

CMA-WSP 地面辐射预报产品的检验评估

朱 燕¹,王 明^{1,2},许沛华¹,孟 丹¹,陈正洪¹

(1. 湖北省气象服务中心, 湖北 武汉 430205;

2. 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, 湖北 武汉 430205)

摘要: 基于湖北华石光伏电站 2022 年 4~9 月地面辐射观测数据,评估了中国气象局风能太阳能预报系统(CMA-WSP)地面辐射产品的预报准确性。整体而言,CMA-WSP 预报未来 5 d 的地面太阳辐射与观测的相关系数在 0.85~0.91 之间,第 1 d 的预报效果最好,随着预报时长的增加,预报准确率逐渐降低;从逐月效果来看,CMA-WSP 对 8~9 月份地面辐射预报效果最好,5~6 月份预报准确率相对较低;就日变化来看,CMA-WSP 对 10:00~16:00 时地面辐射的预报效果相对较差,其他时段较好;CMA-WSP 对地面辐射的预报存在较强季节性,春季不同时效的预报结果差异较大,夏季不同时效预报结果相对稳定,秋季预报效果最为稳定,预报结果与观测值的相关系数达 0.92。总体来说,CMA-WSP 系统对湖北地面辐射预报效果较好,能为湖北省光资源的短期预报提供较好的支撑。

关键词: CMA-WSP;光伏电站;地面太阳辐射;预报检验

中图分类号: TK514

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0225-04

1 引言

太阳能作为一种可再生的清洁能源具有巨大的开发潜力,合理开发利用太阳能是实现国家“碳达峰、碳中和”目标远景的一项重要举措^[1]。太阳辐射具有间歇性、波动性和周期性的特点,云的生消及移动影响太阳辐射,从而引起光伏发电量的急剧波动,威胁电网的安全性和稳定性^[2]。因此,对太阳辐射短时临近的预报是光伏发电平稳调度的重要保障。提高地面辐射预报准确率,不仅对优化电网调度、电力负荷的合理分配具有重要意义,也是目前太阳辐射预报领域最具有挑战性的课题之一。为推动我国新能源行业发展,中国气象局预报司组织中国气象局公共气象服务中心、北京市气象局等单位,改进了中国气象局风能太阳能气象预报系统(CMA-WSP),制作了省级风能太阳能短期预报产品。但模式直接输出结果用于预报和业务还存在一定误差^[3-4]。目前,对不同的地面太阳辐射产品已开展了大量评估和检验。

如顾婷婷等^[5]评估检验了浙江省中尺度数值预报业务系统逐时模拟结果,为该系统地面太阳辐射产品的预报和订正提供了依据;丁立国等^[6]利用贵州高原山区 7 个辐射站数据,对 FY-4A 地面太阳辐射产品数据质量进行了检验分析;王林等^[7]基于湖北省气象新能源研究中心光伏电站 1 年完整的发电数据与同期气象资料,对辐射和发电功率短期预报方法进行了检验分析。但已有研究对中国气象局风能太阳能预报系统地面辐射产品的检验还很少。鉴此,本文以湖北省华石光伏电站逐 15 min 的地面辐射观测资料为基础,基于统计方法从不同角度检验 CMA-WSP 模式对地面辐射的预报能力,分析其预报产品的质量特点和误差产生原因及其在湖北地面辐射预报中的适用性,旨在为 CMA-WSP 地面辐射产品的应用和订正提供参考。

2 研究资料和方法

收稿日期: 2023-02-10, **修回日期:** 2023-03-15

基金项目: 湖北省自然科学基金—气象创新发展联合基金项目(2022CFD017);湖北省气象局科研项目(2023Q12);湖北省自然科学基金青年项目(2023AFB543)

作者简介: 朱燕(1995-),女,硕士研究生,研究方向为风能太阳能资源评估、应用气象,E-mail:zhuyan620@163.com

通讯作者: 王明(1990-),男,博士、副高级工程师,研究方向为风能太阳能资源预测、气候动力学,E-mail:wangming@lasg.iap.ac.cn

2.1 研究资料

2.1.1 预报数据

CMA-WSP 地面辐射预报产品包括中国区域边界层温、湿度、风场及到达地表短波辐射、地面气压、降水量等气象要素,时间分辨率为 15 min,空间分辨率为 9 km,预报时效为 126 h,预报频次为 1 次/d。将 2022 年 4~9 月每天预报未来第 1 d 的地面辐射时间序列作为第 1 d 预报,以此类推,未来 5 d 地面辐射预报结果组成 5 个时间序列,基于观测数据,对比检验 2022 年 4~9 月期间预报未来 5 d 的地面辐射产品。

