

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. 气象, 40(3): 355-363.

贵州冬季电线积冰及其天气成因分析^{* 1}

陈百炼^{1,2} 吴战平³ 张艳梅⁴ 曹双和⁵

- 1 贵州省山地环境气候研究所, 贵阳 550002
- 2 贵州山地气候与资源重点实验室, 贵阳 550002
- 3 贵州省气候中心, 贵阳 550002
- 4 贵州省六盘水市气象局, 六盘水 553001
- 5 贵州省电力设计研究院, 贵阳 550002

提 要: 利用气象部门长期电线积冰观测和电力部门线路覆冰调查资料, 对贵州冬季电线积冰的分布、类型特征与气象条件进行了综合分析, 着重探讨了贵州电线积冰的形成机理和天气成因, 主要结论: (1) 贵州电线积冰的类型复杂多样, 除具有雨淞、雾淞、雪淞(湿雪)三种基本类型外, 还有雨雾混合淞、雨雪混合淞(雪凝)两种混合冻结类型; 贵州电线积冰以危害最大的雨淞冰为主, 混合冻结在贵州省分布十分普遍, 这也是造成 2008 年贵州电网严重冰害的重要原因; (2) 持续低温阴雨 的凝冻天气是贵州电线积冰总的天气成因, 其表现形式主要是冻雨但不局限于冻雨, 此外还包括冻毛雨、雨夹雪、湿雪和过冷雾等多种天气现象, 持续的凝冻天气过程往往有多种天气现象同时或交替出现, 从而导致严重的覆冰灾害; (3) 贵州电线积冰总体上属于较高环境温度下的低风速湿物理过程积冰, 当地面气温持续降到 0℃ 以下, 出现降雨或浓雾是电线积冰开始与增长的关键气象条件, 而最高温度上升到 0℃ 以上是判断积冰转入消融的临界气象指标。

关键词: 电线积冰, 导线覆冰, 积冰机理, 天气成因

中图分类号: P426 **文献标志码:** A **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2014. 03. 011

Analysis on Wires Icing and Its Weather Conditions in Guizhou Province

CHEN Bailian^{1,2} WU Zhanping³ ZHANG Yanmei⁴ CAO Shuanghe⁵

- 1 Institute of Mountains Environment and Climate of Guizhou, Guiyang 550002
- 2 Key Laboratory of Mountain Climate and Resources of Guizhou, Guiyang 550002
- 3 Climate Centre of Guizhou, Guiyang 550002
- 4 Liupanshui Meteorological Office of Guizhou, Liupanshui 553001
- 5 Design and Research Institute of Electric Power of Guizhou, Guiyang 550002

Abstract: Using observation data of wires icing from meteorological stations and field investigation to power line ice-coating from local electricity sections, this study comprehensively analyzes the properties, classifications and distributions of wires icing in Guizhou Province as well as its weather conditions. Emphasis is placed on discussing the mechanisms of wires icing and its weather causes of formation. The results show that (1) there are multiple types of wires icing in Guizhou Region. In addition to glaze, rime, and wet snow, mixed freezing types of freezing rain and fog, freezing rain and wet snow are common. Glaze dominates and mixed freezing prevails in mountainous areas, leading to severe wires icing disasters. (2) The freezing weather of continual low temperature and rainy days are the weather conditions of the formation of wires icing, which includes freezing rain, freezing drizzle, sleet, wet snow and freezing fog. (3) Wires icing in Guizhou is generally controlled by moist physical processes with temperature below or near

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006033)资助
2012 年 12 月 28 日收稿; 2013 年 9 月 25 日收修定稿
第一作者: 陈百炼, 主要从事山地气象与灾害防御研究. Email: cbc99@163. com

0℃ and slow wind speed ($<6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). In most cases wires icing starts and grows under weathers of freezing rains when the temperature falls below 0℃. Therefore, air temperature below 0℃ and occurrence of freezing rain, freezing drizzle, freezing fog or sleet are important indicators to judge wires icing.

Key words: wires icing, ice-coating, mechanism, weather conditions

引 言

电线积冰是雨淞、雾淞凝附在导线上或湿雪冻结在导线上的现象,电力部门称之为导线覆冰。严重的电线积冰会对电力供应、交通运输等重要行业以及工农业生产带来重大不利影响。贵州是我国著名的覆冰灾害多发区,几乎每年冬季都会出现电线积冰。进入 21 世纪以来,贵州的冰灾有增多增强的趋势。2008 年初我国南方特大冰灾期间,贵州是全国受灾最严重的省份,电线积冰造成贵州电网大面积损毁、电力供应中断,直接经济损失上百亿元,对社会正常生活造成了巨大影响(贵州省气象局,2009)。2011 年初贵州又发生了仅次于 2008 年的全省性冰冻灾害,但由于吸取经验教训并提前采取了有效措施,使该次灾害造成的损失和影响大大降低。贵州是我国西电东送的重要源地和输送通道,在当前国家加快实施西部大开发战略同时气候变化导致极端灾害增多的背景下,深入研究贵州电线积冰的机理及其天气成因,建立有效的覆冰灾害预警预报方法,对经济社会可持续发展具有重要的现实意义。

