

胡艳楠, 牛生杰, 吕晶晶, 等. 2017. 湖北电线积冰统计分析及其逆温层结研究 [J]. 气候与环境研究, 22 (1): 35–44. Hu Yannan, Niu Shengjie, Lü Jingjing, et al. 2017. Statistical analysis and inversion study on ice accretion in Hubei Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (1): 35–44, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15267.

湖北电线积冰统计分析及其逆温层结研究

胡艳楠^{1,2,3} 牛生杰^{1,2} 吕晶晶^{1,2} 周悦⁴

¹ 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

² 江苏省大气环境与气象装备协同创新中心, 南京 210044

³ 中国气象局气象干部培训学院河北分院, 保定 071000

⁴ 武汉区域气候中心, 武汉 430074

摘 要 利用 2009~2013 年冬季华中电网电线覆冰在线观测系统对湖北省 500 kV 高压输电线路积冰状况进行实时观测获取的资料, 结合 MICAPS 常规气象资料、探空数据及 NCEP 再分析资料, 对湖北形成积冰的天气形势、积冰持续时间以及形成积冰的逆温层结进行研究。结果表明: 积冰的高空环流形势主要是小槽发展型、横槽型和低槽东移型 3 类, 分别占 43.8%、31.2%、25%; 电线积冰主要发生在每年的 1 月、2 月、11 月、12 月, 月平均积冰时数分别为 65、42、11、9; 积冰可分为降水型积冰和云雾型积冰, 降水型积冰过程中, 900~700 hPa 高度间存在由北至南风向切变, 冷暖空气交汇形成愈加深厚的逆温对降水积冰维持与发展起到重要的作用。

关键词 电线积冰 天气形势 逆温层

文章编号 1006-9585 (2017) 01-0035-10

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15267

Statistical Analysis and Inversion Study on Ice Accretion in Hubei Province

HU Yannan^{1,2,3}, NIU Shengjie^{1,2}, LÜ Jingjing^{1,2}, and ZHOU Yue⁴

¹ School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044

³ Hebei Branch of China Meteorological Administration Training Center, Baoding 071000

⁴ Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074

Abstract The data collected on the transmission lines of Central China Power Grid from 2009 to 2013 in Hubei Province, the MICAPS meteorological data, the atmospheric soundings, and the NCEP reanalysis data are analyzed to investigate the synoptic situation, the duration of the wire icing, and the inversion layer during the wire icing. Results show that the upper-level circulation during the wire icing process can be divided into three types: Small transverse trough development-oriented type, transverse trough type, and eastward-moving low trough type. The occurrence frequency of each type is 43.8%, 31.2%, and 25%, respectively. Wire icing mainly occurs in January, February, November, and December and the average monthly icing hours in each individual month are 65 h, 42 h, 11 h, and 9 h. The icing processes can be divided into two types: Precipitation icing and foggy icing. A shear of wind direction from north to south could be found in the layer between 900 hPa and 700 hPa when precipitation icing occurs. A far more thick inversion layer could be developed, which is favorable for the maintenance and development of the icing process.

Keywords Wire icing, Weather condition, Inversion layer

收稿日期 2015-12-02; 网络预出版日期 2016-05-11

作者简介 胡艳楠, 女, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要从事云雾降水物理学研究。E-mail: huyn_13@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41375138、41505121、41271515

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC, Grants 41375138, 41505121, and 41271515)

1 引言

电线积冰是一种自然灾害,会对经济发展和国民生活造成巨大的影响。输电线路积冰会导致输电线路机械和电气性能急剧下降,影响电力系统的正常运行,严重时甚至造成输电线路的倒杆、倒塔、绝缘子闪络和通讯受阻。2008 年初,我国湖南、贵州等地先后 4 次遭受低温雨雪冰冻天气的袭击,冰冻灾害持续时间长,破历史记录,危害程度极深,电网的输电线路和杆塔在冰灾中遭受了严重损坏,直接财产损失达上百亿元人民币(丁一汇等, 2008; 杨靖波等, 2008)。

从 20 世纪 50 年代起,输电线路受覆冰影响较大的芬兰、挪威、英国和加拿大等国开始对电线积冰进行研究。McKay and Thompson (1969), Sundin and Makkonen (1998) 和 Ahti and Makkonen (1982) 利用实测资料分析气象要素与电线积冰之间的关系, Makkonen (1998) 和 Fu et al. (2006) 相继提出了覆冰计算模型来对积冰厚度、积冰形状进行模拟, DeGaetano et al. (2008) 利用 WRF 模式对电线积冰进行预报。滕中林(1978)和谭冠日(1982)研究了积冰厚度随距地高度的变化,江祖凡(1983)对电线积冰增长速度与气象条件之间的关系进行探讨, Wen et al. (2009) 对电线积冰发生过程中的天气形势进行分析,罗宁等(2008)和贾然等(2010)分析了电线积冰过程中的云雾特征,为认识电线积冰的物理机制做出了积极贡献。

以前的观测主要是电线积冰的模拟试验,即在观测场内架设铁(钢)丝或不通电的输电线进行积冰厚度、积冰重量及气象条件的观测。随着高压输电线路积冰在线监测系统在实际高压输电线上的应用,一些学者利用高时间分辨率的积冰实时观测资料对电线积冰进行了研究。陈继东和张予(2008)、孟毅等(2011)利用华中电网积冰在线监测系统两个杆塔的数据,将积冰过程分为了形成、稳定增长、缓慢增长和消失 4 个阶段。Zhou et al. (2012) 通过分析高压输电线路积冰过程中的气象要素特征,结合导线表面温度与环境气温之间的关系,对比分析了实际高压输电线路积冰与模拟电线积冰气象条件的异同。本文对形成电线积冰的天气形势进行分类研究,统计分析积冰持续时间特征,揭示降水型积冰逆温层结特征,为电线积冰预报提供帮助。

2 观测地点及观测资料介绍

华中电网是三峡电站电力外送的起点,同时作为西电东送的通道和南北互供的枢纽,对我国东南部的电力供应起着重要作用。湖北省的东北部处于大别山区中段,是高压输电线路所经过的密集区,东、北、西三面环山,山脉相连群峰突起,地势东北高、西南低,植物覆盖茂密,极易发生输电线路覆冰。高压输电线路大多路经人烟稀少地区,人工观测积冰难度大,因此有必要对输电线路覆冰状态进行在线监测。

本文所使用的资料为 2009~2013 年冬季华中电网电线覆冰在线观测系统湖北地区 500 kV 高压输电线路宜华线 872#塔杆(海拔 57 m)上的积冰厚度实时观测资料(高压输电线路杆塔的位置如图 1 所示),时间分辨率为 1 min。从高压输电线上开始有积冰出现时,到积冰完全消融,记为一次积冰过程。此外,还使用 MICAPS 常规气象数据对积冰过程的天气形势进行分析统计,利用武汉探空站(海拔 21 m)的探空数据以及 NCEP 再分析资料对积冰过程中的逆温层结特征进行研究。

