

风能太阳能气象预报业务进展与 发展趋势

申彦波

中国气象局风能太阳能中心 科学主任

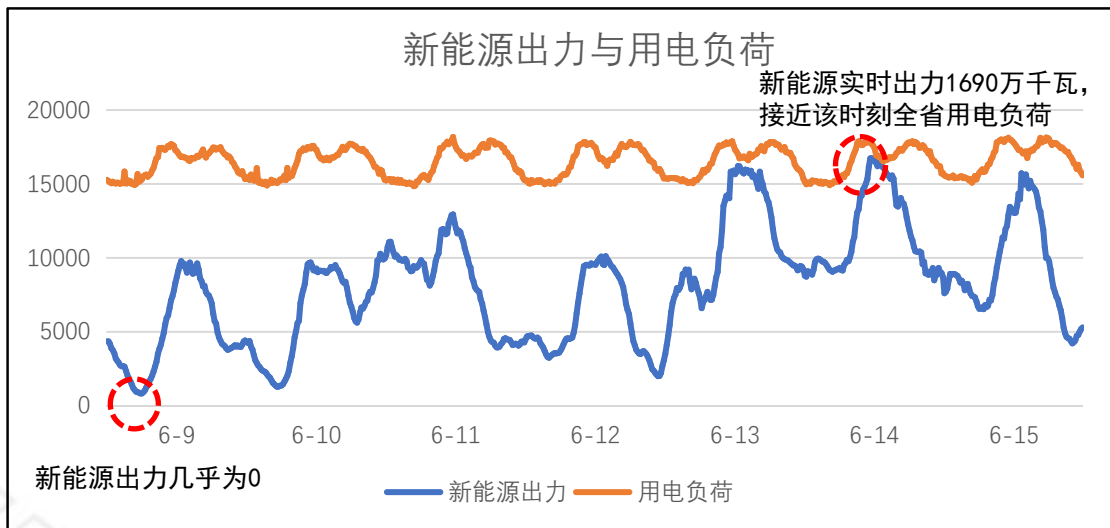
中国气象局公共气象服务中心 首席

2023.5.5

提 纲

- 风能太阳能气象预报**需求**
- 基于FY-4A气象卫星的太阳能资源**超短期**预报
- 基于数值天气预报模式的风能太阳能资源**中短期**预报
- 基于机器学习的**月尺度**风能太阳能资源预报
- 风能太阳能气象预报发展**展望**

一、风能太阳能气象预报需求

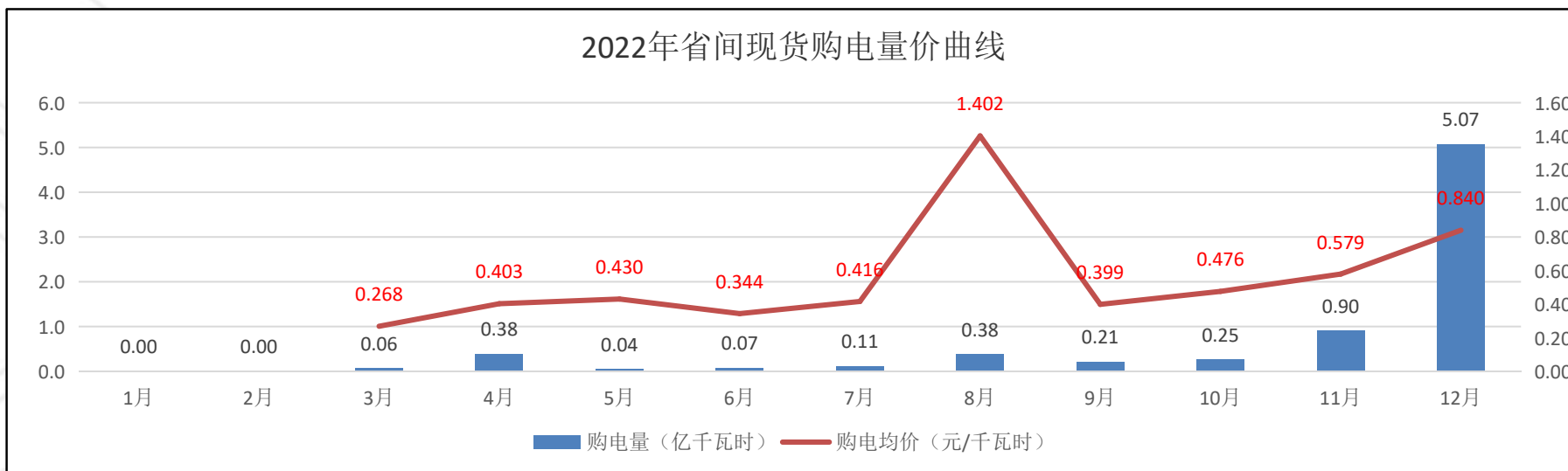


➤ 电网调度的两难问题

- 新能源高发：电网消纳能力不足
- 新能源低发：用电高峰时段供电能力不足

➤ 电力交易的供需矛盾

- 新能源高发：低价外送促消纳
- 新能源低发：高价购买保供应



一、风能太阳能气象预报需求

GB/T 40607-2021 《调度侧风电或光伏功率预测系统技术要求》

功率预测的前提：气象要素预报

功率预测要求

长期电量预测：未来12个月，每月一次，时间分辨率为月 —— 月平均风速、总辐照度、温度

中期功率预测：次日零时起到未来240h，每日两次，时间分辨率为15min

短期功率预测：次日零时起到未来72h，每日两次，时间分辨率为15min

超短期功率预测：未来15min~4h，每15min一次，时间分辨率15min

气象要素预报要求

不同层高的风速、风向，
总辐照度，云量，气温，
湿度，气压等

概率预测要求：

- a) 预测时长和时间分辨率应与中期、短期、超短期功率预测保持一致；
- b) 应至少提供置信度为95%、90%、85%的预测区间上下限，并可手动设置其它置信度。

一、风能太阳能气象预报需求

单站预测要求

表1 风电场的功率预测性能指标要求

预测时间尺度	月平均准确率	月平均合格率
中期功率预测	以一日（24h）为步长统计，预测准确率按顺序依次递减，第十日（第217~240h） $\geq 70\%$	——
短期功率预测	日前 $\geq 83\%$	日前 $\geq 83\%$
超短期功率预测	第四小时 $\geq 87\%$	第四小时 $\geq 87\%$

表2 光伏电站的功率预测性能指标要求

预测时间尺度	月平均准确率	月平均合格率
中期功率预测	以一日（24h）为步长统计，预测准确率按顺序依次递减，第十日（第217~240h） $\geq 75\%$	——
短期功率预测	日前 $\geq 85\%$	日前 $\geq 85\%$
超短期功率预测	第四小时 $\geq 90\%$	第四小时 $\geq 90\%$

一、风能太阳能气象预报需求

区域预测要求

表3 全网风电的功率预测性能指标要求

预测时间尺度	月平均准确率	月平均合格率
中期功率预测	以一日（24h）为步长统计，预测准确率按顺序依次递减，第十日（第217~240h） $\geq 75\%$	——
短期功率预测	日前 $\geq 85\%$	日前 $\geq 85\%$
超短期功率预测	第四小时 $\geq 90\%$	第四小时 $\geq 90\%$

表4 全网光伏的功率预测性能指标要求

预测时间尺度	月平均准确率	月平均合格率
中期功率预测	以一日（24h）为步长统计，预测准确率按顺序依次递减，第十日（第217~240h） $\geq 80\%$	——
短期功率预测	日前 $\geq 90\%$	日前 $\geq 90\%$
超短期功率预测	第四小时 $\geq 95\%$	第四小时 $\geq 95\%$

一、风能太阳能气象预报需求

区域	考核规范	主要考核指标	具体考核要求
国家电网 西北区域	2019 版西北“双细则”	上传率/准确率	上传率：短期、超短期功率预测曲线及其他满足运行的数据文件，上传率应大于 95%（风电、光伏一致）； 准确率：风电场提供的日短期功率预测曲线最大误差不超过 25%，光伏电站最大误差不超过 20%；风电场、光伏发电站的超短期预测曲线第 2 小时调和平均数准确率不小于 75%。
国家电网 华北区域	2019 版华北“双细则”	上报率/准确率	上报率：中短期/超短期功率预测上报率应达到 100%（风电、光伏一致）； 准确率：中短期功率预测的次日预测准确率，应大于等于 85%；超短期功率预测准确率应大于等于 90%（风电、光伏一致）。
国家电网 东北区域	2020 年版东北“双细则”	上传率/准确率/ 合格率	上传率：功率预测数据传送率应达到 100%（风电、光伏一致）； 准确率：月平均风电功率预测准确率 $\geq 75\%$ ，为合格；月平均光伏功率预测准确率 $\geq 85\%$ ； 合格率：月平均风电/光伏功率预测合格率 $\geq 80\%$ ，为合格。
国家电网 华东区域	2019 年版华东“双细则”	上报率/准确率	上报率：风电场和光伏电站短期/超短期功率预测上报率应达到 100%； 准确率：短期功率预测准确率应 $\geq 80\%$ ；超短期功率预测准确率应 $\geq 85\%$ （风电、光伏一致）。
国家电网 华中区域	2020 年版华中“双细则”	准确率	风电场次日 0-24h 日前（短期）功率预测准确率应大于等于 80%，光伏电站次日 0-24 日前（短期）功率预测准确率应大于等于 85%；风电场超短期功率预测第 4 小时的准确率应大于等于 85%，光伏电站超短期功率预测第 4 小时的准确率应大于等于 90%。
南方电网	2020 年版南网“双细则”	上报率/准确率	上报率：短期/超短期上报率应达到 100%（风电、光伏一致）； 准确率：风电短期功率预测准确率应 $\geq 80\%$ ，超短期功率预测准确率应 $\geq 85\%$ ；光伏短期功率预测准确率应 $\geq 85\%$ ，超短期功率预测准确率应 $\geq 90\%$ 。

