

孟春雷. 2015. 应用风云气象卫星及融合降水资料改进地表参数模拟 [J]. 气候与环境研究, 20 (3): 277–284, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14047.
Meng Chunlei. 2015. Improvement of land surface parameters simulation using Fengyun meteorological satellite and fusing precipitation data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (3): 277–284.

应用风云气象卫星及融合降水资料改进 地表参数模拟

孟春雷

中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

摘 要 气象卫星资料不仅对天气、气候研究非常重要, 对于地表参数模拟和预报也具有重要意义。本文首次将全国自动站观测、卫星降水估计和地面观测融合降水资料 (CMORPH) 以及风云二号 D 星 (FY-2D) 积雪覆盖率数据应用到了高分辨率陆面资料同化系统 (u-HRLDAS)。融合降水资料用于驱动 u-HRLDAS, 同时用于计算雪水当量; 积雪覆盖率资料作为 u-HRLDAS 强迫变量。区域模拟结果表明, 积雪覆盖率对于地表反照率、地表温度以及地气交换通量模拟有极其重要的影响。密云站土壤湿度模拟结果表明, 融合降水资料准确度优于全球陆面资料同化系统 (GLDAS) 再分析资料。小汤山站单点验证结果表明, 应用融合降水资料及卫星积雪覆盖率资料可以改进地表温度及地气交换通量的模拟。

关键词 风云卫星 积雪覆盖率 融合降水 高分辨率陆面资料同化系统 (u-HRLDAS)

文章编号 1006-9585 (2015) 03-0277-08

中图分类号 P405

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14047

Improvement of Land Surface Parameters Simulation Using Fengyun Meteorological Satellite and Fusing Precipitation Data

MENG Chunlei

Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

Abstract Satellite data is important in weather and climate research and in land surface parameter simulation and prediction. This paper expands the application fields of Fengyun meteorological satellite data by using fused data of precipitation and fractional snow cover to an urbanized high-resolution land data assimilation system and improves the simulation of land surface parameters and fluxes. The fused precipitation data is used to drive the urbanized high resolution data assimilation system and to compute the snow water equivalent. The snow cover fraction (SCF) data is used as the forcing variable of the model. The regional simulation results indicate that SCF is crucial in the simulation of surface albedo, land surface temperature, and land-atmosphere interaction fluxes. The soil moisture simulation results of Miyun station indicate that the fused precipitation data are more effective than those of the global land data assimilation system. The single site validation results of Xiaotangshan station indicate that simulation of land surface temperature and land-atmosphere interaction fluxes can be improved by fusing precipitation and SCF data retrieved from the Fengyun satellite.

Keywords Fengyun meteorological satellite, Fractional snow cover, CMORPH precipitation, Urbanized high-resolution land data assimilation system (u-HRLDAS)

收稿日期 2014-03-03; 网络预出版日期 2014-09-25

资助项目 国家自然科学基金项目 41375114

作者简介 孟春雷, 男, 1976 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事陆气相互作用及陆面过程研究。E-mail: clmeng@ium.cn

1 引言

目前我国气象卫星已实现业务化、系列化的发展,实现了从试验应用型向业务服务型的转变。但气象卫星资料应用水平与我国气象卫星快速发展的形势还不相适应,与发达国家还存在着明显的差距,要加快提升我国气象卫星资料应用水平面临迫切的发展要求。

卫星资料不仅对天气、气候研究非常重要,对于地表参数模拟和预报也具有重要意义。风云气象卫星在天气气候研究、环境自然灾害监测以及农业气象(许健民等, 2006)等方面得到了较为广泛的应用。但在陆面模式及地表参数模拟和预报中的应用较少,主要是使用卫星资料如降水作为驱动陆面模式的气象强迫数据(师春香等, 2011)。基于此,本文试图拓宽风云气象卫星数据应用领域,将风云气象卫星中的降水与积雪覆盖率资料应用于高分辨率陆面资料同化系统(u-HRLDAS)(Chen et al., 2007),从而改进模式对地表参数及通量的模拟。

积雪覆盖率与地表反照率直接相关,极大改变了地气间辐射能量分配,从而影响了地表温度、地气间交换通量等参数的模拟。国内鲜见卫星积雪资料应用于陆面模式方面的文章,目前国外陆面模式中卫星积雪资料的应用主要有两种方法:即积雪覆盖率同化算法(Rodell and Houser, 2004; Clark et al., 2006; Zaitchik and Rodell, 2009)和雪水当量(Sun et al., 2004; De Lannoy et al., 2010)同化算法。前者是采用卫星积雪覆盖率资料推导雪水当量或雪深,后者则采用卫星雪水当量资料推导积雪覆盖率。最近,De Lannoy et al. (2012)同时同化了地球观测系统高级微波扫描辐射计(Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System, AMSR-E)雪水当量和MODIS传感器积雪覆盖率。由于目前缺乏雪水当量观测数据,因此本文采用全国自动站观测降水(沈艳等, 2010)和卫星降水估计和地面观测融合降水资料(CMORPH)计算雪水当量。

