

李登文,杨静,吴兴洋. 2008 年低温冰冻雨雪灾害天气过程中贵州电线积冰气象条件分析[J]. 气象,2011,37(2):161-169.

2008 年低温冰冻雨雪灾害天气过程中 贵州电线积冰气象条件分析^{*1}

李登文¹ 杨 静¹ 吴兴洋²

1 贵州省气象台, 贵阳 550002

2 贵州省气候中心, 贵阳 550002

提 要: 利用气象电线积冰观测资料、探空观测数据、自动站资料以及 NCEP 再分析资料, 分析 2008 年低温冰冻雨雪灾害天气过程中贵州电线积冰的分布特点, 讨论了贵州电线积冰的气象条件, 并对电线积冰的融冰条件进行了讨论。分析认为此次低温冰冻雨雪灾害天气过程中, 贵州电线积冰严重, 积冰范围广、时间长, 相对而言贵州中东部地区积冰较厚; 贵州电线积冰主要是雨凇、雾凇或者雨凇、雾凇形成的混合积冰; 静止锋降水和锋面逆温在雨凇的形成过程中起着重要的作用; 气温较长时间维持在 $0\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及低层水汽充沛决定了电线的积冰及其增长, 积冰融化时, 相对湿度在 85% 以下, 积冰停止发展, 且融冰快慢与局地升温程度有关。

关键词: 电线积冰, 雨凇, 雾凇, 锋面逆温, 融冰

Discussion on Genesis of Wire Icing in Guizhou During the Freezing Rain and Snow Storm in January 2008

LI Dengwen¹ YANG Jing¹ WU Xingyang²

1 Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002

2 Guizhou Climate Center, Guiyang 550002

Abstract: Using the meteorological wire icing observations, radio sonde and surface observations, and NCEP reanalysis data, the distribution and intensity of wire icing in Guizhou Province during the hazardous sleet in 2008 are analyzed. The meteorological conditions for wire ice accretion and its melting in Guizhou are discussed. The results show that the serious wire ice accretion in Guizhou in the sleet is characterized by wide range, long lasting time and thicker wire ice in the east than the west. Wire icing events in Guizhou are mainly in forms of glaze, rime and mixed freezing consisting of glaze and rime. Quasi-stationary frontal precipitation and frontal temperature inversion play an important role in the formation of glaze ice. The condition that temperature maintains within $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ for a relatively long period and sufficient water vapor exists in the lower level determines the wire ice accretion and its growth. Wire ice stops growing when relative humidity is below 85%, and the melting rate of wire ice is relevant to the local temperature rising rate.

Key words: wire icing, glaze, rime, frontal inversion, melting

引 言

2008 年 1 月 12 日起, 贵州各地自东北向西南先后受到强冷空气影响, 气温急剧下降, 11 日到 13

日 48 小时内日平均气温下降幅度在 $5.7\sim 20.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 其中贵州东部降温达到了 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上, 13 日夜间断贵州中北部大部分县(市、区)最低气温降至 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 开始出现雨夹雪或冻雨。由于罕见低温雨雪冰冻灾害天气维持时间长, 贵州大部分地区均出现

* 国家自然科学基金(40865003/D0505), 贵州省科技厅黔科合重大专项字[2006]6034 号共同资助

2009 年 12 月 17 日收稿; 2010 年 7 月 26 日收修定稿

第一作者: 李登文, 从事中短期天气预报研究. Email: lidengwen_gz@sina.com

不同程度的电线积冻。这次低温冰冻雨雪灾害天气给贵州的电力通讯设备、交通、工农业生产及人民生活造成了重大影响。据贵州省发改委数据,在这次罕见的灾害天气过程中,贵州电网因灾损失严重,贵州省先后有 50 个县市受停电影响,11 个县全部停电,1 月 29 日贵州曾进入大面积一级停电事件应急状态。

电线积冰是贵州冬季常见的气象灾害。贵州过去也曾发生过严重的输电线积冰灾害,如 1984 年 1—2 月华东、贵州、云南因电线覆冰造成局部输电网络崩溃。

贵州是我国出现雨凇最多的地区,研究表明^[1-2],雾凇多见于云贵高原和一些海拔 1000 m 以上的高山地区,由雨凇、雾凇引起线路覆冰,危害极大。电力、气象等部门学者都曾注意过电线积冰的危害性,开展过贵州高海拔地区电线覆冰等一系列有关电线积冰的研究^[2],从电线覆冰的气象学问题、冰区划分和抗冰等方面都进行过一些分析研究。罗宁等^[3]选择贵州西部、北部、中部进行外场观测,分析贵州导线积冰的云物理参数特征,认为在积冰天气过程中,贵州云滴浓度,特征平均直径没有显著性地区差异,导线积冰增长率与含水量的大小成正比,当风速超过 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,积冰增长率与风速有较明显的正比关系。陈柏堃等^[4]分析了金华市电线积冰的气候特征,并提出了灾害的防御建议。王晓兰等^[5]曾对造成 2005 年 2 月湖南输电线路覆冰的冰冻天气进行了分析,建议对不同高程、不同地形特点设置覆冰观测站,根据各行业的不同,分层次制作冰冻预报。以上多是从云物理机理和冻雨与积冰的关系,及气候特征等方面对电线积冰进行分析。一些专家也对 2008 年初冰冻天气进行了研究^[14-16]。陶诗言^[6]对 2008 年 1 月冰雪灾害过程的分析显示,这次南方天气过程最突出的特点是江淮流域冬季的降水具有夏季梅雨锋降水的性质,江南南部的冻雨历史少见,从高原过来的高位涡移到静止锋上空,引起静止锋锋生。丁一汇^[7]研究表明,2008 年 1 月中国南方的冰雪灾害的特征是降雪、冻雨和降雨 3 种天气并存,冻雨是导致南方致灾的主要原因,低温、雨雪、冻雨强度大,持续时间长。赵琳等^[8]分析了此次冰雪灾害对交通、电力、通讯、农业等行业的影响,其中湖南、江西、贵州、广西的电力设施受灾最重。黄小玉等^[9]也对 2008 年湖南极端冰冻灾害进行了研究,表明大气低层的逆温层结、融化层、地面温度

