

MODIS 植被资料在模拟华东地区一次降水中的应用

左晨¹, 黄维¹, 侯玉龙² (1. 祥云机场气象台, 云南祥云 672100; 2. 博乐机场气象台, 新疆博乐 833400)

摘要 采用中尺度模式 WRF 3.7 版本及 NCEP FNL 资料作驱动场, 利用最新的高分辨率 MODIS 资料(MODIS03)提高 WRF 模式对区域降水的模拟能力, 就 2003 年 6 月下旬我国华东地区的一次强降水事件进行 48 h 短期天气模拟。结果表明, 利用最新 MODIS03 资料的土地利用可以减少降水误差, 植被覆盖率会增加降水量, 但同时替换土地利用率和植被覆盖率的 LG₀₃ 试验的模拟结果最接近实测资料。不同的陆面信息可以直接影响地表蒸发量及水汽通量散度的模拟结果。通过分层的水汽通量散度可以看出, 不同的陆面信息模拟的水汽辐合主要在地表气压到 850 hPa 产生差异, 并最终影响降水模拟结果。

关键词 WRF; MODIS; 降水; 模拟; 华东地区

中图分类号 S163 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)27-0185-05

Application of MODIS Vegetation Data in Simulating the Precipitation in East China

ZUO Chen¹, HUANG Wei¹, HOU Yu-long² (1. Aerodrome Synoptic Station of Xiangyun County, Xiangyun, Yunnan 672100; 2. Aerodrome Synoptic Station of Bole City, Bole, Xinjiang 833400)

Abstract Using the Weather Research and Forecasting(WRF) Version 3.7 and National Centers for Environmental Prediction (NCEP) FNL data as the driving field, the simulation of a heavy rainfall event occurring in the East China during late June, 2003 was conducted to improve the WRF model forecast skill for precipitation by latest high-resolution MODIS data (MODIS03) on simulated precipitations. The simulation was performed in the short-range mode for 48 h intergrations. The results showed that the land use rate of the latest MODIS03 data could reduce the error of precipitation, and the vegetation coverage would increase the precipitation, but the simulation results of LG₀₃ test which replaced the land use rate and vegetation coverage was the closest to the observed precipitation. Different land surface information could directly affect the simulation results of surface evaporation and water vapor flux divergence. It can be seen from layered water vapor flux divergence, the water vapor convergence with different land surface information mainly produced differences from surface air pressure to 850 hPa, and finally affected the simulated precipitation results.

Key words WRF; MODIS; Precipitation; Simulation; East China

WRF (Weather Research and Forecasting) 模式是目前全球应用广泛的中小尺度数值模式之一, 该模式耦合陆面方案中的 NOAH 陆面方案^[1-2]的陆面信息(如土地利用类型、植被覆盖率)对陆面和大气边界层之间的能量与水汽交换有十分重要的作用^[3]。因此, 陆面资料作为数值模式的重要输入数据可以直接影响对流启动和降水^[4-5]。陆面资料不断更新, 土地利用类型、植被覆盖率都发生了很大的转变, 然而在 WRF 模式中, 陆面资料的更新跟不上土地覆被改变的速度, 往往局地区域与当地实际覆被不符, 造成了对某些相关变量有较大的模拟偏差^[6-8]。而土地利用类型的变化可以使区域低层大气的能量、水汽、局地环流等的格局改变, 进而造成各气象要素的分布结构发生较大差异。植被覆盖率(GVF)是衡量植被生长状况的重要指数之一, 在陆面过程中, GVF 通过影响地表蒸发过程和地表反照率、发射率和粗糙度等参数, 影响土壤温度、湿度、地表能量收支和水文过程。Gao 等^[9]通过改进黑河流域地形、土地利用、土壤类型、土壤参数和植被覆盖度资料模拟, 研究了陆面资料对近地面气象场模拟精度的影响。张井勇等^[10]研究了归一化植被指数(NDVI)与降水和温度的关系, 认为降水较之温度对 NDVI 的响应更为显著, 降水量变化与 NDVI 变化趋势相同, 降水变化比 NDVI 变化滞后 1~2 个月。笔者采用直接代替的同化方法, 利用最新 MODIS 土地利用和植被覆盖数据代替 WRF 模

