文章编号：2096-5125 (2022) 01-0002-09 中图分类号：TM614 文献标志码：A
DOI：10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2022.01.002

中国区域低温天气及其对风力发电影响的统计

孙荣富[1]，徐海翔[1]，吴林林[2]，林弋莎[3]，乔颖[3*]
（1. 国网冀北电网有限公司调度控制中心，北京市 西城区 100031；
2. 国网冀北电网有限公司电力科学研究院，北京市 西城区 100018；
3. 清华大学电机工程与应用电子技术系，北京市 海淀区 100084）

Statistics of Cold Weather and Its Impact on Wind Power Generation in China

SUN Rongfu[1], XU Haixiang[1], WU Linlin[2], LIN Yisha[3], QIAO Ying[3*]
(1. Dispatch Center of State Grid Jibei Power Grid Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100031, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Jibei Power Grid Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100018, China;
3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

Abstract: Rare cold weather may cause unplanned shutdown of large-scale wind turbines, threatening the reliable and safe operation of the power system. Analyzing the temporal and spatial statistical laws of the impact of low temperature weather on wind power outage capacity is of great significance to the development of a high percentage or even 100% renewable energy power system in the future. This paper takes the lower bound of the designed operating temperature of the wind turbine as the threshold, and focuses on the cold weather with ambient temperature below the threshold. A statistical analysis of the low cold weather in China and its impact on wind power generation is conducted based on the 48-year (1970-2017) daily temperature observation data of the country's 2481 ground weather stations and actual wind farm distribution information belonged to the State Grid Corporation of China. The occurrence frequency, duration, times of repeatedly crossing thresholds, affected area and outage wind capacity are taken as indicators for the analysis. The results of this study can provide a basis for the planning and operation of high-proportion renewable energy power systems in the future.

Keywords: high-proportion renewable energy power system; cold weather; wind power outage

摘 要：罕见低温天气可能导致大规模风电机组非计划停运，威胁电力系统的可靠安全运行。研究低温天气对风力发电停运容量影响的时空规律，对于未来高比例甚至100%可再生能源电力系统的发展，具有重要意义。以风力发电机组的设计运行温度下限为阈值，关注低于阈值的低温天气。结合全国2481个地面气象站点历史48年（1970—2017年）的日气温观测数据及国家电网有限公司经营区的实际风电场分布数据，从发生频率、持续时间、反复穿越阈值次数、影响国土面积、风电停运容量等指标，对中国区域低温天气及其对风力发电的影响进行了统计分析，并总结了低温天气对风力发电的影响规律，可为未来高比例可再生能源电力系统的规划和运行提供基础。

关键词：高比例可再生能源电力系统；低温天气；风电停运

0 引言

“双碳”发展目标下，风力发电将发挥愈加重要的作用[1]，根据预测，到2030年中国风力发电的装机容量占比将达21%，到2050年将达约30%[2]。“三北”地区凭借其风力资源优势，有望再次成为风电开发热点区域。以2020年为例，当年“三北”地区新增风电并网容量占全国新增总容量的60%[3]。

但是，风电的发电能力强依赖于天气，极端天气将极大影响高比例可再生能源电力系统的运行安全[4-6]。“三北”地区纬度高，易受低温天气影响，随着其风电装机占比的不断增加，低温天气导致风电停运的容量可能大大增加，影响系统的电力平衡。

近年来，国内外均记录到低温天气导致风电大规模非计划停运的事件。2021年2月，美国得克萨斯州遭遇极寒天气，风电停运容量达近14 GW[7-8]。2021年

基金项目：国家电网有限公司科技项目（5700-202014195A-0-0-00）。
Science and Technology Foundation of SGCC (5700-202014195A-0-0-00).

1月，冀北地区遭遇寒潮天气，冀北全网44%风电场出现风电机组停运，停运容量占全网总装机容量的57%。因此，亟待研究影响风力发电的低温天气规律，评估风力发电停运的风险。

低温天气风电机组停运的原因有两类[9]，一是环境温度过低，导致风电机组低温保护动作，风电机组切机脱网；二是受冰冻影响[10]，风电机组叶片结冰保护被触发，风电机组退出运行。一般情况下，常温型机组的运行环境温度下限为–10 ℃，低温型机组的运行环境温度下限为–30 ℃，超低温型机组的运行环境温度下限为–40 ℃[11]，当环境温度低于下限值，风电机组低温保护可能被触发，导致风电机组脱网。而最可能导致机械结构覆冰的气温范围为–10 ℃~0 ℃[12]。另外，考虑到中国范围内低温冰冻天气导致大规模风电机组非计划停运的事件很少发生，本文研究的低温天气指的是第一类因轮毂高度温度低于风电机组运行温度下限导致低温保护动作的天气。

气象学领域的学者已对中国日最低气温的规律做了较为全面和详细的统计分析。王翠花等[13]、郭志梅等[14]、班军梅等[15]基于1951—2000年的测点数据分别分析了全国、北方地区、西南地区近50年来日最低气温的变化特征。吴佳等[16]和李洋等[17]还对气温年极值序列的重现期进行了建模。

但是，面向风电低温停运的低温事件的统计分析研究工作还较少。马文通等[18]针对哈密东南部的风电项目进行了常温型和低温型机组的发电量损失比较及成本核算，但其分析结论面向特定风电场的风电机组选型。李亚滨[19]利用黑龙江省71个台站1961年至2008年的逐日最低气温资料，统计分析了低于不同类型风电机组最低运行温度的低温日数、初始和终止日期的时间和空间分布，但其分析没有实际风电场分布情况，难以估算低温导致的风电停运容量，进而评估停运风险。