2.1.2 观测数据

选取湖北省华石光伏电站的同期观测数据作为检验数据,该站点海拔高度为 13.8 m,属于平原地区。

2.2 研究方法

2.2.1 检验方法

为评估太阳能短期预报产品与实况数据之间的差异及变化情况,采用相关系数(R)、均方根误差(R_{RMSE})、平均误差(M_{ME})、平均绝对误差(M_{MAE})作为评估指标。相关系数越大以及均方根误差、平均误差和平均绝对误差越小,表明模拟效果越好。

2.2.2 CMA-WSP 数据取值方法

为了确保对比结果的准确性以及减少因格点选择而导致的误差,采用临近值法、均值法和插值法 3 种方法选取与站点相近的格点数据。临近值法即选择离光伏电站最近的格点数据作为对比验证的模式数据;均值法即选取离光伏电站最近的 4 个格点的平均值作为对比验证的模式数据;插值法即将 CMA-WSP 模式格点预报数据利用双线性插值法插值到光伏电站所在经纬度上,再提取光伏电站的数据作为对比验证的模式数据。

以 2022 年 4 月份为例,利用临近值法、平均值法和插值法分别提取华石光伏电站的 CMA-WSP 地面太阳辐射格点数据(图 1),可以发现大

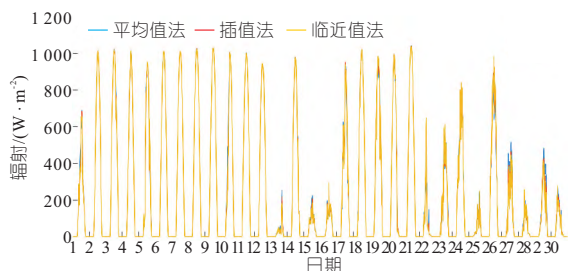


图 1 临近值法、平均值法和插值法取值结果对比

Fig. 1 Comparison of the results of adjacent value method, average value method and interpolation method

部分时间点 3 种方法取值一致,表明就地面太阳辐射预报而言,因提取方法的不同所造成的数据准确性差异较小,因此以临近值法的取值结果作为 CMA-WSP 模式的格点数据。

3 CMA-WSP 地面辐射预报产品的检验评估

3.1 总体预报效果评估

表 1 给出了基于光伏电站观测地面辐射结果计算的 CMA-WSP 模式地面辐射预报结果的评估指标。由表 1 可看出,5 d 预报的地面太阳辐射与观测结果均呈现较好的线性关系,预报结果与观测值相关系数在 0.85~0.91 之间,且均通过 $P<0.01$ 的显著性检验,表明 CMA-WSP 模式对未来 5 d 地面辐射的预报效果较好。其中第 1 d 预报效果最好,第 2~5 d 预报效果随着预报时长的增加而降低。由 CMA-WSP 预报辐射相对于观测的相对误差可看出,预报结果较观测值均偏大(平均误差均大于 0)。

表 1 2022 年 4~9 月华石光伏电站地面太阳辐射 5 d 预报效果评估

Tab. 1 Evaluation of 5-day forecast effect of ground solar radiation of Huashi Photovoltaic Power Station from April to September 2022

预报 时长	R	R_{RMSE} /($W \cdot m^{-2}$)	M_{ME} /($W \cdot m^{-2}$)	M_{MAE} /($W \cdot m^{-2}$)
Day1	0.91**	137.94	29.55	70.93
Day2	0.89**	149.92	35.80	76.15
Day3	0.87**	171.10	45.28	87.03
Day4	0.86**	175.20	38.70	89.88
Day5	0.85**	179.82	38.79	93.42

注:Day1~Day5 分别表示预报未来 1~5 d 的结果;* 表示通过 $P<0.01$ 的显著性检验。

3.2 逐月预报差异

由于太阳直射点的不同以及各月天气过程的差异均会引起各月太阳辐射的不同,太阳总辐射存在明显的月变化特征,有必要逐月评估 CMA-WSP 模式对地面辐射的预报效果。图 2 给出了 2022 年 4~9 月 CMA-WSP 模式预报与观测的逐 15 min 地面辐射曲线。整体而言,CMA-WSP 模式能较好地预报地面辐射的变化趋势。从地面辐射 5 d 预报与观测曲线的重合度来看,8、9 月份预报效果最好,4、5 月份因天气变化较大,转折性天气较多,易出现强对流天气过程,随着预报时间增加,预报效果差异较大。湖北省 6 月多梅雨天气,模式对降水天气过程中的地面辐射模拟效果一般。