风能太阳能预报

- 预报要素：总辐射、70-200米风速
- 预报时效：短期72h、中期240h
- 时间分辨率：15min
- 误差考核：发电功率均方根误差

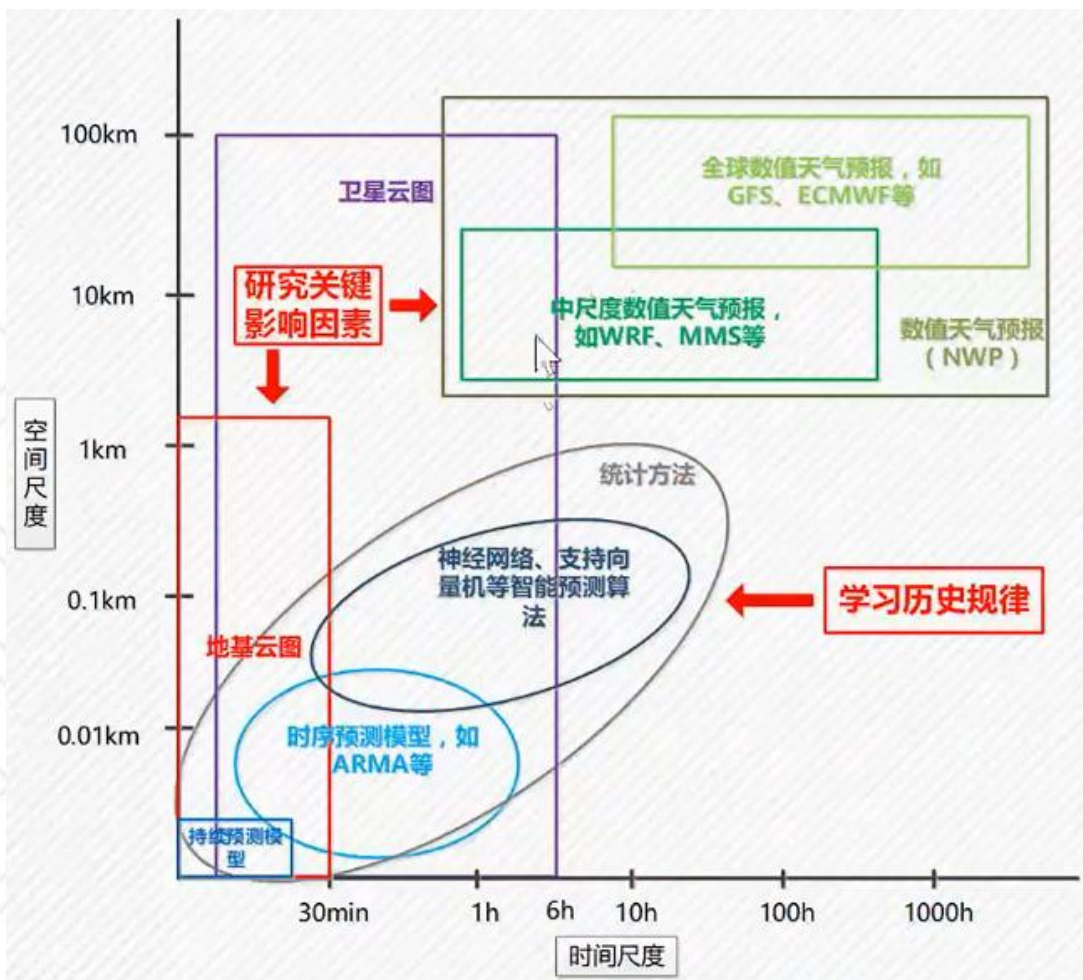
VS

常规天气预报

- 预报要素：气温、降水
- 预报时效：短期24/72h、中期168h
- 时间分辨率：1h、3h、6h
- 误差考核：TS评分

一、风能太阳能气象预报需求

不同预报时效，对应不同预报技术，应用于不同场景



PD IEC TR 63043:2020



BSI Standards Publication

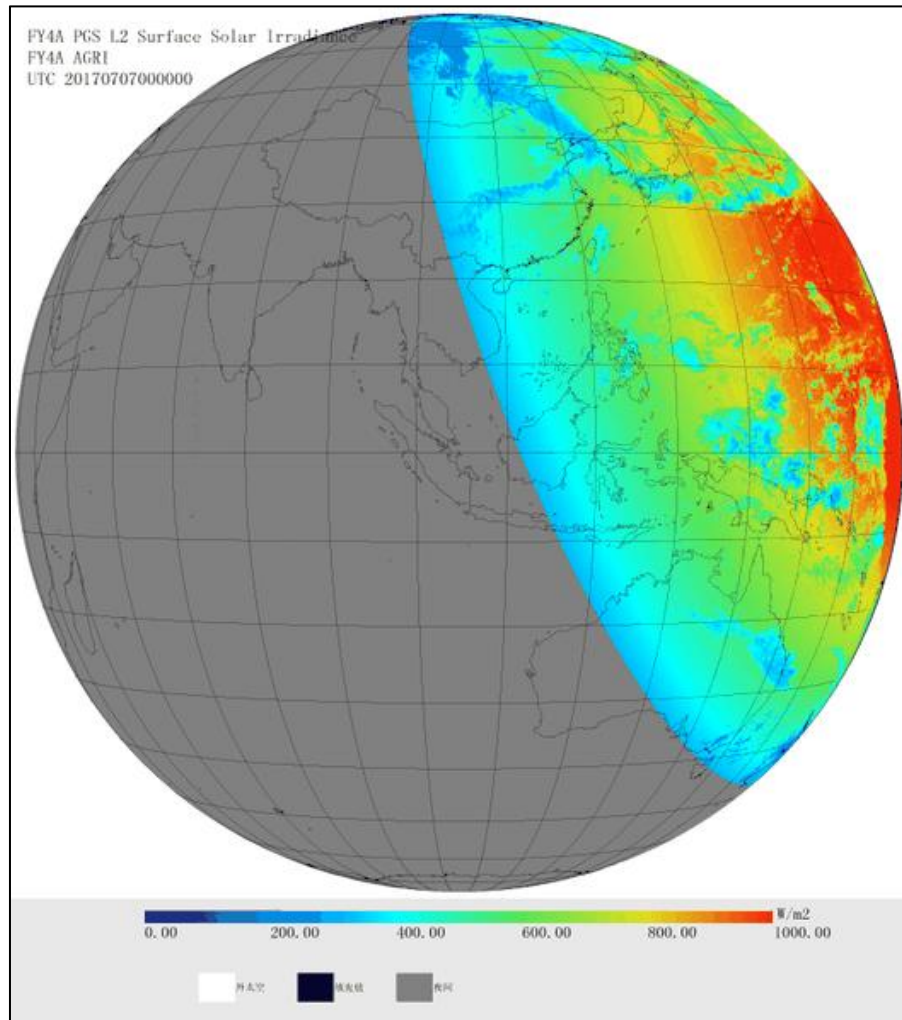
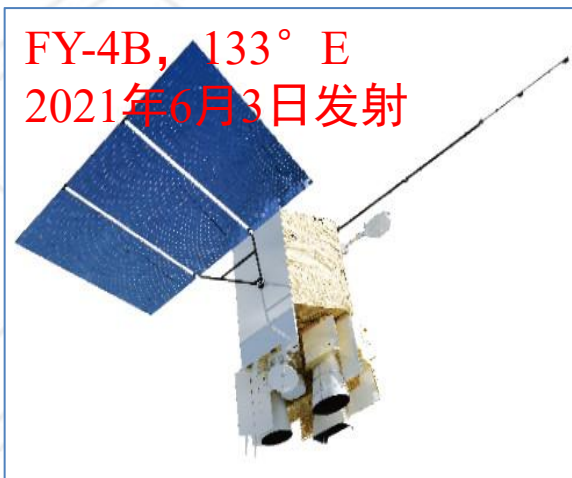
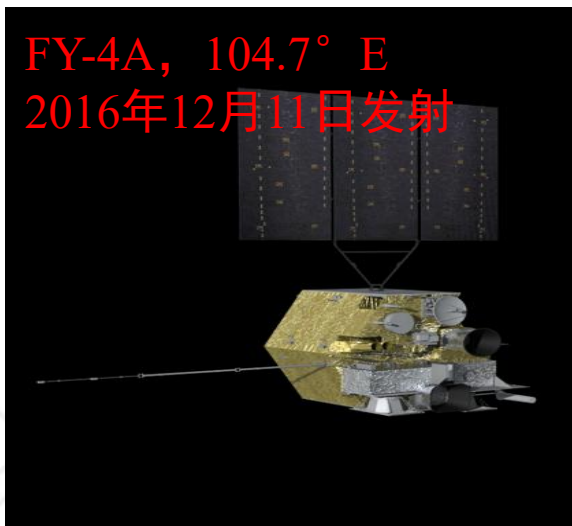
Renewable energy power forecasting technology

IEC技术报告, 可再生能源
发电功率预测技术

<https://webstore.iec.ch/publication/26529>

bsi.

二、FY-4A气象卫星的太阳能资源超短期预报



新一代静止气象卫星FY-4A/4B地面太阳辐射产品SSI基本特性

空间分辨率: 4km

时间分辨率: 15min/1hr

有效时间长度: 2018年5月至今, 持续更新

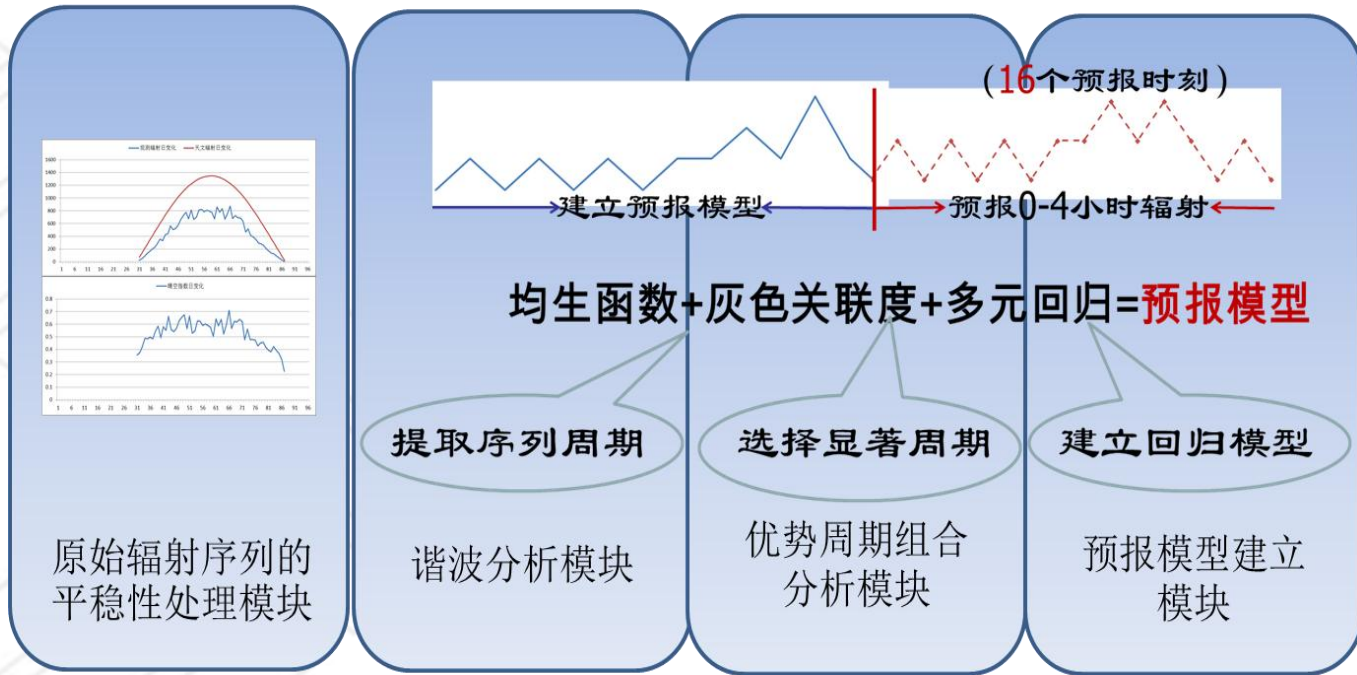
SSI要素 (短波辐射三要素)

