

GUIZHOU DAOXIAN FUBING DE QIXIANG MOSHI
JI YINGYONG YANJIU

贵州导线覆冰的气象模式 及应用研究

陈百炼 编著



气象出版社
China Meteorological Press

贵州导线覆冰的气象模式 及应用研究

陈百炼 编著

内 容 简 介

本书对贵州导线覆冰的物理过程、预测预报和风险评估技术进行了系统深入的研究。利用开展导线覆冰自动观测实验获得的详细数据分析,揭示了贵州导线覆冰过程及其气象条件演变特征,在国际公认的导线覆冰理论模型框架下,引入实时气象条件建立的基于过程判别的导线覆冰气象模式,实现了对真实导线覆冰过程的数值模拟,建立了导线覆冰的精细化预报方法并投入业务应用,初步解决了覆冰厚度定时定点定量精细化预报的难题,可以为电力部门防抗冰害提供更加具有针对性和精细化的服务,具有较大的业务应用价值和广泛的推广应用前景。本书对相关领域的科技工作者有一定的参考作用。

图书在版编目(CIP)数据

贵州导线覆冰的气象模式及应用研究/陈百炼编著

.--北京:气象出版社,2017.10

ISBN 978-7-5029-6416-0

I. ①贵… II. ①陈… III. ①架空导线-冰害-气象灾害-研究-贵州 IV. ①TM752

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 207024 号

贵州导线覆冰的气象模式及应用研究

Guizhou Daoxian Fubing de Qixiang Moshi ji Yingyong Yanjiu

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号 邮政编码:100081

电 话:010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址:<http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑:崔晓军

终 审:吴晓鹏

责任校对:王丽梅

责任技编:赵相宁

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

印 张:10.5

字 数:220 千字

彩 插:1

版 次:2017 年 10 月第 1 版

印 次:2017 年 10 月第 1 次印刷

定 价:45.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

序

贵州地处青藏高原东南侧云贵高原的东斜坡上,是高耸于四川盆地和广西丘陵之间的高原山区,冬季主要受准静止锋影响,常常形成凝冻天气,其影响范围广、持续时间长,容易造成雨凇、雾凇及混合凇等凝冻灾害,对交通运输和电力输电线路危害极大。雨凇(俗称桐油凇)及雨雾混合凇附着在输电线上不易脱落,严重时甚至会拉断电线甚至造成倒杆倒塔,电力部门称之为冰灾。贵州每年冬季都会出现不同程度的覆冰灾害,是全国著名的覆冰灾害高发区。

贵州的凝冻与北方的冰冻有不同之处。由于贵州地处低纬度山区,冬季近地面温度并不是很低,常常在 $-4\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,但空气湿度很大,这个温度段内形成的覆冰以雨凇、雨雾混合凇为主,覆冰密度大、附着力强,故造成的覆冰灾害十分严重;而地面覆冰后车辆极易打滑,对交通运输也带来重大不利影响。北方冬季虽然气温很低,但空气干燥,加之风速较大,干燥的雪花不易附着在导线上面形成覆冰。东北地区冬季气温普遍在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,在这种低温下人们看到更多的是水汽直接凝华而成的晶状雾凇,但这种覆冰密度小、结构疏松,容易脱落,对电力线路基本不造成灾害。

贵州历史上凝冻灾害较重的年份有1954,1964,1976,1984和2008年,尤其是2008年的特大冰灾人们现在还记忆犹新。当时我国南方大部分地区持续长时间的低温雨雪冰冻天气,又正遇上春运高峰期,回家心切的人们因交通中断而焦躁不安。其中贵州是受灾最为严重的省份,极其严重的覆冰导致输电杆(塔)大面积倒塌,大部分地区电力供应中断,220 kV以上线路受灾比例近70%,被迫停运线路超过60%,全省电网供电量不足正常的30%,给人们生产生活及出行带来严重影响。当时贵州省委省政府的中心工作就是抗凝冻、保畅通、保生产,习近平同志曾代表中央专程到贵州指导抗凝冻工作。

贵州由于地形复杂、凝冻灾害不易防范,长期以来气象科技工作者在凝冻天气预报、灾害监测评估以及区划等方面做了大量的研究工作。20世纪90年代初贵州气象部门就与电力部门开展合作,对贵州覆冰的性

