

新型电力系统中气象服务的现状、挑战及未来发展方向

邓力源, 王皓怀, 王凌梓, 沈海波

Meteorological Services in the New Power System: Status, Challenges, and Future Directions

DENG Liyuan, WANG Haohuai, WANG Lingzi, and SHEN Haibo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16516/j.ceec.2025-248>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气象因子相对危险度在电网用电负荷预测中的应用

Application of Relative Risk of Meteorological Factors in Power Grid Electricity Load Forecasting

南方能源建设. 2024, 11(1): 166–175

极端天气对风电开发全过程的影响及应对策略

The Impact of Extreme Weather on the Entire Process of Wind Power Development and Response Strategies

南方能源建设. 2025, 12(2): 1–14

极端天气对新型电力系统的影响及应对措施思考

Reflections on the Impact of Extreme Weather on New Power Systems and Countermeasures

南方能源建设. 2025, 12(1): 43–57

AI技术在电力系统发展中的应用与前景

Application and Prospect of AI Technology in Power System Development

南方能源建设. 2024, 11(5): 149–158

服务于新型能源体系建设的气象服务保障体系构建思考

Thinking on the Meteorological Services to Ensure the Development of a System for New Energy Sources

南方能源建设. 2025, 12(1): 58–64

新型电力系统中非水可再生能源需求空间、约束条件及发展建议

Demand Space, Constraints and Development Suggestions of Non-Water Renewable Energy in New Power System

南方能源建设. 2023, 10(S1): 17–26



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

引用格式: 邓力源, 王皓怀, 王凌梓, 等. 新型电力系统中气象服务的现状、挑战及未来发展方向 [J]. 南方能源建设, 2026, 13(3): 1-19. DENG Liyuan, WANG Hao huai, WANG Lingzi, et al. Meteorological services in the new power system: status, challenges, and future directions [J]. Southern energy construction, 2026, 13(3): 1-19. DOI: 10.16516/j.ceec.2025-248.

新型电力系统中气象服务的现状、挑战及未来发展方向

邓力源[✉], 王皓怀[✉], 王凌梓[✉], 沈海波

(中国南方电力调度控制中心, 广东 广州 510663)

摘要: [目的]随着新型电力系统建设的不断深入, 气象服务广泛渗透至源荷预测、运行调度、灾害预警、电力交易等电网运行的不同环节, 亟待通过系统性梳理电力气象服务的应用现状与问题, 明确其未来发展方向。[方法]文章通过文献综述与系统性分析, 重点梳理电力气象监测、电力气象灾害预警、电力负荷预测与新能源功率预测等环节的应用现状及电力气象服务现存问题, 结合前沿发展趋势对关键问题进行剖析, 对未来电力气象服务进行展望。[结果]研究发现, 随着新型电力系统的不断发展, 电力气象服务呈现多元性的特征, 并已成为提升电力系统安全、效率和智能化水平的关键支撑。然而, 现阶段仍存在监测网络不完善、预报预警水平不足、数据不适配和电力市场服务模式单一等问题, 制约了电力气象服务水平。[结论]未来电力气象服务应朝着更精细化、智能化、一体化的方向发展, 通过电力和气象的深度融合应用, 实现更精细化的气象监测和更精准的气象预报, 提供更完善的能源保供服务, 建立更健全的服务机制, 为新型电力系统建设提供重要支撑。

关键词: 电力系统; 极端天气; 电力气象; 负荷预测; 功率预测; 监测预报; 灾害预警

DOI: 10.16516/j.ceec.2025-248

文章编号: 2095-8676(2026)03-0001-19

CSTR: 32391.14.j.ceec.2025-248

中图分类号: TM7; P49



Meteorological Services in the New Power System: Status, Challenges, and Future Directions

DENG Liyuan[✉], WANG Hao huai[✉], WANG Lingzi[✉], SHEN Haibo

(Power Dispatching and Control Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] Driven by the goals of carbon peaking and carbon neutrality, the traditional power grid operation mode has undergone significant changes, gradually evolving into a new power system characterized by renewable energy as the main source, multi-energy complementarity, and coordinated interaction among generation, grid, load, and storage. In this context, the operation of the power grid is closely related to meteorological conditions. Meteorological services provide essential support for electricity demand and generation forecasting, operational dispatch, disaster early warning, and electricity market management. Therefore, it is urgent to systematically review the application status and challenges of power meteorological services and to clarify their future development directions. [Method] This study adopted literature review and systematic analysis approaches, focusing on the current applications of meteorological services in the power system, including meteorological monitoring, disaster early warning, load forecasting, and renewable energy power prediction. The existing problems of power meteorological services were summarized, and key issues were analyzed in light of frontier trends to provide prospects for future development. [Result] Research indicates that meteorological services have been increasingly integrated into multiple stages of the power system, including planning, operational dispatch, and disaster

收稿日期: 2025-08-30 修回日期: 2025-10-10 网络首发日期: 2025-10-24

基金项目: 南方电网公司软课题项目“能源安全与气象预警协同发展研究”(000000RT25061015)

management, demonstrating diversified functionalities. These services have become critical for enhancing the reliability, efficiency, and intelligence of power operations. Nonetheless, challenges remain, such as incomplete monitoring networks, limited forecasting accuracy, data incompatibility, and restricted service models for electricity markets, which constrain overall performance. **[Conclusion]** This study proposes that future power meteorological services should focus on enhancing service capability and effectiveness, moving towards greater refinement, intelligence, and integration. Key priorities focus on advancing the deep integration of power systems and meteorology to refine meteorological monitoring, enhance forecasting accuracy, strengthen data interoperability, and improve energy supply assurance services. Establishing a more comprehensive service mechanism will provide critical support for the construction of the new power system.

Key words: power system; extreme weather; power meteorology; load forecasting; renewable energy power forecasting; monitoring and forecasting; disaster early warning

2095-8676 © 2026 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

电力行业是能源消费和碳排放的关键领域, 据统计, 我国发电用煤约占全国煤炭消费总量的 60%, 碳排放量占比为 40%^[1], 大量的传统化石能源消耗加剧了气候变化, 导致极端天气气候事件频发^[2]。在上述背景下, 推动电力系统绿色转型, 构建以风电、光伏等清洁能源为主体的新型电力系统, 已成为实现能源结构优化和可持续发展的迫切任务^[3-4]。新型电力系统以高比例可再生能源为特征, 多能协同互补、源网荷储互动是我国能源体系转型的核心方向^[5-6]。我国新型电力系统的发展主要分为 3 个阶段: 加速转型期 (至 2030 年), 在此期间新能源成为第一大能源, 煤电逐步转向调峰电源, 新型储能装机突破 100 GW; 总体形成期 (2030—2045 年), 新能源发电占比超 50%, 电力市场机制成熟, 系统具备高比例可再生能源接入能力; 巩固完善期, 全面实现碳中和, 能源电力系统深度融合 (《新型电力系统发展蓝皮书》)。截至 2024 年底, 我国的风电和光伏装机总量达到 1.41 TW, 已经超过煤电, 形成了全球最大规模的清洁发电体系, 已提前完成加速转型期的装机目标^[7]。可以预见, 未来风、光等新能源发电将成为我国新型电力系统建设中的出力主体。

电力气象学作为交叉研究领域, 是指气象科学与电力系统相融合, 服务于电力系统规划、调度、运行与安全的一门应用性学科^[8]。该学科主要基于气象数据与预报技术, 针对新能源发电、电网运行等方面, 开展气象要素的监测、预测与应用。气象

服务在电力系统的发电、输电、配电、用电等环节发挥着重要作用。一方面, 为电力系统源-网-荷-储各环节提供基础数据支撑^[9]; 另一方面, 耦合气象因子的服务产品能够辅助电力系统规划与安全运行决策, 其重要性日益突出。此外, 随着极端天气气候事件频发和新能源大规模并网, 气象与电力的深度融合正推动电网发电、运行调度、灾害预警等领域服务技术革新。

近年来, 科研机构以及工业界均对电力行业与气象学的融合开展了大量的研究和应用, 在新能源发电预测优化^[10-11]、极端天气灾害预警^[12]、电力负荷预测^[13]、电力系统安全运行评估^[14]以及电力市场交易^[15]等方向均取得了一定的成果。在电力系统和气象因子的相互作用研究上, 风电和光伏的出力大小与太阳辐射、日照时数及风速直接相关^[16-17]; 水力发电能力与区域降水量紧密相关^[18]; 温度、湿度等气象因子与电力负荷的耦合波动程度持续增强^[19]; 气象与电力因子的定性规律仍有待进一步的探索和分析, 电力与气象指标的协同模式仍有待完善^[20]。在电力气象预报的模型和方法技术研究上, 飓风、强降水、高温、寒潮等极端天气预报预警能够助力电网防灾减灾, 支撑电网运行安全, 减少经济损失^[21-22]。通过分析温度、风速、湿度、降水等气象因子对电力功率和电力负荷的影响, 构建预测模型的研究取得了较好的结果^[23-24]。但是, 当前气象预报模型与电力模型的耦合仍然存在不足, 极端气候事件模拟的精确度不够, 人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 功率预测模型和负荷预测模型有待优化^[25-27]。在工程应用方面, 目前的气象服务已

经逐渐融入电力系统源网荷储的不同应用场景，取得了一定的成效，但是当前服务仍呈现单一化模式，缺乏针对性和精准性，服务水平有待进一步提升。

面向新型电力系统的气象服务取得了一定的进展，应用场景逐渐丰富。但是，电力气象的研究历程相对较短，电力与气象两个学科长期的独立发展导致二者存在行业壁垒，二者的融合在理论研究、科学方法、模型技术以及工程应用上仍然存在进步的空间。因此，为了更好地促进两个学科的融合，本文着重探讨新型电力系统中电力气象服务的应用现状、存在问题与挑战，以及未来的主要发展和研究方向。

1 电力气象服务的应用现状

新型电力系统整合了电源、电网、负荷、储能、碳排放与气象六大要素，如图 1 所示，并通过复杂的交互机制形成协同互动的系统结构，该系统通过多要素协同优化，提升了可再生能源的利用效率、系统调节灵活性以及运行的经济性^[28]。

气象作为六大要素之一，是保障电力系统稳定运行、提高新能源利用效率及实现电力行业能源结构转型的重要支撑^[28]。随着新型电力系统的不断发展，气象服务的应用贯穿于规划设计、运行调度以及灾害预警等不同环节，呈现出多元性的特征^[29–30]。目前，气象服务已成为提升电力系统安全性、效率及智能化水平的关键支撑。根据电力气象服务在新型电力系统中的主要应用场景，可分为电力气象监测、电力气象灾害预警、电力负荷预测、新能源功率预测及电力市场交易。表 1 列出了不同场景下的电力气象服务应用维度。

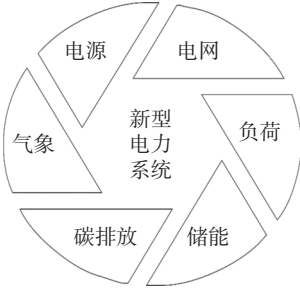


图 1 新型电力系统“六要素”
Fig. 1 "Six elements" of the new power system

1.1 电力气象监测

观测是开展气象工作的重要基础，气象监测可以覆盖海、陆、空、天等多维立体化信息，提供全方位的广域天气系统演变监测服务，具有重要的应用价值。电力气象监测是电力系统建设中的重要环节，对电站规划建设、电网设计以及电力设备维护具有重要作用；此外，它还是电力气象数据的主要来源。这些数据为电力气象预报、灾害预警和气象服务提供了基础支撑。

电源是新型电力系统的核心，其中风、光等可再生能源发电是其重要组成部分。在风电场选址和机组选型中，长期连续的气象监测数据至关重要。目前，测风塔、激光雷达等设备在国家电网和南方电网已广泛应用，可对风速、风向、湍流强度、空气密度等参数进行实时监测分析。这些气象监测数据不仅用于电源侧的资源评估和机组运行优化，也通过与电网数据平台共享，支撑电力气象监测体系建设、新能源功率预测及电网运行调度优化，形成电源侧与电网侧协同感知、联合服务的业务格局。基于风观测数据，采用计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）模拟技术构建风资源

