DOI:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2011.03.014

第 34 卷第 3 期 大 气 科 学 学 报 Vol. 34 No. 3
2011 年 6 月 Transactions of Atmospheric Sciences Jun. 2011

白永清,陈正洪,王明欢,等. 2011. 基于 WRF 模式输出统计的逐时太阳总辐射预报初探[J]. 大气科学学报,34(3):363-369.
Bai Yong-qing,Chen Zheng-hong,Wang Ming-huan,et al. 2011. Preliminary research on prediction of hourly solar radiation based on WRF model output statistics[J]. Trans Atmos Sci,34(3):363-369.

基于 WRF 模式输出统计的逐时太阳总辐射预报初探

白永清[1,2],陈正洪[1,2],王明欢[3],成驰[1,2]

(1. 湖北省气象服务中心,湖北 武汉 430074;2. 湖北省气象能源技术开发中心,湖北 武汉 430074;
3. 中国气象局 武汉暴雨研究所,湖北 武汉 430074)

摘要:基于 WRF(weather research and forecasting model)模式逐时输出结果,设计了逐时太阳总辐射的模式输出统计(model output statistics,MOS)预报流程。主要包括:对逐时观测序列进行低通滤波再除以天文辐射,对模式输出因子的筛选和降维,以及建立 MOS 预报方程,并对 2009 年 1 月、4 月、8 月和 10 月武汉站逐时太阳总辐射进行预报试验。结果表明,该方案在各月预报相对稳定,拟合和预报效果均较为理想,可使平均绝对百分比误差控制在 20% ~30%,相对均方根误差控制在 30% ~40%,相对模式直接预报辐射改进了 50% 左右。由此可见,通过对模式输出进行解释应用,可以有效提高辐射预报的准确率。此外,客观分析所得的气温、云量、露点、比湿、相对湿度、地面气压等 13 个模式输出因子可以作为各地区建立 MOS 辐射预报方程的参考因子。

关键词:太阳能;逐时太阳辐射;预报因子;模式输出统计(MOS)

中图分类号:P422.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-7097(2011)03-0363-07

Preliminary research on prediction of hourly solar radiation based on WRF model output statistics

BAI Yong-qing[1,2],CHEN Zheng-hong[1,2],WANG Ming-huan[3],CHENG Chi[1,2]

(1. Hubei Provincial Meteorological Service Center,Wuhan 430074,China;
2. Meteorological Energy Development Center of Hubei Province,Wuhan 430074,China;
3. Wuhan Institute of Heavy Rain,CMA,Wuhan 430074,China)

Abstract: Based on the hourly output of WRF(weather research and forecasting model),MOS(model output statistics) prediction process of hourly solar radiation was designed,including low-pass filtering of hourly observation series which was then divided by astronomical radiation,selection and dimensionality reduction of output factors and foundation of MOS prediction functions. Judging from the results of experimental prediction of hourly solar radiation at Wuhan station in January,April,August and October 2009,it shows that this method is relatively stable in monthly forecasts and that both fitting and forecast results are satisfactory,mean absolute percentage error was controlled between 20% and 30%. Relative mean square root error was controlled between 30% and 40%. Radiation forecast was improved by 50% compared with model direct prediction. It is clear that accuracy rate of model radiation prediction can be greatly improved through interpretation and implement of model output results. Besides,13 output factors including temperature,cloud amount,dew point,specified humidity,relative humidity and surface pressure analyzed here can provide reference for other regions in foundation of MOS functions of hourly solar radiation.

收稿日期:2011-01-10;**改回日期:**2011-03-25

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)201006036);华中区域气象中心科技发展基金重点项目(QY-Z-201010);中国气象局现代气候业务建设试点工作(气预函[2010]76 号;气预函[2010]174 号)

作者简介:白永清(1985—),男,宁夏银川人,硕士,助理工程师,研究方向为数值预报产品释用、新能源开发利用,2007byq@163.com.