质、天气成因以及冰区划分等进行了初步研究,并于1992年结集出版了当时在国内具有一定影响的《覆冰文集》。贵州省气象科学研究所贵州六盘水和遵义大娄山等地进行了数年的野外观测实验,1993年“贵州凝冻与输电线路覆冰研究”被国家科技部列入中国-挪威国际双边合作项目。尽管我本人过去在导线覆冰领域做过一点工作,但遗憾的是成果的局限性制约了其在业务上的应用。今天,欣慰地看到本书作者陈百炼博士在导线覆冰研究领域的辛勤耕耘结出了硕果,他的工作将贵州导线覆冰的研究推进到了一个更深的层次,上升到了一个更新的高度,不仅完成了导线覆冰精细化风险区划,而且首次实现了导线覆冰厚度的精细化预报,显著提升了我省气象科技服务能力。本书的研究成果已经在实际业务中得到应用,初步显现出了其巨大的应用价值,这对防灾减灾工作具有积极的现实意义。

凝冻灾害尽管会对社会带来重大危害,但作为自然现象研究也可以说是上天赐予气象科技工作者的一份礼物。气象工作者用智慧和心血与天公对话,掌握天象物理规律并趋利避害,这是一份挑战和使命,也是一种社会责任和担当。“防灾减灾,气象先行”,这里交出了一份满意的答卷。

贵州省民政厅厅长
原贵州省气象局局长

罗 宇

2017年2月16日

前 言

导线覆冰是低温阴雨天气条件下由于雨淞、雾淞凝附或湿雪冻结在输电线路造成导线表面包裹覆冰的现象。输电线路覆冰后会大大增加其重量荷载和风荷载,降低其机械和电气性能,当导线覆冰超过线路最大荷载时会导致电线断裂、倒杆倒塔,造成电力设施损毁、电力输送中断,严重时甚至会导致电网瘫痪,电力部门称之为冰灾。而不均匀覆冰和脱冰过程中又会产生导线舞动和跳跃,造成线路闪络和设备损坏。因此,导线覆冰是严重危害电网安全运行的一种气象灾害。

我国电线覆冰灾害主要发生在南方,冬季北方平原地区由于气温很低、空气干燥,很少出现液态降水,而干燥的雪花难以附着冻结在导线上,因此北方平原地区很少出现覆冰灾害。而南方山区冬季潮湿多雾,气温常在冰点附近以下,持续的阴雨天气往往造成严重的电线覆冰,故南方的冰害远重于北方。我国南方地区尤其是西南山区是导线覆冰灾害的多发区,覆冰多为雨、雾淞天气导致,其增长快、密度大、附着力强,故成灾特别严重。2008年1—2月我国南方遭受了历史罕见的大范围持续低温雨雪冰冻灾害,极其严重的电力线路覆冰导致电网大面积瘫痪,造成上千亿元的重大经济损失并严重威胁人民群众的生命财产安全和生产生活。由于特殊的地理位置、地形环境和气候条件的综合影响,贵州每年冬季都会遭受不同程度的覆冰灾害,在2008年南方特大冰灾中是受灾最为严重的省份,可以说是南方覆冰的典型代表。贵州同时又是我国西电东送的重要源地和主要通道。在2008年南方特大冰灾期间,贵州境内输电线路覆冰厚度普遍达50 mm以上,最厚达200 mm,导致贵州电网大面积损毁,大部分地区电力供应中断,最严重时供电量只有正常时的30%,西电东送由425万kW转为倒送50万kW。因此,在当前全球气候变化导致极端气象灾害趋多趋强的严峻形势下,深入开展导线覆冰灾害研究具有重要的现实意义。

导线覆冰是在一定气象条件下发生的复杂的物理过程,由于野外实时观测的困难,电力部门一般通过线路覆冰调查确定覆冰状况,但由于相当数量的重冰区处于无人区,缺乏相关的覆冰数据与气象资料,使电力线

