

王明欢, 赖安伟, 陈正洪, 等. WRF 模式模拟的地表短波辐射与实况对比分析[J]. 气象, 2012, 38(5): 585-592.

WRF 模式模拟的地表短波辐射与 实况对比分析^{*}

王明欢¹ 赖安伟¹ 陈正洪^{2,3} 白永清^{2,3} 成 驰^{2,3} 李 芬^{2,3}

1 中国气象局武汉暴雨研究所, 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430074

2 湖北省气象服务中心, 武汉 430074

3 湖北省气象能源技术开发中心, 武汉 430074

提 要: 利用中尺度数值模式 WRFV3 对 2009 年 1、4、8 和 10 月进行了约 4 个月的逐日(0~36 小时)到达地表短波辐射模拟, 将输出结果转换成逐小时太阳总辐射, 并以武汉站为例, 与地表实测逐小时总辐射值进行对比分析。结果表明: (1) 模拟结果与观测结果有较好的对应关系, 4 个月的日间模拟和观测值的相关系数均在 0.8 以上, 均通过了置信度 0.01 的显著性检验。(2) 日间各时刻模拟值与实况相比, 平均预报误差早晚小, 中午大; 平均绝对误差变化趋势与平均预报误差相同, 平均绝对百分比误差则一般早晚大, 09—15 时较小且变化幅度小, 可信度高于其他时刻。(3) WRFV3 模式对太阳总辐射, 在各种气象条件下均有一定预报能力, 尤其以晴天表现最佳。距直接使用模式输出的地表短波辐射结果作为光伏发电系统初值用于发电量预报还有一些误差, 可以尝试采用误差订正等方法修订, 提高数值预报结果的可用性。

关键词: 地表短波辐射, 太阳总辐射, WRF 模式, 太阳能

Comparison of WRF Forecast Downward Shortwave Radiation with Observations—A Pilot Study

WANG Minghuan¹ LAI Anwei¹ CHEN Zhenghong^{2,3} BAI Yongqing^{2,3}
CHENG Chi^{2,3} LI Fen^{2,3}

1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430074

2 Meteorological Service Centre of Hubei Province, Wuhan 430074

3 Meteorological Energy Development Centre of Hubei Province, Wuhan 430074

Abstract: In this paper, the 0—36 h downward shortwave flux at ground surface (SWDOWN) forecasting has been simulated by WRFV3 continuously for approximately four months: January, April, August and October in 2009. The hourly total solar radiation (HTSR) forecasting was converted by the 12—36 h SWDOWN output from WRF simulation. And HTSR forecast was compared with the observation of Wuhan Station. The results show that: (1) the simulation of HTSR is interrelated well with observation. Correlation of every month is larger than 0.8 and corresponds to 0.01 significance levels. (2) Each time HTSR mean forecast errors (MFE) in the morning and evening are smaller than in other time, but the maxima of mean absolute percentage errors (MAPE) appear in the morning and evening. MAPEs from 9 AM to 3 PM change a little and their reliability is higher than in other time. (3) WRFV3 model has ability to forecast the total solar radiation in clear, cloudy or overcast weather conditions, especially good performance in

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006036), 华中区域气象中心科技发展基金重点项目(QY-Z-201010)和中国气象局(气预函[2010]76 号和气预函[2011]35 号)共同资助

2011 年 3 月 31 日收稿; 2011 年 8 月 14 日收修定稿

第一作者: 王明欢, 主要从事数值天气预报. Email: minghuanw@163.com

clear sky. However, this simulation is not a perfect initial field for power prediction of photovoltaic systems. Our future work is to use some methods for correcting HTSR forecast and improve their practical application.