Key words: solar energy; hourly solar radiation; prediction factors; model output statistics(MOS)

0 引言

新能源和可再生能源的开发利用越来越成为焦点。太阳能资源是未来最有希望的、可大规模开发和利用的可再生能源之一。发展太阳辐射、光伏发电预报技术研究,既可提高气象部门为社会服务的能力,又对我国可再生能源的开发和利用以及低碳经济的发展等具有重大意义。

光伏发电系统规划与分析的基础之一就是太阳辐射数据,电力系统部门更希望得到精细化的太阳辐射预报数据。国内学者对逐时太阳辐射的预报技术进行了研究。张素宁和田胜元(1997) 讨论了确定性模型与随机模型联合使用的方法,建立了逐时太阳辐射数据的自回归滑动平均模型(ARIMA) ,该模型可以将太阳辐射随天气变化的随机性较好地模拟出来。曹双华和曹家枞(2006) 考虑影响太阳逐时总辐射的气象、地理等方面因素,对宝山站太阳逐时总辐射建立了混沌优化神经网络预测模型,模型能够反映太阳逐时总辐射的变化规律,预测结果也较为准确。苏高利等(2007) 采用最小二乘支持向量机(LS-SVM) 方法建立了晴空逐时太阳辐射模型,该方法能够很好地模拟气象要素对太阳辐射的非线性影响,模型精度也较高。王明欢等(2010) 利用中尺度数值模式 WRF(weather research and forecasting model) 对 2009 年 8 月武汉站到达地表短波辐射进行模拟,结果表明,中尺度数值模式对到达地表短波辐射具有一定的预报能力和可信度,尤其对晴天辐射的预报能力更佳。

但是直接利用模式输出的辐射量作为太阳能发电系统的初值进行电力预报还存在一定的难度,有必要尝试对模式输出的辐射量进行进一步订正,以提高模式预报的可靠性。白永清等(2010) 通过对 WRF 模式输出辐射结果的初步订正,进一步减小了辐射预报误差。Jensenius and Cotton(1981) 最早将模式输出统计(model output statistics,MOS) 预报方法引入到太阳辐射预报中。选取的预报因子包括平均相对湿度、750 hPa 垂直速度、850 hPa 相对涡度、200 hPa 风速、700 hPa 露点温度等,可使 24 h 预报时效的逐日太阳辐射预报相对均方根误差降到 25%。Bofinger and Heilscher(2004) 基于 ECMWF 模式也建立了太阳辐射的 MOS 预报方程,选取云量指数、温度露点差、500 hPa 相对湿度、温度露点差、2 000 m 以下云量和可降水量作为预报因子,可使逐时太阳辐射预报相对均方根误差降到 32.1%。

本文基于 WRF 模式逐时输出结果,通过对模式预报结果进行解释应用,以求进一步提高辐射预报的准确率,为继续研究太阳能光伏发电预报系统做好铺垫。

1 资料方法

1.1 资料

1) 模式资料: 基于中尺度数值模式 WRF 每日 20 时(北京时间,下同) 起报、每次积分 36 h 逐时输出的 07—18 时各物理量场预报结果。资料时间为 2009 年 1 月、4 月、8 月和 10 月,每月缺少部分日资料。

2) 观测资料: 取自相应时间段的一级辐射观测站武汉站(114°08′E,30°37′N) 逐时总辐射曝辐量观测(单位: $MJ \cdot m^{-2}$) 。总辐射曝辐量(或到达地表短波辐射) 在下文简称为太阳总辐射(太阳辐射、辐射) 。

1.2 流程设计与观测资料处理

基于 WRF 模式输出结果,以及总辐射观测数据(以武汉站为试点) ,设计了逐时太阳辐射的 MOS 预报流程,如图 1 所示。包括 3 个关键步骤: 对逐时观测序列进行低通滤波再除以天文辐射,对模式输出因子进行筛选和降维,以及建立 MOS 预报方程。其中: I 表示逐时总辐射观测序列; $\bar{I}$ 表示对观测序列低通滤波后的结果; $\frac{\bar{I}}{I_0}$ 表示滤波后再除以天文辐射的结果。

1.2.1 低通滤波

EOF 经验正交函数(黄嘉佑,2004) 本身可作为低通滤波器,第一主成分具有平滑原数据序列的作用。

对 2009 年 8 月武汉站逐时总辐射观测序列进行 EOF 分解(以时刻/天数展开) 。如图 2a 所示,第一模态符合太阳辐射为半波形的日间变化特征,第二模态反映出辐射于正午前后位相发生转变。对典型日进行合成(图 2b) ,非平均态的物理意义在于如果日间正午前后出现转折性天气,往往会对辐射造成一定影响。取 EOF 分解的第一主成分作为低通滤波后的序列(图 3a) 。对于第二模态可预报性问题有待于进一步研究。