本文旨在结合全国2481个地面气象站点历史48年（1970—2017年）的日最高和最低气温观测数据及国家电网有限公司经营区的实际风电场分布数据，统计分析中国区域低温天气及其对风力发电的影响，探索低温触发风电保护停运的时空规律，为未来高比例可再生能源电力系统的规划和运行提供基础。

1 数据来源和风电停运容量估算说明

气象数据：全国2481个地面气象站点的实际观测数据（其中91.05%的气象站建站时间早于1970年），数据记录的时间分辨率为日，时间覆盖范围为1970—2017年。原始记录数据为2 m高度气温，本文将原始气温序列减去0.6 ℃作为轮毂高度处气温换算结果。

风电数据：所采用的风电数据包括国网经营范围内截至2020年已并网的所有风电场经纬度数据，以及截至2020年一季度各省份的风电装机容量[20]。由于每个风电场的容量未知，研究中假设各风电场容量相同，且风电场容量按省份平均。低温保护采取理想模型，认为只要环境温度低于风电机组运行温度下限，风电机组即停运。考虑到低温型风电机组是“三北”地区的常见机型，之后的分析以–30 ℃作为低温触发风电机组保护停运的判断阈值。需要说明的是，估算中风电机组布局固定，以实现变量控制，突出气象条件变化对风电停运的影响。

由于地面气象站点和风电场的空间位置不匹配，在进行风电停运估算时没有对应的气象数据可用。本文采用将气象站点作为多边形中心，进行泰森多边形划分的方法，实现气温数据的空间插值。落入某一多边形内的风电场以该多边形中心的气象站点的记录数据作为判断风电机组是否停运的依据。寒潮天气长达数千km的影响跨度为该方法的应用提供了可行基础。基于2016年1月冀北地区实际的风电低温停运事故记录数据，验证了该方法对风电最大停运容量的估算误差仅为3.2%。

2 统计指标

1）低温事件发生频率。

将观测到日最低气温低于–30 ℃的天数除以总观测天数即对应站点所在位置的低温事件发生频率。

$$I(s)=\sum_{t=1}^{D} d(s,t)/D \tag{1}$$

$$d(s,t)=\begin{cases}1 & T(s,t)\leqslant T_{\mathrm{r}}(s)\\ 0 & T(s,t)>T_{\mathrm{r}}(s)\end{cases} \tag{2}$$

式中：$I(s)$ 表示泰森多边形 s 的低温事件发生频率；D 表示关注时长；$d(s,t)$ 用以指示泰森多边形 s 在时刻 t 的气温 $T(s,t)$ 是否低于低温保护定值 $T_{\mathrm{r}}(s)$，是取值1，否取值0。

2）单次低温事件的持续时间。

以每日最高气温和最低气温为输入，假设每日最低温度出现在每日6点，每日最高气温出现在14点，利用线性插值，计算连续低于–30 ℃的持续时间。

JGEI

$$U(s,k)=t_2(s,k)-t_1(s,k) \tag{3}$$

$$T(s,t)\leqslant T_r(s)\ \forall t_1(s,k)\leqslant t\leqslant t_2(s,k) \tag{4}$$

$$T(s,t_1(s,k)-1)>T_r(s) \tag{5}$$

$$T(s,t_2(s,k)+1)>T_r(s) \tag{6}$$

式中：$U(s,k)$表示泰森多边形 s 第 k 次持续低温的时长，h，其起止时刻分别表示为$t_1(s,k)$和$t_2(s,k)$。

3）气温反复穿越阈值的次数。

若连续多日的日最低气温低于−30 ℃，且期间至少有一日的日最高气温不低于−30 ℃，则可能出现风电机组反复停运再并网的现象。因此，将连续多日出现低温事件作为一个完整的低温过程，在这些连续日中统计温度反复在阈值上下跳变的次数，反映对应区域内风电机组最大的停运再并网次数。气温由−30 ℃以上跌落至−30 ℃，再恢复记作1次。

4）低温影响的国土面积。

将记录到日最低气温低于−30 ℃的站点对应的泰森多边形面积加和，即对应时间断面下低温影响的国土面积的一条样本。

$$A(t)=\sum_{s=1}^{S}d(s,t)E(s,t) \tag{7}$$

式中：$A(t)$ 表示时刻 t 受低于低温保护定值的低温影响区域的面积，km^2；$E(s,t)$ 表示时刻 t 泰森多边形 s 的占地面积，km^2。

5）风电停运容量。

将记录到日最低气温低于−30 ℃的站点对应的泰森多边形内的风电场容量加和，即对应时间断面的风电停运容量。受实际低温影响范围以及风电机组性能分散性的影响，此处估算的停运容量是实际停运容量的一个上界。

$$C(t)=\sum_{s=1}^{S}d(s,t)P(s,t) \tag{8}$$

式中：$C(t)$ 表示时刻 t 受低于低温保护定值的低温影响的风电容量，MW；$P(s,t)$ 表示时刻 t 落入泰森多边形 s 的风电容量，MW。

3 低温事件及其对风力发电影响的规律分析

1）低温事件发生频率。

各站点48年来记录到的低温事件发生频率可视化结果如图1所示。从整个时间轴来看，低温事件发生的天数占比低，但在新疆北部、黑龙江和吉林大部、辽宁东北部、内蒙古中东部以及其他省份的小部分地区，从平均意义上低温事件年年发生（对应频率大于0.0027的站点）。