Key words: downward shortwave radiation, the total solar radiation, WRF model, solar energy

引 言

太阳能作为一种可再生和清洁的能源,得到各界越来越多的关注和研究,其应用前景非常广阔。我国太阳能资源丰富,理论储量达每年 17000 亿 t 标准煤^[1]。近年来,我国光伏发电产业在国家大型工程项目、推广计划和国际合作项目的推动下迅速发展。但是,太阳辐射受天气因素(如云)的影响较大。所以,光伏发电利用自然界能量的同时,也受制于气象条件。为了管理和业务化光伏发电系统,有效利用光波能源就需要可靠的天气预报信息。并且随着太阳能光伏发电量的不断增加,辐射预报也越加显得重要。频繁的预报失误,将会导致巨大的经济损失,进而限制可再生能源的推广。因此,如何预报成为一个新的关键点。

近年来,对太阳辐射的研究观测进展很多^[2-3],为光伏电力预报打下一定的基础。周晋等^[4]建立了日总太阳辐射月均值的神经网络估算模型,利用实测气象数据资料对神经网络进行训练和检验,检验结果表明此方法是可靠和准确的。徐维^[5]进行了短时间尺度太阳辐射数据的时间序列模型(ARMA)的研究,提出了相关的建模、模拟与预报方法,建立了 4 种时间尺度的 ARMA 模型,并验证了该模型能够准确反映存在于短时间尺度太阳辐射数据的相关性。2010 年,针对光伏发电量的预报研究,湖北省气象局牵头编制了全国“太阳能光伏发电预报系统研究 2010 年工作方案”、在 2010 年行业专项“太阳能预报技术研究”中单列一个专题开展太阳辐射预报,这些工作不仅为全国太阳能预报技术研究工作奠定了基础,也将为光伏发电系统的推广和发展提供有力支持和保障。目前,湖北利用取得的发电量资料建立了辐射-发电量预报方程,进行光伏发电量预报试验研究。

现代天气预报方法覆盖着各种不同的应用领域和研究技术。目前,最常用的预报方法可能就是应

用数值天气模式提供多种预报时效和多种空间尺度的天气预报。每种方法都有一定的优势,也存在着不足。目前,随着计算机性能的不断改进,大气数值模式分辨率也显著提高,数值天气模式逐渐完善。无论在计算能力还是预报效果方面,中尺度数值天气模式作为业务或者准业务的模式都具有了一定的可行性,得到了广泛的推广和应用。试图解决光伏发电预报能力的重点已经集中在需要大量计算能力和充分考虑了多种物理过程的数值天气预报上。采用数值模式预报模拟技术可以克服观测的局限性,为光伏发电预报提供客观、定量的依据。

美国的多个研究部门及大学的科学家共同参与开发研究了新一代中尺度预报模式和同化系统——WRF 模式(Weather Research and Forecast Model)^[6-7]。该系统开发的目的是建立一个具有可移植、易维护、可扩充、高效率、用户界面友好的等诸多特性的模式。

本文希望利用中尺度数值模式 WRF 模拟到达地表短波辐射量,通过批量试验检验中尺度模式对太阳总辐射的预报能力,进而为光伏发电量的预报提供依据。

1 试验设计

本文使用的 WRF 模式设置如下:采用一层网格,模式中心位于(31.0°N、112.5°E),水平格点数为 201×182(图 1),水平分辨率为 15 km,垂直方向有 35 层,时间步长为 60 s。主要的物理过程包括:WRF Single-Moment 6-class 微物理方案、Grell-Devenyi ensemble 积云参数化方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、Monin-Obukhov 近地面层方案、四层土壤的热扩散方案、MRF 边界层方案等。其中 Dudhia 短波辐射方案来自于 MM5 模式^[8],它简单地计算了由于晴空散射、水汽吸收、以及云的散射、反射和吸收(应用 Stephens 的云对照表)^[9]所引起的向下太阳短波辐射通量^[10-11]。