式陆面过程中的数值, 设计了改变初始时刻模式土地利用和植被覆盖率的初值试验, 对比分析土地利用和植被覆盖率数据改进前后地表累积降水, 以及地表能量平衡和局地环流差异, 以期对华东地区近地面气象要素的模拟结果有进一步改进, 加深对 MODIS 产品的应用。

1 资料与方法

1.1 MODIS 与 USGS 植被资料 目前 WRF 模式中包含 2 种土地利用数据, 一种是由美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)制作的 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)30 s 分辨率的土地利用数据, 该数据的获取时间为 1992 年 4 月—1993 年 3 月, 共分为 24 类; 另一种是在 WRF 3.1 版本后添加的由波士顿大学制作的 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)30 s 分辨率的土地利用数据, 资料获取时间为 2001 年 1—12 月, 根据国际地圈生物圈计划(International Geosphere - Biosphere Programme, IGBP)分为 20 类。

WRF 模式中默认的植被覆盖是利用像元二分模型在 AVHRR 1985—1990 年的标准化植被指数(NDVI)的基础上建立的 0.144° 全球逐月植被覆盖资料。利用最新等级 3 MODIS 全球月平均 0.05° 标准化植被指数(MOD13C2 资料)计算植被覆盖率, 公式如下:

$$GVF_i = \frac{NDVI_i - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s}$$

其中, i 为一个像元, $NDVI_s$ 、 $NDVI_v$ 分别为完全裸土和植被覆盖像元的标准化植被指数。目前, 有关陆面资料改进对数值模式模拟结果影响的研究主要集中于个别陆面资料的改进, 而针对多种陆面信息改进的研究较少。在此将 MODIS 资料

基金项目 国家自然科学基金项目(41275012)。

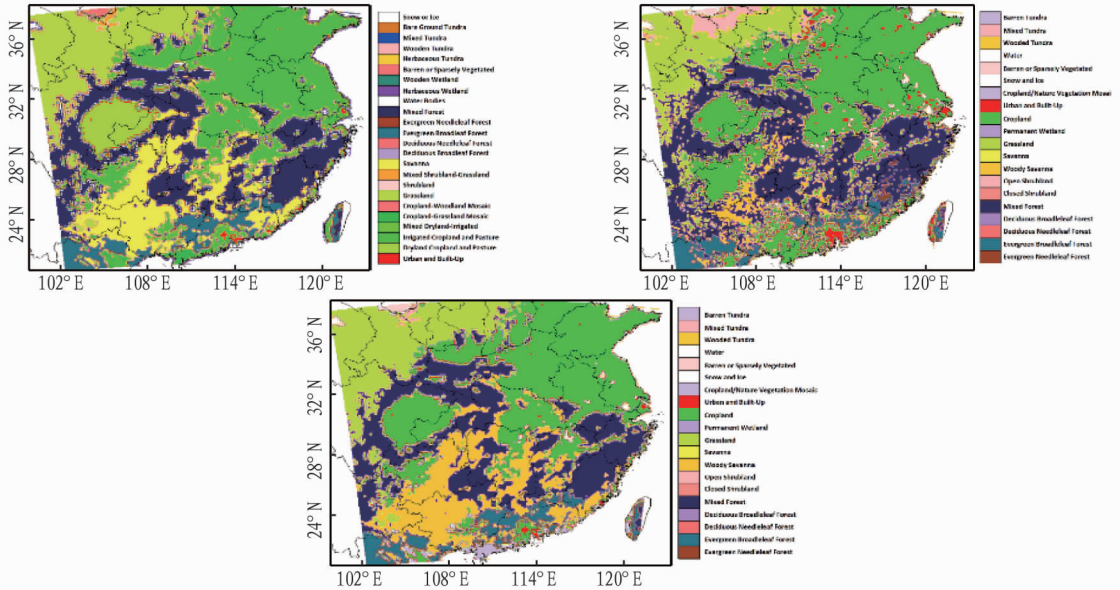
作者简介 左晨(1992—), 男, 新疆博乐人, 助理工程师, 硕士, 从事陆面过程研究。

