

◆ 贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书 ◆

电网防冰关键技术 工程应用

DIANWANG FANGBING GUANJIAN JISHU
GONGCHENG YINGYONG

贵州电网有限责任公司 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

◆ 贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书 ◆

电网防冰关键技术 工程应用

DIANWANG FANGBING GUANJIAN JISHU
GONGCHENG YINGYONG

贵州电网有限责任公司 组编



中国电力出版社

内 容 提 要

低温雨雪冰冻天气引起的电网覆冰是众多国家电力系统所面临的严重威胁之一,严重的覆冰会引起电网断线、倒塔,进而导致大面积停电事故。正确地认识电网覆冰及其危害,深入研究较为合理的融冰技术及装置,对提高电力系统的安全可靠性有极大的应用价值和积极意义。为促进电网防冰融冰最新技术成果的推广应用,本书结合贵州电网实情,对电网防冰融冰关键技术及其应用情况进行了归纳总结。

全书共分6章,分别讲述了电网覆冰危害与成因、直流融冰技术及其配套装置、交流融冰技术及其配套装置、人工观冰技术、覆冰预警系统及其应用和冰灾的防范与处置体系。全书内容丰富,重点突出,对电网防冰融冰方面的工作有较强的指导意义。

本书可供电网技术研究、设计、运行和电气设备生产单位从事防冰融冰方面的技术人员和管理人员使用,也可供高等院校等有关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

电网防冰关键技术工程应用 / 贵州电网有限责任公司组编. —北京: 中国电力出版社, 2014.12

ISBN 978-7-5123-6801-9

I. ①电… II. ①贵… III. ①电网—防冰设备 IV. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第271224号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014年12月第一版 2014年12月北京第一次印刷

700毫米×1000毫米 16开本 15印张 301千字

定价90.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

编 委 会

主 编 钟连宏

副 主 编 马晓红 彭 赤

参 编 人 员 张 迅 曾华荣 李 冶 黄 良

陈仕军 陈沛龙 牛 唯 许 逵

虢 韬 徐梁刚 肖 宁 李宏力

李艳玲 柏 瑞

前言

低温雨雪冰冻天气引起的电网覆冰是众多国家电力系统所面临的严重威胁之一，严重的覆冰会引起电网断线、倒塔，进而导致大面积停电事故。2008年发生的低温雨雪冰冻灾害，共造成全国范围电网停运电力线路36 740条，停运变电站2018座，110~500kV线路共有8381基杆塔倾倒及损坏，全国共170个县（市）发生供电中断。贵州电网在全国范围内受灾最为严重，500kV电网基本瘫痪，贵州电网解列为几片孤网运行。这场大面积冰灾，造成贵州50个县（市、区）近2000万人受停电影响。电网覆冰事故导致的损害，给人们正常生活、社会的稳定和经济的发展带来的损失是相当惨重的。所以，正确地认识电网覆冰及其危害，深入研究较为合理的融冰技术及装置，对提高电力系统的安全可靠性有极大的应用价值和积极意义。

纵观目前国内外的除冰技术，其方法大致可分为4类：一是热力除冰法，其原理是利用附加热源或导线自身发热，使冰雪在导线上无法积覆，或是使已经积覆的冰雪融化。现讨论较多的热力除冰法有交流电流融冰、直流电流融冰、方式融冰、高频高压激励融冰等。二是机械除冰法，其原理是利用各种机械动力使冰产生应力破坏从导线上脱落。目前有滑轮碾压铲刮法、“ad hoc”法、强力振动法、电脉冲除冰法和电磁力除冰法。三是被动除冰法，也称自然脱冰法，该方法是依靠自然风力、地球引力、辐射以及温度突变等作用使覆冰自然脱落。通常做法是在导线上安装阻雪环、平衡锤等装置，使导线上的覆冰堆积到一定程度时，在风或其他自然力的作用下自行脱落。四是其他除冰方法，这类方法大多是通过改变输电线路本身的结构或材料，达到除冰效果。综合国内外的研究试验结果，热力除冰法是目前最主要和最有效的抗冰除冰方法。