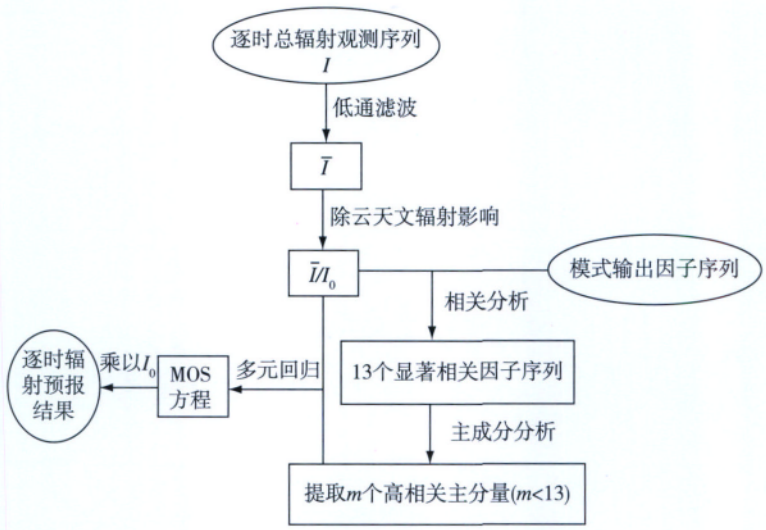

图 1　基于 WRF 模式输出统计的逐时太阳辐射预报流程

Fig. 1　Hourly solar radiation forecast process based on WRF output statistics

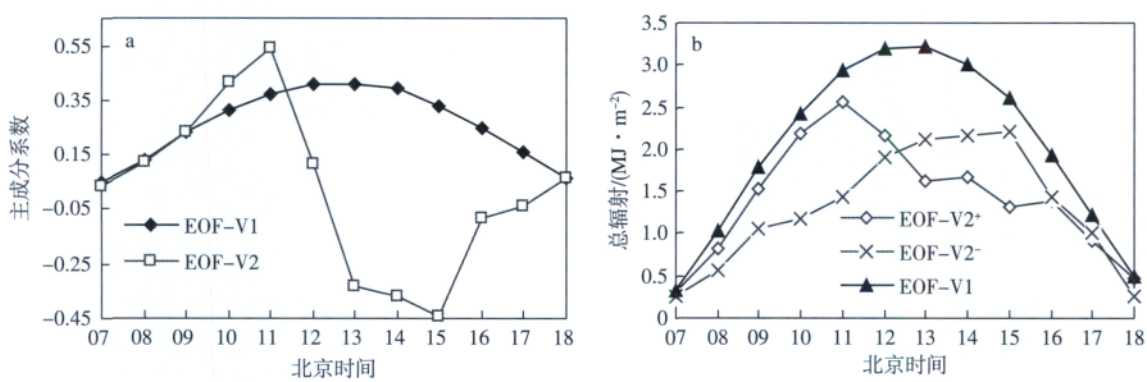

图 2　2009 年 8 月武汉站逐时总辐射观测序列 EOF 分解的第一、二模态(a) 及各模态典型日的辐射合成(b; 单位: MJ/m^2)

Fig. 2　Observed hourly total radiation series' EOF analyzed (a) first and second mode and (b) combination of typical day radiation of each mode at Wuhan station in August 2009(units: MJ/m^2)

通过低通滤波处理,提取出总辐射的平均态,去掉序列中不可预报的小波动成分,后期试验证明这有利于减小预报误差。

1.2.2　去除天文辐射影响

参照气候学上估算太阳辐射的经验公式(翁笃鸣,1964; 王炳忠等,1980; 孙治安等,1992)

$$Q = Q_0(a + bS)。$$

其中: Q_0 为太阳辐射基数值; S 为某(几) 种辐射影响因子; a、b 是经验系数。考虑到 Q/Q_0(若 Q_0 取天文辐射) 表征辐射通过大气层时的衰减情况,数值越大,表示大气越透明,到达地面的太阳辐射强度也就越大。该物理量反映了大气透明程度,与云量、水汽、气溶胶等相关性较好。若将总辐射观测转换为该指数,则间接提高了辐射与气象因子相关性。