贵州的电线积冰是冬季云贵准静止锋天气与复杂的地形环境相互作用的产物,导致电线积冰的持续低温阴雨天气在贵州被称为凝冻天气。长期以来气象部门对凝冻天气的研究较多,对其环流形势与影响系统、时空分布与预测预报等方面都取得了大量成果(许炳南,2001;许丹等,2003;严小冬等,2009;杜正静等,2009;杜晓玲等,2010),然而对于凝冻天气是如何导致电线积冰的,也即电线积冰的形成机理与天气成因问题研究很少。原因一是由于气象站的电线积冰观测局限性较大,难以获得对积冰物理过程的深入了解(郑利兵等,2010);二是电线积冰是十分复杂的物理现象,涉及到大气物理学、气象学、流体力学、热力学及电磁学等多学科交叉领域,观测与实验研究的难度很大(杨军等,2011)。尽管贵州气象部门早在 20 世纪 90 年代就与电力部门合作开展了电线积冰的调查研究(刘其顺等,1992),并

对积冰的气象条件及云雾特征作了初步分析(罗宁,1994;文继芬,1994),但气象部门的研究主要限于对气象条件的分析,而电力部门则限于对局地线路覆冰的调查,两者缺乏有机统一。本文试图在以往工作基础上,综合利用气象和电力部门电线积冰观测和覆冰调查资料,深入分析贵州积冰的物理性质、分布及类型特征,并着重探讨其形成机理与天气成因。

1 资料和方法

本文使用的资料包括:贵州省 84 个国家气象站地面气象观测资料、贵州气象探空站大气探测资料、贵州所有开展电线积冰观测的气象观冰站积冰观测资料,以及贵州电力部门提供的部分线路覆冰调查资料。贵州出现凝冻天气最多的是中部一线地势较高地带,也是电线积冰的高发区,多年资料统计表明贵州冻雨具有以 27°N 为中轴线的频发带特征(杜晓玲等,2010)。本文选取了位于该区域内的 9 个气象站为代表站(站点信息见表 1)。这 9 个站自西向东海拔高度逐渐降低,与贵州大地形变化趋势一致,可较好地代表贵州西部、中部及东部的情况。

表 1 贵州 9 个代表站基本信息
Table 1 Information of the 9 representative stations in Guizhou

区域	站名	站号	经度/°E	纬度/°N	海拔/m
西部	威宁	56691	104. 28	26. 87	2238
	水城	56693	104. 87	26. 58	1814
	大方	57708	105. 60	27. 15	1704
中部	黔西	57803	106. 02	27. 03	1252
	开阳	57719	106. 97	27. 07	1277
	贵阳	57816	106. 72	26. 58	1074
东部	凯里	57825	107. 98	26. 60	723
	三穗	57832	108. 67	26. 97	611
	万山	57742	109. 20	27. 52	883

我国地面气象观测规范规定(中国气象局,2007),气象站的电线积冰观测在距地面约 2 m 高的电线积冰架上进行,当出现覆冰时定时测量导线上的最大积冰直径和厚度,当直径达到规定标准时测量积冰重量。积冰直径是指垂直于导线的切面上冰层积结的最大线值数(包括导线本身直径在内),

相当于电力部门导线覆冰观测的长径; 积冰厚度为导线切面上垂直于积冰直径方向上冰层积结的最大线值数, 相当于电力部门观测的短径。为便于导线积冰数据的比较分析, 需将气象站观测的数据统一换算为实际的积冰厚度, 并计算积冰密度与标准冰厚。取电线积冰外形近似椭圆形, 设 a 、 b 分别为实测积冰的长、短径, W 为积冰重量, φ 为导线直径, 按电力工程气象勘测技术规程(DL/T 5158—2012)推荐的方法(电力规划设计总院, 2012), 本文按以下公式进行计算:

积冰厚度: $d = \frac{1}{2} (\sqrt{ab} - \varphi)$ (1)

积冰体积: $V = \frac{\pi}{4}$ (2)

积冰密度: $\rho = W/V$ (3)

标准冰厚: $b = \sqrt{\frac{W}{0.9\pi} + \frac{\varphi^2}{4}} - \frac{\varphi}{2}$ (4)

值得指出的是, 2008 年初的特大冰灾是贵州历史上最严重的一次覆冰灾害, 期间气象站观测到的电线积冰直径普遍超过 30 mm, 最大直径为万山站的 83 mm。而同期贵州电网冰灾事故线路调查得到的最大覆冰厚度普遍超过 200 mm, 重量超过 $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 。我们将气象观冰站的电线积冰历史观测数据按式(1)~(4)进行统一换算, 并与站点附近有同期记录的电力线路覆冰调查结果比较, 发现在有利地形环境下的野外导线覆冰程度比气象站观测的电线积冰严重得多。由于气象观冰站一般不具备对野外特殊环境的代表性, 且所观测的导线粗细、长短及悬挂高度都与实际电力线路不同, 故其电线积冰观测结果与电力部门线路覆冰调查数据存在较大差距(许艳等, 2013)。但气象站具有长期定点观测记录且分布面广, 在覆冰区域分布及趋势分析方面具有一定优势。因此, 为更全面和准确地研究实际导线覆冰程度及分布情况, 应尽量结合两部门的观测资料进行综合分析。

2 电线积冰分布特征

由于大多数气象站没有开展长期电线积冰观测项目(贵州具有长年代观冰资料的只有 15 站, 自 2008 年以后全省气象站全部开展电线积冰观测), 为分析全省电线积冰的气候分布特征, 我们利用贵州省 84 个气象站多年地面观测资料, 将出现雨、雾