路设计冰厚定量不准,导致冰害事故频发。由于导线覆冰过程的详细观测资料十分稀缺,长期以来研究难以深入到覆冰过程内部,难以揭示覆冰过程及气象条件连续演变的物理特征,因此难以建立有效的覆冰预报方法。以往电力部门多限于针对具体输电线路覆冰情况的调查分析,缺乏与气象资料在时空上的配合研究;而气象部门大多限于对导致覆冰的天气条件和气候背景分析,缺乏对覆冰机理及其预报方法的研究。在南方山区,电力输送主干线穿越的地形复杂、局地气象条件变化很大,导线覆冰出现的情况十分复杂,以往仅根据大范围的天气形势进行导线覆冰的趋势预报远远不能满足电力部门的实际需求,迫切需要提供时空精细化的导线覆冰量预报以及对覆冰灾害风险的评估,从而指导电网运行过程中采取及时、有效的防冰抗冰措施,并实现电网路径与线路设计的优化。根据行业应用和气象服务的迫切需求,中国气象局批准立项了国家公益性行业科研专项经费项目“导线覆冰的精细化预报和风险评估技术”(GYHY201006033)。该项目由贵州省山地环境气候研究所牵头,联合中国科学院电工研究所、南京信息工程大学、成都信息工程大学及有关电力部门,通过开展导线覆冰自动观测实验成功获取了大量连续覆冰过程相关数据,突破了长期以来制约覆冰研究的资料瓶颈;在此基础上对贵州导线覆冰的形成机理及其物理过程进行了深入研究。在项目研究过程中,项目组克服了各种困难,在贵州重冰区进行了三年的导线覆冰过程自动观测实验,经过大量的数据分析、理论研究和数值试验,项目组在导线覆冰自动观测实验、覆冰机理与物理过程分析、覆冰理论模型与参数化方法、覆冰气象模式与精细化预报方法、覆冰风险评估和精细化区划方面取得了一系列新的研究成果。特别是在观测实验和理论模拟基础上研究建立了基于过程识别的导线覆冰气象模式,该模式建立在较为完备的覆冰物理机理基础之上,结合了覆冰过程的气象条件判别方法和模型算法控制,不仅能够模拟覆冰的增长,而且能够模拟覆冰的减弱、消融结束全过程的演变情况,实现了对真实覆冰过程变化的模拟。模式主要以常规气象要素为输入,能够输出全过程覆冰重量、覆冰厚度及覆冰密度变化的计算结果,具有较大的业务应用价值。

在项目研究过程中,得到中国气象局科技与气候变化司的关心和贵州省气象局的大力支持,以及贵州电力试验研究院、贵州电力设计研究院等有关单位的支持,在此表示衷心的感谢!项目合作单位通力协作、联合

攻关,项目组成员付出了艰辛的劳动,特别要感谢郑立兵博士带队的中国科学院电工研究所导线覆冰自动监测系统开发团队,他们多次到贵州进行导线覆冰自动观测系统的安装、调试和维护;特别感谢贵州省威宁县气象局的陈林、开阳县气象局的汪义洋以及铜仁市万山特区气象局的同志对本项目开展导线覆冰观测实验的支持与配合;感谢南京信息工程大学的吴息教授在覆冰气象模式研究方面提供的帮助;感谢成都信息工程大学的程志刚教授在覆冰风险和区划研究方面提供的支持;感谢贵州省气象台提供了本项目研究需要的贵州本地 WRF 模式预报产品;最后还要感谢贵州省山地环境气候研究所的谷晓平所长和全体同事对本项目工作的关心和支持,特别是直接参加项目工作的胡欣欣、廖瑶和张波等同志。值得一提的是,项目组基于研究成果成功地开发了导线覆冰精细化预报产品,初步解决了导线覆冰定时、定点、定量精细化预报的难题,并取得了新的精细化覆冰风险评估及区划成果,对提高气象部门科技服务能力具有积极意义。该项目的研究开发成果已经初步投入业务应用,为电力部门防抗冰灾、制订规划以及线路架设提供了更加具有针对性、更加精细化的服务,随着在实际应用中的进一步改进完善,相信该项目的研究开发成果将可以显著提升气象为电力运行安全服务的能力,具有较大的实际业务应用价值和广泛的推广应用前景。

作者

2017年2月于贵阳

目 录

序	
前言	
第 1 章 贵州导线覆冰及其研究概况	1
1.1 贵州导线覆冰概况	1
1.2 历史覆冰灾害概况	4
1.3 相关研究概况	5
第 2 章 贵州导线覆冰的类型与分布特征	8
2.1 资料与方法	8
2.2 贵州导线覆冰的时空分布特征	12
2.3 贵州导线覆冰的类型分析	14
2.4 贵州导线覆冰的类型分布特征	20
2.5 2008 年以来贵州导线覆冰灾害情况	22
第 3 章 贵州导线覆冰的气象条件与天气成因	27
3.1 影响导线覆冰的因素	27
3.2 贵州导线覆冰的气象条件	28
3.3 贵州电线积冰日气象条件分析	32
3.4 贵州导线覆冰的天气成因分析	35
3.5 贵州凝冻天气的大气环流特征	45
第 4 章 导线覆冰自动观测实验与覆冰过程分析	51
4.1 开展自动观测实验的目的	51
4.2 导线覆冰自动观测系统介绍	52
4.3 导线覆冰自动观测实验情况	56
4.4 典型导线覆冰过程数据分析	61
4.5 覆冰过程不同阶段及其气象条件	66
4.6 小结	70
第 5 章 导线覆冰理论模型与数值模拟	72
5.1 国内外研究现状	72
5.2 导线覆冰理论模型基础	73
5.3 理论模型数值模拟试验	78
5.4 理论模拟的敏感性试验	81