表 1 不同场景下的电力气象服务应用维度
Tab. 1 Application dimensions of power meteorological service under different scenarios

应用场景	主要范围	关键要素	方法	典型指标
电力气象监测	电源侧、电网侧	风、光场站气象要素，输电通道沿线气象灾害等	测风塔、激光雷达、辐射监测站、空/天/地基监测设备	点位密度、覆盖范围、数据精度
电力气象灾害预警	电网侧	覆冰、大风、雷电气象灾害	物理模型、数值模式、耦合AI技术	电网综合预警平台
电力负荷预测	负荷侧	短/中/长期气象要素、转折性和极端天气、气候趋势	统计方法、数值模式、耦合AI技术	预测模型、调度计划、扩容规划
新能源功率预测	电源侧	风、光功率预测	雷达卫星数据、时序分析、数值模式、集合预报、耦合AI技术	风、光功率预测模型
电力市场交易	电源侧、负荷侧、储能侧	气象数据、趋势预测	耦合市场交易模型、“气象-功率-价格”联动预测、量化交易风险	辅助交易决策、评估市场风险

评估系统,其优势是能够识别复杂地形下的湍流区域,避免风机过度磨损,延长设备使用寿命^[31]。这种微观选址方法能够显著提高选址效率,在新型电力系统中已得到广泛应用^[32]。在光伏电站的建设选址中,总辐射、直接辐射、散射辐射、环境温度等气象监测数据也起到重要作用。目前,大部分光伏电站均配备有太阳辐射监测站和光伏组件温度监测系统,可结合卫星遥感反演数据,构建光资源图谱,为制定提升发电效率的策略提供科学依据^[33]。此外,高温会导致光伏组件发电效率下降,降水与积雪影响排水与结构安全。因此,气象数据还直接参与组件选型、倾角设计和防冻系统配置。

电网作为连接电源和负荷的桥梁,承担着能量输送和维持系统稳定的职责。气象监测能够为电网系统的规划和设计提供支撑,具体来讲,它可以为电网的输电线路设计、杆塔选址提供参考依据^[34-35]。强风、雷电和覆冰等天气过程会威胁输电线路的安全。因此,在输电线路选择的时候需要尽量避开这些区域,而沿线的气象监测设备可以提供风速、风向、覆冰、雷电等实况数据,辅助输电线路的路径

选择。目前,国家电网和南方电网已经在重要输电通道沿线广泛部署了专业气象监测设备,构成覆盖“空-天-地”的一体化感知网络,如图2所示。

微气象监测站是一种布设在杆塔或线路周边的小型设备,能够实时采集风速、风向、温度、湿度、气压、降水等参数,采用抗电磁干扰和低温设计,以应对高压电流传输和山区恶劣天气。覆冰监测装置能够通过拉力传感器、倾角传感器和图像识别摄像头实时监测导地线覆冰厚度、冰重及形态变化,部分设备还配备热成像仪,用于辅助判别覆冰类型。此外,还有闪电定位仪、激光雷达、卫星遥感和无人机巡检等技术,有效弥补了电力监测点位稀疏、监测能力不足的缺陷,如图3所示。

1.2 电力气象灾害预警

近年来,随着社会生活水平的提升,用电量不断攀升,气象对电力安全的影响日益显著。与此同时,极端天气事件频发,覆冰、大风、雷电等灾害性天气给用电安全带来的损失约占每年全部自然灾害损失的70%^[36]。电力气象预警服务能够降低气象灾害在电力系统中的影响,为电网调度、运行及应

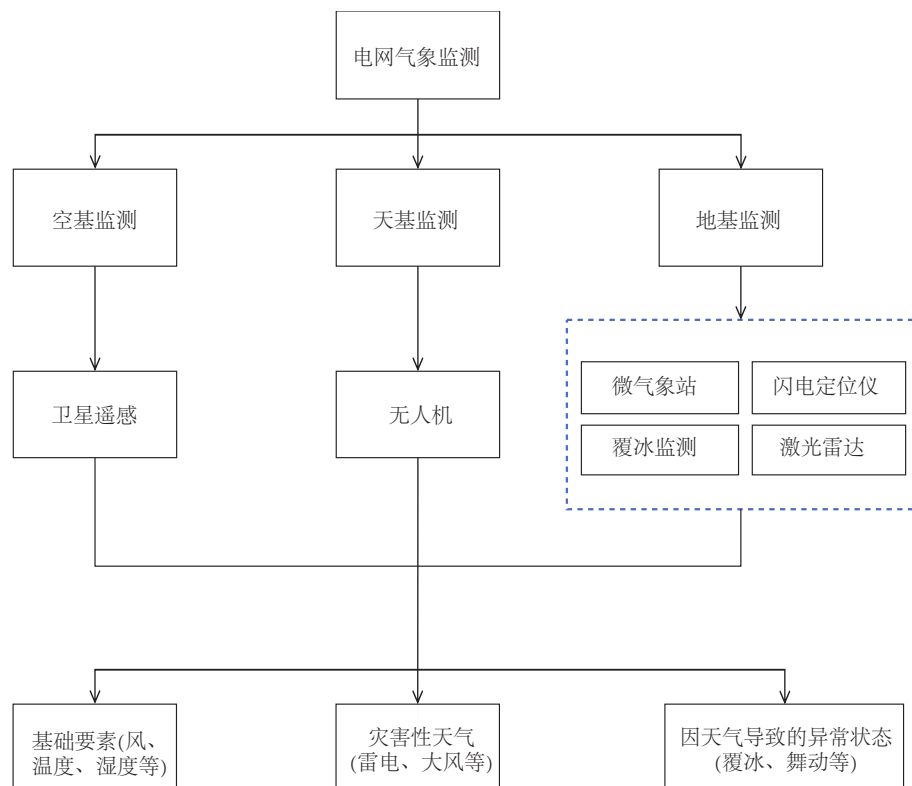


图2 电网气象监测体系及气象服务应用场景

Fig. 2 Meteorological monitoring system of the power grid and application scenarios of meteorological services



图3 典型观测设备实拍图

Fig. 3 Field photographs of typical meteorological observation instruments

急管理提供保障, 助力电网防灾减灾和电力系统的安全稳定运行^[18]。

输电线路覆冰是电网侧最严重且最受关注的气象灾害之一, 气象条件是覆冰生成的重要因素, 构成覆冰孕灾环境。2024年2月初, 华南寒潮引发线路覆冰, 南方电网在云南昭通、曲靖和贵州毕节、六盘水等高寒山区共监测到212条35 kV及以上输电线路出现覆冰, 最大覆冰厚度达26.74 mm, 局部覆冰速率接近3 mm/h。依托数字化覆冰在线监测与防灾减灾预警系统, 运维部门实现了覆冰厚度与速率的实时监控, 并在监测到快速覆冰信号后迅速下发预警, 督促相关单位启动直流融冰。累计对23条线路实施融冰, 部分线路在融冰8 h后解除风险。与此同时, 基于在线监测和远程协作平台的应用, 融冰作业协同效率提升约60%。气象条件变化直接触发电网业务响应, 数字化监测-预警-处置链条在降低覆冰灾害风险、保障春运期间电力供应方面发挥了关键作用^[8]。研究发现, 线路覆冰发生的必要条件是: 空气相对湿度达85%, 风速超过1 m/s, 温度低于0℃。因此, 利用多源数据和数值预报技术, 对覆冰灾害进行实时监控和提前预警, 是电网侧应对灾害性天气的有效方法。除1.1节提到的利用气象监测设备识别线路覆冰外, 还有诸多研究基于经验模型, 从物理机理出发, 开展覆冰预测研究。目前广泛应用的模型包括Lenhard模型、Goodwin模型、Chaine模型以及Makkonen模型等^[37-40]。随着数值预报的不断发展, 国内外研究者开展了大量耦合积冰模型的数值模拟试验, 用于更精细的电网覆冰预测研究。多数传统物理模型依赖于实际覆冰观测数据, 即电力气象监测的准确性,

受复杂地形和观测技术限制, 其结果往往存在一定误差^[25]。因此, 随着近年来AI技术的快速发展, 结合图像识别技术的输电线路覆冰预测方法应运而生, 一方面能够克服传统人工观测方法的缺陷, 另一方面对于冰层实时厚度、消融情况的量化描述更为直观, 有效提升了覆冰灾害预警能力^[41-43]。

除覆冰外, 大风、雷电等灾害性天气也会对电力设施设备造成不利影响。研究表明, 7级及以上大风(风速 ≥ 17.2 m/s)就可能造成输电线路风偏放电、导地线及金具磨损、电线舞动、异物挂塔等一系列现象, 甚至诱发电线短路、倒塔断线等事故, 影响电网运行安全。风振系数是大跨越输电塔风荷载的重要计算参数, 研究表明, 风速对输电塔线具有耦合效应, 不同风速及风向下的风振响应有所不同^[44]。此外, 还有学者通过风洞试验和数值模拟等方式对输电杆塔的倒塌机理进行分析^[45]。由于台风天气对电网输电线路的破坏尤其严重, 一些研究还针对台风天气过程, 构建了风速与输电线路风偏放电跳闸概率模型, 实现风险预警^[46-48]。广西气象科技服务中心预报2008年6月12—13日, 桂江流域、麻石流域、洛东流域、大化流域阴天大部有大雨, 部分地区有暴雨, 局部有大暴雨甚至特大暴雨。结果岩滩、大化、乐滩等电站分别出现了5000~10000 m³/s的洪峰流量过程, 融江和龙江也分别出现了3000~20000 m³/s和4000~8000 m³/s的洪峰流量。全网水电站由于洪水出力受阻1.2 GW, 其中红水河梯级电站和融江梯级电站分别受阻700 MW和300 MW, 电网据此提前增开火、电增购外电, 使电网安全运行和社会正常用电得到了保障, 社会效益显著^[49]。雷电天气具有较强的破坏性, 会产生强大的电流, 干扰电磁场, 引起变压器、断路器等设备短路, 破坏电网运行的稳定性^[50]。雷电通常是通过雷达图、卫星云图、大气闪电仪等提供的监测数据进行短临外推预报, 目前已经实现提前1~2 h的雷电发生位置预测, 对电网设施防雷具有重要指示意义^[51]。

针对上述电力气象灾害, 南方电网及相关企业搭建了综合预警平台, 可实现灾害的实时监控和预报预警, 其应用场景包括防灾减灾、风险评估、辅助调度、网荷协同、应急响应五大方面, 如图4所示。气象灾害预警可以辅助电力系统防灾减灾, 降低设备故障和损失的风险; 根据气象预警信息进行

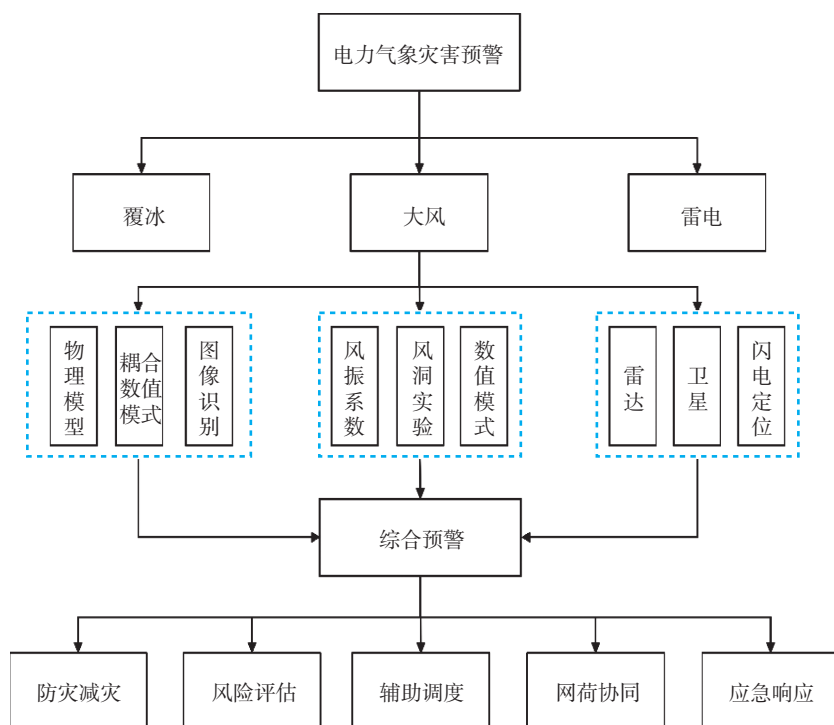


图 4 电力气象灾害预警中的气象服务应用场景

Fig. 4 Application scenarios of meteorological services in disaster early warning for power systems