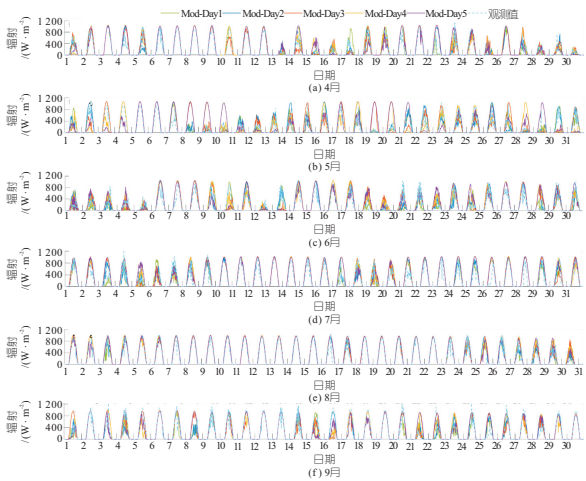


图 2 2022 年 4~9 月 CMA-WSP 地面太阳辐射 5 d 预报与观测时间序列

Fig. 2 Time series of 5-day CMA-WSP ground solar radiation forecast and observation from April to September 2022

为了更准确地评估各月模式的预报效果差异,计算了 4~9 月各月份 5 d 预报与观测的评估指标(图 3)。整体而言,8 月份模拟与观测相关性最好($R>0.9$),且 5 d 的预报差异较小。研究表明,模式对晴天太阳辐射的预报效果最好^[4],而 2022 年 8 月份湖北省受副热带高压的影响,长期维持晴热高温天气,模式对地面辐射的预报准确率相对较高;5、6 月份观测与预报结果的相关系数均相对较小,均方根误差及绝对误差较大,表明这两个月份预报效果较差,这与 5、6 月份长江中下游地区梅雨季节多雨水有关。梅雨季节降水较多,多转折性天气,模式对于转折性天气的预报存在较大难度^[8]。其他月份如 4、7、9 月份预报效果较好,但各天的预报差异不同,可见影响模式预报准确率的因素很多,需进一步探究。

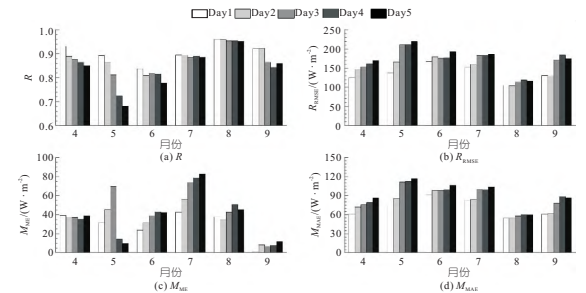


图 3 各月份 CMA-WSP 地面太阳辐射 5 d 预报结果的评估指标对比

Fig. 3 Evaluation indexes comparison of CMA-WSP 5-day ground solar radiation forecast in different months

3.3 季节预报差异

研究表明,基于数值模式的太阳辐射预报具有较明显的季节差异。为准确评估 CMA-WSP 对地面辐射预报的准确性,将现有的预报时段按

照季节划分,即 4~5 月为春季,6~8 月为夏季,9 月为秋季。虽然各季节的样本数不统一,但由于预报和观测均为逐 15 min 的数据,样本量较大,其中样本量最少的秋季样本数达 2 880 个,可忽略因样本量不同带来的差异。

