

引用格式: 申彦波. 新型能源体系建设中的气象问题与技术进展 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(1): 31-42. SHEN Yanbo. Meteorological issues and technological progress in the development of new energy systems [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 31-42. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-423.

新型能源体系建设中的气象问题与技术进展

申彦波

- 中国气象局能源气象重点实验室, 北京 100081;
- 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081)

摘要: [目的] 新能源发电在未来相当长一段时间内, 将持续呈现大规模、高比例、市场化、高质量的发展趋势特征。深入推进能源革命, 加快构建新型能源体系与气象问题密切相关。[方法] 文章分析新型能源体系中的关键环节与天气气候的关系; 从支撑、融入和保障3个方面强调气象工作在新型能源体系中的重要作用; 详细梳理我国风能太阳能资源评估技术发展历程, 包括资源评估技术、技术开发量评估方法以及新一轮风能太阳能资源普查工作的技术要点等; 深入分析风能太阳能预报需求和预报时段划分, 介绍中国气象局在超短期、短期、中期和长期预报方面的技术进展、主要业务产品以及风能太阳能发电精细化气象服务示范计划(SDP)的实施情况。[结果] 风能太阳能资源评估技术显著提升, 但也面临着风电机组大型化、太阳能利用多元化所带来的挑战, 需要不断发展新的资源评估技术应对能源行业需求; 风能太阳能预报准确率的提升需要方法论的突破。“一场一策”构建风光场站的气象预报订正和功率预测模型, 将是提升预报准确率的重要手段。[结论] 气象工作应以国务院《气象高质量发展纲要(2022—2035年)》为指引, 不断强化科技创新和社会服务能力, 为新型能源体系的高质量发展做出积极贡献。

关键词: 新型能源体系; 气象服务; 风能太阳能资源评估; 风能太阳能预报预测; SDP

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-423

文章编号: 2095-8676(2025)01-0031-12

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-423

中图分类号: TK519; S165; TK01+9



论文二维码

Meteorological Issues and Technological Progress in the Development of New Energy Systems

SHEN Yanbo

- Key Laboratory of Energy Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
- China Meteorological Administration Public Meteorological Service Center, Beijing 100081, China)

Abstract: [Objective] New energy power generation is expected to continue its development characterized by large scale, high proportion, marketization and high quality in the future. Advancing the energy revolution and accelerating the development of new energy systems are significantly influenced by meteorological issues. [Method] This study analyzed the relationship between key aspects of new energy systems and weather and climate. It highlighted the important role of meteorological work for new energy systems in three fields: support, integration and guarantee. The study presented the development history of wind and solar energy resource assessment technologies in China, covering resource assessment technology, assessment methods for technically available resources and key technical issues for the latest round of wind and solar energy resource censuses. Additionally, it examined the forecast demand and forecast period divisions for wind and solar energy, introduced the technical progress and main products of the China meteorological administration in ultra-short, short, medium, and long-term forecasts, and discussed the implementation of the precise meteorological service demonstration plan for wind and solar power generation (SDP). [Result] Wind and solar energy resource assessment technologies have seen significant improvements; however, they also face challenges posed by large-scale wind turbine generation systems and the

收稿日期: 2024-12-12 修回日期: 2024-12-23

基金项目: 新疆科技厅上海合作组织科技伙伴计划及国际科技合作计划项目“中巴经济走廊太阳能资源精细化评估及其未来变化趋势研究”(2023E01011); 内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目“基于物理知识与机器学习融合模型的‘沙戈荒’风电基地精细化智慧应用服务系统研发及应用”(2024JBGS0054)

diversified utilization of solar energy. Consequently, there is a pressing need to continuously develop new resource assessment technologies to meet the demands of the energy industry. Additionally, enhancing the accuracy of wind and solar energy forecasts requires breakthroughs in methodology. Developing meteorological forecast correction and power prediction models for wind and solar power generation stations, based on the principle of applying a tailored policy to each station, will be a crucial strategy for enhancing forecast accuracy. [Conclusion] Meteorological work should be guided by the *Guidelines for High-Quality Meteorology Development (2022-2035)* issued by the State Council. It is essential to continually strengthen scientific and technological innovation, as well as social service capabilities, in order to make positive contributions to the high-quality development of new energy systems.

Key words: new energy systems; meteorological services; wind and solar energy resource assessment; wind and solar energy forecasts; SDP

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

习近平总书记在 2020 年 9 月 22 日第七十五届联合国大会上提出:中国将在 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和。在同年 12 月 12 日的气候雄心峰会上进一步提出:2030 年,中国单位 GDP 的 CO₂ 排放将比 2005 年下降 65% 以上,风能太阳能发电总装机容量达 1.2 TW 以上。

2021 年 9 月,《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中明确要求,我国的非化石能源消费比重在 2025 年、2030 年和 2060 年将分别达 20%、25% 和 80%。当前,我国的能源消费结构中非化石能源和化石能源近似呈现“2:8”的形态,而 2060 年时这个比例将会相互转换,变成 1 个全新的“8:2”的形态,意味着在未来几十年的时间内,新能源发电将持续快速发展,保持大规模、高比例的发展特征。

党的二十大报告中提出:要深入推进能源革命,加快规划建设新型能源体系,能源系统将迎来一个全新时代。新型能源体系涵盖能源生产、供给、消费、安全保障等全生命周期,内涵非常丰富,包括但不限于以非化石能源为主的能源生产体系,以新型电力系统为主要特征的能源供给体系,以绿色、智慧、低碳为主要特征的能源消费体系,以及稳定可靠的能源安全保障体系,这 4 个关键环节均与天气气候密切相关。

1 气象工作在新型能源体系中的定位和作用

1.1 新型能源体系关键环节与天气气候的关系

1.1.1 能源生产环节

能源生产体系分为传统化石能源、新能源与可

再生能源,对天气气候变化和灾害性天气均高度敏感。其中,新能源和可再生能源是我国实现双碳目标的主力,包括风电、光伏、水电和核电等,除核电外,风光水都属于气候资源,气候特征决定其丰富程度,天气变化和灾害性天气影响其发电输出和效能。传统化石能源包括煤炭、石油、天然气,目前是主力能源,未来则会逐步转变为调节能源。其中,石油和天然气主要依赖进口,而出口国的气象条件、远洋运输和沿海气象条件,特别是极寒、大风灾害性天气,都会对我国的能源供应,尤其是冬季天然气供应产生较大影响。

1.1.2 能源供给环节

能源供给包括输电线路、油气管道、交通运输等环节,对于灾害性天气高度敏感。其中,输电线路及变电站设施受覆冰、雷击、大风、暴雨、暴雪、高温等影响,油气管道易受到强降水引起的山洪、泥石流等次生地质灾害的影响,交通运输易受到低能见度、路面结冰等恶劣天气的影响。