自2008年贵州遭受大范围冰灾后，贵州电网有限责任公司在交直流融冰技术、覆冰预警系统、冰灾的防范与处置体系等方面的研究取得了一系列成果。为促进电网防冰融冰最新技术成果的推广应用，本书结合贵州电网实情，对电网防冰融冰关键技术及其应用情况进行了归纳总结。第1章结合贵州的气象情况对覆冰的成因做了简要分析，并举例说明了覆冰对电网造成的危害。第2章直流融冰技术及其配套装置的应用，简要分析了直流融冰技术的原理，直流融冰装置的原理、结构，对贵州电网现有的直流融冰装置（固定式直流融冰装置、车载式直流融冰装置）进行了详细介绍，总结了直流融冰装置的现场调试方法、常见问题以及日常维护策略，最后列举了直流融冰技术的应用成效。第3章交流融冰技术及其配套装置，分析了交流融冰的类型及实现条件、方法，介绍了一些交流融冰配套装置的原理、结构特点

和使用方法。第4章是人工观冰技术,描述了观冰内容、数据的收集以及处理过程。第5章是覆冰预警系统及其应用,内容包括覆冰预警系统现有技术及产品的现状和存在的问题,系统的主要结构、功能以及安装过程。覆冰预警系统通过对电网覆冰特征参量、气象条件及运行状况进行在线监测,了解覆冰发展趋势,及时进行覆冰预警,提醒运行人员尽早采取应对措施,保证线路安全。第6章是冰灾的防范与处置体系,根据多年的抗冰经验和深入研究,贵州电网公司已形成了一套应对冰灾的防范与处置体系,力求把冰灾损失减到最小程度,该章介绍了冰灾来临前所做的日常防范措施以及面对冰灾时所采取的应急处置措施。

本书可供电网技术研究、设计、运行和电气设备生产单位从事防冰融冰方面的技术人员和管理人员使用,也可供高等院校有关专业师生阅读参考。

在本书的编写过程中,贵州电网公司、贵州电力试验研究院、贵州电网公司输电运行检修分公司、南方电网科学研究院有限责任公司、贵州电网公司电力调度控制中心、都匀供电局、六盘水供电局、毕节供电局等单位给予了大力支持和帮助,特在此表示衷心的感谢。

随着科学技术日新月异的发展,电网抵御冰灾技术方面的研究也将进一步深入。限于编者的水平有限,书中存在的错误及不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2014年5月

目 录

前言

1 电网覆冰危害与成因

1.1 概述	1
1.2 电网覆冰的气象条件及特点	2
1.2.1 覆冰的气象条件	2
1.2.2 覆冰的特点	3
1.3 电网覆冰情况	7
1.3.1 覆冰的高程分布与性质	7
1.3.2 覆冰量级及分布	8
1.4 输电线路受损情况	10
1.4.1 线路杆塔受损情况	10
1.4.2 线路断线情况	12
1.4.3 线路导、地线金具、绝缘子覆冰掉串情况	12
1.5 电网受损原因	13
1.5.1 电网覆冰事故主要原因	13
1.5.2 铁塔受损类型及原因	17
1.5.3 导、地线断线事故原因	23
1.5.4 贵州电力主干通信光缆受损原因	26
1.5.5 典型事故原因分析	27

2 直流融冰技术及其配套装置

2.1 导线直流融冰技术	35
2.1.1 导线覆冰、融冰的热平衡	35
2.1.2 导线融冰电流	37
2.1.3 导线直流融冰接线方式	40
2.1.4 导线串接直流融冰技术	42
2.2 架空地线直流融冰技术	42
2.2.1 架空地线直流电阻	43

