长波辐射的观测(1.5 m);地表和6层土壤温度观测,分别在土壤下5、10、20、40、80及180 cm处;2层土壤热通量分别在2.5及7.5 cm处;4层土壤湿度传感器分别安装在5、10、20及80 cm深处的土壤中;土壤气湿(20 cm)的观测。张强等^[26]对观测仪器进行了详细介绍,已有研究^[27]表明该站观测数据质量可靠。

所用陆面过程模式为一个土壤-植被-大气模式^[28],为BATS模式的一个简化版本,该模式相对简单,有利于模式验证。利用已有的研究结果,对反照率、相似性函数和粗糙度长度做了参数化改进,改进后各量计算分别如下:

反照率:

$$\alpha = (1 - 0.0074 \times w_s) \times (0.20 + 0.090 \times e^{-0.01 \times h_\theta}) \quad (1)$$

相似性函数:

$$\varphi_m = \begin{cases} 0.83(1 - 14.6z/L)^{-\frac{1}{4}} & z/L \leq 0 \\ 0.83(1 + 4.2z/L) & z/L > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\varphi_h = \begin{cases} 0.73(1 - 10.0z/L)^{-\frac{1}{2}} & z/L \leq 0 \\ 0.73(1 + 4.8z/L) & z/L > 0 \end{cases} \quad (3)$$

粗糙度长度:

$$z_0 = 0.0019, \quad z_{T0} = z_{q0} = 0.00043 \quad (4)$$

式中: α 为反照率; w_s ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)为土壤湿度; h_θ 为太阳高度角; z (m)是高度; L (m)是 Monin - Obukhov 长度; φ_m 和 φ_h 分别是平均风速和温度无因次函数。 z_0 (m)是动量粗糙度; z_{T0} (m)是感热粗糙度; z_{q0} (m)是水汽粗糙度。经证明,该模式适合于干旱区的陆

面过程模拟^[29-30]。

利用敦煌站2000年9月1日至2001年8月31日的观测资料驱动模式,其中初始值包括2层风速、气温、大气相对湿度、大气压,2层土壤湿度,用实际观测资料做强迫场。模式运行时间步长为1 min,每3 h输出一次结果。进而验证参数化方案对模式结果的影响。

2 结果分析

2.1 月变化

图1是2000年9月至2001年8月降水量的月变化。可以看出,2000年9月1日至2001年8月31日总降水量为24 mm,其中2001年8月降水量达13.3 mm,约占全年降水的55%。而2000年9月及2001年1、2、7月没有降水发生,充分体现了干旱区降水量少,降水分布极不均匀的特点。

地表温度是最重要的陆面特征量之一。图2是2000年9月至2001年8月地表温度观测值与模拟

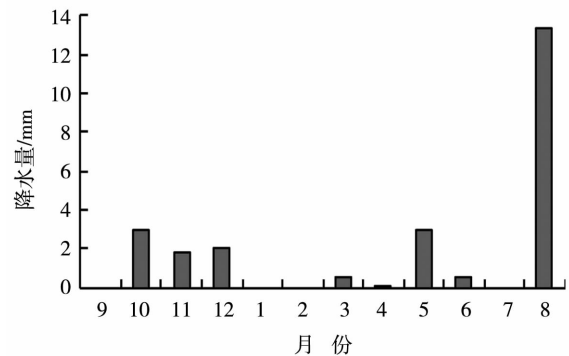


图1 敦煌站2000年9月至2001年8月降水量月变化
Fig. 1 The monthly variation of precipitation at Dunhuang station from September 2000 to August 2001