收稿日期 2017-06-21

内插至 0.01° 标准地理投影上,使其可以被 WPS(WRF Pre-processing System)使用,最后转换为 WRF 网格。

图 1 显示出 USGS 资料与 MODIS 地表覆盖植被类型在华东地区的差异。在 Domain2 区域内,植被差异主要分为两类,模式东部(103°~109°E,27°~33°N)美国地质调查局的草地被 MODIS 资料中的耕地替换;主要差异位于模式南部,在 USGS 资料里有大量热带草原,但在 MODIS 资料中并未出现,而是被混合森林和有林草地代替。

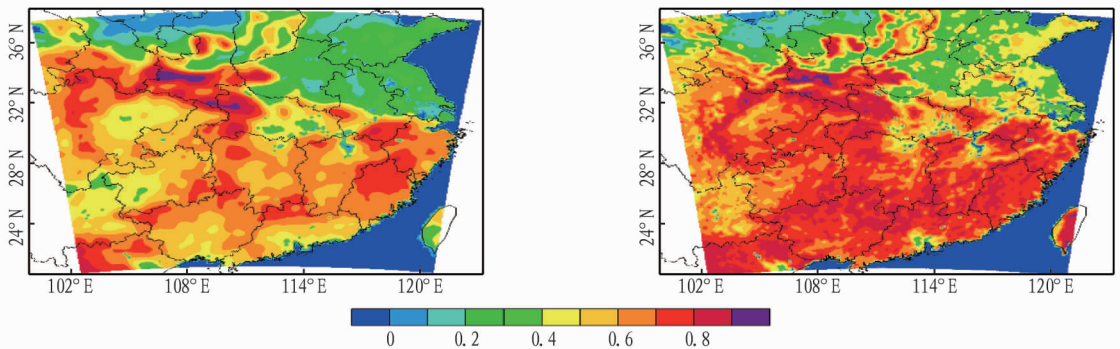
因此该研究使用 MODIS 资料中的植被覆盖率代替模式默认的植被覆盖率,二者差异如图 2 所示。其中植被覆盖率被描述为给定像素中的植被所占部分的面积。可见,2 种资料的植被覆盖率差异明显,在模式区域南部,MODIS 资料与 USGS 资料大致存在 0.1~0.2 的差异,并且 MODIS 资料中的植被覆盖率比 USGS 呈现出更加精准的分佈特征。这主要是由于 MODIS 资料是高分辨率的近实时资料,而 USGS 是基于气候学信息求得。



注:a. 模式默认的土地利用率;b. 模式默认的 MODIS 土地利用; c. 最新 2003 年 MODIS 土地利用
Note: a. land use rate of default mode; b. MODIS land use rate of default mode; c. latest 2003 MODIS land use rate

图 1 模式模拟区域 Domain2 土地利用分类

Fig.1 Land use classification of model simulation area Domain2



注:a. 模式默认的植被覆盖率;b. 最新 2003 年 6 月 MODIS 植被覆盖率
Note: a. vegetation coverage of default mode; b. latest June 2003 MODIS vegetation coverage

图 2 模式模拟区域 Domain2 植被覆盖率

Fig.2 Vegetation coverage of model simulation area Domain2

1.2 试验设计 由于 2003 年 6 月 20—30 日华东地区降水强度大且集中,该旬的连续性降水也具有一定的气候学意义,因此取这 10 d 作为研究时段(模式区域如图 3 所示)。模式初值场及边界条件采用 6 h NECP 1°×1°再分析资料,逐 48 h 积分的初值场采用 2003 年 6 月 19 日 08:00—28 日 08:00 数据(各个初值场相隔 24 h),即做 10×48 h 的积分试验,每个积分试验取后 24 h 统计量进行分析(消除 spin-up

time 问题)。

该研究共设计了 5 组试验(表 1),在第 1 组试验中,控制试验(简称 CTL)的土地利用率采用模式默认的 MODIS 资料,LD_{CS}和 LD₀₃试验的土地利用率分别采用模式默认的 USGS 资料以及 2003 年 MODIS 实时资料,前 3 组的植被覆盖率均设置为模拟默认资料。GVF₀₃和 LG₀₃的植被覆盖率用 2003 年 6 月 MODIS 实时资料替换,但土地利用率分别为模