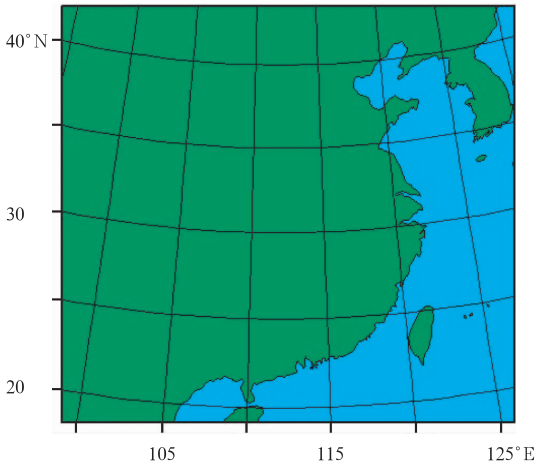


图 1 模拟区域示意图

Fig. 1 Diagram of modeling domain

试验的具体方法:利用 NCEP 预报场 GFS 数据作为 WRF 模式初始场和边界条件,为了与未来实际业务接轨,模式从每日 20 时(北京时,下同)开始起报,积分 36 小时,逐小时输出向下到达地表短波辐射通量(Downward short wave flux at ground surface, SWDOWN; 单位: $W \cdot m^{-2}$)。本次批量试验进行了 2009 年 1、4、8 和 10 月共 4 个月的模拟(缺失 GFS 数据的部分日期:2009 年 4 月 30 日 12 时、8 月 1—5 日 12 时、8 月 26 日 12 时)。为了保持时间段的连续性,取 12~36 h 积分时间段的模拟值进行分析。

2 气象资料与方法

选用的观测资料是一级辐射观测站武汉站(30°37'N、114°08'E,海拔高度 23.1 m)逐小时到达地面的太阳总辐射——曝辐量(简称太阳总辐射,单位: $0.01 MJ \cdot m^{-2}$)和每日日间 2 次(08 和 14 时)云量。模式输出瞬时到达地表短波辐射通量(世界时)乘以 0.36 近似转换为对应的逐小时的辐射曝辐量(单位: $0.01 MJ \cdot m^{-2}$),即逐小时太阳总辐射。

3 结果分析

在观测实践中发现,云量情况不同,其总辐射也随之发生变化^[12]。当观测辐射数据出现异常时,往往需结合当时的天气条件如云量、降水、天气现象等来判断^[13],避免错误记录。因此,本文将使用观测的太阳总辐射和云量来对比分析模式的模拟结果。

到达地面的太阳总辐射集中在白天时段,以武汉站为例,将模式模拟的 2009 年 1、4、8 和 10 月的日间逐小时太阳总辐射与实况进行对比分析。表 1 为每个月的日间时间段和样本数。1 和 10 月日间时间段共 12 小时,4 和 8 月日间时间段略长,共 14 小时。并且根据日间两次观测云量(08 和 14 时),将天气状况分成晴、多云和阴^[14],并统计出不同天气状况对应的逐小时太阳总辐射模拟与实况的样本数(表 2)。

表 1 1、4、8 和 10 月逐小时太阳总辐射日间时间段和样本数

Table 1 The daylight hours and corresponding number of samples for the Wuhan hourly total solar radiation in January, April, August, and October 2009

	1 月	4 月	8 月	10 月
日间时间段	07—18	06—19	06—19	07—18
样本数/个	360	392	336	360

表 2 云量分类和对应样本数

Table 2 Cloud cover category and corresponding number of samples

	晴	多云	阴
云量(08 和 14 时)	0~3	3~7	7~10
样本数/个	59	24	141

3.1 8 月结果分析

图 2 为 2009 年 8 月日间模拟与观测的逐小时的太阳总辐射及观测云量时间序列图。从中可以看出,模拟太阳总辐射一般从 06 时开始出现,并逐渐增加,到中午达到峰值,之后逐渐减小,20 时至次日 05 时为零。该变化趋势与天文辐射基本一致,也与实际观测基本吻合。其中,模式对 8 月 10、16—26 和 29 日模拟太阳总辐射在大小和变化趋势上都与实况非常接近,而在 8 月 13、14、28 和 30 日,模拟效果与观测相差较大。通过分析,当云量覆盖不足 3 成时,模拟效果通常较好;多云(云量 3~7 成)的时次数比晴(云量 0~3 成)的时次数少,这种情况下模拟的太阳总辐射趋势也与实况基本一致;当云量覆盖为 9~10 成时,尤其是连续几天都是阴天,与前两种情形相比,模拟效果普遍较差;但也有云量为 10 成时预报较好的例子,如 29 日观测的逐小时太阳总辐射均在 50(单位: $0.01 MJ \cdot m^{-2}$) 以下,模拟结果也在 70(单位: $0.01 MJ \cdot m^{-2}$) 以下,与实况基