风险等级评估，可以加强对高风险区域的输电线路、变电站的运行监控，降低电网运行的不稳定性；通过点对点发送的气象预警信息，能够帮助调度部门预留时间，有利于优化电力资源配置，保障电力供需平衡；在网荷协同方面，根据气象灾害可以预判负荷的变化趋势，据此调整相应的出力，保障供需平衡；此外，针对台风、洪水等极端气象灾害，可以建立应急联动机制，快速定位灾害位置和时间，便于电力部门启动应急预案。

1.3 电力负荷预测

用电负荷伴随着经济的发展持续增长，气象与电力负荷的耦合波动也不断增强。为了分析气象因子与负荷之间的非线性关系，国内外学者开展了大量研究，发现电力负荷与体感温度、累计温度、降水、风速等气象因子的关联度很高，这些气象条件会直接影响不同地区及时间段的用电负荷^[52-54]。目前，气象服务在短期、中期和长期电力负荷预测中均有广泛应用，基于精细化电力监测数据，利用统计方法、数值模式和 AI 模型，可以实现对电力负荷的精准预测，辅助调度策略的制定，如图 5 所示。

1~3 d 的精细化气象监测数据和预报产品通常

用于短期电力负荷预测，能够辅助日内电力调度。在研究和应用过程中发现，夏季和冬季气温是影响短期负荷波动的关键因子，夏季高温时段，降温设备高频使用会增加用电负荷，温度每升高 1℃，负荷增加 2%~5%；冬季低温时段，取暖设备的使用同样会增加用电负荷，低温持续时间越长，负荷的高峰越高。此外，转折性天气会造成日内降水和风速的剧烈变化，对部分户外工业的用电负荷造成影响，导致短期负荷的显著波动。对于短期电力负荷预测而言，利用气温、风速、降水等气象数据的时序曲线构建数据集，结合逻辑回归等统计学方法或随机森林、长短期记忆（Long Short-Term Memory, LSTM）网络等机器学习和深度学习算法，训练模型进行负荷预测，有助于提升负荷模型的精准度^[55-59]。此类短期模型在两网中的应用广泛，国网江西省电力公司根据历史电力负荷需求值获取负荷特征信息，之后采用线性回归方法计算增长率函数，训练生成短期负荷预测模型，在省级电力系统部署后，不仅能够辅助优化电力资源配置，提高能源利用效率，还有助于提前预判负荷变化，降低运行风险^[60]。

周至月的时间尺度属于中期负荷预测范畴。对

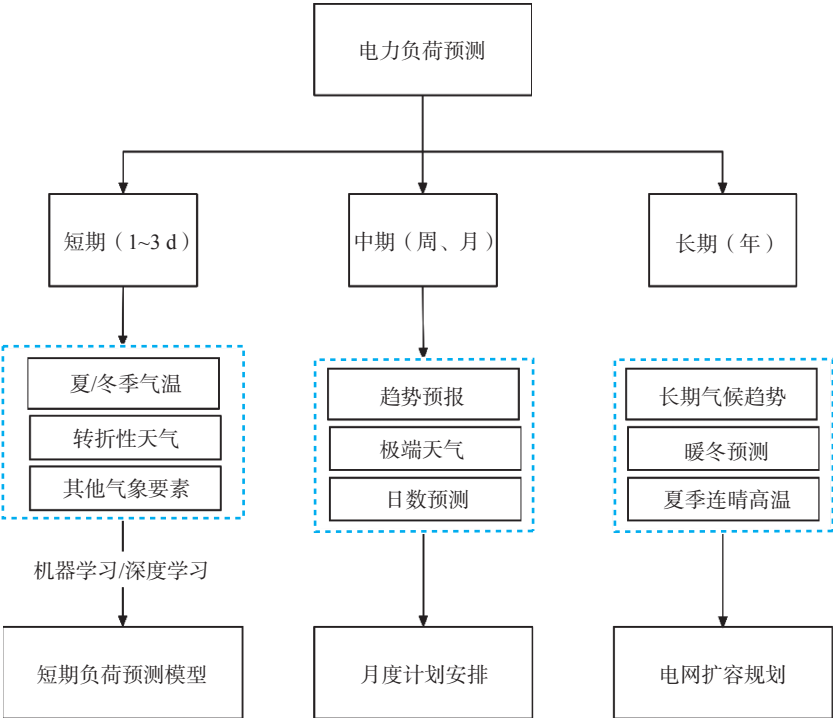


图 5 电力负荷预测中的气象服务应用场景

Fig. 5 Application scenarios of meteorological services in power load forecasting

于电源侧而言，中期的气温趋势预报可以用于提前协调火电机组、燃机电组等调整出力，中期的降水趋势预报有利于提高光伏发电预报的准确度。对于网荷协同而言，极端天气过程预警信息能够为负荷预测提供风险提示，让负荷模型预留负荷增长调整的空间。对于负荷侧而言，气象服务中的趋势预报产品，包括极端天气过程预测、周平均气温及降水日数预测等，均会影响中期时段的电力负荷走向，可用于制定月度的发电计划和调度安排。中期时段预测模型对算法的智能度提出了更高要求，国网江苏省电力公司采用 BP 神经网络和随机梯度下降法训练模型并输出负荷预测结果，之后基于 WRF 数值模式模拟天气系统，根据模拟区域内的气象场构建与电力灾害数据相关的预警模型^[61]。

年平均气温、总降水、季节降水量、年内极端天气事件发生频率等长期气候信息，是电力系统及电网扩容等长期规划的重要参考依据。年度气候趋势是电力负荷基数的预估因素之一，根据气象服务提供的暖冬预测，电力部门可以调整供暖电源的建设进度，夏季连晴高温预测则需要相关部门规划增设调峰机组应对可能攀升的用电负荷。长期的负荷预测需要考虑由于不同天气事件引发的负荷变化对

电网容量的要求，进而确保电力系统的承载能力，而气象长期预报能够满足这一需求。南方电网提出了一种基于大数据的配电网负荷长期预测方法及系统，基于用户用电特征数据和变化趋势数据，分别构建用电特征和变化趋势长期预测模型，之后根据配电网实际供电区域，联合长期预测模型进行负荷预测，为各种配电网的长期规划和管理提供支持^[62]。

1.4 新能源功率预测

作为新型电力系统发电侧的关键支撑技术，新能源功率预测对系统稳定运行发挥着不可替代的作用。气象条件是影响风电、光伏出力及发电功率的核心要素，随着可再生能源的应用不断扩大，新型电力对气象服务的依赖性显著增强，电力气象服务已成为提升发电预测准确度、优化电网调度效率的重要基础^[63]。本文将从光伏、风电两方面分别阐述电力气象服务在新能源功率预测中的应用，如图 6 所示。

1.4.1 光伏功率预测

光伏发电功率主要受地表太阳辐射、温度等气象要素影响。其中太阳辐射强度直接决定发电潜力，温度则通过光电转换系数间接影响光伏发电效率，超过一定阈值后，温度越高，光电转换效率越低^[25]。

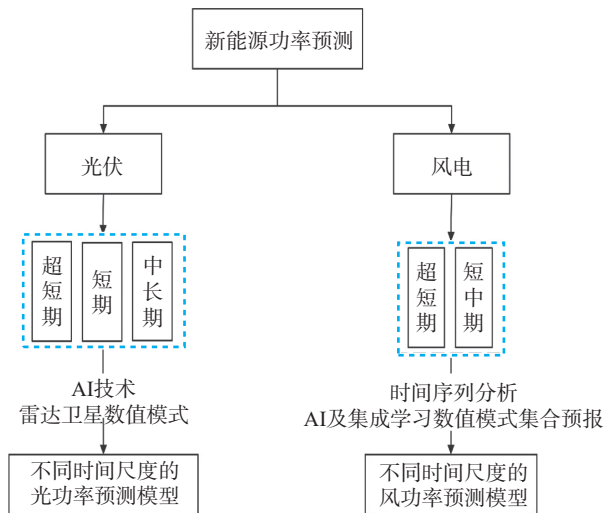


图 6 新能源功率预测中的气象服务应用场景

Fig. 6 Application scenarios of meteorological services in renewable energy power forecasting

电力气象服务能够提供辐射强度、日照时数等实时监测数据，应用于光伏功率预测以提升精度。此外，天气预报中的气温、云量、云移动速度、晴雨天气等要素也可以作为关键变量输入到光功率预测模型中，用于预判功率的波动情况，减少因转折性天气引起的功率骤降失衡^[63]。

在实际应用中，光伏功率预测的时间尺度分为超短期（0~4 h）、短期（1~3 d）和中长期（周至数月）预测。超短期预测主要服务于实时调度控制，短期预测服务于日前调度计划和电力市场交易，中长期预测则用于支撑电力系统的规划设计^[64]。针对超短期光伏功率预测，研究者利用特征相关性分析结果，基于机器学习或深度学习（随机森林、LSTM 等）构建时序预测模型，实现了光伏功率的超短期时序预测^[65-69]。云层会对太阳光线造成遮挡，影响光伏出力，为更好地捕获其动态变化，国家电网和南方电网各大调度中心还引入了卫星云图和雷达数据，通过卷积神经网络等深度学习算法提取云系运动特征，显著提升了对短时辐照波动和遮挡效应的预测精度^[70-71]。短期和中长期预测需要借助数值天气预报，但由于其系统性偏差问题，一些研究通过卡尔曼滤波等模式后处理方法对数值模式输出的太阳辐射预报数值进行订正，以减小误差，提升预测的精度^[72-74]，还通过集成多模型机器学习框架，如 XGBoost、LightGBM 等，有效融合多源气象

信息与发电功率数据，提升不同天气条件下的预测稳健性^[75-76]。此外，随着分布式光伏装机容量的增加，很多研究针对分布式发电功率预测开展了相关研究，这些研究主要是基于网格化天气预报的结果，结合人工智能模型进行预测^[77-78]。

1.4.2 风电功率预测

风速是影响风电功率预测的决定性因素，此外，空气密度（受温度、湿度和气压影响）也会间接影响风能转化效率。电力气象服务提供的逐小时风速、风向数据是风功率预测模型的关键输入参数：根据预报的风速变化，模型可以预判功率的波动，为电网调度提供响应时间；风向会影响风机的运行效率，风向预报能够修正功率预测模型，提高风能的利用效率^[63]。

与光伏预测类似，气象服务在风力发电中的应用场景也可分为超短期预测和短中期预测两类。超短期风功率预测主要是根据风电功率与风速之间的相关性以及功率的时序依赖性，对未来 0~4 h 时段内每 15 min 的功率进行预测^[25]。目前，各类时间序列分析、机器学习和深度学习均被广泛应用于风电功率预测中，但有研究者发现，基于注意力机制的 LSTM 模型能够深度挖掘功率与气象因子之间的非线性关系，预测效果优于其他方法^[79]。短中期风功率预测主要关注次日至未来十天的风场出力，此时风功率的时序相关性较差，同样需要利用数值天气预报来提高功率预测精度^[80]。因此，一些研究通过模式后处理订正，修正模式预报的风速等气象因子误差，通过提升风功率预测的数据输入源来提高准确性^[81]。通过集合预报代替确定性预报也是一种环节预报源不确定性的方法^[82-83]。一些研究通过多模型集成的方法构建更高性能的模型，学习功率与气象之间的非线性关系，实现功率预测效果的优化^[84-86]。

