

李春晖,霍治国,孔瑞,等,2023.南方三个省电线积冰时空分布特征[J].气象,49(12):1509-1520. Li C H, Huo Z G, Kong R, et al, 2023. Spatio-temporal distribution of wire icing in three southern provinces[J]. Meteor Mon, 49(12): 1509-1520 (in Chinese).

## 南方三个省电线积冰时空分布特征<sup>\*</sup>

李春晖<sup>1,2</sup> 霍治国<sup>1,3</sup> 孔 瑞<sup>1,4</sup> 江梦圆<sup>1</sup> 张海燕<sup>1</sup> 毛红丹<sup>5</sup> 宋艳玲<sup>1</sup>

1 中国气象科学研究院,北京 100081

2 江西省农业气象中心,南昌 330096

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

4 中国地质大学,武汉 430074

5 气象出版社,北京 100081

**提 要:** 基于 1961—2019 年贵州、湖南、江西 191 个气象站点电线积冰资料,统计分析了研究区域内电线积冰的日数、标准冰厚极值、最大连续积冰日数的时空分布特征以及电线积冰起止日的时间变化;构建电线积冰风险指数,评估了出现电线积冰的风险。结果表明:电线积冰日数整体呈下降趋势,在 20 世纪 80 年代达到最大值,月分布以 1 月出现最多,电线积冰以雨淞型积冰为主。标准冰厚极值集中在 20~50 mm,极值大部分出现在湖南;大部分站点极值出现在 2011—2019 年。最大连续积冰日数集中在 5~15 d,整体上贵州的最大连续积冰日数高于湖南和江西。电线积冰的起始日的年际变化整体上呈提前趋势,而终止日整体上呈推迟趋势。电线积冰风险指数年变化整体上呈减小的趋势;电线积冰的高风险区域主要位于贵州中西部、湖南中部和江西北部,风险指数大于 0.6。

**关键词:** 电线积冰日数,标准冰厚,连续积冰日数,时空分布,风险指数

**中图分类号:** P49, P426

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.060601

## Spatio-Temporal Distribution of Wire Icing in Three Southern Provinces

LI Chunhui<sup>1,2</sup> HUO Zhiguo<sup>1,3</sup> KONG Rui<sup>1,4</sup> JIANG Mengyuan<sup>1</sup>  
ZHANG Haiyan<sup>1</sup> MAO Hongdan<sup>5</sup> SONG Yanling<sup>1</sup>

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Jiangxi Agricultural Meteorological Center, Nanchang 330096

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,  
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

4 China University of Geosciences, Wuhan 430074

5 China Meteorological Press, Beijing 100081

**Abstract:** Based on daily observation data of wire icing of 191 meteorological stations in Guizhou, Hunan and Jiangxi provinces from 1961 to 2019, the number of wire icing days, the extreme values of standard ice thickness, the maximum consecutive icing days, and the beginning and ending dates of wire icing in the study area are calculated. The wire icing risk indicator is constructed to evaluate the risk of wire icing. The results show that the number of wire icing days shows a slight downward trend on the whole in the past 60 years, and it reached the maximum value in the 1980s. Wire icing occurs most in January. The extreme

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(2018YFC1505605)资助

2022 年 4 月 24 日收稿; 2023 年 6 月 6 日收修定稿

第一作者:李春晖,主要从事灾害风险评估研究. E-mail:674139482@qq.com

通信作者:霍治国,主要从事农业气象灾害风险评估等研究. E-mail:huozg@cma.gov.cn

values of standard ice thickness are concentrated in 20—50 mm, and most of the extreme values are found in Hunan. The interdecadal distribution is extremely uneven, the most of the extreme values are seen in 2011—2019. The maximum consecutive icing days are concentrated in 5—15 days. On the whole, the maximum consecutive icing days in Guizhou are more than in Hunan and Jiangxi. The beginning date of wire icing tends to be advanced in fluctuation, but the ending date tends to be postponed in fluctuation. The annual change of the wire icing risk indicator shows a decreasing trend. The high-risk areas for wire icing are mainly located in central and western Guizhou, central Hunan and northern Jiangxi, with a wire icing risk indicator greater than 0.6.

**Key words:** wire icing days, standard ice thickness, consecutive icing days, spatio-temporal distribution, risk indicator

## 引 言

在全球气候变化的背景下,全球范围内极端高温事件的频次增加,而极端冷事件减少,但其变化更为剧烈(Manton et al, 2001; Alexander et al, 2006; 赵珊珊等, 2010; IPCC, 2021; 吴嘉蕙和任荣彩, 2021; 马锋敏等, 2022; 周佰铨和翟盘茂, 2023), 给农业、林业、交通运输、电力输送以及人民生活的各方面都带来了巨大影响。电力是一项关乎民生的基础产业,近年来随着电网规模的扩大,极端低温事件形成的灾害性天气对电网的安全运行造成了很大的影响(霍林等, 2017)。电线积冰是一种自然灾害,是指雨淞、雾淞凝附在导线上或湿雪冻结在导线上的现象(中国气象局, 2003), 电力、通讯部门称之为电线覆冰。电线积冰严重时可能引发线路过负载事故、相邻不均匀覆冰或不同期脱冰事故、绝缘子串冰闪事故以及覆冰导线舞动事故(蒋兴良和易辉, 2002; 张仕平, 2019), 对人们的生产生活造成极大影响,同时也给社会经济发展带来一定冲击。

我国电线积冰以雾淞型积冰和雨淞型积冰为主,且北方地区多出现雾淞型积冰,南方地区多出现雨淞型积冰,其中雨淞型电线积冰对电网的威胁最大(霍治国等, 2021)。雨淞型积冰由冻雨导致,冻雨在我国发生频率最高的地区是贵州省,湖南省、江西省和湖北省次之(朱乾根等, 2007; 李登文等, 2009), 所以本文选取典型雨淞型区的贵州、湖南、江西三个省份作为研究区域。

国内外学者对电线积冰的研究主要包括积冰特征、成因分析、影响因子、预报模型以及对冰冻雨雪天气的具体过程分析等方面。其中针对电线积冰的特征研究很多,多基于省级尺度,包括电线积冰日数的年际变化、年代际变化、月变化、主要类型以及空

间分布(顾光芹等, 2012; 程肖侠和方建刚, 2013; 周悦等, 2013; 武辉芹等, 2017; 覃武等, 2019; 孙秀博等, 2021); 电线积冰直径、重量、厚度以及标准冰厚的特征(李元鹏等, 2010; 闵诗淳和王宝书, 2010; 许艳等, 2013; 张婷, 2015); 利用概率分布函数估算 30、50、100 年的重现期标准冰厚并进行冰区划分(龚强等, 2010; 庞文保等, 2012; 刘赫男等, 2014; 唐亚平等, 2015; 张小军等, 2021; 李清华等, 2022)。对于贵州、湖南、江西三个省份的研究多是对冰冻天气的特征分析(王怀清等, 2009; 郑劲光等, 2009; 陈百炼等, 2014; 肖平等, 2018), 而对于电线积冰的时空分布特征研究较少, 其中肖雯等(2022)统计了江西省电线积冰出现次数、类型、总积冰日数和雨淞型积冰日数的变化特征; 赵文灿等(2018)分区分析了电线积冰日数的时空分布特征及雨淞型电线结冰的温度层结特征; 霍林等(2017)分析了湖南冰冻天气日数、电线积冰厚度的空间特征及冰冻灾害对电力的影响; 廖玉芳等(2011)从雨淞天气日数、初终日期、最长持续时间和电线积冰标准冰厚等方面分析了时空分布特征。上述研究较好地揭示了易发生电线积冰的时期以及区域, 对开展电线积冰的防御工作具有重要意义, 但电线积冰的冰区划分都只涉及了积冰厚度。本文在电线积冰时空分布特征分析的基础上, 以电线积冰日数平均值、持续日数和过程最大标准冰厚三个要素构建电线积冰风险指数, 同时考虑电线积冰的发生频率和强度, 评估了电线积冰出现的风险。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料来源