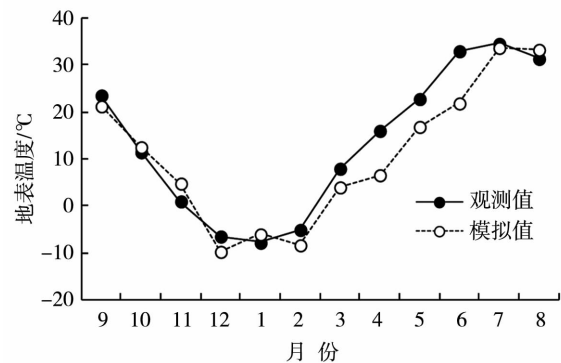


图2 敦煌站2000年9月至2001年8月地表温度模拟值与观测值的月变化
Fig. 2 The monthly variation of simulated and observed surface temperature at Dunhuang station from September 2000 to August 2001

值的月变化。可以看出,春、夏季的模拟值普遍比观测值低,最大偏差出现在6月,秋冬季二者基本相符。敦煌是极端干旱区,夏季地表温度变化剧烈,日最高地表温度接近70℃,模式对于这种剧烈变化模拟得不好是造成偏差的主要原因。而冬季温度变幅相对较小,同时,虽然从土壤温度的平均值可以推断肯定有冻土存在。但对于敦煌这样的极端干旱区,冻土过程的影响有限,因此冬季也模拟得较好。

图3为敦煌站2000年9月至2001年8月5、

10 cm土壤湿度模拟值与观测值的月变化。由于无法观测地表处的土壤湿度,因此用5 cm土壤湿度来代表地表薄层的土壤湿度。可以看出,5 cm土壤湿度的模拟值与观测值变化趋势基本一致。模式在模拟土壤湿度变化剧烈时(春秋季),效果较差,在土壤湿度的变化比较平缓时(夏冬季),模拟的效果较好;而10 cm土壤湿度情况也类似。虽然在降水时土壤湿度的峰值很大,但蒸发很快,土壤湿度的平均值仍然较小。

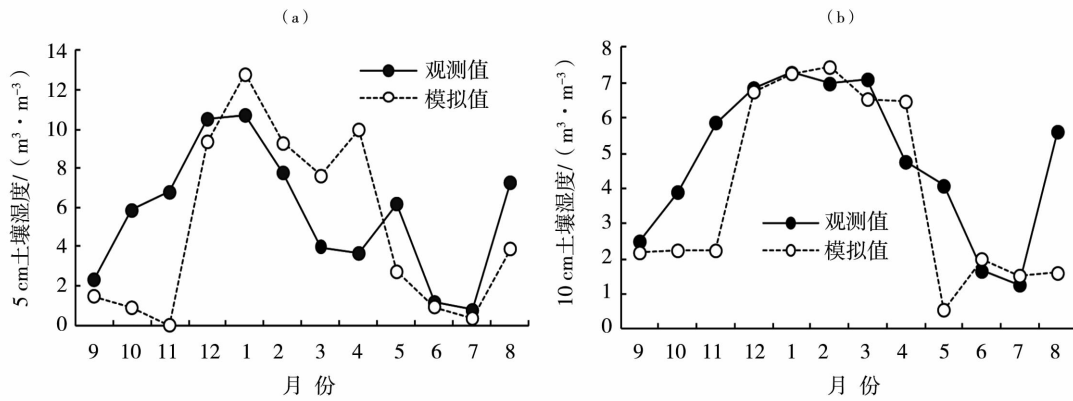


图3 敦煌站2000年9月至2001年8月5 cm(a)、10 cm(b)土壤湿度模拟值与观测值的月变化

Fig. 3 The monthly variation of simulated and observed soil moisture at 5 cm (a) and 10 cm (b) at Dunhuang station from September 2000 to August 2001

图4为敦煌站2000年9月至2001年8月向上长波辐射与净辐射模拟值与观测值的月变化。可以看出,向上长波辐射的模拟值与观测值基本符合,一年中大部分时间都相差很小,最大偏差出现在7月,模拟值与观测值最大绝对误差为48.2 W·m⁻²,最大相对误差为13.8%。净辐射是反映地表辐射收支的量,夏季净辐射模拟值比观测值偏高,冬季则相反。净辐射通量在6月达

