

引用格式: 靳双龙, 成丹, 任永建. 极端气温事件对多类型电力负荷的影响研究进展 [J]. 南方能源建设, xxxx, x(x): 1-12. JIN Shuanglong, CHENG Dan, REN Yongjian. Research progress on the impact of extreme temperature events on multiple types of electrical loads [J]. Southern energy construction, xxxx, x(x): 1-12. DOI: 10.16516/j.ceeec.2025-270.

极端气温事件对多类型电力负荷的影响研究进展

靳双龙¹, 成丹^{2,✉}, 任永建²

(1. 可再生能源并网全国重点实验室 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;

2. 湖北省气象服务中心, 湖北 武汉 430205)

摘要: [目的]针对极端气温事件对电力负荷影响研究中机制碎片化、区域局限及预测调控针对性不足的问题, 文章梳理了高温热浪与低温寒潮对多类型电力负荷的影响规律、预测方法及调控策略, 为构建韧性电力系统、保障能源安全提供支撑。[方法]文章采用文献综述与系统分析, 界定高温热浪(日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 且持续 $\geq 3\text{d}$)、低温寒潮(24 h 降温 $\geq 8^{\circ}\text{C}$ 且最低气温 $\leq 4^{\circ}\text{C}$)及居民、工业、商业3类负荷概念, 整合2022年川渝高温、2021年美国得州寒潮等典型案例, 按传统统计、机器学习、深度学习分类综述预测模型, 结合负荷特征提出调控策略并分析研究缺口。[结果]研究发现, 极端气温事件对电力负荷的影响本质是“气象因子-用户用能行为-负荷响应”的链式过程, 且差异显著: 高温热浪下居民与商业空调负荷协同激增, 负荷曲线呈“单峰高平台”, 温度每升 1°C 总负荷增2%~5%; 低温寒潮下居民采暖负荷主导突变, 负荷曲线呈“高谷值、短平峰”, 温度每降 1°C 总负荷增3%~6%; 实证显示极端气温下负荷峰值较常态提升15%~40%, 且低纬度地区高温敏感性、高纬度地区低温敏感性更突出; 预测模型中Transformer等深度学习模型精度最优, 传统统计模型可解释性强但难应对负荷非线性变化; 高温需通过“错峰电价+智能温控”抑制空调负荷, 低温需依托“蓄热式采暖+跨区域协同”保障采暖需求, 且需政策机制支撑调控落地。[结论]极端气温事件对多类型电力负荷的影响具有显著差异化与区域特征, 深度学习模型是负荷预测的优选方向, 差异化调控与政策保障可有效平抑负荷波动; 未来需重点突破微观负荷异质性分析、小样本突变预测及跨区域协同调控等研究缺口, 进一步提升极端气温事件下电力负荷管理能力, 为韧性电力系统构建提供支撑。

关键词: 极端气温事件; 多类型电力负荷; 影响机制; 负荷预测模型; 负荷调控策略; 韧性电力系统

DOI: 10.16516/j.ceeec.2025-270

文章编号: 2095-8676(2025)

CSTR: 32391.14.j.ceeec.2025-270

中图分类号:



论文二维码

Research Progress on the Impact of Extreme Temperature Events on Multiple Types of Electrical Loads

JIN Shuanglong¹, CHENG Dan^{2,✉}, REN Yongjian²

(1. State Key Laboratory of Renewable Energy Grid-Integration China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2.

Hubei Meteorological Service Center, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the problems of fragmented mechanisms, regional limitations and insufficient targeting of prediction and regulation in the research on the impact of extreme temperature events on electrical loads, this paper systematically sorts out the impact laws, prediction methods and regulation strategies of heatwaves and cold waves on multiple types of electrical loads, so as to provide support for constructing a resilient power system and ensuring energy security. [Method] Using literature review and systematic analysis, this paper defined the concepts of heatwaves (daily maximum temperature $\geq 35^{\circ}\text{C}$ and duration ≥ 3 days), cold waves (24-hour temperature drop $\geq 8^{\circ}\text{C}$ and minimum temperature $\leq 4^{\circ}\text{C}$) and three types of loads (residential, industrial and commercial). It integrated typical cases such as the 2022 Sichuan-Chongqing heatwave and the 2021 Texas (USA) cold wave, reviews prediction models by

基金项目: 中国电力科学研究院院长线攻关项目“融合气象的输电通道气象环境灾害预测预警技术研究”(NY83-24-001)

categorizing them into traditional statistical models, machine learning models and deep learning models, and proposed regulation strategies combined with load characteristics while analyzing research gaps. [Result] The study finds that the impact of extreme temperature events on electrical loads is essentially a chain process of "meteorological factors - user energy consumption behavior - load response" with significant differences: Under heatwaves, residential and commercial air-conditioning loads surge synergistically, the load curve shows a "single-peak high platform" pattern, and the total load increases by 2%~5% for every 1 °C rise in temperature; Under cold waves, residential heating loads dominate the sudden change, the load curve shows a "high valley, short flat peak" pattern, and the total load increases by 3%~6% for every 1 °C drop in temperature. Empirical evidence shows that the peak load increases by 15%~40% compared with the normal state under extreme temperatures, with higher heat sensitivity in low-latitude regions and higher cold sensitivity in high-latitude regions. Among prediction models, deep learning models such as Transformer have the highest accuracy, while traditional statistical models have strong interpretability but struggle to cope with the nonlinear changes of loads. For heatwaves, air-conditioning loads need to be suppressed through "time-of-use pricing + intelligent temperature control"; For cold waves, heating demand needs to be guaranteed by "heat storage heating + cross-regional coordination", and the implementation of regulation requires support from policy mechanisms. [Conclusion] The impact of extreme temperature events on multiple types of electrical loads has significant differentiated and regional characteristics. Deep learning models are the preferred direction for load prediction, and differentiated regulation and policy guarantees can effectively stabilize load fluctuations. In the future, it is necessary to focus on breaking through research gaps such as micro load heterogeneity analysis, small-sample sudden change prediction and cross-regional coordinated regulation to further improve the management capacity of electrical loads under extreme temperature events and provide support for the construction of a resilient power system.

Key words: extreme temperature events; multiple types of electrical loads; impact mechanisms; electrical load forecasting models; electrical load regulation strategies; resilient power systems

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

在全球气候变化背景下, 极端气温事件正呈现频次增多、强度增强、持续时间延长的趋势。据联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 6 次评估报告, 1980—2020 年全球高温热浪频次较工业化前增加 2.3 倍; 低温寒潮虽整体频次略降, 但极端低温强度显著提升, 部分地区最低温已突破历史极值^[1]。电力负荷作为电力系统“需求端”核心, 其波动直接关系电力供需匹配效率。极端气温会改变用户用能行为 (如高温时空调负荷激增、低温时采暖负荷突升), 进而引发电力负荷非常规波动, 甚至超出系统供电容量上限, 带来拉闸限电、设备过载等风险。2022 年, 我国川渝地区遭遇持续高温, 居民空调负荷占总负荷的 42%, 最大负荷较常年同期提升 18%, 叠加水电出力下降, 最终引发区域性供电紧张^[2]。2021 年, 美国得州低温寒潮中, 采暖负荷较常态激增 35%, 电网因负荷过载与设备结冰瘫痪, 超 400 万人断电^[3]。这些案例充分说明, 极端高低温对电力负荷的冲击已成为威胁能源安全的关键因素。

