

程兴宏, 刘瑞霞, 申彦波, 等. 2014. 基于卫星资料同化和 LAPS-WRF 模式系统的云天太阳辐射数值模拟改进方法 [J]. 大气科学, 38 (3): 577–589, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13159. Cheng Xinghong, Liu Ruixia, Shen Yanbo, et al. 2014. Improved method of solar radiation simulation under cloudy days with LAPS-WRF model system based on satellite data assimilation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (3): 577–589.

# 基于卫星资料同化和 LAPS-WRF 模式系统的云天 太阳辐射数值模拟改进方法

程兴宏<sup>1</sup> 刘瑞霞<sup>2</sup> 申彦波<sup>1</sup> 朱蓉<sup>3</sup> 彭继达<sup>4</sup> 杨振斌<sup>1</sup> 徐洪雄<sup>5</sup>

1 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081

2 国家气象卫星中心, 北京 100081

3 国家气候中心, 北京 100081

4 福建省气象科学研究所, 福州 350001

5 中国气象科学研究院, 北京 100081

**摘 要** 太阳能光伏发电已成为仅次于水电和风能的第三大可再生能源, 光伏发电受云量时空变化的影响较大, 因此准确模拟云天太阳辐射的时空变化对电网安全运行至关重要。围绕如何减小中尺度气象模式的云初始场误差, 进而改进云天的太阳辐射模拟这一关键科学问题, 本文通过研究基于卫星资料同化的 LAPS (Local Analysis Prediction System) 多时间层三维云分析同化方法, 改进三维云结构, 并将 LAPS 模式输出结果作为 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式的初始场, 模拟了 2008 年 1 月及夏季 (6~8 月) 北京地区的总云量和总辐射的时空分布, 重点分析了多云和有降水天气过程总辐射的模拟改进效果及其原因。结果表明, 同化前后的总云量模拟值与观测值的时间变化趋势基本一致, 但大部分时次总云量的模拟值低于观测值; 大部分多云及降水时段同化后总云量模拟值较接近于实测值。1 月晴天、多云天以及夏季晴天同化前后总辐射模拟值与实测值的时间变化趋势较一致, 但同化前后两者的相关性差异不明显; 晴天条件下同化前后总辐射模拟值均低于实测值, 1 月多云条件下多数时段同化后总辐射模拟误差减小不明显, 与总云量的改进效果不显著有关。夏季多云、有降水及 6 月典型降水三种天气条件下同化前后总辐射模拟值与观测值的相关性稍差, 同化后两者的相关性较同化前有所改进, 尤其是 6 月典型降水过程改进效果较明显; 同化前总辐射模拟误差较大, 而同化后误差显著减小, 尤其是 6 月典型降水过程同化后均方根误差和平均相对误差较同化前分别减小了  $102.6 \text{ W m}^{-2}$  和 355.9%, 最大相对误差减小更显著; 同化后总辐射模拟误差小于同化前的比例高达 75%, 即大部分时刻同化后模拟误差小于同化前。多云和有降水天气过程总辐射模拟效果的显著改进与总云量的改进密切相关, 即同化后总云量模拟值增加, 云的反射和散射作用增强, 导致模拟总辐射减小, 即更接近于实测总辐射值。研究结果对于多云和降水天气条件下太阳辐射的模拟效果改进、太阳能资源客观评估以及光伏电站的发电量预测具有一定的科学和实际应用价值。

**关键词** 卫星资料同化 太阳辐射 光伏发电 太阳能 LAPS-WRF 模式系统

文章编号 1006-9895(2014)03-0577-13

中图分类号 P422.1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13159

## Improved Method of Solar Radiation Simulation on Cloudy Days with LAPS-WRF Model System Based on Satellite Data Assimilation

CHENG Xinghong<sup>1</sup>, LIU Ruixia<sup>2</sup>, SHEN Yanbo<sup>1</sup>, ZHU Rong<sup>3</sup>, PENG Jida<sup>4</sup>, YANG Zhenbin<sup>1</sup>, and XU Hongxiong<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Public Meteorological Service Center, CMA, Beijing 100081

<sup>2</sup> National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

收稿日期 2013-04-23, 2013-11-05 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金 41275114, 国家高技术研究发展计划项目 2011AA05A302

作者简介 程兴宏, 男, 1977 年出生, 博士, 高工, 主要从事风能太阳能、大气污染数值模拟和预报方法研究。E-mail: cxingh@cma.gov.cn

3 National Climate Center, Beijing 100081

4 Meteorological Institute of Fujian, Fuzhou 350001

5 Chinese Academy of Meteorology Science, Beijing 100081

**Abstract** Photovoltaic power is influenced by the temporal and spatial variation of cloud amounts. Therefore, to ensure safe operation of power grids on cloudy days, accuracy in simulating and forecasting temporal and spatial variations of solar radiation is critical. To reduce initial field errors in the mesoscale meteorological model and to improve the simulation accuracy of solar radiation on cloudy days, the three-dimensional cloud analysis assimilation method in the Local Analysis and Prediction System (LAPS) is adopted in this study. The results are used to improve cloud simulation and are used as the initial field of the Weather Research and Forecasting (WRF) model. The temporal and spatial distribution characteristics of the total cloud amount and global radiation in the Beijing area in January, June, July, and August and during the typical precipitation processes in June 2008 are simulated with the LAPS-WRF model system. This study focuses on the simulation results of global radiation with and without Fengyun satellite data assimilation and describes the reasons for the improvements on cloudy days and during the precipitation processes. The results showed that the temporal variation of simulated and observed values of total cloud amounts with and without satellite data assimilation were consistent. Without assimilation, the simulated values were significantly lower than observations in most cases. After assimilation, the simulated values of total cloud amounts were closer to observations. In addition, the correlation coefficients between simulation and observation values of global radiation before and after assimilation were higher and the differences of correlation coefficients with and without satellite data assimilation were smaller on clear and cloudy days in January and on clear days in summer. The simulation values of global radiation before and after assimilation were all lower than the measured values on sunny days. After assimilation, the error reduction of global radiation was not noticeable on cloudy days in January because the improvement of total cloud amount simulation was insignificant. Moreover, before and after assimilation, the correlation coefficients between simulation and observation values of global radiation on cloudy and rainy days in summer and during typical precipitation process in June were smaller than those on clear days. However, the correlation coefficients after assimilation were noticeably larger than those before assimilation, particularly during typical precipitation processes in June. Further, simulation errors in global radiation were significantly reduced. For example, the root mean square error and average relative errors during a typical precipitation process in June were reduced by  $102.6 \text{ W m}^{-2}$  and 355.9%, respectively, and maximum relative error was reduced to a greater extent. Simulation errors in global radiation after assimilation in most cases were less than those before assimilation, with reduction ratios being 75%. The significant improvement in the simulation of global radiation after assimilation during cloudy days and precipitation processes is closely related to the improvement in total cloud amount. The results of this study have certain scientific and practical application values for the improvement of simulation and the forecasting of solar radiation and photovoltaic power on cloudy days and during precipitation process, and the objective assessments of solar energy resources.

**Keywords** Satellite data assimilation, Solar radiation, Photovoltaic power, Solar energy, LAPS-WRF model

## 1 引言

太阳能是一种清洁能源, 合理有效开发太阳能资源对减少污染、保护环境、应对气候变化以及能源安全具有非常重要的实际意义。为了实现能源和环境的可持续发展, 近年来世界各国都将光伏发电作为太阳能资源开发利用的重点领域。目前光伏发电已成为仅次于水电和风能的第三大可再生能源。我国的太阳能资源丰富且分布范围广阔, 太阳能光伏产业的发展潜力巨大。太阳能光伏发电对于太阳辐照度的要求不高, 在晴天和云天条件下均可运行发电, 但太阳能光伏发电系统的电力输出受到云量

时空变化的影响较大, 其发电量的变化是非平稳的随机过程。即当某光伏电站或热电站无明显天气过程时(晴天条件下), 其发电量较稳定, 对电站微电网调节和电网调度没有明显影响; 当天气系统经过时(有云或降水时), 其发电量发生剧烈变化, 对电网冲击较大。云的反射和散射会使太阳辐射被削弱, 同时云的时空分布变化会在不同程度上引起到达地面太阳辐射的变化(张华, 1999; Zhang et al., 2003; 刘玉芝等, 2007; 石广玉, 2007; Sun, 2011; 张华和荆现文, 2011; 郭准和周天军, 2012; Sun et al., 2012)。IPCC 4 次评估报告(IPCC, 1990, 1992, 1996, 2001)指出, 云辐射参数化是制约当前气候