2 资料与模式

本文所采用的资料包括卫星资料、自动站与通量塔观测资料和全球陆面资料同化系统(GLDAS)(Rodell et al., 2004)再分析资料;所采用的模式为

u-HRLDAS。

2.1 卫星资料

本文所采用的卫星资料包括降水量融合资料和风云二号D星(FY-2D)积雪覆盖率产品。卫星资料由中国气象局卫星广播系统(CMACast)(王春芳等, 2012)分发。

国家气象信息中心基于全国自动站观测降水量和CMORPH降水融合资料,生成了中国区域1 h、 0.1° (纬度) $\times 0.1^\circ$ (经度)分辨率的降水量融合产品(张蒙蒙和江志红, 2013),范围为($15^\circ\text{N}\sim 59^\circ\text{N}$, $70^\circ\text{E}\sim 140^\circ\text{E}$)。融合降水量资料所用时段为2010年1月1日至2011年12月17日。FY-2D积雪覆盖率产品空间分辨率为 0.5° ,时间分辨率为1 d,覆盖范围为($15^\circ\text{N}\sim 60^\circ\text{N}$, $27^\circ\text{E}\sim 147^\circ\text{E}$)。FY-2D积雪覆盖率产品所用时段为2009年9月9日至2012年7月30日。

2.2 观测资料

本文所使用的观测资料包括密云站气象观测资料、小汤山站气象观测资料和地表温度资料以及小汤山通量塔潜热和感热通量观测资料。密云自动站降水观测资料、小汤山自动站地表温度资料用于结果验证。密云自动站降水观测资料所用时段为2011年7月1~31日。小汤山自动站地表温度资料和小汤山通量塔感热、潜热通量资料所用时段为2010年1月1~31日。

2.3 GLDAS 同化系统

GLDAS是由NASA戈达德空间飞行中心(GSFC)和NOAA/NCEP联合发展的全球陆面数据同化系统,它融合来自地面和卫星的观测数据来提供最优优化近实时的地表状态变量(Rodell et al., 2004; 陈莹莹等, 2009)。GLDAS资料提供气象强迫数据,用于驱动u-HRLDAS,空间分辨率为 0.25° ,时间分辨率为3 h。GLDAS资料所用时段为2008年1月1日至2012年12月31日;其中2008年1月1日至2009年12月31日为u-HRLDAS起转(spun-up)时段。

2.4 u-HRLDAS 同化系统

高分辨率城市陆面同化系统(u-HRLDAS)在城市冠层模式(UCM)(Masson, 2000; Kusaka et al., 2001)以及Noah陆面模式(Noah LSM)(Chen et al., 1996, 2007)的基础上收集了大量的(通常为12~18个月)气象强迫以及地表初始化等数据,通过长时间起转过程,得到比较稳定的地表参数及通量输

出结果。u-HRLDAS 已经进行了改进与本地化 (Meng et al., 2013)。

3 同化方法

融合降水资料用于取代 GLDAS 降水资料驱动 u-HRLDAS, 同时用于计算雪水当量, 方法如下:

$$S_{WE} = \max(0, (P_{snow} - E_p - S_{melt})\Delta t), \quad (1)$$

其中, S_{WE} 为雪水当量 (单位: mm); P_{snow} 为降雪率 (单位: mm/s), 来自于融合降水资料; E_p 为潜在蒸发, 为模式输出结果; S_{melt} 为积雪融化率 (单位: mm/s), 为模式输出结果; Δt 为时间步长。

u-HRLDAS 模式中积雪覆盖率是由雪水当量推导出的 (Clark et al., 2006), 计算方法如下:

$$S_{CV} = \begin{cases} 1, & S_{WE} > S_{WEUP} \\ 1 - \left[\exp\left(\frac{-aS_{WE}}{S_{WEUP}}\right) - \frac{S_{WE}}{S_{WEUP}} \exp(-S_{WEUP}) \right], & S_{WE} \leq S_{WEUP} \end{cases} \quad (2)$$

其中, S_{CV} 为积雪覆盖率, a 为积雪覆盖分布函数的形状因子, 设置为 2.6; S_{WEUP} 为雪水当量阈值, 由查找表求得, 与地表分类类型有关。引入 FY-2D 积雪覆盖率后, 积雪覆盖率改为强迫变量。

4 区域模拟

本部分对 u-HRLDS 进行区域模拟, 比较风云卫星资料引入前后模式模拟结果。模拟区域为北京市气象局快速更新循环预报系统 (BJ-RUC) (陈敏等, 2010, 2011) 2.0 版本 D02 区域范围。模式时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 3 km。模式起转时