当前, 针对极端气温与电力负荷关系的研究虽已取得一定成果, 但仍需深入探索。多数研究聚焦于单一气温事件或单一负荷类型^[4-5], 缺乏对高温热浪与低温寒潮影响的系统性对比, 以及对不同负荷协同响应规律的深入剖析。同时, 现有实证案例的区域代表性有待加强^[6], 且传统预测模型在应对负荷的“非线性、突变性”特征时精度有限^[7], 调控策略也未能充分体现高低温场景的差异化需求。因此, 系统梳理极端气温事件对多类型电力负荷的影响规律、预测方法与调控策略, 对构建“韧性电力系统”、保障能源安全具有重要的理论与实践价值。

本文以高温热浪、低温寒潮对多类型电力负荷的影响为核心, 研究范围具体界定为: 气象维度聚焦高温热浪 (日最高气温 ≥ 35 °C 且持续 ≥ 3 d, 或超出区域历史同期 90% 分位) 与低温寒潮 (24 h 降温 ≥ 8 °C 或 48 h 降温 ≥ 10 °C, 且最低气温 ≤ 4 °C)^[8-9]; 负荷维度覆盖居民生活、工业生产、商业服务 3 类负荷; 研究内容涵盖影响机制、实证案例、预测模型、调控策略 4 大模块。全文共分 6 章, 第 1 章界定关键概念, 阐述极端高低温对电力负荷的影响机

制; 第 2 章整合国内外典型实证案例, 对比两类天气对负荷的影响差异; 第 3 章分类综述极端气温下的电力负荷预测模型; 第 4 章提出针对性负荷调控策略; 第 5 章指出研究缺口与未来方向; 第 6 章总结全文。

1 极端气温事件对多类型电力负荷的影响机制

极端气温对电力负荷的影响本质是“气象因子-用户用能行为-负荷响应”的链式过程, 其中高温热浪与低温寒潮的气象特征差异, 导致负荷响应规律与关键影响路径显著不同。

1.1 高温热浪对多类型电力负荷的影响机制

1) 高温热浪的核心气象特征

高温热浪的关键气象因子包括持续高温(日最高温 35~45 °C, 部分极端地区超 45 °C)、低相对湿度(多数地区 $\leq 50\%$)、强太阳辐射(日均辐射量 $\geq 5 \text{ kWh/m}^2$), 部分区域伴随干旱^[10-12]。这些特征共同作用于用户用能需求, 其中“持续高温”是触发负荷激增的核心驱动因子。

2) 不同类型电力负荷的响应规律

高温热浪下, 电力负荷呈现“居民负荷主导激增、商业负荷同步上升、工业负荷局部波动”的特征, 具体机制如下:

居民生活负荷对高温最敏感, 核心驱动是空调、风扇等降温设备的启用。当温度超 26~28 °C “舒适阈值”, 每升高 1 °C, 负荷增幅达 2%~5%^[13]。例如我国华南夏季, 气温从 30 °C 升至 35 °C 时, 居民空调负荷占比从 15% 升至 30%; 达 40 °C 时, 占比超 40%^[14]。高温持续时间越长, “累积效应”越显著: 短期 3~5 d, 负荷随温度线性上升, 长期 $\geq 7 \text{ d}$, 因用户 24 h 开空调等习惯固化, 负荷峰值趋稳但基础负荷显著抬高^[15]。

商业服务负荷响应规律与居民相似但敏感性略低, 商业建筑(商场、写字楼、酒店)采用集中式空调, 降温需求受人员密度、营业时间影响大。白天 9:00—22:00, 人员集中, 温度每升 1 °C, 负荷增幅 1.5%~3%; 夜间人员减少, 敏感性下降, 增幅降至 0.5%~1%^[16]。此外, 高温使商场提前开门、延迟闭店等, 空调运行时长延长, 进一步推高日负荷总量。

工业生产负荷呈“差异化波动”, 取决于行业工艺。高耗能行业(钢铁、化工、有色金属)生产需稳定温度, 高温致车间散热难, 需启用冷却设备, 负荷较常态升高 5%~10%; 但部分企业会限产(如 2022 年川渝高温时钢铁企业减产 30%), 反而使负荷下降^[17]。轻工业(纺织、食品加工)对温度敏感性低, 负荷波动主要受生产排班影响, 高温下增幅通常 $\leq 3\%$ 。

3) 高温热浪对负荷曲线的重塑

高温热浪显著改变电力负荷日曲线形态与季节特征。日曲线形态上, 常态呈“双峰”: 早峰 8:00—10:00、晚峰 18:00—22:00; 高温时晚峰延至 20:00—24:00, 峰值较常态高 15%~30%, 且午间 12:00—14:00 因空调持续运行, 不再出现“谷值”, 形成“单峰高平台”曲线^[18](如图 1 所示)。季节特征上, 高温推动夏季电力负荷峰值突破历史极值, “负荷尖峰期”明显延长。以我国长江流域为例, 该区域夏季高温期从往年 30 d 延长至 45 d, 电力负荷高峰持续时间也同步增加^[19]。

1.2 低温寒潮对多类型电力负荷的影响机制

1) 低温寒潮的核心气象特征

低温寒潮的关键气象因子包括剧烈降温(24 h 降温幅度达 8~15 °C, 部分地区超 20 °C)、低环境温度(多数地区 $\leq 0 \text{ }^\circ\text{C}$, 北方地区可达 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ~ $-30 \text{ }^\circ\text{C}$)、伴随雨雪冰冻(约 60% 的寒潮事件伴随降雪或冻雨)^[20]。与高温热浪的“缓慢累积”不同, 低温寒潮对负荷的影响具有“突发性、短时激增”特征, 其中“剧烈降温”是触发负荷突变的核心因子。

2) 不同类型电力负荷的响应规律

低温寒潮下, 电力负荷呈现“居民采暖负荷主导突变、工业负荷刚性稳定、商业负荷温和上升”的特征, 具体机制如下:

居民生活负荷核心驱动是电采暖设备(空调制热、电暖气、地暖)集中启用, 对温度敏感性显著高于高温场景。当温度低于 18~20 °C “舒适阈值”, 每降低 1 °C, 负荷增幅达 3%~6%^[21]。例如我国华北冬季, 气温从 0 °C 降至 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 居民采暖负荷占比从 20% 升至 35%; 降至 $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 占比超 50%^[21]。此外, 雨雪冰冻天气会进一步推高负荷: 降雪致室内光照减弱, 照明负荷增加; 冻雨致交通不便, 居民减少外出、延长家电使用时长, 最终使