1.1.3 能源消费环节

能源消费是用电用能的过程,其中的用电负荷和供暖负荷对气温和降水的变化非常敏感。近年来,我国中东部地区在夏季出现持续性极端高温天气,导致各省电力负荷屡创新高,而冬季的持续性极端低温则是影响供暖负荷的重要因素。

1.1.4 能源安全保障环节

能源保障和安全事关国计民生,是须臾不可忽视的国之大事。能源安全保障贯穿了能源生产、供给和消费的全过程,全球变暖背景下,极端天气、灾害性天气频发,成为影响能源电力安全的直接或间接诱因。

1.2 新型能源体系中气象工作的定位和作用

从以上分析可以看出,新型能源体系关键环节均与天气气候密切相关,以非化石能源消费为主体,人们又将回到“靠天吃饭”的时代。在此背景下,新能源气象服务的工作任务、逻辑和机制将会发生深刻的变化,其定位也将从目前面向市场的专业气象服务逐步上升到为国家战略发展服务的层面,具体来说,包括支撑、融入、保障 3 个方面。

1.2.1 以精细的资源评估支撑科学规划与选址,发挥气象资源先导性作用

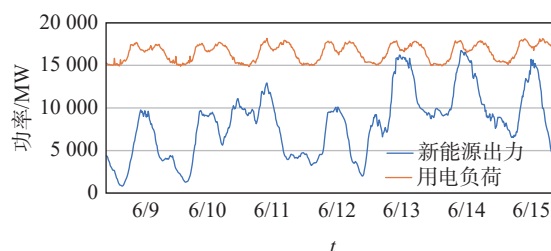
风能太阳能规划和选址取决于 3 个层次的资源:(1)天上的资源,即风光资源;(2)空中的通道资源,即电力输送通道和消纳能力;(3)地面的土地资源,即风光场站的安装空间,“天”、“空”、“地”3 种资源缺一不可。对气象工作而言,最主要的是摸清风光资源,对风能太阳能的资源参数、空间分布、变化特征等进行精细评估,是气象工作发挥先导性作用的重要支撑点。

根据国家能源局统计,截至 2024 年 6 月,全国风电、光伏发电装机容量分别达到 467 GW 和 714 GW,两者之和(1180 GW)已超过煤电装机(1170 GW);截至 2024 年 7 月底,我国风电光伏装机合计达到 1206 GW,提前 6 年多实现了“2030 年装机容量 1.2 TW”的目标。预计到 2060 年实现碳中和时,风能太阳能装机规模将要达到数十亿 kW,也就是目前的 5 倍以上。如此大规模的风能太阳能装机,势必要依据资源条件进行科学规划和布局,气象工作应以此国家需求为重点,在已有资源详查工作基础上,结合风电光伏行业发展的新趋势、新特点,进一步开展精细化的风能太阳能资源评估工作。

1.2.2 以精准的气象预报融入新型电力系统,发挥气象预报指挥棒作用

当前,随着风能太阳能发电装机规模越来越大,在电力供应中的占比越来越高,其固有的波动性特征给电网调度、电力交易带来的困扰也越来越大。如图 1 所示,以甘肃省夏季的一段时间为例,在 6 月 9 日的“谷值”期,风能太阳能低发,新能源出力仅有电力负荷需求的 5%,导致全省在用电高峰时段供应能力不足;而在 6 月 14 日的“峰值”期,风能太阳能高发,新能源出力几乎完全达到电力负荷需求,此时,由于电网消纳能力不足,导致“弃风”“弃光”现象出

现。此外,在电力交易过程中,也会出现供需矛盾,新能源高发时段需要低价外送促消纳,新能源低发时段则需要高价购买保供应。这种电力系统中的两难问题和供需矛盾,近年来已在越来越多的省份出现,其根源就在于风能太阳能固有的不稳定性及其高比例并网。



注:数据来源于国网甘肃省电力公司。

图 1 甘肃省夏季一段时间新能源出力与用电负荷的关系
Fig. 1 The relationship between new energy output and electricity load during the summer period in Gansu Province

对此,气象工作要发挥自身的专业特长,做好风能太阳能预报和服务,提前 3 d、7 d 乃至更长时间将风能太阳能的量值大小、可能变化、波动程度等提供给电力行业,并将预报结果与电网调度和电力交易的业务操作充分融合,发挥气象预报的指挥棒作用,助力缓解电力系统中的两难问题和供需矛盾。

1.2.3 以专业的灾害预警保障新型能源体系安全运行,履行气象部门职责

近年来,在全球变暖背景下,极端天气、灾害性天气呈现多发、频发、强发的特征,对能源电力系统造成极大影响。2021 年 2 月,极寒和暴风雪导致美国得州出现大面积停电事件,占比超过 30% 的风电和光伏在暴雪天气下难以正常运行,是其中 1 个重要因素^[1]。我国北方地区春季时常出现大范围沙尘天气,观测表明^[2],大气中的沙尘可能导致地面太阳辐射下降 60%~80%,光伏组件表面的灰尘进一步导致光电转换效率下降 20%~30%,从而使得北方大量的光伏发电出力急剧下降。近年来,我国中东部地区夏季屡屡出现大范围极端高温天气过程,导致电力负荷激增,特别是 2022 年夏季川渝地区高温和干旱叠加,引发该地区罕见的缺电现象。构建新型能源体系,意味着风电光伏的装机容量和发电量占比均会越来越高,极端天气、灾害性天气所造成的影响,在规模和程度上也将越来越大。

防灾减灾是气象工作的 1 项基本职责,做好专

业化、针对性的灾害天气预警,为能源电力系统提供尽可能长的灾害预防时间,最大程度降低灾害损失,将是气象工作保障新型能源体系安全运行的职责体现。

气象工作在新型能源体系建设中的作用主要体现在 3 个方面:(1)以精细的风能太阳能资源评估支撑能源生产;(2)以精准的多时空尺度新能源预报预测融入能源供给和消费过程;(3)以精确的能源电力气象灾害风险评估和预警保障能源安全。

2 风能太阳能资源评估技术进展

2.1 风能资源评估

当前技术条件下,风能资源开发利用主要关注 300 m 以下的近地边界层风况,包括风速、风向和空气密度等要素,这个高度层的风况受地形和人类活动影响大,时空变化特征复杂。