淞近似作为电线积冰日统计。结果表明贵州省多年平均积冰日数分布总体呈现西部多、东部少, 中部多、南北少的特征, 与贵州大地形分布基本相似。图 1 给出了贵州全省气象站 1980—2010 年平均积冰日数分布情况。可见西部年平均积冰日数(雨、雾淞日数)最多为威宁的 46 d, 中部、东部最多分别为开阳的 25 d、万山的 27 d。年平均积冰日数 10 d 以上的站均集中在 27°N 附近的中部一线地势较高地带(图中以虚线标出), 在该积冰多发带内自西向东分别有威宁、大方、开阳、万山 4 个雨、雾淞高发中心。选取的 9 个代表站均位于该积冰多发带内。

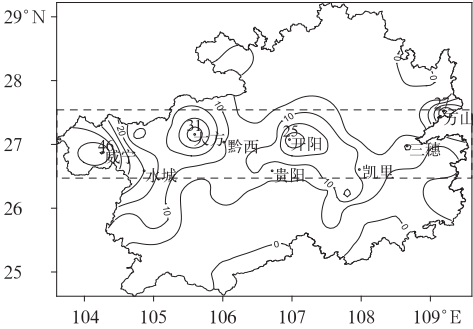


图 1 贵州省气象站 1980—2010 年平均电线积冰日数分布

Fig. 1 Distribution of annual averaged icing-days of stations in Guizhou (1980—2010)

进一步利用 9 个代表站作区域分析, 图 2a 给出了西、中、东三个区域的平均积冰日数。可见平均海拔最高的西部地区平均积冰日数也最多, 明显高于中、东部地区。而中、东部平均积冰日数较为接近, 似乎与平均海拔高度关系不大。分类型看出现最多的是雨淞, 其次是雨雾混合淞, 雾淞最少。图 2b 给出了区域平均的三种积冰类型比例, 可见雨淞占的比例很高, 西、中、东部平均都达 90% 以上; 其次是雨雾混合淞占比不到 10%, 各区相差不大。而只有西部高海拔站点出现少量的雾淞, 平均比例仅 1% 左右, 最高的威宁站雾淞所占比例也仅为 2%, 其余各站基本无雾淞记录。这应归于海拔高度的影响, 据电力部门野外调查结果, 单纯雾淞冰主要出现在 2000 m 以上的高海拔山区, 而气象站一般位于地势不高的市郊区, 故观测到雾淞的机会极少。而雨淞和混合淞的出现与海拔高度关系不大, 在全省分布十分普遍, 说明贵州电线积冰以雨淞、混合淞为主, 这也是造成 2008 年贵州电网严重冰害的重要原因。

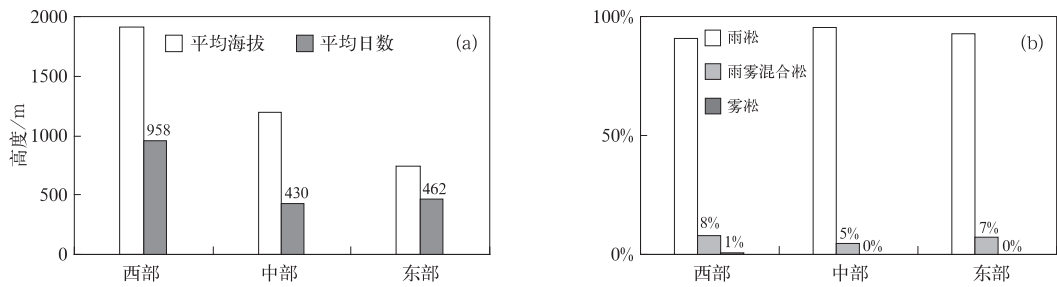


图 2 区域平均的电线积冰日数(单位:d)及海拔高度(a)与积冰类型比例(b)
Fig. 2 Regional averaged icing-days (a) and proportions of three icing types (b)

值得指出的是,气象站记录的电线积冰类型只有雨淞、雾淞及雨雾混合淞三类,湿雪类积冰在气象部门的观测中没有规定记录。在南方山区常见雨夹雪天气导致的电线积冰,但此时气象站的积冰类型一般仍记为雨淞,这可能也是造成气象站资料统计雨淞冰比例过高的原因之一。以上是仅根据气象站资料分析的结果,与电力部门线路覆冰调查结果有一定出入。电力部门的调查结果表明,贵州的导线覆冰类型除雨淞、雾淞、混合淞外,还有雪淞也即湿雪冻结,重覆冰一般出现在迎风坡、山顶、风口、垭口等有利地形环境,覆冰程度比附近气象站观测到的严重得多。由于电力线路覆冰大多都在山区野外环境,出现雾淞和混合淞覆冰的比例也比气象站观测得高。例如六盘水是贵州著名的高海拔重冰区,电力部门调查曾表明雾淞及混合淞多于雨淞,且以雾淞覆冰的长径为最大(许金义,1985)。资料分析表明雾淞主要出现在高海拔山区,而雨淞和混合淞的出现与海拔高度关系不大,这与谢运华(1998)的研究结论是一致的。