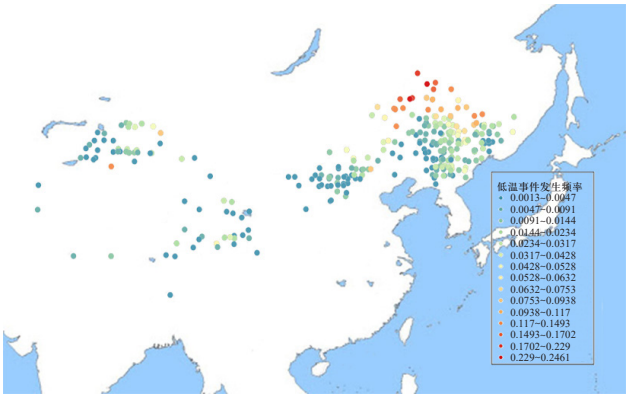

图 1 全国气象站记录的低温事件发生频率

Fig. 1 Frequency of low temperature events recorded by national weather stations

全国低温发生频率随时间的分布结果如图2所示。对应统计空间范围内只要有一个站点观测到低温事件，即影响计算结果。可以看出，全国范围内的低温事件发生频率随时间的分布相对1月中旬呈对称特点，12月至次年2月是中国低温事件高发的主要时段，结合附图A1中各省份相应结果，“三北”地区共有12个省市在这段时间内有过低温观测记录，可推知低温影响的空间范围较广。在低温影响的初期和末期，低温观测站点主要发生在黑龙江、吉林、内蒙古和新疆。

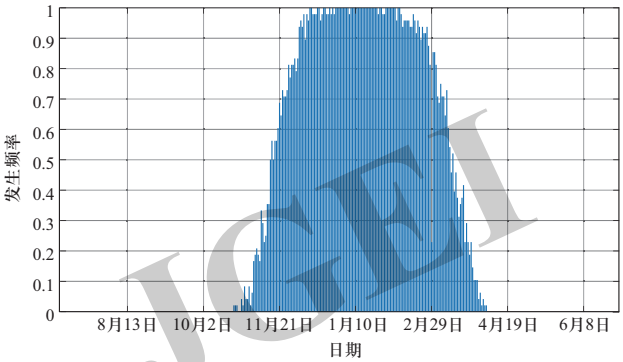

图 2 全国低温发生频率随时间的分布

Fig. 2 Changes in the frequency of low temperature across the country over time

2）单次低温事件的持续时间。

根据站点历史48年气温观测数据，可以得到各站点单次低温事件的持续时间的多年最大值，如图3所示。总体来看，除黑龙江、内蒙古、新疆部分地区出现超出一天的连续低温，其余地区低温持续小时数多在15 h以内。实际上，考虑一个区域中所有风电机组的停运不是瞬间发生的，而是从出现低于−30 ℃的时

JGEI

刻开始渐变发生，即使按低温持续时间结束时才达到所有风电机组停运的状态估算，则可以发现低温导致风电脱网停运的变化速率快，要求电网具有足够的调峰容量保证电力供需平衡。

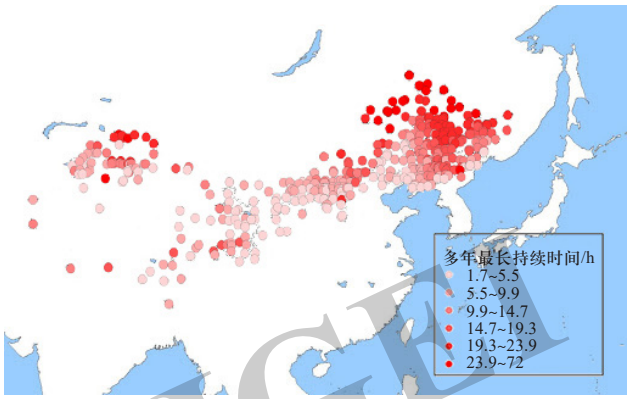

图 3　单次低温事件的持续时间的多年最大值

Fig. 3　Multi-year maximum of the duration of a single low temperature events of national weather stations

3）气温反复穿越阈值的次数。

根据站点历史48年气温观测数据，可以得到各站点多年气温反复穿越阈值的次数的最大值，如图4所示。气温穿越–30 ℃阈值较频繁的区域集中在东北和内蒙古东部地区、新疆北部、甘肃和内蒙古西部地区以及内蒙古中部和河北、山西、陕西的交界地带，这些地区需要尤其关注风电反复停运再并网的冲击。

考虑到供电可靠性要求，即使白天温度上升，风电机组可以正常运转，其可能也不被允许并网发电，则实际停运影响时间将长于气温低于–30 ℃的持续时间。根据计算方法，气温反复穿越阈值的次数给出了连续影响天数的保守估计，则根据图5的结果，这些地区需要做好风电受低温影响持续低出力的准备，最大值跨越2天至3个月之久。

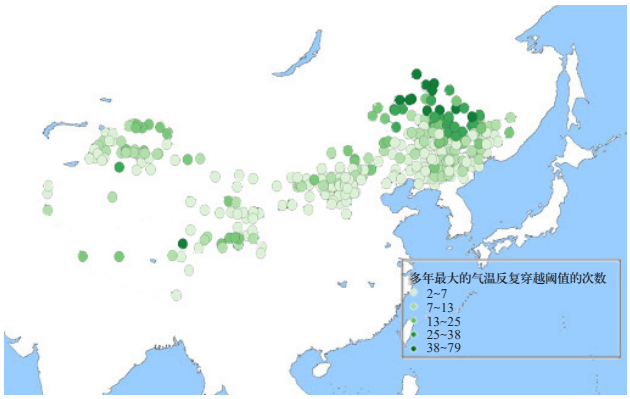

图 4　气温反复穿越阈值次数的多年最大值

Fig. 4　Multi-year maximum of the times that temperature repeatedly crossed the threshold

4）低温影响的国土面积。

全国范围内低温影响的国土面积的频率分布直方图如图5（a）所示，去掉左侧第一个柱所得到的红色直方图如图5（b）所示，以更清晰地看到尾部分布特点。总体上，低温影响的国土面积呈现尖峰长尾的特点，69%的时段全国不受低温影响，95%的情形下全国受低温影响的国土面积小于42.8万km^2，最严重情况下，14.9%的国土面积日最低气温低于–30 ℃。