模式模拟水平的关键因素。数值预报模式可较精确的模拟晴天的太阳总辐射,但由于云的模拟偏差较大,云天的总辐射模拟精度一般都比较差(Sun et al., 2012)。因此,改进云微物理参数的模拟效果,进而准确模拟地面接收太阳辐射的时空分布是太阳能资源大规模开发利用中亟待解决的关键科学问题。改进云天条件下的太阳辐射模拟和预报,为太阳能光伏的发电量预测提供准确可靠的基础数据,将为减小云天条件下发电量对电网的影响和充分利用云天和雨天的太阳能资源提供科学方法。

基于中尺度气象模式的数值模拟方法时空分辨率较高,目前被广泛应用于太阳能资源精细评估和太阳辐射预报中,中尺度气象模式在一定程度上可准确模拟和预报晴天太阳辐射,但对多云和阴雨天的太阳辐射模拟和预报误差较大(Shimada and Kurokawa, 2006; 沈元芳和胡江林, 2006; Lorenz et al., 2007; International Energy Agency, 2009; 吴其重等, 2010; 文小航等, 2010; 王明欢等, 2012)。其主要原因是模式初始场中的云微物理量存在一定误差。鉴于上述原因,近年来国内外部分学者采用中尺度气象模式和统计学方法相结合的动力—统计辐射估算模型进行太阳辐射模拟和预报(Shimada and Kurokawa, 2006; Lorenz et al., 2007; International Energy Agency, 2009; 吴其重等, 2010; 王明欢等, 2012),但动力—统计方法不能从根本上解决初始场误差对辐射模拟的影响这一关键科学问题。因此,如何减小中尺度气象模式初始场中云微物理量的误差,是目前太阳辐射数值模拟和预报方法研究的关键和难点。

近年来随着气象卫星、天气雷达、自动站以及风廓线仪、全球定位水汽监测系统(Global Position System, GPS)、无线电声探测系统(Radio-Acoustic Sounding System, RASS)等多种观测手段及数值模式的快速发展,使中尺度分析和预报技术日益成为天气预报中的重要组成部分,并为灾害性天气超短期和临近预报提供了强有力支持。如何将上述多源观测资料在同一数值平台上统一同化处理是迫切需要解决的问题。20世纪90年代,美国国家海洋大气管理局研发了局地分析预报系统LAPS,该系统具有可移植、可扩充、方便、高效等特性,可以将气象地面观测网、雷达、卫星、垂直探测器、飞机等多种手段观测的数据进行分析融合,得到时空分辨率较高的三维云分析场。三维云分析是LAPS

最有特色的部分,云分析主要采用了逐步订正方案(McGinley et al., 1991; Albers et al., 1996),获得的云参数包括三维云量场、大气柱云量、云底高度、云顶高度等,产生的三维云量场用于LAPS中其他云物理参数如云水含量、云冰含量、云分类等的计算(Albers et al., 1996)。LAPS参考了每种资料来源的可信度,配合若干阈值的判定,将各种资料融合获得三维大气结构信息,可为中尺度气象模式提供客观的三维云初始场,以准确刻画中尺度气象模式对积云对流和次网格尺度物理过程的描述,提高云和降水的预报能力(Shaw et al., 2001; Jian et al., 2003)。许多研究(Alberoni et al., 2000; Shaw et al., 2003)都证明LAPS融合卫星、雷达等多源数据后,为中尺度气象模式提供热启动的初始场比模式冷启动更能有效改善云物理参数的预报。国内多个单位引进了LAPS系统并本地化,开展了三维数据融合及数值模式热启动相关研究(范蕙君, 1997; 崔春光等, 2008; 李红莉等, 2009; 高华等, 2009; 周后福等, 2010; 刘瑞霞等, 2011)。尽管近几年LAPS系统在国内已经业务运行,但由于云分析中需要多种观测数据进行协同分析,才能得到真实的三维云结构信息,其中卫星观测数据是不可缺少的融合数据。目前国内采用LAPS系统融合卫星观测数据进行云微物理过程分析的研究较少。刘瑞霞等(2011)将我国风云二号C星(FY2C)静止气象卫星资料融合进入LAPS三维数据分析系统,并分别对融合了地面、雷达、卫星数据后的LAPS三维云量场进行对比分析。结果显示,卫星、雷达和地面观测数据分别从云顶、云中、云底对云量进行调整,从而获得更为客观的三维云量场。LAPS多源资料分析同化技术可为改进三维云结构的模拟和预报提供新途径。

采用LAPS-WRF模式系统进行太阳辐射数值模拟和预报的方法研究较少。Albers et al. (2011)将LAPS-WRF模式系统用于美国俄克拉荷马州、科罗拉多和西德州的太阳辐射预报,于2011年初实现了实时业务预报,并采用120个气象站辐射观测资料进行检验,每天实时预报和检验结果发布于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)网站(<http://laps.noaa.gov/solar>),结果显示,24小时的总辐射预报均方根误差介于 $0\sim 300\text{ W m}^{-2}$ 之间。国内尚未采用LAPS-WRF模式系统进行太阳辐射模拟和预报方

法研究以及业务应用。本文通过研究基于风云卫星资料同化的 LAPS 多时间层三维云分析同化方法,改进三维云结构,并将 LAPS 模式输出结果作为 WRF 模式的初始场,模拟了 2008 年 1 月和夏季的总云量和总辐射的时空分布,重点分析了多云和有降水天气过程总辐射的模拟效果及其改进原因。本文的研究结果对于多云和降水天气条件下太阳辐射的模拟效果改进、太阳能资源客观评估以及光伏电站的发电量预测具有一定的科学意义和实际应用价值。

为了验证和评估 LAPS-WRF 模式系统对太阳辐射的模拟效果,需要客观准确的地面辐射观测数据。由于我国大气本底站和常规辐射观测站使用的国外进口和国产总日射表均采用热电堆原理制成,环境热噪声的干扰不可避免地影响了总日射表的测量精度,从而造成夜间辐射表测量时常出现负的辐射值,即存在一定的热偏移误差,其主要原因是仪器半球罩与辐射传感器之间的温度差异造成的。因此需对地面观测辐射资料进行严格的质量控制和热偏移订正 (Long and Shi, 2008; 王炳忠等, 2008; 程兴宏等, 2009, 2013)。本文参考 Long and Shi (2008) 的质量控制方法和程兴宏等 (2009) 的热偏移订正方法,对模拟时段收集的北京上甸子区域大气本底站逐分钟总辐射观测数据进行了严格的质量控制和热偏移订正。

## 2 LAPS-WRF 模式系统简介和使用资料

LAPS-WRF 太阳辐射模式系统主要由基于卫星资料多时间层同化的局地分析预报系统 LAPS 和中尺度气象模式 WRF 组成,其中 LAPS 在每天 4 次的美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 大尺度背景场中同化了 FY2C 可见光和红外云图数据以及同时刻的探空和地面观测资料,以改进三维云初始场,并为 WRF 模式提供初始场,进行辐射模拟。本文采用刘瑞霞等 (2011) 的方法将 FY2C 卫星数据同化到 LAPS 云分析模块中,即首先将卫星各通道数据提取出来,进行插值、边缘平滑处理以及太阳高度角订正,最后按照 LAPS 需要的格式将卫星资料投影到 LAPS 网格点上,生成中间文件,并作为云分析模块的输入条件。三维云分析模块主要采用了逐步订正方案,获得的云参数包括三维云量场、大气柱

云量、云底高度、云顶高度等,产生的三维云量场用于其他云物理参数如云水、云冰含量、云分类等的计算。经过卫星资料同化后,WRF 模式初始场中除云量外,水汽有较大变化,增加了云水、雨水、雪水、冰水含量等变量。

使用资料包括:2008 年 1 月和夏季华北地区 30 min 一次的 FY2C 静止气象卫星红外通道 ( $11\ \mu\text{m}$  和  $3.9\ \mu\text{m}$ ) 和可见光通道数据;同期全国每天两次的 MICAPS 气象探空资料以及 3 小时一次的 MICAPS 地面气象观测资料;同期上甸子区域大气本底站每日 3 次 [08:00、14:00、20:00 (北京时)] 的人工观测总云量资料以及上述时段逐分钟总辐射观测数据,并采用 Long and Shi (2008) 辐射数据质量控制方法对总辐射分钟数据进行了严格的质量控制,同时进行小时平均处理。需要说明的是为了作图方便,下文中将观测总云量为  $10^{-}$  的值替换为 10。

