

张敏,袁心仪,张 顾,等.CMA-WSP2.0在江苏地表太阳辐射预报中的检验评估[J].气象研究与应用,2024,45(1):17-22.
ZHANG Min, YUAN Xinyi, ZHANG Gu, et al. Validation and evaluation of CMA-WSP2.0 in surface solar radiation forecasting in Jiangsu[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2024, 45(1): 17-22.

CMA-WSP2.0在江苏地表太阳辐射预报中的检验评估

张 敏^{1,2}, 袁心仪^{1,2}, 张 顾^{1,2}, 王博妮^{1,2*}, 孙 明¹, 黄 亮^{1,2}, 陈正洪³, 葛行成¹, 周雪城^{1,2}

(1. 江苏省气象服务中心, 南京 210008; 2. 中国气象局交通气象重点开放实验室, 南京 210008;
3. 湖北省气象服务中心, 武汉 430205)

摘要: 基于江苏省南京、淮安及吕泗三个标准辐射站2023年6月至12月总辐射观测数据,对中国气象局风能太阳能气象预报系统(CMA-WSP2.0)的地表太阳辐射产品进行检验评估。结果表明:(1)CMA-WSP2.0对南京、淮安和吕泗3 d内太阳辐射的整体预报效果较好,逐15 min第1d的预报与观测值相关系数可达0.85、0.87和0.86,随着预报时效增加,预报效果逐渐降低。(2)以淮安站为例,10—12月预报效果明显优于6—9月,说明秋冬季节明显高于夏季,其中11月预报效果最好,准确率高达92.2%,而7月预报效果最差,准确率仅66.6%,这与梅雨期强降水过程多、天气变化复杂有关。(3)从日变化来看,在11:00—15:00时段模式预报效果偏低,尤其7月。未来将探索应用多种方法对CMA-WSP2.0预报产品进行订正优化以提升其适用性。

关键词: CMA-WSP2.0; 地表太阳辐射; 检验评估; 准确率

中图分类号: P45

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.1.04

作为双碳战略下我国能源转型的中坚力量,太阳能光伏发电因其可持续性、清洁性、安装灵活等优势迎来快速发展^[1-2]。国家能源局发布的2023年全国电力工业统计数据显示,太阳能光伏全年累计装机容量达 6.094×10^8 kW,除火电外位居第一,同比增长55.2%。光伏发电原理决定其发电功率与到达光伏面板的太阳辐射密切相关^[3-4],而太阳辐射因受地球自转、云和气溶胶等因素影响具有周期性、波动性和间歇性等特点^[5-8],从而导致光伏发电输出功率不稳定,大规模光伏并网将给电力系统的安全运行和调度管理带来巨大挑战^[9]。因此,在光伏“大规模、高比例、市场化和高质量”发展趋势下,地表太阳辐射预报服务重要性更加凸显。

目前,对于太阳辐射已有诸多研究,但大多集中在辐射分布特征分析、太阳辐射资源评估计算、云和气溶胶对太阳辐射的影响等方面^[10-13]。近年

来,也有部分学者对各类地表太阳辐射产品进行检验评估,如顾婷婷等^[14]利用杭州站辐射观测数据评估浙江省中尺度数值预报业务系统对地表太阳辐射的模拟效果,并构建相应的订正模型;丁立国等^[15]利用贵州高原山区7个辐射站数据,对FY-4A地表太阳辐射产品数据质量进行检验分析;朱燕等^[16]基于湖北华石光伏电站2022年4至9月太阳辐射观测数据评估中国气象局风能太阳能预报系统(CMA-WSP)太阳辐射产品的预报准确性。

为进一步提升我国新能源气象服务能力水平,2023年5月,中国气象局风能太阳能气象预报系统(CMA-WSP)升级为CMA-WSP2.0版,并正式向省级气象部门下发产品。在预报准确率上,系统考虑气溶胶辐射效应、云辐射效应、地形坡度和阴影效应,对辐射预报进行优化,显著降低辐射、风速等预报误差,预报时效由126 h延长至336 h。虽然模式预

收稿日期: 2023-12-08

基金项目: 江苏省气象局青年基金项目(KQ202210、KQ202310)