在 0°C 以下是形成湖南冰冻的关键因子。而目前对于贵州地区电线积冰的天气成因和气象条件等方面尚缺乏更多的总结和分析,为提高气象延伸服务的能力,针对 2008 年低温冰冻雨雪灾害天气过程,本文就这次灾害性天气贵州电线积冰的成因和气象条件进行分析,以提高对这一区域电线积冰的预报分析能力。

1 数据资料说明

地面气象观测规范中^[10],关于气象台站电线积冰观测,规定要求测定自积冰形成时,开始记录积冰现象和开始积冰时间,观测和记录每一次积冰过程的最大直径和厚度,气象台站观测电线积冰所用导线是采用直径 4 mm(又称 8 号)、长 100 cm 铁(钢)丝作为导线,两端在距端点 5 cm 处弯成直角,电线积冰观测由南北和东西支架上的上导线(称“第一对导线”)及其两个方向上的下导线(称“第二对导线”)组成,支架距地高度分别为 220 cm 和 160 cm。

贵州地处云贵高原,平均海拔 1100 m,实际输电线路多在山区穿梭,山区空气中液态水含量一般较高,在一定的气象条件下,会造成电线覆冰和输电线路的舞动,另外,实际输电线路的走向和高度(一般距地面 30~60 m)及导线直径相对地面气象台站的观冰导线架更容易覆冰,因此实际野外架空输电线路覆冰较气象台站观测的严重。

文中分析所用积冰资料为贵州 82 个气象测站每日 08 时气象观测的电线积冰数据,尽管这与实际野外架空的输电线积冰直径有一定的差异,但气象观测的电线积冰数据一定程度上可以反映当地的积冰强度。另外,本文结合贵州县站地面气象要素资料、贵阳高空气象探测站 L 波段探测资料中的高空温湿要素秒数据等常规气象业务观测资料,以及 NCEP 再分析资料进行了对应分析。

2 2008 年初贵州电线积冰概述

范围广、灾害重、持续时间长是贵州 2008 年初电线积冰的特点。

2008 年 1 月 13 日贵州有 24 个观冰站开始出现电线积冰,主要分布在贵州东部和西部边缘地区,积冰厚度为 4~12 mm。19 日开始,贵州全省电线积冰持续加重,范围进一步扩大,以北部、东部最为

突出,除南部外,贵州全省积冰范围增至55站,并且积冰厚度也在持续增加。从21日起积冰情况持续加重。1月19日至2月2日是积冰最重时段(图1),全省82个观冰站中,每日有超过50个县站出现电线积冰,占全省县站的一半以上。其中1月27—30日积冰范围最大,有68~70个县站出现积冰。这期间贵州中东部地区观冰站电线积冰厚度普遍达20~60 mm。1月23日至2月2日期间,每日有超过15个观冰站积冰厚度超过20 mm,以1月29日铜仁地区万山特区出现的直径83 mm的电线积冰为最大。1月28日是贵州全省积冰范围最大的一天,全省有70个观冰站出现积冰,中东部地区电线积冰普遍达40 mm以上。2月3日后,贵州全省的电线积冰的范围开始缩小,贵州的东部和北部地区积冰逐渐融化,之后贵州中、西部的积冰情况也在逐渐缓解。

从1月13日贵州电线积冰出现,至2月14日积冰大部融化,贵州全省性持续积冰时间长达33天之久,数据分析显示,相对而言贵州中东部地区电线积冰厚,普遍超过20 mm。由于贵州输电线抗覆冰设计中东部地区为10 mm、西部地区为15~20 mm,中东部地区电线积冰长时间超过设计标准,而西部地区只是局部地区短时间超过设计标准,因此在这次低温冰冻雨雪灾害天气过程中,贵州中东部地区电线积冰造成的损失巨大,先后有50个县市受停电影响。

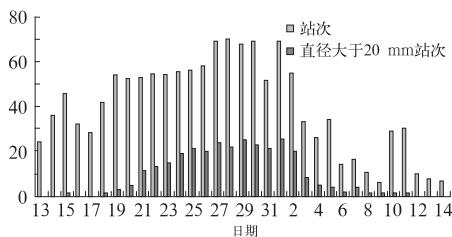


图1 2008年1月13日至2月14日

贵州电线积冰强度

Fig. 1 Intensity features of wire icing in Guizhou from 13 January to 14 February, 2008

3 电线积冰成因探讨

3.1 准静止锋维持时间长

贵州地处青藏高原东南侧,平均海拔1100 m,自西向东、自中部向南、向北三面倾斜,西部海拔在2900~1200 m,中部海拔在1200~800 m,东部地区

海拔在800 m以下,贵州西部属于平均海拔相对较高的乌蒙山区,因此冬季冷锋由于受到山地阻挡和适当流场共同作用而容易在贵州西部形成准静止锋^[1]。

2008年初中纬度大气环流持续异常,导致我国南方地区严重的低温雨雪冰冻天气。赵思雄等^[11]对中纬度的大气环流进行了分析,其结果表明,1月10日至2月2日长达20余天中高纬西风带呈 Ω 型阻塞形势,阻高两侧的低压区有利于冷空气持续地影响我国,副热带高压位置偏西偏北,致使 Ω 阻高东侧500 hPa出现横槽,引导冷空气不断南下,西风带上南支槽异常活跃。这种异常大气环流导致滇黔准静止锋长时间维持,从而使贵州出现近一个月的异常持续低温阴雨冰冻天气。