## 3 LAPS-WRF 模式参数和试验设计方案

### 3.1 LAPS 与 WRF 模式基本参数设置

(1) 网格设置:采用三重单向嵌套网格,中心点位于北京上甸子区域大气本底站 ( $40.65^{\circ}\text{N}$ ,  $117.12^{\circ}\text{E}$ )。第一重网格范围 ( $27^{\circ}\sim 51^{\circ}\text{N}$ ,  $91^{\circ}\sim 141^{\circ}\text{E}$ ),网格数为  $137\times 104$ ,网格距为 27 km;第二重网格范围 ( $35^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$ ,  $108^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ ),网格数为  $148\times 109$ ,网格距为 9 km;第三重网格范围 ( $38^{\circ}\sim 41^{\circ}\text{N}$ ,  $114^{\circ}\sim 119^{\circ}\text{E}$ ),网格数为  $148\times 121$ ,网格距为 3 km;三重网格垂直方向均分为不等距 28 层,其分辨率在大气低层较高并随高度逐渐降低。

(2) 物理过程参数化方案:积云参数化方案为 Kain-Fritsch (new Eta) 方案,边界层参数化方案为 MYJ 湍流动能方案,大气辐射方案为 RRTM 长波和 Dudhia 短波方案。

(3) 模拟时段:2008 年 1、6、7、8 月。

(4) 初边值条件:采用全球  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 、6 h 一次的每天 24 h NCEP 再分析资料作为大尺度气象背景场和边界条件;

(5) 辐射计算频率和输出时间频率:辐射计算频率为 10 min 一次;逐 10 min 输出一次总云量、总辐射等物理量。

### 3.2 试验方案设计

(1) 控制试验:直接采用 NCEP 再分析资料驱动 WRF 模式,进行 24 h 总辐射模拟。

(2) 敏感试验: 首先采用 LAPS 模式将 FY2C 卫星红外和可见光通道数据、MICAPS 探空和地面观测数据同化到同时刻的 NCEP 再分析场资料中, 得到该时刻的三维云客观分析场, 并作为 WRF 模式的初始场, 进行 24 h 总云量和总辐射模拟。在做卫星资料同化时, 每天进行多时间层 (每隔 6 h 一次) 同化, 即同化 00:00、06:00、12:00、18:00 (协调世界时) 的初始场。

### 3.3 晴天、云天、雨天挑选

为了考虑不同天气条件下的总辐射模拟效果, 本文根据上甸子站观测总云量及降水资料将 2008 年 1、6、7、8 月进行了分类, 即分为晴天、多云天和降水天气过程, 天气分类标准如下: (1) 晴天, 总云量低于 2; (2) 多云天, 总云量大于 8, 且低云量大于 5; (3) 降水天气过程, 降水量大于 0.5 mm, 且全天降水时段大于 5 小时。模拟时段共分为 8 个晴天、28 个多云天以及 15 个雨天。本文以 2008 年 6 月 13~16 日一次典型降水天气过程为例进行重点分析。

## 4 云量模拟误差分析

### 4.1 总体时间变化特征

云量模拟效果对于地面太阳辐射的模拟结果影响较大, 本文首先分析了控制试验和敏感试验总

云量的模拟效果。图 1 给出了 2008 年 1、7 月上旬子站每天 3 次观测总云量及卫星资料同化前后总云量的日变化特征。可发现, 同化前后总云量的模拟值与实测值的时间变化趋势基本一致, 但大部分时次总云量的模拟值明显低于实测值; 但近半数时次同化后总云量的模拟值更接近于观测值, 尤其是总云量观测值较大的时刻 (多云或有降水时刻)。即 1 月和 7 月分别有 48%、47% 的时次同化后总云量模拟误差小于同化前, 并且同化后总云量误差小于 3 成的比例分别为 72%、37%。

### 4.2 多云和降水天气过程

本文分析了 2008 年 1 月及 6~8 月多云及有降水时段上甸子站同化前后总云量模拟值与观测值的时间变化特征及其误差特征 (图略)。结果显示, 多数时次同化后总云量的模拟值较同化前有所提高, 即更接近于实测云量, 而且同化后总云量模拟与实测值的时间变化趋势较一致。统计结果表明, 2008 年夏季多云及有降水时段同化后有改进 (同化后总云量模拟误差小于同化前) 的比例为 62%, 其中多云和降水天气过程改进比例分别为 56%、69%, 平均总云量分别提高了 1.9、2.1 成。另外 2008 年 1 月多云条件下改进比例为 72%, 平均总云量提高了 1.7 成。可发现, 经过卫星资料同化后, 多云和降水天气过程多数时段总云量模拟有明显改进, 其中

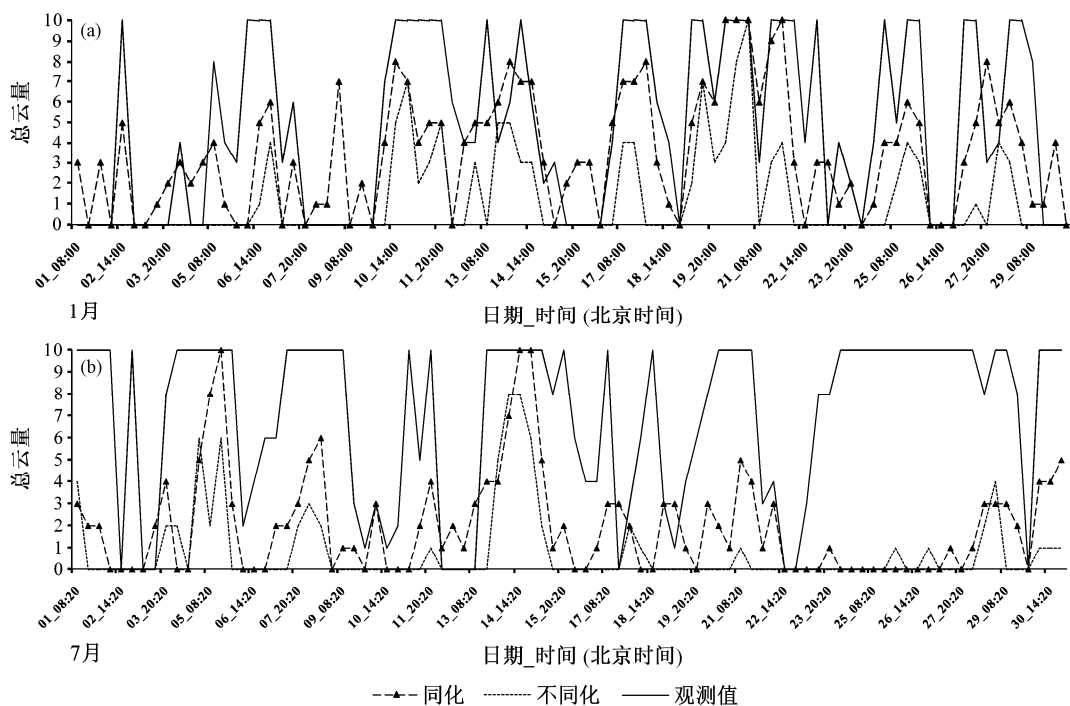


图 1 2008 年 (a) 1 月、(b) 7 月上旬子站观测总云量、同化前后总云量的日变化

Fig. 1 Temporal variation of total cloud amount observed and simulated before and after assimilation at Shangdianzi station in (a) Jan and (b) Jul, 2008

夏季降水天气过程的总云量改进最显著,多云天次之;1月多云天尽管大部分时段有所改进,但平均总云量改进幅度相对较小。

## 5 同化前后总辐射模拟效果分析

### 5.1 概率分布特征

本文分析了云量改进前后 WRF 模式对总辐射的模拟效果差异。图 2 给出了 2008 年 1 月晴天和多云时段上甸子站同化前后 WRF 模拟总辐射误差的概率分布特征。由图 2a 可看出,1 月晴天上甸子站同化前后模拟总辐射误差大部分均介于  $-31 \sim -8 \text{ W m}^{-2}$  之间;误差出现最大概率分别为 22%、25%,其分布范围分别为  $-24 \sim -8 \text{ W m}^{-2}$ 、 $-30 \sim -18 \text{ W m}^{-2}$  之间;由图 2b 可看出,1 月多云天气上甸子站同化前后模拟总辐射误差大部分介于  $-42 \sim +81 \text{ W m}^{-2}$ 、 $-80 \sim +20 \text{ W m}^{-2}$  之间;误差出现最大概率分别为 30%、43%,其分布范围分别为  $-18 \sim +19 \text{ W m}^{-2}$ 、 $-43 \sim -19 \text{ W m}^{-2}$  之间。由上述分析结果可看出,2008 年 1 月晴天同化前后总辐射模拟误差的分布范围不变,但同化后误差最大概率有所增加;多云天气同化前后总辐射模拟误差均比晴天大,但同化后最大概率增加较明显。即 2008 年 1 月晴天和多云天气时段同化后总辐射的模拟效果改进并不显著,主要改进了模拟误差出现的最大概率。