第一作者简介: 张敏(1992-),女,工程师,硕士,从事能源气象服务工作,研究方向为风能太阳能预测和评估。E-mail: z857188112@163.com

* 通讯作者: 王博妮(1984-),女,高级工程师,硕士,从事专业气象预报服务和大气环境研究工作。E-mail: bnsmile@163.com

报准确率有一定的提升,但在实际业务应用中还是存在一定误差。2023年7月中国气象局组织实施“风能太阳能发电精细化气象服务示范计划”,以面向电网公司和发电企业提供精细化时空分辨率的风光要素和风光功率气象服务产品为主,并规定风能太阳能气象服务产品质量检验评价方法,其中辐射检验包括准确率、合格率、均方根误差等内容。

已有研究均未从服务角度的检验指标如准确率、合格率等对地表太阳辐射预报产品进行评估,并且对于升级后CMA-WSP2.0的预报检验研究也尚未开展。鉴此,本文基于江苏省南京、淮安、吕泗三个标准辐射站2023年6月至12月的逐分钟总辐照度观测数据,利用中国气象局“风能太阳能精细化气象服务示范计划”规定的指标检验,对CMA-WSP2.0模式地表太阳辐射预报效果进行检验,通过分析其预报产品的误差特征及产生原因,评估其在江苏地表太阳辐射预报及光伏气象服务业务中的适用性,并为CMA-WSP2.0模式产品的订正提供一定参考。

1 资料与方法

1.1 资料来源

1.1.1 模式预报资料

CMA-WSP是中国气象局公共气象服务中心基于北京城市气象研究院建立的新一代高分辨率专业数值预报系统RMAPS-Wind 1.0输出气象要素制作而成的风能太阳能数值预报产品。该产品包括中国区域边界层分层温、湿、风场以及到达地表短波辐射、地面气压、降水量等风功率、光伏发电功率预报所需气象要素,时间分辨率为15 min,空间分辨率为9 km,预报时效为336 h,预报频次为1次·(24 h)⁻¹。将2023年6月1日至2023年12月31日每天预报未来第1 d的太阳辐射时间序列作为第1 d预报,以此类推,未来3 d太阳辐射预报结果组成3个时间序列,基于观测数据,对比检验该时段期间预报未来3 d太阳辐射产品的准确率。

1.1.2 观测资料

选取江苏省南京(站号58238)、淮安(站号58141)、吕泗(站号58265)同期总辐照度数据作为检验数据。

1.2 方法

1.2.1 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,分析其在光伏气象服务业务中的适用性,采用中国气象局“风能太阳能精细化气象服务示范计划”规定的检验指标,包括相关系数(R)、准确率(A)、合格率(Q)、均方根误差($RSME$)以及平均绝对误差(MAE),具体计算公式如下。其中,相关系数越大、准确率和合格率越高、均方根误差和平均绝对误差越小,表明预报效果越好。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (I_f^i - \bar{I}_f)(I_o^i - \bar{I}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (I_f^i - \bar{I}_f)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (I_o^i - \bar{I}_o)^2}} \quad (1)$$

$$A = \left(1 - \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{I_f^i - I_o^i}{I} \right)^2} \right) \times 100\% \quad (2)$$

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \times 100\%$$

$$Q_i = \begin{cases} 1, & \frac{|I_f^i - I_o^i|}{I} < 0.3 \\ 0, & \frac{|I_f^i - I_o^i|}{I} \geq 0.3 \end{cases} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (I_f^i - I_o^i)^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |I_f^i - I_o^i| \quad (5)$$

式中, I_f 为当日第*i*时刻(或第240分钟)的预报总辐照度, I_o 为当日第*i*时刻(或第240分钟预报对应时刻)的实测总辐照度。由于在有云天气条件下,太阳辐射预报存在误差较大的情况,通过太阳辐射的均方根误差计算准确率,会产生太阳辐射预报误差对光伏发电产出量影响过分放大的情况,因此,对*I*进行分段取值,当日实测平均总辐度小于等于250 W·m⁻²时,*I*取值为600;当日实测平均总辐照度大于250 W·m⁻²时,*I*取值为当日实测总辐照度的最大值。

1.2.2 数值预报取值方法

朱燕等^[16]研究发现利用临近值法、均值法和插值法3种方法选取与站点相近的格点数据基本一致,因此,本文采用临近值法,即选取离观测站点最近的格点数据作为对比验证的模式数据。其中,选取的格点与南京站、淮安站、吕泗站点距离分别为3.2 km、4.5 km及1.4 km。