分析冰冻过程中850 hPa风场(图2)可见,在贵州南部到贵州西部有一条东北—西南向横切变,近似代表着静止锋的位置和走向,该静止锋从1月13日建立,维持到2月14日,长达32天之久。由于这条近似东西向的准静止锋较长时间维持在贵州南部,锋前的偏南气流源源不断地将水汽向北输送。从水汽通量散度场(图略)也可清楚地看到,从850~500 hPa在贵州都有较强的水汽辐合。

用850 hPa上等 θ_{se} 线的分布来表示静止锋的位置。由图2可见在25°~23°N附近都维持着一个假相当位温的密集区,说明这一期间锋区的位置停滞少动。850 hPa上23°N以南西南暖湿气流强盛,贵州近地面为偏东北冷空气,来自低纬的暖湿空气沿着锋面向上爬升,导致温度随高度上升而增加,形成了锋面逆温。

图3为强冰冻过程中沿贵州中部106°E的平均温度和平均相对湿度剖面图,由图注意到,22°~35°N存在锋面逆温,25°~31°N之间逆温最强,逆温层相对湿度达到80%以上,表明逆温层附近的水汽充沛,为锋面和锋面附近大气中水成物相变提供了丰富的水汽条件。高湿区向北倾斜,在30°N附近伸展到700 hPa,而在27°~22°N之间,高湿区仅伸展到850 hPa,逆温层之上存在一条显著的等湿度密集带,近似表征了静止锋锋区的伸展,表明在贵州该静止锋的伸展高度在850 hPa附近。

3.2 雨淞和雾淞引起电线积冰

贵州冬季全省平均降雪日数仅为9.4天,因此冬季造成贵州电线积冰的主要是雨淞、雾淞或者雨

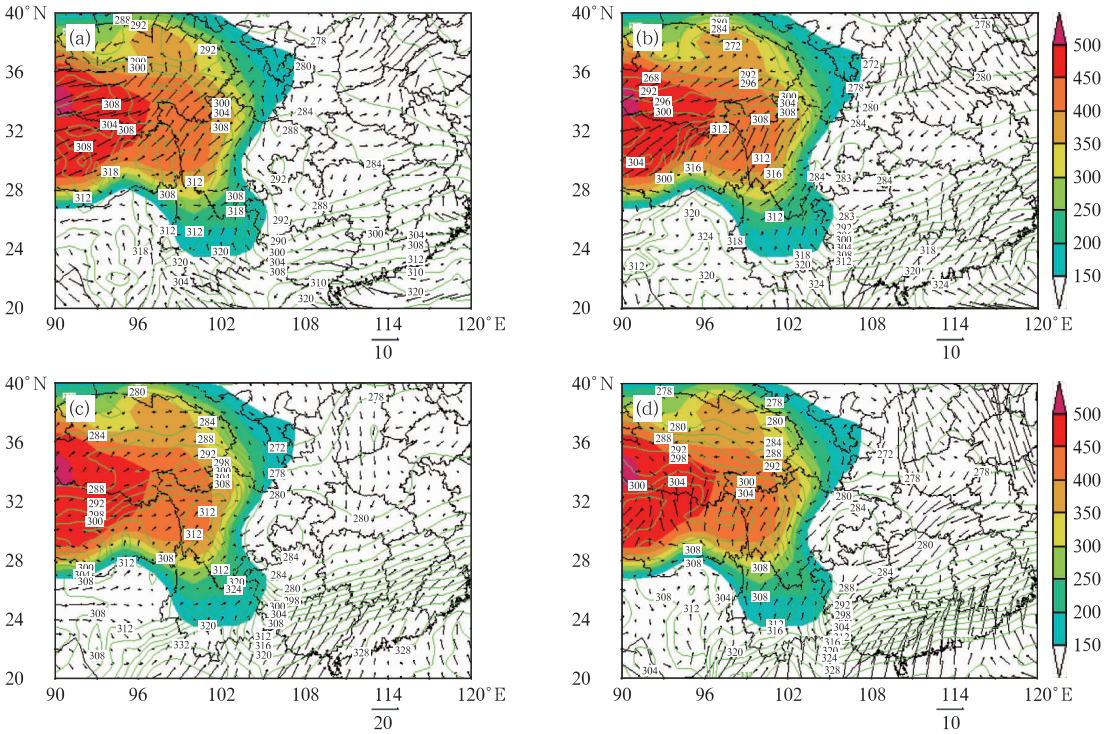


图 2 2008 年 1 月 17 日(a),22 日(b),28 日(c)和 30 日(d) 08 BT 850 hPa 的 θ_{se}
(实线,单位:K)和 风矢量(箭头)
阴影区为地形高度 ≥ 1500 m

Fig. 2 Pseudo-equivalent potential temperature (solid lines, K) and wind vectors at 850 hPa, shadings represent the area where the topography is greater than 1500 m
(a) 08 BT 17, (b) 08 BT 22, (c) 08 BT 28, and (d) 08 BT 30 January 2008

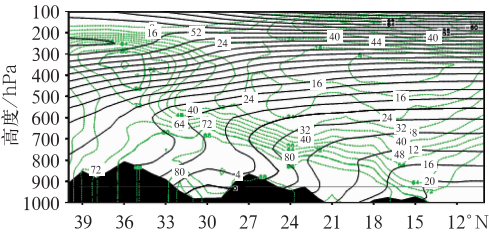


图 3 沿 106°E 的 2008 年 1 月 11 日至 2 月 2 日平均温度(实线,单位:℃)和平均相对湿度(虚线,单位:%)垂直剖面图

Fig. 3 The vertical cross section through 106°E for average temperature (solid, °C) and average relative humidity (dotted, %) during the period of 11 January to 2 February 2008