3 覆冰监测系统工作原理及数据处理

3.1 覆冰监测系统工作原理

覆冰监测系统工作原理基本如下:在线路杆塔安装一台检测分机,监测分机定时/实时完成该杆塔的覆冰导线重量变化、导线张力、绝缘子的风偏角、倾斜角以及气象参数信息的采集,图像采集系统还可以采集现场图像,通过 GSM/CDMA 网络通信模块方式发送至监控中心(孟毅等, 2011)。监控中心可对监测分机进行参数设置,后台软件分析程序是建立在等值覆冰计算模型、风荷载数学模型、垂直荷载数学模型、杆塔三维力学模型、风偏距离数学模型的基础上编制,根据前台数据,直接得出等值覆冰厚度、杆塔纵向不平衡张力等数据,实现对导线等值覆冰厚度、杆塔纵向不平衡张力等的在线监测(张予, 2008)。

导线覆冰厚度计算模型的基本原理是根据“导线综合载荷是导线固有载荷、冰载荷、风载荷之和”,可建立载荷平衡模型:

$$q = q_0 + q_{\text{win}} + q_{\text{ice}}, \quad (1)$$

其中, q 为综合垂直载荷, q_0 为垂直档距内导线和绝缘子自重载荷, q_{win} 为垂直档距内风载荷, q_{ice} 为垂直档距内冰载荷。 q 可通过拉力传感器测量的绝缘子及导线负荷计算得出, q_0 可依据电力建设手册(固有参数)查出, q_{win} 可以通过风速传感器、导线直径和风向夹角等算出。

建立垂直载荷数学模型, 得出冰载荷之后再依据覆冰厚度等效模型计算出导线等值覆冰厚度:

$$\phi = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + \frac{m_3 - m_1}{\pi \rho_i}} - \frac{d}{2}, \quad (2)$$

其中, ϕ 为导线等值覆冰厚度, d 为无冰时导线外径, m_3 为导线每米覆冰后总质量, m_1 为无冰时导线每米总质量, ρ_i 为覆冰密度。

3.2 数据质量控制方法

通过对 2009 年 11 月至 2013 年 2 月的非零数据进行观察分析, 发现本文所研究的非零数据主要以下列 3 种方式聚集, 对每种聚集形式的数据分别采取以下手段进行质量控制:

(1) 短期震荡。数值变化表现为 A-0-B-0, 主要发生在覆冰起始和结束阶段, 原因可能是风力影响造成的导线舞动, 特别是在不满足覆冰的气象条件下(张志劲等, 2010); 还可能是在 0 °C 左右的临界条件下, 较大的导线张力放大了风力的影响作用(阳林等, 2010)。

(2) 中短期维持。数值呈动态平衡态势, 整体无明显增长或减少趋势, 经历时间一般小于 24 h。多见于夜晚温度较低、无冬季降水时段, 白天随着温度升高数据回零。对于短期震荡及中短期维持的数据, 当麻城站地面气象观测资料(时间分辨率为 6 h)满足覆冰条件时, 记为一次积冰过程。

(3) 较长期维持。数据表现形式同中短期维持状态, 经历时间一般大于 24 h, 一般是受到冷空气的影响形成的积冰。地面气象站观测的气象数据满足积冰条件时, 分析武汉站的探空资料, 并对大气环流背景进行分析, 判断是否有冷空气南下。若地面气象环境与大气层结特征满足覆冰维持的条件, 记为一次积冰过程。

经统计后, 共得到持续时间大于 12 h 的积冰过程 16 次(如表 1 所示), 包括 9 次降水型积冰(雨凇、湿雪和干雪引起的积冰), 7 次云雾型积冰(过冷却状态下的云雾滴碰到近地面物体上发生冻结而形成的积冰), 暂不考虑持续时间较短的积冰过

程, 待获取与短时积冰过程同步的在线监测气象数据后再对此类过程进行分析。毛淑君和李栋梁(2015)利用气象站点的观测资料统计了 1962~2012 年我国南方各级低温雨雪冰冻事件发生的平均次数, 麻城、武汉所在的鄂东北地区轻级事件(持续 1~3 d 的低温雨雪冰冻事件)频发, 平均每年 3~4 次, 本文的统计结果与之相符。

表 1 2009~2013 年积冰过程

Table 1 Ice accretion on wires during 2009-2013

积冰类型	起止时间	持续时 间/h	最大积冰 厚度/mm
降水 积冰	2009 年 11 月 15 日 16:00 (北京时间, 下同) 至 17 日 11:00	43	13.5
	2010 年 2 月 10 日 23:00 至 12 日 12:00	37	22.5
	2010 年 2 月 13 日 20:00 至 16 日 11:00	63	13.4
	2011 年 1 月 2 日 08:00 至 3 日 11:00	27	14.7
	2011 年 1 月 17 日 21:00 至 19 日 12:00	39	9.3
	2011 年 1 月 19 日 20:00 至 21 日 12:00	40	9.3
	2012 年 1 月 21 日 11:00 至 22 日 12:00	25	9.3
	2012 年 12 月 26 日 02:00 至 27 日 11:00	33	14.8
	2013 年 2 月 7 日 14:00 至 9 日 12:00	46	14.5
云雾 积冰	2010 年 1 月 11 日 20:00 至 12 日 10:00	14	9.3
	2011 年 1 月 21 日 22:00 至 22 日 12:00	14	9.3
	2011 年 1 月 28 日 19:00 至 29 日 11:00	16	9.3
	2012 年 1 月 22 日 17:00 至 23 日 11:00	18	9.0
	2013 年 1 月 9 日 23:00 至 10 日 11:00	12	13.5
	2013 年 1 月 17 日 18:00 至 18 日 10:00	16	14.6
	2013 年 2 月 9 日 21:00 至 10 日 09:00	12	14.0

注: 最大积冰厚度为每小时平均值。

4 形成积冰的高空天气形势

电线积冰的发生大多为冷空气过境而引起。每次积冰过程都发生在一定的环流形势背景下。本文通过对湖北地区发生积冰过程时的天气形势进行分析, 将形成电线积冰的高空环流形势分为 3 种基本类型, 即小槽发展型、横槽型和低槽东移型, 并对每种天气形势下积冰发生的概率进行统计。

4.1 小槽发展型

小槽发展型也可称为不稳定小槽东移型, 是由不稳定短波槽发展引起冷空气向南爆发而造成的。通常, 不稳定小槽最初出现在格陵兰以东的洋面上, 南下过程中不断发展, 最终成为亚洲东岸的一个大槽。在此类天气形势下, 冷空气爆发强烈, 湖北地区易发生电线积冰, 频次为 43.8%。