本文亦分析了 2008 年夏季晴天、多云天和有降水天气过程上甸子站同化前后 WRF 模拟总辐射误差的概率分布特征(图略)。结果显示,夏季晴

天上甸子站同化前后模拟总辐射误差大部分均介于  $-80 \sim +40 \text{ W m}^{-2}$  之间;误差出现最大概率分别为 28%、33%,其分布范围分别介于  $-20 \sim +20 \text{ W m}^{-2}$ 、 $-40 \sim 0 \text{ W m}^{-2}$  之间。多云天气上甸子站同化前后模拟总辐射误差大部分均介于  $-80 \sim +320 \text{ W m}^{-2}$  之间;误差出现最大概率分别为 22%、25%,其分布范围均介于  $0 \sim +80 \text{ W m}^{-2}$  之间。有降水时段上甸子站同化前后模拟总辐射误差大部分均介于  $-120 \sim +360 \text{ W m}^{-2}$ ;误差出现最大概率分别为 28%、30%,其分布范围均介于  $-40 \sim +40 \text{ W m}^{-2}$ 。由上述分析结果可看出,2008 年夏季晴天、多云和降水过程同化后总辐射模拟误差的分布范围以及最大概率分布范围均与同化前基本一致,但同化后总辐射模拟误差的最大概率均有所增大。

### 5.2 时间变化特征

本文分析了不同天气条件下 FY2C 卫星资料同化对总辐射模拟效果的影响。

#### 5.2.1 晴天

图 3 给出了 2008 年 1 月和夏季晴天上甸子站同化前后模拟总辐射与观测值的时间变化特征。可发现,晴天条件下卫星资料同化前后总辐射模拟值与实测值的时间变化趋势非常一致,即 1 月同化前后总辐射模拟值与观测值的相关系数大于 0.99,夏季相关系数均为 0.98,而且同化前后两者的相关性差异不明显。但晴天条件下总辐射模拟值总低于实测值,这与 WRF 模式辐射参数化方案对其他主要因子(如气溶胶和臭氧)对大气辐射的影响刻画不细致有关;同化后模拟值与同化前较接近,即卫星

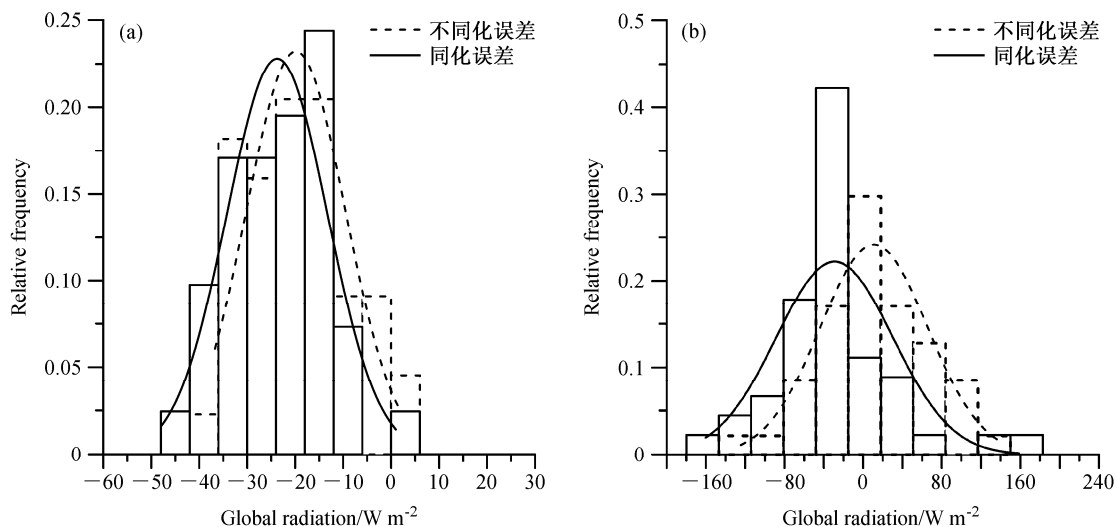


图 2 2008 年 1 月 (a) 晴天和 (b) 多云天气上甸子站同化前后模拟总辐射误差的概率分布

Fig. 2 Probability distribution of simulated errors of global radiation before and after assimilation at Shangdianzi station on (a) sunny and (b) cloudy days in Jan., 2008

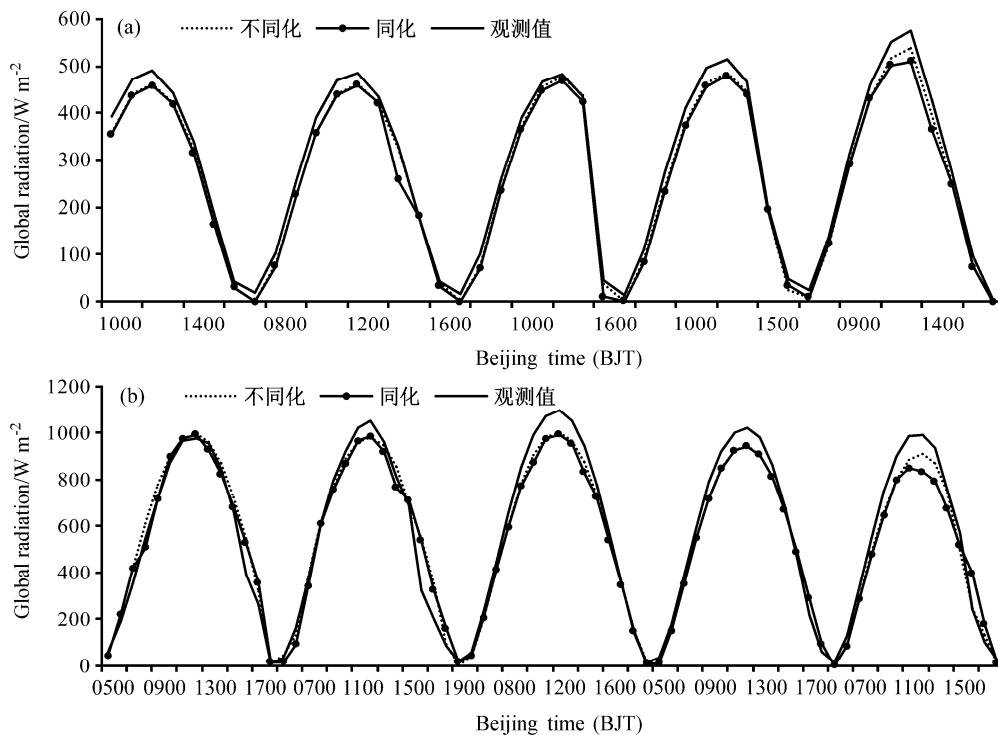


图 3 2008 年 (a) 1 月和 (b) 夏季晴天上甸子站同化前后总辐射模拟值与观测值的时间变化

Fig. 3 Temporal variation of global radiation observed and simulated before and after assimilation at Shangdianzi station on sunny days in (a) Jan and (b) the summer, 2008

资料同化对晴天总辐射模拟结果的影响较小。

### 5.2.2 多云天

图 4 给出了 2008 年 1 月和夏季多云天上甸子站同化前后总辐射模拟值与观测值及模拟相对误差的时间变化特征。由图 4a 和 b 可发现, 1 月多云天气卫星资料同化前后总辐射模拟值与实测值的时间变化趋势亦较一致, 同化前后总辐射模拟值与观测值的相关系数分别为 0.88、0.87, 即同化前后两者的相关性差异较小。多数时段同化前后模拟值低于实测值。同化前后总辐射模拟相对误差较小, 介于  $-100\% \sim 100\%$ , 多数时段介于  $-100\% \sim 0$ ; 同化后模拟相对误差小于同化前的时刻所占比例为 22%, 即多数时段经过卫星资料同化后, 其模拟效果改进不明显。这与 1 月多云天总云量的改进效果不显著有关。由图 4c 和 d 可发现, 夏季同化前后总辐射模拟值与实测值的时间变化趋势亦较一致, 同化前后总辐射模拟值与观测值的相关系数分别为 0.78、0.80, 即同化后两者的相关性较同化前有所改进。但多数时段同化前后模拟总辐射高于实测值。同化前总辐射模拟相对误差较大, 介于  $-100\% \sim 500\%$ ; 同化后多数时段相对误差介于  $-100\% \sim 300\%$ , 即同化后模拟误差显著减小; 同化后模拟相