- 水平面总辐射
- 直接辐射
- 散射辐射

二、FY-4A气象卫星的太阳能资源超短期预报

超短期预报： 利用FY-4A SSI 15min监测数据，逐15min滚动预报4hr，时间分辨率15min

基于均生函数法的光伏电站辐射短临外推系统



$$\bar{x}_l(i) = \frac{1}{n_l} \sum_{j=0}^{n_l-1} x(i+jl), i=1, \dots, l; 1 \leq l \leq m$$

均值生成函数

$$x_i(k) = \frac{x(k) - \bar{x}_i}{s_i}$$

灰色关联度分析

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + P \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + P \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}$$

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k)$$

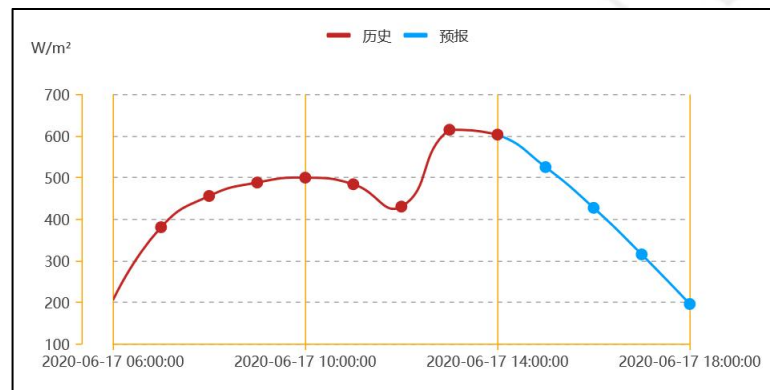
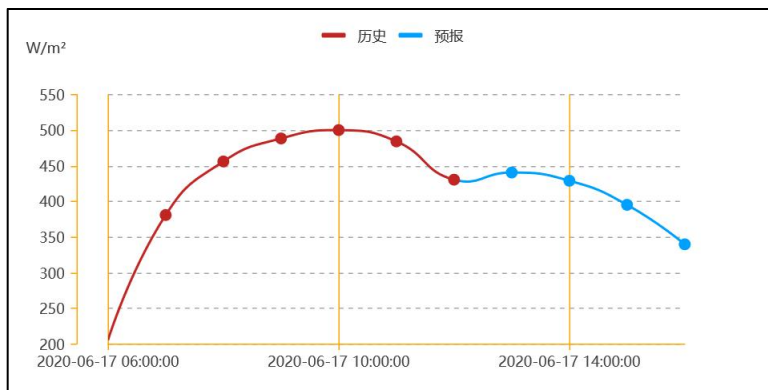
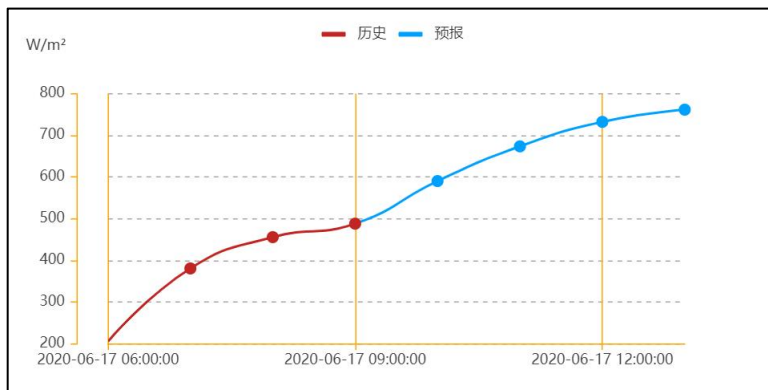
关联度计算

$$\hat{x}(n+q) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i f_i(n+q) \quad q=1,2,\dots$$

预测模型

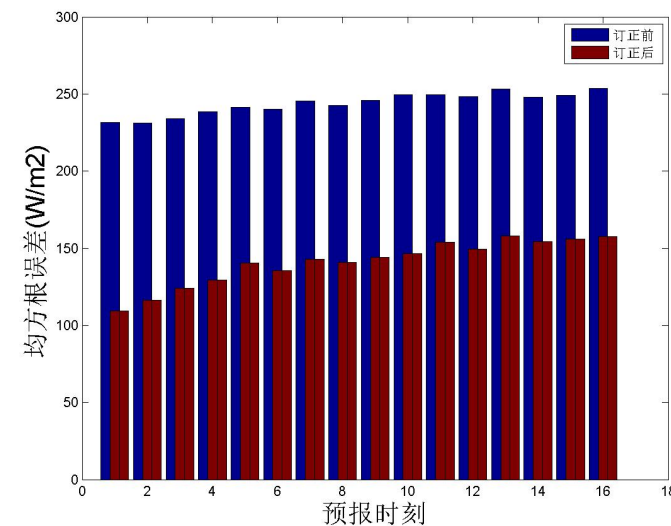
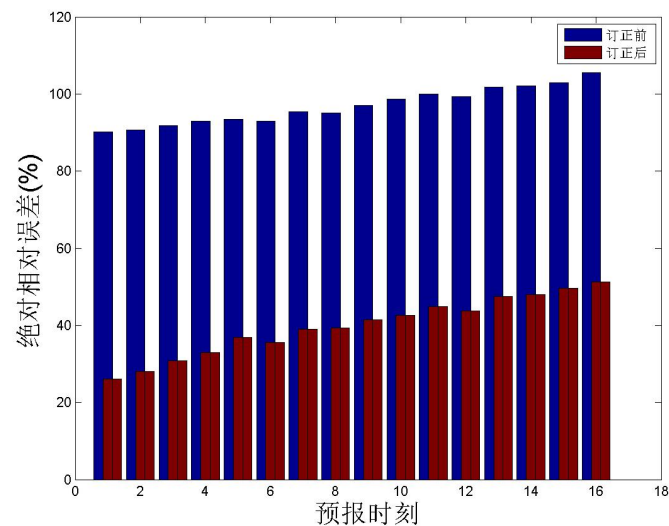
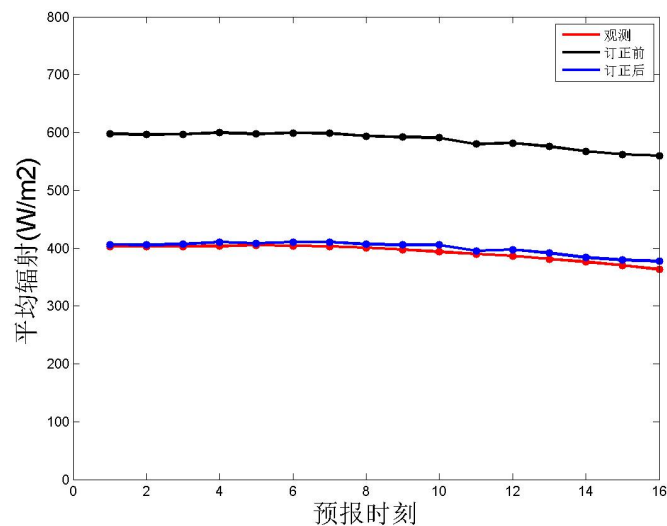
二、FY-4A气象卫星的太阳能资源超短期预报