2011 年 1 月 17~21 日积冰过程的高空环流形势为典型的小槽发展型。积冰过程发生以前, 在乌

拉尔山以东地区存在高压脊, 亚洲中纬度环流较为平直, 东亚大槽平浅。15 日 20:00 (图 2a), 不稳定小槽东移到蒙古时, 已经发展成为一个冷性低槽。至 18 日 20:00 (图 2b), 不稳定小槽已发展成

为东亚大槽移到我国东部地区, 温度槽落后于高度槽, 槽后冷平流强烈。同时青藏高原西部有南支槽活跃发展, 东移过程中对湖北地区产生影响。地面冷空气就在高空西北气流的引导下在向东南移动,

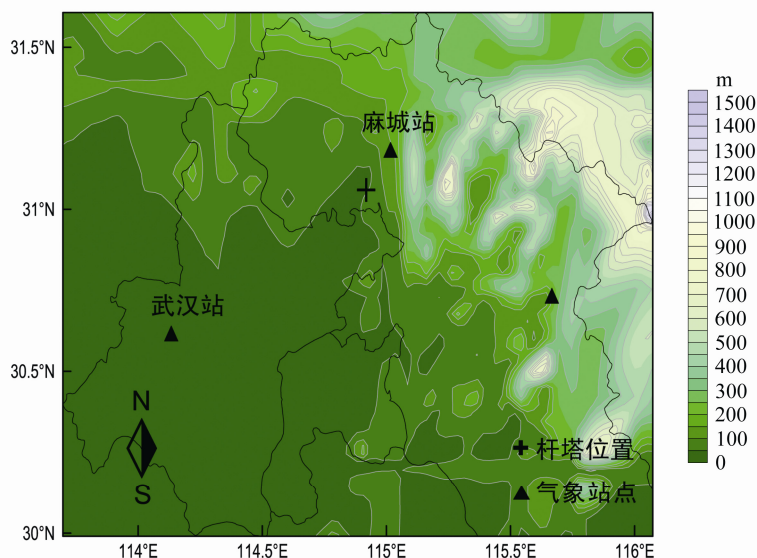


图 1 湖北地区高压输电线路杆塔和气象站点分布及其海拔高度 (阴影)

Fig. 1 Distribution of high voltage transmission lines and meteorological stations

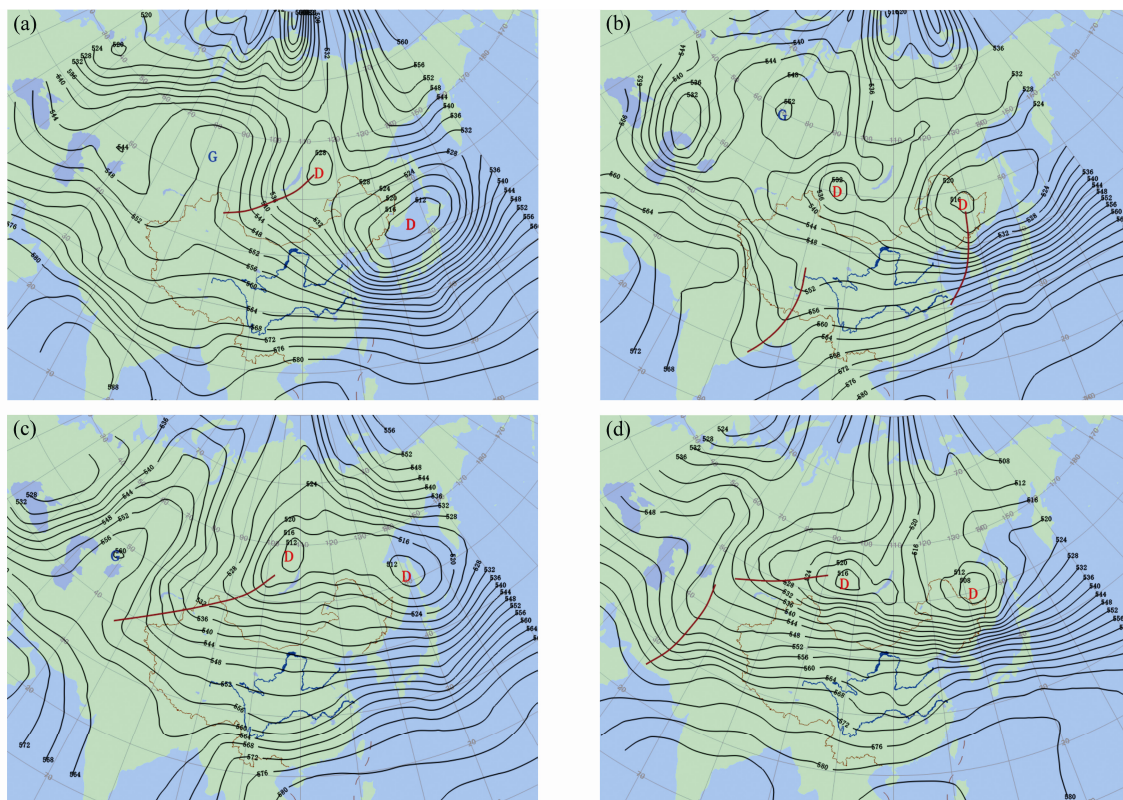


图 2 (a) 2011 年 1 月 15 日 20:00、(b) 2011 年 1 月 18 日 20:00、(c) 2012 年 1 月 17 日 20:00、(d) 2010 年 2 月 8 日 20:00 500 hPa 天气形势图

Fig. 2 500-hPa synoptic patterns at (a) 2000 LST 15 Jan 2011, (b) 2000 LST 18 Jan 2011, (c) 2000 LST 17 Jan 2012, and (d) 2000 LST 8 Feb 2010

湖北地区地面受冷锋影响。在电线积冰过程的发生与维持期间，主要影响系统为冷性高压，温度明显降低，直至冷空气过程结束，地面温度回升，电线积冰消融。

4.2 横槽型

横槽型是阻塞形势崩溃而引起的冷空气向南爆发。在冷空气爆发之前，乌拉尔山地区为一东北至西南向的长波脊，贝加尔湖到巴尔喀什湖为一横槽，50°N 以南地区环流较为平直，多小波动东移。地面图上，整个东亚大陆几乎全部为冷高压所占据，从我国的新疆到河西走廊，不断有小槽东移。一旦阻高崩溃，横槽便转竖，造成冷空气南下温度降低，湖北地区出现电线积冰的频次为 31.2%。

2012 年 1 月 21~23 日积冰过程的高空环流形势就是典型的横槽型。在积冰发生以前，1 月 17 日 20:00 500 hPa 高度场（图 2c）上有一横槽，随着整个系统的发展，横槽逐渐转竖，冷空气南下入侵，至 21 日 20:00，横槽完全转竖，槽后冷平流使湖北地区的积冰得以形成和维持，直至冷空气南下过程结束，积冰开始消融。