近年来，人工智能技术的发展进一步推动了气象服务与新能源功率预测的深度融合。目前，新能源场站及电力企业通过接入实况气象观测、智能网格预报、卫星与雷达数据，并结合 AI 技术进行深度特征提取与关系挖掘^[87-90]，在复杂天气条件下仍将风电、光伏功率预测的准确率保持较高水平，为高比例新能源接入下的电网安全稳定运行提供坚实保障。

1.4.3 新能源领域应用实例

随着光伏、风电等清洁能源供给体系的逐步完善,国家电网和南方电网在新能源预测领域开展了大量应用。南方电网公司从源网荷储各环节挖掘新能源消纳潜力,投运了全国首个区域级源荷聚合服务平台,建成了新能源调度运行管理、多时空尺度预测平台,全面提升新能源可观可测可控水平,提高了电网对清洁能源的接纳、配置和调控能力。据统计,2023年,南方区域新能源总装机容量超过130 GW。同年,南网启动了国内首个新能源功率预测价值生态圈培育计划,依托新型电力系统挂帅项目“新能源多时空尺度精确预测技术研究”,研发了新能源多时空尺度精确预测智慧平台。该平台应用大数据技术,完成了南方五省区800多个新能源场站的运行数据、气象数据等超8亿条海量数据的解析与集成,构建了覆盖全南方区域的网、省、地一体化协同预测场景、机制及评价体系,可满足中、短、超短期等多时间尺度新能源功率预测需求。

根据《国家电网有限公司服务新能源发展报告2024》显示,国家电网公司在新能源领域的电源并网、电网建设、调度运行、市场交易以及技术创新等多个维度,采取了一系列重点措施和创新实践。在并网消纳方面,2023年,国网新增风光新能源装机容量达到226 GW,新能源发电量达到1200 TWh,占总发电量的16.9%;在电网建设方面,持续加强新能源接网和送出工程的建设,已累计建成“19交16直”特高压输电线路;在系统建设方面,建立了全球规模最大的新能源云平台,为新能源场站提供便捷的线上服务。

1.5 电力市场交易

随着电力市场化的不断发展,气象条件对电力市场交易的影响日益突出,它可以通过影响发电功率、用电负荷等要素直接影响交易价格、交易量及风险控制。将高分辨率气象数据(如公里级网格预报)与市场交易模型耦合,可实现“气象-功率-价格”的联动预测,为交易决策提供量化支持。Dupré等^[91]将短期nowcast(短临预报,30 min、1h、2h和3h,基于ECMWF预报与现场观测的降尺度同化模型)用于日内交易与不平衡结算时的经济价值。研究表明:引入30 min、1h、2h和3h的nowcas-

ting后,风场的短期功率预报误差显著下降,从而直接减少了需在流动性较差且价格通常不利于发电方的不平衡市场上的暴露。具体量化指标包括:在30 min平衡时点下,使用nowcast情形中“超过20%装机容量(ICAP)的重大正/负误差”发生率由无nowcast时约7.0%降至约0.5%,大幅减少了极端不平衡敞口;在月/季尺度上,基于nowcast的日内交易和不平衡结算共同使风场的月均日内收入与不平衡结算收入均明显改善。研究还指出,nowcasting对收益的边际价值随季节、价格曲线与平衡时间窗口(30 min、1h、2h和3h)而变化,但总体结论稳健:提高短时预报精度能显著降低不平衡成本、提高日内套利机会,从而产生可观的经年收入增益^[91]。因此,气象服务可以为电力市场主体提供精准的气象数据与趋势预判,助力交易决策更科学、市场运行更稳定。

短时精细化气象预报服务能够为现货市场交易提供重要的决策依据,气温、风速、光照等预报数据可以辅助发电商和售电公司判断市场供需关系,从而获取相应的经济价值。风电和光伏企业会根据短期气象预报的更新及时调整交易策略,平衡市场交易与电网安全,减少价格异常波动。

中长期电力市场交易更关注气象中长期预报,未来一段时间的气象趋势预报产品可以为市场合约电量与价格谈判提供宏观的依据。气象服务的年度气候趋势预报,包括是否暖冬、年度高温日数、降水日数等会影响电力市场的供需预期,发电商与购电方会据此调整成交量与价格,以保障收益的稳定性。季度降水分布、月度风速趋势等可用于进一步细化市场交易策略。

气象服务还可以为电力市场风险控制提供数据支撑,减少极端天气事件引发的市场异常。发电商和售电公司可以基于气象预报数据构建市场风险模型,以对冲价格波动风险。市场监管机构可以借助气象数据识别异常交易,排查利用气象信息不对称的操纵行为,加强监管。

2 电力气象服务存在的问题

当前,电力气象服务在政策的推动下,取得了一定的发展与进步,在新能源功率预测、电网灾害预警及负荷预测等方面取得了诸多成果。然而,电

力气象在新型电力系统中的应用场景仍处于逐步探索阶段，在监测预报水平、数据与建模能力等方面仍存在诸多挑战，表 2 列出了当前电力气象服务中存在的五大问题。

表 2 电力气象服务存在的主要问题及拟解决方向

Tab. 2 Main problems in electric power meteorological service and the directions to be solved

存在问题	范围	核心要点
气象监测范围及专业监测能力不足	电源侧、电网侧	站点代表性、灾害监测能力、数据精度、间接推算误差
气象预报精度及极端天气预警能力不足	电源侧、电网侧	预报准确率、分辨率、时效性、传统数值模式误差、耦合AI技术发展情况、多要素预警协同影响评估能力
数据与建模面临技术挑战	电源侧、电网侧、负荷侧	数据需求、时空匹配误差、模型不确定性、极端事件样本稀缺
电力市场服务模式单一	电源侧、电网侧、负荷侧、储能侧	需求差异、定制化服务缺失
电力气象标准体系缺失	电源侧、电网侧、负荷侧、储能侧	数据格式/接口协议/应用规范不统一

2.1 气象监测范围及专业监测能力不足

完备的气象监测是气象预报的前提，也是实现气象服务的重要基础。目前，大部分气象监测站点主要分布在城市或近郊，对高原山地电网输配电设备、偏远的新能源密集区域及海上风电区覆盖不足，站点密度偏低，对不同尺度气象灾害的监测能力和对气象要素的监测数据精度无法满足现有业务需求。另一方面，电力气象监测的针对性不强，光伏预报关注的“光伏板表面辐照度”“风机轮毂高度风速”、电网运维关注的“导线覆冰厚度”“杆塔周围风速梯度”“雷暴电荷密度”等电网专业气象要素监测设备不足，电力系统的大多数参数需通过基础要素间接推算，引入显著计算误差，影响预报与预警的准确性。

2.2 气象预报精度及极端天气预警能力不足

精准化、精细化的电力气象预报是保障电力系统运行的关键。目前，电网业务中的气象预报在准确率、分辨率以及时效性等方面仍存在较大偏差。在短期预报领域，风速、辐照度等关键气象参数的偏差，导致部分地区的短期风电功率预测误差达 15%~30%，受实时卫星云图分辨率影响，光伏发电功率的预测结果也会出现误差。中长期预报领域，传统数值模式在区域尺度上的预报偏差明显，季节性预测能力有限，而 AI 大模型等前沿技术尚未被成熟应用于现有的长期气候预测体系，此外，目前的气候预测模型无法精准预估气候变化对电力系统的累积影响，对于电网长期规划的支撑不足。极端天气领域，暴雨、高温、台风、干旱、覆冰等电力灾害性天气的预警时间通常不足 24 h，难以支撑电网抢修、应急调度、资源调配等环节，且国家电网和南方电网现行使用的预警系统对于复合型极端天

气的预报能力不足，缺乏对多要素预警协同影响的评估能力。

2.3 数据与建模面临技术挑战

电力和气象行业数据的交叉融合是开展电力气象研究的基础前提。然而，目前两者之间存在数据壁垒，跨领域数据流通机制不健全，主要体现在以下方面：（1）数据需求问题，2.1 节和 2.2 节的分析表明，目前部分电力气象数据在监测范围、要素类型、预报精度、预警时效等方面与电力系统要求不一致，数据有效性和使用率不高；（2）时空匹配误差，气象站点与电力场站通常距离较远，监测数据空间代表性不足，需通过插值进行转化，导致结果偏差。且电力业务需 5~15 min 的高频更新，与气象数据的 1 h 及更长的更新时间不匹配，难以支持电力实时调度与精准预测；（3）模型不确定性，传统的气象数值模式与电力业务模型耦合程度低，跨尺度数据转换过程中会产生显著误差。例如，在电力负荷预测中，模型对于气象因子与负荷的非线性关系把握不足，导致建模过程中这种不确定性被传递并放大，极端天气下的误差叠加尤为突出；（4）极端事件样本稀缺，极端气象事件具有“低概率、高影响”的特征，因此，模型往往难以量化历史个例中气象与电力系统的关联规律，影响了模型的泛化能力和预测稳定性。

2.4 电力市场服务模式单一

当前，气象服务贯穿于电力系统发电、输电、配电、市场交易等不同环节，但是不同环节的气象需求存在差异，而现有电力气象服务多采用较为固定的模式，精准度和针对性存在不足。新能源发电企业更多关注风速、光照等要素的短临预报，应用

气象预报服务实现功率预测优化; 电网企业更重视极端天气(如台风、覆冰)对线路、变电站的影响预警, 进行防灾减灾; 电力市场主体则需要气象驱动的电价趋势预判, 增加经济效益。当前电力气象服务多以标准化数据产品(如未来 72 h 逐时预报)为主, 缺乏针对电网企业和电力市场主体的定制化服务。

2.5 电力气象标准体系缺失

新能源功率预测尚未建立统一的服务标准体系, 预测结果的准确性与可比性难以保障; 气象灾害预警等级划分机制不统一, 影响应急响应效率; 不同区域采用差异化数据格式, 导致数据难以实现跨区域共享和对比; 系统间接口标准缺失, 数据共享与业务协同受到制约。现有的气象服务产品多以专业气象数据格式输出, 电力相关行业缺乏专业的气象知识, 需投入成本进行数据的解码、转换和应用开发, 难以充分利用气象数据价值。亟需构建涵盖监测、预测、预警、服务的标准化体系, 为新型电力系统提供规范化、可复制的服务支撑。

3 电力气象服务的挑战和未来发展展望

随着全球气候变化的加剧及能源结构转型需求的增加, 电力气象作为保障能源安全实现可持续发展的重要保障, 在未来仍然需要持续长期发展。从前文的分析可以发现当前电力气象服务的应用仍然存在一定的问题, 在未来的发展中仍然面临一定挑战。

图 7 给出电力气象服务在未来发展中需要迎接的 5 个方面关键挑战: (1) 技术竞争与创新压力。气象以及人工智能 AI 技术的快速发展导致市场竞争加剧, 未来人工智能将全面渗透于电力服务的不同环节, 需要不断投入资源进行技术创新保持竞争力; (2) 极端天气事件预报预警能力。全球气候变暖导致极端天气事件增多, 对电网安全运行构成威胁。面对电力气象服务高分辨率的要求, 气象监测和气象预报的时间和空间分辨率都需要进一步提升, 并增强对极端天气的监测和预警能力; (3) 数据安全性与行业融合。在数字化转型过程中, 电力与气象数据的数据安全和隐私保护成为重要挑战, 需要加强数据管理, 确保气象数据的合法合规使用, 打破气象和电力数据的融合壁垒, 实现多源异构数

据的高效整合和分析; (4) 多维度服务发展。随着电力市场主体的多元化, 不同用户对电力气象服务需求差异显著, 未来将依据不同用户的特性提供多元化的定制化服务产品; (5) 多产业协同发展。未来需要加强气象部门与电力行业的深度合作机制。