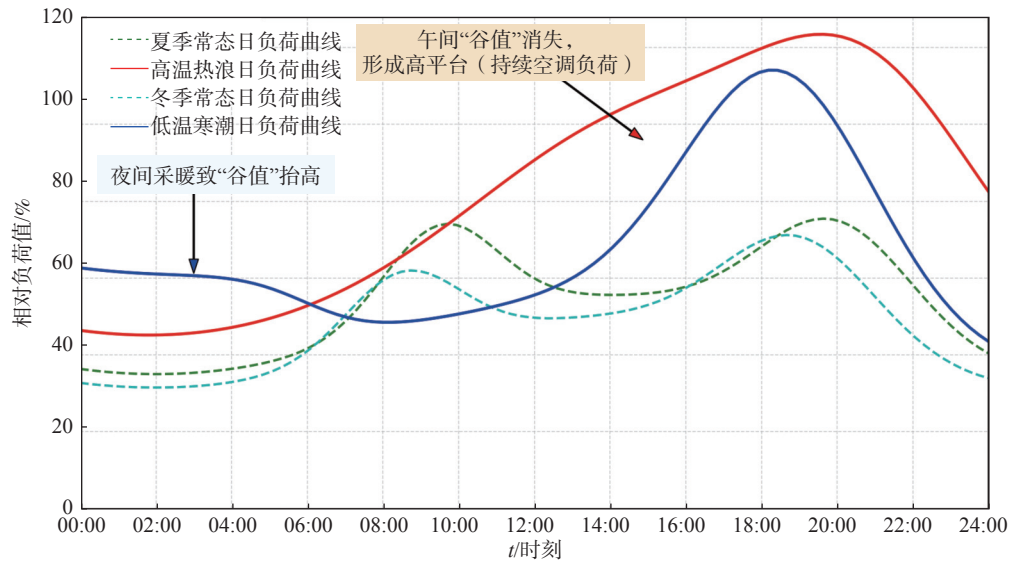


图1 极端气温事件对典型日电力负荷曲线的影响示意图

Fig. 1 Schematic illustration of the impact of extreme temperature events on typical daily electricity load curves

负荷基础值升高5%~8%^[21]。

商业服务负荷响应受建筑类型影响显著。商场、写字楼以集中供暖为主，温度每降1℃，负荷增幅达2%~4%，且因室内人员密度稳定，波动较小；酒店、餐饮因热水需求增加（电热水器运行延长）及空调制热负荷上升，综合增幅达3%~5%^[16]。与高温场景不同，低温下商业负荷日曲线形态变化小，仅峰值高度略有抬高。

工业生产负荷整体“刚性稳定”，但部分行业受影响显著。能源密集型行业（火电、炼油）工艺需连续运行，负荷波动≤2%；制造业（机械加工、电子组装）车间需维持15~25℃，低温促使电采暖启用，负荷增幅达3%~7%；农业相关行业（食品冷藏、温室种植）呈“抵消效应”，冷藏设备能耗降低（负荷降2%~3%），但温室采暖负荷增加5%~10%^[17]。

3) 低温寒潮对负荷曲线的重塑

低温寒潮对负荷曲线的影响集中体现为“峰值突变、谷值抬高”。日曲线变化上，常态冬季日负荷呈“双峰”：早峰7:00—9:00、晚峰18:00—22:00；寒潮时，因居民集中使用采暖设备，晚峰提前至17:00—21:00，峰值较常态高20%~40%。同时，受采暖设备持续运行影响，夜间22:00—次日6:00负荷谷值抬高15%~25%，最终形成高谷值、短平峰曲线^[22]（如图1所示）。季节特征层面，寒潮使冬季负荷呈“多峰叠加”，多个寒潮事件引发多次负荷峰值，且峰值逐次抬高，源于用户采暖设备持续运行，负荷累积效应更显著。

1.3 两类极端气温事件对电力负荷影响的差异对比

为清晰区分高温热浪与低温寒潮的影响特征，本文从负荷敏感性、负荷曲线、影响持续时间和关键驱动因子4个维度进行对比，结果如表1所示。

表1 高温热浪与低温寒潮对电力负荷影响的差异对比

Tab. 1 Comparative analysis of the impacts of heatwaves and cold waves on electricity load

对比维度	高温热浪	低温寒潮
负荷敏感性	居民负荷>商业负荷>工业负荷；温度每升1℃，总负荷增2%~5%	居民负荷>商业负荷>工业负荷；温度每降1℃，总负荷增3%~6%
负荷曲线形态	日曲线呈“单峰高平台”，晚峰延长至20:00—24:00	日曲线呈“高谷值、短平峰”，晚峰提前至17:00—21:00
影响持续时间	持续7~15 d，负荷峰值随时间延长趋于稳定	持续3~7 d，负荷峰值随寒潮强度增强而突变
关键驱动因子	持续高温（核心）、低湿度、强辐射	剧烈降温（核心）、低气温、雨雪冰冻
负荷类型差异度	居民与商业负荷协同激增，工业负荷局部波动	居民负荷主导突变，商业与工业负荷温和上升

2 极端气温事件对多类型电力负荷影响的实证案例

本章选取国内外典型极端气温事件, 从区域类型、负荷变化数据、关键影响因素 3 个维度, 整合高温热浪与低温寒潮对电力负荷的实证结果, 进一步验证第 1 章的影响机制。

2.1 高温热浪对多类型电力负荷影响的实证案例

1) 2022 年川渝地区高温热浪

2022 年 7—8 月, 我国四川、重庆遭遇持续高温热浪, 日均温达 35~40 °C, 部分地区超 42 °C, 持续 40 d 且伴随严重干旱^[21]。该事件对电力负荷的影响主要有 3 个方面^[23]: (1) 负荷峰值破历史极值, 四川最大负荷达 65 GW, 较 2021 年同期升 18%; 重庆达 23 GW, 升 15%; (2) 负荷结构显著变化, 居民空调负荷占比从常态 25% 升至 42%, 商业空调负荷占比从 15% 升至 28%; (3) 工业负荷波动, 高耗能企业因限电减产, 负荷较常态降 12%, 轻工业因车间冷却需求, 负荷升 5%。此案例印证了高温下“居民与商业负荷协同激增、工业负荷局部波动”的规律, 且干旱致水电出力下降, 进一步加剧负荷供需矛盾。

2) 2023 年广东、福建等地持续高温

2023 年夏季, 我国广东、福建等华南地区遭遇长时间高温热浪, 多地日最高气温突破 38 °C, 持续日数超过 20 d^[24]。该事件对电力负荷的影响体现了低纬度高温高湿地区的典型特征^[25]: (1) 用电负荷与气温高度正相关, 广东省统调最高负荷达 42 GW, 创历史新高, 较 2022 年同期增长 10%; (2) 居民空调负荷占比极高, 广州、深圳等核心城市, 居民空调负荷在高峰时段占总负荷的比重攀升 45%~50%, 成为拉动负荷增长的核心引擎; (3) 商业负荷增幅显著, 受高温天气影响, 大型商场、写字楼等商业场所中央空调几乎全天候运行, 其用电负荷较常态工作日增长超过 20%。此案例进一步证实, 在我国南方地区, 高温热浪下的负荷增长主要由居民和商业的降温需求驱动, 且其负荷对温度的敏感性强于国内其他地区。

3) 2023 年欧洲多国高温热浪

2023 年 7 月, 欧洲法国、西班牙、意大利等国遭遇极端高温, 日均温达 38~45 °C, 巴黎、马德

里等城市突破历史最高温^[26]。实证数据显示^[27]:

(1) 法国最大电力负荷达 120 GW, 较 2022 年同期升 20%, 居民空调负荷占比 45%; (2) 西班牙商业负荷增幅显著, 商场、酒店负荷较常态升 25%, 因空调运行时长从 10 h/d 延至 16 h/d; (3) 意大利工业负荷呈“分化特征”, 钢铁企业因高温限产降 8%, 电子制造业因车间降温需求升 10%。此案例表明, 高纬度地区高温热浪下电力负荷对温度敏感性虽低于低纬度地区, 但因欧洲近 5 a 空调普及率从 30% 升至 50%, 负荷增幅仍显著。

2.2 低温寒潮对多类型电力负荷影响的实证案例

1) 2021 年我国北方寒潮

2021 年 11 月, 我国华北、东北地区遭遇强寒潮, 24 h 降温 10~15 °C, 最低温达 -20 °C~-30 °C, 部分地区伴暴雪^[28]。其对电力负荷的影响有 3 个方面^[29]: (1) 负荷峰值短时突变, 北京最大负荷达 22 GW, 较寒潮前升 35%; 沈阳达 9 GW, 升 40%;

(2) 负荷谷值显著抬高, 北京夜间负荷谷值从 8 GW 升至 12 GW, 抬高 50%; (3) 工业负荷稳定, 东北重工业基地(如鞍山钢铁)因生产连续, 负荷波动仅 3%, 但温室种植行业负荷升 15%。此案例验证了低温下“居民负荷主导突变、工业负荷刚性稳定”的规律, 且暴雪致交通中断, 居民居家用电增加, 进一步推高负荷。

2) 2021 年美国得州寒潮

2021 年 2 月, 美国得克萨斯州遭遇极端寒潮, 气温从 10 °C 骤降至 -15 °C, 伴随冻雨与降雪^[3], 对电力负荷冲击显著。具体影响有 3 方面^[30]: (1) 负荷峰值创历史新高, 得州最大电力负荷达 70 GW, 较常态升 35%, 其中居民采暖负荷占比 55%; (2) 负荷持续高企, 寒潮持续 7 d, 负荷峰值维持在 65 GW 以上, 远超电网 60 GW 的供电容量, 引发拉闸限电; (3) 商业与工业负荷同步上升, 商业建筑采暖负荷升 30%, 石油炼化行业因管道防冻, 电伴热负荷升 25%。此案例暴露极端寒潮下“负荷突变超出系统备用容量”的风险, 也表明低温时商业与工业负荷协同上升会加剧供需矛盾。

2.3 实证案例的共性与差异总结

从上述案例可提炼高温热浪与低温寒潮影响的共性特征: (1) 居民负荷是极端气温下负荷波动的核心驱动, 对温度的敏感性显著高于商业、工业

负荷；（2）极端气温持续时间越长，负荷累积效应越显著，峰值高度与持续时间呈正相关；（3）高温干旱、寒潮暴雪等伴随灾害会加剧负荷波动，形成“极端天气+次生灾害”的叠加影响。

区域差异特征主要有两点：（1）低纬度地区高温负荷敏感性更高，如我国华南、欧洲南部，温度每升 1℃，负荷增加 4%~5%；高纬度地区低温负荷敏感性更突出，如我国东北、美国北部，温度每降 1℃，负荷增加 5%~6%；（2）发展中国家工业负荷波动更大，典型如我国，因极端气温下需通过限产应对供需压力，高耗能行业负荷受影响明显；发达国家工业负荷更稳定，如美国、欧洲，其工业工艺先进，设备与系统抗干扰能力强，极端气温对工业负荷影响较小。

3 极端气温事件下电力负荷预测模型研究进展

极端气温事件下电力负荷的非线性、突变性、高不确定性特征，对预测模型的精度与鲁棒性提出更高要求。本章按传统统计模型、机器学习模型、深度学习模型进行分类，综述各类模型的原理、优势、不足及在极端气温场景下的改进方向。

3.1 传统统计模型

传统统计模型基于“负荷与气象因子的线性关联”构建，核心包括回归分析、时间序列分析等，在极端天气研究初期应用广泛。

1) 回归分析模型

常用模型有多元线性回归（MLR）、逐步回归（SR），通过构建“负荷-温度-湿度-辐射”线性方程实现预测。汪付华等^[31]基于 2012—2016 年淮北市逐日用电负荷与气象要素数据，采用相关分析、回归分析、曲线拟合等统计方法，分析用电负荷的季节变化规律及周末/节假日效应，提炼主要气象影响因子，同时研究温度对负荷的 1℃ 效应与负荷对最高温度的敏感性。在此基础上构建趋势负荷及趋势方程，将周末/节假日效应应用于气象负荷提取与不同预测模型建立，还通过趋势法建立逐日负荷预测的多元回归方程和曲线拟合方程。针对趋势法弱点提出 2 d 增量法并建立对应模型，其历史拟合率及 2017 年试报均达 96%~97%，比趋势法高 2%~3%，比考核要求高 4%~5%，提升了负荷预

测精度。这类模型优势是原理简单、计算量小、可解释性强；不足是无法捕捉极端天气下负荷的非线性变化，温度超“历史样本范围”时，预测误差显著增大。

2) 时间序列模型

常用模型有自回归积分移动平均模型（ARIMA）、指数平滑模型（ES），通过挖掘负荷时间相关性实现预测。梁荣等^[32]以 5 种典型建筑冷热电负荷历史数据为基础，将 ARIMA 模型用于短期预测，仿真显示在冬夏典型日的冷热电负荷预测中，ARIMA 模型的最大平均绝对百分比误差为 4.1%，计算速度慢，但调试和确定参数的难度不大。这类模型优势是对平稳负荷序列预测精度较高；但极端气温下负荷序列平稳性被打破（如寒潮致负荷突变），模型难适应序列突变，长期（7 d 以上）预测误差达 15%~20%。

3.2 机器学习模型

机器学习模型通过非线性映射捕捉负荷与气象因子的复杂关联，在极端天气负荷预测中应用更广泛，核心包括支持向量机（SVM）、随机森林（RF）、梯度提升决策树（GBDT）等。

1) 支持向量机（SVM）

SVM 通过核函数将负荷-气象数据映射至高维空间，构建最优分类超平面实现预测。顾婷婷等^[33]利用 2008—2013 年杭州市逐日和逐时燃气负荷及气象资料，分析其负荷变化与气象因子的响应关系，并建立 SVM 预测模型，结果显示该模型预测效果较好，逐日燃气负荷预报的平均误差为 4.36%，逐时燃气负荷预报的相对误差约为 4.18%。SVM 的优势是对小样本数据的适应性强，能有效处理极端天气下的稀疏样本；但不足在于计算复杂度高，对大规模数据的处理效率低。

2) 随机森林（RF）与梯度提升决策树（GBDT）

RF 通过多棵决策树集成降低过拟合风险，GBDT 通过梯度下降迭代优化模型参数。李焱等^[34]用 RF 模型对北爱尔兰地区进行 1 d 24 h 的负荷预测，平均绝对百分比误差为 2.1%；Chen 等^[35]用 GBDT 模型预测欧洲德国高温期负荷，平均绝对百分比误差为 3.2%。此类模型优势有两点：（1）能自动筛选关键气象因子，如识别高温下“温度-辐射”、低温下“温度-降雪”组合；（2）对极端值鲁棒性强，预