4.3 低槽东移型

低槽东移型的高空环流形势的特点是西风带较为平直，有来自西方的冷高压活动，常伴有蒙古气旋发展，导致冷空气南下。以 2010 年 2 月 10~12 日积冰过程的天气形势为例对低槽东移型的环流形势进行分析。从 2 月 8 日 20:00 500 hPa 高空环流形势（图 2d）上可看到，在巴尔喀什湖以西有一浅槽，不断向东南方向移动，并且湖北地区受到不断移入的短波槽影响。到 10 日 20:00 高空浅槽已东移到我国华中地区（图略），地面冷空气伴随高空浅槽南下，有电线积冰发生并发展。这类天气形势下电线积冰发生的频次为 25%。

5 积冰生消时间的统计分析

5.1 年变化

将宜华线 872#塔杆上 2009~2013 年每月的积冰小时数进行 4 年平均，并根据麻城气象站的地面观测资料，统计每月最低温度低于 0℃ 的日数并同样进行 4 年平均（结果如图 3 所示）。我国冻雨的发生时间一般是从 11 月开始到次年 3 月结束，以 1 月最多（李杰等，2015）。本文的研究结果显示，温度低于 0℃ 的日数集中在 1 月，2 月次之，这与

王遵娅（2011）对全国冰冻日数的统计结果一致。积冰时间与温度低于 0℃ 的日数分布一致，主要发生在每年的 11 月至次年 2 月，1 月是每年的积冰多发期，平均积冰小时数为 65 h，2 月次之。

5.2 日变化

对积冰形成与消融的时间进行统计后发现，电线积冰的形成时间主要是在傍晚和夜间，因为此时太阳短波辐射的加热作用较弱，地表因长波辐射的冷却作用而温度降低。其中 20:00 至 02:00 发生积冰的次数最多，占 70.3%（图 4）。电线积冰的消融时间集中于 09:00 至 12:00，频次高达 96.8%，其中以 12:00 积冰消融的次数最多，占 34.3%。

6 电线积冰的大气层结特征分析

6.1 逆温层与积冰持续时间及最大积冰厚度

本文利用武汉探空站每日 08:00、20:00 的探空

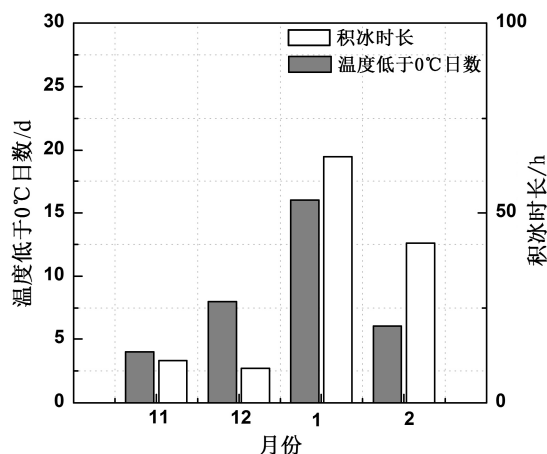


图 3 2009~2013 年宜华线上月平均积冰时间变化

Fig. 3 Monthly average of icing time on Yihua Line during 2009–2013

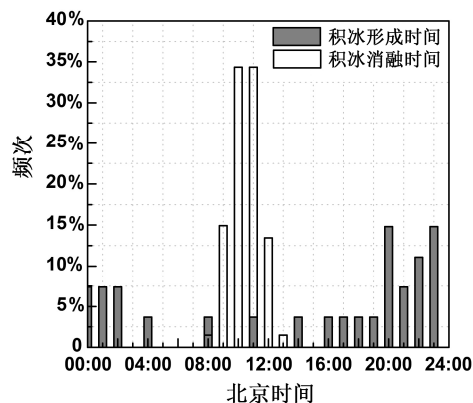


图 4 积冰形成与消融时间分布

Fig. 4 Distribution of ice formation and melting time

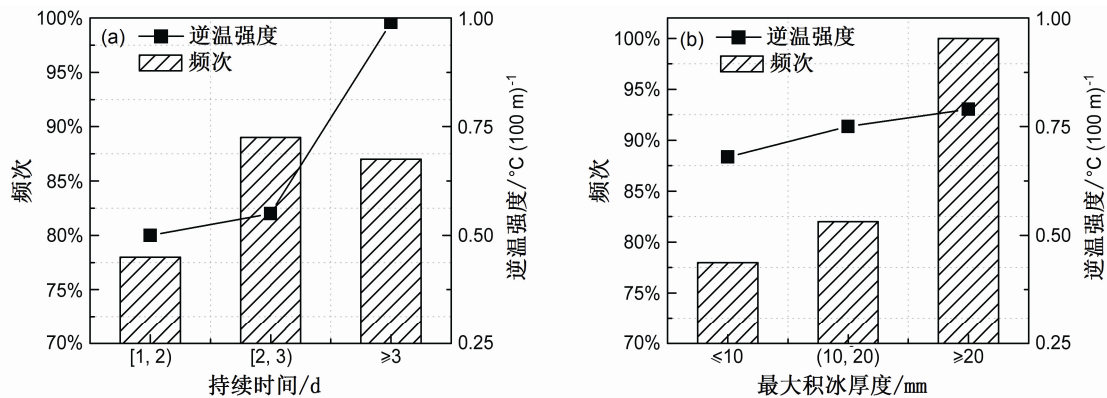


图5 2009~2013年宜华线上结冰过程中逆温层出现的频次、逆温强度与(a)持续时间和(b)最大积冰厚度

Fig. 5 Frequency of inversion layer occurrence, inversion intensity and (a) duration and (b) the maximum ice thickness on Yihua Line during 2009–2013

资料, 对不同持续时间、不同积冰厚度的过程进行分析, 逆温层出现的频次及逆温强度的平均值对比如图5所示。由图5a可知, 逆温层中逆温强度的值越大, 积冰过程维持的时间越长。持续时间为1~2 d的积冰过程中, 逆温层出现的频次为78%, 平均逆温强度为 $0.5^{\circ}\text{C} (100 \text{ m})^{-1}$, 但维持3 d以上的积冰过程, 平均逆温强度明显增大, 高达 $1.0^{\circ}\text{C} (100 \text{ m})^{-1}$ 。由此可见, 相较于逆温层出现的频次, 逆温强度对积冰维持时间的影响要更加明显。

由图5b可知, 逆温层出现的频次越大, 则积冰厚度的值越大。对于最大积冰厚度小于10 mm的积冰过程, 逆温层出现的频次为78%, 逆温强度的平均值为 $0.68^{\circ}\text{C} (100 \text{ m})^{-1}$, 而最大积冰厚度在20 mm以上的积冰过程, 虽然逆温强度增加的幅度较小, 但逆温层出现的频次明显增大。由此可知, 相较于逆温强度, 逆温层出现的频次对积冰厚度最大值的影响要更加明显。