3 积冰类型与形成机理

关于导线覆冰的种类,我国现行的分类标准与国际上大体一致,一般将电线积冰分为四大类,即雨淞、雾淞、雨雾混合淞以及湿雪冻结,所不同的是国外常将雾淞、雨雾混合淞分别称为软雾淞与硬雾淞。根据《电力工程气象勘测技术规程》(DL/T 5158-2012)等规程规范以及相关研究成果(谭冠日等,1985;王守礼等,1993;廖祥林,1994;蒋兴良等,2002),表 2 列出了我国导线覆冰分类的相关信息。

根据国内外相关研究(Makkonen,1984;廖祥林,1994;蒋兴良等,2002;孙才新等,2003),电线积冰按其形成的天气条件可分为云雾积冰与降水积

表 2 我国导线覆冰分类相关信息

覆冰类型	天气条件	形成机制	覆冰密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	危害性
雨淞	冻雨、毛雨	湿增长	0.7~0.9	很大
	粒状	雾、雨雾		较大
雾淞	轻雾或晴	干增长	0.1~0.3	小
	晶状			
雨雾淞	雾、毛雨	干、湿增长	0.3~0.6	大
混合冻结				
湿雪冻结	湿雪或雨夹雪	湿增长	0.2~0.4	较小

冰,按其形成机制可分为干增长与湿增长,如果导线捕获的水滴在碰撞其表面瞬间完全冻结则称为干增长,如雾淞;若瞬间未完全冻结,成冰时仍有少部分液态水存在则称为湿增长,如雨淞。在山区最常见的是雨雾混合淞,其形成机制皆有干增长与湿增长,密度较大且附着力强,其危害性仅次于雨淞冰。除雨淞、雾淞及其混合淞外,湿雪冻结也是一种基本的覆冰类型,电力部门常称之为雪淞。雪淞由表面融化或有液态水膜包裹的湿雪花或雪粒在导线上粘附冻结而成,形成时环境温度较高($-2 \sim 1^{\circ}\text{C}$)且风速很小,其密度小、附着力弱,能被强风吹掉,一般不会对导线造成大的危害。电力部门多年的覆冰调查结果表明,贵州的导线覆冰具有以上全部 4 种类型。而且我们在电力部门线路冰灾调查资料中发现,有相当数量的覆冰类型记录为雪淞,且不少记为雪淞的覆冰厚度远远超过其他类型。例如 2008 年冰灾期间在 220 kV 线路江阳 I 回 103 号杆塔、II 回 75 号杆塔附近,记为雪淞的线路覆冰厚度(长径)竟达 280 mm,重量超过 $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$,为所有覆冰类型的最大值。然而雪淞即单纯的湿雪覆冰不可能增长到如此程度,因此推测其并非单纯的雪淞,而可能是雪淞和雨淞的混合冻结物。后来从电力部门现场拍摄的照片得到证实,这种雪淞和雨淞的混合冻结物外表与雨雾混合淞相似,为白色不透明不规则积冰,但内部文理比较粗糙,隐约有呈块状的湿雪晶体聚合

结构。天气分析表明, 冬季贵州山区的降雪多是小雪或雨夹雪, 并常伴随冻雨出现, 环境气温在 0°C 左右, 空气湿度大、风速小, 这种带有液态水膜的雪花很容易粘附在导线上冻结形成雪淞。雪淞覆冰的危害并不大, 但一旦遇上冻雨形成混合冻结, 其覆冰密度和厚度都会迅速增大。而雨、雪同时或交替出现的情况在贵州山区是比较常见的, 贵州历来就有雪凝的说法, 这里的雪凝正是指的雪淞和雨淞的混合冻结。廖祥林(1994)也曾指出, 雨淞和湿雪的混合冻结在大巴山区较为常见。鉴于以上分析, 将电力部门调查资料中记为雪淞的严重覆冰称为雪凝可能更为恰当, 于是可以给出贵州电线积冰的类型及其相互间关系的简要示意图(图 3)。

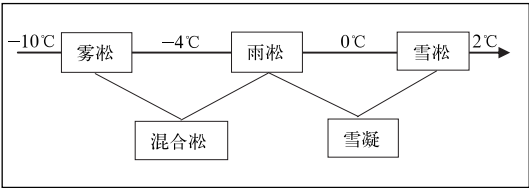


图 3 贵州电线积冰类型及相互间关系示意图
Fig. 3 Sketch about classification of wires icing and their relations in Guizhou

图 3 表示贵州电线积冰的类型除雨淞、雾凇、雪淞三种基本类型外, 还有两种重要的混合类型即雨雾混合冻结(混合凇)和雨雪混合冻结(雪凝)。决定不同覆冰类型出现的主要是环境温度, 而各类积冰的出现均有一定的温度范围(见图 3)。由于贵州冬季凝冻天气时地面气温常常在 $-4\sim 0^{\circ}\text{C}$, 加之阴雨绵绵, 因此出现最多的是雨淞。然而环境温度并不稳定, 常随冷空气势力强弱进退而变化。野外山区因天气变化雨淞、雾凇、雪淞常交替出现, 从而导致雨淞与雾凇的混合冻结(混合凇)和雨淞与雪淞的混合冻结(雪凝)。实际观测分析表明, 贵州严重的覆冰很少由单纯一种类型的积冰构成, 大多是混合积冰(朱君等, 2011)。以往对导线覆冰进行剖面分析曾发现, 很厚的覆冰大多具有透明与不透明的分层结构, 而紧贴导线表面的冰层大多是透明的, 说明开始的覆冰多数是雨淞所致(许金义, 1985; 刘其顺等, 1992), 而后由于天气变化其上有雾凇或雪淞粘附冻结, 再后又雨淞覆盖……, 如此反复, 最终导致了复杂的混合积冰。蒋兴良等(2002)和王守礼等(1993)也指出, 在高海拔山区, 导致严重冰害的覆冰多数是混合冻结类型。2008 年初贵州电网冰灾原