测误差波动小(平均绝对误差百分比波动 $\leq 1\%$)。不足在于对负荷突变的“提前预警能力”不足,通常仅能捕捉已发生突变,无法预测未来1~2 d的突变趋势。

3.3 深度学习模型

深度学习模型通过多层神经网络提取负荷与气象数据的深层特征,在极端天气负荷预测中精度最高,核心包括循环神经网络(RNN)、长短期记忆网络(LSTM)、门控循环单元(GRU)、Transformer等。

1) 长短期记忆网络(LSTM)与门控循环单元(GRU)

LSTM通过遗忘门、输入门、输出门解决RNN的梯度消失问题,能有效捕捉负荷长时依赖关系;GRU简化LSTM门结构,提升计算效率。周绍妮等^[36]以山西省为案例,构建了融合时间特征和气象要素的数据集,对RA-LSTM模型进行了全面评估,结果表明,RA-LSTM模型在均方根误差、平均绝对误差、平均绝对百分比误差及决定系数等指标上均显著优于基准BP模型和传统LSTM模型,RA-LSTM模型的MAPE、MAE较BP模型分别降低了41.8%、40.9%。曾囿钧等^[37]为提高短期负荷预测精度,提出构建基于卷积神经网络(CNN)、双向门控循环单元(BiGRU)与全连接神经网络

(NN)的混合模型,用于短期负荷预测。此类模型优势是对负荷长时变化趋势捕捉精度高,能适应极端天气下负荷非线性变化;不足是需大量历史数据(如至少5 a极端天气样本)支撑,若地区极端天气样本稀缺,模型精度会显著下降。

2) Transformer 模型

Transformer通过自注意力机制捕捉负荷与气象数据的全局关联,尤其适配多源异构数据(如气象雷达、用户用电行为数据)。张帅等^[38]为提高短期电力负荷预测精度,提出Transformer-CNN融合法,融合负荷内部周期与外部气象特征;用奇异谱分析(SSA)重构负荷周期、快速傅里叶变换(FFT)提取典型周期,改进灰色关联度法提取4种气象特征建立特征集,经多特征融合网络预测,实验显示精度高,节假日预测提升明显。Transformer优势有两点:(1)多源数据融合能力强,可整合气象、用户行为、电网运行等多维度数据;(2)负荷突变预测能力突出,能提前6~24 h预警负荷峰值^[39]。不足在于模型复杂度高,需高性能计算资源支撑,且可解释性差(难以说明“为何预测负荷会突变”)^[40]。

3.4 模型对比与改进方向

为清晰对比各类模型的性能,本文从预测精度、计算效率、鲁棒性、数据需求4个维度进行评价,结果如表2所示。

表2 极端气温事件下电力负荷预测模型性能对比

Tab. 2 Performance comparison of electricity load forecasting models under extreme temperature events

模型类型	代表模型	预测精度(平均绝对百分比误差)/%	计算效率	鲁棒性	数据需求
传统统计模型	ARIMA	4.8~10	高	弱	少量历史数据
机器学习模型	RF/GBDT	3.2~3.8	中	中	中等样本数据
深度学习模型	LSTM/Transformer	1.9~2.8	低	强	大量多源数据

当前模型核心改进方向可围绕三维度展开,通过技术融合与方法优化,提升极端气温事件下负荷预测精度与实用性。(1)“物理机理+数据驱动”融合优化:将气象模型(如数值天气预报)的物理规律嵌入深度学习模型,既保留数据驱动模型对复杂负荷变化的拟合能力,又弥补纯数据模型“黑箱特性”,提升对极端气温事件影响负荷过程的解释性,让预测结果因果可追溯;(2)优化小样本学习能力:针对极端气温事件样本稀缺问题,用迁移学习突破瓶颈,如将高纬度寒潮负荷样本迁移至低

纬度寒冷地区,或借相似气候区高温样本辅助训练,补充特征信息,提升稀有极端事件预测精度;

(3)强化预测不确定性量化:引入贝叶斯方法,将单一预测值改为不确定性区间量化,计算不同置信度下负荷波动范围,为电网调度提供全面风险参考,助力决策从“经验驱动”转向“风险可控”。

4 极端气温事件下电力负荷调控策略

极端气温事件下电力负荷调控的核心目标是平抑负荷峰值、优化负荷曲线、保障供需平衡,需

结合高温热浪与低温寒潮的负荷特征差异，从需求侧响应、供给侧协同、政策保障 3 个维度制定针对性策略。

4.1 高温热浪下的电力负荷调控策略

高温热浪下负荷调控重点为抑制居民与商业空调负荷激增，保障工业关键负荷，具体策略分两方面：（1）需求侧响应（Demand Side Management, DSM）精准化^[41]。居民端推行“阶梯电价+峰谷分时电价”组合政策，并可进一步引入季节性尖峰电价，在每年 7—8 月等极端高温时段的 14:00—18:00，执行比普通峰时电价高 20%~50% 的尖峰电价，以强化对用电极高峰时段的负荷引导力度。目前广东、浙江等省份已开展相关实践。同时，建议空调温度设置不低于 26℃，并通过智能电表实时反馈用电信息。商业端实施补贴，商场、写字楼 14:00—18:00 降空调功率（如 24℃ 升至 26℃），每削 1 kW，负荷补 0.5~1 元，还可引导商场 10:00 开门、21:00 闭店，分散负荷。工业端差异化施策，高耗能行业错峰生产（如钢铁冶炼调至 22:00—6:00），轻工业弹性排班避高峰；（2）供给侧协同调度^[41]。优先启用燃气轮机、储能电站等调峰电源，高峰时增供电。整合分布式光伏，借高温高辐射提升出力抵消部分空调负荷。通过跨区域电力互济，从西南水电丰富地区向华东、华南高温负荷中心输电，补充供电缺口。

4.2 低温寒潮下的电力负荷调控策略

低温寒潮下负荷调控重点为保障居民采暖负荷，稳定商业与工业负荷，具体策略分两方面：（1）DSM 差异化^[41]。居民端推行“采暖负荷阶梯电价”政策，超基准用电量适当提价但不抑制基本采暖需求。同时，推广“蓄热式电采暖”，利用 22:00—6:00 夜间低价电蓄热、白天放热平抑负荷曲线。商业端优化集中供暖策略，酒店、商场采用“分时供暖”（白天 10:00—20:00 正常供暖，夜间降 2~3℃），并加强保温（如关非必要区域空调）减热量损耗。工业端差异化施策，制造业车间推广“电采暖+余热利用”模式降电耗，农业温室用“光伏+电采暖”一体化系统实现发电采暖自给；（2）供给侧协同调度^[42]。优先启用电火、生物质发电保障供电稳定。提前储备煤炭、天然气，防极端低温下燃料运输受阻致供应中断。加强区域电网互联，依托华北、西