逐时天文辐射的计算公式可参考以下(2) —(4) 式(王炳忠,1999; 杨金焕等,2009) 。

$$E_{sc} = 1\ 367\ \mathrm{W/m^2}; \tag{1}$$

$$\gamma = 1 + 0.033\cos\frac{360°n}{365}; \tag{2}$$

$$\delta = 23.45\sin\left[360 \times \frac{284 + n}{365}\right]; \tag{3}$$

$$I_t = 3\ 600\gamma E_{sc}(\sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\tau_t)。 \tag{4}$$

其中: E_{sc} 是太阳常数; γ 为日地距离订正系数; φ 为纬度; δ 为赤纬角; τ_t 为时角,时角上午为负,下午为正; n 为一年中日序号(1 月 1 日为 $n = 1$) ; $\tau_t = 15°z - 7.5°$, z 为离正午的时间(单位: h) ; I_t 为逐时天文辐射,随当地纬度及日期时刻而变化。

对低通滤波后的序列值(图 3a, $\bar{I}$) 再除以对应时刻的天文辐射,将辐射预报转换为表征大气透明度的指数预报(图 3b, $\bar{I}/I_0$) ,由于水汽、云量等因子

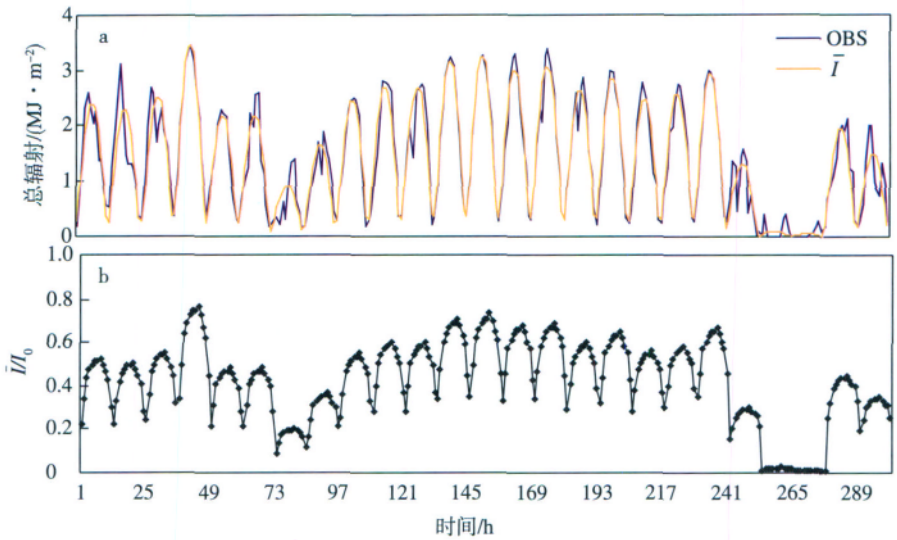

图 3 2009 年 8 月武汉站逐时总辐射观测和低通滤波后的序列(a; 单位: MJ/m^2) 以及滤波后除以天文辐射的序列(b)

Fig. 3 (a) Observed hourly total radiation series before and after low-pass filtering(units: MJ/m^2) ,and (b) series after filtering divided by astronomical radiation at Wuhan station in August 2009

对预报量的贡献增大,后期试验进一步提高了 MOS 方程的稳定性和预报准确率。其中 OBS 表示逐时太阳辐射观测。

1.3 误差检验

评估预报效果的方法如下。

平均绝对百分比误差

$$E_{MAP} = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|P_f^i - P_o^i|}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}P_o^i} \times 100\%, \quad (5)$$

相对均方根误差

$$E_{RMSR} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_f^i - P_o^i)^2}}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}P_o^i} \times 100\%。 \quad (6)$$

其中: N 表示时间序列长度; i 表示第 i 时刻; P_f^i 是第 i 小时预报值; P_o^i 是第 i 小时观测值。

2 模式输出因子分析与处理

2.1 模式因子选取

向下短波辐射的影响因子主要包括云量、水汽含量或湿度、气溶胶等,另外地表气温或地面温度也是密切相关的因子。依据 WRF 模式逐时输出各物理量,通过统计分析提取与辐射观测显著相关的输出因子。表 1 列出 2009 年 8 月武汉站辐射观测与模式输出因子的相关统计量。可见,通过对初始资料的两步处理,能够有效提高辐射与气象因子的相关性。其中到达地表短波辐射通量 SWDOWN (downward short wave flux at ground surface; 单位: $W \cdot m^{-2}$) 乘以 3.6×10^{-3} 可近似转换为模式预报 1 h 的辐射曝辐量(单位: $MJ \cdot m^{-2}$) 。