电线积冰资料来源于全国电线结冰日值数据

集,对所有原始数据进行质量控制码筛选,并剔除在历史出现积冰时段(10月至次年4月)出现缺测年份的数据,最后得到1961—2019年贵州、湖南和江西三个省共191个气象站点历史出现积冰时段具有完整观测的电线结冰逐日观测数据,观测项目为:东西向和南北向的电线积冰类型、重量、直径、厚度,以及积冰发生时的气温、风向、风速,气象站点的分布如图1所示;其中,贵州、湖南和江西各有85、88和18个气象站点。由于本文使用的是研究时段内具有完整观测记录的数据,而江西80%的气象站点存在缺测,所以江西的气象站点较贵州和湖南稀疏。

本文将东西向和南北向积冰重量、直径、厚度其中一列出现大于零或出现微冰记为一个电线积冰日,选取南北向和东西向中的积冰重量最大值作为当日电线积冰重量,根据电线积冰重量计算标准冰厚。

## 1.2 方法

### 1.2.1 曼-肯德尔(Mann-Kendall)检验

曼-肯德尔(Mann-Kendall, M-K)检验是一种非参数方法(魏凤英,2007),常用于突变检验,其可以明确变化趋势,确定突变开始的时间和突变范围。覃武等(2019)、章开美等(2020)的研究已应用M-K检验方法检测积冰日数序列的变化趋势和突变情况,具有较好的适用性。本文利用M-K检验方法来确定电线积冰日数和电线积冰起止日的变化趋势及突变开始时间。

### 1.2.2 标准冰厚计算方法

研究区域内电线积冰的类型主要有雨淞型、雾淞型和混合淞型积冰三类,由于三类电线积冰的密度各不相同,需要统一转换为标准冰厚后才能计算和比较。标准冰厚是指均匀裹在导线上密度为 $0.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的冰层厚度,本文选取根据电线积冰重

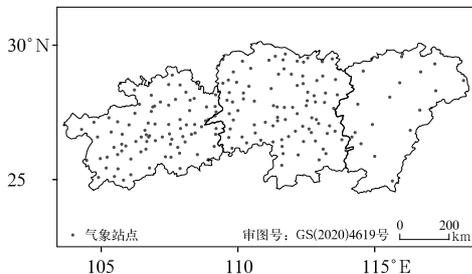


图1 研究区域内气象站点分布

Fig.1 Distribution of weather stations in the study area

量计算标准冰厚的换算公式(中国气象局,2017):

$$B_0 = \sqrt{\frac{W}{0.9\pi L} + r^2} - r \quad (1)$$

式中: $B_0$ 为标准冰厚(单位:mm); $W$ 为积冰质量(单位:g); $L$ 为导线长度(单位:m); $r$ 为导线半径(单位:mm),2011年之前为2.0 mm,2011年开始为13.4 mm。

由于2011年之前气象站用于观测电线积冰的导线直径为4.0 mm,2011年开始改为26.8 mm,为了便于比较,对2011年之前的标准冰厚进行线径订正,线径订正和线径订正系数的计算公式分别见式(2)和式(3)(国家能源局,2012):

$$B = K_\varphi B_0 \quad (2)$$

$$K_\varphi = 1 - 0.126 \ln(\varphi/\varphi_0) \quad (3)$$

式中: $B$ 为线径订正后的标准冰厚(单位:mm), $K_\varphi$ 为线径订正系数, $B_0$ 为标准冰厚(单位:mm); $\varphi$ 为标准电线直径(26.8 mm), $\varphi_0$ 为2011年之前的电线直径(4.0 mm)。下文中用到的标准冰厚统一为线径订正后的标准冰厚( $B$ )。

### 1.2.3 归一化方法

为便于不同单位或量级的指标进行比较和加权,对原始数据进行归一化处理,去除数据的单位限制,将其转化为无量纲的纯数据,并统一映射到 $[0,1]$ 区间上,计算公式如下:

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

式中: $x'$ 为经过归一化后的数据, $x$ 为原始数据序列, $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别为原始数据序列的最小值和最大值。

### 1.2.4 电线积冰风险指数

为综合评判研究区域内出现电线积冰的风险,本研究综合考虑电线积冰的发生频率和强度,以电线积冰日数平均值、电线积冰过程的持续日数和电线积冰过程的最大标准冰厚三个要素构建电线积冰风险指数( $I$ ):

$$I = I'_1 + I'_2 + I'_3 \quad (5)$$

式中: $I$ 为电线积冰风险指数,积冰日数平均值( $I_1$ )表示电线积冰的频率,持续日数指数( $I_2$ )和标准冰厚指数( $I_3$ )均表示电线积冰的强度,利用式(4)中的归一化方法对 $I_1$ 、 $I_2$ 和 $I_3$ 进行归一化处理,得到 $I'_1$ 、 $I'_2$ 和 $I'_3$ 。

$I_1$ 由计算该年或该站点的平均积冰日数得到, $I_2$ 和 $I_3$ 的计算公式如下:

$$I_2 = \sum_{i=1}^n t_i P_i \quad (6)$$

$$I_3 = \sum_{j=1}^m D_j P_j \quad (7)$$

式中:  $t_i$  为持续日数,  $P_i$  为持续日数  $t_i$  的电线积冰过程的发生频率; 统计电线积冰过程的最大标准冰厚, 根据《电线积冰气象风险等级》(中国气象局, 2017) 将标准冰厚划分为 0~5、5~10、10~15 mm 以及  $\geq 15$  mm 四级,  $D_j$  为等级数, 从低到高依次赋值为 1、2、3、4,  $P_j$  为等级  $D_j$  的电线积冰过程的发生频率。

## 2 结果与分析

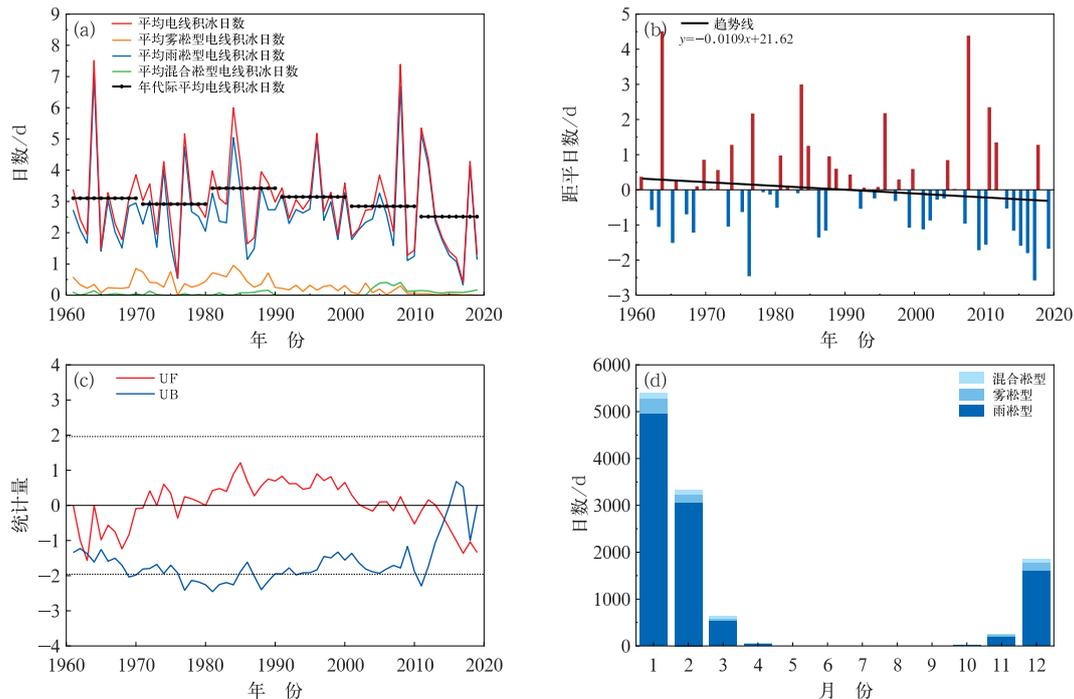
### 2.1 电线积冰日数时空分布

#### 2.1.1 电线积冰日数时间变化特征

基于 1961—2019 年电线积冰的逐日观测数据, 分别统计逐年所有站点的三种类型(雨淞型、雾淞型、混合淞型)电线积冰总日数及完整站点数, 计算

得到逐年平均各类型电线积冰日数, 平均电线积冰日数则为三类电线积冰日数相加之和; 进一步计算各年代际的平均电线积冰日数。计算平均电线积冰日数距平值, 根据最小二乘法得到一元线性趋势; 同时使用 M-K 检验对平均电线积冰日数进行检验; 分别统计逐月所有站点的各类型电线积冰总日数。