6.2 降水积冰过程中逆温层结特征

本文以2010年2月10~12日的积冰过程为例, 对降水型积冰过程中逆温层结特征进行分析。图6所示为高压输电线上实时监测到的等效积冰厚度、麻城站地面观测的温度及6 h累计降水量随时间的变化, 其中积冰厚度按小时取平均值。在2010年2月的降水积冰过程中, 10日开始温度急剧下降, 最大降温率达 $0.23^{\circ}\text{C h}^{-1}$ 。10日开始有降水出现, 11日08:00由雨转变为固态雪粒子。10日夜间温度达到 0°C , 积冰开始形成, 并在此后经历了一个快速增长过程。11日00:00至11日06:00是此次过程中积冰厚度增长最快的时段, 最大增长率为 2.4 mm h^{-1} , 并且在10:00至13:00, 积冰厚度的小时

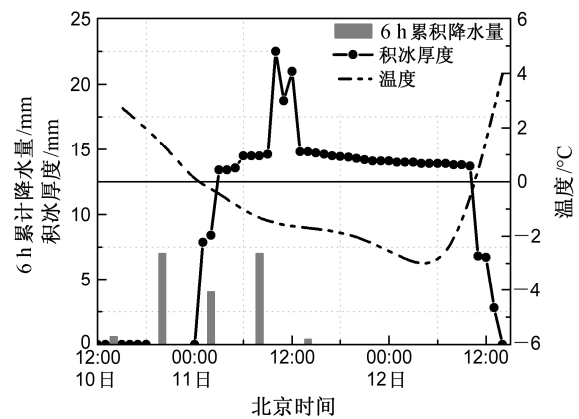


图6 2010年2月10~12日宜华线积冰过程中积冰厚度、温度和6 h 累积降水量随时间的变化

Fig. 6 Temporal variations of ice thickness, temperature, and 6-h accumulative precipitation during icing on Yihua Line in 10–12 Feb 2010

平均值最大 (达到22.5 mm)。

不同类型的冷季降水对积冰的影响不同。干雪的密度小, 引起的积冰很容易脱落; 湿雪的黏性大, 形成的积冰密度大, 易造成一定的危害; 冻雨滴在与输电线碰冻过程中不易反弹, 能够加快积冰的增长。Niu et al. (2012) 对湖北恩施雷达站观测到的电线积冰过程进行研究发现, 冻雨都发生在积冰厚度的迅速增长期, 最大冰厚也出现在降水发生期间, 且积冰过程中的降水有着雨量小、平均半径小的特点。通常布设在山区的高压输电线路, 易同时受到过冷云雾和冻雨的影响。Zhou et al. (2013) 认为冻雨对积冰的直接影响是冻雨滴与云雾滴相比具有更大的含水量, 能给积冰的增长提供更多的过冷水; 冻雨的间接影响是冻毛毛雨滴会影响过冷雾过程, 使得雾滴同时受到凝结活化、蒸发失活以及碰

并作用的影响。本文对观测得到的降水积冰过程进行分析,发现降水基本都出现在积冰的快速生长期,这说明雨滴在积冰增长的过程中具有显著贡献,冻雨是积冰增长的“催化剂”。

图 7 所示为积冰过程中大气层结的温度与相对湿度廓线图,图 8 为积冰过程中水平风向风速、水汽通量与水汽通量散度的垂直剖面图。从图 7、图 8 中可以看出,2010 年 2 月 9 日 18:00 开始,850 hPa 高度上存在风切变,由低层的东北冷气流变为偏南暖湿气流。低层的东北冷气流引起地面温度降低,西南暖湿气流提供充足的水汽。冷暖空气的交汇,是积冰形成的基本条件(曲巧娜等,2012)。10 日 20:00,冷暖空气的交汇致使 950~800 hPa 之间形成了一个深厚的逆温层,温差约为 8~9 °C。降水类型和降水性质与大气温度层结特征密切相关。冻雨的形成需要 3 个条件(Huffman and

Noman,1988; 孙建华和赵思雄,2008; 陶玥等,2012; 高守亭等,2014): 在对流层中层有一个冻结层,冻结层下面需有一个深厚的暖层(融化层)和逆温层,近地面有一个温度在 0 °C 以下的薄层。逆温层内暖区应具有合适的强度、厚度和高度,不能太厚太低,也不能太薄太高(曾明剑等,2008)。10 日 20:00 以后地面温度降低形成薄的冷层,温度层结为典型的冷—暖—冷的结构,500 hPa 高度上西南暖湿气流输送来的水汽在-15~-10 °C 左右条件下形成冰晶或雪花,850~750 hPa 间的暖层最高温度约为 8 °C,高空下落的冰晶或雪花能够在此融化为雨滴,下落到近地面冷的薄层内呈现过冷却状态,形成冻雨,因此在高压输电线上有积冰开始出现,并致使积冰快速增长。