以面积与频率的乘积为纵坐标，作为遭遇低温天气风险的度量指标，并绘制其关于面积的柱形图，如图 6（a）所示，去掉第一个柱子的结果如图6（b）所示。将图6（b）与图5（b）对比，呈现先增长后下降的趋势，说明虽然大空间影响范围的低温事件发生频率较低，但其造成影响大，不可忽视，尤其是影响面积介于30万~50万km^{2}的低温天气。

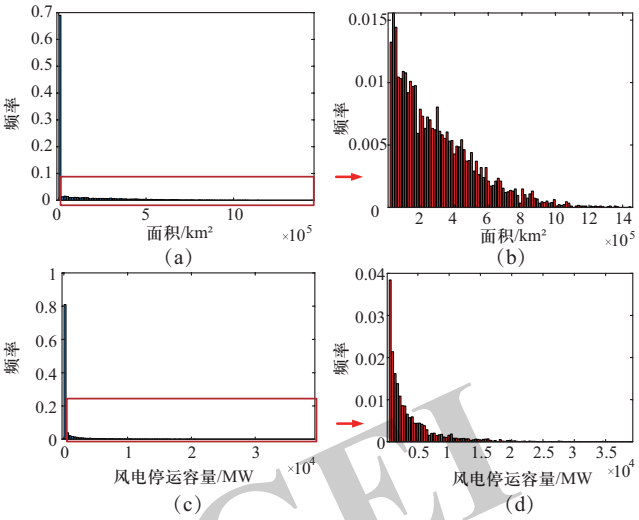

图 5　全国范围内低温影响的国土面积及风电停运容量的频率分布直方图

Fig. 5　Frequency distribution histograms of affected area and wind power outage capacity

由图7所示的多年平均低温影响国土面积在不同日期下的情况，与图2相比，说明12月和2月虽然低温事件发生频率高，但影响的空间范围相较于1月大幅缩减。

5）风电停运容量。

全国范围内低温影响的风电停运容量的频率分布直方图如图 5（c）所示，其中图 5（d）红色直方图为蓝色直方图去掉左侧第一个柱的结果，以更清晰地看到尾部分布特点。总体上，风电停运容量的分布呈

JGEI

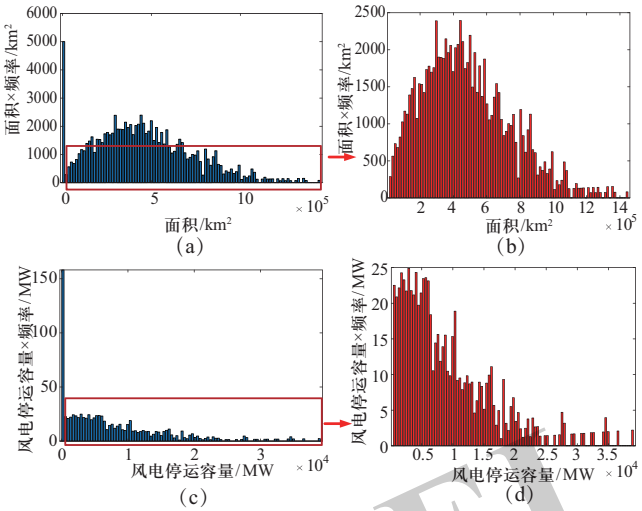

图 6　全国范围内低温影响的国土面积及风电停运容量与频率的乘积的分布图

Fig. 6　Distribution histograms of affected area and outage capability nationwide multiplied by frequency

现尖峰长尾的特点，95%的情形下风电停运容量小于2 930.4 MW，但最严重情形下18.39%的风电装机容量面临停运。

将图 5（b）与图 5（d）作对比，发现小风电停运容量对应的发生频率增加，频率分布直方图衰减趋势比受影响国土面积的衰减趋势更明显。这一现象的发生与风电场的空间聚集分布有关，虽然某些低温过程影响空间范围较大，但影响的主要风电聚集区相同，则风电停运容量估算值将与小空间影响范围相近。按省份风电停运容量的频率分布直方图和停运容量与频率的乘积随停运容量的柱形图可见附图A2和附图A3。相比附图A1，附图A2至附图A4缺少对应四川和北京的数据，主要原因是这两地的风电机组未落入低温影响区域。

以停运容量与频率的乘积作为纵坐标，作为风电停运容量风险的度量指标，并绘制其关于停运容量的柱形图，如图6（c）所示，其中图6（d）为图6（c）去掉左侧第一个柱的结果。将图6（d）与图5（d）对比，停运容量与频率的乘积随停运容量的增加衰减缓慢。说明大停运容量低温过程尽管发生频率低，但其造成的风险不可忽视，需要有对全国约7%（对应分析例中的15 GW）装机容量风电同时遭遇低温停运的应对能力。

全国范围不同日期下的最大停运容量如图8所示。1月更容易发生大容量风电停运事件。相比图7，该分布呈现左偏，说明尽管1月中旬受影响国土面积更大，但1月下旬影响风电富集区的面积更大，全国受低温影响的风电容量偏大。按省份多年平均停运容量随日期的分布结果可见附图A4。