表 1 模式输出因子与辐射观测处理序列的统计相关

Table 1 Statistical relationship between model output factors and pre-treated observed radiation series

	$\frac{\bar{I}}{I_0}$	$\bar{I}$
地表气温	0.71	0.76
2 m 气温	0.68	0.57
高云量	-0.64	-0.44
到达地表短波辐射通量	0.57	0.78
2 m 露点温度	0.50	0.36
2 m 比湿	0.49	0.35
500 hPa 相对湿度	-0.44	-0.28
2 m 相对湿度	-0.42	-0.41
温度露点差	0.42	0.41
云雨冰雪混合比的垂直积分	-0.36	-0.25
中云量	-0.36	-0.20
850 hPa 露点温度	0.34	0.25
地面气压	-0.34	-0.23

2.2 因子降维处理

由于选取的众多因子之间难免会存在复共线性关系,从而影响到方程的预报能力,并且众多因子也

不利于方程的建立。因此,需要对所选取的模式因子做进一步处理。利用 EOF 进行主成分分析(黄嘉佑,2004),不但浓缩了因子数目,而且使得各主分量相互独立,消除了因子之间的复共线性关系。许多研究也表明(王业宏和金龙,2003; 林健玲等,2006),以主分量作为预报因子,可以提高预报模型泛化能力,降低预报误差。

对 2009 年 8 月模式输出的 13 个辐射相关因子进行主成分分析,各主分量再与$\frac{\bar{I}}{I_0}$序列进行相关分析,选出相关性较好的主分量作为建立 MOS 预报方程的因子。表 2 列出入选 MOS 方程的 3 个主分量信息。

表 2　入选 MOS 方程预报因子的 3 个主分量信息

Table 2　The principal component information of the three forecast factors in MOS functions

主成分序数	方差贡献/%	与预报量($\bar{I}/I_0$)相关系数
1	39.2	0.77
3	15.6	-0.27
5	6.0	0.25

3　结果分析

在训练期通过建立 $\bar{I}/I_0$ 序列与相关主分量因子矩阵的预报方程,确定方程回归系数,在预报期对预报量结果乘以对应时刻天文辐射,得到辐射结果。

3.1　逐时太阳辐射预报结果分析

2009 年 8 月模式资料缺少 1—5 日及 26 日,将剩下的资料长度分为拟合期(15 d)和预报期(10 d),对逐时太阳辐射的预报结果进行分析。

由图 4 可见,在拟合期和预报期,逐时太阳辐射的 MOS 预报与观测均较吻合,二者相关系数为 0.89。MOS 预报的平均绝对百分比误差(E_{MAP})为 22.6%,相对均方根误差(E_{RMSR})为 30.7%。

比较模式直接预报结果(图 5),对于 07—18 时,MOS 方法预报 E_{MAP}、E_{RMSR}相对模式直接预报误差明显降低。可见,通过模式输出结果的解释应用,能够进一步提高辐射预报的准确率。

由于 8 月 29—30 日发生降水,辐射观测仪器加盖(观测值为 0),导致 2 d 的样本数据产生误差。表 3 对预报期去掉这 2 d 的预报结果进行了误差评估。表 3 中,$\bar{I}/I_0$(I/I_0)表示由观测序列经过(未经过)低通滤波处理后再除以天文辐射建立起的 MOS 预报方程。由误差分析可见,没有经过滤波的序列,由于过分拟合了噪音成分,导致其拟合期误差较小,而预报期误差较大。通过低通滤波处理,进一步减小了预报期的误差,可使预报 8 d 的平均 E_{MAP}降到 20%,相对模式预报改进了 50% 左右。

表 3　2009 年 8 月武汉站 WRF 模式及 MOS 预报在拟合期、预报期的误差统计分析

Table 3　Statistical analysis of error during fitting and forecasting of model and MOS prediction at Wuhan station in August 2009　%