对误差小于同化前的时刻所占比例为 59%, 而且有 20% 的时刻相对误差减小比例大于 50%。即多数时段经过卫星资料同化后, 其模拟效果改进较明显, 而且 20% 的时刻总辐射模拟误差减小到原来误差的一半以上。

### 5.2.3 降水天气过程

图 5 给出了 2008 年夏季有降水天气过程上甸子站同化前后模拟总辐射与观测值及模拟相对误差的时间变化特征。由图 5a 可看出, 夏季有降水天气过程卫星资料同化前后总辐射模拟值与实测值的时间变化趋势基本一致, 同化前后总辐射模拟值与观测值的相关系数分别为 0.65、0.72, 即同化后两者的相关性较同化前有所改进。多数时段同化前后总辐射模拟值高于实测值。由图 5b 可看出, 同化前总辐射模拟相对误差较大, 介于  $-100\% \sim 700\%$ ; 同化后多数时段相对误差介于  $-100\% \sim 300\%$ , 即同化后模拟误差显著减小; 同化后模拟相对误差小于同化前的时刻所占比例为 60%, 而且有 31% 的时刻相对误差减小比例大于 50%。即多数时段经过卫星资料同化后, 其模拟效果改进较明显, 而且 31% 的时刻总辐射模拟误差减小到原来的一半以上。

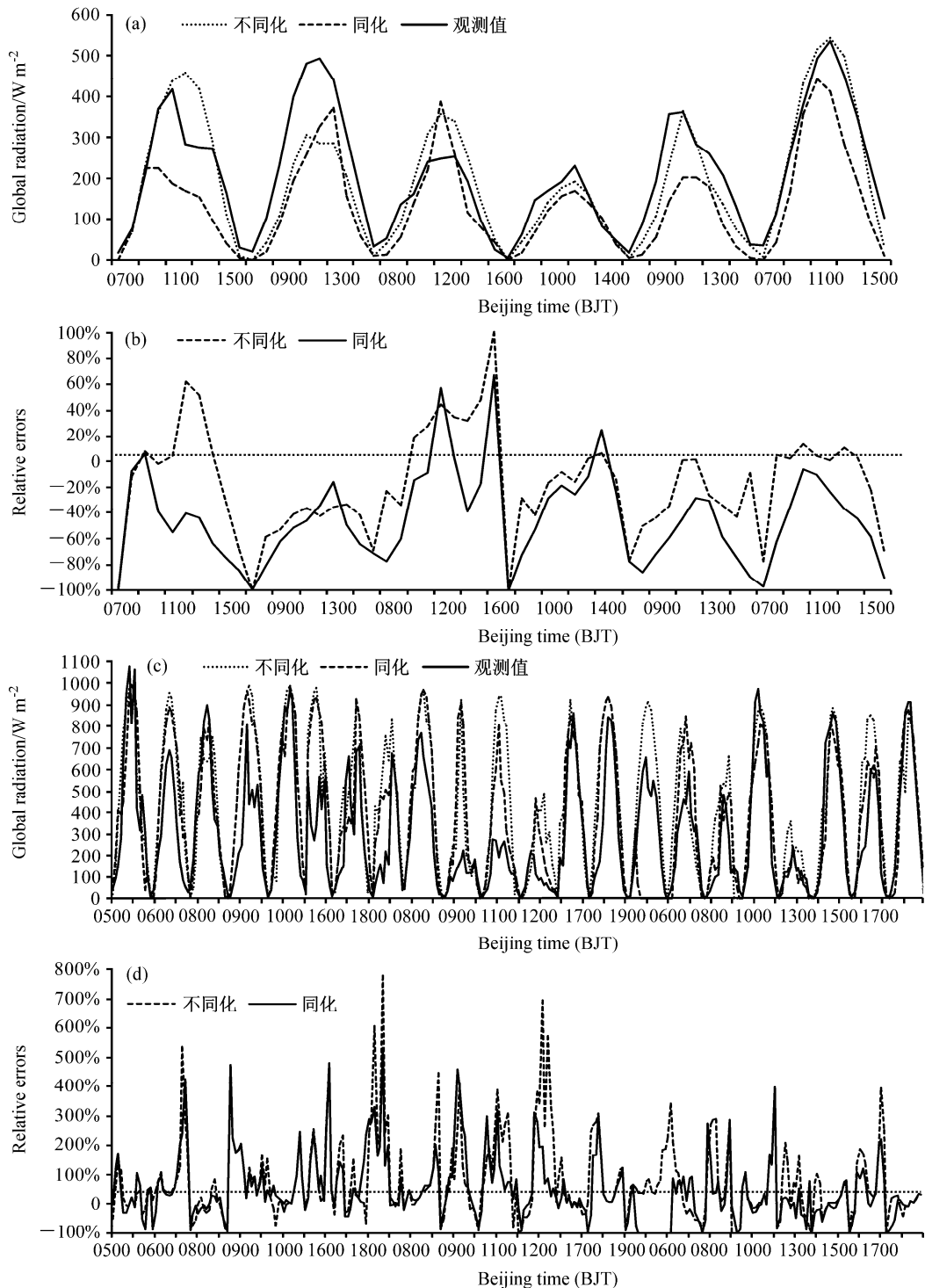


图 4 2008 年 (a, b) 1 月和 (c, d) 夏季多云天上甸子站同化前后总辐射模拟值与观测值及模拟相对误差的时间变化

Fig. 4 Temporal variation of global radiation observed and simulated before and after assimilation and their relative errors at Shangdianzi station on cloudy days in (a, b) Jan and (c, d) the summer, 2008

5.3 典型降水天气过程的总辐射模拟效果

本文分析了一次典型降水天气过程卫星资料同化前后总辐射模拟误差及其原因。图 6 为 2008 年 6 月 13~15 日上甸子站观测总云量和降水量的

时间变化特征。可看出，这是一次典型的夏季锋面降水过程。6 月 13 日为锋前典型天气，白天多云，08:00、14:00、20:00 (北京时，下同) 总云量分别为 10、10<sup>-</sup>、10<sup>-</sup>成。13 日 21:00~14 日 00:00 出现



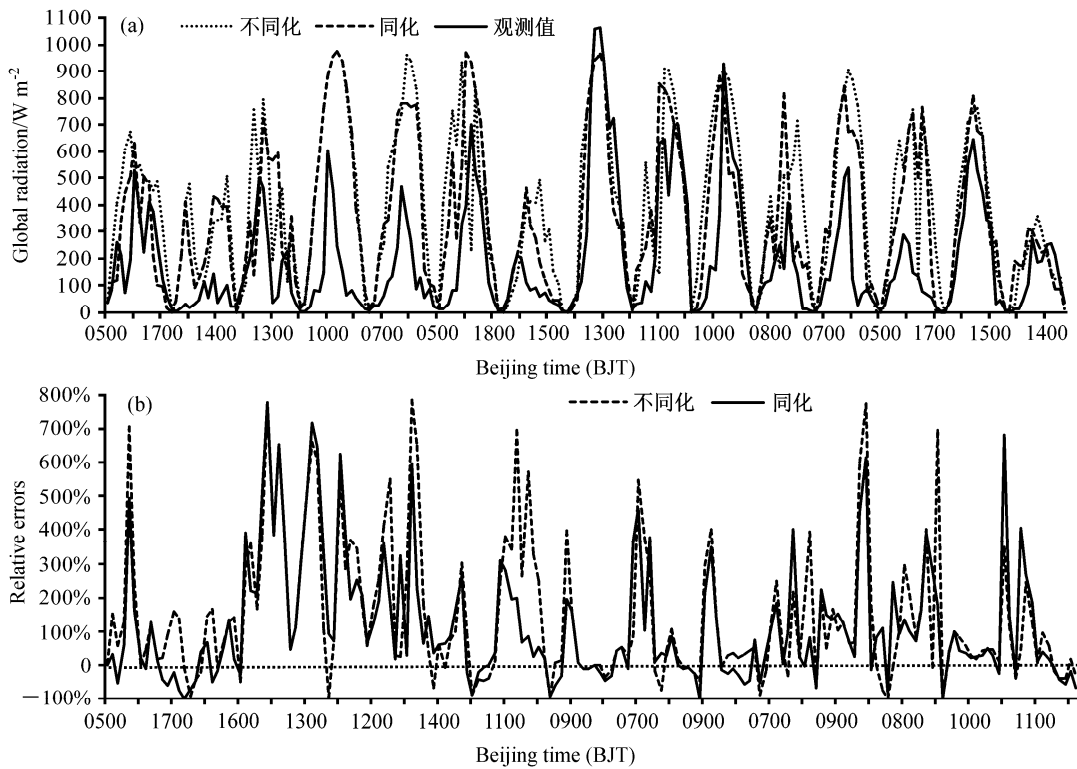


图 5 2008 年夏季有降水天气过程上甸子站同化前后 (a) 总辐射模拟值与观测值及 (b) 模拟相对误差的时间变化  
 Fig. 5 Temporal variation of (a) global radiation observed and simulated before and after assimilation and (b) their relative errors at Shangdianzi station on rainy days in the summer, 2008