到最高,平均为85 W·m⁻²,12月最低,平均为12 W·m⁻²。出现这样结果的原因是各辐射分量的模拟都存在一定的偏差,所有偏差累加到一起造成了净辐射的较大偏差,其中向下长波辐射存在较大偏差是最主要原因。说明对于陆面过程模式如果只进行短期模拟,并不一定能看出模式的模拟偏差,而进行全年的模拟才能较全面反映模式的偏差。

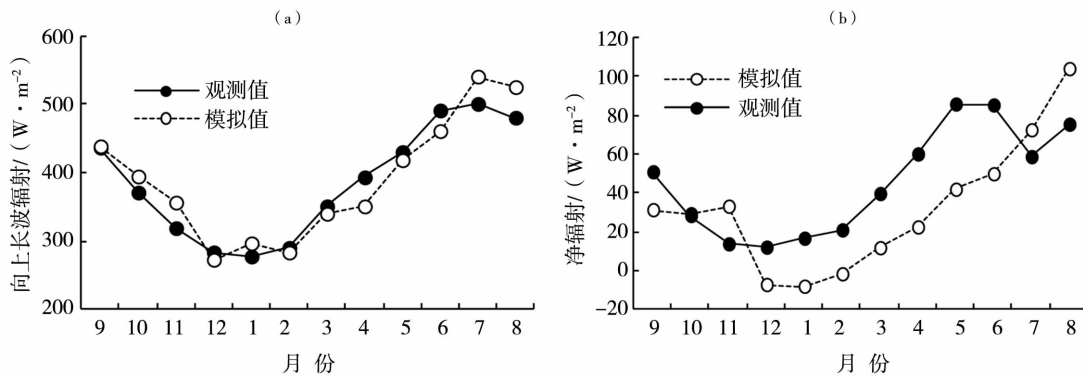


图4 敦煌站2000年9月至2001年8月向上长波辐射(a)与净辐射(b)模拟值与观测值的月变化

Fig. 4 The monthly variation of simulated and observed upward long wave radiation (a) and net radiation (b) at Dunhuang station from September 2000 to August 2001

图5为敦煌站2000年9月至2001年8月地表感热和潜热通量模拟值的月变化。可以看出,能量平衡以感热为主,潜热比感热小很多,这与夏季干旱区一般规律相符。冬季感热通量依然比潜热通量大得多,即在干旱区冬季,地表能量依然以感热为主,潜热很低,几乎可以忽略。这主要是因为冬季干燥,气温低,仅有的一点土壤水分被冻结,以致蒸发极其微弱,进而导致潜热通量极小。这与观测结果^[31]一致,说明模式对能量的模拟总体合理。

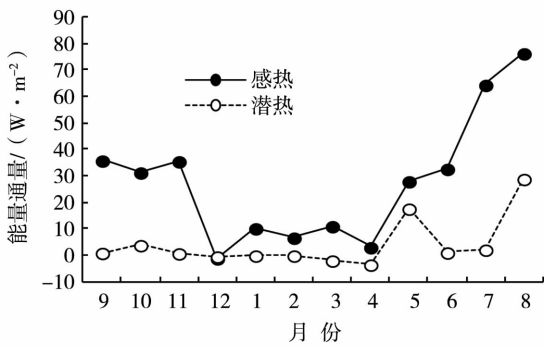


图5 敦煌站2000年9月至2001年8月感热及潜热通量模拟值的月变化
Fig. 5 The monthly variation of simulated sensible heat flux and latent heat flux at Dunhuang station from September 2000 to August 2001

由于在所用资料时间段内,无感热和潜热的直接观测,因此用可利用能量和观测值比较(图6)。由图6可以看出,冬季可利用能量的模拟值比观测值偏小,这是由于潜热模拟偏小造成的,但从全年来看,模拟值与观测值的总体变化趋势相符,但在冬、夏季峰值依然存在一定的偏差。