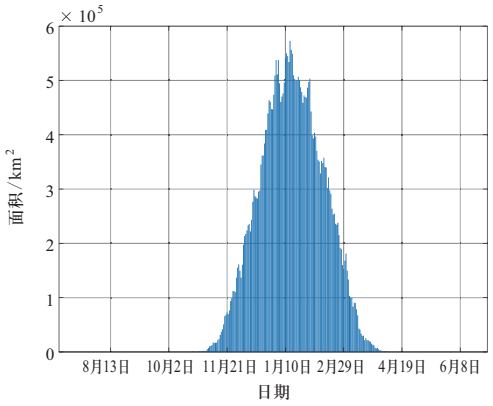

图 7　不同日期下多年平均受低温影响国土面积

Fig. 7　The average affected area for many years under different dates

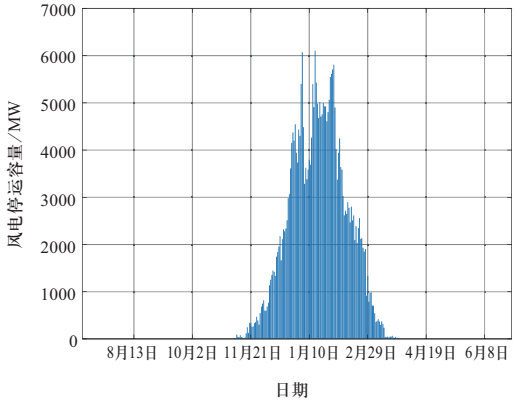

图 8　全国范围不同日期下多年平均风电停运容量

Fig. 8　The average wind power outage capacity for many years under different dates

由于调度管理体系大致根据行政区划分，有必要分析不同省份受低温影响的风电停运规律。根据各省低温事件的发生频率，已知共14个省份有气象站观测到日最低气温低于−30 ℃，但其中北京和四川的风电不分布在受低温影响气象站所在区域，因此评估的停运容量为0。提取出各省停运容量占比的平均值和最大值列于表1中，可以看出，大容量冲击是低温影响的重要特点。

表 1　各受影响省份风电停运容量占全省总装机容量比例的平均值和最大值

Table 1　Average and maximum values of wind outage capacity ratio for low-temperature affected provinces

省份	平均风电停运容量占比/%	最大风电停运容量占比/%
甘肃	0.20	33.08
河北	9.90	48.63

JGEI

续表

省份	平均风电停运容量占比/%	最大风电停运容量占比/%
黑龙江	11.10	96.93
吉林	3.69	99.89
辽宁	0.47	65.65
内蒙古	10.58	50.22
陕西	0.15	29.89
山西	2.89	32.81
新疆	7.32	64.69
青海	0.71	36.51
宁夏	0.035	11.62
西藏	0.86	100（只有1个风电场）

4 总结与展望

近年来，寒潮低温天气对风力发电的影响受到广泛关注，但是鲜有对低于风电机组运行温度下限的低温天气及其影响进行统计分析的研究。本文基于1970—2017年全国气象站点实测气温数据和国网经营范围内风电场的布局数据，以低温型机组运行温度下限为阈值，统计分析了低温事件发生频率、单次低温事件的持续时间、气温反复穿越阈值的次数、低温影响的国土面积和风电停运容量等指标的时空变化规律。主要结论如下。

1）低于−30 ℃的低温事件从整个时间轴上看是小概率事件，但在北方许多省份几乎年年发生。全国范围来看，12月至次年2月是低温事件的高发期，受影响范围较大，停运容量也较大。

2）由于寒潮天气影响往往跨越很大的空间尺度，不需要空间分辨率非常高的气温预测量，即可以对风电停运容量有较为准确的估计，说明在实际工程中，只要能够把低温触发风电机组停运的动作逻辑考虑到常规风电功率预测中，就能够实现风电机组低温停运的容量预警。

3）由于寒潮天气影响跨度大，而风电场空间分布聚集性强，一旦气温低于最低运行温度，总停运容量往往较大。

4）气温低于−30 ℃的持续时间一般只持续数小时，在这段时间内风电可能遭遇大规模脱网而后并网的过程，快速的功率变化可能给电力平衡带来极大冲击。

5）如果不考虑人为干预，只要气温高于风电机组最低运行温度，风电机组即并网发电，则电网可能遭遇几次到数十次的反复脱网和并网；而若考虑不允许风电机组在可能反复脱网和并网期间的恢复发电，则需要考虑连续数天至多个月的风电低出力带来的电量平衡问题。

6）大容量停运事件的发生频率虽然相比小容量停运事件的发生频率低很多，但从电网运行风险的角度二者可比，大影响小概率的低温天气过程不可忽视。

7）停运容量的尾部分布衰减微弱，数年一遇的常态低温事件可能同数十年一遇的低温事件对风电发电能力的影响差别不大。

随着可再生能源发电容量和电量占比的进一步提高，将低温等极端天气纳入未来高比例可再生能源电力系统的规划和运行已成为一项紧迫和重要的工作。在规划层面，风电场的布局、风电机组的选型、系统调峰容量的配置等问题，以及在运行层面，可再生能源发电的功率预测、日前调度计划的安排等都需要考虑低温因素的影响。

参考文献

[1] 鲁宗相，李昊，乔颖. 从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析[J]. 全球能源互联网，2021，4(1)：12-18.
LU Zongxiang, LI Hao, QIAO Ying. Morphological evolution of power systems with high share of renewable energy generations from the perspective of flexibility balance[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 12-18(in Chinese).

[2] 全球能源互联网发展合作组织.《中国2030年能源电力发展规划研究及2060年展望》发布版PPT [EB/OL]. (2021-03-18) [2021-07-12]. https://www.gei-journal.com/cn/contents/4/1613.html.

[3] 中国电力网. 风回三北 深度解析2020年全国六大区域风电装机布局[EB/OL]. (2021-04-15) [2021-07-12]. http://www.chinapower.com.cn/flfd/hyyw/20210415/66113.html.

[4] 赵静波，张思聪，廖诗武. 美国加州2020年8月中旬停电事故分析及思考[J]. 电力工程技术，2020，39(6)：52-57.
ZHAO Jingbo, ZHANG Sicong, LIAO Shiwu. Analysis and reflection for the rotating outages in mid-August 2020 in CaliforniaFull text replacement[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 52-57(in Chinese).