2.2.2	架空地线融冰电流	44
2.2.3	架空地线融冰接线方式	44
2.2.4	架空地线串接直流融冰技术	48
2.2.5	架空地线直流融冰绝缘改造	48
2.2.6	架空地线直流融冰绝缘改造融冰实战	53
2.3	直流融冰装置原理与结构	55
2.3.1	阀组	57
2.3.2	控制保护系统	58
2.3.3	冷却系统	59
2.3.4	换流变压器	61
2.3.5	限流电抗器	61
2.3.6	滤波器	61
2.4	直流融冰装置类型	63
2.4.1	固定式直流融冰装置	63
2.4.2	车载式直流融冰装置	66
2.5	直流融冰装置接入系统	68
2.5.1	融冰线路首端接线	68
2.5.2	融冰线路末端短接方式	78
2.6	直流融冰装置现场调试与日常运行维护	85
2.6.1	直流融冰装置现场调试	85
2.6.2	直流融冰装置运行维护策略	87
2.7	直流融冰装置运行中常见问题	89
2.7.1	运行、维护及管理制度	90
2.7.2	水冷却系统	90
2.7.3	控制保护系统	96
2.7.4	直流融冰装置的外围设备	99
2.7.5	其他问题	106
2.8	直流融冰技术应用成效	106

3 交流融冰技术及其配套装置

3.1	交流融冰的类型及实现条件	110
3.1.1	交流融冰的类型	110
3.1.2	交流融冰的实现条件	111
3.2	方式融冰	116
3.3	交流短路融冰	119

3.3.1	改变接线方式	119
3.3.2	利用辅助设备	125
3.4	发电机零起升流	128
3.5	交流短路融冰配套装置	131
3.5.1	改造变压器	131
3.5.2	融冰变压器	135
3.5.3	自能式调节融冰电源	138
3.5.4	自能式融冰电抗器	140
3.5.5	限流电抗器	141
3.5.6	负阻抗特性的融冰辅助装置	143
3.6	应用实例	144
3.6.1	改造融冰变压器	144
3.6.2	融冰变压器	145
3.6.3	全电压带降压变压器融冰	145

4 人工观冰技术

4.1	2014年初主网输电线路覆冰情况	148
4.1.1	冰区分布	148
4.1.2	覆冰线路覆盖率	148
4.1.3	处于微地形、微气候区线路	148
4.1.4	观冰监测点情况	148
4.2	覆冰类型划分及识别	149
4.2.1	类型划分及识别	149
4.2.2	现场观冰注意事项	151
4.3	人工观冰方式及优缺点	152
4.3.1	线路主人观冰	152
4.3.2	护线员观冰	152
4.3.3	人工观冰站观冰	153
4.4	人工观冰流程	153
4.4.1	观冰阶段划分及观冰点选取	153
4.4.2	现场覆冰观测	153
4.4.3	人工观冰数据收集整理	154
4.4.4	覆冰数据分析	155
4.5	以往覆冰监测存在问题	158
4.5.1	人工观冰现场数据及时收集难	158

4.5.2	现场人工观冰冰情误判机率大	158
4.5.3	投入覆冰数据收集整理人员多	158
4.6	引入基于防冰专项管理平台及手持终端的覆冰观测	159
4.6.1	建立防冰专项管理平台	159
4.6.2	建立数据传输移动专线网络通道	161
4.6.3	覆冰数据采集	162
4.6.4	覆冰数据上报	162
4.6.5	覆冰数据查询统计	163
4.6.6	应用效果	164

5 覆冰预警系统及其应用

5.1	覆冰预警系统概述	165
5.1.1	现有技术及产品现状	165
5.1.2	现有技术及产品存在的问题	167
5.2	覆冰预警系统	167
5.2.1	主要技术原则	167
5.2.2	系统体系结构	168
5.2.3	系统功能	169
5.2.4	系统主站平台	170
5.2.5	覆冰预警系统通信	172
5.2.6	覆冰预警系统终端	172
5.3	覆冰预警系统建设	182
5.3.1	覆冰预警监测终端的选点	182
5.3.2	覆冰预警监测终端的安装	184
5.3.3	覆冰预警监测终端的调试	191
5.3.4	覆冰预警系统存在的问题及对策	197
5.3.5	终端常见故障处理	201
5.3.6	覆冰预警系统应用案例	204