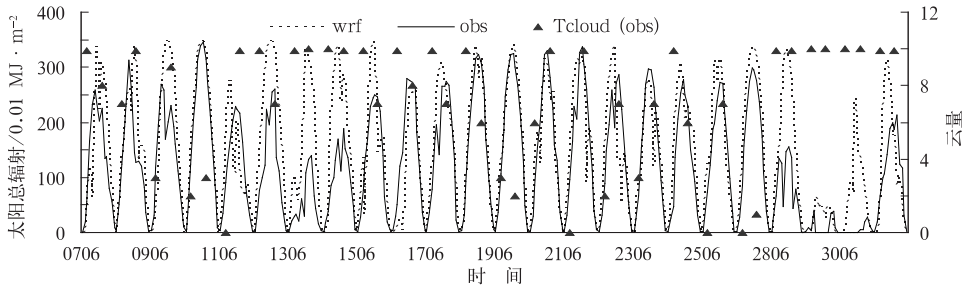


图 2 武汉市 2009 年 8 月日间模拟与观测的逐小时太阳总辐射以及观测云量的时间序列图
(横坐标:时间,为日和时,下同)单位: $0.01 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 2 Time series of the Wuhan daylight hourly total solar radiation simulation (dashed) and observation (solid) and observed cloud fraction (right ordinate) for 24 days in August 2009
(x axis:DDHH, unit: $0.01 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)

表 3 2009 年 1、4、8 和 10 月日间逐小时太阳总辐射的模拟结果与观测资料的相关系数
Table 3 The correlation coefficients between simulation and observation of Wuhan daylight hourly total solar radiation during 4 months of 2009

	1 月	4 月	8 月	10 月
相关系数	0.863	0.866	0.810	0.806

本一致。8 月的日间的模拟和观测的相关系数在 0.810,通过了置信度 0.01 的显著性检验(表 3)。

3.2 1、4 和 10 月结果分析

图 3a、3b 和 3c 分别为武汉站 2009 年 1、4 和 10

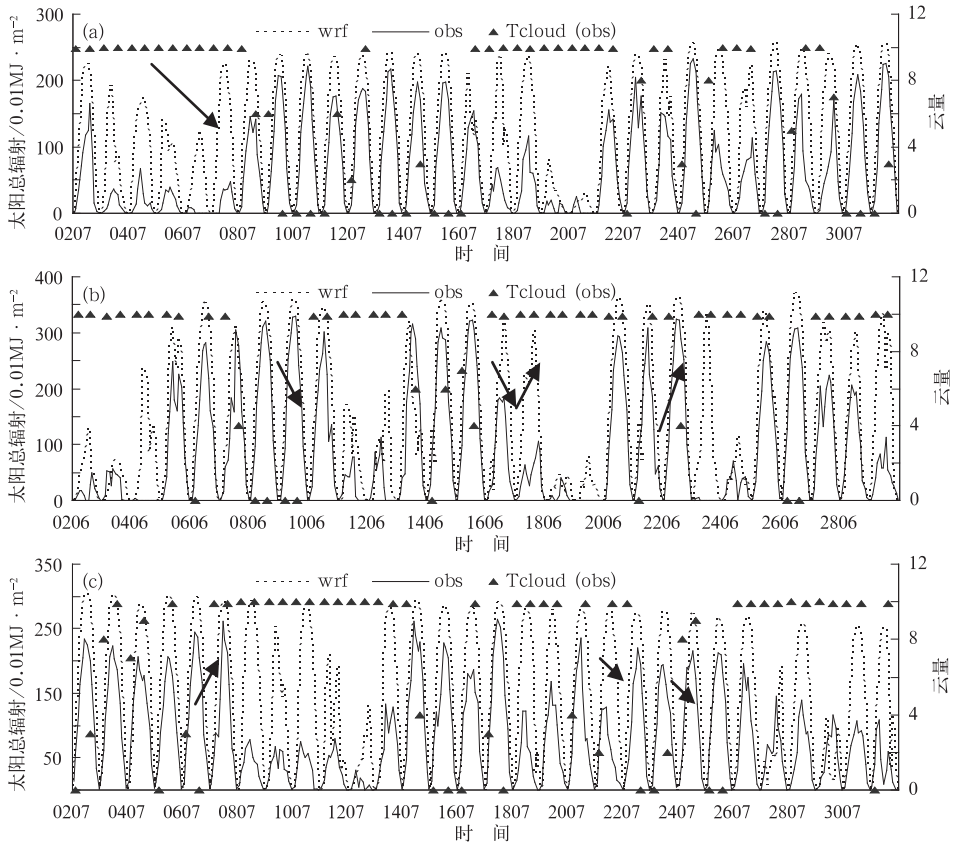


图 3 武汉市 2009 年 1(a)、4(b)和 10 月(c)日间模拟与观测的逐小时太阳总辐射以及观测云量的时间序列图
(单位: $0.01 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,箭头为变化趋势标记)