因调查分析结果表明, 正是由于持续的低温阴雨天气下雨、雾凇以及雪淞的交替发展导致了极其严重的覆冰。

电线积冰是在特定的天气条件下产生的物理现象, 覆冰的物理性质及类型特征与气象条件有着密切的关系。我们考察了积冰期间各站的气温、湿度、降水、风速以及天气现象, 结果表明: 各站积冰期间日平均气温范围在 $-8\sim 4^{\circ}\text{C}$ 之间, 而 $-4\sim 2^{\circ}\text{C}$ 之间出现积冰的频率最高; 日最低气温都在 0°C 以下, 日平均相对湿度在 80% 以上, 平均风速在 $0\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 其中风速在小于 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的占绝大多数; 段旭等(2010)在分析云南冰冻灾害的气象条件时也得到相近的结果。从天气现象分析, 90% 以上的积冰形成和增长时都观测到有液态降水(冻雨或雨夹雪), 但降雨量一般很小, 量级为微量降水或小雨; 而积冰的维持阶段一般都有雾的存在。因此, 总结导致电线积冰的气象条件主要有: (1) 近地面气温维持在 0°C 附近或以下; (2) 出现持续的冻雨、毛毛雨或浓雾天气; 以及 (3) 较小的风速。综合以上分析, 可认为贵州的电线积冰总体上属于较高环境温度下的低风速湿物理过程积冰, 这与北方以雾凇为主的干增长物理过程形成积冰是不同的。

4 天气成因分析

导致贵州电线积冰的持续低温阴雨天气被称为凝冻天气, 然而长期以来对凝冻天气的定义却并不十分清楚。过去曾长期将凝冻等同于冻雨或雨淞。实际上凝冻是一种非常复杂的物理现象, 凝冻天气虽然以冻雨为主要表现形式但绝不只是简单的冻雨。从前文分析可以看出, 导致积冰的有多种天气现象, 其降水形式有冻雨、毛毛雨、雨夹雪或湿雪, 而无明显降水在山区由过冷雾也能造成积冰。美国气象学会专门定义了凝冻降水(Freezing Precipitation), 指出其特征为液态降水在近地面向固态冰的转化(早期主要指冻雨)。众所周知, 国际上很早就提出了经典的冻雨“三层模型”理论(Brooks, 1920; Stewart, 1985), 即大气在垂直方向从高空到近地面分为冰晶层、融化层及过冷层, 在高空形成的冰晶或雪花降落经过中空高于 0°C 的逆温层被融化为液滴, 然后在低空至地面的过冷层中被冷却为低于 0°C 的冻雨, 最后降落地面发生冻结。这也即是冻雨的“冰相-融化”机制。后来 Huffman 等(1988)的研

究发现冻雨还存在着“过冷-暖雨”机制,即大气垂直结构中没有冰晶层和融化层,整层温度都低于 0℃,云滴通过碰并过程增长并以过冷雨滴的形式直接降落到地面产生冻结。若进一步将有融化层但无冰晶层的情况也归于此类,则暖雨机制冻雨可占到大多数。后来的观测研究表明,暖雨机制冻雨多发生在中低空,大多与静止锋等比较稳定的天气系统有关,其形成的过冷雨滴很小,类似于毛毛雨(Rasmussen et al,1992;Bernsteinal et al,1998)。因此国际上又进一步将凝冻降水分为冻雨(Freezing Rain)、冻毛雨(Freezing Drizzle)和冻雾(Freezing Fog)。Bernstein(2000)研究了美国凝冻降水的分布情况,发现冻毛雨在中西部山区远比冻雨发生更多。

国内相关研究也表明,我国南方山区以暖雨机制冻雨为多(欧建军等,2011;漆梁波,2012)。贵州冬季主要是准静止锋降水,多数情况下其大气垂直结构不符合冻雨冰相机制的“三层模型”,而是表现为没有冰晶层和融化层的“一层模式”或只有融化层而无冰晶层的“二层模式”(李登文等,2011;吴古会等,2012)。贵州出现凝冻天气时地面温度常在一5~2℃,中低空有逆温层且水汽十分充足,云层位于中低空锋面附近,云顶高度低而温度较高,云内冰晶生成较少。由于锋面附近湍流混合强烈,云滴主要

通过碰并增长形成过冷水滴。由于这种过冷水滴很小,经过低空过冷层也不会冻结,最后降落地面形成冻雨。当云顶稍高及温度稍低的时候,云内有部分冰晶或雪花生成,其与过冷雨滴共同降落地面则形成雨夹雪或冰粒。