如图 2 所示, 贵州、湖南、江西 59 年来各类型电线积冰日数呈现波动性变化, 年际间波动幅度较大; 其中, 各类积冰出现日数为雨淞型积冰远大于雾淞型和混合淞型, 2004 年之前雾淞型积冰略大于混合淞型, 2004 年之后混合淞型积冰略大于雾淞型。电线积冰日数的多年平均值约为 3.0 d, 平均电线积冰日数最多的年份为 1964 年, 约出现 7.5 d; 2008 年次之, 约为 7.4 d; 最少为 2017 年, 仅出现 0.4 d。雨淞型积冰日数的多年平均值约为 2.6 d, 平均雨淞型积冰日数最多的年份为 1964 年, 约出现 7.0 d; 2008 年次之, 约为 6.7 d; 最少为 2017 年, 仅出现 0.3 d。雾淞型积冰日数的多年平均值约为 0.3 d, 平均雾淞型积冰日数最多的年份为 1984 年, 约出现 1.0 d; 最少为 1976 年和 2019 年两年, 均没有出现。混合淞



注: 图 c 中虚线为  $\alpha = 0.05$  显著性水平临界值。

图 2 1961—2019 年贵州、湖南、江西积冰日数的 (a) 逐年及年代际变化,

(b) 逐年距平变化, (c) M-K 检验结果, (d) 月变化

Fig. 2 Change of wire icing days in Guizhou, Hunan and Jiangxi from 1961 to 2019

(a) annual and interdecadal change, (b) annual anomaly change, (c) M-K test result, (d) monthly change

型积冰日数的多年平均值约为 0.07 d, 平均混合凇型积冰日数最多的年份为 2006 年和 2008 年, 均约为 0.4 d, 最少为没有出现, 59 年里 有 26 年混合凇型积冰日数为 0.0 d, 占 44%。

从电线积冰日数的年代际变化来看(图 2a), 年代际间电线积冰日数变化不大, 20 世纪 60—80 年代日数有略微的增加, 80 年代后呈下降趋势; 80 年代电线积冰出现日数最多, 年均约为 3.4 d, 21 世纪 10 年代出现最少, 年均约为 2.5 d。

从电线积冰日数距平结果看(图 2b), 59 年中呈现正、负相间的分布型, 正值和负值出现的年份大约各占一半; 趋势线表明整体上呈现略微减少的趋势, 与冰冻天气日数的变化趋势基本一致(叶茵等, 2007; 郑劲光等, 2009; 王怀清等, 2009; 肖平等, 2018), 倾向率约为  $-0.1 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

M-K 检验结果和距平变化基本一致(图 2c), 1961—1970 年电线积冰日数呈减少趋势, 1980—2002 年则呈增加趋势, 而在 2013 年之后又呈减少趋势; 根据 UF 和 UB 曲线交点的位置, 确定电线积冰日数在 2014 年发生突变。

从电线积冰日数月变化来看(图 2d), 电线积冰现象在 10 月至次年 4 月均有发生, 主要出现在冬季(12 月、1 月和 2 月), 其中 1 月最多, 占全年的 47%, 4 月和 10 月出现的很少; 雨凇型积冰占比最大, 远远大于雾凇型和混合凇型; 11 月至次年 2 月雾凇型略大于混合凇型, 而 3 月和 4 月混合凇型占比略大于雾凇型。

### 2.1.2 电线积冰日数空间分布特征

分别统计所有站点电线积冰总日数及出现年数, 计算其平均值, 使用 ArcGIS 中的 IDW 方法进行插值, 得到各站点平均电线积冰日数的空间分布; 并进一步统计各年代际具有整 5 年及以上电线积冰数据的气象站点, 计算各年代际各站点的平均电线积冰日数, 得到各年代际平均电线积冰日数的空间分布。在气象站点分布较稀疏的地区, 使用 IDW 方法可以补充某些缺测的站点数据; 在气象站点分布较密的地区, IDW 插值也能反映出高值和低值的区别, 得到的空间分布也更接近于真实情况, 所以 IDW 插值方法具有较好的适用性。

图 3 结果表明, 研究区域内约 45% 的地区年平均电线积冰日数较小, 为 0~1 d, 主要分布在贵州东

北部、湖南北部和西南部以及江西中部和南部, 最小年平均电线积冰日数仅约为 0.09 d, 出现在湖南龙山。只有约 4% 的地区年平均电线积冰日数大于 10 d, 所出现范围很小, 主要分布在贵州西部、湖南中部南岳以及江西北部庐山附近地区。电线积冰日数高值区主要分布在贵州西部的威宁、大方, 贵州中部的开阳, 湖南中部的南岳以及江西北部的庐山, 这些地区的年平均电线积冰日数在 17~34 d, 其中威宁日数最多(约为 34 d), 南岳和庐山次之, 分别约为 30 d 和 25 d。贵州电线积冰日数的分布规律与贵州冻雨中心(杜小玲等, 2010)及冻雨的分布规律(严小冬等, 2009)基本一致; 湖南与雨凇天气日数的分布基本一致(廖玉芳等, 2011); 江西与雨凇天气日数的分布略有不同, 雨凇天气在江西中北部区域出现较多(王怀清等, 2009)。

造成积冰形成的最重要的两个条件分别是冷空气和充足的水汽条件, 电线积冰的出现与地形地貌有一定的关系, 地形地貌主要影响的是冷空气的水平分布(霍治国等, 2021)。满足这两个条件时, 形成雾凇或者是雨凇(即冻雨)则与大气的垂直结构(如逆温层、三层结构等)和气象要素场的分布有关。贵州位于云贵高原东部, 海拔较高, 平均为 1100 m 左右, 积冰日数也比湖南和江西多; 贵州地势西高东低, 中部还有多处盆地, 电线积冰日数呈中西部多、东北部少的特点。湖南整体地形是由东南西三个方向向北部倾斜开口的马蹄形, 南岳因海拔较高, 电线积冰日数多, 其他地区日数均较小。江西省东西南三面有多座山岭环绕, 呈向北开口的地形, 由于高海拔山区对冷空气的阻挡作用, 冷空气在北部聚集, 同时由于江西北部的庐山海拔高, 也更容易形成电线积冰, 而江西中部和南部除了受海拔影响以外, 还受纬度影响(赵文灿等, 2018), 因此积冰较少, 所以形成了北部积冰日数多而其余地区均较少的特点。

从图 4 中可以看出, 三个省的年代际平均电线积冰日数表现出不同的变化特征。贵州的平均电线积冰日数随年代际变化而增加, 但贵州东北部积冰日数则减少; 电线积冰日数为 3~10 d 的范围向贵州的中部、西部和南部缩小; 大于 10 d 和大于 20 d 的范围从西向东扩大。湖南的平均电线积冰日数随年代际变化而减少, 其中湖南北部的电线积冰日数从 20 世纪 90 年代前后开始减少; 湖南西南部的电线积冰日数随年代际从 3~10 d 减少到 1~3 d, 再减少

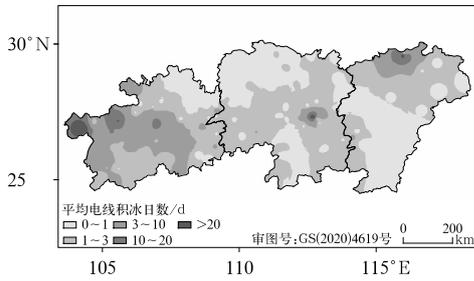


图 3 1961—2019 年贵州、湖南、江西  
平均电线积冰日数空间分布  
Fig. 3 Spatial distribution of average  
wire icing days in Guizhou, Hunan and  
Jiangxi from 1961 to 2019