北火电基地余量，向东北、华东等寒潮重灾区输电，补充激增的采暖负荷。

4.3 政策保障机制

极端气温事件下电力负荷调控需依托政策构建系统性支撑框架，可从 3 个方面推进以保障调控高效落地：（1）完善需求侧响应激励政策。明确 DSM 的补贴标准与实施细则，建立清晰利益导向机制，避免规则模糊导致用户参与意愿不足，进而提升居民、商业、工业用户参与负荷调控的积极性，夯实需求侧调控基础；（2）建立极端气温事件下负荷调控应急预案。重点明确政府（统筹协调）、电网企业（调度执行）、用户（配合响应）3 方责任分工，避免应急时责任推诿或执行断层。预案中应进一步明确紧急状况下大电网保供所需的切负荷实施规则，通常遵循先非后民、先工后商、分级执行的原则。即优先切除高耗能工业负荷，其次是一般工商业负荷，最大限度保障居民生活、医院、交通枢纽等民生关键负荷的供应。确保极端气温来袭时，调控措施能快速有序落地，最大程度降低供电风险。此外，加强跨部门协同机制建设。建立气象与电力部门常态化信息共享通道，依托气象部门专业预测能力，提前 48~72 h 向电力部门发布极端天气预警，为负荷预测、调度方案制定预留准备时间，推动负荷调控从“被动应对”转向“主动预判”^[43]。

5 研究缺口与未来方向

尽管极端气温事件对电力负荷影响的研究已取得显著进展，但结合前文分析，当前仍存在以下研究缺口，未来需重点突破。

1) 影响机制层面

现有研究多依赖城市级等宏观负荷数据，缺乏单户居民、单个商业建筑等微观用户负荷异质性分析，难以精准识别不同用户群体响应差异。对高原寒冷、低纬度高温高湿地区负荷特征研究少，缺乏区域差异化模型。同时，气候变化下“高温+干旱”“低温+暴雪”等叠加场景频发，其负荷协同响应机制（如干旱致水电降加剧高温供需矛盾）尚未明确。未来需基于智能电表、物联网的微观数据，解析不同收入/户型居民及不同行业/规模商工用户响应规律，建立“区域气候-用户行为-负荷特征”耦合模型。同时构建叠加场景模拟方法，量化“极端气温+次生

灾害”影响, 建立“气象-负荷-电网”耦合的系统动力学模型。

2) 预测模型层面

低纬度寒冷地区等极端气温事件样本稀缺, 致现有模型难适配小样本场景。模型对负荷突变提前预警弱, 通常仅捕捉已发生突变, 无法预测未来 1~2 d 趋势。同时, Transformer 等深度学习模型虽精度高, 但可解释性差, 多输出点预测、缺不确定性区间, 难给电网调度提供风险参考。未来需引入元学习、少样本学习等算法适配小样本场景; 融合极端气温强度、持续时间等气象数据, 建“气象预警-负荷突变”关联模型(如提前 24~48 h 预测负荷峰值); 用注意力机制可视化、模型蒸馏提升深度学习模型可解释性(明确关键因子负荷贡献度); 通过贝叶斯深度学习、蒙特卡洛模拟量化预测不确定性区间。

3) 调控策略层面

现有需求侧响应多依赖电价补贴, 致低收入、农村用户参与不足, 且过度抑制采暖负荷存公平性问题。同时, 负荷跨区域波动特性与单一区域/行业调控矛盾, 缺跨区域跨行业协同机制。未来需设计“经济激励+民生保障”策略(对低收入用户、民生负荷给电价优惠), 推广“虚拟电厂+社区负荷聚合”提升参与规模化与公平性。建全国/区域协同调控平台(错峰错开、资源互补), 并定跨区域补偿机制明确利益分配, 提升可行性。

6 结论

本文系统综述了高温热浪与低温寒潮两类极端气温事件对分类型电力负荷的影响机制、实证案例、预测模型与调控策略, 得出以下核心结论:

1) 极端气温事件对电力负荷的影响具有显著差异化特征。高温热浪下, 居民与商业空调负荷协同激增, 负荷曲线呈“单峰高平台”; 低温寒潮下, 居民采暖负荷主导突变, 负荷曲线呈“高谷值、短平峰”, 且低温下负荷对温度的敏感性(3%~6%/°C)高于高温场景(2%~5%/°C)。

2) 实证案例表明, 极端气温事件下电力负荷峰值较常态提升 15%~40%, 且区域差异显著。低纬度地区高温负荷敏感性更高, 高纬度地区低温负荷敏感性更高; 发展中国家工业负荷受极端气温天

气影响波动更大, 发达国家工业负荷更稳定。

3) 预测模型方面, Transformer 等深度学习模型在极端气温事件下的预测精度最高(MAE 1.9%~2.8%), 但需大量多源数据支撑。未来需向“物理机理+数据驱动”融合、小样本学习、不确定性量化方向发展。

4) 调控策略需结合天气类型差异化设计。高温时段重点抑制空调负荷, 采用“错峰电价+智能温控”; 低温时段重点保障采暖负荷, 采用“蓄热式采暖+跨区域协同”, 同时需政策层面完善激励机制与应急预案。

在“碳达峰·碳中和”战略背景下, 极端气温事件频发对以新能源为主体的新型电力系统建设带来了严峻挑战。一方面, 新能源发电(如光伏、风电)本身具有波动性, 极端天气(如高温无风、寒潮冰冻)会进一步加剧其出力的不确定性, 与极端负荷的刚性增长形成“供需双侧随机”的矛盾; 另一方面, 为实现“双碳”目标, 社会电气化水平将持续提升, 使得电力负荷对极端气温的敏感性进一步增强。因此, 本文的研究结论对于应对这些挑战具有现实指导意义。未来研究需聚焦负荷异质性分析、小样本突变预测、跨区域协同调控 3 大方向, 通过精准预测与差异化调控, 提升电网对极端负荷的柔性调节能力, 推动源网荷储协同互动, 为构建安全、高效、绿色的韧性电力系统, 保障能源安全, 助力“双碳”目标实现提供有力支撑。

参考文献:

- [1] IPCC. Sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Geneva: IPCC, 2023.
- [2] 国家能源局. 2022 年川渝地区电力保供工作总结 [R]. 北京: 国家能源局, 2022.
National Energy Administration. Work summary of electricity supply guarantee in the Sichuan-Chongqing region in 2022 [R]. Beijing: National Energy Administration, 2022.
- [3] ERCOT. 2021 Winter storm Uri preliminary report [R]. Austin: Electric Reliability Council of Texas, 2021.
- [4] YUAN J H, ZHANG K, DING B D, et al. Enhancement strategy of power system resilience for supply-demand imbalance at extreme weather conditions: a high-share renewable energy case from Qinghai Province in China [J]. *Renewable energy*, 2026, 256: 124048. DOI: 10.1016/j.renene.2025.124048.
- [5] 袁家海, 张凯, 张健, 等. 极端高温天气下电力系统韧性提升策略 [J]. *发电技术*, 2025, 46(4): 694-704. DOI: 10.12096/j.2096-