式默认的 MODIS 资料以及 2003 年 MODIS 实时资料。由于除了两组初始场资料外的物理参数都相同,因此不同 24 h 积分结果之间的差异即为由不同内插至 WRF 网格的土地利用率和植被覆盖率所引起。

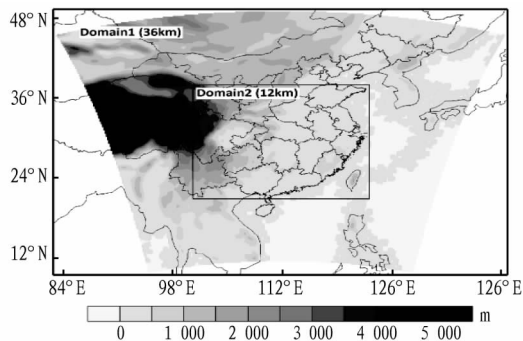


图 3 模式区域分布及海拔分布

Fig. 3 Pattern area distribution and altitude distribution

表 1 基于不同资料的土地利用率和植被覆盖率的 5 组试验设计

Table 1 Five sets of experimental design for land use and vegetation coverage based on different data

| 试验 Test | 模式 Mode | 陆面方案 Land surface program | 土地利用 率 Land use rate | 植被覆盖 率 Vegetation coverage |
|-------------------|------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| CTL | WRF | Noah | MODIS - based | Default |
| LD _{CS} | WRF | Noah | USGS - based | Default |
| LD ₀₃ | WRF | Noah | MODIS - 03 | Default |
| GVF ₀₃ | WRF | Noah | MODIS - based | MODIS - 03 |
| LG ₀₃ | WRF | Noah | MODIS - 03 | MODIS - 03 |

2 模拟结果

2.1 空间分布 从每一个 24 h 积分的结果来看,模拟降水量分布与实况均存在较好的一致性,同时也显示出了 5 种不同数据资料对降水过程均存在各自的特点,降水强度、降水中心位置也存在差异。

为总体考察不同数据资料对模拟结果的影响,从 CTL、LD_{CS}、LD₀₃、GVF₀₃、LG₀₃ 5 种试验模拟的连续 10 d 24 h 累计降水的 10 个积分平均分布情况和相应的实况(图 4)可以看出,CTL 试验结果与实况相比,模拟的从山东向西南方向延伸的 10 mm 等雨量线与观测资料基本一致,覆盖江淮流域的强降水带和位于广西南部的强降水带的模拟结果与实况也较为相符;但模拟区域左下角,主体位于云贵高原的强降水带与实况相比降水量偏大。其余 4 个试验模拟的降水分布类似于 CTL 试验。可见,5 组试验在降水的区域分布上差异很小,通过进一步的比较可以看出不同数据的模拟结果也存在一定差异,GVF₀₃ 试验大于 10 mm 的降水面积大于其他试验,当同时使用最新 MODIS 资料的 LD₀₃ 试验,发现模拟区域的降水强度有了较大的减少,并且与观测值的相对误差也最小。

2.2 误差分析 从图 5a 可以看出,5 组试验对于模拟区域降水量存在约 4.13 mm 的模式偏差,从总的旬平均模式偏差来看,LG₀₃ 的最优(3.49 mm),LD₀₃、CTL、LD_{CS} 次之,GVF₀₃ 最差(4.53 mm)。其中来自 3 种不同精度的土地利用资料

模拟结果也呈现较大差异。CTL 试验为 2001 年 MODIS 30 s 分辨率的土地利用数据,模式误差为 4.29 mm,LD_{CS} 试验使用的是 1992 年 USGS 制作的 AVHRR 30 s 分辨率的土地利用数据,模拟结果的模式偏差最大,与 LD_{CS} 试验相比,相对误差增加了 0.06 mm,LD₀₃ 试验使用的由波士顿大学制作的最新的 MODIS 30 s 分辨率的土地利用数据,当使用精度更高的输入数据,模拟结果较 CTL 试验相比模式偏差减小了 7.5%。但在植被覆盖率中呈现相反的情况,使用更加精细的 GVF₀₃ 试验的模式偏差比 CTL 试验相对误差提高了 5.3%。值得注意的是,在 LG₀₃ 试验中,同时使用最新 MODIS 中的土地利用数据与植被覆盖率以后,模式偏差为 5 组试验最小,较 CTL 试验减小了 22.9%,较 LD₀₃ 试验减小了 14.3%。这说明同时改变两组相关的输入数据可以有效减小模式误差。均方根误差 5 种误差结果(图 5b)与模式误差较为相似,LG₀₃ 仍为最优,但 LD_{CS} 误差最大。这反映了利用越精细的土地利用率和植被覆盖率能够提高模拟降水的的能力,且模拟的平均降水对不同精度的土地利用与植被覆盖率呈现不同的敏感性。