2 结果与分析

2.1 总体预报效果评估

表1给出利用南京、淮安和吕泗三个辐射观测站2023年6至12月数据计算的CMA-WSP2.0模式地表太阳辐射预报结果的评估指标。可以看出,三个站点的3 d预报地表太阳辐射与观测结果均呈现较好的相关关系,相关系数在0.83~0.87之间,均通过 $P<0.01$ 的显著性检验,表明CMA-WSP2.0模式对未来3 d太阳辐射的预报效果较好。其中第1 d预报效果最好,第2~3 d预报效果随着预报时长的增加而降低。根据公式(2—5)计算的准确率在75.5%~78.1%

之间,合格率在87.0%~89.8%之间,均方根误差在137.8~153.5 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,平均绝对误差在57.9~68.9之间。按照国家标准《调度侧风电或光伏功率预测系统技术要求》(GB/T 40607-2021),光伏功率预测准确率应达到短期日前 $\geq 85\%$,但尚未对光伏功率预测模型输入因子之一的太阳辐射要素预报准确率做出规定。但从2023年6至12月的地表太阳辐射准确率检验结果来看,CMA-WSP2.0对地表太阳辐射预报准确率仍有较大提升空间。总体上,三个站点的预报效果差异不大,但淮安站的预报效果从五个指标的检验评估来看均为最好。因此,下文选淮安站作为代表站进一步检验模式预报效果。

表1 2023年6—12月CMA-WSP2.0太阳辐射3 d预报效果评估

站点	预报时效	相关系数	准确率/%	合格率/%	均方根误差/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	平均绝对误差/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
南京	第1 d	0.85**	76.6	88.3	146.5	63.8
	第2 d	0.85**	76.6	87.9	146.5	65.0
	第3 d	0.85	75.3	87.0	153.5	68.9
淮安	第1 d	0.87**	78.1	89.8	137.8	57.9
	第2 d	0.86**	77.1	89.1	142.7	61.0
	第3 d	0.85**	75.5	88.1	152.6	65.8
吕泗	第1 d	0.86**	77.9	89.1	141.4	62.2
	第2 d	0.84**	76.9	88.4	148.3	65.3
	第3 d	0.83**	76.3	87.8	152.9	68.2

注:**表示通过 $P<0.01$ 的显著性检验。

2.2 逐月预报差异

由于太阳直射点随着时间的变化以及天气过程的差异均会引起各月太阳辐射的不同,地表太阳总辐射存在明显的月变化特征,有必要逐月评估CMA-WSP2.0模式对太阳辐射的预报效果。图1给出2023年6至12月CMA-WSP2.0模式预报与淮安站点观测的逐15 min地表太阳辐射序列曲线。可以看出,逐日太阳辐射均呈单峰型变化特征,晴空条件下观测曲线较为平滑,而有天气过程时,曲线波动明显。

总体而言,CMA-WSP2.0模式能较好预报太阳辐射的变化趋势,但当转折性天气出现时,预报曲线往往偏高。例如,如图1(a)所示,6月17日江苏淮河以南地区入梅,受强降水影响,淮安站观测的地表太阳辐射在10:00—15:00之间仅为77~194 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$,而CMA-WSP2.0模式没能预报出大气环流的调整,仍将该日当做晴空,预报的太阳辐射偏

差较大。而对于6月18—19日的持续暴雨过程,模式及时调整,准确率显著提升,分别达67.1%和83.7%。同样,在其他月份,从晴空到阴雨的转折过程预报偏差均较大,随着天气系统的发展,一般在第二至三天预报曲线有明显调整,准确率显著提升。

从月际比较来看,10—12月预报效果较好,而6—9月预报效果差异较大。这是因为6—9月江苏天气变化较大,转折性天气较多,易出现强对流天气过程,而模式对转折性天气以及降水过程中的太阳辐射模拟效果一般。

2.3 逐月检验指标

为了更准确地评估各月模式的预报效果差异,计算各月3 d预报与淮安观测站的评估指标(公式1—5)(图2仅给出准确率 A 及均方根误差 $RMSE$)。整体而言,10—12月模式预报准确率较高,6—9月模式预报准确率偏低,尤其是6—7月。其中11月模式预报准确率最高($A>90.5\%$),均方根误差最小