间为 2008 年 1 月 1 日 00:00 (北京时间, 下同), 模拟结果的输出时间为 2010 年 1 月 4 日 14:00。

图 1 为 FY-2D 与 u-HRLDAS 积雪覆盖率比较, FY-2D 积雪覆盖率数据已经插值到 BJ-RUC D02 区域。可以看出由于华北地区大雪, FY-2D 积雪覆盖率很高, 而 u-HRLDAS 查找表方法求出的积雪覆盖率完全不能反映出华北地区大雪的影响。一方面原因是由于 GLDAS 降雪数据误差较大, 另一方面是由于积雪覆盖率计算方法有很大误差。由于积雪覆盖率与地表反照率直接相关, 极大改变了地气间辐射能量分配, 从而影响了地表温度、地气间交换通量等参数的模拟。因此, 引入风云卫星积雪覆盖率资料对于提高雪天陆面模式模拟能力至关重要, 对于雪天气象预报特别是气温预报也有重要影响。

图 2 为卫星资料引入前后, 反照率、感热通量与潜热通量模拟结果比较。由图 2a 和 2b 可以看出, 引入卫星积雪覆盖率资料后, 有积雪覆盖的地区反照率显著增加, 这是由于积雪的反照率较大的缘故。由图 2c 和 2d 可以看出, 有积雪覆盖的地区感热通量显著减少, 部分地区甚至为负值; 而由图 2e 和 2f 可以看出, 有积雪覆盖的地区潜热通量显著增加。这是由于反照率增加导致地表净辐射显著减少; 同时积雪覆盖率增加导致土壤湿度增加, 从而导致潜热通量增加; 净辐射的减少和潜热通量的增加导致感热通量显著减少, 甚至出现负的感热通量, 即地表温度小于近地面大气温度。

5 单点验证

5.1 密云站

本部分对融合降水资料、GLDAS 降水资料 and

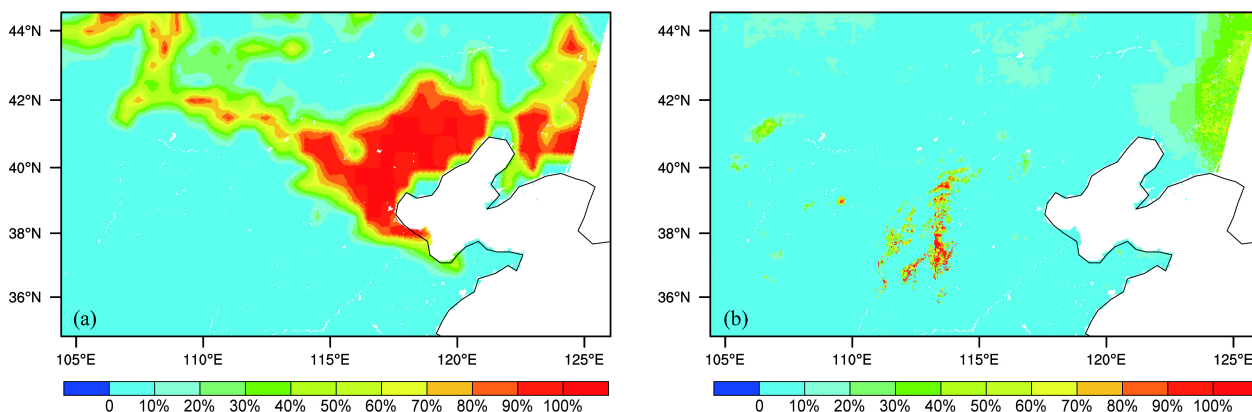


图 1 (a) FY-2D 卫星和 (b) u-HRLDAS 同化系统积雪覆盖率

Fig. 1 Fractional snow cover from (a) FY-2D satellite and (b) u-HRLDAS assimilation system