表 2 为春、夏、秋三个季节 CMA-WSP 模式未来 5 d 地面辐射预报与观测的评估指标,与所得评估效果基本一致,第 1 d 的预报效果最好,预报准确率随预报时效变长而降低,但存在较明显的季节性差异。平均而言,春季 5 d 预报与观测相关系数为 0.84,均方根误差 172.40 W/m²,第 1~5 d 的预报效果差异较大(相关系数及均方根误差变化较大),这是由于湖北春季多转折性天气,频繁出现强对流天气过程,增加了模式的预报难度;夏季 5 d 预报与观测相关系数平均为 0.90,均方根误差 157.41 W/m²,5 d 的预报结果差别不大,预报效果相对稳定,这与当年 7 月份以来湖北省长期处于高温少雨天气有关;秋季 5 d 预报与观测相关系数平均为 0.88,均方根误差 158.48 W/m²。相比于春、夏季,秋季天气较为稳定,特别是 2022 年秋季延续了夏季高温炎热天气,较少出现对流天气和转折性天气。可见,CMA-WSP 模式对地面辐射的预报效果存在较强的季节性,各季节天气的不同决定了模式对辐射的预报结果存在差异,这为模式预报性能的改进提供了参考。

表 2 不同季节的华石光伏电站地面太阳辐射 5 d 预报效果评估

Tab. 2 Evaluation of 5-day forecast effect of ground solar radiation of Huashi Photovoltaic Power Station in different seasons					
季节	预报 时长	R	R_{RMSE} /(W·m ⁻²)	M_{ME} /(W·m ⁻²)	M_{MAE} /(W·m ⁻²)
春	Day1	0.91	131.66	35.35	67.79
	Day2	0.88	157.02	41.43	79.12
	Day3	0.84	185.94	54.16	94.42
	Day4	0.80	189.56	24.45	96.46
	Day5	0.77	197.82	23.50	102.38
	5 d 平均	0.84	172.40	35.78	88.03
夏	Day1	0.91	143.96	34.85	76.15
	Day2	0.90	151.17	41.06	78.94
	Day3	0.89	160.62	51.99	85.16
	Day4	0.90	162.26	57.70	86.08
	Day5	0.88	169.05	57.10	89.93
	5 d 平均	0.90	157.41	48.54	83.25
秋	Day1	0.92	130.78	1.57	60.94
	Day2	0.92	130.33	8.27	61.61
	Day3	0.86	171.95	6.80	78.20
	Day4	0.84	184.02	8.01	88.59
	Day5	0.86	175.29	11.77	86.72
	5 d 平均	0.88	158.48	7.28	75.21

3.4 预报差异日变化

图 4 为 4~9 月 5 d 预报与观测的平均日变化。由图 4 可知,预报与观测的地面辐射变化趋

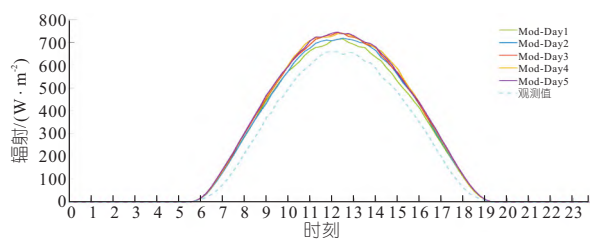


图 4 2022 年 4~9 月华石光伏电站 CMA-WSP 地面太阳辐射 5 d 预报与观测的平均日变化

Fig. 4 Average diurnal variation of CMA-WSP ground solar radiation 5-day forecast and observation of Huashi

Photovoltaic Power Station from April to September 2022

势较一致,呈单峰特征。整体而言,预报值均高于观测值。在辐射增强(6:00~10:00)或减弱(15:00~19:00)时段,5 d 预报结果变化基本一致,与观测较为接近,预报效果较好;在地面辐射接近峰值时(10:00~15:00),5 d 的预报效果出现了差异,与整体、逐月及季节评估结果不太一致的是,第 1 d 预报效果最好,第 3 d 预报效果最差。尽管 CMA-WSP 模式对峰值阶段的地面辐射的预报存在差异,但总体能较好地模拟地面辐射的日变化特征。

图 5 给出了逐月的 CMA-WSP 预报与观测地面辐射的日变化曲线。由图 5 可知,各月预报结果与观测的日变化趋势较为一致,其中 9 月预报效果最好,模式较好地预测了峰值时段的地面辐射;6、8 月份次之,5 d 预报的曲线较为重合,但均略高于观测值;4、5、7 月份预报效果最差。可见,CMA-WSP 模式对各月地面辐射预报的日变化存在较大差异。