在 2008 年初湖南省一次低温雨雪冰冻天气中,因对流层中层维持强盛的西南气流,使得逆温增

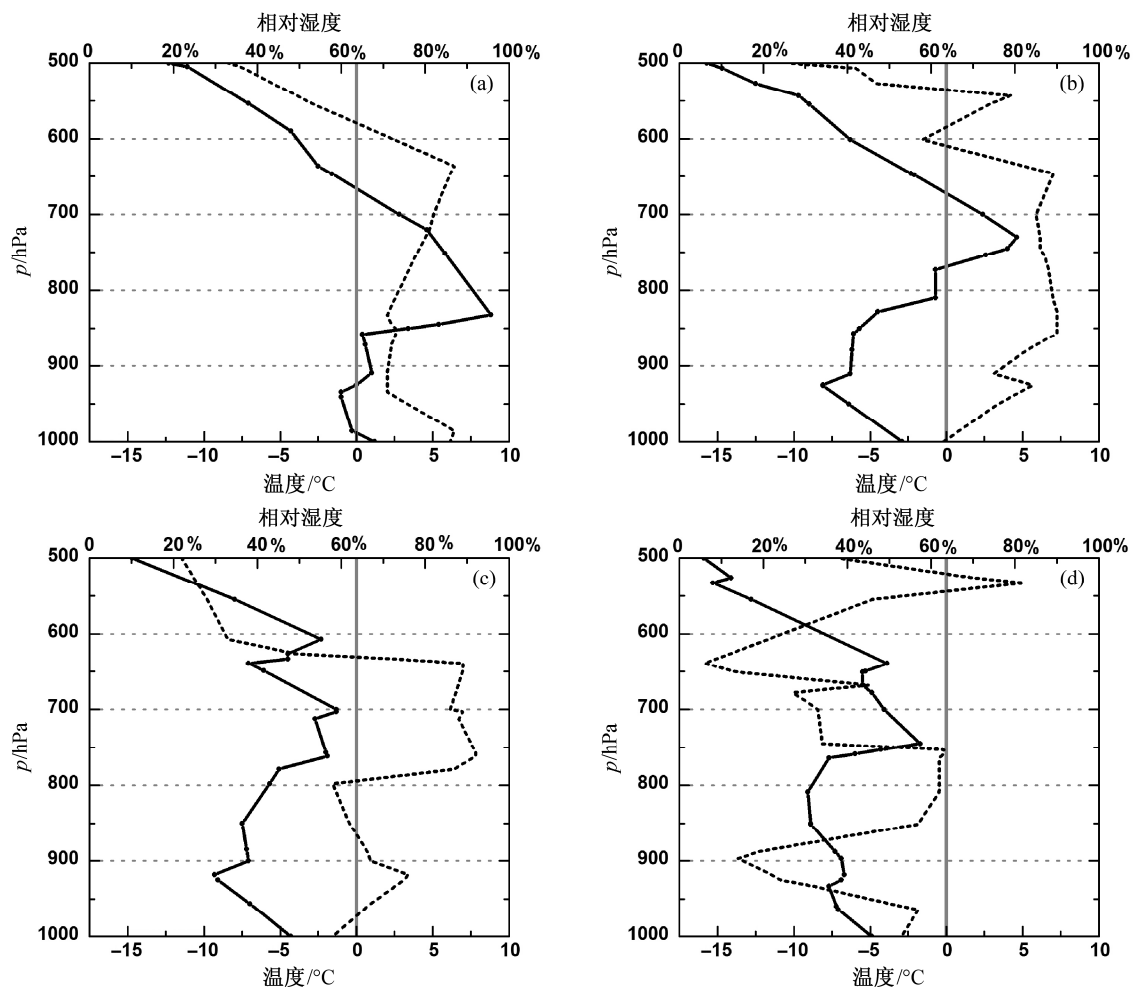


图 7 2010 年 2 月 (a) 10 日 20:00、(b) 11 日 08:00、(c) 11 日 20:00、(d) 12 日 08:00 武汉探空站的温度(实线)、相对湿度(点线)廓线图

Fig. 7 Profiles of temperature (solid line) and relative humidity (dotted line) at (a) 2000 LST 10 Feb, (b) 0800 LST 11 Feb, (c) 2000 LST 11 Feb, and (d) 0800 LST 12 Feb 2010 at Wuhan sounding station

强,水汽通量强中心空间伸展高度更高,为强冰冻天气提供了有利条件(叶成志等,2009)。此次降水积冰过程中出现了同样的情况。从水汽通量散度的垂直剖面(图8b)中可以看出,10日20:00在800 hPa高度上存在水汽通量散度负值中心($-9 \times 10^{-5} \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1}$),600 hPa高度上为水汽通量散度正值中心,有利于系统性上升运动的发展。因800 hPa以上的西南暖湿气流持续增强,到11日08:00,逆温层顶抬升到700 hPa附近(图7b),水汽通量极大值中心从800 hPa抬升到700 hPa以上(图8a)。逆温层内温差高达 13°C ,逆温强度约为 $0.67^\circ\text{C} (100 \text{ m})^{-1}$,且逆温层内存在水汽辐合中心以及水汽通量极大值中心,相对湿度达到90%以

上。由图7b可以看出,在11日08:00虽然暖层仍然存在,但厚度较薄,800 hPa以下深厚的冷层使得地面降水物成固态,即降水类型由之前的冻雨转变为雪,这与地面气象站所记录的天气现象一致。

电线积冰的增长速率同时受到液滴与电线的碰撞率、液滴被电线的捕获率、被捕获的液滴的冻结率等因子影响。就捕获率而言,过冷水滴碰到积冰表面时可迅速冻结或者蔓延开来,而不是反弹;雪粒子在积冰表面的弹性却非常大,对于干雪,捕获率几乎为0;对于湿雪,捕获率与风速、气温、相对湿度有关。因此在本次降水型积冰过程中,在积冰刚开始形成时的冻雨期,积冰保持快速增长,而在11日08:00以后,降水类型由冻雨转变为固态雪

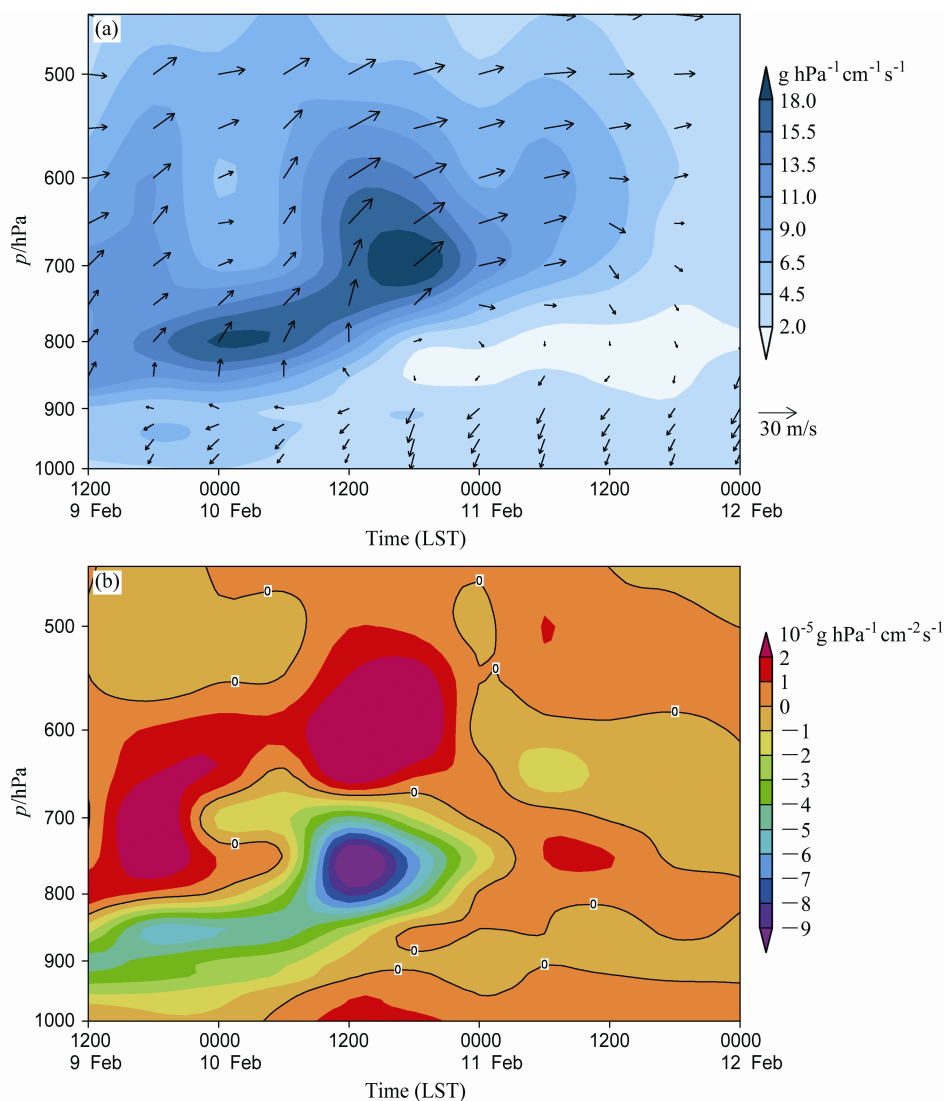


图8 2010年2月10~12日宜华线降水积冰过程中(a)水汽通量(阴影)与水平风速和风向(箭头)、(b)水汽通量散度的垂直剖面

Fig. 8 Vertical cross sections of (a) the moisture flux (shadings) and horizontal wind speed and direction (vectors) and (b) the moisture flux divergence during icing on Yihua Line in 10~12 Feb 2010