		拟合期(15 d)	预报期(10 d)	预报期观测值去 0 样本(8 d)
WRF	E_{MAP}	34.8	47.8	41.35
	E_{RMSR}	47.9	67.6	58.8
I/I_0	E_{MAP}	20.8	27.6	21.7
	E_{RMSR}	27.6	38.2	31.2
$\bar{I}/I_0$	E_{MAP}	22.2	23.5	20.0
	E_{RMSR}	28.8	34.6	30.4

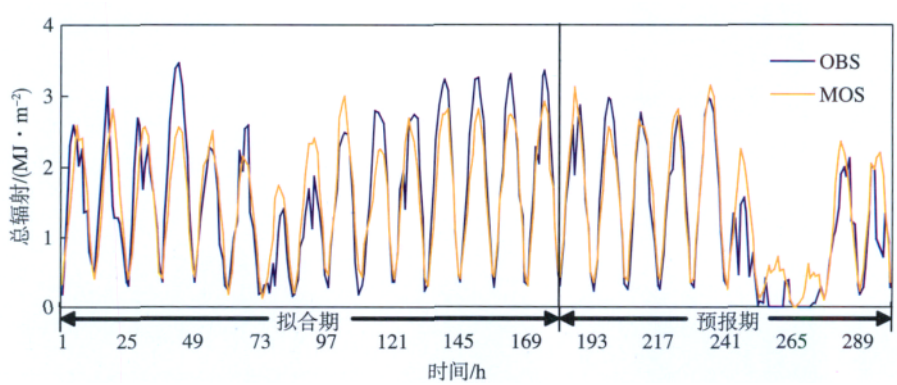

图 4　2009 年 8 月武汉站逐时太阳辐射观测(OBS)及预报(MOS)的总辐射量时间序列(单位: MJ/m²)

Fig.4　Hourly solar radiation observed(OBS) and predicted(MOS) series at Wuhan station in August 2009(units: MJ/m²)

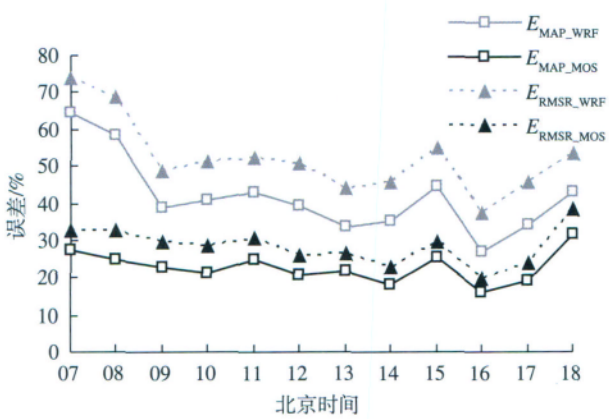

图 5 2009 年 8 月 07—18 时武汉站 WRF 模式及 MOS 预报的逐时太阳辐射误差统计量

Fig. 5 Statistical E_{MAP} and E_{RMSR} of model and MOS forecast hourly solar radiation at Wuhan station from 07:00 to 18:00 BST in August 2009

3.2 各季代表月的逐时太阳辐射预报结果

基于以上预报流程，对 2009 年 1、4、10 月分别进行逐时太阳辐射的预报试验，检验各季代表月的辐射预报效果。

表 4 列出各月选择的预报因子数目。其中 1 月在 8 月选择因子的基础上加入了雪水量和低云量因子，4 月也加入了低云量因子。由各自的主分量因子分别建立起各月的 MOS 预报方程。