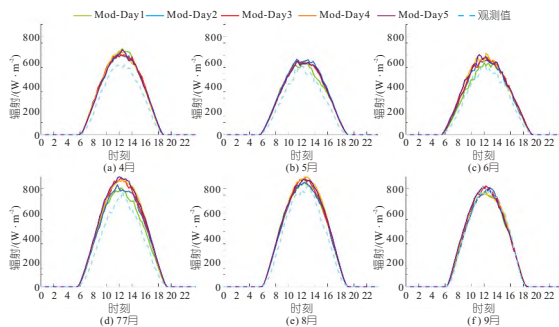


图 5 2022 年 4~9 月华石光伏电站 CMA-WSP 地面太阳辐射各月 5 d 预报与观测的日变化

Fig. 5 Diurnal variation of CMA-WSP ground solar radiation monthly 5-day forecast and observation of Huashi Photovoltaic Power Station from April to September 2022

通过预报与观测的日变化评估指标曲线(图 6)可看出,6:00~8:00 时预报与观测相关系数显著下降,8:00~16:00 时较为平稳,16:00~19:00 时呈上升趋势;均方根误差及绝对误差的变化特征与地面辐射变化趋势一致,呈现先增后减趋势;

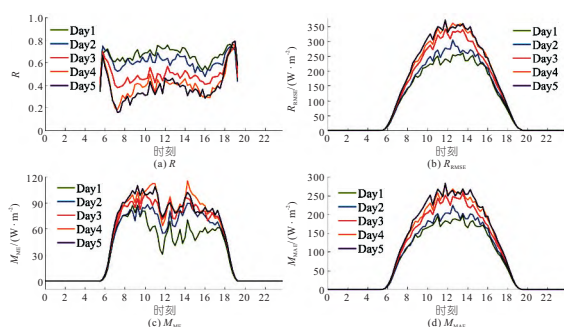


图 6 2022 年 4~9 月华石光伏电站的 CMA-WSP 地面太阳辐射 5 d 预报与观测的检验参数日变化

Fig. 6 Evaluation indexes daily variation of CMA-WSP ground solar radiation 5-day forecast and observation of Huashi

平均误差随着地面辐射的增加也先增后减,除第 3 d 的预报外,其他预报时效在 10:00~15:00 时均有不同程度的下降。综合不同评估指标的日变化可知,CMA-WSP 模式对 10:00~16:00 时的地面辐射的预报效果相对较差,其他时段较好。

4 结论

a. CMA-WSP 地面辐射产品与观测相关系数在 0.85~0.91 之间,总体预报效果较好,预报准确率随预报时长增加而降低。

b. 8~9 月份预报效果最好,5~6 月份最差;春季多转性天气导致预报难度增加,夏、秋季长期维持晴热高温天气使预报效果较好。CMA-WSP 模式对 10:00~16:00 时地面辐射的预报效果相对较差,其他时段较好。

c. 不同地形、不同天气对地面辐射的预报有较大影响,CMA-WSP 地面辐射预报效果全面地分析检验需要更多的观测数据及模式数据,这将在今后的研究中继续探究。

参考文献:

- [1] 邹才能,熊波,薛华庆,等. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘探与开发,2021,48(2):411-420.
- [2] 达选芳,李照荣,王小勇,等. 有云条件下太阳辐射短临预报订正技术研究[J]. 干旱气象,2021,39(6):1006-1016.
- [3] 马金玉,罗勇,申彦波,等. 太阳能预报方法及其应用和问题[J]. 资源科学,2011,33(5):829-837.
- [4] 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.
- [5] 顾婷婷,潘娅英,张加易. 浙江省中尺度数值预报系统的地表太阳辐射预报订正方法[J]. 干旱气象,2022,40(2):327-332.

(下转第 224 页)

- taic power generation prediction[J]. Energy reports, 2023, 9(S3): 369-376.
- [3] TIANZE L, SHUSEN L, SHUNJIANG W, et al. Short-term photovoltaic power prediction based on MDCM-GA-LSTM model[J]. The journal of engineering, 2022, 2022(10): 994-1005.
- [4] 周帆, 郑常宝, 胡存刚, 等. 基于高斯混合模型的光伏发电功率概率区间预测[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(24): 10284-10290.
- [5] 刘洁, 林舜江, 梁炜焜, 等. 基于高阶马尔可夫链和高斯混合模型的光伏出力短期概率预测[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 266-275.
- [6] 许彪, 徐青山, 黄煜, 等. 基于藤 copula 分位数回归的光伏功率日前概率预测[J]. 电网技术, 2021, 45(11): 4426-4435.
- [7] 张虎, 陈建斌, 魏欢. 一种改进的 BRICH 算法及其应用[J]. 软件导刊, 2015, 14(10): 45-47.
- [8] NELSEN R B. An introduction to copulas[M]. New York: Springer, 1999.
- [9] LANDAU D P, BINDER K. A guide to Monte Carlo simulations in statistical physics (4th ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [10] CHEN Y D, ZHANG Q, XIAO M, et al. Probabilistic forecasting of seasonal droughts in the Pearl River basin, China[J]. Stochastic environmental research and risk assessment, 2016, 30(7): 2031-2040.
- [11] AGOUE X G, GIRARD R, KARINIOTAKIS G. Probabilistic models for spatio-temporal photovoltaic power forecasting[J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2019, 10(2): 780-789.
- [12] HE Y, QIN Y, WANG S, et al. Electricity consumption probability density forecasting method based on LASSO-Quantile Regression Neural Network[J]. Applied energy, 2019, 233: 565-575.