波文比是表征陆地生态系统能量分配的主要指标。图7是敦煌站2000年9月至2001年8月波文比的月变化。可以看出,敦煌站波文比在冬季达到最大,最大可达126。这是因为冬季潜热很小,几乎为零,使得波文比很大,不确定性较强^[32]。夏季

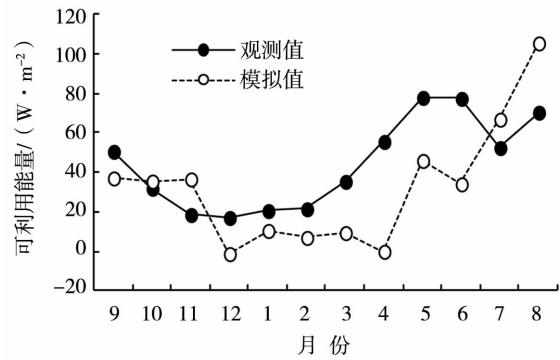


图6 敦煌站2000年9月至2001年8月可利用能量模拟值与观测值的月变化
Fig. 6 The monthly variation of simulated and observed available energy at Dunhuang station from September 2000 to August 2001

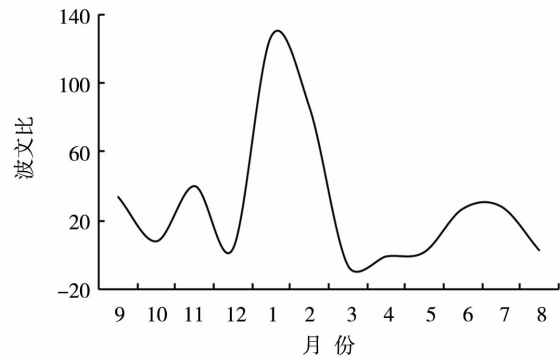


图7 敦煌站2000年9月至2001年8月波文比的月变化
Fig. 7 The monthly variation of Bowen ratio at Dunhuang station from September 2000 to August 2001

7月出现的另外一个峰值,则真实地反映地表能量分配,7月气温较高,同时降水又少(仅有3次无量降水),感热很大,潜热很小,导致波文比很大。全年而言,除3、4月,波文比值都较大,恰好反映了干旱区气候干燥的特点。

2.2 季节变化

表1列出敦煌站2000年9月至2001年8月各

表1 敦煌站2000年9月至2001年8月陆面主要特征量各季节的模拟值与观测值比较

Tab. 1 The comparison of land surface characteristic quantities in each season between observation and simulation at Dunhuang station from September 2000 to August 2001

特征量	秋季		冬季		春季		夏季	
	模拟值	观测值	模拟值	观测值	模拟值	观测值	模拟值	观测值
地表温度/℃	12.88	12.03	-8.05	-6.44	9.16	15.62	29.65	33.01
向上长波辐射/(W·m ⁻²)	396.23	375.23	283.90	283.37	369.44	391.23	508.80	490.57
净辐射/(W·m ⁻²)	31.19	30.93	-5.69	16.50	25.31	61.77	75.38	73.03
可利用能量/(W·m ⁻²)	36.32	33.60	5.35	19.63	18.37	56.2	68.73	66.67

季节净辐射、地表温度、可利用能量和向上长波辐射模拟值与观测值。可以看出各特征量的模拟值总体在冬、春季偏小,夏、秋季偏大。而四季之中,夏、秋两季偏差较小,冬、春两季误差较大,其中又以地表能量的模拟最差。表明模式仍有待进一步改进。

3 结 论

(1)总体上,模式对各主要陆面特征量表现出较好的模拟能力。其中辐射、地表温度模拟效果较好,而能量、湿度模拟结果有待进一步提高。

(2)模式对可利用能量的总体变化趋势模拟较好,且模拟峰值偏大,即模式高估了夏季和冬季的能量,而对春、秋季模拟相对较好。模式对湿度的模拟与可利用能量的模拟有相似之处,即峰值模拟偏大,对蒸发的模拟明显较实际更快,这可能是模式忽略了某些陆面水分过程造成的。