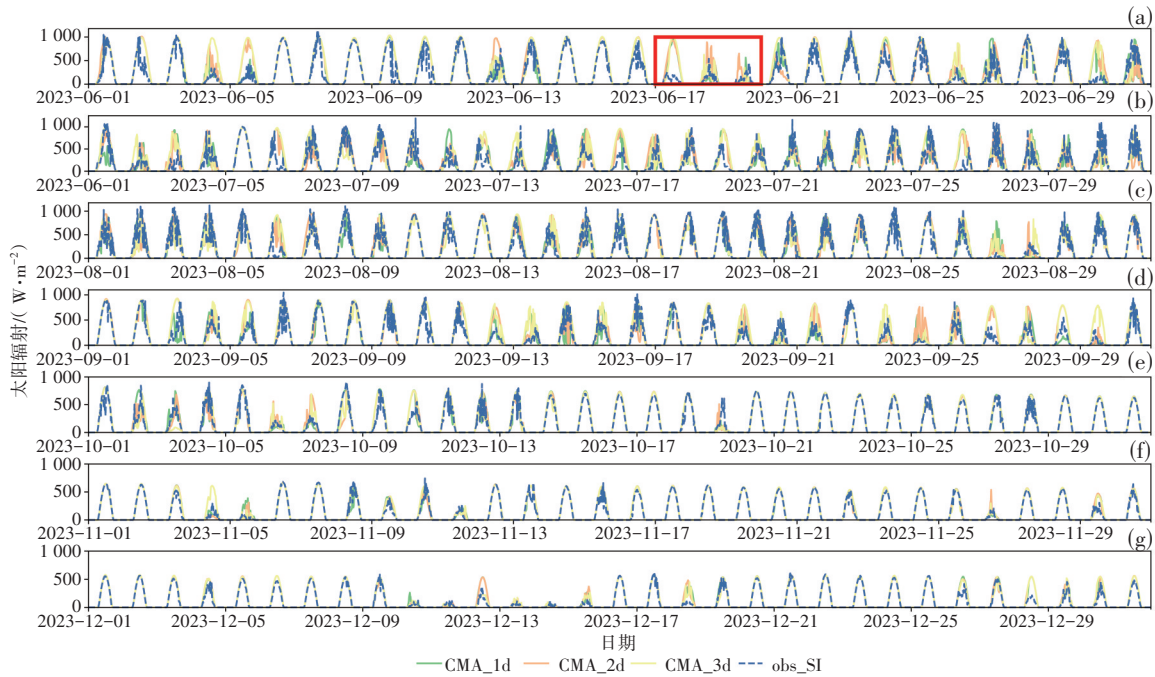


图1 2023年6至12月CMA-WSP2.0太阳辐射3 d预报与同期淮安站观测逐日时间序列, 红方框为6月17至19日入梅持续强降水过程

($RMSE < 56.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$), 且3 d的预报差异较小; 7月模式预报准确率最低($A < 68.5\%$), 同时, 均方根误差最大($A > 197.2\%$), 且1d预报效果明显差于2 d。

江苏省气候中心发布的2023年逐月气候影响评价显示, 6、7月总体气候特征均为温高多雨, 6月17日至7月23日为梅雨期, 梅雨期间共出现九次区域性暴雨过程及21个强对流日, 总体降水量大, 极端性突出, 天气过程复杂, 因此, 6、7月太阳辐射预报效果偏低。而8月江苏省大多受副热带高压控制, 温高雨少, 天气过程简单, 模式预报准确率明显提升, $RMSE$ 明显下降, 准确率平均比7月偏高9%左右。9月天气降水过程增多, 且出现强对流龙卷天气, 模式预报效果基本与8月差别不大。10—12月, 江苏省进入秋季, 天气稳定, 降水过程较少且以系统性降水为主, 模式预报效果提升明显。这与已有研究结论模式对晴空太阳辐射的预报准确率相对较高, 转折性天气的预报存在较大难度相符^[17]。

2.4 日变化检验

基于以上研究结果, 选取7月作为夏季代表月, 10月作为秋季代表月进一步计算分析其日变化检验指标。考虑结果相似性及画图简洁性, 仅选取具代表性的相关系数和均方根误差进行计算。