5.5	模型参数方案比较	86
第6章	导线覆冰的气象模式研究	92
6.1	基本思路和方法	92
6.2	覆冰过程的气象条件判别	93
6.3	导线覆冰气象模式理论框架	9
6.4	模式参数化方案	95
6.5	空气液态水含量的计算	98
6.6	雨、雾凇覆冰处理方法	101
6.7	模式算法与运算流程	103
6.8	实际覆冰过程数值模拟	105
6.9	小结	110
第7章	导线覆冰的精细化预报方法	112
7.1	国内研究现状	112
7.2	导线覆冰厚度精细化预报方法	113
7.3	导线覆冰厚度站点精细化预报产品	116
7.4	导线覆冰厚度格点精细化预报产品	119
7.5	导线覆冰精细化预报产品的初步检验	124
7.6	覆冰精细化预报产品的初步应用情况	127
第8章	导线覆冰的风险评估与区划	128
8.1	国内研究现状	128
8.2	导线覆冰风险评估技术	129
8.3	覆冰过程最大冰厚计算模型	131
8.4	站点最大冰厚序列恢复重建	134
8.5	覆冰厚度精细化区划方法	139
8.6	覆冰厚度精细化区划成果	151
参考文献		154

第1章 贵州导线覆冰及其研究概况

1.1 贵州导线覆冰概况

导线覆冰是严重危害电网安全运行的一种气象灾害。我国导线覆冰灾害主要发生在西南、西北以及华中部分地区,尤其西南山区为覆冰高发区,以冬季云贵准静止锋影响下的贵州及云南东北部为典型代表,其覆冰多为雨、雾凇天气导致,增长快、密度大、附着力强,故成灾特别严重。在2008年年初我国南方大范围持续低温雨雪冰冻灾害期间,贵州是受灾最为严重的省份,极其严重的电力线路覆冰导致电网大面积瘫痪,大部分地区电力供应中断,造成上千亿元的重大经济损失,并严重威胁人民群众的生命财产安全和生产生活。贵州省位于青藏高原东南侧的云贵高原向东部平原过渡的斜坡上,地理位置范围为 $103.6^{\circ}\sim 109.6^{\circ}\text{E}$ 、 $24.62^{\circ}\sim 29.22^{\circ}\text{N}$,总面积 17.6万 km^2 ,绝大部分属山地和丘陵,地形地貌具有典型的喀斯特特征。省内大地形分布具有西高东低、中部高南北低的特点,平均海拔高度从西部的近 3000 m 过渡到中部的 1000 m 左右,再到东部的约 600 m ,构成三级小台阶。

贵州省地处靠近海洋的中低纬度,主要受副热带东亚大陆季风影响,属亚热带高原季风湿润气候。省内地形海拔高度最低为 137 m ,最高近 3000 m ,由于地形分布复杂、高度落差大,全省具有显著的立体气候特征。贵州省境内主要有四条山脉,分别是位于西部的乌蒙山脉、横亘于贵州中部的苗岭山脉、北部的大娄山脉以及东北部的武陵山脉。其中西部的乌蒙山脉海拔最高,近 3000 m ,为近似南北走向;中部的苗岭山脉海拔为 $1200\sim 2000\text{ m}$,基本为东西走向;而北部的大娄山脉以及东北部的武陵山脉平均海拔较低,近似为东北—西南走向。由于贵州省位于青藏高原东南侧云贵高原向东的大斜坡之上,冬季冷暖气团经常在贵州相遇,当两种气团势力相持不下时便形成天气学上有名的云贵准静止锋(或滇黔准静止锋)。在准静止锋影响下经常出现大范围持续的低温阴雨(雪)天气,其与局地地形共同作用从而形成多种类型的覆冰,包括雨凇、雾凇、混合凇及湿雪冻结等。由于冷暖空气势力的变化,准静止锋的位置经常在贵州中西部到云南东北部之间摆动,而地面锋线的位置与山脉地形走向基本一致,故造成贵州的中西部地区覆冰灾害特别严重。图1.1是冬季云贵准静止锋大致位置示意图。