淞、雾淞形成的混合积冰。雨淞是危害输电线路最严重的天气现象,雨淞形成电线积冰是因过冷却水滴进入气温在 0℃以下的气层,与低温状态下的电线接触,电线就成为了冻雨很好的附着体,使过冷却液态水通过相变变成固态水,从而形成透明或半透明的冰层。由雨淞形成的电线积冰,强度大、冰层密实。雾淞是由过冷却雾滴或水汽直接凝结在 0℃以

下的物体上的冻结物。贵州西部高寒山区,冬季准静止锋长时间维持,在空气湿度较大,气温降至 0℃以下极易形成雾淞,雾淞是从水汽直接凝华而形成附着在物体上的冰晶,这样即使无降水出现,在野外高架线上也可以造成积冰。雾淞是一种结构松散的白色冻结物,易脱落,植物叶面的双面覆冰就是雾淞;而雨淞形成的是透明或半透明的光滑冰层,冰层密度大,不易脱落,植物叶面形成的单面覆冰是雨淞。在贵州山区,野外湿度大,多是先出现雾淞,再出现雨淞,随着雾淞、雨淞的产生,电线增加了捕获大气中悬浮过冷却雾滴和水滴的碰撞面积,电线上堆积的冰不断增加,冰就将电线层层包裹起来,在风和一定温湿条件下如果不融化脱落,雨淞和雾淞形成的混合积冰,就对输电线的运行安全构成危害^[2]。

2008 年 1 月 11 日至 2 月 14 日的气象观测中,贵州气象测站中有 80 个站都出现了雨淞。可见在这次低温冰冻雨雪天气过程中,贵州主要是雨淞形成积冰。但是雾淞对积冰的贡献也不可忽视,有 4 个测站观测有雾淞出现。威宁县在 1 月 12 日、1 月 30 日至 2 月 4 日和 2 月 9—15 日出现雾淞,大方县

在1月24日至2月2日、2月10—11日期间出现雾凇。这两个测站都地处贵州西部高寒山区,海拔在1700 m以上。另外贵州东北部的万山特区也是此次冰冻的重灾区,1月12日至2月10日有雨凇出现,同时1月12日至2月2日有雾凇出现(仅1月17日中断)。另一个积冰重灾区,贵阳市的开阳县电线积冰最大厚度46 mm,在1月12日至2月14日、1月25日至2月8日出现了雾凇。由于空气湿度接近冰面饱和,很多高架线上出现雾凇积冰,加上低温细雨不断,又有雨凇产生,雨凇、雾凇共同作用,加重了积冰的厚度。而实际的输电线路多分布在山区,山区空气湿度大,因此山区高架线出现雾凇的可能性更大,由此推断雾凇引起贵州地区山区高架线积冰对实际野外架空输电线路的影响贡献较大。

3.3 电线积冰与逆温层结的关系

中央气象台^[1]根据对我国雨凇天气资料的分析认为,产生雨凇时大气垂直结构可分为冰晶层、暖层、冷层等几层,冰晶层在500 hPa高度上温度需达到 $-14\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,伴有水汽凝结成冰晶或雪花,暖层或称融化层(常在距地面2000~4000 m的高度)有足够的暖层使来自冰相水成物层的冰晶或雪花融化为液态降水,从暖层中下降的液态雨滴进入低层低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷却层(常为距地面2000 m以下),很快热交换成为过冷却雨滴,这些过冷却液滴下降碰到地面温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的任何物体,就比较容易发生冻结。

李登文等对2008年冰冻灾害贵州冻雨垂直结构分析表明^[12],贵州冻雨的垂直结构除这种经典的三层模式外,还有两种类型:一类是“一层模式”,指600 hPa高度以下至地面的中低空处于冷湿的环境,低层温度均低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,低层在有逆温且水汽条件充沛的情况下,有雨凇或雾凇的形成;另一类为“二层模式”,指冷垫与暖层共存,即在冷垫之上存在一层暖湿层或融化层,云顶高度通常没有达到500 hPa。由于云顶高度很难达到500 hPa,大气水成物经过凝结及碰并呈液态水成物,在进入低层冷却层后,由于距离地面高度有限,缺乏足够的垂直冷却距离和物理转化时间成为固态水成物,这样液态水成物只能转化为过冷却液态水成物落到地面。以下探空资料对贵阳低温冰冻雨雪灾害天气期间逆温层结的讨论也佐证了这点。

从贵阳高空气象探测站L波段探测系统高空

气象要素秒数据,分析积冰期逆温层结的特征。贵阳在静止锋影响期间,锋面逆温长时间维持。云顶高度平均为663 hPa,云顶温度大多高于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明云中多以过冷却水滴为主。从气温与逆温层底温度的时间序列图可见(图4),逆温层底温度普遍在 $-10\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围,逆温层顶温度在 $-7\sim7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。 $-4\sim0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的云,一般全是由过冷却水滴形成,达到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,云中冰晶及冰相水成物存在的几率为50%^[13]。据此推断,在这次低温冰冻雨雪灾害天气过程期间,逆温层底部附近应该主要以过冷却水滴为主,非常有利于冻雨的产生。以1月26日07时和2月6日19时贵阳逆温为例。1月26日07时逆温顶部温度为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$,高度在2495 m附近,逆温底部高度为1523 m,温度为 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$,逆温层厚度为972 m,地面气温为 $-5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,云顶高度在650 hPa附近,云顶温度 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,云中以过冷却水滴为主,当它进入近地面温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷层,由于地面气温低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此容易产生电线积冰。2月6日19时贵阳低层逆温顶温度为 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$,高度在2577 m,逆温底高度为2222 m,温度为 $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$,低层逆温层厚度为355 m,地面气温为 $-0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,云顶高度在660 hPa附近,云顶温度 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$,逆温层为冷性,无融化层,云中也以过冷却水滴为主,是过冷云直接转为过冷雨的过程。