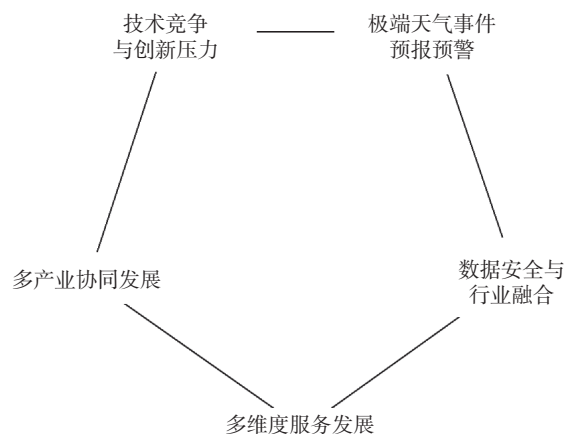


图 7 电力气象服务面临的挑战

Fig. 7 Challenges facing power meteorological services

为应对上述挑战, 南方电网公司和国家电网公司制定了一系列发展方案和研究计划。2024 年, 南方电网广西电网公司与省气象局联合印发了电力气象高质量合作发展行动计划方案, 明确提出加强电网设备气象高精度监测与灾害预警技术研究, 保障电力系统安全稳定运行; 全面提升电力气象精细化预测服务能力, 保障电力可靠供应与清洁能源消纳; 建设基于气象灾害辅助研判的电网安全与应急指挥智能系统, 开展新型电力系统下基于多数值气象模式融合的广西风光水荷高精度预测技术研究。2025 年, 国网山西公司印发了《电力气象赋能提升工作方案(2025—2026)》, 方案计划加强监测站点布设与预测模型优化, 实现重大天气过程提前精准预警; 推进系统平台融合升级, 重点完善覆冰、风偏、山火、地质灾害等七大电力气象监测预警单元, 联动自然灾害监测预警平台、电网一张图等系统。本文将电力气象服务未来的发展方向主要概括为感知层、数据层、技术层、创新层和服务层 5 个方面, 其间相互协同作用, 旨在提升电力气象服务的行业竞争力和经济社会效益, 如图 8 所示。

3.1 完善电力气象监测体系

电力服务逐步朝着更高的时空分辨率迈进, 对气象监测的精细化需求也相应增强。未来电力气象

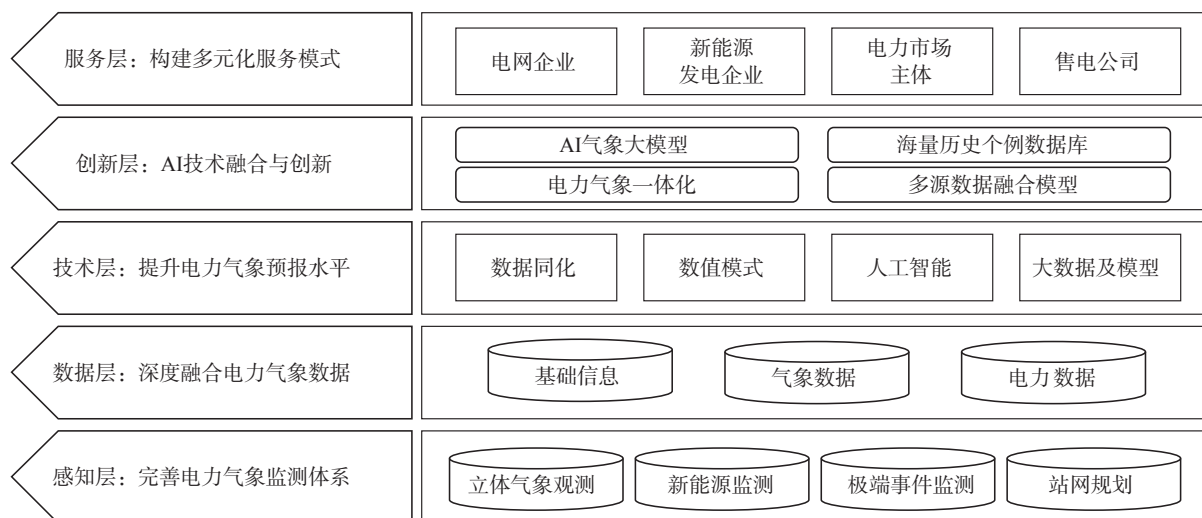


图 8 电力气象服务未来发展趋势

Fig. 8 Future development trends of power meteorological services

监测需要实现重点区域覆盖，观测站网建设依据实际业务需求进行合理布局，通过对站网现状评估构建布局优化模型并制定规划方案，实现科学合理的电力气象监测站网布局规划。除了持续加密地面气象观测站点，还需要结合低空无人机探测、垂直观测、遥感观测等多种观测手段，实现对风速、气温、湿度等气象要素的精准捕捉。通过建设立体化气象观测站网，满足实况观测、气象预报、科学实验等多场景需求。在现有常规气象站增设新能源监测要素（辐照度、高空风速、云量等），实现气象数据资源的优化配置与高效利用，提升电力气象监测的精准度和覆盖面。

为了保障极端天气下电力系统设备安全运行，未来在空间布局上，需要聚焦新能源基地、重要输电通道、枢纽变电站等易受极端天气影响的区域，加密布设高精度观测设备。在数据维度上，强化对极端事件特有要素的观测。除常规气象要素外，重点采集湍流强度、冰雨混合比、强降水雨滴谱、极端温度下的空气密度等数据，为模型训练提供更丰富的样本。

此外，电力气象观测体系建设应该将电力气象监测需求融入中国气象局全国气象站网建设规划，最终构建覆盖电网“发输变配用”各环节的重点区域、重要场站、重要电力走廊、重大工程、送电区域、潜在路径区域以及国际化业务覆盖区域的电力气象观测站网。

3.2 深度融合电力气象数据

电力与气象数据之间存在行业差异，间接影响了电力气象服务效率。未来电力气象数据须具备准确性、及时性，并提供个性化服务，打造功能完备、高效稳定的电网电力气象数据融合应用服务，实现气象、地理、电力等多源数据的全面深度融合。将卫星遥感数据（如台风云图、地表温度反演）、雷达回波数据、电力设备状态数据（如线路负载、杆塔倾斜度）与地面观测数据进行时空匹配，通过数据同化技术优化初始场，减少预报误差。优化数据采集、解析、加工、质控、分发等环节，为电网规划、运行调度、防灾减灾、新能源开发等提供高质量数据支撑。统一观测数据建设标准，推动网级统筹规划与标准化建设，省地级公司按照统一技术标准开展建设，实现多源监测数据统一管理，为电力气象预报、灾害防控及科学研究提供高精度实况数据支持。

3.3 提升电力气象预报水平

新型电力系统叠加了极端天气多发趋势，电网灾害风险的系统性和复杂性也持续增强。一方面，需要利用不同的电力观测数据通过数据同化的方法，提升和更新模式初始场，提高模式预报水平；另一方面，在数值天气预报模型中，优化对强对流、寒潮爆发、台风增强等物理过程的参数化方案，提高对大气垂直运动、云微物理过程的模拟精度，将极端降水的预报提前量从当前的 6~12 h 提升至

24~48 h。此外,结合传统数值模式和人工智能方法,针对不同的电力灾害性天气,进行精细化建模,提升极端事件的预报超前性,实现对极端气象事件的预测。通过收集近年来电力气象极端事件案例,建立包含气象要素、电力设施受损数据、地理环境参数的大型数据库,识别分析极端事件的形成机制与演化规律。针对输电线路覆冰,将地形抬升、冷空气堆积等微尺度过程纳入模型,实现杆塔级的覆冰预报预警。

在长期趋势研究方面,投入更多资源研发高精度气候预测模型,结合全球气候变化趋势,评估未来10~30 a极端低温、高温、强降水等事件对电力系统的影响,为电网长期规划(如杆塔抗冰等级、线路耐热设计)提供科学依据。在短期极端事件应对上,构建复合型极端天气协同预报体系,综合考虑多种气象要素的相互作用及对电力系统的叠加影响。例如,利用多源数据融合技术,提前预判“暴雨+雷电+大风”组合天气下,新能源功率骤降、负荷激增、线路故障的风险,为电力企业制定全面的应急预案提供支撑,保障电力系统在气候变化背景下的安全稳定运行。

3.4 AI 技术融合与创新

人工智能未来将在电力气象不同环节深度渗入,积极开展AI气象大模型研究应用,依托高分辨率长时效的电力气象大模型技术研究及应用项目,推进公司“大瓦特-气象”预报模型建设,接入“风鸟”“伏羲”等AI气象大模型气象预报数据,实现外部气象AI产品与自主搭建的气象AI模型应用的数据共享与结果互补,实现内外部数据的高效利用。

加强气象预报模型与电力业务模型的深度耦合,构建一体化预测平台。通过联合研发,将气象数据的预处理、转换环节嵌入电力预测模型,减少中间数据传递误差。例如,在风电功率预测中,基于地形、大气边界层模型,直接将气象模型输出的近地面风速转化为风机轮毂高度风速,提高风速换算精度。同时,利用深度学习、机器学习等人工智能技术,建立多源数据融合的预测模型,增强模型对复杂气象条件和极端事件的适应能力。收集海量历史极端气象数据及对应电力系统运行数据,训练模型识别“高温+干旱”“台风+暴雨”等复杂气象组合对电力功率、负荷的影响模式,提前预判极端天气下

的电力供需变化,提高预测的准确性与稳定性。

3.5 构建多元化服务模式

针对电力行业各环节的不同需求,设计差异化服务方案。针对新能源发电企业提供分风机机位、分光伏板阵列的精细化气象要素预报以及基于气象条件的发电效率优化建议;针对电网企业,提供杆塔级、变电站级的极端天气风险预警及应对策略;针对电力市场主体,提供气象驱动的电价走势分析、交易风险评估等定制化服务。针对售电公司,结合气温、降水、季节等因素,提供居民、工业、商业用户细分的用电负荷预测,以便更精准地制定购电计划。同时,优化气象服务产品输出形式,采用可视化、易接入的格式,降低电力企业的数据应用门槛,使中小电力企业也能便捷地将气象服务融入业务流程。未来,随着可再生能源占比提升,气象服务在电力市场中的作用将进一步凸显,成为连接气象数据、电力生产与市场交易的核心纽带,推动电力市场向更高效、更灵活的方向发展。

4 结论

当前电力气象服务面临的主要挑战有:(1)电力气象监测精细化程度不足,重点区域覆盖有限;(2)极端天气预测与预警能力有待提升,难以满足新型电力系统安全需求;(3)跨行业数据与业务融合度不高,制约了气象服务效益的发挥。针对这些问题,本文提出3条改进主线:提高监测与预报精度,推动气象与电力数据的深度融合,构建多元化协同服务模式。在此基础上,建立气象部门与电力企业之间的常态化、全方位合作机制。通过构建气象灾害预警与电力应急响应联动机制实现业务流程的协同,电力企业能迅速针对气象部门发出的预警信息启动相应应急预案,实现“监测-预警-处置”全流程无缝对接,保障电力系统安全稳定运行。

总体而言,“双碳”目标驱动下的电力系统中气象服务的应用越来越重要,逐渐实现了从传统的局部应用向全面支撑的升级,气象服务应用的场景呈现出多元化的特征,在电力系统的发电、输电、配电、用电等环节发挥重要的作用。

随着新型电力系统的快速发展,电力气象服务贯穿于电力系统规划运行以及调度等环节,是提升电力系统安全、效率和智能化水平的关键支撑。为

为了满足实际电力业务的需求,电力气象服务目前在电力气象监测、电力气象灾害预警、电力负荷预测、新能源功率预测、电力市场交易等方向展开相关的应用。但是由于电力气象的研究和发展相对较晚,当前电力气象服务应用仍然面临着一定的问题和挑战,主要包括:电力气象监测能力不足,极端气象预报准确度有待提升,行业数据交叉应用存在技术壁垒,电力气象服务模式相对单一等。

面对当前电力气象服务存在的问题和挑战,本文提出了未来电力气象服务的发展方向,主要包括:提高电力气象监测精细化程度,实现重点区域覆盖;实现电力和气象数据的统一和融合;提升气象预报能力,特别是针对极端天气的精细化预报预警能力;充分利用人工智能构建电力气象预报大模型,实现气象和电力技术的深度融合;针对不同的电力应用环节,制定专业化的气象服务,实现多元化电力气象服务;构建电力与不同产业之间的多方位协同模式,促进电力气象的发展。