我国开展风能资源评估的历史由来已久,先后于 1979—1984 年、1984—1987 年、2003—2006 年、2007—2012 年开展了 4 次全国范围的资源普查/详查工作,技术方法也由地面观测统计发展到数值模拟评估,如图 2 所示。前 2 次资源普查工作^[3],基于国家地面气象站 10 m 高度风速统计分析,评估得到全国风能资源开发量不足 300 GW。此后,逐步引入国际先进的数值模拟系统开展精细化风能资源评估。2007—2012 年,由国家发改委、财政部和中国气象局组织开展全国第 4 次风能资源详查工作,建设 400 座测风塔,研发自主知识产权的风能资源数值模拟系统,获得全国水平分辨率 1 km、垂直方向 150 m 以下逐 10 m 的精细化风能资源数据集,评估得到 70 m 和 100 m 高度的风能资源技术开发量分别为 2.6 TW 和 3.4 TW,是 10 m 高度的 10 倍以上^[4]。2021 年,朱蓉等^[5]在该套数据集的基础上,进一步考虑低

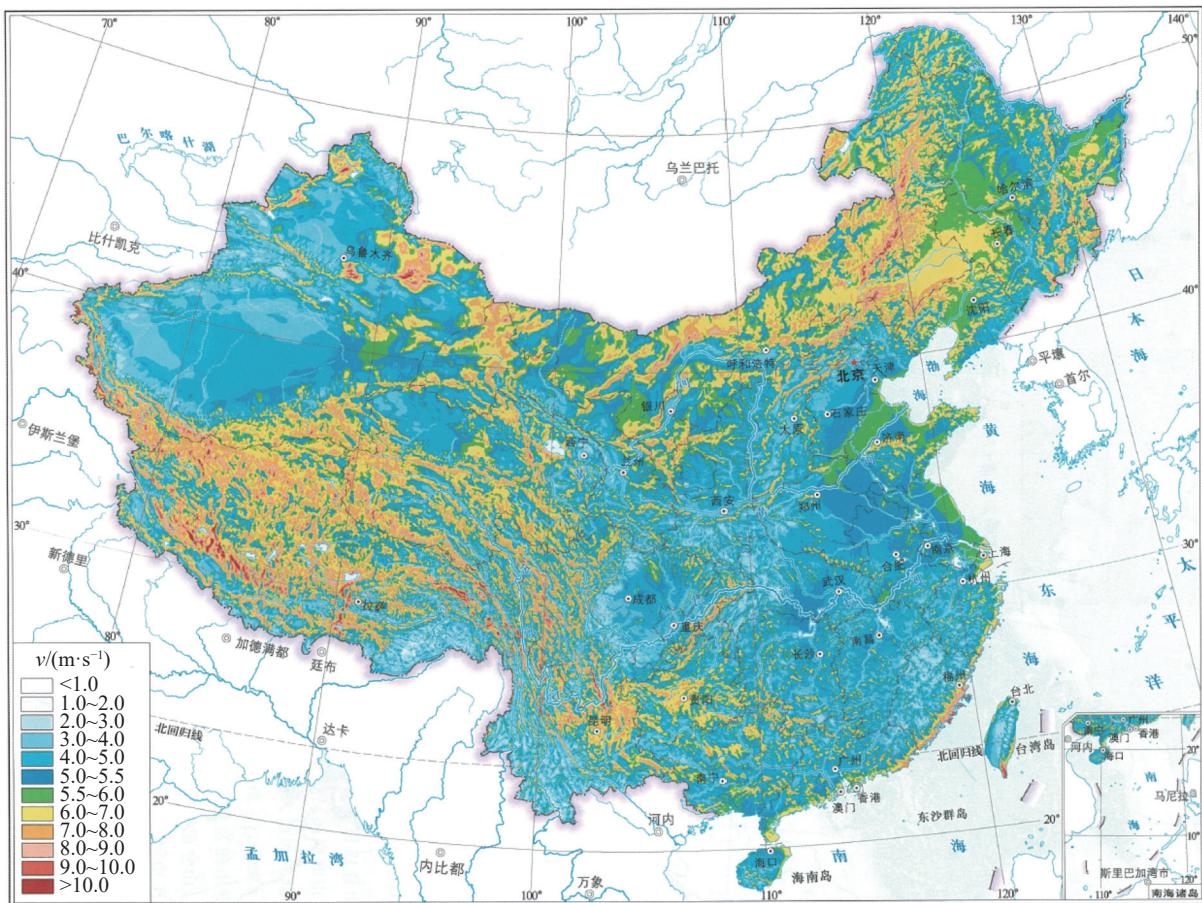


图 2 第 4 次全国风能资源详查成果示意图:70 m 高度年平均风速分布^[4]

Fig. 2 Schematic diagram of the 4th national wind energy resource detailed survey results: annual average wind speed distribution at a height of 70 m^[4]

风速资源开发, 评估得到全国陆地 100 m 高度风能资源技术开发量为 3.9 TW, 中国近海 5~50 m 等深线内的风能资源技术开发量为 400 GW。这些研究成果有力地支撑了我国“十二五”、“十三五”、“十四五”期间风电大规模开发的科学规划和布局。

当前, 随着风电技术的快速发展, 风电机组呈现大型化的发展趋势。单台风电机组的额定功率从早期的 750 kW 到 1.5 MW, 再到目前的 6~8 MW, 风机轮毂高度从 30 m、70 m 发展到 150~180 m, 叶轮直径从三四十米发展到 200 m 左右, 扫风面积越来越大。这种发展趋势为风能资源评估带来了新的挑战: (1) 风能利用高度超过了近地层, 近地层经典相似理论中湍流通量为常数的假设不再成立, 风速廓线不能再用简单的指数率描述; (2) 简单以轮毂高度处的风速近似代表整个扫风面积, 进行风功率密度计算的方法, 可能出现越来越大的误差; (3) 在复杂地形条件下, 中尺度局地环流作用凸显, 仅仅采用 CFD 流场计算不能满足大型风电机组的等效风功率密度计算精度要求。对此, 国际电工学会的国际标准(IEC 61400-12-1)中提出^[6], 应采用叶轮等效风速评估风功率密度和发电量, 并给出了具体的计算方法, 为风能资源的技术发展指明了方向。

2.2 太阳能资源评估

太阳能资源评估的实质是对到达地表的太阳辐射的准确计算, 包括总辐射、直接辐射、散射辐射 3 个要素。

我国自上世纪八十年代开始开展太阳能资源评估, 王炳忠等^[7]于 1980 年首次从资源角度给出了全国总辐射空间分布。此后, 利用气象台站观测日照时数, 采用气候学统计方法, 研究工作者对全国的总辐射、直接辐射、散射辐射进行了更多的计算和评估, 中国气象局风能太阳能中心在此基础上利用近百个辐射站和 2400 多个站点日照时数观测数据, 开展全国太阳能资源业务化评估, 每年年初发布《中国风能太阳能资源年景公报》^[8]。近年来, 随着气象卫星技术的发展, 基于卫星遥感的物理方法开展精细化太阳能资源评估成为主流^[9-11]。申彦波等^[12]利用风云四号 A 星(FY-4A)构建太阳能资源精细化监测预报系统, 实现千米级、逐小时太阳能资源精细化监测和评估, 如图 3 所示。