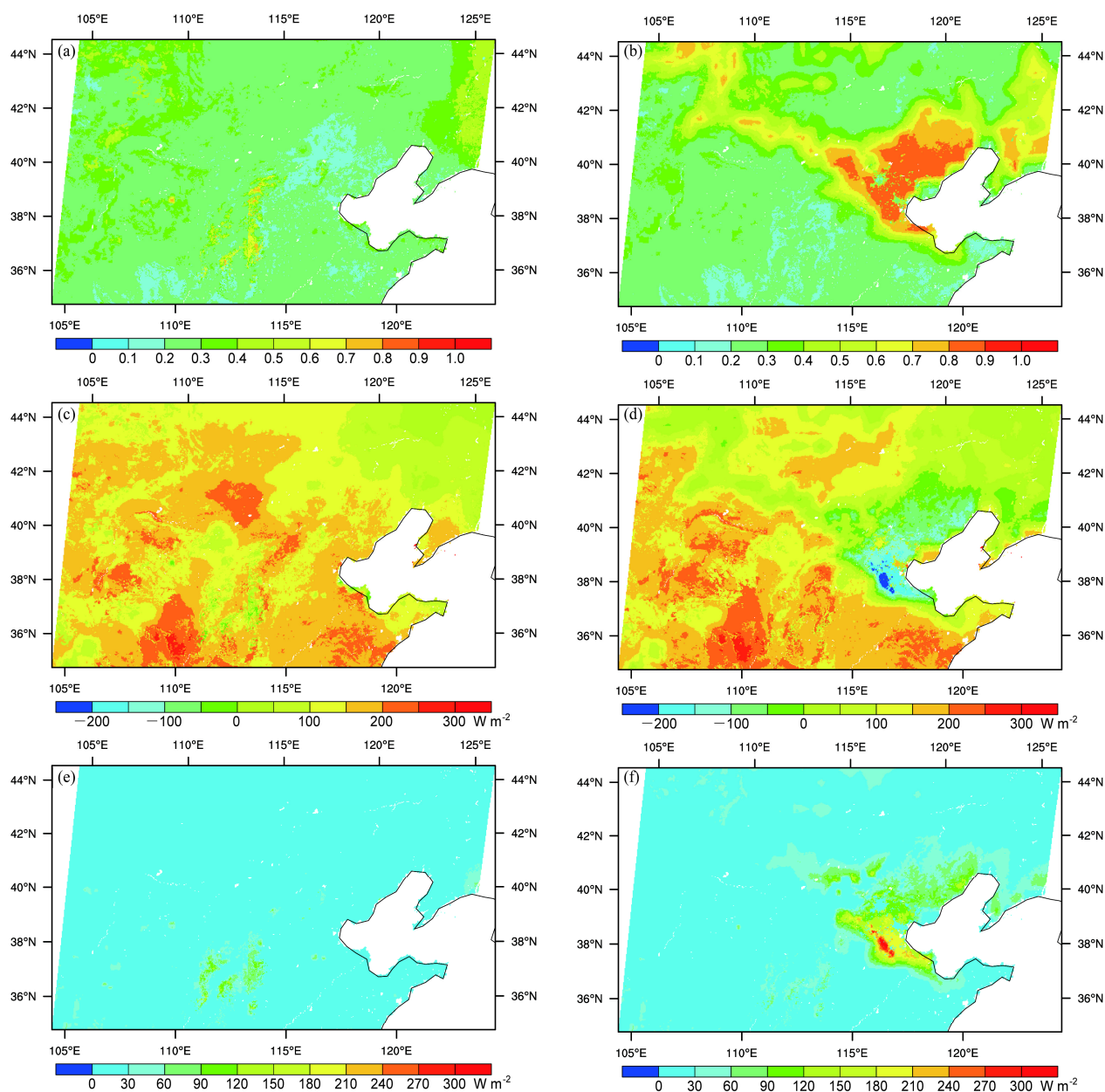


图2 卫星资料引入前(左列)、后(右列)(a、b)反照率、(c、d)感热通量与(e、f)潜热通量模拟结果

Fig. 2 Simulation results of (a, b) albedo, (c, d) sensible heat fluxes, and (e, f) latent heat flux before (left panel) and after (right panel) using satellite data

自动站观测资料进行对比, 并且采用自动站土壤湿度观测数据对融合降水资料进行检验。

密云站下垫面为农田, 验证时间为 2011 年 7 月。图 3 为 2011 年 7 月融合降水资料、GLDAS 降水资料和密云自动站观测资料比较。可以看出融合降水资料降水量级与观测值比较接近, 而 GLDAS 资料降水量级与观测值差别较大。

为了更好地验证融合降水数据, 分别采用融合降水资料和 GLDAS 降水资料驱动 u-HRLDAS, 比

较密云站土壤湿度模拟结果, 两种模拟所采用的其它气象强迫数据均为 GLDAS 资料。验证时间为 2011 年 6~8 月。图 4 为融合降水资料和 GLDAS 资料作为降水强迫情况下, 密云站 10 cm、40 cm 和 100 cm 土壤相对湿度模拟结果与观测值的比较。表 1 为融合降水资料和 GLDAS 资料作为降水强迫情况下, u-HRLDAS 10 cm 土壤相对湿度、40 cm 土壤相对湿度模拟结果与观测值之间的平均误差、均方根误差和相关系数。由图 4 和表 1 可以看出, 融