3 机理讨论

3.1 地表热通量 不同陆面输入资料可以直接影响地表热通量的模拟结果。图 6 为模拟的 20—29 日每天 14:00 区域平均感热通量和潜热通量,使用该时次(一般对应一天的最高温度)可以较为明显地反映不同植被输入数据对感热通量和潜热通量的变化的影响。无论是对于感热通量还是潜热通量,5 组试验的模拟结果均存在一定的差异。总体上,潜热通量是按 GVF₀₃、LG₀₃、LD_{CS}、CTL、LD₀₃ 依次递减,感热通量按 GVF₀₃、LD_{CS}、LG₀₃、CTL、LD₀₃ 依次增加。其中 CTL、LD_{CS}、LD₀₃ 试验模拟的平均潜热通量差异很小,对于 14:00 区域平均潜热通量,LD_{CS} 为 301.12 W/m²,LD₀₃ 为 291.26 W/m²,表明使用更新的 MODIS 土地利用数据会略微降低潜热通量(大约 10 W/m²),这一差异主要是由于 MODIS 资料中的混合森林和有林草地代替了大量的热带草原,因此引起蒸发量的改变,最终影响降水(LD₀₃ 试验比 LD_{CS} 试验降水量减少了 0.12 mm)。不同的植被覆盖率模拟的潜热通量也存在较大差异,高的植被覆盖率提高了潜热通量,GVF₀₃ 试验的植被覆盖率比 CTL 试验平均高 20%,GVF₀₃ 为 321.25 W/m²(最大),CTL 为 301.41 W/m²,因此在 Domain2 区域内蒸发量也最大,导致最终的降水量也是 GVF₀₃ 试验最大(11.71 mm)。

3.2 水汽通量散度 由于降水水质粒来自水汽凝结或凝华而形成云粒子。从陆气相互作用的机理上讲,整层水汽辐合量(IVFC)是影响降水的重要因素。为了更好地分析分层的水汽辐合量,定义在气压 p_1 到 p_2 ($p_1 > p_2$) 之间的水汽辐合(VFC)的公式为:

$$VFC = \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \nabla \cdot (QV) dp$$

式中, p 为气压,对于 IVFC, $p_1 = p_{sc}$, $p_2 = p_t$, p_{sc} 和 p_t 分别代表地面气压和大气层顶气压, Q 为水汽混合比(kg/kg); g 为重力(m/s²); V 为风矢量(m/s)。