在低温冰冻雨雪灾害天气维持过程中,贵州地面气温和逆温层底温度均在 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,强逆温层的融化和低层低温冷却下,非常有利于冻雨的形成及在电线上形成覆冰。图5为贵阳1月13日07时至2月13日19时高空逆温高度、厚度序列图,分析可见贵阳积冰期逆温层厚度大多在500~1000 m之间,积冰期逆温强度一般在 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (图略),逆温强度最强出现在1月28日,逆温强度达到 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,1月24日逆温强度也达到了 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。积冰期的逆温层顶高大多在3000 m附近,逆温层底高度大都处在1500 m以内,普遍在400~1000 m,逆温层底较低。2月8日以后逆温层底高超过1500 m,逆温层抬到中空,地面气温开始升高,积冰开始融化。

将形成贵州冻雨的云体分为锋区云体和锋上云体两类。锋区云体有锋面逆温,云体位于冷暖气团过渡区中的云体,云体的云顶不超过逆温顶部的云体;锋上云体也有锋面逆温存在,不但云体下部处于锋区中,而且云顶超过逆温顶部的云体。2008年初

这次低温冰冻雨雪过程中,贵州冻雨仍然是这两类云体造成,云底高度均在逆温底部附近,云底低,说明近地层垂直冷却快,抬升凝结高度低。经计算分析冰冻过程期间贵阳抬升凝结高度平均仅为 309 m。可见,积冰期逆温强度大,持续时间长。逆温层的存在,一是保证云体内温度较高(相对 0° 和大气对流层正常垂直减温率而言),大气水成物在垂直空间上存在融化冷却,有利于冻雨形成。二是逆温层的抑制作用造成大气近地层湿度大,水汽易达到饱和,且大气水成物和电线上的积冰在这种近似饱和的环境中蒸发较小。

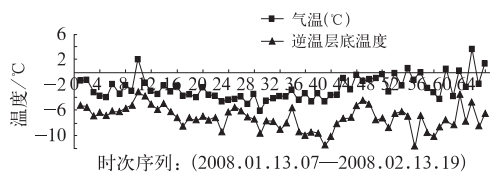


图 4 贵阳 2008 年 1 月 13 日 07 时至 2 月 13 日 19 时气温、高空逆温序列图

Fig. 4 Temperature of inversion layer and air temperature in Guiyang from 07:00 BT 13 January to 19:00 BT 13 February 2008

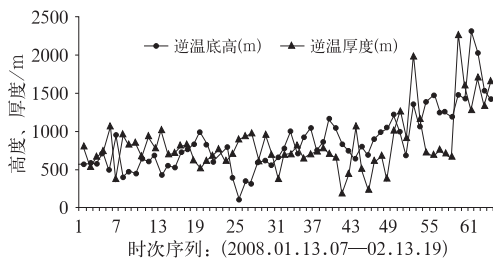


图 5 贵阳 2008 年 1 月 13 日 07 时至 2 月 13 日 19 时逆温高度、厚度序列图

Fig. 5 The thickness and height of inversion layer in Guiyang from 07:00 BT 13 January to 19:00 BT 13 February 2008

4 电线积冰的气象条件分析

4.1 积冰期的温度条件

电线积冰是在特定的温度、湿度和风的条件下形成的。在这次低温雨雪冰冻灾害天气过程中,除贵州南部地区外,贵州大部地区日平均气温在 0°C 以下,气温变化较小,且长时间维持在较低状况,使得积冰持续增长或维持,以受灾较重的贵阳和都匀为例。

贵阳市区观测到的电线积冰从 1 月 13 日至 2

月 11 日。1 月 12 日 21 时贵阳最低气温降至 -0.1°C , 13 日 03 时气温低于 -1°C , 13 日 21 时气温低于 -2°C , 到 16 日 12 时气温均在 $-3.3\sim-1^{\circ}\text{C}$, 16 日 13—14 时短暂回升到 0.1°C 和 0.3°C , 15 时又降低到 -0.9°C , 到 17 日 11 时绝大多数时间气温均在 $-4\sim-1^{\circ}\text{C}$, 17 日 12 时至 18 日 23 时气温回升至 $0\sim2.6^{\circ}\text{C}$, 从 18 日 0 时又降至 -0.6°C , 之后一直低于 0°C , 这样持续到 2 月 5 日的 15 时短暂回升至 0.1°C , 17 时后又降至 0°C 以下, 一直到 2 月 6 日 13 时才回升到 0°C 以上, 但夜间气温都在 0°C 以下。气温低于 0°C 的时间从 1 月 12 日夜间至 2 月 6 日午后, 期间虽有个别时段回升到 0°C 附近, 但非常短暂, 持续低于 0°C 的时间长达 26 天, 平均气温低于 0°C 。气温最低时段是 1 月 18 日 13 时至 2 月 2 日 11 时, 气温都低于 -2°C , 以 1 月 27 日 07 时和 08 时的 -6.3°C 为最低。

实际观测数据显示, 1 月 17 日至 2 月 1 日积冰直径则持续增加, 冰层最厚至 60 mm, 日增幅在 $1\sim29\text{ mm}$, 大部分在 $2\sim6\text{ mm}$, 最大增幅出现在 1 月 24 日的 29 mm, 平均气温为 -4.5°C 。积冰厚度的增加是一个累积过程, 因此与气温的持续偏低有关。在积冰的持续累积过程中(图 6), 贵阳日平均气温大部低于 -2°C , 24 小时变温累积与日平均气温的走向有着很大的相似, 气温在 0°C 以下, 气温的累积降幅不断增大, 积冰持续增长, 日平均气温较长时间维持在 $-5\sim-2^{\circ}\text{C}$ 之间。2 月 3 日后日平均气温开始间断地回升到 0°C 以上, 积冰开始融解, 但最低气温仍在 -2°C 以下, 故积冰的融解较缓慢。