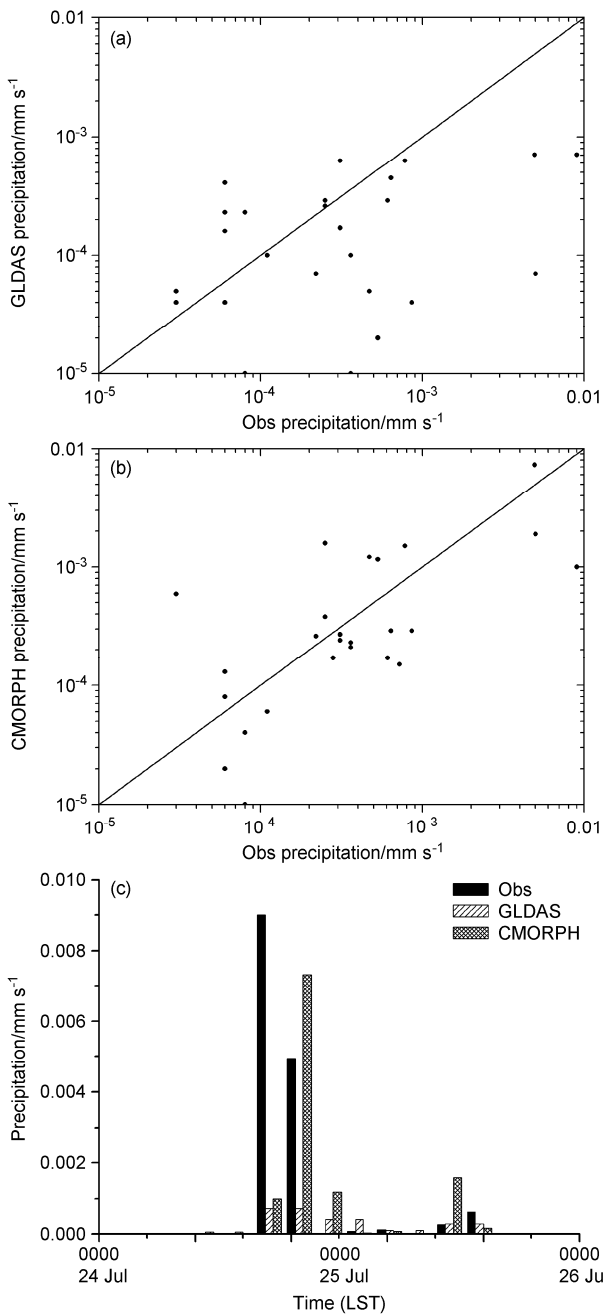


图 3 2011 年 7 月 (a) GLDAS 降水量与密云自动站观测资料散点图、(b) CMORPH 融合降水量与自动站观测资料散点图、(c) 降水量较大时段结果比较

Fig. 3 Scatter plots of precipitation data (a) from GLDAS and automatic weather station and (b) from CMORPH fusing and automatic weather station, and (c) comparison of the precipitation data in the relatively heavy precipitation period

合降水资料的引入对土壤相对湿度模拟结果有较大改进，由于大部分时间融合降水大于 GLDAS 资料，导致各层土壤湿度有所增加。但由于初始场、土壤质地和地表类型数据不够准确以及模式本身

的缺陷，引入融合降水资料后，土壤相对湿度模拟结果仍与观测值有一定差距。

表 1 卫星数据引入前后 u-HRLDAS 10 cm、40 cm 土壤湿度模拟结果与观测值之间的平均误差、均方根误差和相关系数

	平均误差	均方根误差	相关系数
10 cm GLDAS 降水	0.36	0.38	0.745
10 cm CMORPH 降水	0.23	0.26	0.710
40 cm GLDAS 降水	0.57	0.59	0.705
40 cm CMORPH 降水	0.43	0.44	0.804
100 cm GLDAS 降水	0.69	0.71	0.723
100 cm CMORPH 降水	0.55	0.56	0.920

5.2 小汤山站

本部分采用自动站地表温度观测数据与通量塔感热和潜热通量观测数据对融合降水资料和卫星反演积雪覆盖率资料引入前后 u-HRLDAS 模拟结果进行验证。

小汤山站冬季下垫面为裸地，验证时间为 2010 年 1 月。图 5 为融合降水资料和卫星反演积雪覆盖率资料引入前后，小汤山站点积雪覆盖率、地表温度与气温、感热通量与潜热通量模拟结果比较。表 2 为融合降水资料和卫星反演积雪覆盖率资料引入前后 u-HRLDAS 感热、潜热通量模拟结果与观测值之间的平均误差、均方根误差和相关系数。由图 5a 可以看出，2010 年 1 月有几次较明显的降雪过程，卫星积雪覆盖率明显大于 u-HRLDAS 积雪覆盖率。由图 5b、5c 和 5d 可以看出，在有积雪覆盖的时段，

表 2 融合降水资料和卫星反演积雪覆盖率资料引入前后 u-HRLDAS 感热、潜热通量模拟结果与观测值之间的平均误差、均方根误差和相关系数

	平均误差/K	均方根误差/K	相关系数
感热引入前	22.9	34.0	0.612
感热引入后	18.5	24.9	0.679
潜热引入前	9.9	17.7	0.784
潜热引入后	9.3	15.9	0.605