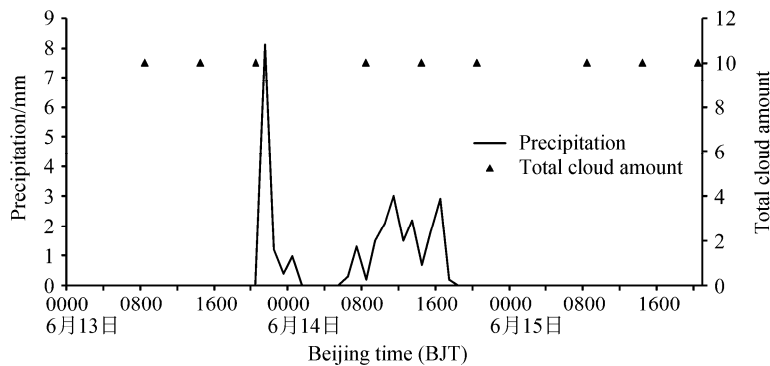


图 6 2008 年 6 月 13~15 日上甸子站观测总云量和降水量的时间变化  
 Fig. 6 Temporal variation of the observed total cloud amount and precipitation at Shangdianzi station during 13-15 Jun 2008

连续降水，其中 22:00 降水量为整个降水过程的最大值 (8.1 mm)。14 日锋面过境，06:00~17:00 出现连续降水，而且 12 小时累计降水达 17.7 mm，为大雨量级；15 日为阴天，3 个时次总云量均为 10 成。

图 7 给出了上述典型降水天气过程上甸子站同化前后总辐射模拟值与观测值的时间变化特征。可看出，该过程卫星资料同化前后模拟总辐射与实测值的时间变化趋势基本一致。多数时刻同化前后总辐射模拟值高于实测值，但大部分时段同化后模拟值较接近于实测值。除 6 月 13 日同化后总辐射改

进时段较少 (12:00~14:00 有改进) 外，6 月 14 和 15 日两天白天总辐射模拟效果均得到显著改进。其中 14 日同化后总辐射模拟效果改进最显著，尤其是降水时段同化后模拟误差显著减小。即白天同化前模拟误差为  $582 \text{ W m}^{-2}$ ，12:00 模拟误差最大，达  $908 \text{ W m}^{-2}$ ；而同化后平均模拟误差为  $130 \text{ W m}^{-2}$ ，除 12:00~14:00 模拟值与实测值的差值较大 (分别为  $258 \text{ W m}^{-2}$ 、 $278 \text{ W m}^{-2}$ 、 $446 \text{ W m}^{-2}$ ) 外，其他时刻模拟误差均小于  $200 \text{ W m}^{-2}$ 。

图 8 给出了同化前后总辐射模拟值与观测值的相关特征。结果显示，同化前后总辐射模拟值与观

测值的相关系数分别为 0.61、0.82，即同化后两者的相关性较同化前显著改进，而且同化后模拟值集中分布于趋势线附近，而同化前模拟值的分布较离散。

本文分析了该典型降水天气过程经过卫星资料同化后总辐射模拟效果改进的原因。本文对比分析了该降水过程每天 08:00、14:00、20:00 三个时刻同化前后总云量模拟值与观测值（图略），结果发现，3 天共 9 个时刻同化前后总云量模拟值均小于

2 成，而观测总云量为 10 或 10<sup>-</sup> 成，即同化前后总云量模拟值远小于观测值。图 9 给出了该过程逐 10 min 上甸子站同化后模拟总云量与同化前的差值的时间变化特征。可看出，除 6 月 13 日外该过程多数时段同化后总云量模拟值较同化前有所增加，其中 14 日增幅较大，9:00 总云量增幅最大，达 3.6 成；15 日白天多数时段的增幅亦大于 1 成。综上所述，尽管 9 个时刻同化后总云量模拟值低于实测值，但 13~14 日有降水时刻和 15 日多云时段同化后总云

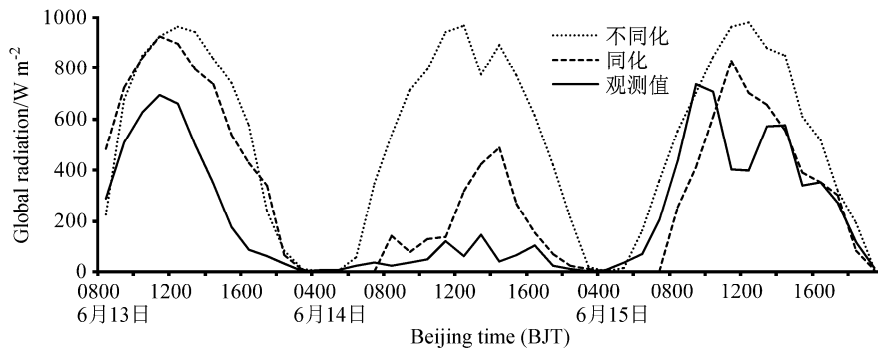


图 7 2008 年 6 月 13~15 日上甸子站同化前后总辐射模拟值与观测值的时间变化

Fig. 7 Temporal variation of global radiation observed and simulated before and after assimilation at Shangdianzi station during 13-15 Jun 2008

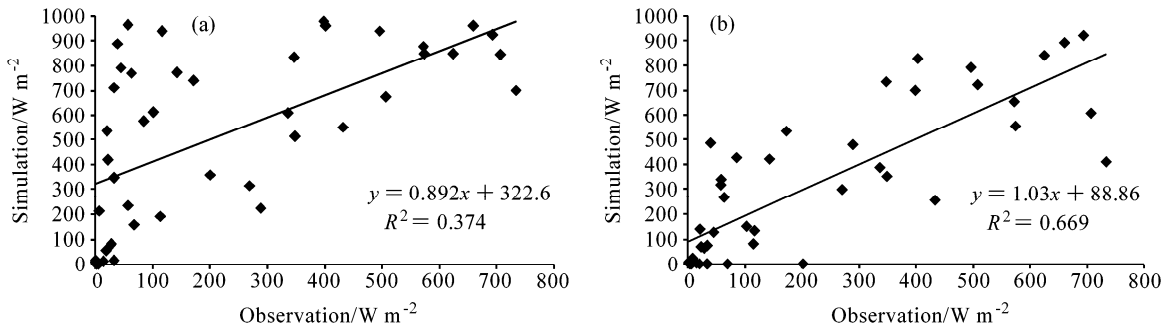


图 8 2008 年 6 月 13~15 日上甸子站 (a) 同化前和 (b) 同化后总辐射模拟值与观测值的散点图

Fig. 8 Scatter plots of global radiation observed and simulated (a) before and (b) after assimilation at Shangdianzi station during 13-15 Jun 2008

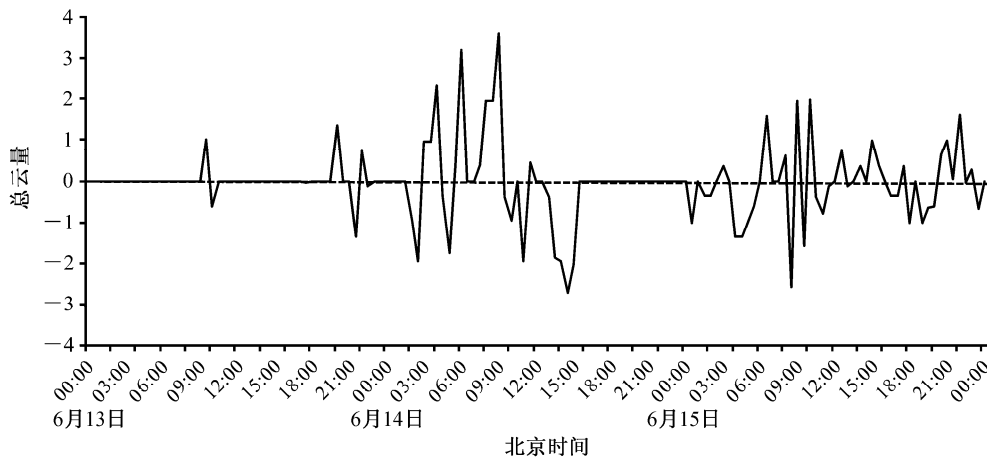


图 9 2008 年 6 月 13~15 日上甸子站同化后模拟总云量与同化前的差值时间变化图

Fig. 9 Temporal variation of difference between simulated total cloud amount after assimilation and that before assimilation at Shangdianzi station during 13-15 Jun 2008