到 0~1 d; 湖南中部的大于 10 d 和大于 20 d 的范围和日数都在减小。江西的平均电线积冰日数随年代际变化也在减少, 江西的中部和南部的电线积冰日数从 20 世纪 80 年代开始减小, 日数 0~1 d 的区域范围向北扩展; 江西北部的大于 10 d 和大于 20 d 的范围和日数都在减小。在全球气候变暖背景下, 电线积冰日数的年代际变化与相应的气温变化大致呈负相关。中国气候变暖趋势远高于全球平均水平(严中伟等, 2020; 吴蓓蕾等, 2021), 1950—2015 年中国气温升高, 增幅超过  $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$  (Ren et al, 2017), 其中 1987 年以前为冷期, 之后为暖期, 1990—2009 年气温增幅更大, 为  $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$

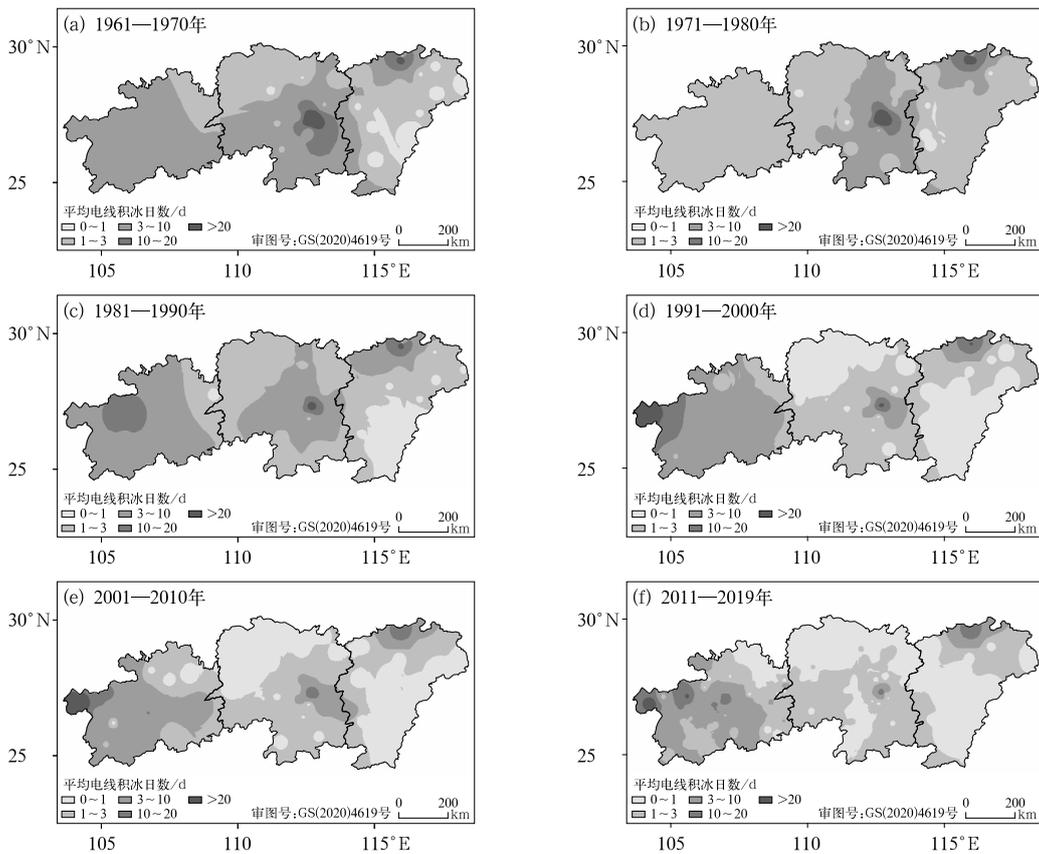


图 4 1961—2019 年贵州、湖南、江西年代际平均电线积冰日数空间分布  
Fig. 4 Spatial distribution of average wire icing days in different decadal periods in  
Guizhou, Hunan and Jiangxi from 1961 to 2019

(虞海燕等, 2011)。研究区域内大部分地区平均电线积冰日数随年代际气温的增加而减少, 且在 20 世纪 80 年代和 90 年代前后减少得较为明显。

## 2.2 标准冰厚极值时空分布

### 2.2.1 标准冰厚极值时间变化特征

根据 1961—2019 年的电线积冰资料, 选取南北

向和东西向中的最大值作为当日电线积冰重量, 再根据式(1)~式(3)计算出标准冰厚值, 统计逐年标准冰厚极值及其出现站点信息, 结果如图 5 所示。

电线积冰的标准冰厚极值年际差别较大, 大部分年份的标准冰厚极值在 20~50 mm, 占有年份的 76.3%。电线积冰标准冰厚极值的最大值出现在 2008 年 2 月 2 日的湖南南岳站(117 mm), 积冰

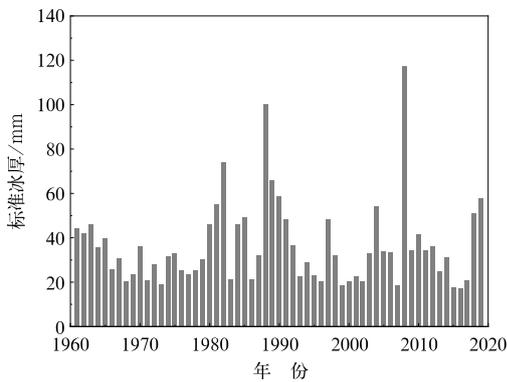


图 5 1961—2019 年贵州、湖南、江西标准冰厚极值逐年变化

Fig. 5 Annual change in the extreme values of standard ice thickness in Guizhou, Hunan and Jiangxi from 1961 to 2019

类型为混合淞型；1988 年 3 月 5 日湖南雪峰山站次之(100 mm)，类型为雨淞型；电线积冰标准冰厚极值的最小值出现在 2016 年 11 月 24 日湖南南岳站(17 mm)，类型为混合淞型。从极值的积冰类型来看，标准冰厚极值的类型主要为雨淞型，占 66.1%，混合淞型次之，占 30.5%。从极值出现的月份来看，11—4 月都有出现，在 1 月和 2 月出现最多，占所有年份的 59.3%；在 4 月出现最少，仅有 1 年。从极值出现的地点来看，极值大部分出现在湖南，包括南岳站、雪峰山站和双峰站，占 96.6%，除此之外，1984 年出现在贵州三穗站，2019 年出现在贵州万山站。

### 2.2.2 标准冰厚极值空间分布特征

分别统计 1961—2019 年各个站点出现过的电线积冰标准冰厚极值，统计得到标准冰厚极值的空间分布及各年代际出现极值站点数，结果如图 6 所示。

各地电线积冰标准冰厚极值为 0~117 mm，且 98% 的站点极值类型为雨淞型。从图 6 中可以看出，研究区域内约 69% 的地区标准冰厚极值较小，为 0~5 mm，主要分布在贵州中偏西部、湖南北部以及江西东北部和南部，最小标准冰厚极值(0.1 mm)出现在湖南衡阳县。约 8% 的地区标准冰厚极值大于 20 mm，所出现范围很小，主要分布在贵州西部威宁、湖南中部南岳和雪峰山、江西北部庐山附近地区。标准冰厚极值高值区主要分布在贵州西部的威宁、贵州中部的遵义和都匀、贵州东部的万山和三穗、湖南西部的雪峰山、湖南中部的双峰和