[5] SU K, JIANG L P, LIU J Z. Power source-power grid coordinated typhoon defense strategy based on multiagent dynamic game theory[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(3): 285-294.

[6] 景锐，韩晖，林剑艺. 计及台风极端天气影响的城市能源

JGEI

规划[J]. 全球能源互联网，2021，4(2)：178-187.
JING Rui, HAN Hui, LIN Jianyi. Urban energy planning considering impacts of typhoon extreme weather[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(2): 178-187(in Chinese).

[7] ERCOT. Review of February 2021 extreme cold weather event – ERCOT presentation[EB/OL].(2021-02-24) [2021-07-12]. http://www.ercot.com/content/wcm/key_documents_lists/225373/2.2_REVISED_ERCOT_Presentation.pdf.

[8] 严道波，文劲宇，杜治，等. 2021年得州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. 电力系统保护与控制，2021，49(9)：121-128.
YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 121-128(in Chinese).

[9] International Energy Agency. IEA wind TCP recommended practice 13 2nd edition: wind energy in cold climates[R]. Paris: IEA, 2017.

[10] 王浩，王洪涛，王春义. 计及冰雪天气影响的风电场短期出力模型[J]. 电力系统保护与控制，2016，44(8)：107-114.
WANG Hao, WANG Hongtao, WANG Chunyi. A short-term output model of wind farm considering rain-snow-ice weather[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 107-114(in Chinese).

[11] 明阳智能. 风机产品介绍页[EB/OL]. [2021-07-12].http://www.myse.com.cn/cpyjs/index.aspx?lcid=energy.

[12] National Weather Service. Icing Hazards [EB/OL] . [2021-07-12].https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/icing_stuff/icing/icing.htm.

[13] 王翠花，李雄，缪启龙. 中国近50年来日最低气温变化特征研究[J]. 地理科学，2003，23(4)：441-447.
WANG Cuihua, LI Xiong, MIAO Qilong. Variety characteristics of daily minimum air temperature in China in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(4): 441-447(in Chinese).

[14] 郭志梅，缪启龙，李雄. 中国北方地区近50年来气温变化特征的研究[J]. 地理科学，2005，25(4)：448-454
GUO Zhimei, MIAO Qilong, LI Xiong. Variation characteristics of temperature over Northern China in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(4): 448-454(in Chinese)

[15] 班军梅，缪启龙，李雄. 西南地区近50年来气温变化特征研究[J]. 长江流域资源与环境，2006，15(3)：346-351.
BAN Junmei, MIAO Qilong, LI Xiong. Analysis of characteristics of temperature variations in southwest China in recent 50 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(3): 346-351(in Chinese).

[16] 吴佳，高学杰，石英. 中国20年一遇气温和降水极值变化的高分辨率模拟[J]. 气候变化研究进展，2012，8(4)：243-249.
WU Jia, GAO Xuejie, SHI Ying. Changes of 20-year return temperature and precipitation extremes over China simulated by RegCM3[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2012, 8(4): 243-249(in Chinese).

[17] 李洋，杨赤. 中国区域气候极值重现水平的非平稳模型及趋势分析[J]. 气候与环境研究，2015，20(3)：347-355.
LI Yang, YANG Chi. Non-stationary modeling and trend analysis of return levels of climate extremes in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2015, 20(3): 347-355(in Chinese).

[18] 马文通，朱蓉，李凯，等. 哈密东南部风电项目极端气温导致的发电量折减与不确定性分析[J]. 风能，2014(2)：84-88.
MA Wentong, ZHU Rong, LI Kai, et al. Analysis of production loss and uncertainty due to extreme temperature in southeastern Hami area wind power project[J]. Wind Energy, 2014(2): 84-88(in Chinese).

[19] 李亚滨. 低温对黑龙江省风电工程影响初探[C]//第28届中国气象学会年会论文集. 厦门，2011：974-981.

[20] 国家能源局. 2020年一季度风电并网运行情况. [EB/OL]. (2020-05-11) [2021-07-12].http://www.nea.gov.cn/2020-05/11/c_139047892.htm.