由于特殊的地理位置、地形环境和气候条件的综合影响,贵州全省特别是中西部高海拔地区每年冬季都会遭受不同程度的覆冰灾害。覆冰发生频率总的空间分

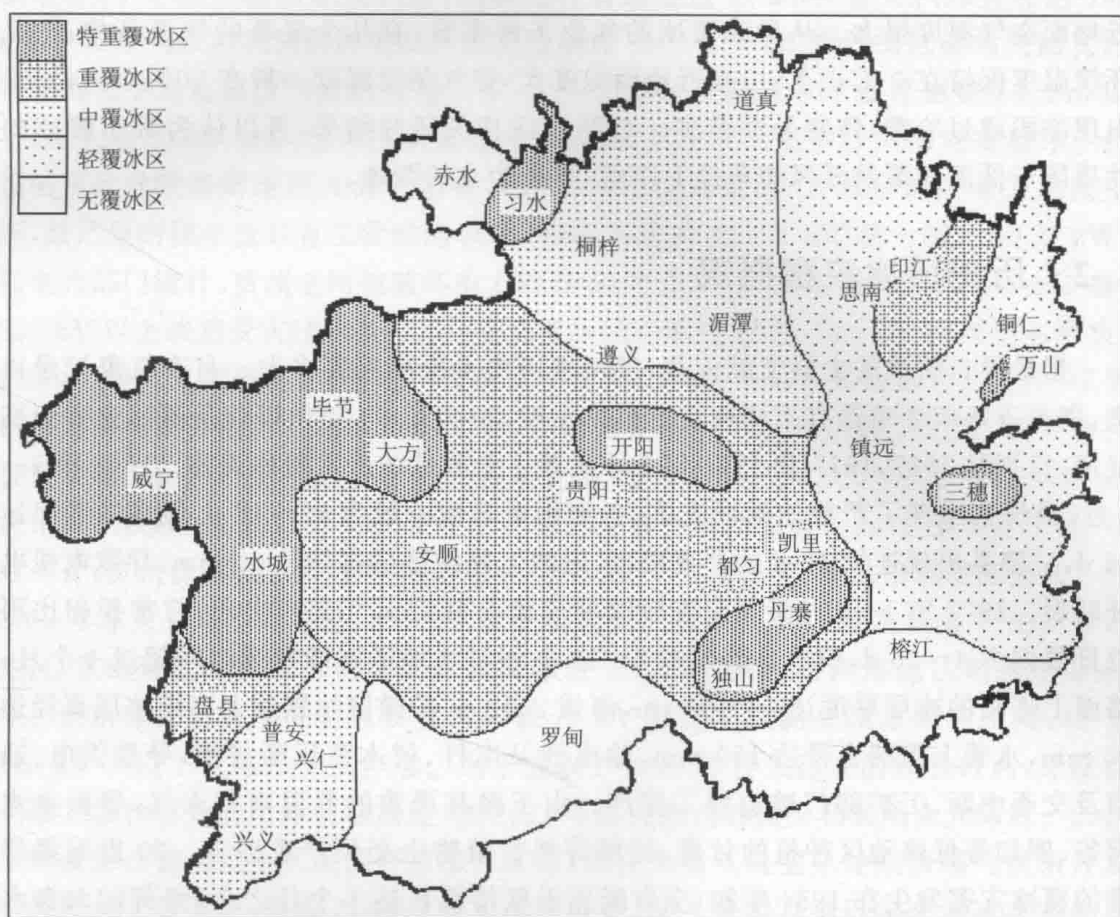


图 1.2 贵州省覆冰灾害等级区域分布图(已往研究成果)

的地区,而南部的丹寨、独山处于冷空气通道上的迎风坡,故覆冰也特别严重。

电力部门线路覆冰调查结果显示,贵州的覆冰主要是由雨淞、雾淞、湿雪以及三者的混合冻结造成的,从导线覆冰层的剖面分析发现,覆冰通常出现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雨淞,严重的覆冰大多是雨淞和雾淞的混合冻结。而局地地形环境对覆冰的影响十分显著,在山区风口、垭口、山顶、迎风坡等特殊地形条件下往往出现较重的覆冰。贵州的覆冰类型多样、空间分布复杂,普遍具有受微地形、微气象条件影响的特征。相对地势较低的地区出现的覆冰性质以雨淞为主,而野外高海拔山区覆冰性质则多为雾淞和雨雾混合淞,此外还有湿雪冻结以及雨夹雪导致的混合覆冰。气象部门研究表明,导致贵州出现覆冰灾害的主导天气系统是冬季云贵准静止锋,覆冰灾害是准静止锋后低温阴雨天气与复杂的地形环境共同作用的结果。导致覆冰灾害的天气在贵州被称为凝冻天气,其表现形式除冻雨外还包括冻毛雨、过冷雾(冻雾)、湿雪及雨夹雪等,持续的凝冻天气过程往往有多种凝冻天气现象交替出现,从而导致严重的覆冰灾害。多年气象观测