2008 年 1 月 18 日至 2 月 1 日贵阳出现连续 15 d 的凝冻天气过程,导致了连续的电线积冰增长,积冰直径最终达罕见的 60 mm。凝冻期间几乎天天有降水,但降水量大多都不足 1 mm,为冻毛雨级别。图 4 给出了降雨比较明显的 1 月 18 日(a)和 2 月 1 日(b)08 时贵阳探空站的大气温湿垂直结构图,图中 T 为层结温度、 T_d 为露点温度。若以 $T-T_d\leq 2^{\circ}\text{C}$ 作为云内判别,可见这两天的云顶高度都不高(在 600 hPa 以下),温度在一5℃左右,基本没有冰晶层,为过冷暖雨机制降水。所不同的是前者有高于 0℃的融化层(厚度约 50 hPa),为冻雨的“二层模式”;而后者没有融化层,整层温度均低于 0℃,为冻雨的“一层模式”。另外后者在高层 400 hPa 左右有少量冰晶生成,而中低空到地面的温度更低、逆温层更强。由于大气垂直结构的差异,这两天的降水量及形态也有所不同。前者降水量为 1.7 mm,为单纯的冻雨,而后者降水量为 1.1 mm,除冻雨外还出现了雨夹雪和冰粒。

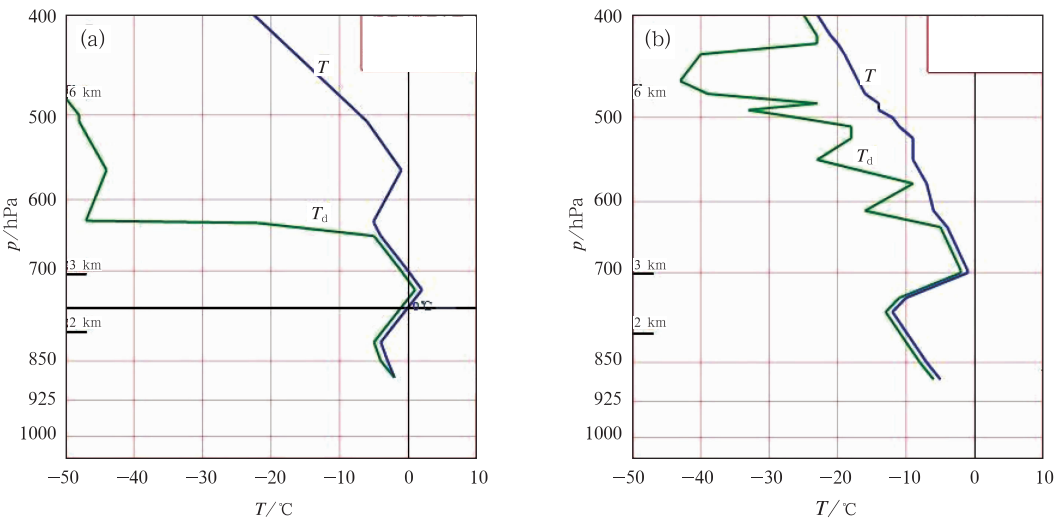


图 4 2008 年初凝冻期间贵阳站大气探空图

(a)1月18日08时,(b)2月1日08时

Fig. 4 Sounding T -log p diagrams of Guiyang Station

at 08:00 BT 18 January (a) and 08:00 BT 1 February 2008 (b)

进一步考察 1 月 18 日至 2 月 1 日期间贵阳站大气层结逐日变化情况,发现只有 1 月 28 日出现明

显的冰晶层,云顶高度在 400 hPa 以上,云层很厚且有融化层,符合经典的冻雨“三层模式”,而当日降水

量 4.9 mm 也为期间最大值。另外 14 d 均未出现冰晶层,云顶高度均在 600 hPa 以下;除 2 月 1 日外中低空都有融化层,大多属于冻雨的“二层模式”,其降雨量都很小,属“过冷暖雨”机制下的冻毛雨。分析该凝冻天气过程中共同的特点,近地面为过冷层而中低空都有逆温层(不一定是融化层)。逆温层的抑制作用造成逆温层以下到地面水汽堆积,空气达到饱和甚至过饱和状态,导致电线积冰在这种低温高湿环境中易于维持,同时在海拔较高处不断有过冷雾或浓雾生成,在适当的风速下与冻雨共同形成雨雾凇混合冻结,最终导致积冰的持续增长。值得指出的是,贵州的凝冻天气除了能够观测到的明显降水外,在高海拔山区常常表现为准静止锋后的过冷雾,有时候由于冻毛雨非常细小也类似于冻雾,地面几乎观测不到降水,而电线积冰照样能够形成和增长(罗宁等,2008)。持续的凝冻天气过程往往有多种凝冻天气现象同时或交替出现,从而导致严重的冰灾。2008 年 1 月中旬到 2 月中旬,贵州遭遇持续近一个月的凝冻天气,全省 85 个气象站有 76 个站观测到电线积冰,积冰数据全面突破历史纪录。我们仔细考察了该期间贵阳站电线积冰及其气象条件的逐日演变过程。图 5 是对贵阳站 2008 年 1 月 13 日至 2 月 7 日电线积冰过程的分析。