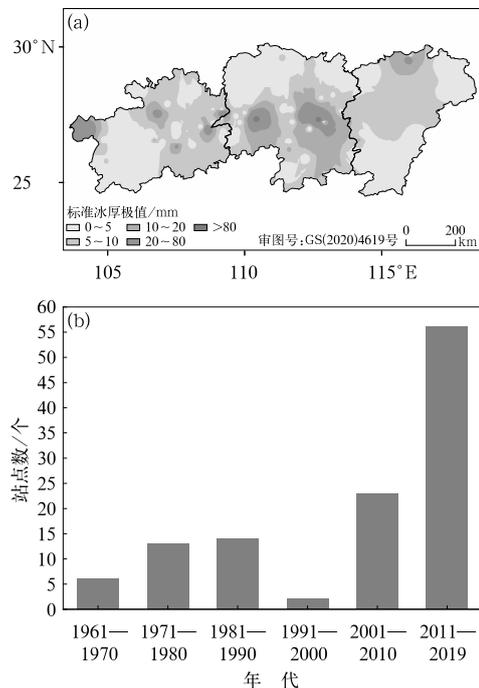


图 6 1961—2019 年贵州、湖南、江西(a)电线积冰标准冰厚极值空间分布及(b)各年代际出现极值站点数  
Fig. 6 (a) Spatial distribution of the extreme values of standard ice thickness and (b) the number of stations with extreme values in each decadal period in Guizhou, Hunan and Jiangxi from 1961 to 2019

南岳、江西北部的庐山，这些地区的标准冰厚极值在 24~118 mm，其中，湖南南岳标准冰厚极值最大(约为 117 mm)，湖南雪峰山次之(约为 100 mm)。

电线积冰标准冰厚极值的年代际分布极其不均匀，大部分站点极值都出现在 2011—2019 年，占区域内所有站点的 49%；2001—2010 年次之，占 20%；1991—2000 年出现极值的站点数是最少的，仅占 1.8%。年代际分布结果也表明，近 20 年来，研究区域内最大电线积冰标准冰厚呈现增大趋势，电线积冰强度增强。

### 2.3 最大连续积冰日数时空分布

计算每个站点每年的最大连续积冰日数，进一步统计出逐年最大连续积冰日数和各站点最大连续积冰日数。

由图 7 可见，电线积冰的最大连续积冰日数年际差别较大，大部分年份的最大连续积冰日数在 5~15 d，占所有年份的 72.9%。有 5 年的最大连续积冰日数在 20 d 以上，其中最大连续电线积冰日数最多的为 1977 年 1 月 1—23 日(湖南南岳，23 d)；

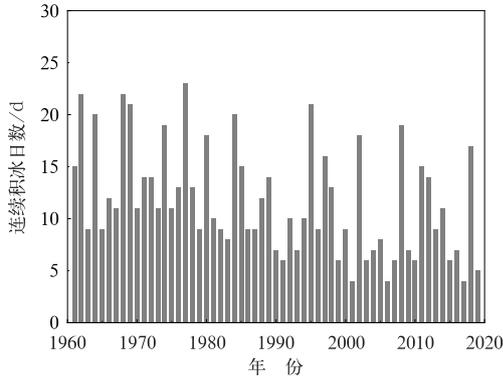


图 7 1961—2019 年贵州、湖南、江西最大连续积冰日数年变化

Fig. 7 Annual change in the maximum consecutive icing days in Guizhou, Hunan and Jiangxi from 1961 to 2019

次之为 1962 年 1 月 14 日至 2 月 4 日(贵州威宁)和 1968 年 1 月 19 日至 2 月 9 日(湖南南岳),连续积冰日数均为 22 d;而最大连续积冰日数最少年份仅有 4 d,分别出现在 2001 年、2006 年和 2017 年。

各地最大连续积冰日数为 1~23 d。由图 8 可见,研究区域内约 53% 的地区最大连续积冰日数较小,为 1~3 d,主要分布在贵州东北部、湖南北部及南部、江西南部的小部分区域,17% 的站点最大连续积冰日数仅出现 1 d。约 11% 的最大连续积冰日数大于 10 d,主要位于贵州西部、湖南中部南岳,以及江西北部庐山附近地区。最大连续积冰日数大于 15 d 的区域主要分布在贵州西部的威宁、盘县、毕节、黔西、织金和安顺,湖南中部的南岳及江西北部的庐山,这些地区的最大连续积冰日数在 17~23 d,

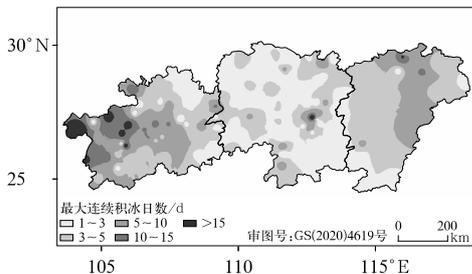


图 8 1961—2019 年贵州、湖南、江西最大连续积冰日数空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the maximum consecutive icing days in Guizhou, Hunan and Jiangxi from 1961 to 2019

其中,湖南南岳最大连续积冰日数最大(23 d),贵州威宁次之(22 d)。

分省来看,贵州的最大连续积冰日数高于湖南和江西;湖南 72.4% 的地区最大连续积冰日数为 1~3 d,江西为 38.1%,而贵州只有 35.4%;对于最大连续积冰日数大于 15 d 的站点,有 6 个站点位于贵州,湖南和江西分别只有 1 个站点大于 15 d。

## 2.4 电线积冰出现日期时间变化特征

统计逐年出现电线积冰站点的起始日和终止日,将站点当年 10 月至次年 4 月最早出现电线积冰的日期作为该站点的起始日,将站点最晚出现电线积冰的日期作为该站点的终止日,并计算每一年所有站点起始日和终止日的平均值作为该年的起始日和终止日;分别对电线积冰的起始日和终止日进行 M-K 检验。

从电线积冰的起始日的年际变化趋势来看(图 9a),1961—2018 年起始日在波动中呈提前趋势,其倾向率为  $-2.023 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,58 年共计提前了约 11.7 d,平均年电线积冰起始日为 1 月 10 日,最早为 1985 年(12 月 12 日),最晚为 1967 年(2 月 11 日),两者相差 61 d。由 UF 曲线可知(图 9b),20 世纪 60 年代电线积冰的起始日有推迟的趋势,而 70 年代之后起始日有提前趋势,且在 2000—2014 年提前趋势超过 0.05 显著性水平临界线,表明这段时间内起始日的提前趋势是十分显著的。根据 UF 和 UB 曲线交点的位置,确定起始日在 1980 年发生突变。

从电线积冰的终止日的年际变化趋势来看(图 9c),58 年来终止日在波动中呈推迟趋势,其倾向率为  $1.85 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,共计推后了约 10.7 d,平均年电线积冰终止日为 1 月 30 日。最早为 1985 年(12 月 24 日),最晚为 1968 年(2 月 26 日),两者相差 64 d。由 UF 曲线可知(图 9d),1980 年之后电线积冰的终止日呈推迟趋势,且在 2002 年之后推迟趋势超过 0.05 显著性水平临界线,表明在 2002 年之后终止日的推迟趋势十分显著。UF 和 UB 曲线在 1980 年之前有多个交点,说明终止日没有发生突变。

## 2.5 电线积冰风险指数时空分布

综合考虑电线积冰日数平均值、电线积冰过程的持续日数和电线积冰过程的最大标准冰厚三个要素,计算得到  $I_1$ 、 $I_2$  和  $I_3$ ,并进行独立性检验,结果显示渐进显著性水平检验小于 0.05,表明三个指数