资料统计分析表明,出现凝冻天气时的地面温度为 $-8\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、风速为 $0\sim 6\text{ m/s}$,而近地面空气湿度很大。从导致覆冰的气象条件来看,有几个显著的气象条件:一是环境温度保持在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下;二是近地面湿度大,空气相对湿度一般在90%以上;三是出现冻雨或过冷雾,特别是浓雾多。总结以往相关研究结果,可以认为贵州覆冰的性质属于低温高湿及低风速条件下以雨、雾凇为主的覆冰。

1.2 历史覆冰灾害概况

据最早自明清的史料文献记载,贵州省历史上凝冻灾害多发。自有气象记录以来,贵州省每年冬季都有不同程度的覆冰出现,20世纪90年代以前是覆冰灾害的高发期,特别是1967,1977和1984年冬季出现了全省性的严重覆冰灾害。1968年1—2月,贵州省出现了严重的雨凇灾害,各地雨凇日数一般为 $12\sim 18\text{ d}$,最多的开阳达 35 d ,三穗县出现连续 10 d 的严重雨凇,电线上冻结冰层直径达 62 mm ,导致电线电杆断裂。1977年1—2月贵州全省持续的冻雨与降雪天气交替出现,与常年相比雨凇日数偏多 $4\sim 15\text{ d}$,积雪日数偏多 $3\sim 18\text{ d}$;六盘水地区雨凇持续时间超过1个月,路面上冻结的冰层厚度达 $20\sim 30\text{ cm}$,海拔 2012 m 的微波站铁丝上冻结冰层直径达 80 mm ,水管上雨凇直径达 150 mm ,输电线及电杆、树木被压断拔倒,导致供电、通信及交通中断,工矿部门被迫停工停产。由于极其严重的低温雨雪天气,导致赤水河谷、罗甸等低热地区种植的甘蔗、柑橘等热带植物也受到严重冻害。20世纪最严重的覆冰灾害发生在1984年初,全省凝冻天气持续长达1个月之久,西部的六盘水气象站观测到的导线积冰厚度达 82 mm ,为雨雾凇混合冻结;水城至盘县的 110 kV 电力线路上覆冰厚度达 165 mm ;中东部的修文县、麻江县、凯里市境内线路覆冰厚度最大达 85 mm ,且多为危害极大的雨凇覆冰;开阳气象站观测场围栏上透明的雨凇覆冰厚度达 150 mm 。覆冰程度大大超过电力线路的设计标准,造成了极其严重的冰灾。由于输电线路严重覆冰,造成导线拉长折断、金具变形断裂、电杆铁塔倒塌、电网裂解,导致大范围输电中断,电力部门直接经济损失达600多万元。另外,省内8个微波站出现倒杆、断线,22条长途架空一级、二级干线几乎全部损坏,电讯电话线路中断,邮电部门直接经济损失400多万元。

进入21世纪以后,2005年初贵州省中东部地区遭受大面积凝冻灾害,万山地区电线积冰直径达 70 mm 以上,导致停电、停水、公路交通中断,直接经济损失上千万元。2008年初发生了席卷我国南方地区的大范围低温雨雪冰冻灾害,这次极端天气事件造成的覆冰灾害的强度、广度和持续时间均创下了历史最高纪录,共造成南方近20个省(区、市)不同程度受灾。其中贵州、湖南的灾情最为严重,部分地区达到百年一遇的程度。2008年1月12日—2月15日,贵州全省出现持续超过1个月之久的低温凝冻天气,造成了极其严重的覆冰灾害(贵州省气象局,2009)。全省84个气

象站有 76 个站观测到电线积冰, 积冰直径普遍超过 50 mm, 最大积冰直径达 160 mm。贵阳气象站观测到的电线积冰重量超过 1000 g/m, 而野外山区输电线路实际覆冰程度更远远超过气象站观测记录, 中东部地区线路覆冰厚度普遍在 50 mm 以上, 最大超过 200 mm, 最大冰重超过 10 kg/m, 且主要为危害极大的雨淞覆冰。严重的覆冰导致贵州电网大面积损毁, 倒杆倒塔、电网裂解, 大部分地区电力供应中断, 最严重时供电量只有正常时的 30%, 西电东送由 425 万 kW 转为倒送 50 万 kW。据电力部门统计, 贵州电网被破坏电力线路 5030 条, 电力杆塔倾倒损坏 184 875 基, 220 kV 以上线路受灾比例近 70%, 被迫停运线路超过 60%, 500 kV 网架基本瘫痪, 220 kV 网架支离破碎, 全省电网裂解成中西部、北部、东部及东南部四片运行, 仅中西部电网与南方电网主网维持弱连接, 仅电力设施损失就高达数十亿元, 给经济社会发展和人民生活造成了极大影响。继 2008 年特大冰灾以后, 2009—2010 年贵州覆冰较轻, 但 2011 年初又发生了严重的全省性覆冰灾害。2011 年 1 月 1 日—2 月 2 日, 贵州低温凝冻天气共持续 33 d, 全省 85 个气象站有 78 站出现凝冻天气。与 2008 年冰灾分布不同的是, 2011 年初贵州遭受严重冰灾的区域主要集中在中西部地区, 东部地区由于降雪明显反而使覆冰较 2008 年为轻, 而西部地区则重于 2008 年。该次冰灾期间贵州电网共有 987 条 10 kV 及以上线路受覆冰影响跳闸, 43 个 110 kV 及以下变电站受灾停运。由于吸取了 2008 年特大冰灾的经验教训, 并提前采取了各种有效的防冰抗冰措施, 使 2011 年冰灾造成的损失和影响大大降低。2011 年以来贵州暂未发生大范围严重覆冰灾害, 但在当前气候变化导致极端气候事件发生频繁的大背景下, 吸取 2008 年特大冰灾教训, 深入分析总结近年来覆冰灾害的发生及分布规律, 对全省原设计冰区线路进行全面审查, 并根据实际情况做出适当调整仍然是十分必要的。