相比于风力发电, 太阳能资源开发的最大特点

是利用方式多样化。从大的方面看, 主要分为太阳能热利用和太阳能发电 2 种方式; 而太阳能发电又分为光热发电和光伏发电 2 种类型, 其中光热发电包括塔式、槽式、蝶式、菲涅尔式等, 光伏发电则包括集中式、分布式, 以及多种多样的“光伏+”模式, 如农光互补、渔光互补、牧光互补等。由此, 太阳能资源评估所面临的主要挑战包括: (1) 辐射传输理论方面, 复杂地形、复杂天气, 特别是云、气溶胶多变条件下的地表太阳辐射精确求解; (2) 工程应用方面, 针对每种太阳能利用方式的差异和特点, 如热水器、晶硅组件、薄膜组件吸收的光谱波段不同, 光热发电、光伏发电利用的辐射要素不同, 安装倾角、方位角、离地高度、阵列间距的不同, 需要实现对可利用辐射能量的准确计算。对此, 已有国家标准分别从资源测量^[13-14]、等级划分^[15-16]、评估方法^[17-18]等方面进行了规范性要求, 今后还需要针对更多太阳能利用方式发展新的评估技术。

2.3 风能太阳能资源技术开发量评估

空间分布、等级区划、时间变化等是风能太阳能资源评估的主要内容。除此之外, 风能太阳能开发利用规划和布局还关注区域的技术开发量, 即在现行技术条件下, 剔除制约风电、光伏开发的自然和社会因素后, 1 个区域的风电、光伏可装机容量。评估技术开发量, 主要考虑 2 个方面的因素:

1) 装机容量系数, 即单位面积(如 1 km²)下的风电、光伏装机容量, 其中风电装机容量系数与单台风电机组额定功率、叶轮直径、风机之间的尾流效应等有关, 光伏装机容量系数与纬度以及单个光伏组件的额定功率、面积等有关。

2) 制约因素, 又分为不可开发因素和限制开发因素, 其中不可开发因素包括资源因素(如年平均风速 4~5 m/s 以下通常不考虑风电开发)、自然因素(如生态保护红线、自然保护地、永久基本农田等)、社会因素(工矿用地、商业用地、住宅用地、交通过地、特殊用地等); 限制开发因素包括土地利用类型(如林地、草地等)和坡度坡向等地形因素, 需按照国家 and 地方政府的相关政策, 设置合理的开发比例。

风能太阳能资源技术开发量, 通常是以省、市、县级行政区域或特定区域为单位进行评估, 摸清区域内的开发潜力, 为碳中和目标下各级政府制定科学的新能源开发路径, 明确优先开发区提供技术支撑。

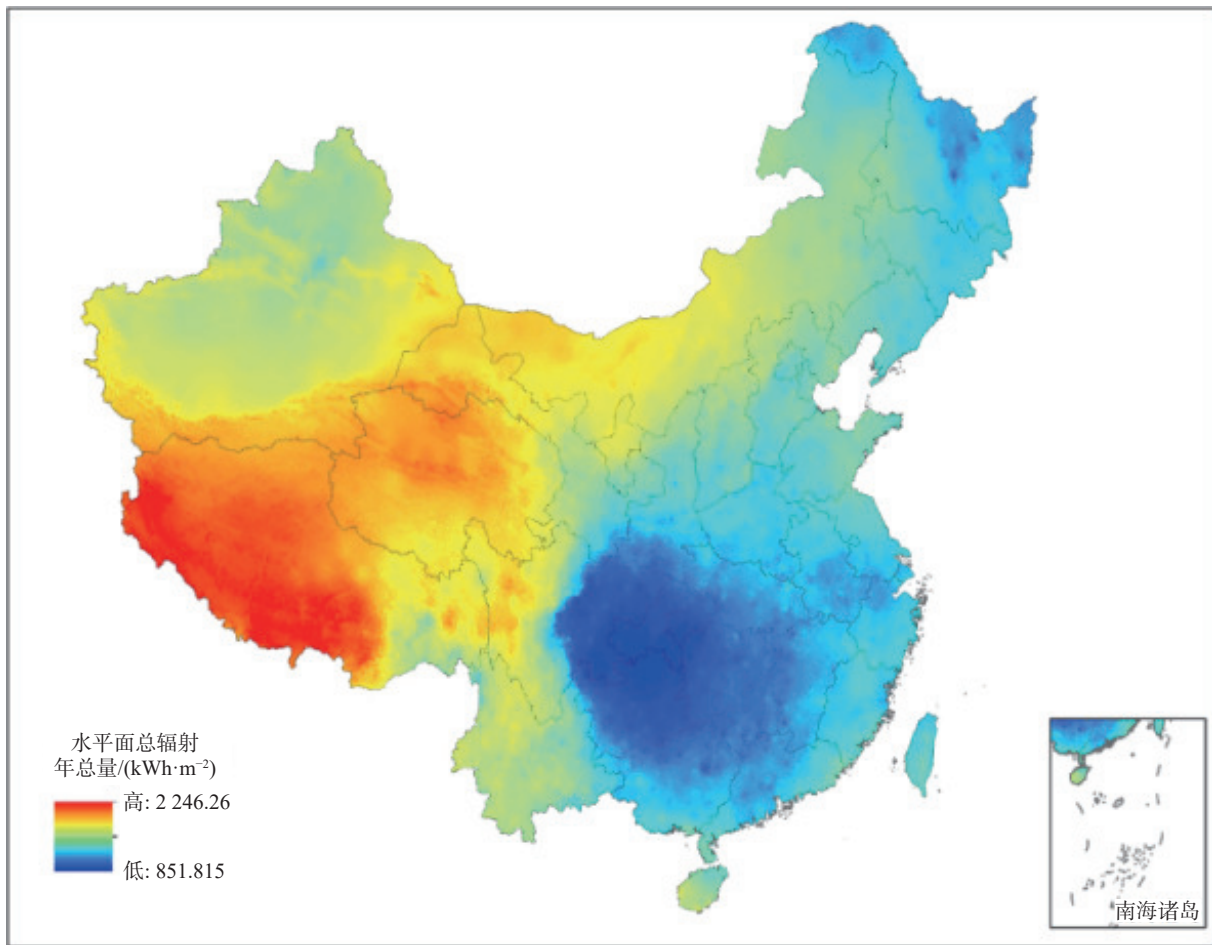


图 3 全国水平面总辐射年总量空间分布示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spatial distribution of annual total radiation at the national level