如图3(a)所示, 从预报与观测数据的相关系数日变化曲线可看出, 整体而言, 秋季(10月)模式预

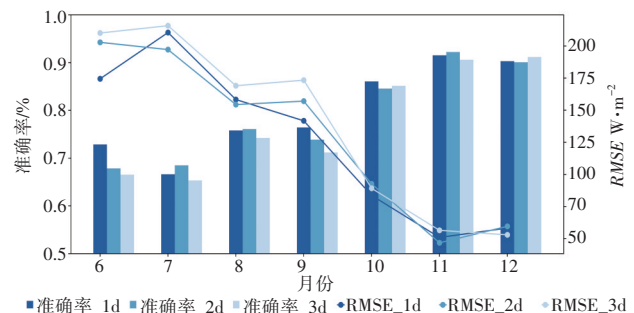


图2 2023年6—12月CMA-WSP2.0太阳辐射3 d预报结果的评估指标对比

报与淮安站点观测数据之间的相关系数日变化差异不大, 说明预报效果较为平稳; 夏季(7月)的相关系数在10:00之后下降明显, 尤其在11:00—15:00之间为全天最低时段, 之后有所回升, 但总体上仍低于上午时段。相应地, 江苏夏季天气过程一般在中午至下午时段发生发展, 尺度小、周期短, 模式预报难度较大。

如图3(b)所示, 对均方根误差日变化来说, 7月和10月均呈单峰型变化特征, 先增后降, 一般在中午前后达到最大, 与太阳辐射变化规律基本一致。但7月均方根误差明显高于10月, 尤其在10:00—15:00之间的时段, 说明10月的日内预报准确率优于7月。

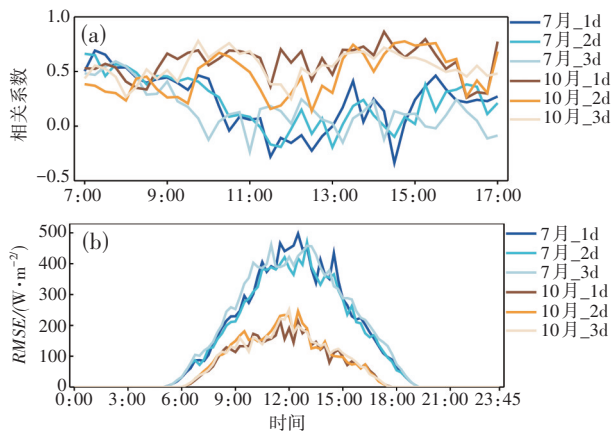


图3 2023年6—12月CMA-WSP2.0太阳辐射3 d预报与淮安观测站的检验参数日变化
(a)相关系数;(b)均方根误差RMSE

3 结论

本文基于江苏省南京、淮安及吕泗三个标准辐射站2023年6—12月的总辐射观测数据,对中国气象局风能太阳能气象预报系统(CMA-WSP2.0)的地表太阳辐射产品进行检验评估,主要研究结论如下:

(1)CMA-WSP2.0对南京、淮安和吕泗3 d内太阳辐射的整体预报效果较好,逐15 min第1 d的预报与观测值相关系数可达0.85、0.87和0.86,随着预报时效增加,预报效果逐渐降低;总体上三个站点的预报效果差异不大,但淮安站的预报效果最好。

(2)以淮安站为例,10—12月预报效果明显优于6—9月,说明秋冬季节明显高于夏季。其中11月预报效果最好,准确率达92.2%,而7月预报效果最差,仅为66.6%,这可能与梅雨期强降水过程多、天气变化复杂有关。

(3)从日变化来看,10月的相关系数差异不大,而7月在10:00之后下降明显,总体上仍低于上午时段。7、10月的均方根误差均呈单峰型变化特征,与太阳辐射变化规律基本一致。总体而言,秋季(10月)的太阳辐射日内预报效果明显优于夏季(7月)。

虽然模式总体上对于江苏三个站点预报效果较好,但对于转折性天气、降水过程等的预报偏差较大,尤其是突发性的强对流天气,离直接应用于光伏电站的功率预报需求仍存在一定差距。未来,为提升CMA-WSP2.0模式预报产品在江苏地表太阳辐射及光伏气象服务中的适用性,需进一步分析不同季节、不同天气过程的CMA-WSP2.0模式预报误差分布特征,探索应用多元线性回归、机器学习

算法等构建地表太阳辐射订正模型,并引入卫星、雷达等多源数据对短临预报进行改进。

参考文献:

- [1] 李美成,高中亮,王龙泽,等."双碳"目标下我国太阳能利用技术的发展现状与展望[J].太阳能,2021,331(11):13-18.
- [2] 李明东,李婧雯."双碳"目标下中国分布式光伏发电的发展现状和展望[J].太阳能,2023,349(5):5-10.
- [3] 马胜红,陆虎俞.太阳能光伏发电技术(2)太阳能与太阳辐射[J].大众用电,2006(2):39-41.
- [4] 孟祥星,于大洋,韩学山,等.太阳辐射与负荷波动的相关性对光伏发电并网的影响[J].山东大学学报(工学版),2010,40(2):126-129.
- [5] 申彦波,赵宗慈,石广玉.地面太阳辐射的变化、影响因子及其可能的气候效应最新研究进展[J].地球科学进展,2008,23(9):915-923.
- [6] 陈跃浩,熊明明,曹经福,等.雾霾天气对天津市太阳辐射影响的量化研究[J].气象与环境学报,2018,34(5):25-30.
- [7] HATZIANASTASSIOU N, MATSOUKAS C, DRAKAKIS E, et al. The direct effect of aerosols on solar radiation based on satellite observations, reanalysis datasets, and spectral aerosol optical properties from Global Aerosol Data Set (GADS)[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2007, 7(10):2585-2599.
- [8] 尹青,张华,何金海.近48年华东地区地面太阳总辐射变化特征和影响因子分析[J].大气与环境光学学报,2011,6(1):37-46.
- [9] 陈伟,艾欣,吴涛,等.光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J].电力自动化设备,2013,33(2):26-39.
- [10] 凌佩嘉,王婷,赵艳杰.基于MATLAB方法的太阳辐射度波动特征分析——以乌干达布津杜太阳能热电混合电站为例[J].气象研究与应用,2022,43(4):98-103.
- [11] 方琼玉,谭佳勇,丁美花,等.基于气候学方法的太阳能资源估算研究概述[J].气象研究与应用,2023,44(2):87-91.
- [12] 郭媛,陈贻亮,何宽.近50年广西蒸发量与太阳辐射关系分析[J].气象研究与应用,2018,39(1):46-50.
- [13] 谭宗琨,李政,丁美花,等.1961—2020年广西光合有效辐射时空分布特征[J].气象研究与应用,2022,43(4):7-12.
- [14] 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.
- [15] 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.

225–228, 224.

[16] 朱燕, 王明, 许沛华, 等. CMA-WSP 地面辐射预报产品的检验评估[J]. 水电能源科学, 2023, 41(12):

[17] 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.

Validation and evaluation of CMA–WSP2.0 in surface solar radiation forecasting in Jiangsu

ZHANG Min^{1,2}, YUAN Xinyi^{1,2}, ZHANG Gu^{1,2}, WANG Boni^{1,2}, SUN Ming¹, HUANG Liang^{1,2},
CHEN Zhenghong³, GE Hangcheng¹, ZHOU Xuecheng^{1,2}

(1. Jiangsu Meteorological Service Center, Nanjing 210008, China; 2. Key Laboratory of Transportation Meteorology, China Meteorological Administration, Nanjing 210008, China;
3. Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205, China)

Abstract: Based on the total radiation observation data of Nanjing, Huai'an, and Lvsu stations in Jiangsu Province from June to December 2023, the surface solar radiation products of the China Meteorological Administration Wind Energy and Solar Energy Forecasting System (CMA–WSP2.0) were examined and evaluated. The results are as follows: (1) CMA–WSP2.0 performs well in overall forecasting of the surface solar radiation at Nanjing, Huai'an and Lvsu stations within three days. The correlation coefficients between the forecast and observation values for these three stations on the first day are 0.85, 0.87 and 0.86 for 15 min intervals respectively. As the forecasting time increases, the correlation gradually decreases; (2) as for Huai'an Station, the forecast effect from October to December is significantly better than that from June to September, indicating that the forecast effect in autumn and winter seasons are significantly higher than that in summer. The forecast effect in November is the highest, with an accuracy of 92.2%, while in July, the forecast effect is the worst, only 66.6%, which is related to the frequent heavy rainfall processes and complex weather changes during the rainy season; (3) From the perspective of daily changes, the predictive performance of CMA–WSP2.0 is relatively low during the period of 11:00–15:00, especially in July. Next, multiple methods will be explored to revise and optimize the CMA–WSP2.0 forecast products in order to improve its applicability.

Key words: CMA–WSP2.0; surface solar radiation; validation and evaluation; accuracy