未来电力气象服务将围绕提升服务能力与效益,朝着更精细化、智能化、一体化的方向发展,具体来讲是通过电力和气象的深度融合应用实现更精细化的气象监测、更精准的气象预报、提供更完善的能源保供服务,建立更加健全的服务机制,给新型电力系统建设提供重要的支撑。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 2024 年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2025-01-21) [2025-08-19]. <http://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>.
National Energy Administration. 2024 national power industry statistical data [EB/OL]. (2025-01-21) [2025-08-19]. <http://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>.
- [2] IPCC. 气候变化 2022: 减缓气候变化 [M]. 剑桥: 剑桥大学出版社, 2022. DOI: 10.1017/9781009157926.
IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009157926.
- [3] 辛保安. 新型电力系统与新型能源体系 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
XIN B A. New power system and new energy system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2023.
- [4] 李凤然, 杨雅淮, 尹忠东, 等. 适应高比例分布式能源接入的 UPQC 研制与应用 [J]. 电力电子技术, 2024, 58(11): 72-76, 80. DOI: 10.20222/j.cnki.cn61-1124/tm.2024.11.014.
- [5] 李贝贝, 范英乐, 李存, 等. 基于“电力-气象一张图”的低碳调度系统的建设与应用 [J]. 自动化应用, 2024, 65(17): 108-110, 113. DOI: 10.19769/j.zdhy.2024.17.029.
LI B B, FAN Y L, LI C, et al. Construction and application of low-carbon dispatching system based on "power meteorological one map" [J]. Automation application, 2024, 65(17): 108-110, 113. DOI: 10.19769/j.zdhy.2024.17.029.
- [6] 李靖, 徐天奇, 李琰, 等. 基于多市场耦合的新能源综合发电项目的盈利能力研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 65-76. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231210.
LI J, XU T Q, LI Y, et al. Profitability study of multi-market coupled integrated renewable energy generation projects [J]. Power system protection and control, 2024, 52(6): 65-76. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231210.
- [7] 刘吉臻, 王庆华, 胡阳, 等. 新型电力系统的内涵、特征及关键技术 [J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 49-65.
LIU J Z, WANG Q H, HU Y, et al. Connotation, characteristics and key technologies of new power systems [J]. New type power systems, 2023, 1(1): 49-65.
- [8] 中国南方电网有限责任公司. 南方电网科技抗冰 让冰雪“看得见、除得掉、防得住” [EB/OL]. (2025-02-13) [2025-09-15]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c32814422/content.html>.
China Southern Power Grid Co., Ltd. Technological anti-icing of China southern power grid: making ice and snow "visible, removable, and preventable" [EB/OL]. (2025-02-13) [2025-09-15]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c32814422/content.html>.
- [9] 王伟胜, 刘纯, 秦世耀, 等. 新能源并网与调度运行技术丛书 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2020: 4.
WANG W S, LIU C, QIN S Y, et al. Renewable energy grid connection and dispatch operation technology series [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2020: 4.
- [10] 赵拥华, 彭刚, 岳宝鹏, 等. 输电线路风致振动与档距分布、微气象数据的关联性研究 [J]. 内蒙古电力技术, 2025, 43(2): 70-76. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0024.
ZHAO Y H, PENG G, YUE B P, et al. Research on correlation between wind-induced vibration of transmission line with span distribution and micrometeorological data [J]. Inner Mongolia electric power, 2025, 43(2): 70-76. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0024.
- [11] 陆佳政, 皮新宇, 朱思国, 等. 新型电力系统源网设备典型外部灾害防治挑战与展望 [J]. 新型电力系统, 2024, 2(1): 36-51. DOI: 10.20121/j.2097-2784.nps.230044.
LU J Z, PI X Y, ZHU S G, et al. Challenges and prospects in prevention and control of typical external disasters power generation and network equipments in the new type power systems [J].

- New type power systems, 2024, 2(1): 36-51. DOI: 10.20121/j.2097-2784.https.230044.
- [12] 姜飞, 林政阳, 王文烨, 等. 考虑最小平均包络熵负荷分解的最优 Bagging 集成超短期多元负荷预测 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(5): 1777-1788. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.223470.
- JIANG F, LIN Z Y, WANG W Y, et al. Optimal Bagging ensemble ultra short term multi-energy load forecasting considering least average envelope entropy load decomposition [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(5): 1777-1788. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.223470.
- [13] 别朝红, 李更丰. 极端天气条件下新型电力系统风险评估与弹性提升 [J]. 全球能源互联网, 2024, 7(1): 1-2. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2024.01.001.
- BIE Z H, LI G F. Risk assessment and resilience improvement of new power systems in extreme weather [J]. *Journal of global energy interconnection*, 2024, 7(1): 1-2. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2024.01.001.
- [14] 高红均, 郭明浩, 刘俊勇, 等. 从四川高温干旱限电事件看新型电力系统保供挑战与应对展望 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4517-4537. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222971.
- GAO H J, GUO M H, LIU J Y, et al. Power supply challenges and prospects in new power system from Sichuan electricity curtailment events caused by high-temperature drought weather [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(12): 4517-4537. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.222971.
- [15] GUO J X, LI R K, CAI P L, et al. Risk in solar energy: spatio-temporal instability and extreme low-light events in China [J]. *Applied energy*, 2024, 359: 122749. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.122749.
- [16] LIU F, WANG X M, SUN F B, et al. Potential impact of global stilling on wind energy production in China [J]. *Energy*, 2023, 263: 125727. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125727.
- [17] 李宝聚, 付小标, 史坤鹏, 等. 基于对抗神经网络的风电功率超短期组合预测研究 [J]. 电力电子技术, 2025, 59(10): 89-95. DOI: 10.20222/j.cnki.cn61-1124/tm.20250704.008.
- LI B J, FU X B, SHI K P, et al. Research on ultra short term combination prediction of wind power based on adversarial neural network [J]. *Power electronics*, 2025, 59(10): 89-95. DOI: 10.20222/j.cnki.cn61-1124/tm.20250704.008.
- [18] LI J L, YANG L S, LONG H Y. Climatic impacts on energy consumption: intensive and extensive margins [J]. *Energy economics*, 2018, 71: 332-343. DOI: 10.1016/j.eneco.2018.03.010.
- [19] 王伟胜, 解鸿斌, 杨知, 等. 初论电力气象的基本概念与研究方向 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7440-7452. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.241858.
- WANG W S, XIE H B, YANG Z, et al. An introductory analysis of electric meteorology: basic concepts and research directions [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(18): 7440-7452. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.241858.
- [20] PERERA A T D, HONG T Z. Vulnerability and resilience of urban energy ecosystems to extreme climate events: a systematic review and perspectives [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2023, 173: 113038. DOI: 10.1016/j.rser.2022.113038.
- [21] GONÇALVES A C R, COSTOYA X, NIETO R, et al. Extreme weather events on energy systems: a comprehensive review on impacts, mitigation, and adaptation measures [J]. *Sustainable energy research*, 2024, 11(1): 4. DOI: 10.1186/s40807-023-00097-6.
- [22] 许守东, 王建, 李铭益, 等. 极端气象灾害下考虑 MESS 主动调控的配电网故障恢复策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 45-57. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231606.
- XU S D, WANG J, LI M Y, et al. Distribution network fault recovery strategy considering active control of an MESS in extreme weather [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(12): 45-57. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231606.
- [23] 韩富佳, 王晓辉, 乔骥, 等. 基于人工智能技术的新型电力系统负荷预测研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8569-8591. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221560.
- HAN F J, WANG X H, QIAO J, et al. Review on artificial intelligence based load forecasting research for the new-type power system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(22): 8569-8591. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.221560.
- [24] 史静, 李冰洁, 李泽森, 等. 基于改进 LSTM 的电力系统多层级负荷预测方法研究 [J]. 电力需求侧管理, 2025, 27(2): 62-67. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1831.2025.02.010.
- SHI J, LI B J, LI Z S, et al. Research on multi-level load forecasting method for power system based on improved LSTM [J]. *Power demand side management*, 2025, 27(2): 62-67. DOI: 10.3969/j.issn.1009-1831.2025.02.010.
- [25] 李卓, 叶林, 戴斌华, 等. 基于 IDSCNN-AM-LSTM 组合神经网络超短期风电功率预测方法 [J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2117-2127. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20210557.
- LI Z, YE L, DAI B H, et al. Ultra-short-term wind power prediction method based on IDSCNN-AM-LSTM combination neural network [J]. *High voltage engineering*, 2022, 48(6): 2117-2127. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20210557.
- [26] 陈正洪, 贺莉微. 风电场风机覆冰气象研究及预警服务 [J]. 内蒙古电力技术, 2025, 43(2): 3-11. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0016.
- CHEN Z H, HE L W. Meteorological research and early warning services for wind turbine icing in wind farms [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2025, 43(2): 3-11. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0016.
- [27] 侯慧, 万屹, 王振国, 等. 台风灾害不确定性场景下双层循环风光功率预测 [J]. 电力建设, 2025, 46(3): 146-154. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.03.012.
- HOU H, WAN Y, WANG Z G, et al. Wind and photovoltaic generation prediction bi-level model based on uncertainty scenarios under typhoon disaster [J]. *Electric power construction*, 2025, 46(3): 146-154. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.03.012.
- [28] 王珍意, 刘广一, 汤亚宸, 等. 新型电力系统“六要素”的协同优