Fig. 3 Time series of the Wuhan daylight hourly total solar radiation simulation (dashed) and observation (solid) and observed cloud fraction (right ordinate) for January (a), April (b), and October (c) 2009, respectively
(unit: $0.01 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, arrows show the trend)

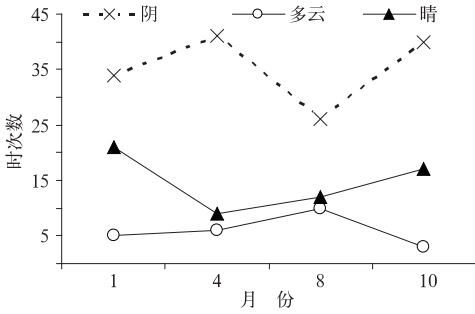


图 4 武汉市 2009 年 1 月、4 月、8 月、10 月统计的日间阴、多云、晴的时次数

Fig. 4 Day light times of the clear, broken, or overcast skies in January, April, August and October 2009, respectively

月日间模拟与观测的逐小时的太阳总辐射时间序列图叠加了两个时次的观测云量。图 4 是根据实际观测云量将天气类型分类得出的 4 个月日间阴、多云和晴的时次数。

从图 3 中可以看出,模拟的太阳总辐射日变化趋势与天文辐射基本一致,与实际观测结果也基本吻合。1、4 和 10 月日间的模拟和观测的相关系数均在 0.8 以上,都通过了置信度 0.01 的显著性检验(表 3)。在图 3a 中,1 月 2—6 日太阳总辐射有一次减少的过程,虽然模拟值比观测值偏大,但是仍有下降。1 月 19 和 20 日模拟值的大小和趋势变化与实际非常接近。4 和 10 月也有类似的情形。

1、4 和 10 月当中,阴天时次较多,其次是晴天,最少的是多云(图 4)。不同天气类型下逐小时太阳总辐射的模拟效果与 8 月具有相似的特点。可见模式对逐小时太阳总辐射的模拟具有一定的参考价值。

3.3 误差分析

本文采用的部分统计量如下:

平均预报误差:

$$MFE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_f^i - P_o^i) \quad (1)$$

平均绝对误差:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_f^i - P_o^i| \quad (2)$$

平均绝对百分比误差:

$$MAPE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_f^i - P_o^i|}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_o^i} \times 100\% \quad (3)$$

相对均方根误差:

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_f^i - P_o^i|^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_o^i} \times 100\% \quad (4)$$

式中, i 表示第 i 个样本数, N 表示样本数, P_f^i 是第 i 个模式输出值, P_o^i 是第 i 个观测值。

3.3.1 日间各时刻误差统计分析

图 5 和 6 是日间各时刻模拟值与实况进行误差统计分析的结果。从图 5 看出,平均预报误差(MFE)早晚较小,中午最大,分布近似拱形。1、4 和 8 月的 11—13 时的 MFE 较大,而 10 月 12—14 时的 MFE 较大。8 月除了早晚的 MFE 比其他 3 个月的略大,其他时刻均小于另外 3 个月。1 和 4 月 MFE 比较接近,10 月 MFE 在 11—18 时明显大于其他 3 个月。

从平均绝对百分比误差(MAPE)图(图 6)上可以看出,一般情况下,MAPE 在早晚较大(除 1 月 07 时外),其他时刻比较稳定,变化幅度较小,模拟的可信度高于其他时刻。1 月 07 时预报与实况非常吻合。8 月 09—18 时之间的 MAPE 走势较平稳,大小在 27%~43% 波动,而在早 6 时和晚 19 时的 MAPE 接近 100%。4 月的 MAPE 变化趋势类似 8 月,但数值略大,09—18 时的 MAPE 变化范围在 41%~62%。1 和 10 月的 MAPE 波动较大,两者的变化趋势具有反相位的特点,1 月 MAPE 变化范围不超过 100%,但 10 月 MAPE 从 08 时开始