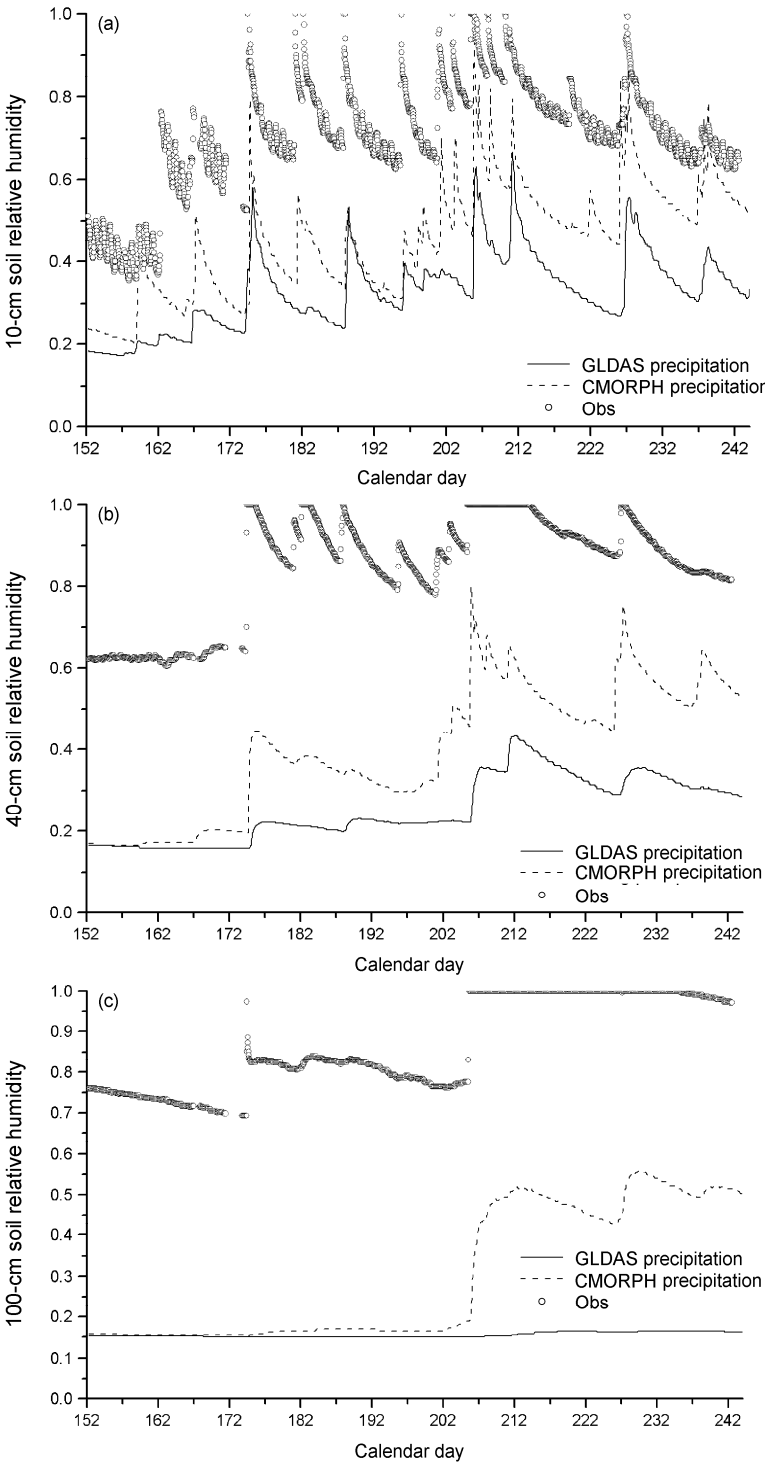


图 4 CMORPH 和 GLDAS 资料作为降水强迫情况下，密云站 (a) 10 cm、(b) 40 cm、(c) 100 cm 土壤相对湿度模拟结果与观测值的比较
Fig. 4 Comparisons of the simulation results of (a) 10-cm, (b) 40-cm, and (c) 100-cm soil relative humidity at Miyun station forced by CMORPH and GLDAS precipitation data with observations