- 化 [J]. 供用电, 2025, 42(7): 3-11, 22. DOI: [10.19421/j.cnki.1006-6357.2025.07.001](https://doi.org/10.19421/j.cnki.1006-6357.2025.07.001).
- WANG Z Y, LIU G Y, TANG Y C, et al. Collaborative optimization of "six elements" in modern power systems [J]. *Distribution & utilization*, 2025, 42(7): 3-11, 22. DOI: [10.19421/j.cnki.1006-6357.2025.07.001](https://doi.org/10.19421/j.cnki.1006-6357.2025.07.001).
- [29] 朱永昶, 陈超, 黄磊, 等. 气象服务保障碳市场建设需求、现状与对策 [J]. *气候变化研究进展*, 2025, 21(4): 555-564. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2024.310](https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2024.310).
- ZHU Y C, CHEN C, HUANG L, et al. Current situation, challenges and countermeasures of meteorological service for carbon market construction [J]. *Climate change research*, 2025, 21(4): 555-564. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2024.310](https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2024.310).
- [30] 袁铁江, 张文达. 新型电力系统源-储-荷协同规划研究综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2025, 45(17): 6664-6682. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.240612](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240612).
- YUAN T J, ZHANG W D. A review of research on source-storage-load coordinated planning for new power system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2025, 45(17): 6664-6682. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.240612](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.240612).
- [31] 罗勇, 尹林林, 冯黎明, 等. CFD 技术在风资源评估中的应用综述与未来展望 [J]. *机电产品开发与创新*, 2025, 38(2): 167-170, 174. DOI: [10.3969/j.issn.1002-6673.2025.02.046](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6673.2025.02.046).
- LUO Y, YIN L L, FENG L M, et al. A review of CFD technology in wind resource assessment and future prospects [J]. *Development & innovation of machinery & electrical products*, 2025, 38(2): 167-170, 174. DOI: [10.3969/j.issn.1002-6673.2025.02.046](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6673.2025.02.046).
- [32] 朱凤霞, 黄润兰, 顾鹏, 等. 复杂地形条件下风电场风能资源评估及发电量计算的研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2025(12): 200-205. DOI: [10.12396/znsd.2500100](https://doi.org/10.12396/znsd.2500100).
- ZHU F X, HUANG R L, GU P, et al. Research on wind energy resource assessment and power generation calculation of wind farms under complex terrain conditions [J]. *China rural water and hydropower*, 2025(12): 200-205. DOI: [10.12396/znsd.2500100](https://doi.org/10.12396/znsd.2500100).
- [33] 韩平, 刘涛, 魏昕, 等. 光伏电站调频调压特性仿真研究 [J]. *电力电子技术*, 2025, 59(3): 74-77. DOI: [10.20222/j.cnki.cn61-1124/tm.2025.03.011](https://doi.org/10.20222/j.cnki.cn61-1124/tm.2025.03.011).
- HAN P, LIU T, WEI X, et al. Simulation and research on frequency modulation and voltage regulation characteristics of photovoltaic power station [J]. *Power electronics*, 2025, 59(3): 74-77. DOI: [10.20222/j.cnki.cn61-1124/tm.2025.03.011](https://doi.org/10.20222/j.cnki.cn61-1124/tm.2025.03.011).
- [34] 庄文兵, 祁创, 王建, 等. 基于微气象监测的输电线路覆冰动态过程估计模型 [J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(14): 87-94. DOI: [10.7667/PSPC20191411](https://doi.org/10.7667/PSPC20191411).
- ZHUANG W B, QI C, WANG J, et al. Dynamic ice process estimation model of transmission line based on micrometeorological monitoring [J]. *Power system protection and control*, 2019, 47(14): 87-94. DOI: [10.7667/PSPC20191411](https://doi.org/10.7667/PSPC20191411).
- [35] 李磊, 刘桂箐, 张雷, 等. 输电线路极端口气象灾害风险智能评估方法仿真 [J]. *计算机仿真*, 2025, 42(6): 144-147, 158. DOI: [10.3969/j.issn.1006-9348.2025.06.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2025.06.024).
- LI L, LIU G J, ZHANG L, et al. Simulation of intelligent risk assessment method for extreme meteorological disasters on transmission lines [J]. *Computer simulation*, 2025, 42(6): 144-147, 158. DOI: [10.3969/j.issn.1006-9348.2025.06.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2025.06.024).
- [36] LENHARD R W. An indirect method for estimating the weight of glaze on wires [J]. *Bulletin of the American meteorological society*, 1955, 36(1): 1-5. DOI: [10.1175/1520-0477-36.1.1](https://doi.org/10.1175/1520-0477-36.1.1).
- [37] GOODWIN III E J, MOZER J D, DIGIOIA JR A M, et al. Predicting ice and snow loads for transmission line design [C]// Anon. Proceedings of the First International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Hannover, Germany, May 31, 1982. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1983: 267-273.
- [38] CHAÎNÉ P M, CASTONGUAY G. New approach to radial ice thickness concept applied to bundle like conductors [R]. Toronto, Canada: Environment Canada, 1974.
- [39] MAKKONEN L. Heat transfer and icing of a rough cylinder [J]. *Cold regions science and technology*, 1985, 10(2): 105-116. DOI: [10.1016/0165-232X\(85\)90022-9](https://doi.org/10.1016/0165-232X(85)90022-9).
- [40] 许永新. 输电通道气象灾害预警与在线监测组网方法研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2022. DOI: [10.27139/d.cnki.gnbdu.2022.000351](https://doi.org/10.27139/d.cnki.gnbdu.2022.000351).
- XU Y X. Research on meteorological disaster warning and online monitoring networking method in transmission channel [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2022. DOI: [10.27139/d.cnki.gnbdu.2022.000351](https://doi.org/10.27139/d.cnki.gnbdu.2022.000351).
- [41] 周红亮, 张利强, 董小刚, 等. 融合图像识别与数值模拟的秦岭输电线覆冰预测 [J]. *南方能源建设*, 2026(1): 182-190. DOI: [10.16516/j.ceec.2025-073](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2025-073).
- ZHOU H L, ZHANG L Q, DONG X G, et al. Prediction of ice accretion on Qinling transmission lines integrating image recognition and numerical simulation [J]. *Southern energy construction*, 2026(1): 182-190. DOI: [10.16516/j.ceec.2025-073](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2025-073).
- [42] 郝艳捧, 张伟勋, 梁苇, 等. 输电线路覆冰导线 Mask R-CNN 图像识别与分割 [J]. *广东电力*, 2022, 35(2): 1-10. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2022.002.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2022.002.001).
- HAO Y P, ZHANG W X, LIANG W, et al. Mask R-CNN image recognition and segmentation of icing conductors in transmission lines [J]. *Guangdong electric power*, 2022, 35(2): 1-10. DOI: [10.3969/j.issn.1007-290X.2022.002.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-290X.2022.002.001).
- [43] 陈思睿, 郝艳捧, 黄磊, 等. 图像与前三天微气象融合驱动的架空输电线路覆冰类型 GSM-XGBoost 预测 [J/OL]. 南方电网技术, 1-11(2025-03-26) [2025-09-12]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.TK.20250325.1758.019>.
- CHEN S R, HAO Y P, HUANG L, et al. GSM-XGBoost prediction of ice types for overhead transmission lines driven by the fusion of images and micrometeorological data from the past three days [J/OL]. *Southern power system technology*, 1-11(2025-03-26) [2025-09-12]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643>.

- TK.20250325.1758.019.
- [44] ZHANG M, ZHAO G F, WANG L L, et al. Wind-induced coupling vibration effects of high-voltage transmission tower-line systems [J]. *Shock and vibration*, 2017, 2017: 1205976. DOI: [10.1155/2017/1205976](https://doi.org/10.1155/2017/1205976).
- [45] 于佳宝, 卓越, 张佳毅, 等. 海岛大跨越输电塔线体系风振响应及动力失稳分析 [J]. *山东电力技术*, 2024, 51(1): 1-10, 23. DOI: [10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.01.001](https://doi.org/10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.01.001).
- YU J B, ZHUO Y, ZHANG J Y, et al. Analysis of wind vibration response and dynamic instability of large crossing transmission tower line system between islands [J]. *Shandong electric power*, 2024, 51(1): 1-10, 23. DOI: [10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.01.001](https://doi.org/10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.01.001).
- [46] 郭乾, 吴龙腾, 吴杰康, 等. 海岛配电网应对风灾灵活资源动态应急优化调控 [J/OL]. *南方电网技术*, (2025-03-03) [2025-09-19]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20250303.1039.004>.
- GUO Q, WU L T, WU J K, et al. Dynamic emergency optimization and control of flexible resources for island distribution network to cope with wind disasters [J/OL]. *Southern power system technology*, (2025-03-03) [2025-09-19]. <https://link.cnki.net/urlid/44.1643.tk.20250303.1039.004>.
- [47] 朱承治, 姜凯华, 姜文东, 等. 台风灾害下电网输电设备故障预测技术综述 [J]. *高压电器*, 2025, 61(5): 10-19. DOI: [10.13296/j.1001-1609.hva.2025.05.002](https://doi.org/10.13296/j.1001-1609.hva.2025.05.002).
- ZHU C Z, JIANG K H, JIANG W D, et al. Overview of fault prediction technology of power grid transmission equipment under typhoon disaster [J]. *High voltage apparatus*, 2025, 61(5): 10-19. DOI: [10.13296/j.1001-1609.hva.2025.05.002](https://doi.org/10.13296/j.1001-1609.hva.2025.05.002).
- [48] 陈志强. 台风条件下输电线路风偏跳闸风险评估关键技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2024. DOI: [10.27151/d.cnki.ghnlu.2024.004621](https://doi.org/10.27151/d.cnki.ghnlu.2024.004621).
- CHEN Z Q. Research on key technology of risk assessment of wind-bias tripping of transmission lines under typhoon condition [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024. DOI: [10.27151/d.cnki.ghnlu.2024.004621](https://doi.org/10.27151/d.cnki.ghnlu.2024.004621).
- [49] 黄树燕, 莫生兆. 电力行业气象服务效益评估分析 [C]//第26届中国气象学会年会气象灾害与社会和谐分会场论文集, 杭州, 中国, 2009-10-14. 北京: 中国气象学会气象灾害与服务委员会, 中国气象局预测减灾司, 国家气象中心, 中国气象局公共气象服务中心, 2009: 154-159.
- HUANG S Y, MO S Z. Evaluation and analysis of meteorological service benefits in the electric power industry [C]//Proceedings of the 26th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society, Sub-Session on Meteorological Disasters and Social Harmony, Hangzhou, China, October 14, 2009. Beijing: Meteorological Disasters and Services Committee, China Meteorological Society, Forecasting and Disaster Reduction Department, China Meteorological Administration, National Meteorological Center, Public Meteorological Service Center, China Meteorological Administration, 2009: 154-159.
- [50] 李哲. 特高压输电线路气象灾害风险管理研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2022. DOI: [10.27139/d.cnki.ghbdu.2022.000176](https://doi.org/10.27139/d.cnki.ghbdu.2022.000176).
- LI Z. Research on meteorological disaster risk management system of UHV transmission lines [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2022. DOI: [10.27139/d.cnki.ghbdu.2022.000176](https://doi.org/10.27139/d.cnki.ghbdu.2022.000176).
- [51] LIU L Y, YANG X T, LONG C, et al. Study on the relationship between residential cooling load and temperature under extreme weather of summer [C]//Anon. 2023 Panda Forum on Power and Energy(PandaFPE), Chengdu, China, April 27-30, 2023. New York: IEEE, 2023: 2043-2048. DOI: [10.1109/PandaFPE.57779.2023.10141456](https://doi.org/10.1109/PandaFPE.57779.2023.10141456).
- [52] 高赐威, 李倩玉, 苏卫华, 等. 短期负荷预测中考虑积温效应的温度修正模型研究 [J]. *电工技术学报*, 2015, 30(4): 242-248. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2015.04.030](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2015.04.030).
- GAO C W, LI Q Y, SU W H, et al. Temperature correction model research considering temperature cumulative effect in short-term load forecasting [J]. *Transactions of China electro-technical society*, 2015, 30(4): 242-248. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2015.04.030](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2015.04.030).
- [53] 李艳, 俞剑蔚, 蔡梦宁, 等. 南京市电力负荷特征及夏季极端负荷与气象条件关系 [J]. *气象科技*, 2021, 49(4): 637-646. DOI: [10.19517/j.1671-6345.20200259](https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.20200259).
- LI Y, YU J W, CAI X N, et al. Characteristics of electric loads in Nanjing and relationship between extreme loads and meteorological conditions in summer [J]. *Meteorological science and technology*, 2021, 49(4): 637-646. DOI: [10.19517/j.1671-6345.20200259](https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.20200259).
- [54] 王继东, 杜冲. 基于 Attention-BiLSTM 神经网络和气象数据修正的短期负荷预测模型 [J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(4): 172-177, 224. DOI: [10.16081/j.epae.202112017](https://doi.org/10.16081/j.epae.202112017).
- WANG J D, DU C. Short-term load prediction model based on Attention-BiLSTM neural network and meteorological data correction [J]. *Electric power automation equipment*, 2022, 42(4): 172-177, 224. DOI: [10.16081/j.epae.202112017](https://doi.org/10.16081/j.epae.202112017).
- [55] 胡怡霜, 夏翔, 丁一, 等. 基于因子和趋势分析反馈的多元回归负荷预测 [J]. *电力需求侧管理*, 2018, 20(6): 22-25, 35. DOI: [10.3969/j.issn.1009-1831.2018.06.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1831.2018.06.006).
- HU Y S, XIA X, DING Y, et al. A multivariate regression load forecasting algorithm based on factor and tendency analysis feedback [J]. *Power demand side management*, 2018, 20(6): 22-25, 35. DOI: [10.3969/j.issn.1009-1831.2018.06.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1831.2018.06.006).
- [56] 戴明明, 王康, 李强, 等. 基于天气分类和卷积神经网络的短期负荷预测方法 [J]. *电力需求侧管理*, 2023, 25(3): 93-98. DOI: [10.3969/j.issn.1009-1831.2023.03.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1831.2023.03.015).
- DAI M M, WANG K, LI Q, et al. Short-term load forecasting method based on weather classification and convolutional neural network [J]. *Power demand side management*, 2023, 25(3): 93-98. DOI: [10.3969/j.issn.1009-1831.2023.03.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-1831.2023.03.015).
- [57] 沈赋, 刘思蕊, 徐潇源, 等. 基于多尺度特征提取的 IES 多元负荷短期联合预测 [J]. *高电压技术*, 2024, 50(7): 2918-2930. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20240619](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240619).