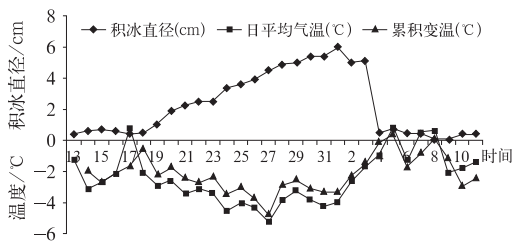


图 6 2008 年 1 月 13 日至 2 月 11 日 贵阳冰冻过程日平均气温、累积变温和积冰的演变

Fig. 6 Evolution of mean temperature, accumulative variable temperature and icing during the process of freezing in Guiyang

东部地区受灾严重的都匀市(图 7), 最大电线积冰厚度达 70 mm。该市从 1 月 13 日起平均气温降至 0°C 以下, 至 2 月 2 日, 平均气温持续 21 天低于 0°C ,

最低气温至 2 月 14 日一直低于 0℃。1 月 18 日至 2 月 2 日积冰厚度不断增加,1 月 31 日至 2 月 2 日达到了 70 mm 的峰值,积冰直径在 60~70 mm 的高值区维持了 8 天,这期间最低气温在-6.6~-3.8℃之间,平均气温也较低,在-5.8~-1.8℃间。

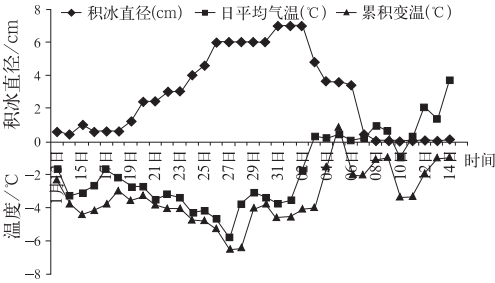


图 7 2008 年 1 月 13 日至 2 月 14 日都匀冰冻过程日平均气温、最低气温和积冰的演变

Fig. 7 Evolution of mean temperature, minimum temperature and icing during the process of freezing in Duyun

4.2 积冰期的水汽条件

利用贵阳高空气象探测站 L 波段探测系统采集的高空气象要素相对湿度秒数据,制作贵阳湿空气厚度时间序列图(图 8)。根据贵阳探空冬季多年统计,取高空相对湿度大于 85% 的大气层厚度作为高空湿空气厚度。由图清晰可见,积冰期高空湿空气厚度一般在 1000~4000 m 之间,在 1 月底,高空湿空气厚度超过了 5000 m,水汽非常充足,且稳定。2 月 7 日后湿空气厚度虽然仍在 1000 m 左右,但湿空气层已不在近地面,而处于中空高。

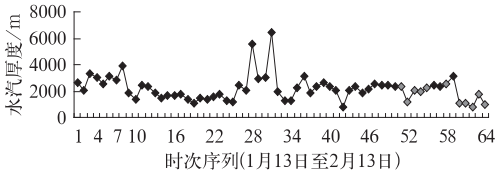


图 8 贵阳 2008 年 1 月 13 日 07 时至 2 月 13 日 19 时高空湿空气厚度序列图

Fig. 8 The thickness of vapor layer in Guiyang during from 07:00 BT 13 January to 19:00 BT 13 February 2008

这次低温雨雪冰冻过程中,贵州降水为锋面降水,日降水量以小雨为主,降水量不超过 10 mm。图 9 是贵州 15 个国家基准站积冰首日的降水量。可以发现,电线积冰都以较小降水量为主,甚至降水量不足 1 mm。如贵阳首日降水量仅为 0.7 mm,但积冰直径达 7 mm,安顺市降水量为 0.2 mm,积冰直径也能达到 5 mm。贵阳市积冰 28 天中,仅有 1

月 28 日降水量最大,为 4.1 mm,有 5 天降水量在 1.0~1.5 mm,其余 22 天降水量都在 1 mm 以内,但是积冰直径却增长到 60 mm(图 10)。可见在水汽持续充沛的情况下,电线积冰以及增厚与降水量并非简单的线性对应增长的关系,因此认为近地面的空气湿度和水汽对电线积冰的增长具有不小作用和影响。

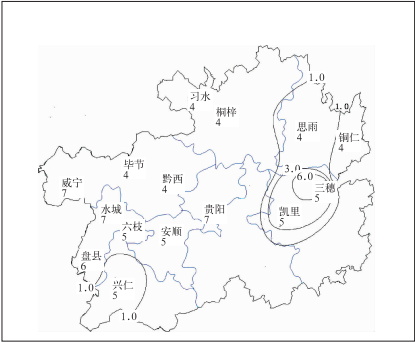


图 9 贵州基准站积冰首日降水量和积冰直径

数值为积冰直径,单位: mm;等值线为降水量,等值线间隔 3 mm

Fig. 9 The precipitation amount and icing diameter at basic stations on the first day of icing
Number is icing diameter (unit:mm), isopleth is precipitation amount

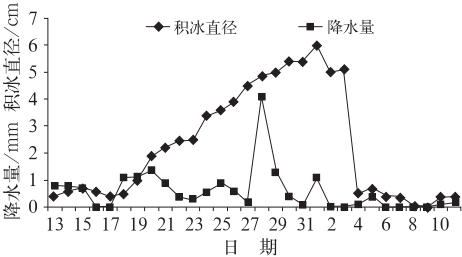


图 10 贵阳冰冻过程日降水量和积冰演变

Fig. 10 Daily precipitation and evolution of icing during the process of freezing in Guiyang