2.4 新一轮风能太阳能资源普查工作

为应对新型能源体系下新能源大规模开发的资源需求,以更大力度推动新能源高质量发展,国家又组织实施了新一轮风能太阳能资源普查工作。2024年5月,国家发展改革委、国家能源局、自然资源部、生态环境部、中国气象局、国家林草局等6部门发布《关于开展风电和光伏资源普查试点工作的通知》(国能发新能〔2024〕43号)^[19],明确在河北、内蒙古、上海、浙江、西藏、青海等6个省(区、市)率先开展风电和光伏发电资源普查试点工作,要求试点地区根据自身资源禀赋,因地制宜开展陆上风电、地面光伏和屋顶分布式光伏发电资源普查,具备条件的地区可拓展至光热及领海范围内海上风电、光伏发电、海洋能等其他新能源发电资源普查。

在此基础上,中国气象局又进一步制定了《风电和光伏发电资源普查试点气象部门工作方案》(气办

发〔2024〕54号)^[20],要求通过资源普查试点,优化完善资源普查工作机制和技术体系,摸清河北、内蒙古、上海、浙江、西藏、青海等6个试点省份资源状况,支撑试点地区新能源科学规划布局和开发建设,为全国开展风光发电资源普查积累经验并奠定工作基础。

本次资源普查工作要求,原则上试点地区陆上各县应至少保证1个180 m高度的风资源观测点和1个太阳能辐射观测点,并至少实现连续3 a有效观测;原则上沿海试点地区海上至少保证5个200 m高度的风资源观测点和5个太阳能辐射观测点,并至少实现连续3 a有效观测;具备海洋能开发基础的沿海试点地区,可根据各省情况开展潮流能、波浪能基本要素的观测。丰富的观测数据,将为资源普查工作奠定坚实基础。

本次资源普查工作的核心指标之一,是研制更

精细化的全国风能太阳能资源数据集,时间分辨率为1 h,水平分辨率达到1 km,风能资源在垂直方向为70~300 m逐10 m。相比于以往的资源普查成果,本次的技术进展主要体现在3个方面:(1)数据集研制以多源数据融合方法为主,充分体现海量观测数据的价值;(2)数据集具备时间序列,可以反映资源变化;(3)在垂直方向覆盖到300 m,可在较长时间内满足风电开发的需求。目前,资源普查各项工作正在如期推进,第一批技术指南即将正式发布。

3 风能太阳能预报预测技术进展

3.1 风能太阳能气象预报需求

风能太阳能预报包括2个主要环节:(1)气象要素的预报,包括近地层风速风向、总辐照度、温度等;(2)风电和光伏发电的功率预测。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)^[21]对此做了明确规定。从预报时效上,该标准分为4个时段:(1)未来12个月、逐月的长期电量预测;(2)未来240 h、逐15 min的中期功率预测;

(3)未来72 h、逐15 min的短期功率预测;(4)未来15 min~4 h、逐15 min的超短期功率预测。其中,对中期、短期和超短期的功率预测准确率也做了具体要求,如风电场日前准确率和合格率均应大于或等于83%,光伏电站的日前准确率和合格率均应大于或等于85%。对于气象预报数据,标准中提了2类需求:(1)气候预测,包括次月起到未来12个月的逐月平均风速、总辐照度、温度等;(2)数值天气预报,包括次日零时起到未来240 h、逐15 min不同层高的风速风向、总辐照度、云量、气温、湿度、气压等。除此之外,各个区域电网结合本地区实际情况,对风电和光伏发电的功率预测及考核办法做了更为细致的要求,即“双细则”。

表1对比了风能太阳能气象预报与常规天气预报的差异,从表1可以看出,无论是预报要素、预报时效,还是时间分辨率、误差考核方法,两者之间都有明显差异,风能太阳能气象预报的要求远高于常规天气预报,这也为新能源气象预报服务带来了极大挑战。

表1 风能太阳能气象预报与常规天气预报的对比

Tab. 1 Comparison of wind and solar energy meteorological forecast with conventional weather forecast

	常规天气预报	风能太阳能气象预报
预报要素	气温、降水、地面风速等	不同层高的风速风向、总辐照度、云量等
预报时效	当日08时起24 h(短期)、168 h(中期)	未来4 h(超短期)、次日00时起72 h(短期)、240 h(中期)
时间分辨率	1 h、3 h	15 min
误差考核方法	TS评分	均方根误差

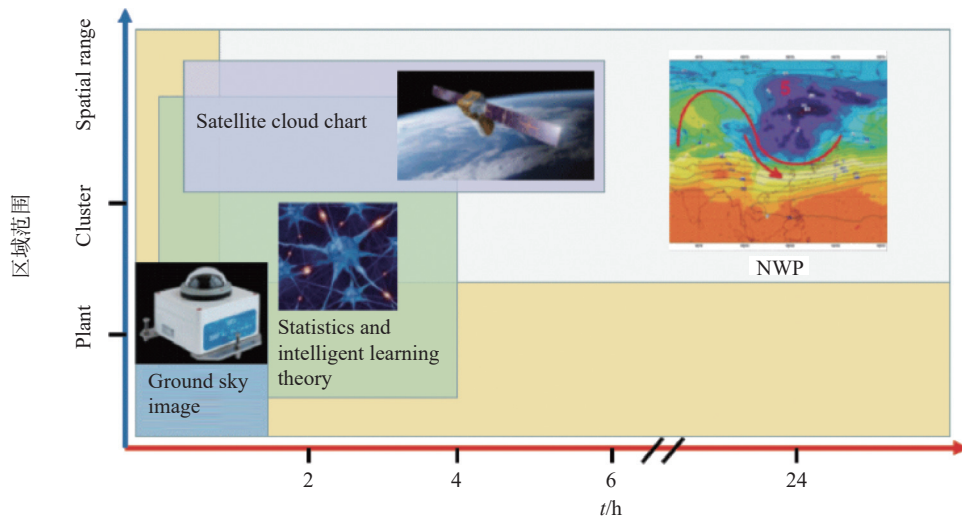
对于不同预报时效,要采用不同的基础数据和预报方法,IEC标准 *Renewable Energy Power Forecasting Technology*(IEC TR 63043: 2020)^[22]对此进行了全面论述。以光伏功率预测为例,如图4所示,对于小时级的超短期预报,要基于地表太阳辐射或地基云量观测,或星基卫星遥感观测,采用数学统计或机器学习理论进行外推预报,地基观测通常只能覆盖单一的场站范围,而卫星遥感则可以覆盖较大的区域范围;对于24 h以上的短中期预报,则要基于数值天气预报模式,或采用多模式集成(集合)的方法获得长时效预报结果。以下按照不同预报时效,介绍中国气象局现有的相关业务预报产品。