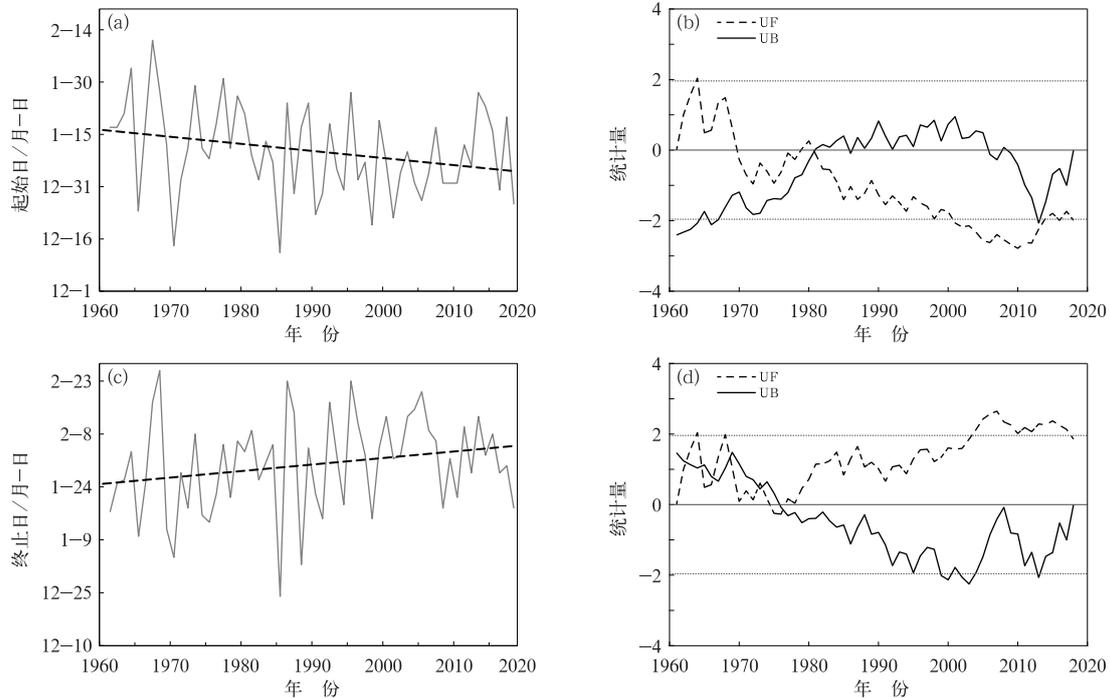


图 9 1961—2018 年贵州、湖南、江西电线积冰(a,b)起始日,(c,d)终止日的(a,c)逐年变化和(b,d)M-K 检验

Fig. 9 Annual change in (a, b) the beginning and (c, d) ending dates of wire icing in Guizhou, Hunan and Jiangxi from 1961 to 2018 (a, c) annual change, (b, d) M-K test

有显著性差异,所以在构建电线积冰风险指数时三个指数相互独立且有效。将归一化后的  $I'_1$ 、 $I'_2$  和  $I'_3$  相加得到电线积冰风险指数,其年变化和空间分布情况分别见图 10、图 11。

从图 10 中可以看出,贵州、湖南、江西 59 年来

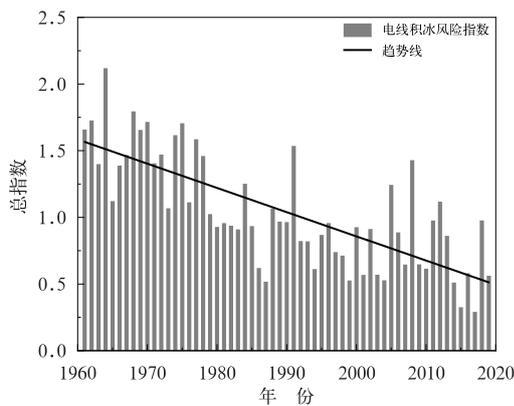


图 10 1961—2019 年贵州、湖南、江西电线积冰风险指数年变化

Fig. 10 Annual change of wire icing risk indicator in Guizhou, Hunan and Jiangxi from 1961 to 2019

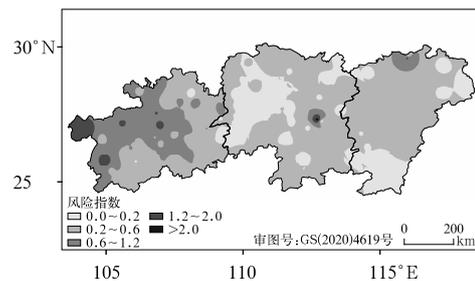


图 11 1961—2019 年贵州、湖南、江西电线积冰风险指数空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of wire icing risk indicator in Guizhou, Hunan and Jiangxi from 1961 to 2019

电线积冰风险指数呈现波动性变化,大部分年份的风险指数在 0.5~1.5, 占有年份的 79.7%。整体变化呈现减小的趋势,倾向率约为每 10 年 -0.18。一共有 10 年的电线积冰风险指数在 1.5 以上,其中电线积冰风险指数最大值出现在 1964 年(2.12),最小值出现在 2017 年(0.29)。

由图 11 可以看出,研究区域内 31% 的地区电线积冰的风险指数在 0.2 以下,主要在湖南西部和

江西南部;风险指数最小仅为 0.003,出现在贵州北部的德江。43%的地区风险指数为 0.2~0.6,主要分布在贵州东北部、东部及南部,湖南南部、中北部,江西中部和北部。风险指数为 0.6 以上的地区占 26%,主要集中在贵州中西部、湖南中部和江西北部;风险指数为 1.2 及以上的地区很少,只有个别几个站点,其中贵州西部的威宁、普安,贵州中部的开阳和湖南中部的南岳风险指数值均大于 1.5,南岳的风险指数值高达 2.3。

### 3 结论和讨论

本文以贵州、湖南、江西三个省为研究区域,利用研究区域内电线积冰资料,结合 M-K 检验、反距离权重法等方法,统计分析了研究区域内电线积冰的日数、标准冰厚极值和最大连续积冰日数的时空分布特征以及电线积冰出现起止日的时间变化特征;基于电线积冰日数年平均、过程持续日数和过程最大标准冰厚三个要素构建电线积冰风险指数,明确了研究区域内出现电线积冰的风险大小,主要结论如下。

(1)贵州、湖南、江西近 59 年的年平均电线积冰日数整体呈下降趋势,在 20 世纪 80 年代电线积冰日数达到最大值,之后减少。电线积冰主要出现在冬季 3 个月,其中 1 月出现的最多。电线积冰类型以雨淞型积冰为主。研究区域内平均电线积冰日数呈现高值区集中在贵州中西部、湖南中部和江西北部,其余地区积冰日数较少的分布特征。整体上,贵州的平均电线积冰日数随年代际变化增加,贵州东北部积冰日数减少;湖南和江西的平均电线积冰日数随年代际变化减少。

(2)标准冰厚极值集中在 20~50 mm,高值区集中在 27°N 附近的贵州、湖南的部分地区,以及江西北部;大部分站点极值都出现在 2011—2019 年,1991—2000 年出现的站点数是最少的。最大连续积冰日数集中在 5~15 d,贵州的最大连续积冰日数整体高于湖南和江西;高值区集中在贵州西部、湖南中部、江西北部和中东部。电线积冰的起始日的年际变化整体上呈提前趋势,终止日的年际变化整体上呈推迟趋势。

(3)电线积冰风险指数年变化整体上呈减小的趋势;电线积冰的高风险区域主要位于贵州中西部、湖南中部和江西北部,风险指数大于 0.6,其中贵州

威宁、普安和开阳以及湖南南岳是电线积冰最为严重的地区;湖南西部和江西南部为低风险区域。

本文得出的电线积冰时空分布特征对明确电线积冰易发时间及地区有一定的意义。以 2008 年为例,年初中国出现了大范围持续低温雨雪冰冻天气,其电线积冰日数、雨淞型积冰日数均为 59 年来的次大值,混合淞型积冰日数为最大值,标准冰厚极值在 2008 年出现最大值,最大连续积冰日数在 2008 年的值也相对较大。已有的《电线积冰气象风险等级》(中国气象局,2017)将电线积冰风险等级划分为四级,是根据前一天日平均气温、日平均相对湿度和日平均风速满足气象条件的持续时间和电线积冰标准冰厚进行划分,而本文的电线积冰风险指数考虑了电线积冰日数年平均,表示的是多年平均状态下出现电线积冰的情况,持续日数和过程最大标准冰厚则能表示出现电线积冰时的强度大小,该指数可以同时表示不同地区电线积冰的发生频率和强度,有助于明确出现电线积冰的重点区域。