表 4 MOS 预报方程在各月选择的预报因子数目

Table 4 Number of forecast factors in MOS functions in different months

	模式相关因子	相关主分量
1 月	15	7
4 月	14	7
8 月	13	3
10 月	13	5

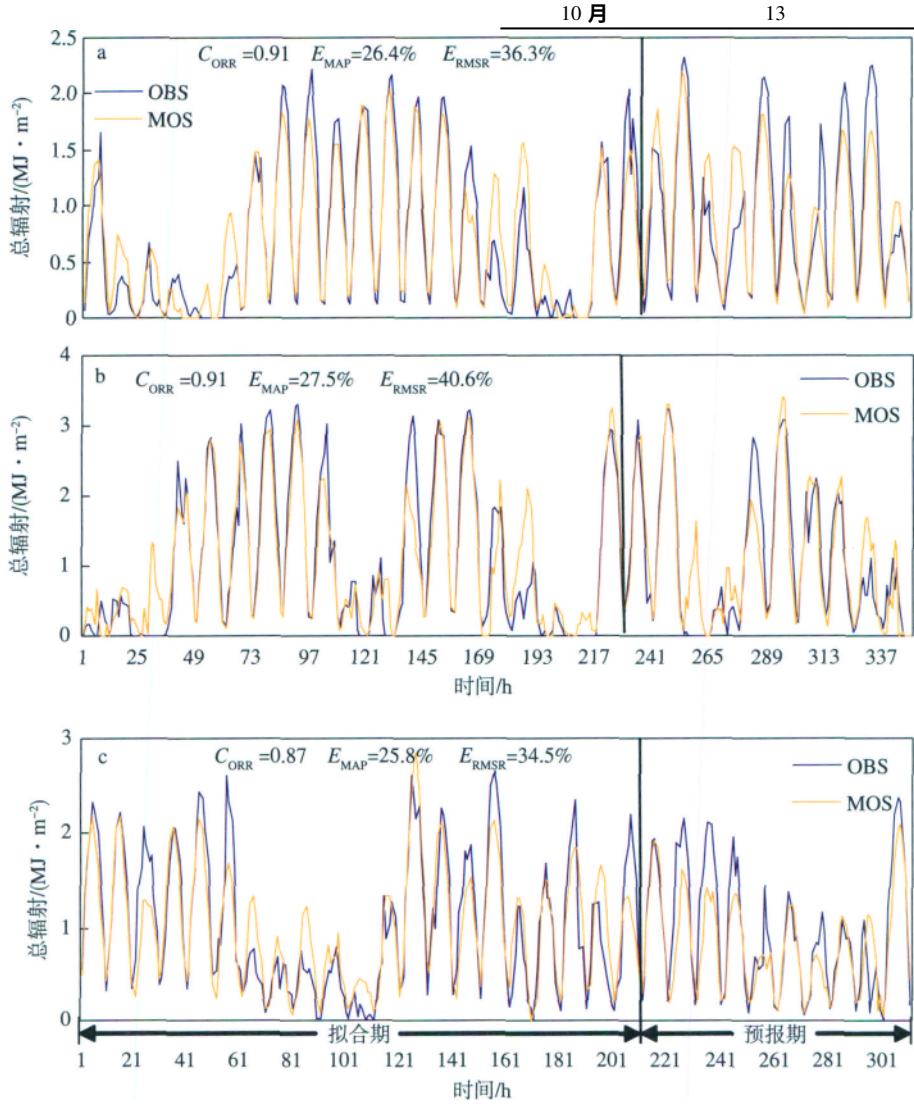

图 6 2009 年 1(a)、4(b)、10 月(c) 武汉站逐时太阳辐射观测(OBS) 及预报(MOS) 的总辐射(单位: MJ/m^2)

Fig. 6 Hourly solar radiation observed(OBS) and predicted(MOS) series at Wuhan station in (a) January, (b) April and (c) October 2009(units: MJ/m^2)

各月平均以后以 10 d 为预报期,进行独立样本检验。由图 6 可见,1、4、10 月的 MOS 预报与观测相关系数 C_{ORR} 依次为 0.91、0.91 和 0.87,E_{MAP} 均小于 28%,预报均相对稳定,效果较为理想。

各月预报 10 d 的误差统计如图 7 所示,MOS 预报 E_{MAP} 均控制在 20% ~30% 之间,E_{RMSR} 控制在 30% ~40% 之间,相比模式直接预报辐射误差降低了 50% 左右。

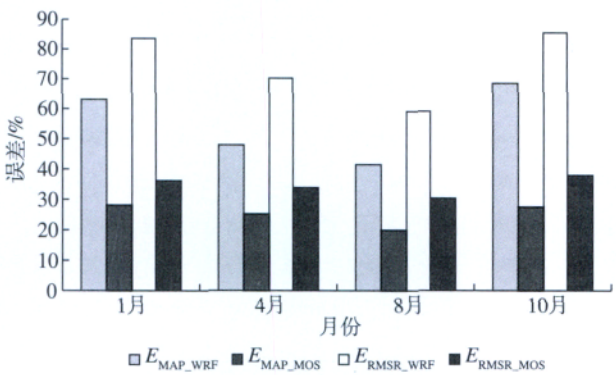

图 7　WRF 模式及 MOS 预报逐时太阳辐射在预报期 10 d(去掉观测值为 0 的样本)平均 E_{MAP} 和 E_{RMSR} 统计量(单位: %)