预报效果：随天气情况变化动态调整预报



二、FY-4A气象卫星的太阳能资源超短期预报

预报效果：采用订正数据可有效降低预报误差；预报误差随预报时效延长而增大

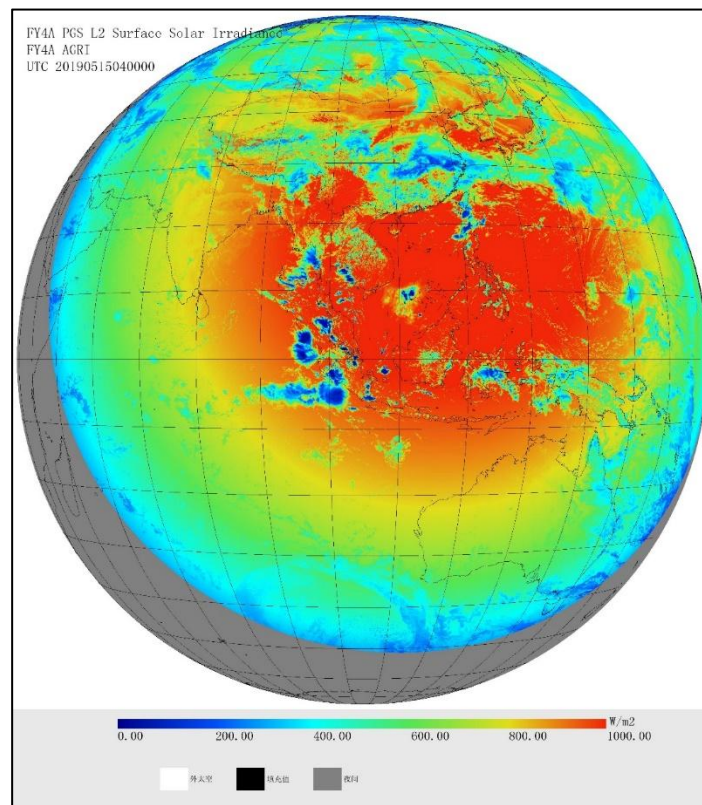


二、FY-4A气象卫星的太阳能资源超短期预报

FY-4A云图



FY-4A SSI



FY-4A SSI优点

- 1.时间分辨率高
- 2.空间分辨率高
- 3.空间覆盖广、连续性好
- 4.反映天气变化

圆盘范围内，任意点位均可实现超短期预报

三、基于数值天气模式的风能太阳能资源中短期预报

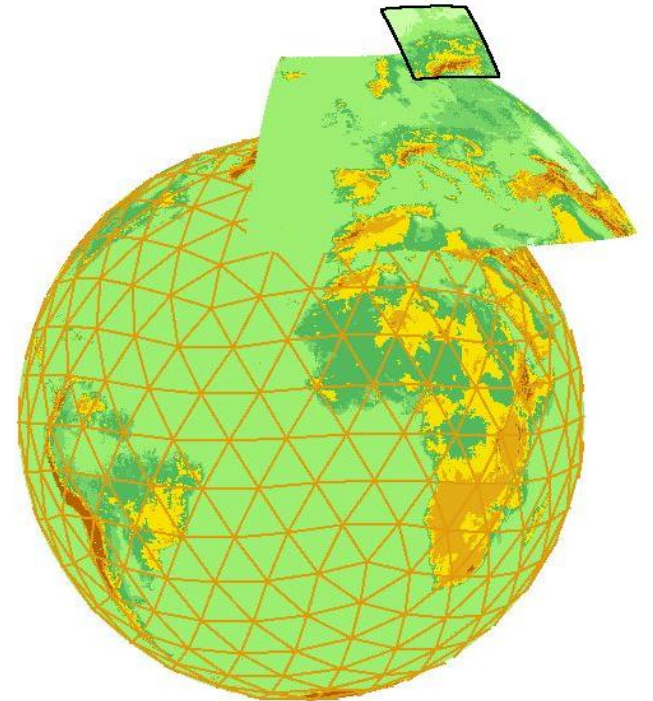
- 风力发电功率和光伏发电功率日尺度的预报主要依赖于数值天气模式（NWP）的结果。
- **数值天气模式：数值求解给定初始和边界条件的大气运动基本方程，并从一个已知的初始时刻预报大气的未来状态。** 根据其空间范围可分为：全球模式和区域模式。

全球模式

- 全球模式有14个国家在运行：IFS、GFS、CMA-GFS等；
- 水平分辨率低，一般在几十公里左右，难以反映风速、云层和辐照度受局部地形和次网格天气现象影响的细微变化；
- 数据同化周期长。

区域模式

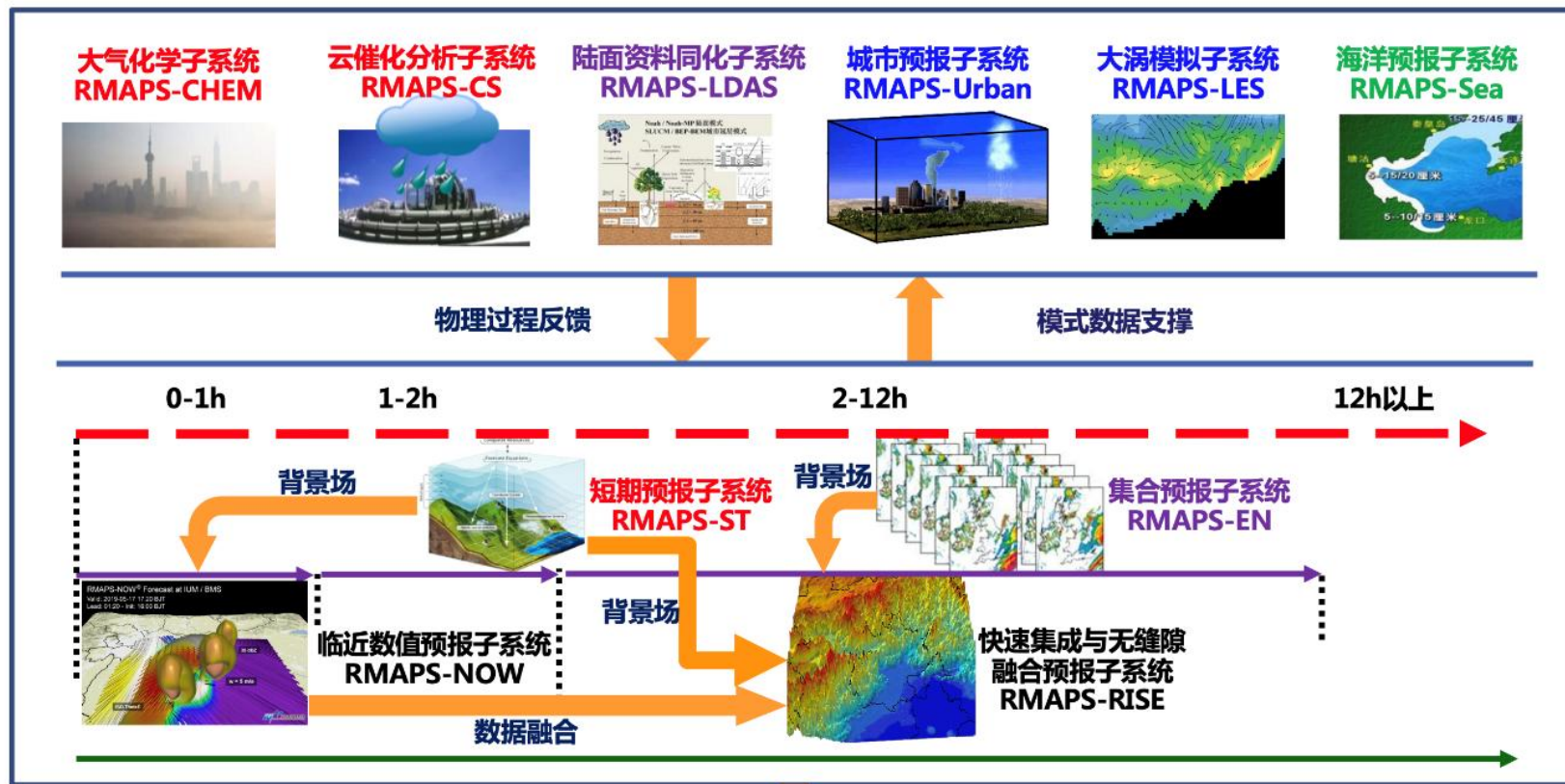
- 包括WRF、英国气象局的Euro4和UKV，法国的AROME和中国的CMA-MESO；
- 水平分辨率高，一般为几公里，可以更准确地模拟微观地形和微观过程；
- 数据同化周期短，更多的观测资料被吸收。



三、基于数值天气模式的风能太阳能资源中短期预报

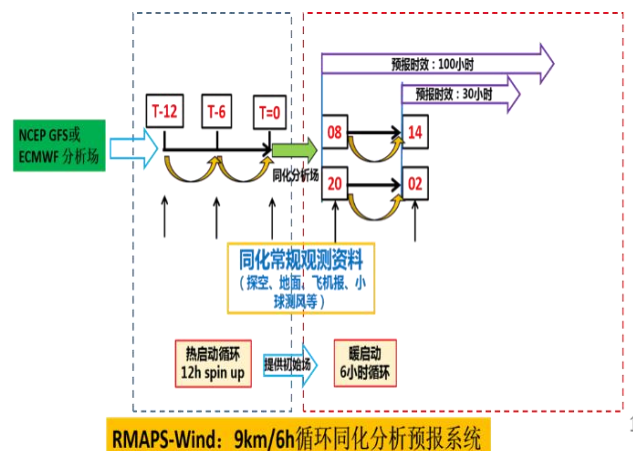
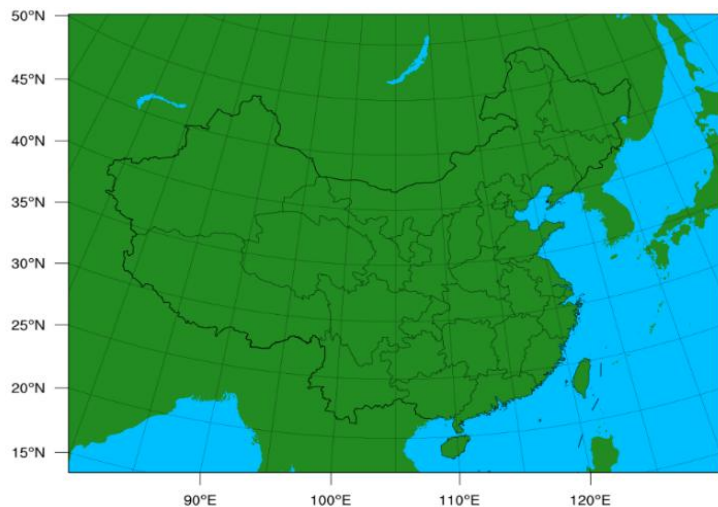
两次奥运会带来的发展契机：

- 新一代无缝隙、多尺度、多物理过程数值预报模式体系（RMAPS）
- 实现分钟级更新、百米级分辨率的客观分析和预报



三、基于数值天气模式的风能太阳能资源中短期预报

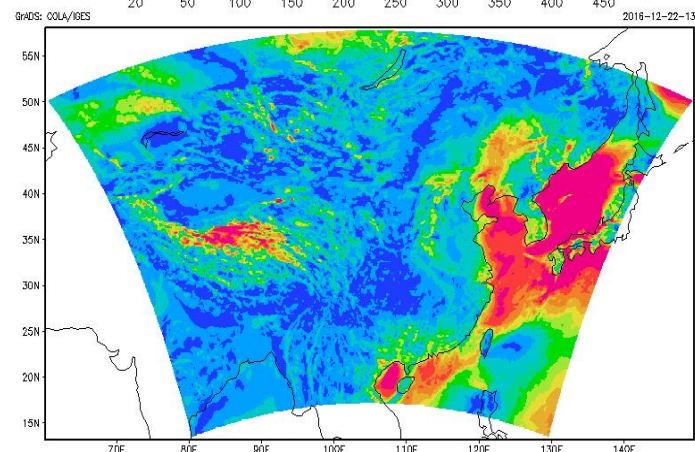
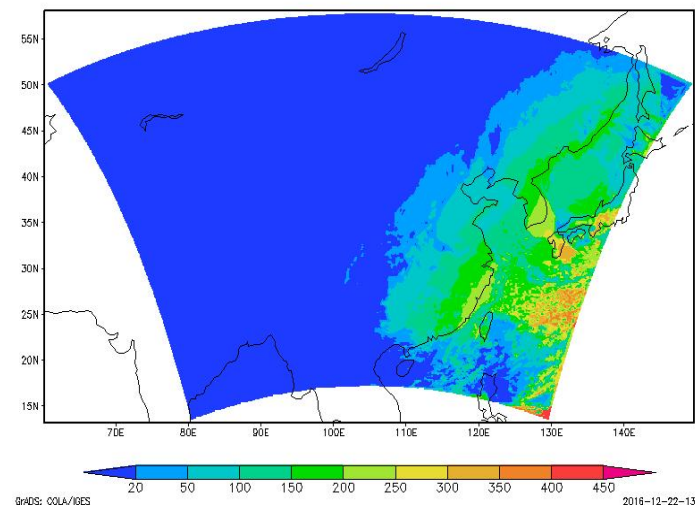
中国气象局风能太阳能数值预报系统 (CMA-WSP)