由于电线积冰观测资料在 20 世纪 60—70 年代缺测较多,利用现有数据统计标准冰厚极值、最大连续积冰日数以及电线积冰起止日时,可能存在与实际情况不完全相符的情况。由于气象站点的环境与实际输电线路在地理上和高度上存在空间差异,目前所用的电线积冰资料的代表性有限,建议增加电线积冰观测站点的建立,或建立适用于输电线路自动观测的系统,特别是在电线积冰灾害频繁发生或是历史曾出现过严重积冰的地区。在今后研究中,需对电线积冰数据进行完善,结合气象灾害大典、气象灾害年鉴以及报纸和媒体报道所记录的不同地区实际输电线路的积冰情况,对部分电线积冰频发的重点区域进行深入研究,使研究结论更有实用性和代表性,从而提出更有针对性的防冰除冰措施。

### 参考文献

- 陈百炼,吴战平,张艳梅,等,2014. 贵州冬季电线积冰及其天气成因分析[J]. 气象,40(3):355-363. Chen B L, Wu Z P, Zhang Y M, et al, 2014. Analysis on wires icing and its weather conditions in Guizhou Province[J]. Meteor Mon, 40(3): 355-363 (in Chinese).
- 程肖侠,方建刚,2013. 中国西北部电线积冰气候特征及分区[J]. 干旱区研究,30(2):341-346. Cheng X X, Fang J G, 2013. Climatic characteristics and distribution of wire icing days in the eastern part of northwest China[J]. Arid Zone Res, 30(2): 341-346 (in Chinese).
- 杜小玲,彭芳,武文辉,2010. 贵州冻雨频发地带分布特征及成因分析

- [J]. 气象, 36(5):92-97. Du X L, Peng F, Wu W H, 2010. Distribution and cause on frequent freezing rain zone in Guizhou[J]. Meteor Mon, 36(5):92-97(in Chinese).
- 龚强, 汪宏宇, 蒯娜, 等, 2010. 辽宁省电线积冰特征与电网冰区划分研究[J]. 冰川冻土, 32(3):549-556. Gong Q, Wang H Y, Lin N, et al, 2010. Research on the characteristics of wire icing and the division of grid icing in Liaoning Province[J]. J Glaciol Geocryol, 32(3):549-556(in Chinese).
- 顾光芹, 田国强, 周须文, 2012. 河北省电线积冰的气候特征及一次电线积冰天气过程分析[J]. 气象与环境科学, 35(1):8-13. Gu G Q, Tian G Q, Zhou X W, 2012. Climatic characteristic of wire icing in Hebei Province and synoptic process analysis[J]. Meteor Environ Sci, 35(1):8-13(in Chinese).
- 国家能源局, 2012. DL/T 5158—2012 电力工程气象勘测技术规程[M]. 北京: 中国计划出版社. National Energy Administration, 2012. DL/T 5158—2012 Technical Code for Meteorological Survey in Electric Power Engineering[M]. Beijing: China Planning Press(in Chinese).
- 霍林, 谭萍, 张婷婷, 等, 2017. 电力气象灾害时空分布特征及其影响分析[J]. 南方农业, 11(20):83-84. Huo L, Tan P, Zhang T T, et al, 2017. Spatial and temporal distribution characteristics of power meteorological disasters and impact analysis[J]. South China Agric, 11(20):83-84(in Chinese).
- 霍治国, 李春晖, 孔瑞, 等, 2021. 中国电线积冰灾害研究进展[J]. 应用气象学报, 32(5):513-529. Huo Z G, Li C H, Kong R, et al, 2021. Review on disaster of wire icing in China[J]. J Appl Meteor Sci, 32(5):513-529(in Chinese).
- 蒋兴良, 易辉, 2002. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社. Jiang X L, Yi H, 2002. Transmission Line Icing and Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press(in Chinese).
- 李登文, 乔琪, 魏涛, 2009. 2008 年初我国南方连雨雪天气环流及垂直结构分析[J]. 高原气象, 28(5):1140-1148. Li D W, Qiao Q, Wei T, 2009. Analyses on the freezing rain and snow weather circulation and vertical structure of Southern China in early 2008[J]. Plateau Meteor, 28(5):1140-1148(in Chinese).
- 李清华, 孟洁, 李劲松, 等, 2022. 山西省不同重现期下电线覆冰厚度空间分布及区划[J]. 干旱气象, 40(1):156-165. Li Q H, Meng J, Li J S, et al, 2022. Spatial distribution and division of wire icing thickness under different return periods in Shanxi Province[J]. J Arid Meteor, 40(1):156-165(in Chinese).
- 李元鹏, 赵逸舟, 江远安, 等, 2010. 新疆电线积冰的特性、时空分布及气象条件分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 4(5):20-23. Li Y P, Zhao Y Z, Jiang Y A, et al, 2010. Characteristics, spatial and temporal distribution of wire icing in Xinjiang and corresponding meteorological condition[J]. Desert Oasis Meteor, 4(5):20-23(in Chinese).
- 廖玉芳, 潘志祥, 吴贤云, 等, 2011. 湖南雨淞[M]. 北京: 气象出版社. Liao Y F, Pan Z X, Wu X Y, et al, 2011. Hunan Glaze[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 刘赫男, 张洪玲, 朱红蕊, 等, 2014. 黑龙江省电线积冰的气候特征及电网冰区划分[J]. 冰川冻土, 36(3):555-562. Liu H N, Zhang H L, Zhu H R, et al, 2014. Power grid icing in Heilongjiang Province: climatic characteristics and division[J]. J Glaciol Geocryol, 36(3):555-562(in Chinese).
- 马锋敏, 陈丽娟, 李想, 等, 2022. 中国冬季气温不同年代际的季节内变化特征及成因分析[J]. 大气科学, 46(3):573-589. Ma F M, Chen L J, Li X, et al, 2022. Characteristics and causes of intraseasonal variation of winter temperature in China under different interdecadal scale[J]. Chin J Atmos Sci, 46(3):573-589(in Chinese).
- 闵诗淳, 王宝书, 2010. 吉林省电线积冰的初步统计特征分析[J]. 吉林气象, (3):14-18. Min S C, Wang B S, 2010. Preliminary statistical analysis of wire icing in Jilin Province[J]. Jilin Meteor, (3):14-18(in Chinese).
- 庞文保, 白光弼, 李建科, 等, 2012. 陕西省电线积冰区划[J]. 气象, 38(6):733-739. Pang W B, Bai G B, Li J K, et al, 2012. Division of wire icing in Shaanxi Province[J]. Meteor Mon, 38(6):733-739(in Chinese).
- 覃武, 罗小莉, 郑风琴, 等, 2019. 广西输电线路覆冰典型年份的环流特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 13(1):110-116. Qin W, Luo X L, Zheng F Q, et al, 2019. Circulation characteristics of transmission line ice-coating in Guangxi in the typical years[J]. Desert Oasis Meteor, 13(1):110-116(in Chinese).
- 孙秀博, 张婉莹, 张建强, 等, 2021. 辽宁电线覆冰日数气候特征与大气环流异常的关系[J]. 气象与环境学报, 37(3):125-131. Sun X B, Zhang W Y, Zhang J Q, et al, 2021. The relationship between climate characteristics of wire icing days in Liaoning Province and atmospheric general circulation anomalies[J]. J Meteor Environ, 37(3):125-131(in Chinese).
- 唐亚平, 张凯, 李岚, 等, 2015. 辽宁省电线覆冰特征及冰区重现期标准冰厚分布[J]. 气象与环境学报, 31(4):58-64. Tang Y P, Zhang K, Li L, et al, 2015. Characteristics of wire icing and distribution of standard ice thickness during ice return period in Liaoning Province[J]. J Meteor Environ, 31(4):58-64(in Chinese).
- 王怀清, 彭静, 赵冠男, 2009. 近 50 年江西省雨淞过程气候特征分析[J]. 气象科技, 37(3):311-314. Wang H Q, Peng J, Zhao G N, 2009. Climatic characteristics of glaze weather in Jiangxi in past 50 years[J]. Meteor Sci Technol, 37(3):311-314(in Chinese).
- 魏凤英, 2007. 现代气候统计诊断与预测技术: 第 2 版[M]. 北京: 气象出版社. Wei F Y, 2007. Modern Climate Statistics Diagnosis and Prediction Technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 武辉芹, 张金满, 赵增保, 2017. 河北省输电线路冰害的气象要素时空分布特征[J]. 干旱气象, 35(6):991-997. Wu H Q, Zhang J M, Zhao Z B, 2017. Spatial-temporal distribution characteristics of meteorological elements causing ice disaster on transmission wires in Hebei Province[J]. J Arid Meteor, 35(6):991-997(in Chinese).
- 吴蓓蕾, 姜大勝, 王晓欣, 2021. 1961~2018 年中国生长季变化[J]. 大气科学, 45(2):424-434. Wu B L, Jiang D B, Wang X X, 2021. Changes in the growing season across China during 1961—2018[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2):424-434(in Chinese).
- 吴嘉蕙, 任荣彩, 2021. 冬季全国性持续低温事件过程中的平流层-对流层相互作用[J]. 大气科学, 45(3):558-572. Wu J H, Ren R C, 2021. Stratosphere-troposphere interactions during nationwide extensive and persistent extreme cold events in boreal