- 4528.pgt.25089.
- YUAN J H, ZHANG K, ZHANG J, et al. Resilience enhancement strategies for power systems under extreme high-temperature weather [J]. *Power generation technology*, 2025, 46(4): 694-704. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.25089.
- [6] SCHOOF J T, FORD T W, PRYOR S C. Recent changes in U. S. regional heat wave characteristics in observations and reanalyses [J]. *Journal of applied meteorology and climatology*, 2017, 56(9): 2621-2636. DOI: 10.1175/jamc-d-16-0393.1.
- [7] 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: 10.3969/j.issn.1000-6753.2015.04.030.
- 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 electrotechnical society*, 2015, 30(4): 242-248. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6753.2015.04.030.
- [8] 中国气象局. 极端天气气候事件监测业务规定 [R]. 北京: 中国气象局, 2017.
- China Meteorological Administration. Regulations on monitoring operations of extreme weather and climate events [R]. Beijing: China Meteorological Administration, 2017.
- [9] NOAA. National weather service criteria for heat waves and cold waves [R]. Washington D. C. : National Oceanic and Atmospheric Administration, 2020.
- [10] 张玉星, 黄晓军, 郑殿元. 长江经济带高温热浪时空特征及脆弱性评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(2): 440-450. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202302019.
- ZHANG Y X, HUANG X J, ZHENG D Y. Temporal and spatial characteristics of heat waves and assessment of vulnerability in the Yangtze River economic belt [J]. *Resources and environment in the Yangtze basin*, 2023, 32(2): 440-450. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202302019.
- [11] QIAO N, YIN Y X, ZHANG P, et al. Trend, driving factors and temperature-humidity relationship of the extreme compound hot and humid events in South China [J]. *Theoretical and applied climatology*, 2024, 155(5): 4213-4230. DOI: 10.1007/s00704-024-04876-z.
- [12] LEEPER R D, HARRINGTON T, PALECKI M A, et al. The influence of drought on heat wave intensity, duration, and exposure [J]. *Journal of applied meteorology and climatology*, 2025, 64(5): 425-438. DOI: 10.1175/jamc-d-24-0072.1.
- [13] 唐冬来, 石佳磊, 许梓荣, 等. 面向极端高温电力保供的居民空调负荷调节方法 [J]. *供用电*, 2025, 42(5): 91-99. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2025.05.010.
- TANG D L, SHI J L, XU Z R, et al. Residential air conditioning load regulation methods for power supply guarantee in extreme high temperature conditions [J]. *Distribution & utilization*, 2025, 42(5): 91-99. DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2025.05.010.
- [14] 谢敏, 邓佳梁, 刘明波, 等. 基于气象信息和熵权理论的降温负荷估算方法 [J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(3): 135-139. DOI: 10.7500/AEPS20150504009.
- XIE M, DENG J L, LIU M B, et al. Temperature-lowering load estimation method based on meteorological data and entropy weight theory [J]. *Automation of electric power systems*, 2016, 40(3): 135-139. DOI: 10.7500/AEPS20150504009.
- [15] 杨小磊, 过夏明, 路轶, 等. 计及温度累积效应的智能电网负荷预测算法 [J]. *沈阳工业大学学报*, 2024, 46(2): 121-126. DOI: 10.7688/j.issn.1000-1646.2024.02.01.
- YANG X L, GUO X M, LU Y, et al. Load forecasting algorithm of smart grid considering temperature cumulative effect [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2024, 46(2): 121-126. DOI: 10.7688/j.issn.1000-1646.2024.02.01.
- [16] 徐晶, 迟福建, 葛磊蛟, 等. 基于 SARIMA-GRNN-SVM 的短期商业电力负荷组合预测方法 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(2): 85-91. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.000353.
- XU J, CHI F J, GE L J, et al. Short-term combined commercial load forecasting method based on SARIMA-GRNN-SVM [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2020, 32(2): 85-91. DOI: 10.19635/j.cnki.csu-epsa.000353.
- [17] 廖思阳, 肖雨朵, 徐箭, 等. 需求响应下计及高耗能工业负荷生产流程的经济调度模型 [J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(3): 22-30. DOI: 10.7500/AEPS20240414003.
- LIAO S Y, XIAO Y D, XU J, et al. Economic dispatch model considering production process of energy-intensive industrial load under demand response [J]. *Automation of electric power systems*, 2025, 49(3): 22-30. DOI: 10.7500/AEPS20240414003.
- [18] 李丹, 贺帅, 颜伟, 等. 考虑动态时间锚点和典型特征约束的年均负荷曲线预测 [J]. *中国电力*, 2024, 57(11): 36-47. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202308114.
- LI D, HE S, YAN W, et al. Annual daily average load curve prediction considering dynamic time anchors and typical feature constraints [J]. *Electric power*, 2024, 57(11): 36-47. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202308114.
- [19] 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.
- 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.
- [20] 汪宁, 谢志清, 高苹, 等. 江苏四类低温事件致灾因子与基于影响的低温风险时空分布对比研究 [J]. *气象学报*, 2023, 81(1): 110-123. DOI: 10.11676/qxxb2023.20220058.
- WANG N, XIE Z Q, GAO P, et al. Differences in spatiotemporal variation and risk zoning of four types of extreme cold events in Jiangsu province [J]. *Acta meteorologica sinica*, 2023, 81(1): 110-123. DOI: 10.11676/qxxb2023.20220058.
- [21] 陈泽龙, 刘鑫, 刘继成, 等. 东北区域采暖负荷研究 [J]. *东北电*