(3)在改进参数化方案后,对于干旱区陆面模式的结果有一定的改善,所用的参数化方案尽管不够完善但在西北干旱区仍有一定的应用价值。

我国西北干旱区面积广大,无论对天气还是对气候都有重要的影响,虽然目前陆面过程模式发展了多年,但目前依然没有完全能模拟好各主要陆面特征量的陆面过程模式,这其中陆面过程参数化不好依然是一个重要原因。发展大尺度的陆面参数化方案是提高模式模拟结果的关键之一。

参考文献:

- [1] HUANG J, YU H, GUAN X, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2015, DOI:10.1038/nclimate2837
- [2] KOSTER R D, DIRMEYER P A, GUO Z C, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation[J]. *Science*, 2004,305(5687):1138-1140.
- [3] 张强,王胜,张杰,等. 干旱区陆面过程和大气边界层研究进展[J]. *地球科学进展*,2009,24(11):1185-1194.
- [4] 张强,尹宪志,王胜,等. 走进干旱世界[M]. 北京:气象出版社,2017:6-7.
- [5] 黄荣辉. 中国干旱区陆-气相互作用及其对东亚气候变化的影响[M]. 北京:气象出版社,2011:28.
- [6] CHARNEY J, W QUIRK, S CHEW, et al. Dynamics of deserts and drought in the Sahel[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1975,101(428):193-202.
- [7] HOLTSLAG A A M, EK M. Simulation of surface fluxes and boundary layer development over the pine forest in HAPEX - MOBILHY[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1996,35:202-213.
- [8] SELLERS P J, HALL F G, ASRAR G, et al. The First ISLSCP Field Experiment (FIFE)[J]. *Bulletin American Meteorological Society*, 1998,69:22-27.
- [9] 胡隐樵,高由禧. 黑河实验(HEIFE)一对于干旱地区陆面过程的一些新认识[J]. *气象学报*,1994,52(3):285-296.
- [10] 黄荣辉,周德刚,陈文,等. 关于中国西北干旱区陆-气相互作用及其对气候影响研究的最近进展[J]. *大气科学*,2013,37(2):189-210.
- [11] 李新,刘绍民,马明国,等. 黑河流域生态-水文过程综合遥感观测联合试验总体设计[J]. *地球科学进展*,2012,27(5):481-498.
- [12] 管晓丹,程善俊,郭瑞霞,等. 干旱半干旱区土壤湿度数值模拟研究进展[J]. *干旱气象*,2014,32(1):135-141.
- [13] 张强,黄荣辉,王胜. 浅论西北干旱区陆面过程和大气边界层对区域天气气候的特殊作用[J]. *干旱气象*,2011,29(2):133-136.
- [14] 杨彦龙,左洪超,郭阳,等. 空气热储存和垂直平流对干旱均匀裸土地表能量平衡的影响[J]. *干旱气象*,2014,32(4):537-546.
- [15] 张强,王胜. 西北干旱区荒漠水分循环特征及其模拟[J]. *干旱气象*,2007,25(4):1-4.
- [16] 宋海清,李云鹏,师春香,等. 内蒙古地区下垫面变化对土壤湿度数值模拟的影响[J]. *大气科学*,2016,40(6):1165-1181.
- [17] 张强,曾剑,张立阳. 夏季风盛行期中国北方典型区域陆面水、热过程特征研究[J]. *中国科学:D辑 地球科学*,2012,42(9):1385-1393.
- [18] 陈乾,李宝梓,陈添宇. 黄土高原半干旱雨养农田空气动力和热力参数分析[J]. *干旱气象*,2014,32(4):547-552.
- [19] 高艳红,程国栋,崔文瑞,等. 陆面水文过程与大气模式的耦合及其在黑河流域的应用[J]. *地球科学进展*,2006,21(12):1283-1294.
- [20] 刘金婷,马柱国,罗德海. 三个陆面模式对新疆地区陆面过程模拟的对比研究[J]. *高原气象*,2009,28(6):1242-1250.
- [21] 王莉莉,陈德辉. GRAPES NOAH - LSM 陆面模式水文过程的改进及试验研究[J]. *大气科学*,2013,37(6):1179-1186.
- [22] 王超,韦志刚,李振朝,等. 西北干旱区戈壁下垫面陆面过程特征的模拟研究[J]. *太阳能学报*,2016,37(9):2422-2429.
- [23] 杨扬,左洪超,杨启东,等. CLM4.0 模式对于干旱区荒漠草原过渡带快速变化陆面过程的数值模拟研究[J]. *高原气象*,2015,34(4):923-934.
- [24] 马迪,吕世华,鲍艳,等. 沙漠下垫面地面温度及能量收支的 BATS 模式参数化改进[J]. *中国沙漠*,2017,37(4):749-754.
- [25] 叶丹,张述文,王飞洋,等. 基于陆面模式 Noah - MP 的不同参数化方案在半干旱区的适用性[J]. *大气科学*,2017,41(1):189-201.
- [26] 张强,卫国安,黄荣辉. 西北干旱区荒漠戈壁动量和感热总体输送系数[J]. *中国科学:D辑 地球科学*,2001,31(9):783-792.
- [27] 郑志远,韦志刚,李振朝,等. 中国西北三类典型裸土下垫面地表宽波段发射率变化特征研究[J]. *大气科学*,2016,40(6):1227-1241.
- [28] 赵鸣,江静,苏炳凯,等. 一个引入近地层的土壤-植被-大气相互作用模式[J]. *大气科学*,1995,19(4):405-414.
- [29] 张强,王胜. 西北地区戈壁地表物理过程参数化的研究[J]. *地球物理学报*,2003,46(5):616-623.
- [30] ZHANG Q, HUANG R H, TIAN H. A parameterization scheme of