- winter[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(3):558-572(in Chinese).
- 肖平, 王文, 胡灿明, 等, 2018. 1983—2015 年湖南雨凇时空分布特征及影响因子[J]. *气象科技*, 46(3):515-523. Xiao P, Wang W, Hu C M, et al, 2018. Temporal and spatial distribution and influencing factors of glazes in Hunan Province during 1983—2015[J]. *Meteor Sci Technol*, 46(3):515-523(in Chinese).
- 肖雯, 凌婷, 刘春, 等, 2022. 基于配料法的江西省电线积冰预报研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 17(3):70-76. Xiao W, Ling T, Liu C, et al, 2022. Ingredients-based methodology for forecasting wire icing in Jiangxi Province[J]. *J Subtrop Resour Environ*, 17(3):70-76(in Chinese).
- 许艳, 朱江, 高峰, 等, 2013. 两种导线观测的电线积冰资料的对比分析[J]. *气象*, 39(3):362-369. Xu Y, Zhu J, Gao F, et al, 2013. Comparative analysis on two types of wire icing data in China[J]. *Meteor Mon*, 39(3):362-369(in Chinese).
- 严小冬, 吴战平, 古书鸿, 2009. 贵州冻雨时空分布变化特征及其影响因素浅析[J]. *高原气象*, 28(3):694-701. Yan X D, Wu Z P, Gu S H, 2009. Analyses on the space-time distribution characteristics and their influence factors of freezing rain in Guizhou Province[J]. *Plateau Meteor*, 28(3):694-701(in Chinese).
- 严中伟, 丁一汇, 翟盘茂, 等, 2020. 近百年中国气候变暖趋势之再评估[J]. *气象学报*, 78(3):370-378. Yan Z W, Ding Y H, Zhai P M, et al, 2020. Re-assessing climatic warming in China since the last century[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(3):370-378(in Chinese).
- 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等, 2011. 1951—2009 年中国不同区域气温和降水量变化特征[J]. *气象与环境学报*, 27(4):1-11. Yu H Y, Liu S H, Zhao N, et al, 2011. Characteristics of air temperature and precipitation in different regions of China from 1951—2009[J]. *J Meteor Environ*, 27(4):1-11(in Chinese).
- 叶茵, 杜小玲, 严小冬, 2007. 贵州冻雨时空分布及对应临近环流特征分析[J]. *贵州气象*, 31(6):11-13, 25. Ye Y, Du X L, Yan X D, 2007. Analysis of temporal and spatial distribution of frozen rain in Guizhou and corresponding nearby circulation characteristics[J]. *J Guizhou Meteor*, 31(6):11-13, 25(in Chinese).
- 章开美, 龙余良, 周雨, 等, 2020. 庐山雨凇积冰日数变化特征及其与海气场关系[J]. *气象与环境科学*, 43(1):75-80. Zhang K M, Long Y L, Zhou Y, et al, 2020. Variation characteristics of glaze icing days in Lushan Mountain and its relationship with ocean-air field[J]. *Meteor Environ Sci*, 43(1):75-80(in Chinese).
- 张仕平, 2019. 电网线路冰冻危害与对策分析[J]. *集成电路应用*, 36(11):42-43. Zhang S P, 2019. Analysis of power grid line freezing[J]. *Appl IC*, 36(11):42-43(in Chinese).
- 张婷, 2015. 吉林省电线积冰的特征分析及气象条件初探[J]. *气象灾害防御*, 22(3):44-48. Zhang T, 2015. Characteristic analysis of ice accretion on wires and preliminary study on meteorological conditions in Jilin Province[J]. *Meteor Dis Prev*, 22(3):44-48(in Chinese).
- 张小军, 庄文兵, 肯巴提·波拉提, 2021. 北疆电线积冰的分布及区划[J]. *沙漠与绿洲气象*, 15(3):117-121. Zhang X J, Zhuang W B, Kenbati B L T, 2021. The temporal and spatial distribution characteristics and the division of wire icing in Northern Xinjiang[J]. *Desert Oasis Meteor*, 15(3):117-121(in Chinese).
- 赵珊珊, 高歌, 张强, 等, 2010. 中国冰冻天气的气候特征[J]. *气象*, 36(3):34-38. Zhao S S, Gao G, Zhang Q, et al, 2010. Climate characteristics of freezing weather in China[J]. *Meteor Mon*, 36(3):34-38(in Chinese).
- 赵文灿, 龙余良, 阙志萍, 等, 2018. 江西省电线积冰特征及温度层结分析[J]. *气象科技*, 46(1):178-181. Zhao W C, Long Y L, Que Z P, et al, 2018. Characteristic and temperature stratification of wire icing in Jiangxi[J]. *Meteor Sci Technol*, 46(1):178-181(in Chinese).
- 郑劲光, 吴琼, 刘照明, 2009. 江西省冻雨气候概况和环流特征[J]. *气象与减灾研究*, 32(4):45-49. Zheng J G, Wu Q, Liu X M, 2009. Climate and circulation characteristics of freezing rain in Jiangxi[J]. *Meteor Dis Reduct Res*, 32(4):45-49(in Chinese).
- 中国气象局, 2003. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2003. Ground Meteorological Observation Specification [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 中国气象局, 2017. 电线积冰气象风险等级: QX/T 355—2016[S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration, 2017. Grade of meteorological risk of wire icing: QX/T 355—2016 [S]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 周佰铨, 翟盘茂, 2023. 未来的极端天气气候与水文事件预估及其应对[J]. *气象*, 49(3):257-266. Zhou B Q, Zhai P M, 2023. The future projections of extreme weather, climate and water events and strategic responses[J]. *Meteor Mon*, 49(3):257-266(in Chinese).
- 周悦, 高正旭, 周月华, 等, 2013. 湖北省电线积冰特征及其冰区划分[J]. *自然灾害学报*, 22(6):169-177. Zhou Y, Gao Z X, Zhou Y H, et al, 2013. Characteristics of wire icing and icing zoning in Hubei Province[J]. *J Nat Dis*, 22(6):169-177(in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 2007. 天气学原理和方法: 第 4 版[M]. 北京: 气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2007. Principles and Methods of Weather[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- Alexander L V, Zhang X B, Peterson T C, et al, 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *J Geophys Res Atmos*, 111(D5):D05109.
- IPCC, 2021. Summary for policymakers[C]//Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press.
- Manton M J, Della-Marta P M, Haylock M R, et al, 2001. Trends in extreme daily rainfall and temperature in Southeast Asia and the South Pacific, 1961—1998[J]. *Int J Climatol*, 21(3):269-284.
- Ren G Y, Ding Y H, Tang G L, 2017. An overview of mainland China temperature change research[J]. *J Meteor Res*, 31(1):3-16.