收稿日期：2021-07-21；修回日期：2021-10-20。

孙荣富

作者简介：

孙荣富（1982），男，博士，研究方向为风电调度运行、风电功率预测和电力系统运行可靠性分析，E-mail：hcxsrf@163.com。

乔颖（1981），女，博士，副教授，研究方向为新能源、分布式发电、电力系统安全与控制。通信作者，E-mail：qiaoying@tsinghua.edu.cn。

（责任编辑　张宇）

JGEI

附录A　按省份的低温事件及风电停运统计

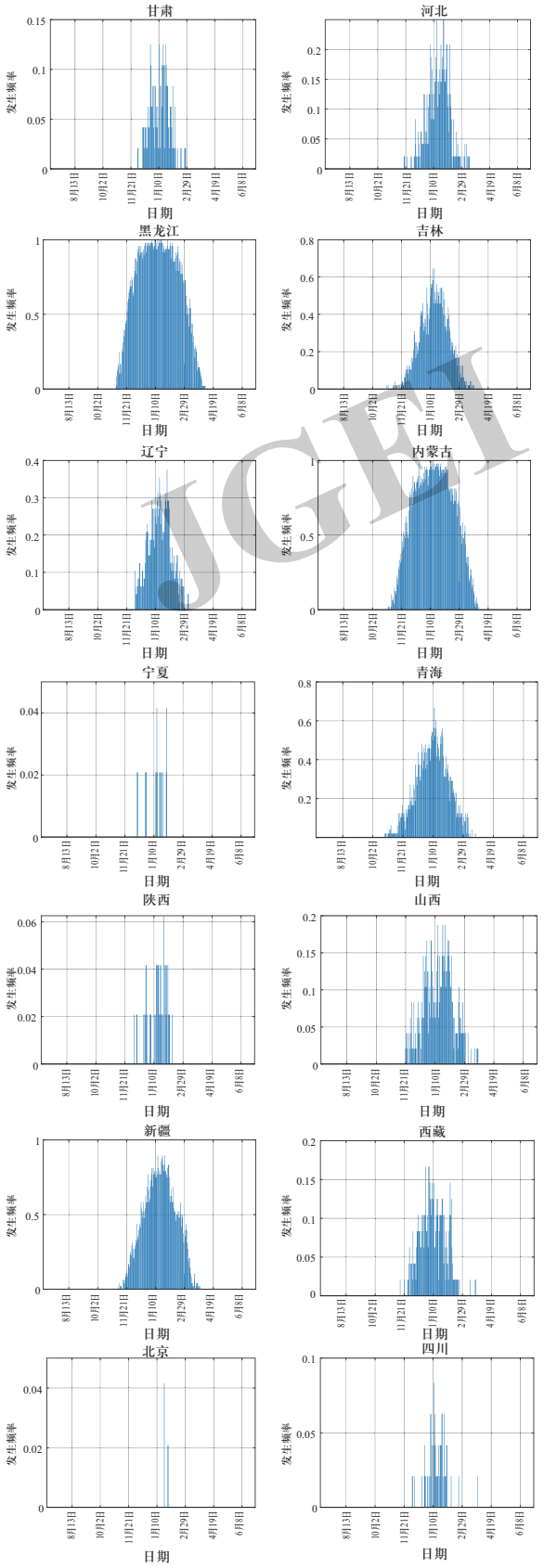

图 A1　有低温记录省份的不同日期低温事件发生频率统计结果

Fig. A1　Occurrence frequency of low-temperature events on different dates in provinces with low temperature records

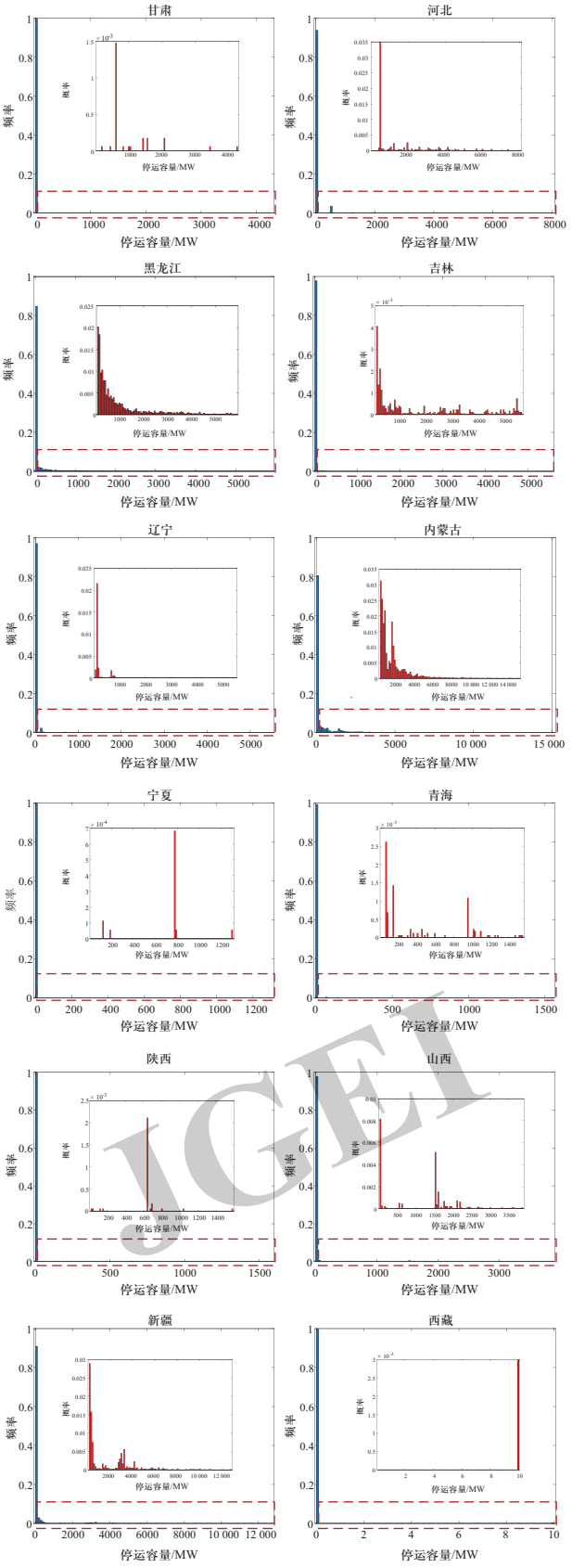

图 A2　按省份风电停运容量的频率分布直方图

Fig. A2　Frequency distribution histograms of wind power outage capacity by province