预报要素

时间、经度、纬度
地表温度、地面气压、云量、降水量、降雪量
地表的感热通量
地表的潜热通量
地表向下长波辐射通量
地表向下短波辐射通量
2m温度、2m比湿
10m风速、风向
垂直eta层第2-5层高度、风速、风向、温度

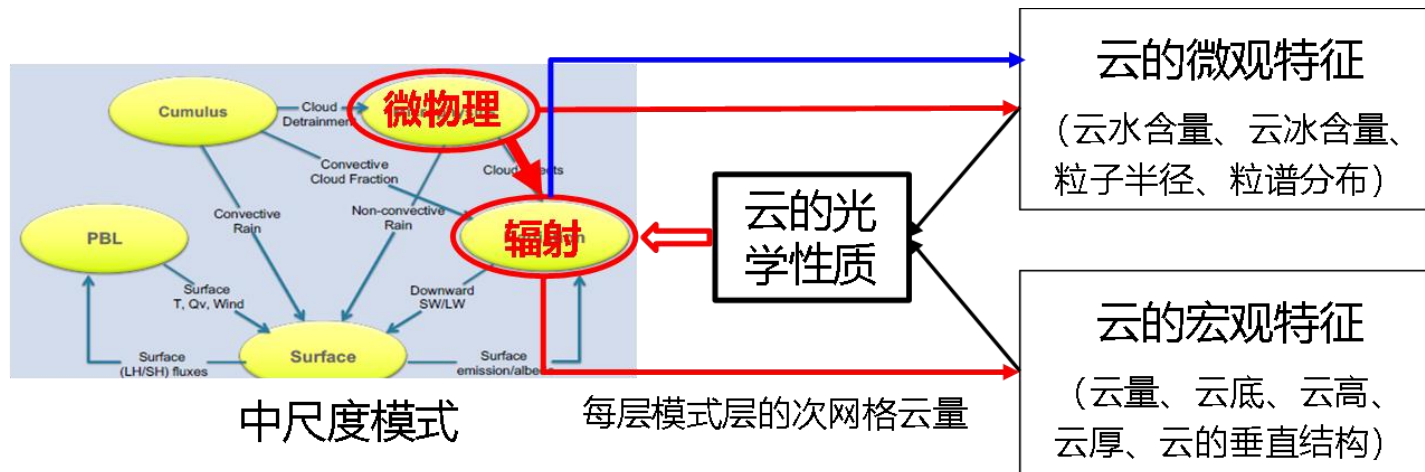
- 空间分辨率：9km（全国）/3km（区域）/1km（场站）
- 预报时效：126hr（V1.0）
336hr（V2.0）
- 时间分辨率：15min
- 预报要素：右表



全国未来336小时风能太阳能资源预报

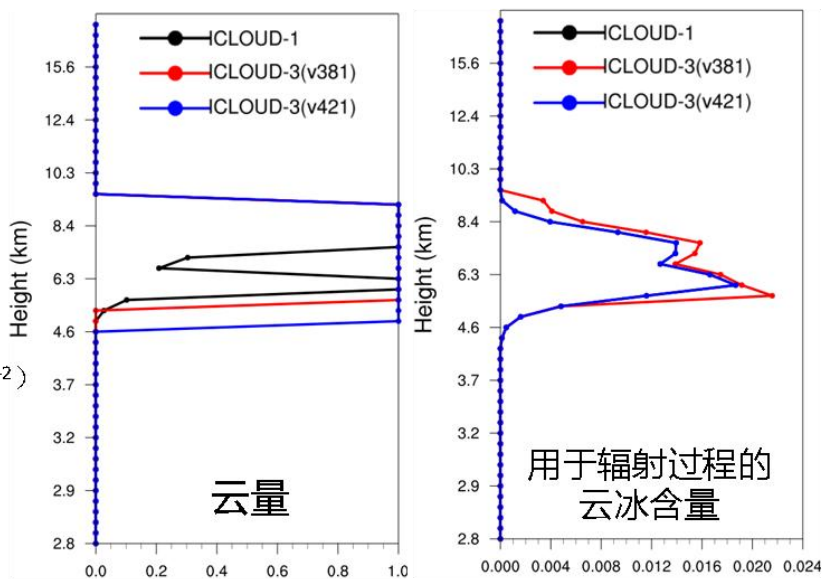
三、基于数值天气模式的风能太阳能资源中短期预报

云是辐射过程中的最大不确定性



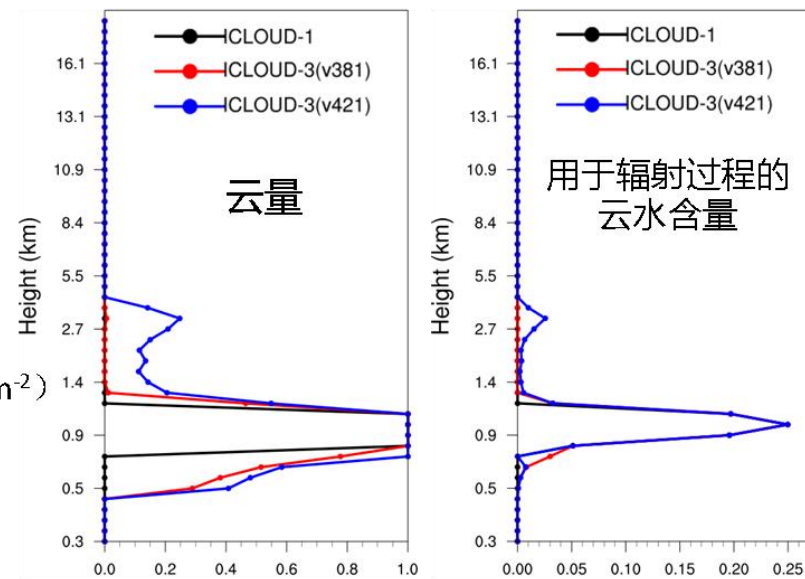
青海
格尔木

向下短波辐射 ($W.m^{-2}$)
观测: 353
Icloud-1: 538
Icloud-3(V381): 489
Icloud-3(V421): 337



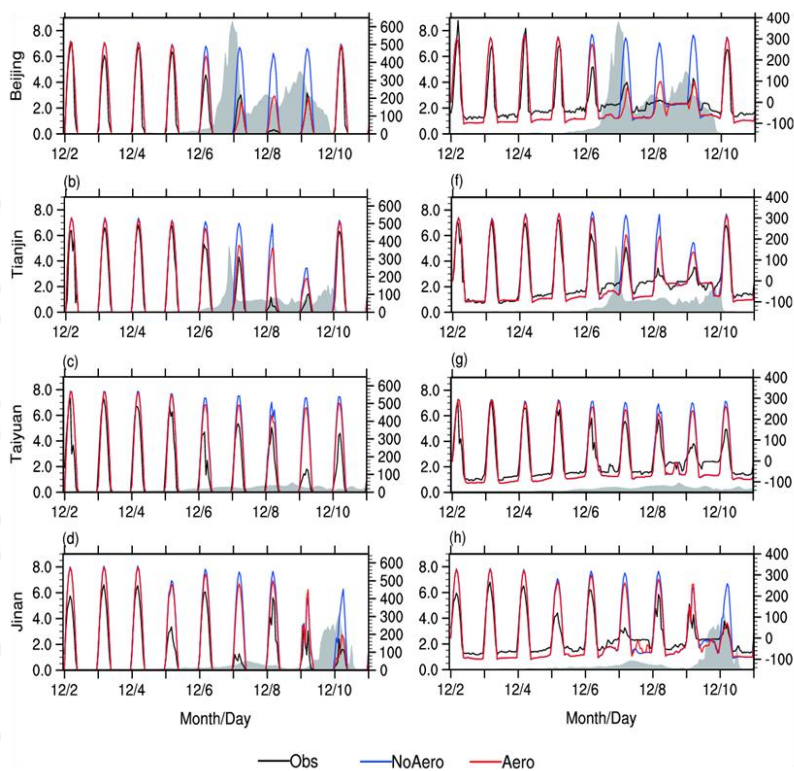
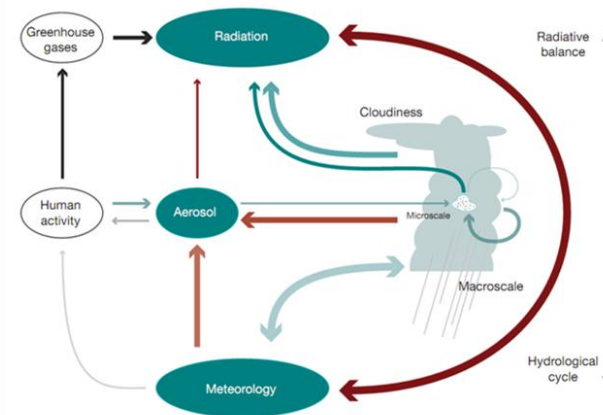
福建
福州

向下短波辐射 ($W.m^{-2}$)
观测: 71
Icloud-1: 325
Icloud-3(V381): 284
Icloud-3(V421): 69



三、基于数值天气模式的风能太阳能资源中短期预报

- **气溶胶**一方面通过直接辐射效应影响大气辐射平衡
- 另一方面通过与云的相互作用，影响降水和水循环特征，间接影响辐射平衡



序号	地区	海拔高度	Ctrl	AeroClim
1	佳木斯	82.0	-13.49	-17.40
2	哈密	774.6	19.98	14.64
3	格尔木	2804.8	37.81	34.42
4	锡林浩特	1003.5	12.31	4.79
5	北京	32.8	31.70	17.34
6	丽江	2380.9	17.43	9.90
7	郑州	110.4	52.12	37.98
8	福州	84.1	5.55	0.20
9	北海	10.3	-7.08	-10.58
10	吕泗港	3.8	24.30	13.92