粒子后, 积冰厚度处于维持期无明显增长。在 10:00 至 13:00 期间, 积冰厚度跃增至 22.5 mm, 这可能与正午太阳短波辐射起到增温作用有关, 雪粒子在下降过程中表面融化有一层水膜, 湿雪表面的粘黏作用增加了电线对其的捕获效率, 在温度仍然低于 0 °C 的条件下冻结在输电线表面, 这使得积冰厚度陡然增至最大值。

11 日 20:00 之后, 850 hPa 高度以上的西南暖湿气流逐渐变为偏西气流 (如图 8a 所示), 这使得逆温层内温差减小, 逆温强度减弱 (如图 7c 所示), 但整层大气均为冷层, 地面温度在 -4 °C 左右, 积冰能够维持。至 12 日 08:00, 逆温抬升 (图 7d 所示), 且日出之后地面温度逐渐升高, 在正午达到 0 °C 以上, 积冰消融。

综合以上分析发现, 在降水型积冰过程中, 因冷暖空气交汇使得在 900~700 hPa 之间形成逆温层, 并且存在较为深厚的暖层, 这是冻雨能够形成的重要条件, 对于积冰的维持和发展起到重要的作用。

7 结论

(1) 对湖北地区发生积冰过程时的天气形势进行分析, 将形成电线积冰的高空环流形势分为小槽发展型、横槽型和低槽东移型 3 种基本类型, 发生频次分别为 43.8%、31.2%、25%。

(2) 电线积冰主要发生在每年的 11 月至次年 2 月, 1 月是积冰多发期, 平均积冰小时数为 65 h, 2 月次之。形成时间主要在傍晚和夜间, 大多在正午时消融。

(3) 相较于逆温层出现的频次, 逆温强度对积冰维持时间的影响要更加明显: 逆温层中逆温强度越大, 积冰过程维持的时间越长。相较于逆温强度, 逆温层出现的频次对积冰厚度最大值的影响要更加明显: 逆温层出现的频次越大, 则积冰厚度的值越大。

(4) 降水基本都出现在积冰厚度的快速增长期, 说明雨滴在积冰增长的过程中具有显著的贡献, 增大降水积冰过程中积冰厚度的增长速率。在降水积冰过程中, 因冷暖空气交汇使得在 900~700 hPa 之间形成逆温层, 并且其中存在深厚的暖层, 这对于积冰的维持和发展起重要的作用。

参考文献 (References)

- Ahti K, Makkonen L. 1982. Observation on rime formation in relation to routinely measured meteorological parameters [J]. *Geophysica*, 19: 75–85.
- 陈继东, 张予. 2008. 华中电网覆冰监测系统典型实例分析 [J]. *电瓷避雷器*, (5): 8–10. Chen Jidong, Zhang Yu. 2008. Typical case analysis of icing load on-line monitoring system of central china power grid [J]. *Insulators and Surge Arresters (in Chinese)*, (5): 8–10, doi: 10.16188/j.isa.1003-8337.2008.05.012.
- DeGaetano A T, Belcher B N, Spier P L. 2008. Short-term ice accretion forecasts for electric utilities using the weather research and forecasting model and a modified precipitation-type algorithm [J]. *Wea. Forecasting*, 23 (5): 838–853, doi: 10.1175/2008WAF2006106.1.
- 丁一汇, 王遵亲, 宋亚芳, 等. 2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系 [J]. *气象学报*, 66 (5): 808–825. Ding Yihui, Wang Zunya, Song Yafang, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66 (5): 808–825, doi: 10.11676/qxb2008.074.
- Fu P, Farzaneh M, Bouchard G. 2006. Two-dimensional modelling of the ice accretion process on transmission line wires and conductors [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 46 (2): 132–146, doi: 10.1016/j.coldregions.2006.06.004.
- 高守亭, 张昕, 王瑾, 等. 2014. 贵州冻雨形成的环境场条件及其预报方法 [J]. *大气科学*, 38 (4): 645–655. Gao Shouting, Zhang Xin, Wang Jin, et al. 2014. The environmental field and ensemble forecast method for the formation of freezing rain over Guizhou Province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (4): 645–655, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1403.13250.
- Huffman G J, Noman G A. 1988. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 116 (11): 2172–2182, doi: 10.1175/1520-0493(1988)116<2172:TSWRPA>2.0.CO;2.
- 贾然, 牛生杰, 李蕊. 2010. 鄂西电线积冰微物理观测研究 [J]. *气象科学*, 30 (4): 481–486. Jia Ran, Niu Shengjie, Li Rui. 2010. Observational study on microphysical characteristics of wire icing in west Hubei [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 30 (4): 481–486, doi: 10.3969/j.issn.1009-0827.2010.04.008.
- 江祖凡. 1983. 电线积冰增长速度的研究 [J]. *科学通报*, 28 (15): 928–931. Jiang Zufan. 1984. The growth rate of ice accretion on power line [J]. *Chinese Science Bulletin*, 29 (4): 501–504.
- 李杰, 郭学良, 周晓宁, 等. 2015. 2011~2013 年中国冻雨、冻毛毛雨和冻雾的特征分析 [J]. *大气科学*, 39 (5): 1038–1048. Li Jie, Guo Xueliang, Zhou Xiaoning, et al. 2015. Characteristics of freezing rain, freezing drizzle, and freezing fog in China from 2011 to 2013 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39 (5): 1038–1048, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1501.14239.
- 罗宁, 文继芬, 赵彩, 等. 2008. 导线积冰的云雾特征观测研究 [J]. *应用气象学报*, 19 (1): 91–95. Luo Ning, Wen Jifen, Zhao Cai, et al. 2008.