在积冰增长过程中,贵州全省从地面到 1500 m 相对湿度普遍高达 80% 以上。从贵阳的积冰变化可以看到,2 月 3 日前积冰不断增长,相对湿度都维持在 85% 以上,大部时间处在 90% 以上。2 月 4 日以后,湿度降至 70% 以下,积冰处于融化过程中(图略)。

5 积冰融化分析讨论

观测规定,电线积冰增长时发报,电线积冰不增长或融化时不发报。因此受观测限制,无法得到积冰融化过程中准确的积冰直径数据。在此根据这次低温冰冻雨雪灾害天气过程中的地面气象加密观测

数据,以贵阳和都匀两个观冰代表站为例分别讨论积冰融化时的条件。

贵阳市位于贵州中部,2月2—4日、2月5—6日以及2月7—8日为积冰的融化阶段,选取2月7—8日来具体分析(图11a)。2月7日08时观测积冰为4 mm,2月8日08时积冰完全消融,积冰融化了4 mm。从逐时气温变化来看,2月7日08—11时,气温低于0℃,无降水,且相对湿度在70%以下,因此认为积冰属于维持未增长。2月7日12时,气温回升到0.1℃,积冰开始融化,7日12—20时,气温在0℃以上,相对湿度在48%~67%之间,7日22时至8日08时,气温又重新降到0℃以下。因此,7日12—21时,为积冰的融化时段,融化时间为9个小时,最高气温为3.0℃,相对湿度低于70%,无降水。

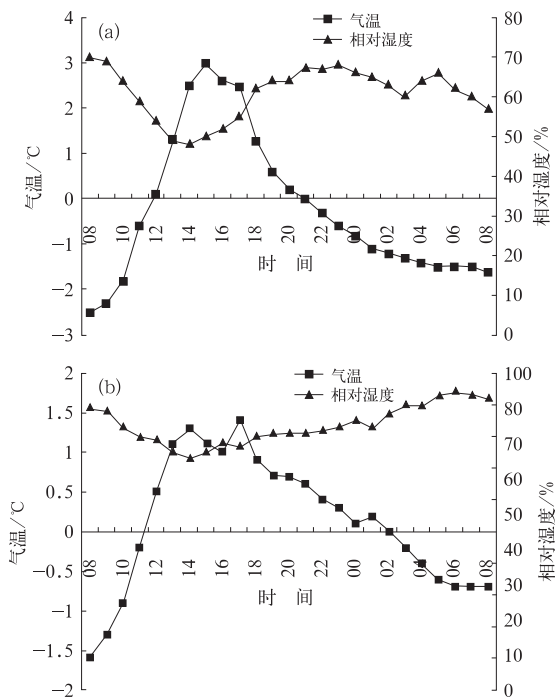


图 11 融冰时段气温和相对湿度
(a) 贵阳, 2月7日08时至8日08时;
(b) 都匀, 2月3日08时至4日08时

Fig. 11 Temperature and relative humidity during melting period

(a) Guiyang, 08:00 BT 7 February to 08:00 BT 8 February 2008 (b) Duyun, 08:00 BT 3 February to 08:00 BT 4 February 2008

都匀市融冰的阶段为2月2—8日,期间4—5日积冰不增长。以2月3—4日融冰时段来讨论(图11b)。2月3日08时积冰观测为48 mm,4日08时积冰观测为36 mm,融冰12 mm。2月3日08—11时,气温低于0℃,相对湿度在80%~89%,认为积冰属于维持不增长,3日12时气温上升至

0.5℃,相对湿度下降至79%,积冰开始融化,3日12时至4日01时,气温在0℃以上,相对湿度在73%~85%之间。都匀融冰12 mm的时间为14个小时,融冰最高温度为1.4℃,相对湿度低于85%,且无降水。

另外,融冰阶段,贵州风速都在 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内,风速较小,对融冰的影响非常小。因此,综合考虑贵州冬季融冰时气温回升至0.1℃以上,相对湿度在85%以下,融冰快慢与升温程度、升温快慢、最高气温等综合因素有关。更多定量分析依据需要今后更为丰富的观测数据来总结和分析验证。

6 电力设施灾害重的原因分析

有研究观测表明^[3],温度在 $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间积冰密度可达 $0.79\text{ 至 }0.89\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$,冰对导线的粘附力强,且不易脱落。因此,形成积冰时温度也不能过低,适宜的温度能使大气水成物以过冷却液滴为主,这样导线上形成的积冰密度就较大,冰层较厚。一般来说,同温度下,冰面的饱和水汽压比水面的小,纯水的饱和水汽压比溶液的大。所以在气温低于0℃下,温度越高,冰面饱和水汽压越大,越有利于凝华或凝结,根据凝华凝结的机理,凝华凝结的速率越慢,冰层越厚实,冰层密度越大。本次低温冰冻雨雪灾害天气过程中,贵州大部地区长时间温度处于 $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间是造成积冰重、冰层厚的重要原因之一。

从贵州四个代表站的资料,分析其从开始电线积冰时到2月2日20时积冰主要时段温度处于 $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间(表1),贵州东部和中部地区都在1月12日20时左右温度降至0℃以下,西部地区在1月22日才降至0℃以下(西部地区前期白天温度高于0℃,夜间低于0℃,22日开始持续低于0℃),比中东部地区推迟10天;中东部地区温度处于 $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间达到490小时左右,占计算时间的比例高达90%以上,西部地区温度处于 $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的时间数只是略高于中东部地区的一半,但是所占计算时间的比例也接近90%。贵州平均海拔1100 m,在此用850 hPa的温度代表近地层的温度。积冰期温度的时间经度垂直剖面(图12)显示,在整个积冰期,贵州中东部近地面的气温持续低于贵州西部。另外,由于贵州东部地形较西部低,准静止锋的长时间维持,来自孟加拉湾和南海的暖湿气流在贵州东部汇合,使得贵州东部的水汽更为充沛。因此,贵州