surface turbulent momentum and sensible heat over the Gobi underlying surface [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20 (1): 111 - 118.

[31] 刘宏谊, 杨兴国, 张强, 等. 敦煌戈壁冬夏季地表辐射与能量平

衡特征对比研究[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(3): 558 - 565.

[32] 王佩, 马琪顺, 王家琪, 等. 温带草地蒸散发及波文比观测与比较: 涡动相关及波文比系统[J]. *草地学报*, 2017, 25(3): 453 - 459.

Validation of Land Surface Model in Arid Region

WANG Sheng¹, ZHANG Qiang¹, ZHAO Jianhua¹,

WANG Xing², XU Yan³, BAI Guoqiang⁴

(1. *Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou 730020, China*; 2. *Northwest Regional Climate Center, Lanzhou 730020, China*; 3. *Qingyang Meteorological Bureau of Gansu Province, Qingyang 745000, Gansu, China*; 4. *Gansu Weather Modification Office, Lanzhou 730020, China*)

Abstract: Improving parameterization scheme in land surface process was one of the important contents of making better land surface model. In this paper, an soil - vegetation - atmosphere model was improved by parameterization scheme and was validated by using the observation data of Dunhuang station of NWC - ALIEX in Northwest China from September 2000 to August 2001. The results show that sensible heat flux was larger than latent heat flux in Dunhuang, it was almost four times of the latent heat flux in summer, and both were very small in winter. The trend of observed surface temperature and simulated values was consistent, but peak values of shallow soil moisture were overestimated. About surface radiation, the simulated upward long wave radiation was better than that of the net radiation. Meanwhile, it overestimated the peak value of the surface energy. The results show that the parameterization scheme can improve the results in land surface process model over typical arid area.

Key words: land surface characteristics; typical arid region; available energy; parameterization