- Observation study on properties of cloud and fog in ice accretion areas [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 19 (1): 91–95, doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2008.01.012.
- Makkonen L. 1998. Modeling power line icing in freezing precipitation [J]. *Atmospheric Research*, 46 (1–2): 131–142, doi: 10.1016/S0169-8095(97)00056-2.
- 毛淑君, 李栋梁. 2015. 基于气象要素的我国南方低温雨雪冰冻综合评估 [J]. *冰川冻土*, 37 (1): 14–26. Mao Shujun, Li Dongliang. 2015. Comprehensive assessment of low temperature, snow and freezing weather in southern China based on meteorological elements [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 37 (1): 14–26, doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0002.
- McKay G A, Thompson H A. 1969. Estimating the hazard of ice accretion in Canada from climatological data [J]. *J. Appl. Meteor.*, 8 (6): 927–935, doi: 10.1175/1520-0450(1969)008<0927:ETHOIA>2.0.CO;2.
- 孟毅, 陈继东, 胡丹晖. 2011. 架空输电线路覆冰在线监测系统的运行 [J]. *中国电力*, 44 (5): 38–40. Meng Yi, Chen Jidong, Hu Danhui. 2011. Application of an icing on-line monitoring system in overhead transmission lines [J]. *Electric Power* (in Chinese), 44 (5): 38–40, doi: 10.3969/j.issn.1004-9649.2011.05.009.
- Niu S J, Zhou Y, Jia R, et al. 2012. The microphysics of ice accretion on wires: Observations and simulations [J]. *Science China Earth Sciences*, 55 (3): 428–437, doi: 10.1007/s11430-011-4325-8.
- 曲巧娜, 李栋梁, 熊海星, 等. 2012. 冬季中东急流对中国西南地区覆冰形成的影响 [J]. *大气科学*, 36 (1): 195–203. Qu Qiaona, Li Dongliang, Xiong Haixing, et al. 2012. The impact of the middle east jet stream to the freezing over southwestern China in winter [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (1): 195–203, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.15.
- 孙建华, 赵思雄. 2008. 2008 年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结结构分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 368–384. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2008. Quasi-stationary front and stratification structure of the freezing rain and snow storm over southern China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (4): 368–384, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2008.04.03.
- Sundin E, Makkonen L. 1998. Ice loads on a lattice tower estimated by weather station data [J]. *J. Appl. Meteor.*, 37 (5): 523–529, doi: 10.1175/1520-0450(1998)037<0523:ILOALT>2.0.CO;2.
- 谭冠日. 1982. 电线积冰若干小气候特征的探讨 [J]. *气象学报*, 40 (1): 13–23. Tan Guanri. 1982. On the microclimatological characteristics of icing on wires [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 40 (1): 13–23, doi: 10.11676/qxxb1982.002.
- 陶玥, 史月琴, 刘卫国. 2012. 2008 年 1 月南方一次冰冻天气中冻雨区的层结和云物理特征 [J]. *大气科学*, 36 (3): 507–522. Tao Yue, Shi Yueqin, Liu Weiguo. 2012. Characteristics of stratification structure and cloud physics of the freezing rain over southern China in January 2008 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (3): 507–522, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11082.
- 滕中林. 1978. 架空线路的结冰及冰厚计算 [J]. *中国电力*, (3): 53–56. Teng Zhonglin. 1978. Study on the icing and the calculation of ice thickness in overhead transmission lines [J]. *Electric Power* (in Chinese), (3): 53–56.
- 王遵娅. 2011. 中国冰冻日数的气候及变化特征分析 [J]. *大气科学*, 35 (3): 411–421. Wang Zunya. 2011. Climatic characters and changes of ice-freezing days in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (3): 411–421, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.03.03.
- Wen Z, Chan J C L, Chen C, et al. 2009. Synoptic-scale controls of persistent low temperature and icy weather over southern China in January 2008 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (11): 3978–3991, doi: 10.1175/2009MWR2952.1.
- 杨靖波, 李正, 杨风利, 等. 2008. 2008 年电网冰灾覆冰及倒塔特征分析 [J]. *电网与水力发电进展*, 24 (4): 4–8. Yang Jingbo, Li Zheng, Yang Fengli, et al. 2008. Analysis of the features of covered ice and collapsed tower of transmission line snow and ice attacked in 2008 [J]. *Advances of Power System and Hydroelectric Engineering* (in Chinese), 24 (4): 4–8, doi: 10.3969/j.issn.1674-3814.2008.04.002.
- 阳林, 郝艳捧, 黎卫国, 等. 2010. 输电线路覆冰与导线温度和微气象参数关联分析 [J]. *高电压技术*, 36 (3): 775–781. Yang Lin, Hao Yanpeng, Li Weiguo, et al. 2010. Relationships among transmission line icing, conductor temperature and local meteorology using grey relational analysis [J]. *High Voltage Engineering* (in Chinese), 36 (3): 775–781, doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.2010.03.033.
- 叶成志, 吴贤云, 黄小玉. 2009. 湖南省历史罕见的一次低温雨雪冰冻灾害天气分析 [J]. *气象学报*, 67 (3): 488–500. Ye Chengzhi, Wu Xianyun, Huang Xiaoyu. 2009. A synoptic analysis of the unprecedented severe event of the consecutive cryogenic freezing rain in Hunan Province [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 67 (3): 488–500, doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2009.03.016.
- 曾明剑, 陆维松, 梁信忠, 等. 2008. 2008 年初中国南方持续性冰冻雨雪灾害形成的温度场结构分析 [J]. *气象学报*, 66 (6): 1043–1052. Zeng Mingjian, Lu Weisong, Liang Xinzong, et al. 2008. Analysis of temperature structure for persistent disastrous freezing rain and snow over southern China in early 2008 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66 (6): 1043–1052, doi: 10.11676/qxxb2008.093.
- Zhou Y, Niu S J, Lü J J. 2013. The influence of freezing drizzle on wire icing during freezing fog events [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30 (4): 1053–1069, doi: 10.1007/s00376-012-2030-y.
- Zhou Y, Niu S J, Lü J J, et al. 2012. Meteorological conditions of ice accretion based on real-time observation of high voltage transmission line [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57 (7): 812–818, doi: 10.1007/s11434-011-4868-2.
- 张予. 2008. 架空输电线路导线覆冰在线监测系统 [J]. *高电压技术*, 34 (9): 1992–1995. Zhang Yu. 2008. Study on an icing on-line monitoring system in overhead transmission lines [J]. *High Voltage Engineering* (in Chinese), 34 (9): 1992–1995, doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.2008.09.033.
- 张志劲, 蒋兴良, 胡建林, 等. 2010. 环境参数对绝缘子表面覆冰增长的影响 [J]. *高电压技术*, 36 (10): 2418–2423. Zhang Zhijin, Jiang Xingliang, Hu Jianlin, et al. 2010. Influence of environment parameters on the icing accretion on the surface of insulator [J]. *High Voltage Engineering* (in Chinese), 36 (10): 2418–2423, doi: 10.13336/j.1003-6520.hve.2010.10.015.