中东部地区在持续低温期间,绝大多数时间积冰密度大,厚度厚,致使积冰重,再加上输电线路设计标准低,导致输电线断裂、铁塔倒塌,灾害重,而西部地区尽管也积冰,但积冰时间相对短,加上输电线设计标准较高,因此线路受损情况相对东部为轻。

表 1 代表站气温<0℃的小时数
Table 1 The hours for temperature of representative stations less than 0℃

站名	代表区域	<0℃ 开始时间	-5~0℃ 的小时数	占<0℃ 的比例
晴隆	贵州西部	1月22日00时	262	87.3%
贵阳	贵州中部	1月12日21时	495	93.9%
都匀	贵州东部	1月12日20时	486	92.0%
三穗	贵州东部	1月12日20时	480	90.9%

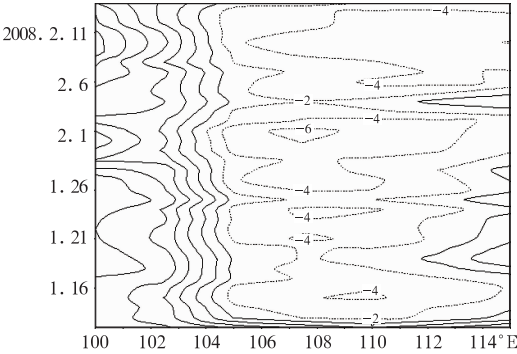


图 12 2008 年 1 月 12 日至 2 月 14 日 850 hPa 23°~30°N 平均气温经度时间演变

Fig. 12 The longitude-time cross-section for 23°-30°N averaged temperature at 850 hPa from 12 January to 14 February 2008

7 结 论

2008 年初低温冰冻雨雪灾害天气过程中,贵州电线积冰严重,总体表现为积冰范围广、厚度厚、时间长,中东部地区积冰厚度较西部严重,受灾重。本文详细分析了贵州电线积冰地域分布特征和与局地气象要素的关系,并对融冰条件进行了讨论,结论如下:

(1) 冬季造成贵州电线积冰的主要是雨淞、雾淞或者雨淞、雾淞形成的混合积冰。静止锋引起的锋面雾和锋面及锋区降水是贵州雾淞、雨淞的主要原因。锋面逆温在积冰形成过程中起着重要的作用。逆温层的存在,使得云体内以过冷却水滴为主,有利于雨淞与雾淞的形成,同时低层的高湿也是导致电线积冰的重要原因。

(2) 形成电线积冰的雨淞和雾淞都是在特定的温湿条件下产生的,分析认为贵州 2008 年低温冰冻雨雪灾害天气过程中的电线积冰主要因这一期间低

层大气维持稳定的过冷却水滴或雾滴而形成。雨淞和雾淞成灾形成严重积冰并非对应较大的地面降水量,微量降水就能产生雨淞并导致电线积冰和增厚。积冰增长过程中,相对湿度普遍高达 90%,在温度低于 0℃时,易形成雾淞。长时间雨淞和雾淞的维持导致电线上堆积的冰层不断加厚。

(3) 贵州中东部地区持续低温,绝大多数时间温度处于 0~-5℃之间,致使积冰密度大、积冰重,加上设计标准低,这是导致电力设施损失巨大的重要原因。

(4) 积冰融化时相对湿度低于 85%,无降水,融冰快慢与升温程度、升温快慢等综合因素有关。

参考文献

[1] 朱乾根,林锦瑞,等. 天气学原理和方法(第三版)[M]. 北京:气象出版社,2000: 67,312-318.

[2] 贵州省电力工业局. 贵州省气象科研所编. 覆冰文集[G]. 1992:3-6,107-110.

[3] 罗宁,文继芬,赵彩,等. 导线积冰的云雾特征观测研究[J]. 应用气象学报,2008,19(1):91-95.

[4] 陈伯堃,郇庆林,吴明江. 金华近 56 年电线积冰及灾害防御[J]. 气象,2009,35(8):85-90.

[5] 王晓兰,李象玉,黎祖贤,等. 2005 年湖南省特大冰冻灾害天气分析[J]. 气象,2005,32(2):87-91.

[6] 陶诗言,卫捷. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析[J]. 气候与环境研究,2008,13(4):337-350.

[7] 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等. 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,2008,66(5):808-825.

[8] 赵琳娜,马清云,杨贵名,等. 2008 年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析[J]. 气候与环境研究,2008,13(4):556-566.

[9] 黄小玉,黎祖贤,李超,等. 2008 年湖南极端冰冻特大灾害天气成因分析[J]. 气象,2008,34(11):47-53.

[10] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,2003:92-95.

[11] 赵思雄,孙建华. 2008 年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征研究[J]. 气候与环境研究,2008,13(4):351-367.

[12] 李登文,乔琪,魏涛. 2008 年初我国南方冻雨雪天气环流及垂直结构分析[J]. 高原气象,2009,28(5):1140-1148.

[13] Wallace John M, Hobbs Peter V. 大气科学概论[M]. 上海:上海科学技术出版社. 1981:9.

[14] 覃志年,钟利华,刘莉红,等. 2008 年初广西异常低温雨雪冰冻天气影响因子分析[J]. 气象,2010,36(10):14-20.

[15] 赵珊珊,高歌,张强,等. 中国冰冻天气的气候特征[J]. 气象,2010,36(3):34-38.

[16] 马晓刚,曲晓波,李月安,等. 冻雨落区基本概念模型的研究与建立[J]. 气象,2010,36(9):68-73.