- 力技术, 2025, 46(8): 49-54. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7913.2025.08.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7913.2025.08.011).
- CHEN Z L, LIU X, LIU J C, et al. Research on regional heating load in Northeast China [J]. *Northeast electric power technology*, 2025, 46(8): 49-54. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7913.2025.08.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7913.2025.08.011).
- [22] 刘静, 王丽娟, 成丹, 等. 武汉市电力负荷特征及其与气象因子的关系 [J]. *暴雨灾害*, 2023, 42(2): 232-240. DOI: [10.12406/byzh.2023-022](https://doi.org/10.12406/byzh.2023-022).
- LIU J, WANG L J, CHENG D, et al. Characteristics of power load in Wuhan and its relationship with meteorological factors [J]. *Torrential rain and disasters*, 2023, 42(2): 232-240. DOI: [10.12406/byzh.2023-022](https://doi.org/10.12406/byzh.2023-022).
- [23] 周达, 许红梅, 艾婉秀, 等. 2022 年夏季川渝高温干旱事件对电力供需影响分析 [J]. *气象研究与应用*, 2024, 45(1): 6-11. DOI: [10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.1.02](https://doi.org/10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.1.02).
- ZHOU D, XU H M, AI W X, et al. The impact of high temperature and drought events in the Sichuan and Chongqing region during summer 2022 on the power supply and demand [J]. *Journal of meteorological research and application*, 2024, 45(1): 6-11. DOI: [10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.1.02](https://doi.org/10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2024.1.02).
- [24] 中国气象局国家气候中心. 2023 年中国气候公报 [R]. 北京: 中国气象局, 2024.
- National Climate Center, China Meteorological Administration. China climate bulletin 2023 [R]. Beijing: China Meteorological Administration, 2024.
- [25] 陈天, 刘君男. 粤港澳大湾区高温灾害韧性评估与提升策略 [J]. *上海城市规划*, 2023, 1(1): 9-17. DOI: [10.11982/j.supr.20230102](https://doi.org/10.11982/j.supr.20230102).
- CHEN T, LIU J N. High-temperature disaster resilience evaluation and promotion in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Shanghai urban planning review*, 2023, 1(1): 9-17. DOI: [10.11982/j.supr.20230102](https://doi.org/10.11982/j.supr.20230102).
- [26] European Environment Agency. Heat waves in Europe: impacts on health and the environment [R]. Copenhagen: European Environment Agency, 2023.
- [27] REN21. Renewable energy policy network for the 21st Century annual report 2023 [R]. Paris: REN21, 2023.
- [28] 中国气象局. 2021 年 11 月全国极端天气事件公报 [R]. 北京: 中国气象局, 2021.
- China Meteorological Administration. Bulletin on national extreme weather events in November 2021 [R]. Beijing: China Meteorological Administration, 2021.
- [29] 国家电网公司. 2021 年北方寒潮电力保供报告 [R]. 北京: 国家电网公司, 2021.
- State Grid Corporation of China. Report on electric power supply guarantee during the northern China cold wave in 2021 [R]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2021.
- [30] U. S. Department of Energy. Review of the February 2021 Texas power outages [R]. Washington D. C. : U. S. Department of Energy, 2021.
- [31] 汪付华, 周后福, 张屏, 等. 气象因素对淮北市电力负荷的影响及其预测研究 [J]. *气象与环境学报*, 2020, 36(4): 104-111. DOI: [10.3969/j.issn.1673-503X.2020.04.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-503X.2020.04.014).
- WANG F H, ZHOU H F, ZHANG P, et al. Effects of meteorological factors on electrical load and the forecasting of electrical load [J]. *Journal of meteorology and environment*, 2020, 36(4): 104-111. DOI: [10.3969/j.issn.1673-503X.2020.04.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-503X.2020.04.014).
- [32] 梁荣, 王洪涛, 吴奎华, 等. 基于神经网络和 ARIMA 模型的冷热电短期负荷预测 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(3): 52-58. DOI: [10.19635/j.cnki.csu-epsa.000260](https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000260).
- LIANG R, WANG H T, WU K H, et al. Short-term forecasting of cooling, heating and power loads based on neural network and ARIMA model [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2020, 32(3): 52-58. DOI: [10.19635/j.cnki.csu-epsa.000260](https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000260).
- [33] 顾婷婷, 骆月珍, 张青, 等. 基于气象因子杭州市燃气负荷预测研究 [J]. *气象与环境学报*, 2017, 33(3): 107-112. DOI: [10.3969/j.issn.1673-503X.2017.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-503X.2017.03.014).
- GU T T, LUO Y Z, ZHANG Q, et al. Study on gas load forecast in Hangzhou based on meteorological factors [J]. *Journal of meteorology and environment*, 2017, 33(3): 107-112. DOI: [10.3969/j.issn.1673-503X.2017.03.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-503X.2017.03.014).
- [34] 李焱, 贾雅君, 李磊, 等. 基于随机森林算法的短期电力负荷预测 [J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(21): 117-124. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.191594](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.191594).
- LI Y, JIA Y J, LI L, et al. Short term power load forecasting based on a stochastic forest algorithm [J]. *Power system protection and control*, 2020, 48(21): 117-124. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.191594](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.191594).
- [35] CHEN B B, LIN R H, ZOU H. A short term load periodic prediction model based on GBDT [C]//IEEE. 2018 IEEE 18th International Conference on Communication Technology (ICCT), Chongqing, China, October 8-11, 2018. New York: IEEE, 2018: 1402-1406. DOI: [10.1109/ICCT.2018.8600009](https://doi.org/10.1109/ICCT.2018.8600009).
- [36] 周绍妮, 吴优, 窦雨菡, 等. 基于 RA-LSTM 模型的山西省中长期电力负荷预测 [J]. *气象与环境科学*, 2025, 48(1): 78-87. DOI: [10.16765/j.cnki.1673-7148.2025.01.009](https://doi.org/10.16765/j.cnki.1673-7148.2025.01.009).
- ZHOU S N, WU Y, DOU Y H, et al. Medium- and long-term power load forecasting in Shanxi Province based on RA-LSTM model [J]. *Meteorological and environmental sciences*, 2025, 48(1): 78-87. DOI: [10.16765/j.cnki.1673-7148.2025.01.009](https://doi.org/10.16765/j.cnki.1673-7148.2025.01.009).
- [37] 曾囿钧, 肖先勇, 徐方维, 等. 基于 CNN-BiGRU-NN 模型的短期负荷预测方法 [J]. *中国电力*, 2021, 54(9): 17-23. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.202003035](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.202003035).
- ZENG Y J, XIAO X Y, XU F W, et al. A short-term load forecasting method based on CNN-BiGRU-NN model [J]. *Electric power*, 2021, 54(9): 17-23. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.202003035](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.202003035).
- [38] 张帅, 刘文霞, 唐浩洋, 等. 一种基于 Transformer 多特征融合的短期负荷预测方法 [J]. *华北电力大学学报*, 2025, 52(3): 68-75, 83. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2691.2025.03.07](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2691.2025.03.07).

- ZHANG S, LIU W X, TANG H Y, et al. Short-term load forecasting method based on multi-feature fusion using Transformer [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2025, 52(3): 68-75, 83. DOI: [10.3969/j.issn.1007-2691.2025.03.07](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-2691.2025.03.07).
- [39] GAO J X, CHEN Y T, HU W B, et al. An adaptive deep-learning load forecasting framework by integrating transformer and domain knowledge [J]. *Advances in applied energy*, 2023, 10: 100142. DOI: [10.1016/j.adapen.2023.100142](https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100142).
- [40] 黄文琦, 梁凌宇, 王鑫, 等. 基于变量选择与 Transformer 模型的中长期电力负荷预测方法 [J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2024, 51(4): 483-491, 500. DOI: [10.3785/j.issn.1008-9497.2024.04.011](https://doi.org/10.3785/j.issn.1008-9497.2024.04.011).
- HUANG W Q, LIANG L Y, WANG X, et al. Mid-long term power load forecasting based variable selection and Transformer model [J]. *Journal of Zhejiang University (science edition)*, 2024, 51(4): 483-491, 500. DOI: [10.3785/j.issn.1008-9497.2024.04.011](https://doi.org/10.3785/j.issn.1008-9497.2024.04.011).
- [41] 国家发展改革委. 关于进一步完善分时电价机制的通知 [R]. 北京: 国家发展改革委, 2021.
- National Development and Reform Commission (NDRC). Notice on further improving the time-of-use electricity pricing mechanism [R]. Beijing: National Development and Reform Commission (NDRC), 2021.
- [42] 中国电力企业联合会. 中国电力工业发展报告 2023 [R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2023.
- China Electricity Council (CEC). China electric power industry development report 2023 [R]. Beijing: China Electricity Council (CEC), 2023.
- [43] 中国气象局, 国家能源局. 气象与电力行业信息共享合作协议

[R]. 北京: 中国气象局, 国家能源局, 2022.

China Meteorological Administration (CMA), National Energy Administration (NEA). Cooperation agreement on information sharing between the meteorological and electric power industries

[R]. Beijing: China Meteorological Administration (CMA), National Energy Administration (NEA), 2022.

作者简介:



靳双龙

靳双龙 (第一作者)

1984-, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事数值预报和电力气象技术研究 (e-mail) jinshuanglong@epri.sgcc.com.cn。



成丹

成丹 (通信作者)

1988-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力气象服务研究 (e-mail) 501985033@qq.com。

任永建

1982-, 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事应用气象和气候变化研究 (e-mail) renyj@cam.gov.cn。

(责任编辑 孙舒)