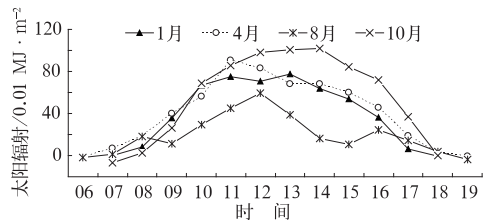


图 5 武汉市 2009 年 1、4、8 和 10 月日间各时刻太阳总辐射模拟和观测结果的平均预报误差(MFE)

Fig. 5 The MFE of Wuhan hourly total solar radiation for every daylight hour in January, April, August and October 2009, respectively

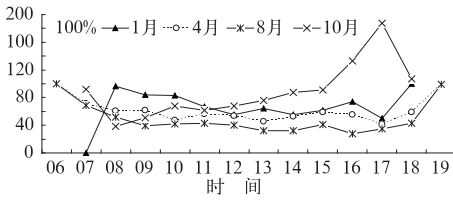


图 6 武汉市 2009 年 1、4、8 和 10 月日间各时刻太阳总辐射模拟和观测结果的相对平均绝对百分比误差 (MAPE, 单位: %)

Fig. 6 The MAPE (unit: %) of Wuhan hourly total solar radiation for every daylight hour in January, April, August and October 2009, respectively

一路上升, 17 时的 MAPE 近似 190%, 18 时又下降。

总体来讲, 8 月日间各时刻的预报效果较好, 然后依次为 4、1 和 10 月。每个月的 09—15 时之间的 MAPE 变化波动较小, 模拟的可信度也高于其他时刻, 并且该时段到达地表的太阳短波辐射较为充足, 具有较高的利用价值。

3.3.2 不同天气类型下的误差统计分析

将每天两个时次的逐小时太阳总辐射和云量按照天气类型进行整理分析。图 7~9 分别为晴、多云和阴天天气类型下模拟与观测逐小时太阳总辐射及观测云量的时间序列图。

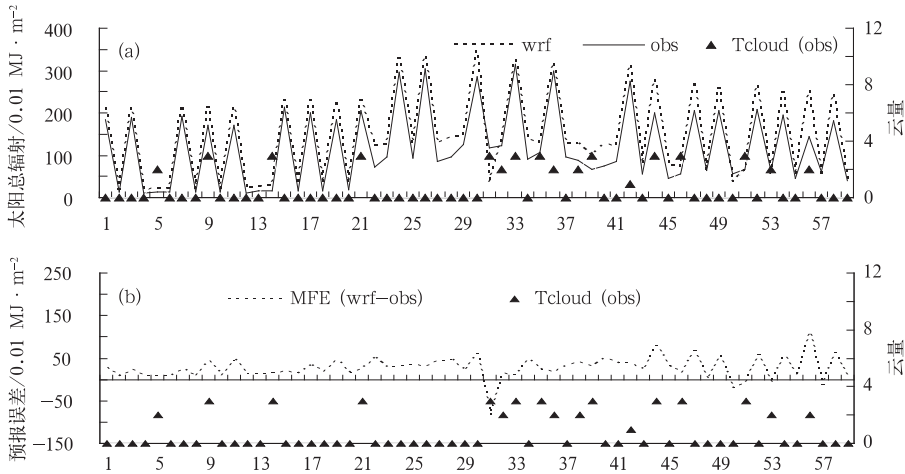


图 7 天气类型为晴时逐小时太阳总辐射模拟和观测结果 (a) 及对应的预报误差 (b)

Fig. 7 Time series of the hourly total solar radiation simulation and observation (a) and corresponding forecast errors (b) in clear skies