Fig. 7　10 days mean statistical E_{MAP} and E_{RMSR} (after removing observed samples whose values are 0) in forecast period of model and MOS predicted hourly solar radiation of each month (units: %)

4　结论

本文基于 WRF 模式输出结果,以及武汉站逐时总辐射观测数据,初步设计了基于 WRF 模式输出统计的逐时太阳总辐射预报流程。对 2009 年 1 月、4 月、8 月和 10 月的武汉站逐时辐射预报试验表明,该模型预报相对稳定,效果较为理想,使得 E_{MAP} 控制在 20% ~30%,E_{RMSR} 控制在 30% ~40%,比模式直接预报辐射改进了 50% 左右,明显提高了辐射预报的准确率。

本文以武汉站为试点进行研究,旨在为今后向各地区推广太阳辐射预报技术提供基础指导。客观分析得到的气温、云量、露点、比湿、相对湿度、地面气压等 13 个模式输出因子也可作为各地区建立 MOS 辐射预报方程的参考因子。

该方案利用逐时刻样本建立一个模型,大大丰富了样本数据,有效缩短了数据资料的储备周期(积累 20 d 左右数据即可进行建模),因此便于快速投入到建设光伏发电预报系统的业务运行中。为今后继续开展太阳能光伏发电预报研究做好了铺垫。

参考文献:

白永清,陈正洪,王明欢,等. 2010. 关于 WRF 模式模拟地表短波辐射的统计订正 [C] //第 27 届中国气象学会年会论文集. 北京: 中国气象学会: 232.

曹双华,曹家枞. 2006. 太阳逐时总辐射混沌优化神经网络预测模型研究 [J]. 太阳能学报,27(2): 164-169.

黄嘉佑. 2004. 气象统计分析与预报方法 [M]. 3 版. 北京: 气象出版社.

林健玲,金龙,彭海燕. 2006. 区域降水数值预报产品人工神经网络释用预报研究 [J]. 气象科技,34(1): 12-17.

苏高利,柳钦火,邓芳萍,等. 2007. 基于 LS-SVM 方法的晴空逐时太阳辐射模型 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版,43(3): 274-278.

孙治安,施俊荣,翁笃鸣. 1992. 中国太阳总辐射气候计算方法的进一步研究 [J]. 南京气象学院学报,15(2): 21-29.

王炳忠,张富国,李立贤. 1980. 我国的太阳能资源及其计算 [J]. 太阳能学报,1(1): 1-9.

王炳忠. 1999. 太阳辐射计算讲座第三讲: 地外水平面辐射量的计算 [J]. 太阳能,4: 12-13.

王明欢,赖安伟,陈正洪,等. 2010. 关于 WRF 模式模拟地表短波辐射的研究 [C] //第 27 届中国气象学会年会论文集. 北京: 中国气象学会: 235.

王业宏,金龙. 2003. 基于自然正交展开的神经网络长期预报模型 [J]. 自然灾害学报,12(2): 127-132.

翁笃鸣. 1964. 试论总辐射的气候学计算方法 [J]. 气象学报,34(3): 304-314.

杨金焕,于化丛,葛亮. 2009. 太阳能光伏发电应用技术 [M]. 北京: 电子工业出版社: 21-29.

张素宁,田胜元. 1997. 太阳辐射逐时模型的建立 [J]. 太阳能学报,8(3): 273-277.

Bofinger S, Heilscher G. 2004. Solar radiation forecast based on ECMW and model output statistics [R] //Technical Report ESA/ENVISOLAR.

Jensenius J S, Cotton G F. 1981. The development and testing of automated solar energy forecasts based on the model output statistics (MOS) technique [C] //Proc 1st workshop on terrestrial solar resource forecasting and on the use on satellites for terrestrial solar resource assessment. Newark: American Solar Energy Society.

(责任编辑: 刘菲)