表 1 2008 年 1、6~8 月三类天气条件及 6 月典型降水天气过程同化前后总辐射模拟误差及同化后相对误差小于同化前的比例

Table 1 Simulation errors of global radiation before and after assimilation and reduction ratios of relative error under three weather conditions in Jan., Jul. and during the typical precipitation processes in Jun in 2008

天气类型	同化前均方根 误差/ $W m^{-2}$	同化后均方根 误差/ $W m^{-2}$	同化前平均 相对误差	同化后平均 相对误差	同化前最大 相对误差	同化后对应 相对误差	减小比例
1 月晴天	10.41	15.03	16.85%	20.12%	-99.33%	-99.33%	6.98%
1 月多云	70.00	70.54	35.31%	50.40%	100.48%	67.06%	22.03%
夏季晴天	62.55	63.04	15.03%	16.42%	75.12%	61.35%	43.10%
夏季多云	194.01	182.21	105.70%	80.05%	778.96%	533.47%	59.20%
夏季降水过程	229.17	200.99	185.70%	144.59%	795.30%	554.23%	60.10%
6 月典型降水过程	273.86	171.25	515.62%	159.65%	2597.21%	190.87%	75.00%

量模拟值较同化前有所增加，更接近于实测云量。总云量增加后，云的反射和散射作用增强，导致总辐射模拟值减小，更接近于实测值。

#### 5.4 同化前后总辐射模拟误差分析

表 1 给出了 2008 年 1、6~8 月三类天气条件及 6 月典型降水天气过程同化前后总辐射模拟误差及同化后误差小于同化前的比例统计表。需要说明的是表 1 中同化前后的平均相对误差是相对误差取绝对值后的平均值；同化前最大相对误差是指相对误差中最大的正值或负的最小值，同化后最大相对误差是指与同化前最大误差对应时刻的值；减小比例即为同化后总辐射模拟误差小于同化前的比例。由表 1 可看出，1 月晴天、多云和 7 月晴天三种天气条件下同化前后模拟总辐射误差相对较小（除 1 月多云误差相对较大外，晴天同化前后平均相对误差均小于 21%）；同化后模拟效果改进不明显，因为均方根误差和平均相对误差反而略微增加（均方根误差分别增加 4.6、0.5、0.5  $W m^{-2}$ ，平均相对误差分别增加 3.3%、15.1%、1.4%），但同化后的最大相对误差有所减小，而且同化后部分时刻（6%~43%的时刻）的相对误差小于同化前。这可能与 WRF 模式辐射参数化方案对其他主要因子（如气溶胶和臭氧）对大气辐射的影响刻画不细致以及多云天总云量的改进效果不明显有关。夏季多云、有降水天气过程及 6 月典型降水天气过程三种天气条件下同化前总辐射模拟误差较大（均方根误差均大于 194  $W m^{-2}$ ，平均相对误差均大于 170%），而且最大相对误差较大，均高于 778%。而同化后模拟误差大幅减小，尤其是 6 月典型降水过程同化后均方根误差和平均相对误差较同化前分别减小了 102.6  $W m^{-2}$  和 355.9%，最大相对误差减小幅度最大，高达 2406%；另外同化后总辐射模拟相对误差

小于同化前的比例亦较高，均高于 59%，6 月典型降水过程减小比例高达 75%，即大部分时刻同化后模拟误差均小于同化前。这与该过程总云量模拟效果显著改进有关。本文的云天总辐射模拟误差与美国业务运行预报模式（Albers et al., 2012）的误差分布范围较一致。

## 6 结论与讨论

本文通过研究基于风云卫星资料同化的 LAPS 多时间层三维云分析同化方法，改进三维云结构，并将 LAPS 模式输出结果作为 WRF 模式的初始场，模拟了 2008 年 1 月及夏季的总云量和总辐射的时空分布，重点分析了多云和有降水天气过程总辐射的模拟效果及其改进原因。得出如下初步结论：

(1) 同化前后的总云量模拟值与实测值的时间变化趋势基本一致，大部分时次其值低于观测总云量；多数多云及有降水时次同化后总云量模拟值较同化前更接近于实测云量。其中夏季降水天气过程的总云量改进最显著，多云天次之，1 月多云天改进较小。

(2) 1 月晴天、多云天以及夏季晴天大部分时刻同化前后总辐射模拟误差较小，平均绝对误差分别介于  $-31 \sim -8 W m^{-2}$ 、 $-81 \sim +80 W m^{-2}$ 、 $-80 \sim +40 W m^{-2}$ ；夏季多云天和有降水天气过程多数时刻同化前后模拟误差较大，平均绝对误差分别介于  $-80 \sim +320 W m^{-2}$ 、 $-120 \sim +360 W m^{-2}$ 。同化后总辐射模拟误差的分布范围以及最大概率分布范围与同化前基本一致，但同化后总辐射模拟误差的最大概率均有所增大。

(3) 1 月晴天、多云天以及夏季晴天同化前后模拟总辐射与实测值的时间变化趋势较一致，两者相关系数分别大于 0.99、0.87、0.98，同化前后两

者的相关性差异不明显。晴天条件下同化前后总辐射模拟值均低于实测值。1月多云条件下多数时段同化后总辐射模拟误差减小不明显,这与总云量的改进效果不显著有关。

(4) 夏季多云、有降水及6月典型降水三种天气条件下同化前后总辐射模拟值与观测值的相关系数分别大于0.78、0.65、0.61,但同化后两者的相关性较同化前有所改进,尤其是6月典型降水过程改进较显著。三种天气状况下同化前总辐射模拟误差较大,同化后模拟误差显著减小,尤其是6月典型降水过程同化后均方根误差和平均相对误差较同化前分别减小了 $102.6 \text{ W m}^{-2}$ 和355.9%,最大相对误差减小更显著。同化后总辐射模拟误差小于同化前的比例高达75%,即大部分时刻同化后模拟误差均小于同化前。总辐射模拟效果的显著改进与总云量的改进有关,同化后总云量模拟值增加,云的反射和散射作用增强,导致总辐射模拟值减小,即更接近于实测值。

由于本文模拟时段有限,得出的初步结论有待进一步验证。晴空条件下经卫星资料同化后总辐射模拟误差有所增大,其可能原因是同化时将部分卫星遥感资料的噪音带入模式以及WRF模式辐射参数化方案其他主要因子(如气溶胶和臭氧)对大气辐射的影响刻画不细致,本文将在以后的研究中不断改进同化前卫星资料的质量检验和控制方法,以改进晴天条件下的模拟效果。另外本文基于卫星资料的三维云分析同化方法初步改进了三维云结构,今后将采用雷达、地基GPS资料同化分析方法进一步改进云中和云底结构,进而改进云量、水汽及太阳辐射的模拟效果。本文的研究结果对于多云和降水天气条件下太阳辐射的模拟效果改进、太阳能资源客观评估以及光伏电站的发电量预测具有一定的科学和实际应用价值。