三、基于数值天气模式的风能太阳能资源中短期预报

70m/100m 风速预报方法

插值方法:

- 利用位于100m (70m) 高度上下两层模式层的预报结果进行插值

$$U_{100} = \alpha U_{100+} + \beta U_{100-} \quad \alpha \text{和} \beta \text{是距离权重}$$

两层模式层, 100m高度以上的100+, 100m高度以下的100-

直接诊断方法:

- 基于模式最底层风速和相似理论, 直接诊断100m (70m) 高度的米风速

$$U_{100} = U_m \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_m + 100}{z_o}\right) + PSIM_{100}}{\ln\left(\frac{h_m}{z_o}\right) + PSIM}$$

$PSIM_{100}$ 和 $PSIM$ 与大气稳定度有关

U_m 和 h_m : 模式最底层风速和高度

z_o : 模式中的地面粗糙度

ME		插值		直接诊断
站点/模式	经纬度	v1	v2_beta	v2_beta
Shenzhen	22.67, 113.92	6.79	6.09	4.93
Tianjin	39.10, 117.17	0.63	0.64	0.40
3	42.12, 123.75	0.48	0.55	-0.58
5	42.28, 122.83	1.39	1.3	0.10
12	41.02, 119.70	0.09	-0.11	-1.48
16	40.77, 122.13	1.19	1.16	0.75
20	39.90, 123.74	0.41	0.21	-0.07

RMSE		插值		直接诊断
站点/模式	经纬度	v1	v2_beta	v2_beta
Shenzhen	22.67, 113.92	7.49	6.63	5.46
Tianjin	39.10, 117.17	2.43	2.14	2.03
3	42.12, 123.75	2.62	2.39	2.28
5	42.28, 122.83	2.82	2.52	1.86
12	41.02, 119.70	2.73	2.55	3.05
16	40.77, 122.13	3.17	2.78	2.45
20	39.90, 123.74	2.92	2.76	2.59

三、基于数值天气模式的风能太阳能资源中短期预报

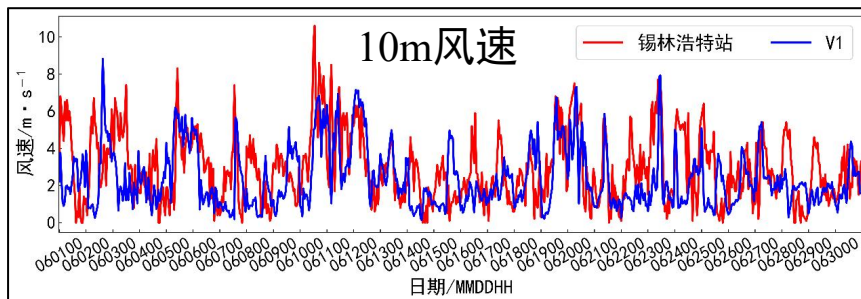
中国气象局风能太阳能数值预报系统 (CMA-WSP)

CMA-WSP 风能太阳能预报产品

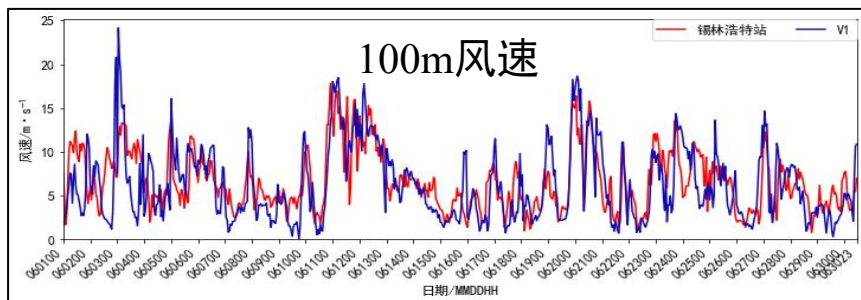
检验报告

(2022年6月)

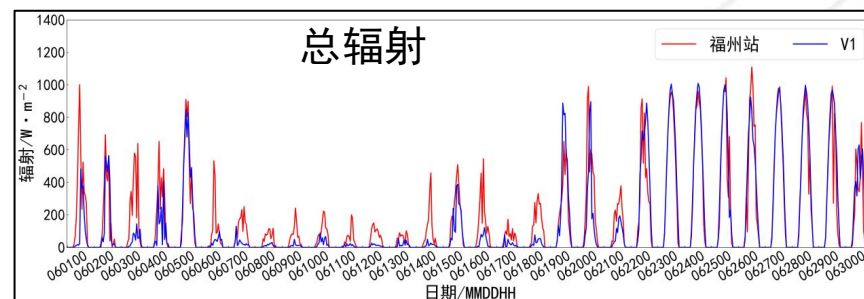
中国气象局风能太阳能中心



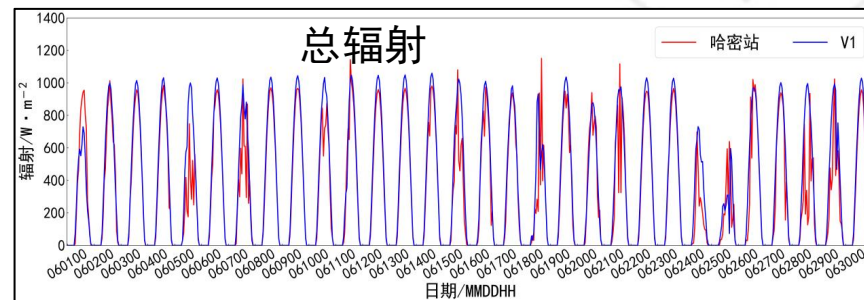
检验时段	R	ME/m·s ⁻¹	MAE/m·s ⁻¹	MAPE/%	RMSE/m·s ⁻¹
Day1 (V1)	0.35	-0.55	1.63	109.62	2.07
Day5 (V1)	-0.02	-0.71	1.87	122.74	2.38



检验时段	R	ME/m·s ⁻¹	MAE/m·s ⁻¹	MAPE/%	RMSE/m·s ⁻¹
Day1 (V1)	0.66	-0.35	2.47	43	3.24
Day5 (V1)	0.23	-0.62	3.67	67	4.77



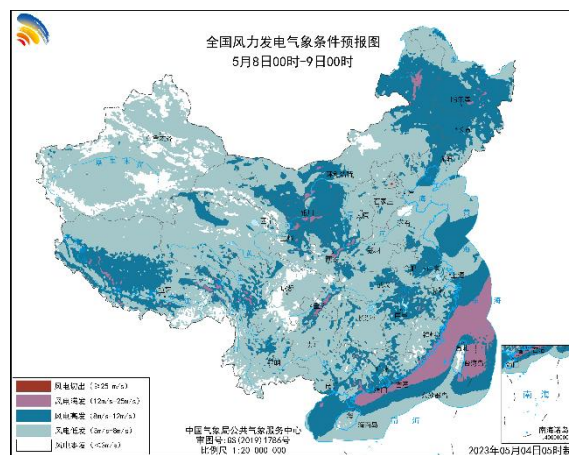
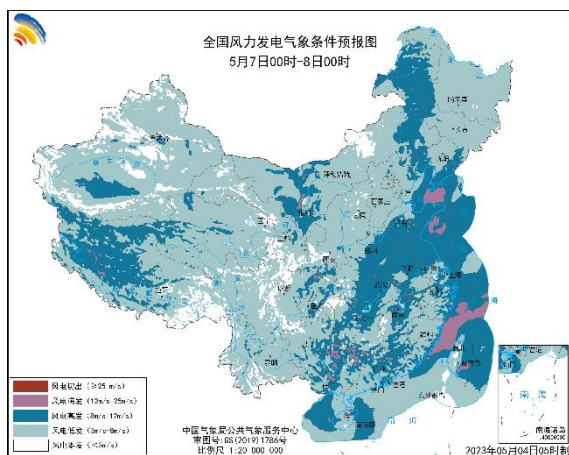
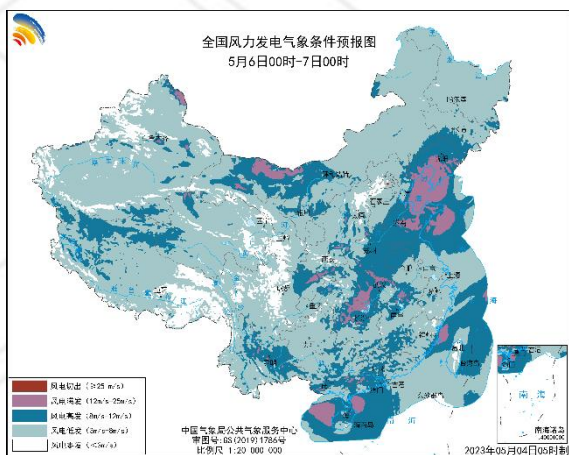
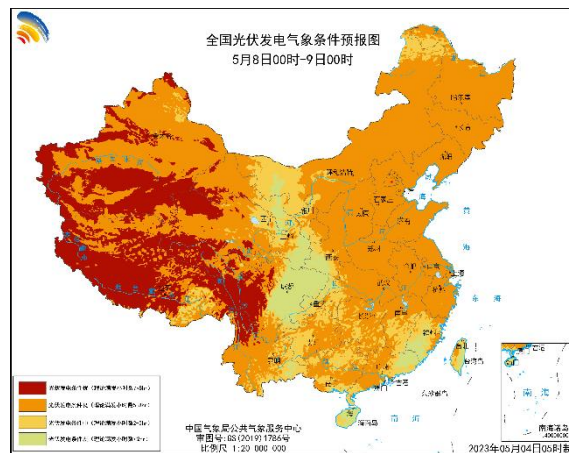
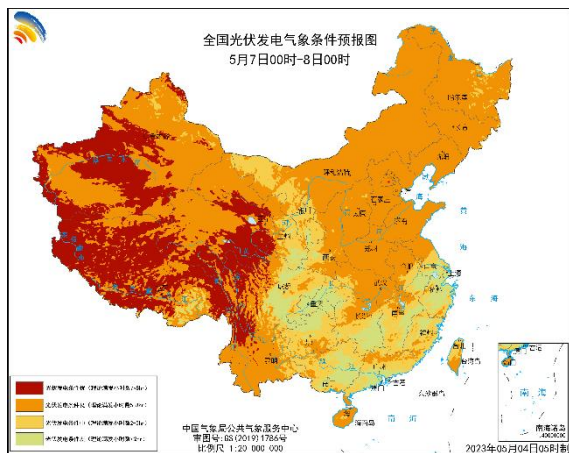
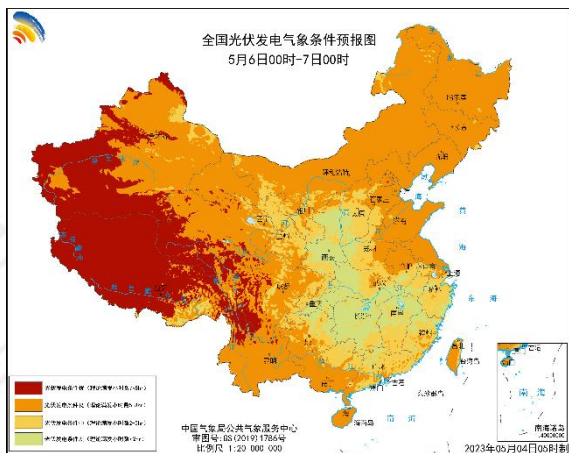
检验时段	R	ME/W·m ⁻²	MAE/W·m ⁻²	MAPE/%	RMSE/W·m ⁻²
Day1 (V1)	0.84	-45.85	112.41	39.28	172.94
Day5 (V1)	0.83	9.64	124.68	43.64	183.07