3.2 风能太阳能超短期预报

风电场风速超短期预报主要是对数值模式前4 h

预报结果的再订正。北京城市气象研究院自主研发的多源气象数据快速集成与融合预报系统(“睿图-睿思”系统),在数值预报模式的基础上,结合大量地面观测资料和高分辨率地形信息,利用动力降尺度手段和融合预报技术,实现了复杂地形下、10 min更新的百米级阵风预报,并在2022年北京冬季奥运会实现业务应用^[23]。在此基础上,研究团队针对风电场风速预报的特点,通过对数值预报背景场、不同融合算法、模型关键参数等的优化,实现对风机轮毂高度(100 m)未来4 h风速预报的改进,均方根误差下降到1.5 m/s以下,较数值模式降低40%以上。

光伏电站太阳辐射超短期预报主要是基于风云四号卫星地表太阳辐射产品(FY4 SSI),进行外推预报。叶冬等^[24]采用均生函数方法,并利用地面气象



注：来源于 IEC TR 63043: 2020。

图 4 不同时空尺度的光伏发电气象预报和功率预测

Fig. 4 Meteorological and power forecasting of photovoltaic power generation at different temporal and spatial scales

站辐射观测资料,进行总辐照度的短临预报和订正,预报时效 4 h,时间分辨率和更新频次均为 15 min,预报结果能反映不同天气条件下的辐照特征,并随天气变化进行动态调整。该方法可提供风云四号卫星覆盖范围内任意点位的总辐照度预报结果,有效弥补了地面辐射观测站点稀少和资料不足的问题。

3.3 风能太阳能短中期预报

72 ~ 240 h 的风能太阳能短中期预报,均要基于数值天气预报模式进行。当前,能源电力行业主要基于国外数值预报产品,如欧洲预报中心(EC)的高分辨率预报数据、美国国家气象局(NOAA)的NCEP等格点化预报产品,以及丹麦 ConWx、西班牙 Meteorologica 等单点预报产品。中国气象局则致力于研发国产自主、专业化的风能太阳能数值预报技术、系统和产品。

北京城市气象研究院基于“睿图-睿思”系统,改进地表太阳辐射和近地层风速预报参数化方案,优化长时效、高时间分辨率预报输出的运行策略,发展形成专业化的风能太阳能数值预报模式 RMAPS-Wind。中国气象局公共气象服务中心在该数值预报模式的基础上,搭建产品制作和省级下发的业务运行系统,即中国气象局风能太阳能数值预报系统(CMA-WSP),该系统于 2022 年 3 月向省级气象部门下发 1.0 版本的预报产品^[25],于 2023 年 5 月升级为 2.0 版本^[26]。2.0 版本的预报净时效为 336 h,时间

分辨率 15 min,空间覆盖范围为 70°E-140°E、14°N-50°N,水平分辨率为 9 km,格点为 649×550,垂直方向采用 σ 坐标,共 59 层,层顶气压为 10 hPa。目前,该产品已在全国各省级气象部门的能源气象服务中得到广泛应用^[27-29]。

此外,中国气象局还组织相关单位基于自主研发的区域数值预报模式(CMA-Meso)发展专业化的风能太阳能数值预报模式,通过 10 m 风诊断方案改进、辐射参数化方案优化,并将模式输出频次由 1 h 提高至 15 min,初步实现未来 72 h 的风能太阳能预报^[30-31]。

多模式集成是提升风能太阳能短中期预报准确率的有效手段。袁彬等^[32]在 CMA-WSP、CMA-Meso、WRF-SOLAR、CMA-GD 等模式输出结果的基础上,以场站的风光观测为真值,利用 LightGBM 模型,经过特征工程提取、回归集成模型训练,构建了针对场站的风能太阳能预报的多模式集成模型,提高预报准确率,特别在少云、阴天情况下效果显著。

3.4 风能太阳能月尺度预报

风能太阳能月尺度预报既可以通过机器学习的方法实现,也可以基于气候预测模式获得。国家气候中心在已有国家级气候预测业务的基础上,研制风能太阳能资源综合预测产品和模式客观化预测产品,主要内容包括未来 1 个月的平均气温距平和降水量距平百分率、100 m 高度风速、水平面总辐照量

及其距平百分率等气候预测的文字、图形产品及预测数据,并于每月月中面向省级气象部门下发。一方面能够提高电网安全和国家能源安全气象保障能力,另一方面也能够服务能源电力企业,指导新能源电力现货和中长期交易。

3.5 中国气象局 SDP 示范计划

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(SDP)^[33],这是气象服务领域首个示范计划。该示范计划搭建统一的预报检验平台,从风能太阳能区域数值预报、基于 CMA-WSP 的风光场站短期气象预报、风光场站短期功率预测、风光场站超短期功率预测等 4 个方面,对全国气象部门 28 个单位的 122 个预报产品进行为期 2 个月的检验和对比,旨在遴选优秀的风能太阳能预报技术和模型,提升风能太阳能发电精细化气象服务的技术能力和产品质量。检验结果表明:(1)在区域数值预报方面,与 EC 的高分辨率预报产品相比,气象部门数值模式输出的总辐照度均方根误差更低,但风速预报还存在一定差距;(2)在风光场站短期气象预报方面,采用机器学习或深度学习方法对 CMA-WSP 的产品进行订正后,准确率有显著提升,具有较高的服务应用价值;(3)在风光场站短期功率预测方面,24 h 的最优功率预测准确率能够满足 GB/T 40607—2021 和区域电网“双细则”的考核要求,同时也比场站现有功率预测产品的准确率高 2%。

当前,中国气象局公共气象服务中心在上述工作基础上,进一步打造基于 SDP 的国省一体化功率预测系统,包括后台支撑子系统和场站端功率预测子系统,其中的核心模块是在后台支撑端构建气象预报订正和功率预测算法的模型池,将 SDP 示范计划中形成的优秀算法纳入其中,针对所服务风光场站的特点,进一步遴选形成最优气象预报和功率预测产品,从而在技术组织上实现国、省两级一体化的风能太阳能发电精细化气象服务。

4 结论

以上对新型能源体系中的气象工作和相关技术进展进行了分析和梳理,主要内容总结如下:

1)新型能源体系各个关键环节均与天气气候密切相关,气象工作在其中的定位和作用主要包括 3 个方面:(1)以精细的风能太阳能资源评估支撑能源生

产;(2)以精准的多时空尺度新能源预报预测融入能源供给和消费过程;(3)以精确的能源电力气象灾害风险评估和预警保障能源安全。

2)风能太阳能资源评估技术从气象站观测统计发展到精细化的数值模拟和卫星遥感反演,时空分辨率和准确性显著提升,但也面临着风电机组大型化、太阳能利用多元化所带来的挑战,需要不断发展新的资源评估技术应对能源行业需求。

3)风能太阳能预报包括超短期、短期、中期和长期等多个时间尺度,不同时间尺度需要采用不同的预报技术和方法。风速预报受大气环流和局地地形的影响,辐照度预报则取决于云和气溶胶的变化,从物理机制上而言,风能太阳能预报涉及到天气预报学科的根本,其准确率的提升需要方法论的突破。对于风光场站而言,针对局地特点和场站运行情况,基于人工智能技术,“一场一策”构建气象预报订正和功率预测模型,将是提升预报准确率的重要手段。

国务院 2022 年 4 月 28 日印发的《气象高质量发展纲要(2022—2035 年)》明确指出:要提升能源开发利用、规划布局、建设运行和调配储运气象服务水平,强化气候资源合理开发利用。这为新能源气象服务高质量发展指明了方向,气象工作应以此为指引,不断强化科技创新和社会服务能力,为新型能源体系的高质量发展做出积极贡献。

致谢:湖北省气象服务中心的陈正洪研究员、何飞高工为本文的整理和修改做出了重要贡献,特此致谢!