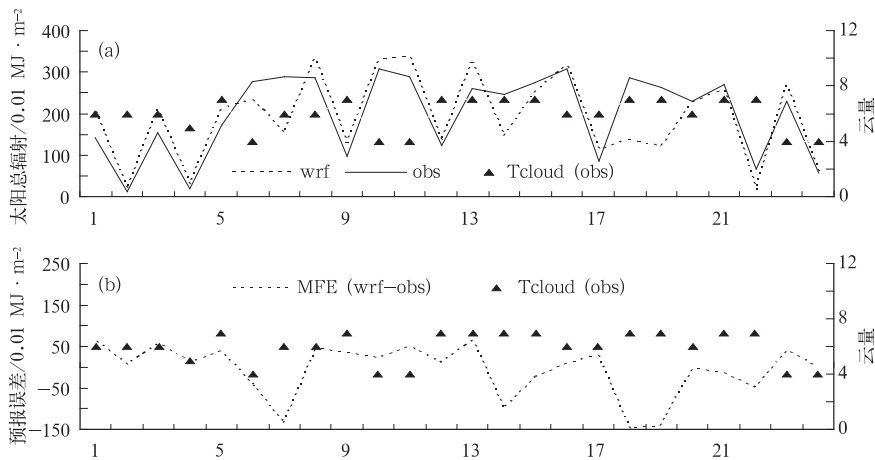


图 8 同图 7, 但天气类型为多云

Fig. 8 Same as Fig. 7, but in broken skies

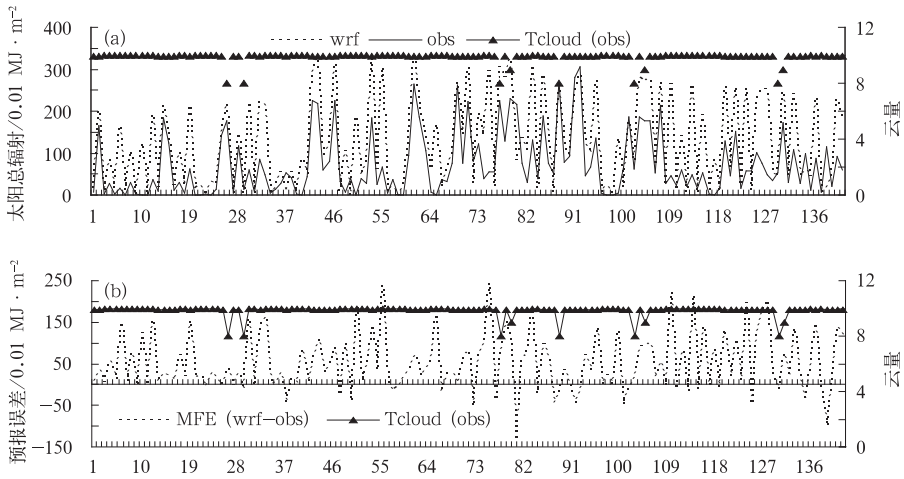


图 9 同图 7,但天气类型为阴
Fig. 9 Same as Fig. 7, but in overcast skies

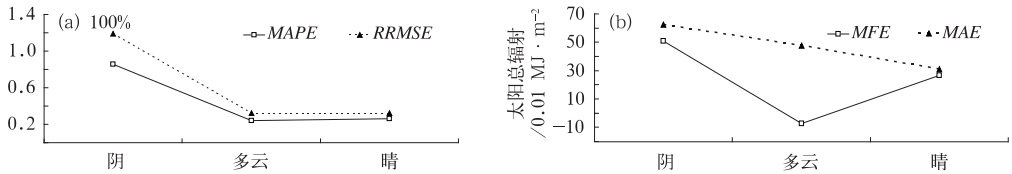


图 10 晴、多云和阴不同天气类型下的 MAPE 和 RRMSE(a)
以及 MFE 和 MAE(b)

Fig. 10 MAPE,RRMSE (a) and MFE, MAE (b) in clear, broken, or overcast skies

晴天共有 59 个样本。晴天下的模拟与观测变化趋势非常接近(图 7a)。绝大部分是正的预报误差,只有 1 个时次超过 100(单位:0.01 MJ · m⁻²) (图 7b)。

多云共有 24 个样本,不足晴天的一半。多云天气的模拟与观测变化趋势基本吻合(图 8a)。预报误差有正有负,负的绝对值最大为 149.4(单位:0.01 MJ · m⁻²)左右,正的预报误差普遍不超过 50 (图 8b)。

阴天共有 141 个样本,远多于晴天和多云的时次数。阴天时的云量在 7 成以上,而云是影响到达地面太阳短波辐射的重要因素之一,因此对阴天的太阳短波辐射模拟具有一定的难度。从图 9a 中可以看出,一些时次模拟与实况比较一致,但较前两种天气类型模拟效果,还有一定的差距。预报误差以正值居多,且多在 100(单位:0.01 MJ · m⁻²)以上 (图 9b)。