检验时段	R	ME/W·m ⁻²	MAE/W·m ⁻²	MAPE/%	RMSE/W·m ⁻²
Day1 (V1)	0.88	77.31	107.29	22.03	176.46
Day5 (V1)	0.85	107.78	124.2	25.9	208.67

三、基于数值天气模式的风能太阳能资源中短期预报

未来4天全国风电、光伏发电气象条件预报，每周一、周四制作/发布专报，可来函订阅



全国风光发电气象条件预报专报

2023年第36期

中国气象局风能太阳能中心 2023年5月4日

一、中央气象台天气预报

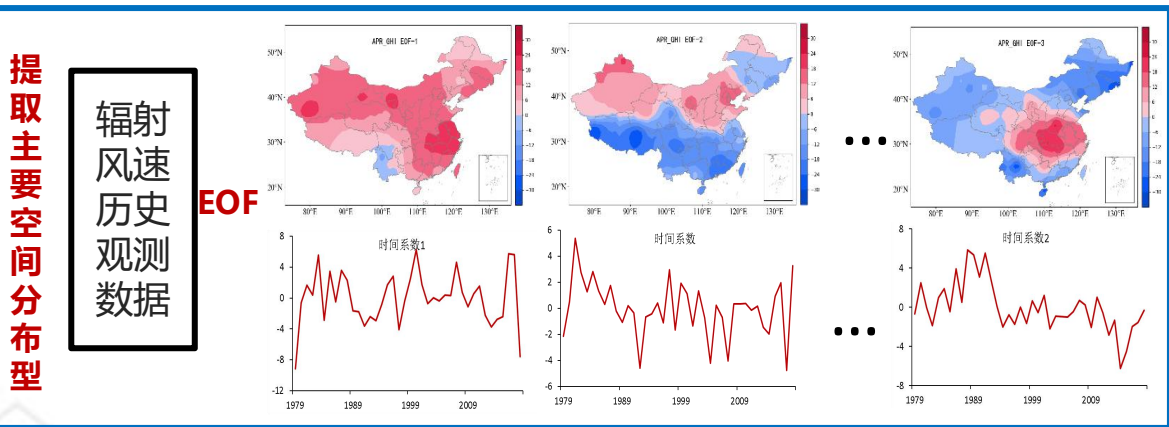
5月4日08时至5日08时，湖北南部和东部、安徽南部、湖南东北部、江西中北部、浙江西部、江苏南部以及山东半岛、辽宁南部、河北东部等地区部分地区有大到暴雨，其中，安徽南部、江西北部等地区部分地区有大暴雨（100~120毫米）。

5月4日08时至5日08时，山东东部、安徽中南部、江苏南部、湖北东部和南部、湖南中北部、江西北部、重庆东南部、贵州东北部等地的部分地区将有8~10级雷暴大风或冰雹天气；内蒙古西南部、山东中南部、河南南部、安徽中南部、江苏中南部、湖北东部和南部、湖南中北部、江西中北部、浙江中北部、重庆东北部、贵州东北部等地的部分地区将有短时强降水天气，小时雨量20~40毫米，局地可达50毫米以上。强对流的主要影响时段为今天午后至夜间。中央气象台5月4日06时继续发布暴雨蓝色预警和强对流天气蓝色预警。

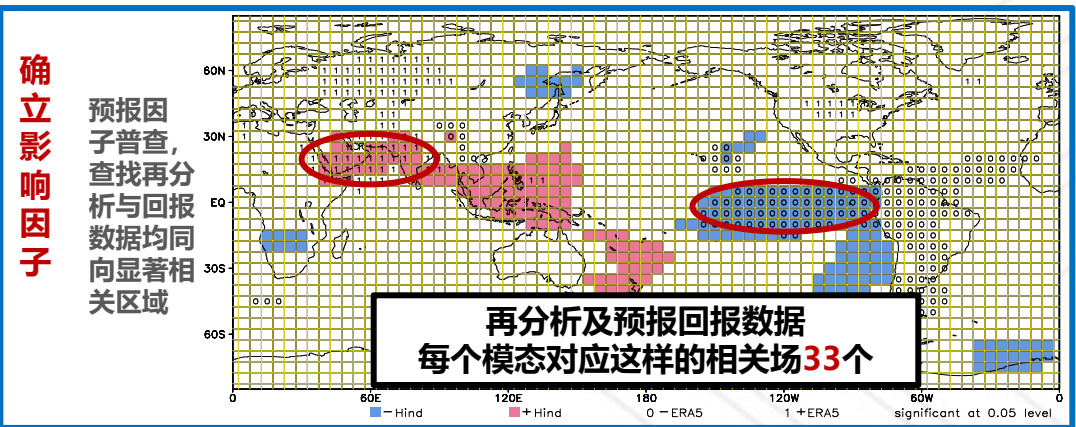
此外，5月4日，受地面气旋影响，黄淮东部、华北东部等地有4~5级风，阵风7级左右；黄海、渤海有7~9级大风。5-6日，强降水带南压至长江以南地区，江南大部、华南北部以及西南地区

四、基于机器学习的月尺度风能太阳能资源预报

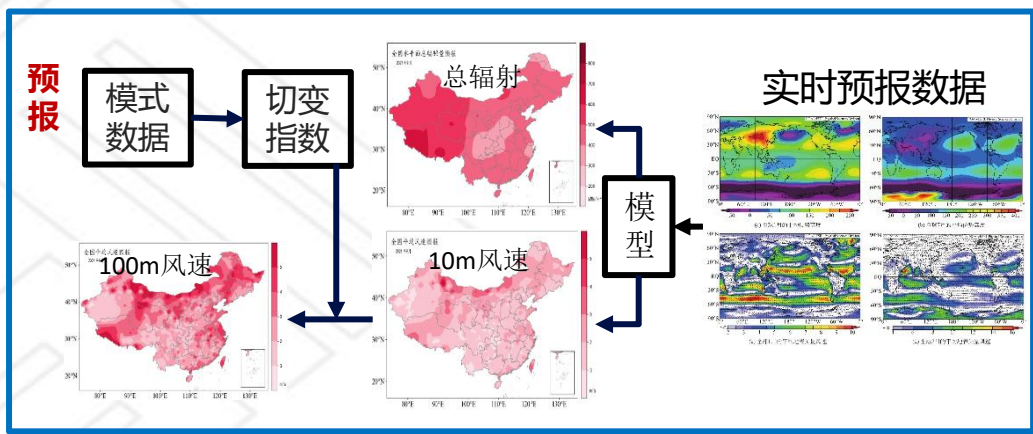
1



2



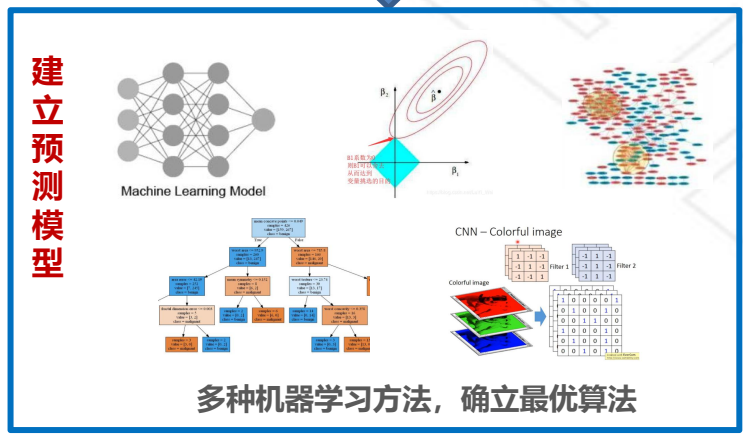
5



4



3

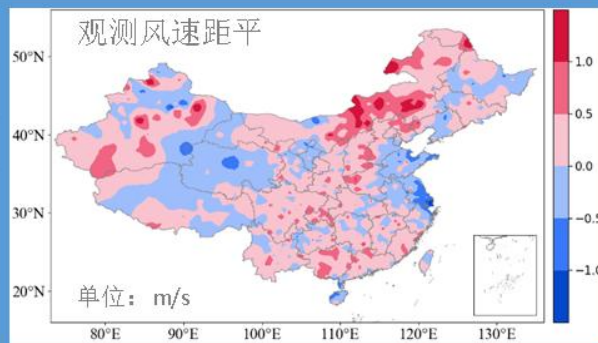
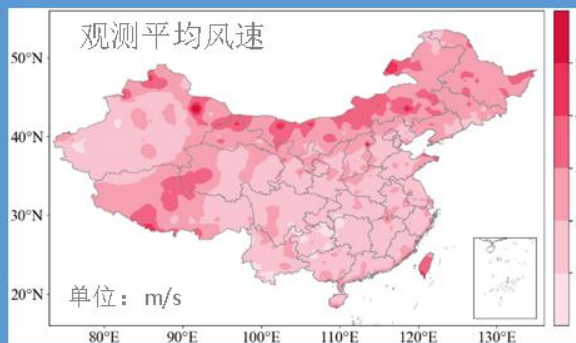
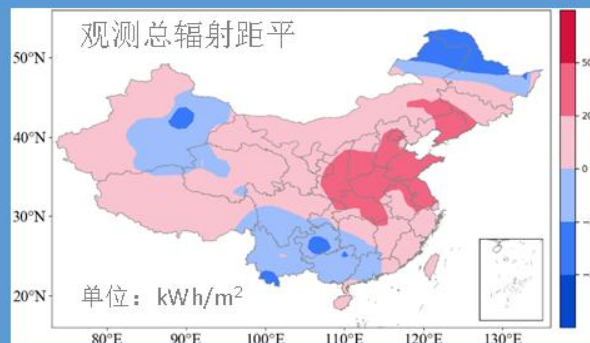
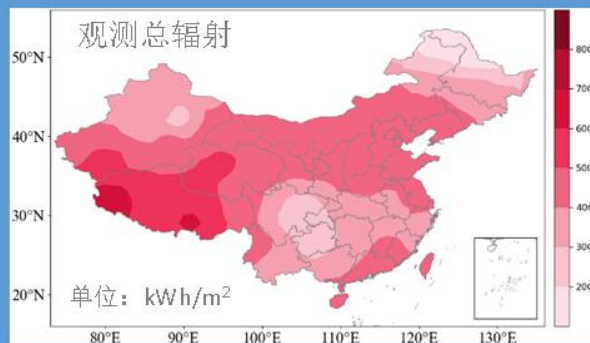