参考文献:

- [1] 王伟胜,林伟芳,何国庆,等.美国得州 2021 年大停电事故对我国新能源发展的启示[J].*中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 4033-4042. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.210749.
WANG W S, LIN W F, HE G Q, et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(12): 4033-4042. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.210749.
- [2] 申彦波,常蕊,杜江,等.吐鲁番地区可利用太阳能资源分析[J].*高原气象*, 2015, 34(2): 470-477. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00003.
SHEN Y B, CHANG R, DU J, et al. Analysis of the available solar energy resources in Turpan [J]. *Plateau meteorology*, 2015, 34(2): 470-477. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00003.
- [3] 杨振斌.风能、太阳能资源研究论文集[M].北京:气象出版社,

- 2008.
- YANG Z B. Collection of research papers on wind and solar energy resources [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008.
- [4] 中国气象局. 全国风能资源详查和评价报告 [M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- China Meteorological Administration. Detailed survey and evaluation report of national wind energy resources [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014.
- [5] 朱蓉, 王阳, 向洋, 等. 中国风能资源气候特征和开发潜力研究 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(6): 409-418. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-0130](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-0130).
- ZHU R, WANG Y, XIANG Y, et al. Study on climate characteristics and development potential of wind energy resources in China [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(6): 409-418. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-0130](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-0130).
- [6] IEC. Wind energy generation systems – Part 12-1: power performance measurement of electricity producing wind turbines: IEC 61400-12-1: 2022 [S]. IEC, 2022.
- [7] 王炳忠, 张富国, 李立贤. 我国的太阳能资源及其计算 [J]. *太阳能学报*, 1980, 1(1): 1-9. DOI: [10.19912/j.0254-0096.1980.01.002](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.1980.01.002).
- WANG B Z, ZHANG F G, LI L X. Solar energy resources in China [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 1980, 1(1): 1-9. DOI: [10.19912/j.0254-0096.1980.01.002](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.1980.01.002).
- [8] 中国气象局风能太阳能中心. 2023 年中国风能太阳能资源年景公报 [R]. 北京: 中国气象局风能太阳能中心, 2024.
- Wind and Solar Energy Center of China Meteorological Administration. China wind and solar energy resources bulletin in 2023 [R]. Beijing: Wind and Solar Energy Center of China Meteorological Administration, 2024.
- [9] 申彦波. 近 20 年卫星遥感资料在我国太阳能资源评估中的应用综述 [J]. *气象*, 2010, 36(9): 111-115. DOI: [10.7519/j.issn.1000-0526.2010.9.018](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2010.9.018).
- SHEN Y B. Review of applications of satellite remote sensing data to solar energy resources assessment in China in recent 20 years [J]. *Meteorological monthly*, 2010, 36(9): 111-115. DOI: [10.7519/j.issn.1000-0526.2010.9.018](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2010.9.018).
- [10] 申彦波. 我国太阳能资源评估方法研究进展 [J]. *气象科技进展*, 2017, 7(1): 77-84. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.008).
- SHEN Y B. Development of the solar energy resource assessment methods in China [J]. *Advances in meteorological science and technology*, 2017, 7(1): 77-84. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.008).
- [11] 梁进秋, 申彦波, 胡丽琴, 等. FY-4A 地表太阳入射辐射产品在山西高原的适用性研究 [J]. *气象*, 2020, 46(12): 1575-1585. DOI: [10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.005](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.005).
- LIANG J Q, SHEN Y B, HU L Q, et al. Applicability of FY-4A surface solar irradiance products in the loess plateau of Shanxi [J]. *Meteorological monthly*, 2020, 46(12): 1575-1585. DOI: [10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.005](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2020.12.005).
- [12] 申彦波, 胡丽琴, 叶冬, 等. 基于 FY-4A 静止气象卫星的太阳能资源精细化监测预报技术 [R]. 北京: 气象出版社, 2023.
- SHEN Y B, HU L Q, YE D, et al. Precise solar energy resources monitoring and forecasting technology based on FY-4A geostationary meteorological satellite [R]. Beijing: Meteorological Administration, 2023.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 太阳能资源测量 总辐射: GB/T 31156—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Solar energy resources measurement: global radiation: GB/T 31156—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 太阳能资源等级 总辐射: GB/T 31155—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classification of solar energy resources: global radiation: GB/T 31155—2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 太阳能资源等级 直接辐射: GB/T 33677—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classification of solar energy resources: direct radiation: GB/T 33677—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [16] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 太阳能资源评估方法: GB/T 37526—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Assessment method for solar energy resource: GB/T 37526—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光伏发电太阳能资源评估规范: GB/T 42766—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Specifications for solar energy resource assessment of photovoltaic power generation: GB/T 42766—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [18] 王香云, 申彦波, 李利秋. 中国太阳能资源领域标准的制定综述 [J]. *太阳能*, 2020(12): 17-23. DOI: [10.3969/j.issn.1003-0417](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-0417).