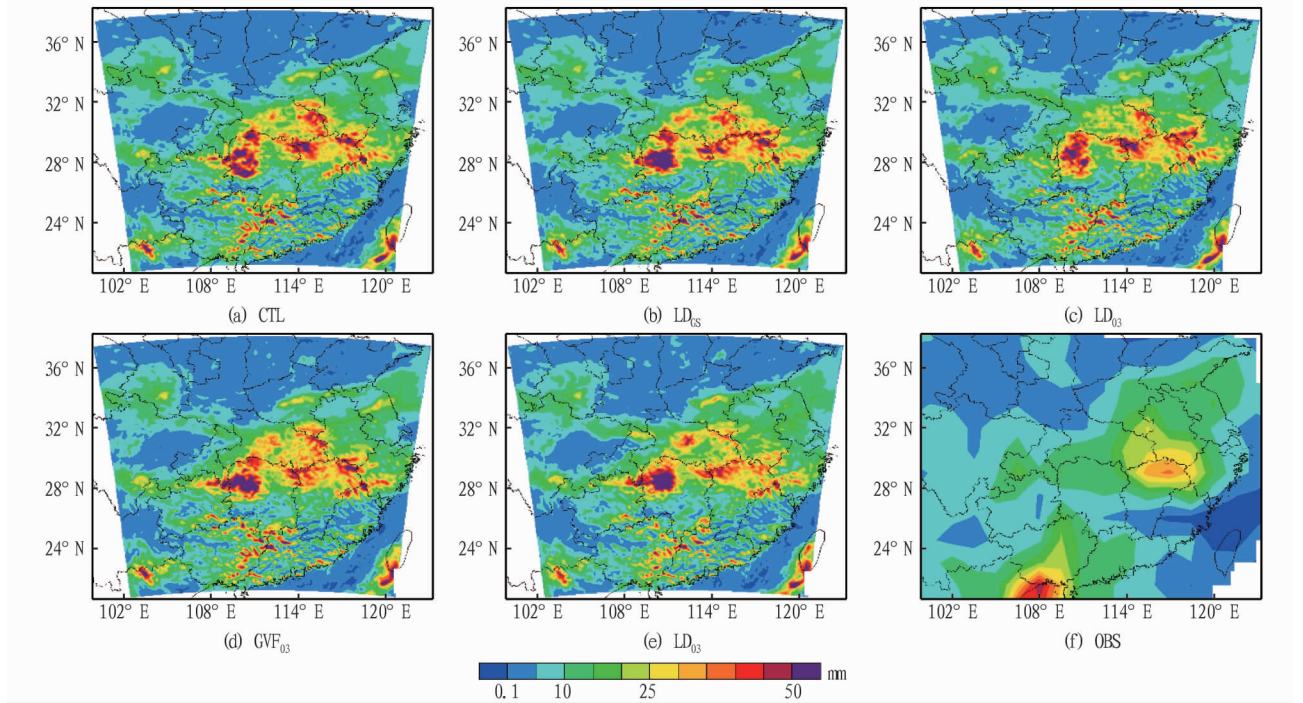


图4 模式模拟区域 Domain2 降水分布

Fig. 4 Precipitation distribution of model simulation area Domain2

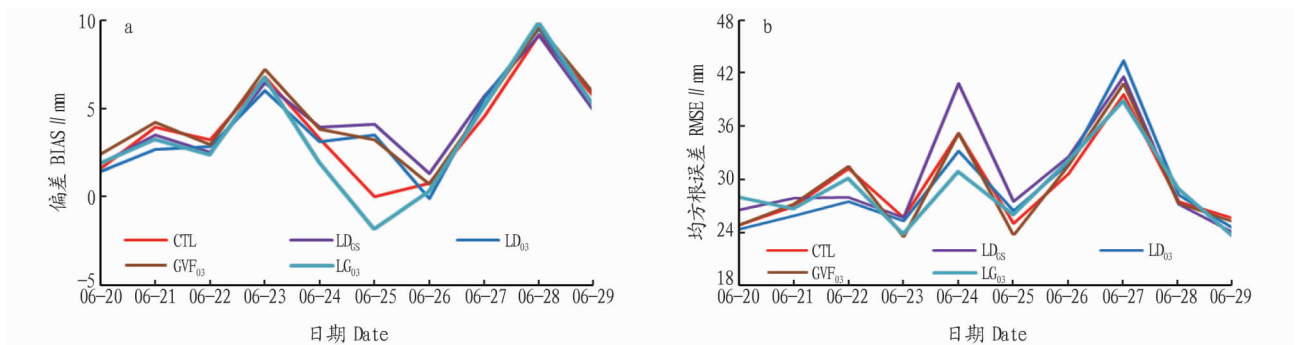


图5 5组试验模拟24 h 累积降水量的区域模式偏差(a)和均方根误差(b)

Fig. 5 The regional model deviation (a) and the root mean square error (b) of five groups of experiments simulated 24 h cumulative precipitation