1.3 相关研究概况

世界上发生覆冰灾害较多的国家如苏联、加拿大、美国、英国、芬兰、挪威、日本等国对输电线路覆冰进行了长期的观测与研究, 苏联最早从 20 世纪 30 年代起就开始了导线覆冰的观测。根据国内外研究成果, 导线覆冰按其物理特征可分为雨淞、雾淞、混合淞、湿雪冻结等类型; 按其天气成因可分为降水覆冰和云雾覆冰; 按其形成机制又可分为干增长型和湿增长型。不同类型的覆冰形成的物理机制和影响因素各不相同, 因此对覆冰的观测和理论研究难度较大。对导线覆冰这一复杂物理现象的研究涉及电工学、热力学、气象学、大气物理学及流体力学等多学科交叉领域。自 1982 年第一届国际结构物大气覆冰会议(IWAIS)以来, 国际导线覆冰理论研究已经取得了大量成果, 特别是描述覆冰机理的动力学、热力学模型有了很大发展。进入 21 世纪以来, 覆冰理论研究进一步向实际应用方向发展, 将高分辨率的云气象模

式与先进的覆冰模型进行耦合已成为新的发展趋势。

国内对导线覆冰的观测和研究起步并不算晚,一些气象台站从1958年就开始进行电线积冰的人工观测,多年来已经积累了大量的资料。从20世纪70年代起,电力部门陆续建立了一些导线覆冰观测站,对覆冰特征及其成因、地形对覆冰的影响以及抗冰工程技术等进行了长期研究。滕中林(1978)、谭冠日(1982)较早提出了分析导线覆冰的理论公式,并对不同高度和线径的导线覆冰规律进行了探讨;江祖凡(1983)利用庐山云雾观测站资料对电线积冰的增长速度做了分析。

20世纪90年代初,贵州省气象部门就与电力部门开展合作,对贵州省覆冰的性质、天气成因以及冰区划分等进行了初步研究,并编辑出版了当时在国内具有一定影响的《覆冰文集》(贵州省电力工业局等,1992)。贵州省气象科学研究所于1990—1994年在贵州省六盘水和遵义大娄山等地进行了数年的野外观测实验,分析了凝冻天气的云雾滴谱及雾中含水量特征。罗宁(1994)对气象站记录的雨、雾凇天气与输电线路冰害事故的关系做了分析,指出雨雾凇天气持续时间越长冰害事故率越高,而冰害事故大多发生在积冰过程的中后期。王守礼(1993)对云南高海拔地区的导线覆冰特征及分布规律进行了总结。蒋兴良等(1998)分析了三峡地区导线覆冰机理并提出了雾凇覆冰的理论模型。刘和云等(2001)在借鉴国外覆冰模型的基础上提出了一个雨凇覆冰的简单模型。罗宁等(2008)利用野外观测实验资料分析了凝冻天气的云雾滴谱及雾中含水量特征,表明雾中含水量、雾滴大小及其谱分布对导线覆冰具有重要影响,并指出直径 $14\text{ }\mu\text{m}$ 以上的大雾滴对导线覆冰具有重要贡献。在与覆冰相关的凝冻天气和凝冻灾害研究方面,贵州省气象台很早就对贵州雨凇天气的大气环流背景及其形成机理进行了分析,并建立了贵州雨凇天气的预报指标。许炳南(2001)分析了贵州凝冻灾害气候预测信号并建立了统计预测模型。许丹等(2003)对贵州凝冻灾害的时空分布特征及其环流成因做了初步分析。吉廷艳等(2006)初步建立了贵州凝冻灾害的监测预警方法。杜正静等(2009)分析了贵州典型冰冻天气环流特征,严小东等(2009)分析了贵州冻雨时空分布变化特征及其影响因素,指出冻雨空间分布受地形环境、静止锋区、冷空气厚度和不同高度冷空气活动等多种因素的综合影响。杜小玲等(2010)的研究指出贵州冻雨高发区具有以 27°N 为中轴线的带状分布特征,并提出了贵州冻雨的天气学三维概念模型。吴古会等(2012)对贵州2011和2008年低温雨雪冰冻天气进行了对比分析,指出冷空气入侵的路径不同导致了冰冻灾害范围及其分布上的差异,由于2011年冰冻天气的大气环流系统配置不如2008年且水汽输送较弱,使其造成的灾害范围和严重程度均不及2008年。