### 参考文献 (References)

- Alberoni P P, Levizzani V, Mezzasalma P, et al. 2000. Impact of meteorological radar and satellite data onto mesoscale analyses [C] // Proceedings of the 3rd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms. Baja Sardinia, Italy.
- Albers S C, McGinley J A, Birkenheuer D L, et al. 1996. The local analysis and prediction system (LAPS): Analyses of clouds, precipitation, and temperature [J]. *Wea. Forecasting*, 11: 273–287.
- Albers S C, Jankov I. 2012. Using the LAPS-WRF system to analyze and forecast solar radiation [C]. American Geophysical Union, Fall Meeting 2011. San Francisco.
- 程兴宏, 张小玲, 郑向东, 等. 2009. PSP 总日射表热偏移特征及其测量总辐射误差分析 [J]. *太阳能学报*, 30 (1): 19–26. Cheng Xinghong, Zhang Xiaoling, Zheng Xiangdong, et al. 2009. Characteristics of thermal offset of a precision spectral pyranometer (PSP) and its error in global solar radiation measurement [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica (in Chinese)*, 30 (1): 19–26.
- 程兴宏, 杨云, 宋建洋, 等. 2013. 总日射表热偏移订正方法研究进展 [J]. *气象科技*, 41 (1): 1–7. Cheng Xinghong, Yang Yun, Song Jianyang, et al. 2013. Progresses in researches on physical mechanisms and thermal offset correction method [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 41 (1): 1–7.
- 崔春光, 李红莉, 彭菊香, 等. 2008. LAPS 资料在一次鄂东初夏暴雨分析中的应用 [J]. *暴雨灾害*, 27 (4): 307–312. Cui Chunguang, Li Hongli, Peng Juxiang, et al. 2008. The application of LAPS data to research a heavy rain in east Hubei Province in the early summer of 2008 [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 27 (4): 307–312.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46: 3077–3107.
- 范惠君. 1997. 应用 LAPS 系统分析风、温度、云和降水 [J]. *气象科技*, (4): 44–48. Fan Huijun. 1997. Application LAPS systematic analysis of wind, temperature, cloud and precipitation [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, (4): 44–48.
- 高华, 谭旭光, 李英华, 等. 2009. 局地分析和预报系统(LAPS)在北京市气象局移植与应用 [C] // 第 26 届中国气象学会年会灾害天气事件的预警、预报及防灾减灾分会场论文集. 北京: 中国气象学会. Gao Hua, Tan Xuguang, Li Yinghua, et al. 2009. Transplantation and application of Local Analysis and Forecasting System (LAPS) in Beijing Meteorological Administration [C] // Proceedings of Early Warning, Forecasting and Disaster Prevention and Mitigation of Severe Weather Events Session of the 26th China Meteorological Society Annual Meeting (in Chinese). Beijing: Chinese Meteorological Society.
- 郭淮, 周天军. 2012. 新旧两个版本 GAMIL 模式对 1997/98 强 El Niño 年西太平洋暖池区独特云辐射强迫特征的数值模拟 [J]. *大气科学*, 36 (5): 863–878. Guo Zhun, Zhou Tianjun. 2012. The cloud-radiative forcing over the western Pacific warm pool during 1997/98 simulated by two versions of LASG/IAP atmospheric general circulation model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (5): 863–878.
- International Energy Agency. 2009. Task 36 2009 Highlights [DB/OL]. <http://www.iea-shc.org/task36/index.html>.
- IPCC. 1990. Climate Change 1989: The IPCC Scientific Assessment [M]. Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J, Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 195–238.
- IPCC. 1992. Climate Change 1991: The IPCC Scientific Assessment [M]. Houghton J T, Callander B A, Varney S K, et al, Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 69–95.
- IPCC. 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change [M]. Houghton J T, Meira Filho L G, Callander, B A, et al, Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 572.
- IPCC. 2002. Climate Change 2001: The Scientific Basis [M]. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA:

- Cambridge University Press, 881.
- Jian G J, Shieh S L, McGinley J A. 2003. Precipitation simulation associated with typhoon Sinlaku (2002) in Taiwan area using the LAPS diabatic initialization for MM5 [J]. *TAO*, 14: 261–288.
- Kain J S, Frisch J M. 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization [J]. *J. Atmos. Sci.*, 47 (23): 2784–2802.
- 李红莉, 崔春光, 王志斌. 2009. LAPS 的设计原理、模块功能与产品应用 [J]. *暴雨灾害*, 28: 64–70. Li Hongli, Cui Chunguang, Wang Zhibin. 2009. Scientific designs, functions and applications of LAPS [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 28: 64–70.
- 刘瑞霞, 陈洪滨, 师春香, 等. 2011. 多源观测数据在 LAPS 三维云量场分析中的应用 [J]. *应用气象学报*, 22 (1): 123–128. Liu Ruixia, Chen Hongbin, Shi Chunxiang, et al. 2011. The application of multi source data to three dimensional cloud amount analysis in LAPS [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 22 (1): 123–128.
- 刘玉芝, 石广玉, 赵剑琦. 2007. 一维辐射对流模式对云辐射强迫的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 31 (3): 486–494. Liu Yuzhi, Shi Guangyu, Zhao Jianqi. 2007. A study of the radiative forcing of clouds by using a one-dimensional radiative-convective model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (3): 486–494.
- Long C N, Shi Y. 2008. An automated quality assessment and control algorithm for surface radiation measurements [J]. *The Open Atmospheric Science Journal*, 2: 23–37.
- Lorenz E, Heinemann D, Wickramaratne H, et al. 2005. Forecast of ensemble power production by grid-connected PV systems [C] // *Proceedings of the 20th European PV Solar Energy Conference and Exhibition*. Barcelona, Spain.
- Mellor G, Yamada T. 1974. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layer [J]. *J. Atmos. Sci.*, 31: 1791–1806.
- McGinley J A, Albers S, Stamus P. 1991. Validation of a composite convective index as defined by a real-time local analysis system [J]. *Wea. Forecasting*, 6: 337–356.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated- $k$  model for the longwave [J]. *J Geophys Res*, 102 (D14): 16663–16682
- Shaw B L, Thaler E R, Szoke E J. 2001. Operational evaluation of the LAPS-MM5 “hot start” local forecast model [C] // *18th Conference on Weather Analysis and Forecasting*. Florida.
- Shaw B L, Birkenheuer D, Albers S, et al. 2003. LAPS diabatically initialized MM5 for the IHOP\_2002 campaign [C] // *Proceedings of the 13th PSU/NCAR Mesoscale Model User’s Workshop*. Boulder, Colombia.
- 沈元芳, 胡江林. 2006. GRAPES 模式中的坡地辐射方案及其对短期天气过程模拟的影响 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1129–1137. Shen Yuanfang, Hu Jianglin. 2006. Slope irradiance scheme in GRAPES and its effect on simulation of short-range weather processes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (6): 1129–1137.
- 石广玉. 2007. *大气辐射学* [M]. 北京: 科学出版社. Shi Guangyu. 2007. *Atmospheric Radiation (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press.
- Shimada T, Kurokawa K. 2006. Grid-connected photovoltaic systems with battery storages control based on insolation forecasting using weather forecast [C] // *Proceedings of Renewable Energy*. Chiba, Japan.
- Sun Z A. 2011. Improving transmission calculations for the Edwards-Slingo radiation scheme using a correlated- $k$  distribution method [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137: 2138–2148.
- Sun Z A, Liu J M, Zeng X N, et al. 2012. Parameterization of instantaneous global horizontal irradiance: Cloudy-sky components [J]. *J. Geophys. Res.*, 117, D14202, doi:10.1029/2012JD017557.
- 王炳忠, 莫月琴, 杨云, 等. 2008. *现代气象辐射测量技术* [M]. 北京: 气象出版社. Wang Bingzhong, Mo Yueqing, Yang Yun, et al. 2008. *Modern Meteorological Radiation Measurement Technology (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 王明欢, 赖安伟, 陈正洪, 等. 2012. WRF 模式模拟的地表短波辐射与实况对比分析 [J]. *气象*, 38 (5): 585–592. Wang Minghuan, Lai Anwei, Chen Zhenghong, et al. 2012. Comparison of WRF forecast downward shortwave radiation with observations—A pilot study [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (5): 585–592.
- 文小航, 吕世华, 孟宪红, 等. 2010. WRF 模式对金塔绿洲效应的数值模拟 [J]. *高原气象*, 29 (5): 1163–1173. Wen Xiaohang, Lü Shihua, Meng Xianhong, et al. 2010. Numerical simulation of oasis effect in Jinta oasis using the WRF model [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (5): 1163–1173.
- 吴其重, 王自发, 崔应杰. 2010. 我国近 20 年太阳辐射时空分布状况模式评估 [J]. *应用气象学报*, 21 (3): 343–351. Wu Qizhong, Wang Zifa, Cui Yingjie. 2010. Evaluating the solar radiation resources of China in recent 20 years by meteorological model [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 21 (3): 343–351.
- 张华. 1999. 非均匀路径相关  $K$ -分布方法的研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文. Zhang Hua. 1999. On the study of a new correlated  $K$ -distribution method for non-gray gaseous absorption in the inhomogeneous scattering atmosphere [D]. Ph. D. dissertation, (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- 张华, 荆现文. 2010. 气候模式中云的垂直重叠假定对模拟的地—气辐射的影响研究 [J]. *大气科学*, 34 (3): 520–532. Zhang Hua, Jing Xianwen. 2010. Effect of cloud overlap assumptions in climate models on modeled earth-atmosphere radiative fields [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (3): 520–532.
- Zhang H, Nakajima T, Shi G Y, et al. 2003. An optimal approach to overlapping bands with correlated  $k$  distribution method and its application to radiative calculations [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D20), doi:10.1029/2002JD003358
- 周后福, 郭品文, 翟菁, 等. 2010. LAPS 分析场资料在暴雨中尺度分析中的应用 [J]. *高原气象*, 29 (2): 461–470. Zhou Houfu, Guo Pinwen, Zhai Jing, et al. 2010. Application of LAPS analysis field in rainstorm mesoscale analysis [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (2): 461–470.