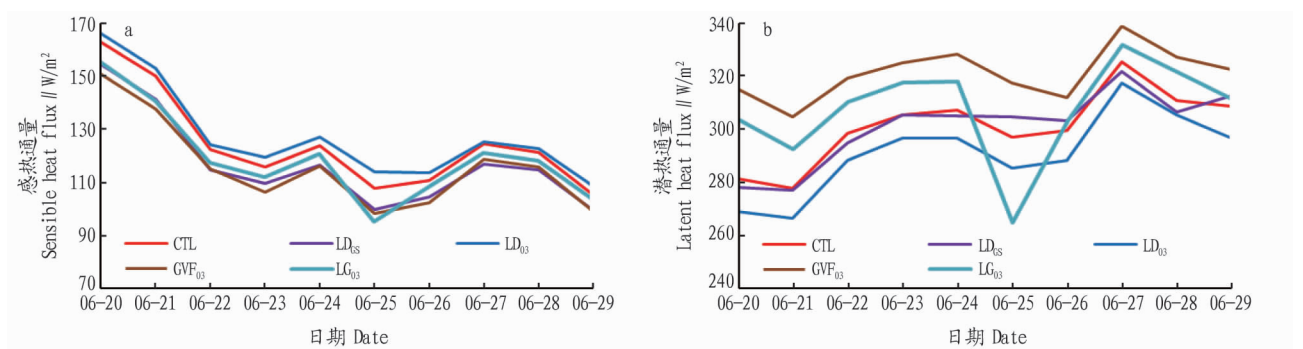


图6 不同试验各10个积分模拟的区域平均14:00的感热通量(a)和潜热通量(b)

Fig. 6 The average sensible heat flux (a) and latent heat flux (b) at 14:00 of each ten integral simulation areas of different experiment

由表2可知,5个试验模拟的整层与分层水汽通量散度均存在一定差异。对于整层水汽通量散度,GVF₀₃试验水汽辐合最大,CTL试验、LD₀₅试验、LD₀₃试验次之,LG₀₃试验水汽辐合量最小。这与降水呈现很好的一致性,由于强的水汽辐

合量对应强的降水,GVF₀₃试验对应最强的降水(11.71 mm),LG₀₃试验为所有试验中降水量最接近实测资料的(11.19 mm)。使用不同土地利用率和植被覆盖率的各个试验模拟的水汽辐合表现不一,使用USGS资料对应的LD₀₅试

验与 CTL 试验相比,其整层水汽辐合减小;在使用最新 MODIS 资料的 LD₀₃ 试验中,水汽辐合进一步减弱,这也使得降水结果更加接近观测资料。但在插值最新植被覆盖率的 GVF₀₃ 试验中,植被覆盖的增加使 GVF₀₃ 试验的水汽辐合量增加(增幅为 5 组试验中最大),这也直接导致最终的降水结果最大。虽然最新的植被覆盖率会增强降水,但当同时使用 MODIS03 的土地利用率和植被覆盖率,水汽辐合明显减弱,

而降水也更加接近观测。这有可能是 2 个资料相互配合的结果。从分层的水汽通量散度可以看出,不同的陆面资料主要是改变地表气压(PSFC)到 850 hPa(简写 PSFC ~ 850 hPa)的水汽辐合量,而整层水汽通量散度的差别也主要来自 PSFC ~ 850 hPa。在 PSFC ~ 850 hPa 的 5 组试验的水汽辐合差异与整层基本一致,表明不同的陆面资料模拟的水汽辐合主要在 PSFC ~ 850 hPa 产生差异,并最终影响降水结果。

表 3 5 组试验区平均整层与分层水汽通量散度

Table 3 The average whole layer and stratified water vapor flux divergence of five groups test area

mm/d

| 层次 Test | CTL | LD _{CS} | LD ₀₃ | GVF ₀₃ | LG ₀₃ |
|----------------|--------|------------------|------------------|-------------------|------------------|
| 整层 Whole layer | -0.932 | -0.925 | -0.923 | -0.957 | -0.915 |
| PSFC ~ 850 hPa | -0.732 | -0.720 | -0.726 | -0.745 | -0.713 |
| 850 ~ 700 hPa | -0.103 | -0.104 | -0.099 | -0.113 | -0.100 |
| 700 ~ 500 hPa | -0.090 | -0.092 | -0.091 | -0.091 | -0.091 |
| 500 ~ 300 hPa | -0.015 | -0.016 | -0.016 | -0.016 | -0.018 |
| 300 ~ 50 hPa | 0.007 | 0.007 | 0.007 | 0.007 | 0.007 |