2008年特大冰灾发生以后,蒋兴良(2008)对贵州电网冰灾事故进行了总结分析,指出2008年初持续的冰雪冻雨天气是导致贵州省电网发生冰灾事故的基本原因,但对覆冰的危害程度缺乏足够的认识和冰灾发生后应急预案不完善也是导致该次冰灾期间造成巨大损失的重要原因。李登文等(2011)对2008年冰灾期间贵州电

线积冰的气象条件进行了分析,认为积冰主要是由雨淞、雾淞和混合淞所导致。朱君等对(2011)2008和2011年导致贵州覆冰灾害的大气环流特征、天气条件以及地形影响进行了分析,并对贵州导线覆冰的机理进行了初步研究。陈百炼等(2014)综合利用气象部门长期积累的电线积冰观测资料和电力部门线路覆冰调查资料,对贵州电线积冰的类型、分布特征与气象条件进行了分析,着重探讨了电线积冰的形成机理和天气成因,指出雨淞、雾淞及湿雪混合冻结是造成2008年贵州电网严重冰害的重要原因。

总的来说,国内相关研究主要集中在覆冰灾害的天气成因、影响因素及气候特征等方面,针对导线覆冰机理与预测预报方法的研究不多,已有的覆冰预报方法研究主要基于经验统计模型,由于缺乏覆冰理论基础而难以投入应用推广;一些大学虽然在导线覆冰的实验室仿真研究方面也取得了一些成果,但对覆冰理论模型的应用能力较为薄弱,目前国内对导线覆冰预报及其风险评估技术的研究仍处于探索阶段。

2008年特大冰灾给电网安全运行带来了深刻的教训,电力部门与气象部门积极开展合作,对该次极端事件进行了认真分析总结,然而由于贵州地形复杂而观测资料有限,迄今对于全省覆冰的类型及分布特征仍然缺乏全面的了解。长期以来覆冰观测资料不足特别是缺乏导线覆冰过程的详细观测数据,使研究难以深入到覆冰过程内部,难以揭示清楚覆冰的形成机理及其演变特征。以往电力部门多限于针对具体输电线路覆冰情况的调查分析,缺乏与气象资料在时空上的配合研究;而气象部门大多限于对导致覆冰的天气条件和气候背景分析,缺乏对覆冰机理及其预报方法的研究。贵州电力输送主干线穿越的地形复杂、局地气象条件变化很大,导致覆冰出现的情况十分复杂,以往仅根据大范围的天气形势或气象条件进行导线覆冰的趋势预报远远不能满足电力部门的实际需求,迫切需要提供时空精细化的导线覆冰量预报以及对覆冰灾害风险的评估,从而指导电网运行过程中采取及时有效的防冰抗冰措施,并实现电网路径与线路设计的优化。根据行业应用和气象服务的迫切需求,中国气象局于2010年批准立项了国家公益性行业科研专项经费项目(GYHY201006033)“导线覆冰的精细化预报和风险评估技术”。该项目由贵州省山地环境气候研究所牵头,参加单位有中国科学院电工研究所、南京信息工程大学、成都信息工程大学及有关电力部门。项目于2011年开始实施,开展多部门多学科联合攻关,充分利用气象部门长期积累的观测资料以及电力部门野外线路覆冰调查资料,对贵州导线覆冰进行全面系统的研究,并计划在贵州重冰区开展导线覆冰的自动观测实验,通过对覆冰物理过程详细数据的深入分析揭示导线覆冰的形成机理与演变特征,在此基础上进一步研究建立完整的导线覆冰气象模式,并开发导线覆冰的精细化预报方法和覆冰灾害风险评估方法。该项目实施完成后将在导线覆冰自动观测实验、覆冰机理与物理过程分析、导线覆冰气象模式与精细化预报方法、覆冰风险评估和精细化区划等方面取得新的进展。