引入卫星资料后，地表温度模拟结果几乎全天低于气温，从而导致了负的感热通量，而潜热通量显著增加。这是因为卫星反演积雪覆盖率较高，导致较

高的反照率，降低了净辐射；同时积雪阻碍了地表以及大气间的能量交换，雪水蒸发也会带走一定的热量，导致地表温度进一步降低。由于 u-HRLDAS

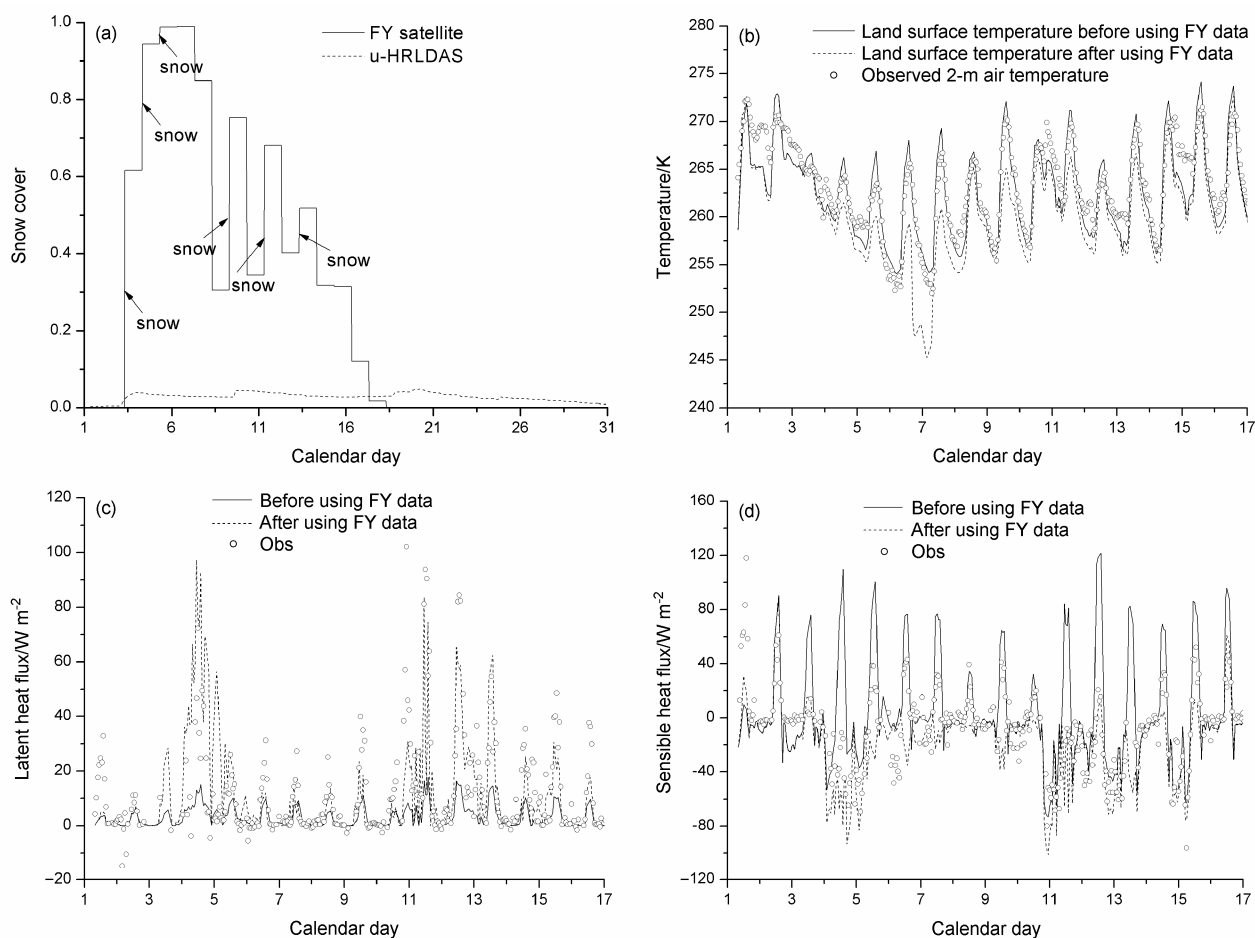


图5 融合降水资料和卫星反演积雪覆盖率资料引入前后,小汤山站(a)积雪覆盖率、(b)地表温度、(c)潜热通量、(d)感热通量与观测值比较
Fig. 5 Comparisons of (a) fractional snow cover, (b) land surface temperature, (c) latent heat flux, and (d) sensible heat flux at Xiaotangshan station after and before using fusing precipitation and satellite retrieved fractional snow cover with observations

积雪覆盖率较低,因此中午前后温度较高的时段,地表温度大于气温,感热通量为正值。由图5c和5d以及表2可以看出,引入卫星资料可以大大改进模式对感热、潜热通量的模拟。由于缺乏雪水当量卫星资料以及模式本身的缺陷,引入卫星资料后模拟结果与观测值仍存在一定误差。

6 结论

本文将融合降水资料以及FY-2D积雪覆盖率数据应用到u-HRLDAS,改进了高分辨率陆面资料同化系统对地表参数的模拟。主要结论如下:

(1) 积雪覆盖率与地表反照率直接相关,极大改变了地气间辐射能量分配,从而影响了地表温度、地气间交换通量等参数的模拟。

(2) 区域验证结果表明,引入卫星积雪覆盖率资料后,反照率显著上升。由于反照率增加,感热通量显著下降,积雪覆盖率较大的区域甚至为负值,即这些区域地表温度低于大气温度;潜热通量则显著增加。

(3) 融合降水资料的引入对土壤相对湿度模拟结果有较大改进,由于大部分时间融合降水大于GLDAS资料,导致各层土壤湿度有所增加。

(4) 在有积雪覆盖的时段,引入卫星资料后,地表温度模拟结果几乎全天低于气温,这表明即使在白天,感热通量也为负值。引入卫星资料可以大大改进模式对感热、潜热通量的模拟。

由于雪水当量不仅取决于降水量,还取决于潜在蒸发以及积雪融化,因此仅引入自动站融合降水资料对于准确计算雪水当量是不够的。今后需要将

风云三号 B 星 (FY-3B) 雪水当量资料与风云三号 A 星 (FY-3A) 积雪覆盖率资料引入陆面模式中, 以进一步提高地表参数模拟结果。

参考文献 (References)