- SHEN F, LIU S R, XU X Y, et al. Multi-load short-term joint forecasting of integrated energy system based on multi-scale feature extraction [J]. *High voltage engineering*, 2024, 50(7): 2918-2930. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20240619](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240619).
- [58] 耿冠晨, 何宇. 基于 VMD-TCN-Attention 机制的短期电力负荷预测 [J]. *智能计算机与应用*, 2024, 14(7): 94-99. DOI: [10.20169/j.issn.2095-2163.240714](https://doi.org/10.20169/j.issn.2095-2163.240714).
- GENG G C, HE Y. Short-term power load forecasting based on VMD-TCN-Attention mechanism [J]. *Intelligent computer and applications*, 2024, 14(7): 94-99. DOI: [10.20169/j.issn.2095-2163.240714](https://doi.org/10.20169/j.issn.2095-2163.240714).
- [59] 赖泽锋. 基于时空关联的光伏与风电功率预测算法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024. DOI: [10.27517/d.cnki.gzkju.2024.000431](https://doi.org/10.27517/d.cnki.gzkju.2024.000431).
- LAI Z F. Research on photovoltaic and wind power forecasting based on spatial and temporal dependencies [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024. DOI: [10.27517/d.cnki.gzkju.2024.000431](https://doi.org/10.27517/d.cnki.gzkju.2024.000431).
- [60] 周宇, 袁宏波, 郑富永, 等. 一种电力区域负荷的短期预测方法及装置: 202011083600.0 [P]. 2021-01-15.
- ZHOU Y, YUAN H B, ZHENG F Y, et al. Short-term prediction method and device for power regional load: 202011083600.0 [P]. 2021-01-15.
- [61] 张宸, 刘凯, 崔惠, 等. 一种考虑气象因素的区域电力负荷预测方法: 202411748609.7 [P]. 2025-04-01.
- ZHANG C, LIU K, CUI H, et al. Regional power load prediction method considering meteorological factors: 202411748609.7 [P]. 2025-04-01.
- [62] 谭靖, 黎敏, 张俊成, 等. 一种基于大数据的配电网负荷长期预测方法及系统: 202510365903.8 [P]. 2025-08-22.
- TAN J, LI M, ZHANG J C, et al. Power distribution network load long-term prediction method and system based on big data: 202510365903.8 [P]. 2025-08-22.
- [63] 杨明, 李梦林, 王勃, 等. 面向新型电力系统的数值天气预报技术及应用综述 [J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(17): 1-20. DOI: [10.7500/AEPS20240227001](https://doi.org/10.7500/AEPS20240227001).
- YANG M, LI M L, WANG B, et al. Review on technologies and applications of numerical weather prediction for new power system [J]. *Automation of electric power systems*, 2025, 49(17): 1-20. DOI: [10.7500/AEPS20240227001](https://doi.org/10.7500/AEPS20240227001).
- [64] 龚莺飞, 鲁宗相, 乔颖, 等. 光伏功率预测技术 [J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(4): 140-151. DOI: [10.7500/AEPS20150711003](https://doi.org/10.7500/AEPS20150711003).
- GONG Y F, LU Z X, QIAO Y, et al. An overview of photovoltaic energy system output forecasting technology [J]. *Automation of electric power systems*, 2016, 40(4): 140-151. DOI: [10.7500/AEPS20150711003](https://doi.org/10.7500/AEPS20150711003).
- [65] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need [C]// Anon. Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems, Long Beach, California, USA, December 4-9, 2017. Red Hook: Curran Associates Inc., 2017: 6000-6010.
- [66] ZHOU H Y, ZHANG S H, PENG J Q, et al. Informer: Beyond efficient transformer for long sequence time-series forecasting [C]//Proceedings of the 35th AAAI Conference on Artificial Intelligence, Online, February 2-9, 2021. Palo Alto: AAAI Press, 2021: 11106-11115. DOI: [10.1609/aaai.v35i12.17325](https://doi.org/10.1609/aaai.v35i12.17325).
- [67] WU H X, XU J H, WANG J M, et al. Autoformer: decomposition transformers with auto-correlation for long-term series forecasting [C]//Proceedings of the 35th International Conference on Neural Information Processing Systems, December 6-14, 2021. Red Hook: Curran Associates Inc., 2021: 1717.
- [68] CAO Y S, LIU G, LUO D H, et al. Multi-timescale photovoltaic power forecasting using an improved stacking ensemble algorithm based LSTM-informer model [J]. *Energy*, 2023, 283: 128669. DOI: [10.1016/j.energy.2023.128669](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128669).
- [69] 司志远, 杨明, 于一潇, 等. 基于卫星云图特征区域定位的超短期光伏功率预测方法 [J]. *高电压技术*, 2021, 47(4): 1214-1223. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20201803](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201803).
- SI Z Y, YANG M, YU Y X, et al. Ultra-short-term photovoltaic power prediction method based on satellite image feature region positioning [J]. *High voltage engineering*, 2021, 47(4): 1214-1223. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20201803](https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201803).
- [70] SI Z Y, YANG M, YU Y X, et al. Photovoltaic power forecast based on satellite images considering effects of solar position [J]. *Applied energy*, 2021, 302: 117514. DOI: [10.1016/j.apenergy.2021.117514](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117514).
- [71] SABZEHGAR R, AMIRHOSSEINI D Z, RASOULI M. Solar power forecast for a residential smart microgrid based on numerical weather predictions using artificial intelligence methods [J]. *Journal of building engineering*, 2020, 32: 101629. DOI: [10.1016/j.job.2020.101629](https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101629).
- [72] ALANAZI M, MAHOOR M, KHODAEI A. Two-stage hybrid day-ahead solar forecasting [C]// Anon. 2017 North American Power Symposium (NAPS), Morgantown, WV, USA, September 17-19, 2017. New York: IEEE, 2017: 1-6. DOI: [10.1109/NAPS.2017.8107319](https://doi.org/10.1109/NAPS.2017.8107319).
- [73] MASSIDDA L, MARROCU M. Quantile regression post-processing of weather forecast for short-term solar power probabilistic forecasting [J]. *Energies*, 2018, 11(7): 1763. DOI: [10.3390/en11071763](https://doi.org/10.3390/en11071763).
- [74] LOPES F M, CONCEIÇÃO R, SILVA H G, et al. Improved ECMWF forecasts of direct normal irradiance: a tool for better operational strategies in concentrating solar power plants [J]. *Renewable energy*, 2021, 163: 755-771. DOI: [10.1016/j.renene.2020.08.140](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.140).
- [75] WU W B, PENG M G. A data mining approach combining K-means clustering with bagging neural network for short-term wind power forecasting [J]. *IEEE internet of things journal*, 2017, 4(4): 979-986. DOI: [10.1109/IIOT.2017.2677578](https://doi.org/10.1109/IIOT.2017.2677578).
- [76] SU H Y, HUANG C R. Enhanced wind generation forecast using robust ensemble learning [J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2021, 12(1): 912-915. DOI: [10.1109/TSG.2020.3021578](https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3021578).

- [77] YU Y X, YANG M, HAN X S, et al. A regional wind power probabilistic forecast method based on deep quantile regression [J]. *IEEE transactions on industry applications*, 2021, 57(5): 4420-4427. DOI: [10.1109/TIA.2021.3086077](#).
- [78] DONG X C, SUN Y Y, LI Y, et al. Spatio-temporal convolutional network based power forecasting of multiple wind farms [J]. *Journal of modern power systems and clean energy*, 2022, 10(2): 388-398. DOI: [10.35833/MPCE.2020.000849](#).
- [79] 李卓, 叶林, 戴斌华, 等. 基于 IDSCNN-AM-LSTM 组合神经网络超短期风电功率预测方法 [J]. *高电压技术*, 2022, 48(6): 2117-2127. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20210557](#).
- LI Z, YE L, DAI B H, et al. Ultra-short-term wind power prediction method based on IDSCNN-AM-LSTM combination neural network [J]. *High voltage engineering*, 2022, 48(6): 2117-2127. DOI: [10.13336/j.1003-6520.hve.20210557](#).
- [80] LI M L, YANG M, YU Y X, et al. Short-term wind power forecast based on continuous conditional random field [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2024, 39(1): 2185-2197. DOI: [10.1109/TPWRS.2023.3270662](#).
- [81] LI M L, YANG M, YU Y X, et al. A wind speed correction method based on modified hidden Markov model for enhancing wind power forecast [J]. *IEEE transactions on industry applications*, 2022, 58(1): 656-666. DOI: [10.1109/TIA.2021.3127145](#).
- [82] WU Y K, SU P E, WU T Y, et al. Probabilistic wind-power forecasting using weather ensemble models [J]. *IEEE transactions on industry applications*, 2018, 54(6): 5609-5620. DOI: [10.1109/TIA.2018.2858183](#).
- [83] TAYLOR J W, MCSHARRY P E, BUIZZA R. Wind power density forecasting using ensemble predictions and time series models [J]. *IEEE transactions on energy conversion*, 2009, 24(3): 775-782. DOI: [10.1109/TEC.2009.2025431](#).
- [84] WU W B, PENG M G. A data mining approach combining K-means clustering with bagging neural network for short-term wind power forecasting [J]. *IEEE internet of things journal*, 2017, 4(4): 979-986. DOI: [10.1109/JIOT.2017.2677578](#).
- [85] SU H Y, HUANG C R. Enhanced wind generation forecast using robust ensemble learning [J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2021, 12(1): 912-915. DOI: [10.1109/TSG.2020.3021578](#).
- [86] LI M L, YANG M, YU Y X, et al. Adaptive weighted combination approach for wind power forecast based on deep deterministic policy gradient method [J]. *IEEE transactions on power systems*, 2024, 39(2): 3075-3087. DOI: [10.1109/TPWRS.2023.3294839](#).
- [87] 刘宏博. 基于深度学习的光伏功率预测方法及系统实现 [D]. 北京: 北方工业大学, 2025. DOI: [10.26926/d.cnki.gbfgu.2025.000376](#).
- LIU H B. Deep learning-based photovoltaic prediction method and system implementation [D]. Beijing: North China University of Technology, 2025. DOI: [10.26926/d.cnki.gbfgu.2025.000376](#).
- [88] 张庆. 基于深度学习的短期光伏发电功率预测及其可解释性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2025.
- ZHANG Q. Research on short-term photovoltaic power prediction based on deep learning and its interpretability [D]. Changchun: Jilin University, 2025.
- [89] 成天乐. 基于人工智能及气象预测的风电功率预测方法 [J]. *电力设备管理*, 2024(22): 150-152.
- CHENG T L. Wind power forecasting method based on artificial intelligence and weather forecasting [J]. *Electric power equipment management*, 2024(22): 150-152.
- [90] 张冬冬, 单琳珂, 刘天皓. 人工智能技术在风力与光伏发电数据挖掘及功率预测中的应用综述 [J]. *综合智慧能源*, 2025, 47(3): 32-46. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0706.2025.03.004](#).
- ZHANG D D, SHAN L K, LIU T H. Review on the application of artificial intelligence in data mining and wind and photovoltaic power forecasting [J]. *Integrated intelligent energy*, 2025, 47(3): 32-46. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0706.2025.03.004](#).
- [91] DUPRÉ A, DROBINSKI P, BADOSA J, et al. The economic value of wind energy nowcasting [J]. *Energies*, 2020, 13(20): 5266. DOI: [10.3390/en13205266](#).

作者简介:



邓力源

邓力源 (第一作者)

ORCID: [0000-0002-3821-1909](#)1994-, 女, 工程师, 博士, 主要从事电力气象管理及水风光预测技术研究 (e-mail) [dengly3@csg.cn](#)。

王皓怀

王皓怀 (通信作者)

1984-, 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事新能源功率预测及调度运行, 新型储能、虚拟电厂等新技术、新业态的电力系统运行应用等研究 (e-mail) [nanw_2025@163.com](#)。

王凌梓

ORCID: [0009-0008-6426-292X](#)1991-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力气象管理 (e-mail) [wanglz2@csg.cn](#)。

沈海波

1992-, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事电网气象管理 (e-mail) [shenhb1@csg.cn](#)。

(责任编辑 孙舒)