图 10 统计出不同天气类型下的 MAPE 和 RRMSE 以及 MFE 和 MAE。在阴天的情况下,

MAPE、RRMSE 和 MAE 都比较大。在多云和晴天的情况下,两者的 MAPE 和 RRMSE 几乎相当,但多云天气下的 MAE 大于晴天。对于 MFE,阴天最大且为正,即预报比实际偏大。多云天气下的 MFE 为负,不到 -20(单位:0.01 MJ · m⁻²),即预报比实况偏小。晴天天气下的 MFE 为正。

综上所述,WRFV3 模式对太阳总辐射,在不同天气类型下有一定预报能力。阴天天气下模拟的效果普遍不如晴天和多云天气。鉴于多云天气的样本比晴天少,虽然晴天的 MAPE 略大于多云天气,综合考虑之后,仍以晴天模拟效果最好。

4 结 论

本文利用中尺度数值模式 WRFV3 进行了近 4 个月的向下到达地表短波辐射模拟,并将逐小时输出结果转换成逐小时太阳总辐射进行详细对比和误差分析,结果表明:

- (1) 从总体上看,模拟与实际观测结果的相关

性较高,4 个月的日间模拟和观测值的相关系数均在 0.8 以上,且均通过了置信度 0.01 的显著性检验。模式对太阳总辐射具有一定的预报能力和可信度。09—15 时的太阳总辐射较为充足,利用价值较大,这个时段的各时刻模拟的平均绝对百分比误差小于其他时刻。

(2) 模拟结果得到的 4 个月的时间序列包含了在不同天气条件下地表短波辐射情况。晴天对辐射的预报能力最佳,多云次之,阴天普遍较差。从 4 个月的时间序列来看,模式对于太阳总辐射的变化趋势具有一定的可信度。

(3) 太阳总辐射预报误差存在的原因,至少部分上,是由于短波辐射方案中使用的云量存在的不确定性或偏差。虽然 WRF 模式对太阳总辐射预报具有一定的预报能力。但是数值模式并不能十分精确的再现观测。由于太阳辐射资源评估与预报是太阳能光伏发电系统发电量计算(以制定发电规划、电力调度)与预报分析的关键基础之一,所以若直接使用模式输出的辐射值作为光伏发电系统初值仍存在一些误差,可以采用误差订正等方法进行修订,提高数值预报结果的可用性。

参考文献

- [1] 简讯. 我国太阳能储量达每年 17000 亿吨标准煤[J]. 化工学报, 2005, 56(3): 399.
- [2] 权继梅, 丁蕾, 郑向东, 等. 总辐射表两种现场校准方法的比较[J]. 气象, 2010, 36(9): 116-119.
- [3] 刘香娥, 王广河. FY-2C 静止气象卫星红外通道辐射特性研究[J]. 气象, 2010, 36(2): 39-47.
- [4] 周晋, 吴业正, 晏刚, 等. 利用神经网络估算太阳辐射[J]. 太阳能学报, 2005, 26(4): 509-512.
- [5] 徐维. 基于时间序列分析的短时间尺度太阳辐射模型研究[J]. 常州工学院学报, 2009, 22(1/2): 41-44.
- [6] <http://www.wrf-model.org/index.php>.
- [7] 章国材. 美国 WRF 模式的进展和应用前景[J]. 气象, 2004, 30(12): 27-31.
- [8] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. J Atmos Sci, 1989, 46(20): 3077-3107.
- [9] Lacis A A, Hansen J E. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere[J]. J Atmos Sci, 1974, 31: 118-133.
- [10] 沈元芳, 胡江林. 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, 2006, 30(6): 1129-1137.
- [11] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3[G]. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2008: 113.
- [12] 贾东奇. 浅谈辐射变化规律与辐射观测[J]. 气象, 1996, 22(2): 56-57.
- [13] 郭发辉, 王颖. 气象辐射资料准实时处理系统的研制[J]. 气象, 2003, 29(7): 19-22.
- [14] Armstrong M A. Comparison of MM5 Forecast Shortwave Radiation with Data Obtained from the Atmospheric Radiation Measurement Program[D]. College Park: Univ of Maryland, 2000.