- Chen F, Mitchell K, Schaake J, et al. 1996. Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101 (D3): 7251–7268.
- Chen F, Manning K W, LeMone M A, et al. 2007. Description and evaluation of the characteristics of the NCAR high-resolution land data assimilation system [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46 (6): 694–713.
- 陈敏, 范水勇, 仲跻芹, 等. 2010. 全球定位系统的可降水量资料在北京地区快速更新循环系统中的同化试验 [J]. *气象学报*, 68 (4): 450–463.
- Chen Min, Fan Shuiyong, Zhong Jiqin, et al. 2010. An experimental study of assimilating the global position system-precipitable water vapor observations into the rapid updated cycle system for the Beijing area [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68 (4): 450–463.
- 陈敏, 范水勇, 郑芳, 等. 2011. 基于 BJ-RUC 系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探 [J]. *气象学报*, 69 (1): 181–194.
- Chen Min, Fan Shuiyong, Zheng Zuofang, et al. 2011. The performance of the proximity sounding based on the BJ-RUC system and its preliminary implementation in the convective potential forecast [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (1): 181–194.
- 陈莹莹, 施建成, 杜今阳, 等. 2009. 基于 GLDAS 的中国区地表能量平衡数值试验 [J]. *水科学进展*, 20 (1): 25–31.
- Chen Yingying, Shi Jiancheng, Du Jinyang, et al. 2009. Numerical experiments of surface energy balance over China area based on GLDAS [J]. *Advances in Water Science (in Chinese)*, 20 (1): 25–31.
- Clark M P, Slater A G, Barrett A P, et al. 2006. Assimilation of snow covered area information into hydrologic and land-surface models [J]. *Advances in Water Resources*, 29 (8): 1209–1221.
- De Lannoy G J M, Reichle R H, Houser P R, et al. 2010. Satellite-scale snow water equivalent assimilation into a high-resolution land surface model [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 11 (2): 352–369.
- De Lannoy G J M, Reichle R H, Arsenault K R, et al. 2012. Multiscale assimilation of advanced microwave scanning radiometer-EOS snow water equivalent and moderate resolution imaging spectroradiometer snow cover fraction observations in northern Colorado [J]. *Water Resour. Res.*, 48 (1): W01522, doi: 10.1029/2011WR010588.
- Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, et al. 2001. A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 101 (3): 329–358.
- Masson V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 94 (3): 357–397.
- Meng C L, Zhang C L, Miao S G, et al. 2013. Localization and validation of an urbanized high-resolution land data assimilation system (u-HRLDAS) [J]. *Science China Earth Sciences*, 56 (6): 1071–1078.
- Rodell M, Houser P R. 2004. Updating a land surface model with MODIS-derived snow cover [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 5 (6): 1064–1075.
- Rodell M, Houser P R, Jambor U, et al. 2004. The global land data assimilation system [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85 (3): 381–394.
- 沈艳, 冯明农, 张洪政, 等. 2010. 我国逐日降水量格点化方法 [J]. *应用气象学报*, 21 (3): 279–286.
- Shen Yan, Feng Mingnong, Zhang Hongzheng, et al. 2010. Interpolation methods of China daily precipitation data [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 21 (3): 279–286.
- 师春香, 谢正辉, 钱辉, 等. 2011. 基于卫星遥感资料的中国区域土壤湿度 EnKF 数据同化 [J]. *中国科学: 地球科学*, 41 (3): 375–385.
- Shi Chunxiang, Xie Zhenghui, Qian Hui, et al. 2011. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data [J]. *Science China Earth Sciences*, 54 (9): 1430–1440.
- Sun C J, Walker J P, Houser P R. 2004. A methodology for snow data assimilation in a land surface model [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109 (D8): D08108, doi: 10.1029/2003JD003765.
- 王春芳, 李湘, 陈永涛, 等. 2012. 中国气象局卫星广播系统 (CMACast) 设计 [J]. *应用气象学报*, 23 (1): 113–120.
- Wang Chunfang, Li Xiang, Chen Yongtao, et al. 2012. Design of CMA's broadcast system for meteorological data—CMACast [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 23 (1): 113–120.
- 许健民, 钮寅生, 董超华, 等. 2006. 风云气象卫星的地面应用系统 [J]. *中国工程科学*, 8 (11): 13–18, 24.
- Xu Jianmin, Niu Yinsheng, Dong Chaohua, et al. 2006. Ground segments for FY meteorological satellites [J]. *Engineering Science (in Chinese)*, 8 (11): 13–18, 24.
- Zaitchik B F, Rodell M. 2009. Forward-looking assimilation of MODIS-derived snow-covered area into a land surface model [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 10 (1): 130–148.
- 张蒙蒙, 江志红. 2013. 我国高分辨率降水融合资料的适用性评估 [J]. *气候与环境研究*, 18 (4): 461–471.
- Zhang Mengmeng, Jiang Zhihong. 2013. Analyses of high-resolution merged precipitation products over China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (4): 461–471.