四、基于机器学习的月尺度风能太阳能资源预报

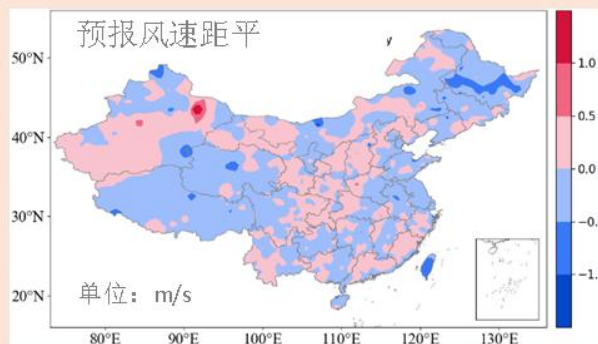
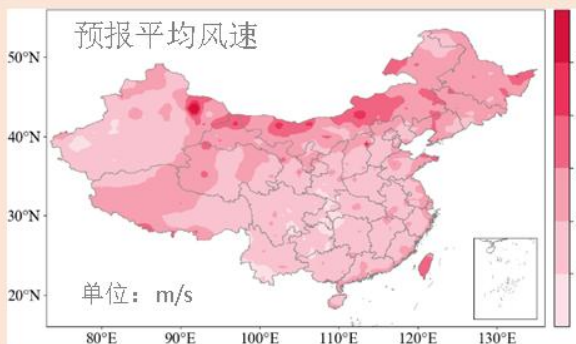
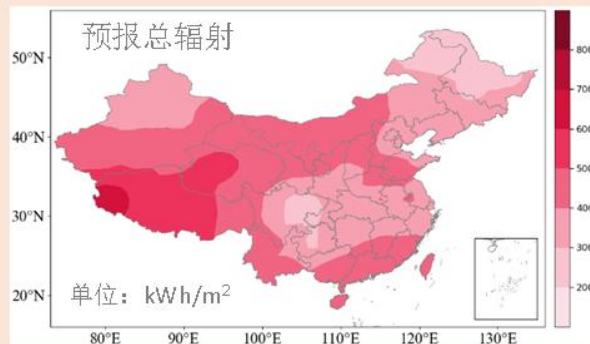
总辐射

100米风速

观测值

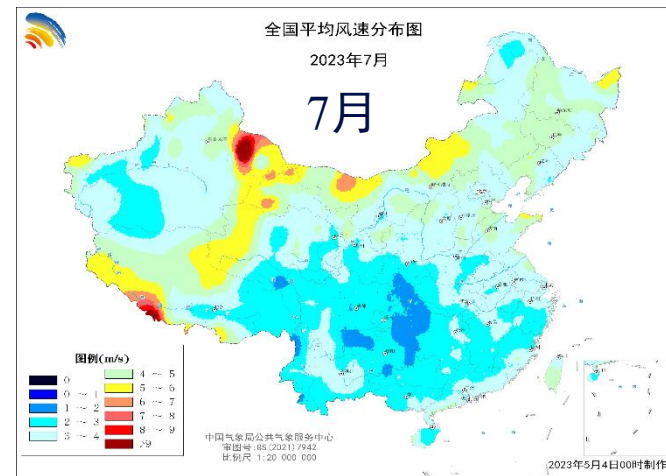
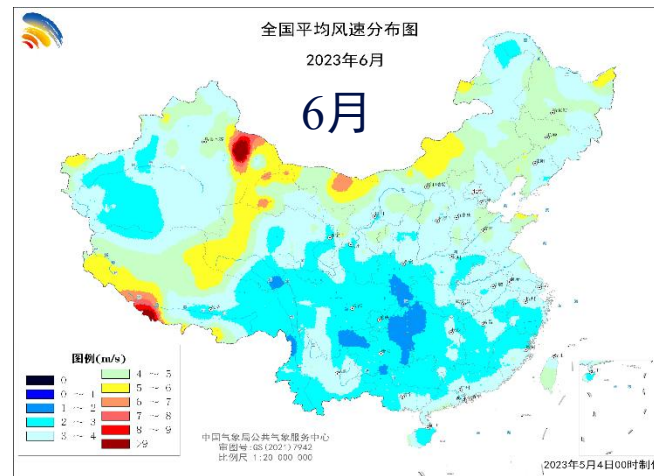
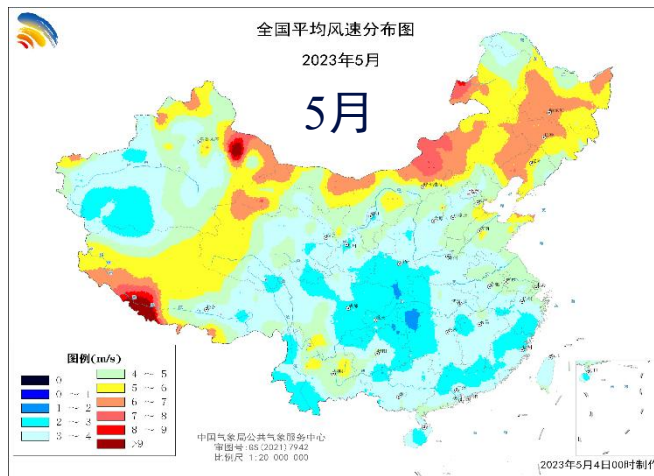


预报值

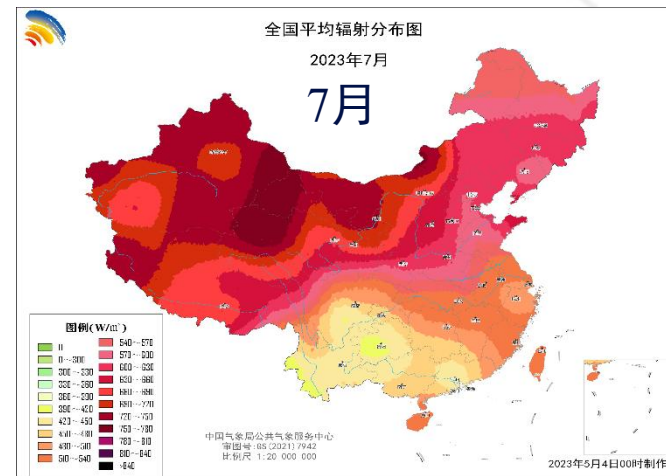
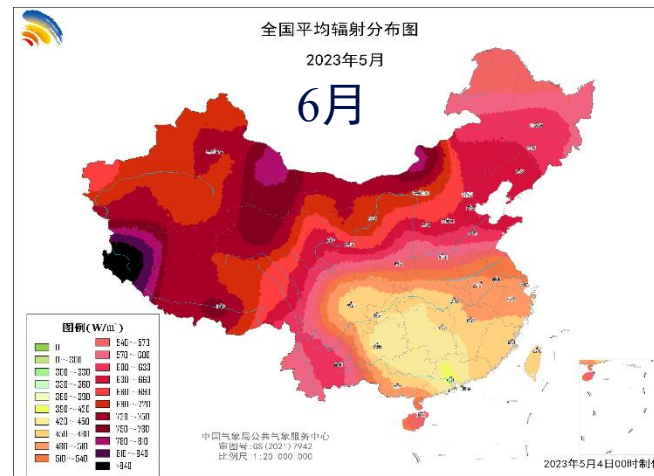
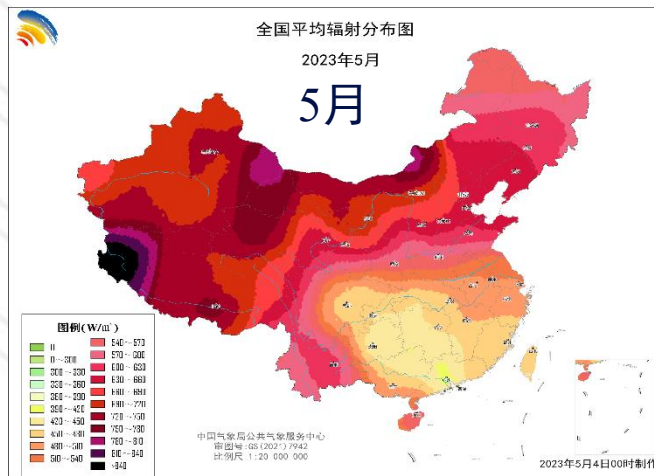


四、基于机器学习的月尺度风能太阳能资源预报

100米
风速



总辐射



五、风能太阳能气象预报发展展望

风速（大气环流）、辐射（云）预报涉及到天气预报学科的根本，准确率提升任重道远

➤ 专业化、国产化风能太阳能数值预报模式发展

- 高密度气象观测资料同化
- 针对云、气溶胶的辐射参数化方案改进
- 针对近地层风速的边界层参数化方案改进
- 针对高频次、长时效、高时间分辨率的数值模式运行策略优化

➤ 基于人工智能的风能太阳能数值预报产品订正技术发展

- 多模式集成订正技术
- 一场一策、一机一模型
- 测风测光数据质量提升

➤ 风光发电功率预测技术发展

- 场站功率预测：人工智能
- 集中式功率预测：区域数值天气预报

敬请批评指正！



13681254296