Photovoltaic Power Probabilistic Prediction Based on BRICH Clustering and Copula-Monte Carlo Simulation

HUANG Mu-tao^{1a}, GAO Su-hua^{1b}, WANG Yang², ZENG Ling-kang², WEI Cong-ying², CHEN Xing-bang^{1a}
(1a. School of Electrical and Electronic Engineering; 1b. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Dispatching and Control Center of Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China)

Abstract: Photovoltaic power generation is affected by the chaotic characteristics of meteorology, and its stochastic, volatile and intermittent characteristics affect the operation of power systems seriously. Aiming at the problem of large dimension of original PV power generation data and the vulnerability of power generation to weather conditions, a data processing method based on Principal Component Analysis (PCA) and BRICH clustering was proposed to reduce the dimensionality of model input variables and facilitate statistical modeling. Secondly, a Copula-Monte Carlo-based probabilistic PV power probabilistic prediction model was constructed to calculate the probabilistic interval prediction of PV power output given the future point prediction values. The model was evaluated based on interval coverage and average width of prediction interval. Finally, the summer data of the actual photovoltaic power station were taken as an example for verification analysis. The results show that the Copula-Monte Carlo method can intuitively show the fluctuation range and expected value of photovoltaic power generation, and is superior to other power prediction models.

Key words: probabilistic prediction; PV power generation; BRICH clustering; Copula function; Monte Carlo simulation; weather fractal

(上接第 228 页)

- [6] 丁立国, 申彦波, 马勋丹, 等. FY-4A 地面太阳辐射产品在贵州高原山区的适用性研究[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 1041-1050.
- [7] 王林, 陈正洪, 唐俊. 太阳能光伏发电预报方法的应用效果检验与评价[J]. 气象, 2014, 40(8): 1006-1012.
- [8] 彭继达, 程兴宏, 孙治安, 等. 两种不同初始场对太阳辐射模拟效果的影响[J]. 高原气象, 2014, 33(5): 1352-1362.

Inspection and Evaluation of CMA-WSP Ground Radiation Forecast Products

ZHU Yan¹, WANG Ming^{1,2}, XU Pei-hua¹, MENG Dan¹, CHEN Zheng-hong¹

(1. Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205, China; 2. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205, China)

Abstract: Based on the ground radiation observation data of Hubei Huashi photovoltaic power station from April to September in 2022, the forecast accuracy of the ground radiation products of Wind Energy and Solar Energy Forecasting System of China Meteorological Administration (CMA-WSP) was evaluated. Overall, the correlation coefficient between ground solar radiation and observation in the next 5 days predicted by CMA-WSP is between 0.85 and 0.91, and the forecast effect on the first day is the best. With the increase of forecast time, the forecast accuracy gradually decreases. From the perspective of month-by-month effect, the CMA-WSP has the best effect on ground radiation forecasting in August and September, and the forecast accuracy rate in May and June is relatively low. In terms of daily changes, the CMA-WSP has a relatively poor forecasting effect on ground radiation at 10:00~16:00, and is better in other periods. The prediction of ground radiation by CMA-WSP has strong seasonality. The forecast results of different times in spring are quite different, and are relatively stable in summer. The forecast effect in autumn is the most stable, and the correlation coefficient between the prediction results and observation can reach 0.92. In general, the CMA-WSP has a good effect on the ground radiation forecasting in Hubei Province, which can provide good support for the short-term forecasting of photovoltaic resources in Hubei Province.

Key words: CMA-WSP; photovoltaic power plant; ground solar radiation; forecast inspection