图 5a 中可见整个积冰过程可以分为三个阶段,

即开始阶段(1 月 13—17 日)、增长阶段(1 月 18 日至 2 月 1 日)和消融阶段(2 月 2 日以后)。其中 1 月 18 日开始的积冰增长阶段整整持续了 15 d。积冰增长期间天天都有降水但雨量很小,日雨量大多不足 1.0 mm,基本上属于冻毛雨。整个积冰期间空气的湿度都很大,积冰增长期间相对湿度维持在 90% 左右。中间一排标记表示逐日出现的各种天气现象,可见积冰期间出现的天气现象有雾、雨、雪以及冰粒。整个过程几乎天天都有雾,在积冰开始和增长阶段都有降雨出现,期间雪也不时出现,有 3 d 还出现了冰粒,因降雪是雨夹雪故地面观测不到明显的积雪。图 5b 中是温度和风速的逐日演变情况,可见在积冰增长期间一直维持低温阴雨天气,日最高温度都在 0℃ 以下,最低温度在 -3℃ 以下,平均风速稳定在 2 m·s⁻¹ 左右。对照图 5a 和 5b 分析可以看出,日最高温度下降到 0℃ 以下且出现液态降水是导致积冰开始的关键条件;而积冰增长和维持阶段日最高温度都保持在 0℃ 以下、平均相对湿度 90% 左右且有液态降水或雾。图中积冰增长到顶点后于 2 月 2 日开始转入消融阶段,可以看到其临界气象条件是日最高温度上升到 0℃ 相对湿度下降同时降雨停止,而日最高温度上升到 0℃ 以上后积冰迅速消融。

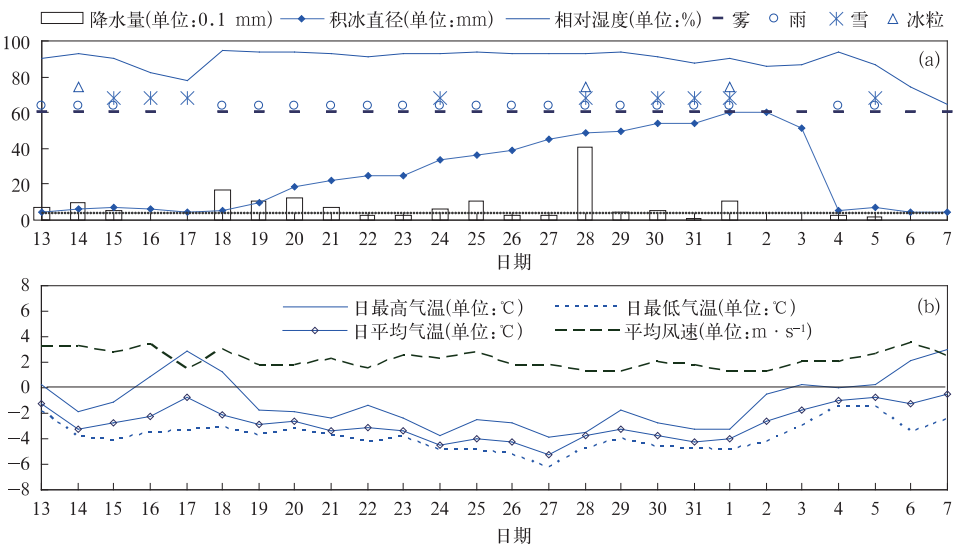


图 5 2008 年 1 月 13 日至 2 月 7 日贵阳站电线积冰及天气条件逐日演变分析

(a) 电线积冰直径、相对湿度、天气现象及降水, (b) 温度及风速

Fig. 5 Daily evolution of ice accretion and weather conditions at Guiyang station (2008. 1. 13—2008. 2. 7)

(a) diameter of ice accretion, relative humidity, weather phenomena and precipitation;

(b) temperature and wind speed

从以上积冰过程的综合分析可知,日最高温度是否低于 0°C 是判断积冰开始、中断、增长维持及转入消融最重要的临界指标。例如在开始阶段的2月17日积冰有所中断,这时日最高温度上升到 3°C ,相对湿度下降到80%以下同时降水停止;积冰增长和维持阶段日最高温度都保持在 0°C 以下,相对湿度高且有液态降水或雾;转入消融阶段的标志则是日最高温度上升到 0°C ,相对湿度下降同时降雨停止。而在整个过程中包括积冰中断和消融阶段日平均温度均处于 0°C 以下,显然日平均温度并不是判断积冰过程节点的有效指标。值得指出的是,虽然液态降水决定积冰开始和增长的关键条件之一,但电线积冰厚度的增长量与降水量却有着非简单的对应关系。例如贵阳站从1月18日至2月1日出现连续积冰增长的15 d中,仅有1 d降水量最大为4.9 mm、5 d降水量在1.0~2.0 mm,其余9 d降水量都不足1 mm,期间累积总降水量仅为14.5 mm,而电线积冰直径却由5 mm增长到60 mm,积冰增长厚度达累积降水量的4倍多。这么多冰是从哪里来的呢?考虑到这期间空气湿度很高且一直有雾,风速稳定维持在 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,可以推断由于持续的冻毛雨和雨雾在稳定的风速作用下不断向低温导线表面积聚和冻结,导致了积冰厚度的持续增长,最终达到远超累积降水量的厚度。由此可见,电线积冰厚度的增长决定于温度、湿度、风速和降水等多个气象要素的复杂组合,要实现电线积冰厚度的准确预报是很不容易的。

5 结 论

本文利用气象部门长期电线积冰观测和电力部门线路覆冰调查资料,对贵州冬季电线积冰的分布、类型特征与气象条件进行了综合分析,着重探讨了贵州电线积冰的形成机理和天气成因,主要得到以下结论。

(1) 贵州电线积冰的类型复杂多样,除具有雨淞、雾淞、雪淞(湿雪)三种基本类型外,还有雨雾混合淞、雨雪混合淞(雪凝)两种混合冻结类型。贵州电线积冰以危害最大的雨淞冰为主,仅在西部高海拔山区出现一定的雾淞冰。而混合冻结在全省分布十分普遍,这也是造成2008年贵州电网严重冰害的重要原因。