4 结论

(1) 模式模拟区域内模拟自带的 USGS 和 MODIS 提供的土地利用,以及最新的 MODIS 资料(简称 MODIS03)的土地利用率之间差异很大。在 Domain2 区域内,USGS 资料中草地被 MODIS 资料中的耕地替换,并且 USGS 资料中有大量热带草原,在 MODIS 资料中并未出现,而是被混合森林和有林草地代替。

(2) 5 组试验总体模拟出降水的分布形势,在区域平均降水方面,降水量大小按 LG₀₃、LD₀₃、LD_{CS}、CTL、GVF₀₃ 试验依次增大,但 5 组试验均高估了实际降水量,其中同时替换土地利用以及植被覆盖率的 LG₀₃ 试验最接近实测资料。

(3) 不同陆面输入资料可以直接影响地表热通量的模拟结果。不同陆面信息可以导致模拟平均感热通量及潜热通量的系统性差异,并且这些差异会由于地区不同而变化。从水平衡的角度出发,在 5 组试验中,整层的水汽通量散度与降水形成很好的对应关系。通过分层的水汽通量散度可以看出,不同陆面信息模拟的水汽辐合主要在 PSFC ~ 850 hPa 产生差异,并最终影响降水结果。

参考文献

- [1] CHEN F, DUDHIA J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MMS modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity[J]. *Mon Weather Rev*, 2001, 129(4): 569-585.
- [2] EK M B, MITCHELL K E, LIN Y, et al. Implementation of Noah land surface model advances in the national centers for environmental prediction operational mesoscale Eta model[J]. *J Geophys Res*, 2003, 108(22): 8851.
- [3] MAHRT L, EK M. The influence of atmospheric stability on potential evaporation[J]. *J Climate Appl Meteor*, 1984, 23(2): 222-234.
- [4] HOLT T, NIYOGI D, CHEN F, et al. Effect of land-atmosphere interactions on the IHOP 24-25 May 2002 convection case[J]. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 113-133.
- [5] NIYOGI D, RAMAN S. Comparison of four different stomatal resistance schemes using FIFE observations[J]. *J Appl Meteor*, 1997, 36: 903-917.
- [6] JIANG X Y, WIEDINMYER C, CHEN F, et al. Predicted impacts of climate and land use change on surface ozone in the Houston, Texas, area[J]. *J Geophys Res: Atmospheres*, 2008, 113(20): 1-16.
- [7] PIELKE R A Sr, PITMAN A, NIYOGI D, et al. Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence[J]. *Wiley Interdiscip Rev: Climate Change*, 2011, 2(6): 828-850.
- [8] DIRMEYER P A, NIYOGI D, DE NOBLET-DUCOUDRE N, et al. Impacts of land use change on climate[J]. *J Climatol*, 2010, 30(13): 1905-1907.
- [9] GAO Y H, CHEN F, BARLAGE M, et al. Enhancement of land surface information and its impact on atmospheric modeling in the Heihe River basin, China[J]. *J Geophys Res*, 2008, 113(20): 2739-2740.
- [10] 张井勇, 董文杰, 叶笃正, 等. 中国植被覆盖对夏季气候影响的新证据[J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 91-95.

(上接第 64 页)

- [18] 娄成后, 王学臣. 作物产量形成的生理学基础[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 39-51.
- [19] 杜林方, 孙逊, 潘用华, 等. 钙离子对光系统 II 放氧反应的影响[J]. *中国科学(B 辑)*, 1995, 25(2): 144-150.
- [20] BRESTIC M, CORNIC G, FRYER M J, et al. Does photorespiration protect the photosynthetic apparatus in French bean leaves from photoinhibition during drought stress? [J]. *Planta*, 1995, 196: 450-457.
- [21] QUICK W P, CHAVES M M, WENDLER R, et al. The effect of water

stress on photosynthetic carbon metabolism in four species grown under field conditions[J]. *Plant Cell Environ*, 1992, 15(1): 25-35.

- [22] YOUNIS H M, BOYER J S, GOVINDJEE. Conformation and activity of chloroplast coupling factor exposed to low chemical potential of water in cells[J]. *Biochim Biophys Acta*, 1979, 548(2): 328-340.
- [23] GIMENEZ C, MITCHELL V J, LAWLOR D W. Regulation of photosynthetic rate of two sunflower hybrids under water stress[J]. *Plant Physiol*, 1992, 98(2): 516-524.