- 2020.12.003.
WANG X Y, SHEN Y B, LI L Q. Review of formulation of standards in the field of solar energy resources in China [J]. *Solar energy*, 2020(12): 17-23. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2020.12.003.
- [19] 国家发展改革委, 国家能源局, 自然资源部, 等. 国家发展改革委 国家能源局 自然资源部 生态环境部 中国气象局 国家林草局 关于开展风电和光伏发电资源普查试点工作的通知(国能发新能〔2024〕43号) [R]. 北京: 国家发展改革委, 国家能源局, 自然资源部, 生态环境部, 中国气象局, 国家林草局, 2024.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Natural Resources, et al. National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Natural Resources, Ministry of Ecology and Environment, China Meteorological Administration, National Forestry and Grassland Administration. Notice on carrying out pilot work for censuses of wind power and photovoltaic resources (GNFXN〔2024〕No. 43) [R]. Beijing: National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Natural Resources, Ministry of Ecology and Environment, China Meteorological Administration, National Forestry and Grassland Administration, 2024.
- [20] 中国气象局办公室. 风电和光伏发电资源普查试点气象部门工作方案(〔2024〕54号) [R]. 北京: 气办发, 2024.
General Office of China Meteorological Administration. Work plan of meteorological departments for pilot censuses of wind power and photovoltaic generation resources (〔2024〕No. 54) [R]. Beijing: QBF, 2024.
- [21] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 调度侧风电或光伏功率预测系统技术要求: GB/T 40607—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Technical requirements for dispatching side forecasting system of wind or photovoltaic power: GB/T 40607—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [22] IEC-IEC. Renewable energy power forecasting technology: IEC TR 63043: 2020 [S]. [S.l.]: IEC, 2020.
- [23] 徐景峰, 宋林焯, 陈婧, 等. 北京冬奥会延庆复杂地形冬季和早春地面风场精细特征对比研究 [J/OL]. (2024-10-23) [2025-12-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1061.p.20241022.1019.008.html>.
XU J F, SONG L Y, CHEN J, et al. Comparative Study on fine characteristics of ground wind fields in complex terrain of Yanqing during winter and early spring of Beijing Winter Olympics, [J/OL]. (2024-10-23) [2025-12-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1061.p.20241022.1019.008.html>.
- [24] 叶冬, 梁进秋, 申彦波, 等. 基于 FY-4A 地面辐射产品的太阳能资源短临预报方法研究 [J]. *高原气象*, 2022, 41(4): 1030-1040. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00110.
- YE D, LIANG J Q, SHEN Y B, et al. Research on the nowcasting method of solar energy resources base on FY-4A ground radiation products [J]. *Plateau meteorology*, 2022, 41(4): 1030-1040. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00110.
- [25] 中国气象局预报司. 关于下发风能太阳能短期预报产品的通知 [R]. 北京: [s.n.], 2022.
Forecast Department of China Meteorological Administration. Notice on issuing wind and solar energy short-term forecast products [R]. Beijing: [s.n.], 2022.
- [26] 中国气象局预报与网络司. 关于风能太阳能气象预报系统升级(2.0版)的通知 [R]. 北京: 中国气象报社, 2023.
Department of Forecast and Network, China Meteorological Administration. Notice on upgrading weather forecast systems for wind and solar energy (Version 2.0) [R]. Beijing: China Meteorological News Agency, 2023.
- [27] 陶勇, 王加敏, 陈果, 等. CMA-WSP 风速预报订正产品在贵州风电场的检验评估 [J]. *山地气象学报*, 2024, 48(5): 41-47. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6598.2024.05.006.
- TAO Y, WANG J M, CHEN G, et al. Validation and assessment of the CMA-WSP wind speed forecast correction product at Guizhou wind farms [J]. *Journal of mountain meteorology*, 2024, 48(5): 41-47. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6598.2024.05.006.
- [28] 缙晓辉, 严晓瑜, 叶冬, 等. CMA-WSP 模式在宁夏太阳能预报中的适用性研究 [J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 2024. DOI: 10.20176/j.cnki.nxdz.000056.
- GOU X H, YAN X Y, YE D, et al. Study on suitability of CMA-WSP model for solar energy forecast in Ningxia [J]. *Journal of Ningxia University (Natural Science Edition)*, 2024. DOI: 10.20176/j.cnki.nxdz.000056.
- [29] 王丹, 杨艳超, 高红燕, 等. CMA-WSP 精细化风速预报在陕西地区的质量检验 [J]. *陕西气象*, 2024(5): 24-31. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4354.2024.05.004.
- WANG D, YANG Y C, GAO H Y, et al. Quality inspection of CMA-WSP fine forecast product of wind speed in Shaanxi Province [J]. *Journal of Shaanxi meteorology*, 2024(5): 24-31. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4354.2024.05.004.
- [30] 张敏, 袁心仪, 张颀, 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. DOI: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.1.04.
- ZHANG M, YUAN X Y, ZHANG G, 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. DOI: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.1.04.
- [31] 王明, 孟丹, 许沛华, 等. 中国气象局风能太阳能预报系统(CMA-WSP)在风资源短期预报中的检验评估 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(1): 73-84. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.08.

WANG M, MENG D, XU P H, et al. Validation and evaluation of the China meteorological administration wind energy and solar energy forecasting system (CMA-WSP) in short-term wind resource forecasting [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(1): 73-84. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.08.

- [32] 袁彬, 于廷照, 申彦波, 等. 基于人工智能多模式集成的光伏电站总辐射预报方法研究 [J/OL]. (2024-03-28) [2024-12-04]. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-2100.

YUAN B, YU T Z, SHEN Y B, et al. Research on artificial intelligence-based multi-model ensemble forecast of global horizontal irradiance in PV station [J/OL]. (2024-03-28) [2024-12-04]. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-2100.

- [33] 中国气象局应急减灾与公共服务司. 关于实施风能太阳能发电精细化气象服务示范计划的通知 [R]. 北京: 中国气象报社, 2023.

Department of Emergency Response, Disaster Mitigation and

Public Services, China Meteorological Administration. Notice on implementing the precise meteorological service demonstration plan for wind and solar power generation [R]. Beijing: China Meteorological News Agency, 2023.

作者简介:



申彦波

申彦波

1978-, 男, 正高级工程师, 大气物理学与大气环境专业博士, 主要从事能源气象、风能太阳能资源评估预报研究工作 (e-mail) shenyb@cma.gov.cn。

(责任编辑 孙舒)

聚焦融合发展 推进科技创新——中国气象学会能源气象专业委员会成立

2024年11月24日,中国气象学会能源气象专业委员会(后简称能源气象专委会)成立,中国气象局风能太阳能中心科学主任申彦波任主任委员。

能源气象专委会具有高水平、年轻化、多行业的特点,立足国家“双碳”战略,聚焦能源转型需求,充分发挥科技创新和学科交叉的优势,为推动能源气象学科建设、人才培养及产业升级提供有力支撑。未来,将通过跨领域合作,推动气象科技与新能源体系在资源详查、精细预报以及行业预警等方向的深度融合,甚至延伸为能源-气象-AI交叉学科,为行业发展提供全面支撑。能源气象专委会将为提升“气象+能源”领域的整体服务能力,探索气象服务助力新型能源体系高质量发展提供新路径。

能源气象专委会的成立是“气象+能源”融合发展的重要里程碑,为行业搭建了全新的合作平台,未来将加强多领域协作,创造更多的科技成果,助力能源行业绿色转型,推动能源气象服务从传统向智能化转型,为“双碳”目标和新型能源体系建设贡献力量。

来源:《公共气象服务中心》微信公众号