(2) 低温阴雨的凝冻天气是贵州电线积冰总的

天气成因,其表现形式主要是冻雨但不局限于冻雨,除冻雨外还包括冻毛雨、雨夹雪、湿雪、过冷云雾等多种天气现象,持续的凝冻天气过程往往有多种天气现象同时或交替出现,从而导致严重的覆冰灾害。

(3) 贵州电线积冰总体上属于较高环境温度下的低风速湿物理过程积冰,大多数积冰开始和增长阶段都伴有液态降水,但一般降雨量很小。当地面气温持续降到 0°C 以下,出现降雨或浓雾是电线积冰开始与增长的关键气象条件,而最高温度上升到 0°C 以上是判断积冰转入消融的临界气象指标。

参考文献

- 电力规划设计总院. 2012. 电力工程气象勘测技术规程(DL/T 5158—2012). 北京:中国计划出版社,19-26.
- 杜晓玲, 彭芳, 武文辉. 2010. 贵州冻雨频发地带分布特征及成因分析. 气象, 36(5):92-97.
- 杜正静, 熊方, 何玉龙, 等. 2009. 贵州严重冰冻天气过程典型模型及环流特征分析. 贵州气象, 33(1):7-10.
- 段旭, 段玮, 陶云, 等. 2010. 云南冰冻灾害研究与电线覆冰区划. 北京:气象出版社,1-96.
- 贵州省气象局. 2009. 2008年贵州特大凝冻灾害. 北京:气象出版社,1-87.
- 蒋兴良, 易辉. 2002. 输电线路覆冰及防护. 北京:中国电力出版社, 192.
- 李登文, 杨静, 吴兴洋. 2011. 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. 气象, 37(2):161-169.
- 廖祥林. 1994. 导线覆冰性质分类和密度浅析. 电力建设, 15(9):17-25.
- 刘其顺, 丁积仁, 周祖纯, 等. 1992. 覆冰文集. 贵阳:贵州新华印刷厂, 1-262.
- 罗宁. 1994. 气象记录的雨雾淞冰与导线冰害事故的关系. 贵州气象, 18(6):16-20.
- 罗宁, 文继芬, 赵彩, 等. 2008. 导线积冰的云雾特征观测研究. 应用气象学报, 19(1):91-95.
- 欧建军, 周毓荃, 杨棋, 等. 2011. 我国冻雨时空分布及温湿结构特征分析. 高原气象, 30(3):692-699.
- 漆梁波. 2012. 我国冬季冻雨和冰粒天气的形成机制及预报着眼点. 气象, 38(7):769-778.
- 孙才新, 蒋兴良, 熊启新, 等. 2003. 导线覆冰及其干湿增长临界条件分析. 中国电机工程学报, 23(3):141-145.
- 谭冠日, 严济远, 朱瑞兆. 1985. 应用气候学. 上海:科学技术出版社, 143-167.
- 王守礼, 李家垣. 1993. 云南高海拔地区电线覆冰问题研究. 昆明:云南科技出版社, 236.
- 文继芬. 1994. 雨雾淞天气的滴谱、含水量与积冰. 贵州气象, 18(6):21-26.
- 吴古会, 彭芳, 崔庭, 等. 2012. 2011年冬季贵州低温雨雪冰冻天气的成因分析. 气象, 38(3):291-299.
- 谢运华. 1998. 导线覆冰密度的研究. 中国电力, 31(1):46-51.

许炳南. 2001. 贵州冬季凝冻预测信号和预测模型研究. 贵州气象, 25(4):3-6.

许丹, 罗喜平. 2003. 贵州凝冻的时空分布特征和环流成因分析. 高原气象, 22(4):401-404.

许金义. 1985. 六盘水地区的导线覆冰. 气象, 11(2):22-24.

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. 气象, 39(3):362-369.

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. 高原气象, 28(3):694-701.

杨军, 谢真珍. 2011. 电线积冰物理过程与数值模拟研究进展. 气象, 37(9):1158-1165.

郑利兵, 陈林, 林云生, 等. 2010. 基于气象规范的电线积冰自动监测系统研究. 气象, 36(10):97-101.

中国气象局. 2007. 地面气象观测规范(第 15 部分:电线积冰观测). 北京:气象出版社, 1-5.

朱君, 向卫国, 赵夏菁. 2011. 贵州导线覆冰的致灾机理研究. 高原山地气象研究, 31(4):42-49.

Bernstein B, 2000. Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellets. Wea Forecasting, 15:485-508.

Bernstein B, M Politovich, F McDonough. 1998. Surface weather features associated with freezing precipitation and severe inflight aircraft icing. Atmos Res, 46:57-73.

Brooks C F. 1920. The nature of sleet and how it is formed. Mon Wea Rev, 48:69-73.

Huffman G J, Norman G A Jr. 1988. The supercooled warm rain process and the specification of freezing precipitation. Mon Wea Rev, 116:2172-2182.

Makkonen L. 1984. Heat transfer and icing of a rough cylinder. Cold Regions Sci Technol, 10(2):105-116.

Rasmussen R, Politovich M, Marwitz, et al. 1992. Winter Icing and Storms Project(WISP). Bull Amer Meteor Soc, 73:951-974.

Stewart R E. 1985. Precipitation types in winter storms. Pure Appl Geophys, 123:597-609.