JGEI

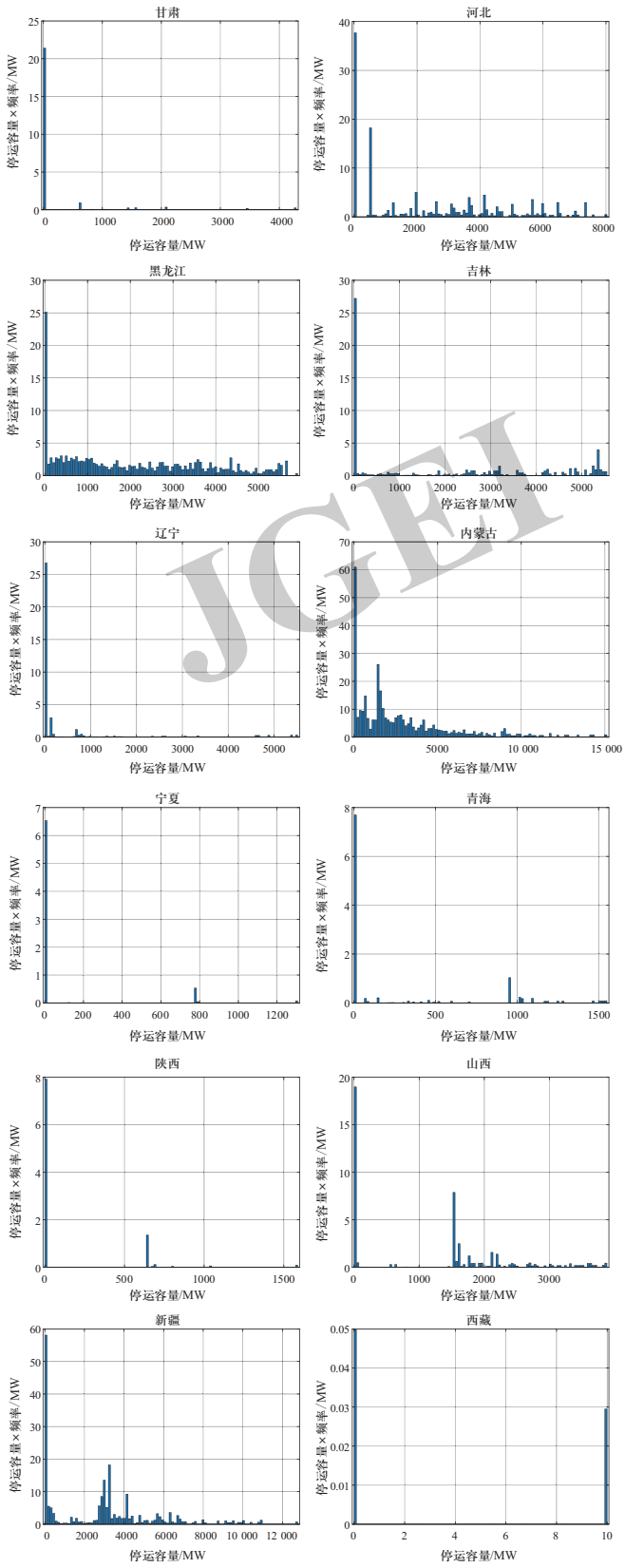

图 A3 按省份风电停运容量风险随停运容量分布图

Fig. A3 Relationship of wind power outage capacity risk with outage capacity by province

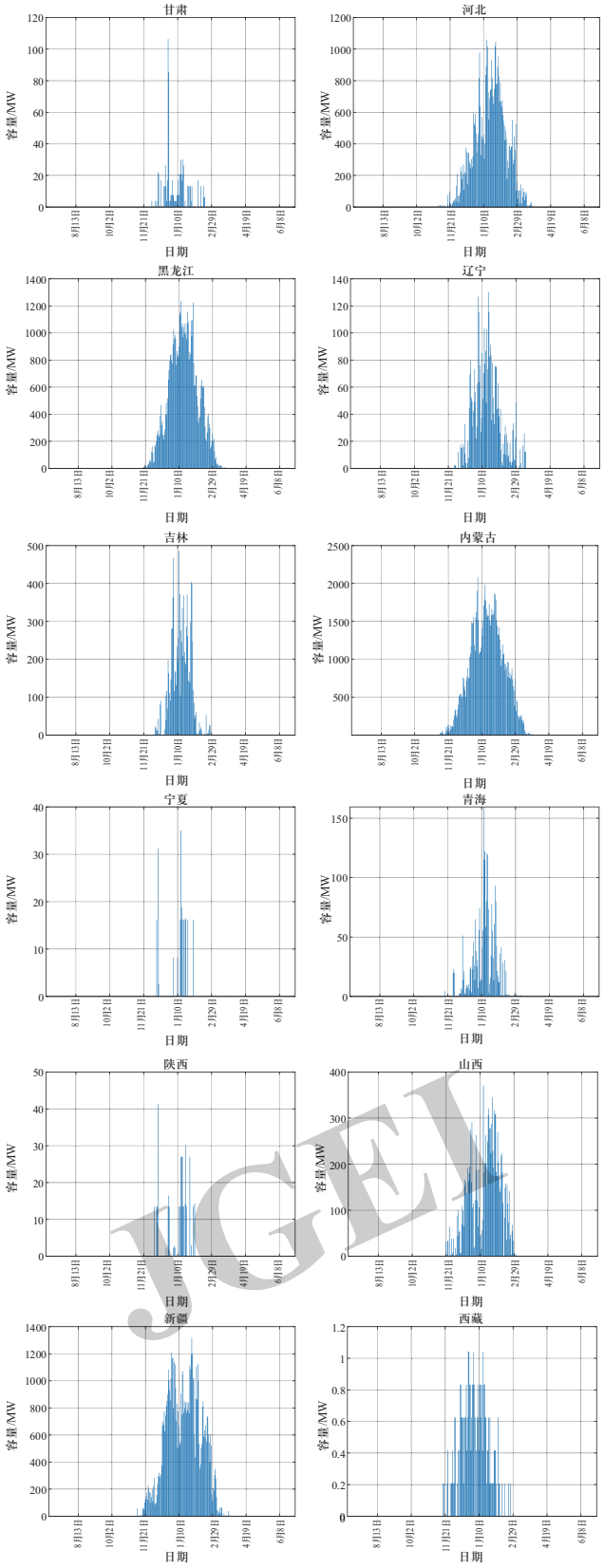

图 A4 按省份历史多年不同日期风电停运容量最大值

Fig. A4 Maximum wind power outage capacity according to different dates in provincial history

JGEI