6 冰灾的防范与处置体系

6.1	冰灾的日常防范措施	208
6.1.1	电网建设的防范措施	208
6.1.2	输电线路的防范措施	210
6.1.3	入冬前的防范措施	211
6.2	冰灾的应急处置体系	212

6.2.1 组织机构的建立	213
6.2.2 运作机构的建立	213
6.2.3 管理制度及流程	216
6.2.4 应急处置机制	218
6.3 冰灾的应急处置措施	220
6.3.1 灾害事件分级	221
6.3.2 冰情的监测与预警	223
6.3.3 应急响应行动	224
6.3.4 后期处置	227
参考文献	228

电网覆冰危害与成因

1.1 概 述

我国是电网覆冰事故高发的国家之一，这与我国幅员辽阔所导致的复杂地形地貌以及气候有直接关系，在高海拔或冬季湿冷的气候环境下，都易发生电网覆冰事故。当电网出现覆冰事故时，会严重威胁到电力系统的安全稳定运行，使国民经济遭到重大损失，也会严重影响社会生产及人民生活。

输电线路冰害事故产生的直接原因可分为三类：一是线路或者铁塔由于覆冰出现的过荷载情况，随着导、地线覆冰厚度的增加，铁塔承受的荷载会越来越大，主要体现在水平、垂直和纵向上。当覆冰厚度持续增加，铁塔承受的水平荷载及垂直荷载也将急剧增加，超过铁塔及导、地线的结构、材料的屈服强度，使得铁塔的薄弱处及金具（如悬垂线夹、U型环等）出现损坏变形或断裂。最终，导致铁塔折断、顺向倒塔或导、地线纵向断线。二是输电线路或铁塔上出现不均匀覆冰或不同期脱冰，当覆冰区线路档距、塔高不相等时或连续相邻档距不一致时，导线覆冰则会造成线路荷载静态纵向不平衡；当杆塔两侧导线覆冰不均匀时或脱冰不同期时，则会产生不平衡张力，这将使导线固定点承受很大的冲击荷载。三是绝缘子串覆冰过多或被冰凌桥接，引起绝缘子串电气性能降低，导致的冰闪事故，在绝缘子覆冰积雪过程中，可导电颗粒同样会被冻结在绝缘子表面或覆冰层中，在对输电线路进行融冰或由于气温回升使线路覆冰慢慢融化时，会明显提高绝缘子表面的电导，导致绝缘子串在运行电压下发生闪络事故。

覆冰现象包括雨凇、雾凇、雪凇或混合凇等形式，当具备了形成覆冰的温度和水气条件后，风对导线覆冰起着重要的作用。它可将大量的过冷却水滴源源不断地输向送电线路，与导线碰撞而被截获并逐步增大形成覆冰现象。覆冰首先在导线迎风面上成长，当迎风面达到某一覆冰厚度时，导线因重力作用而产生扭转，从而出现了新的迎风面。这样，导线通过不断扭转而使覆冰逐步增大，最终导线上形成圆形或椭圆形的覆冰。

2008年初，受大气环流异常的影响，我国南方地区出现了很强的寒潮过程，遭遇了有气象记录以来最严重的大范围持续低温雨雪冰冻灾害天气，极端低温凝冻天

气一直持续到2月中旬。此次极端冰冻气候,致使贵州全省范围自东向西出现大面积、长时间、高强度的低温凝冻灾害,省内88个县(市、特区)中受冰灾破坏影响的达50余个,1117个乡镇、11069个行政村受到停电影响,涉及461万户、1817万人。此次冰灾中,贵州电网受灾情况尤其严重,杆塔、导线严重覆冰,大范围倒塔、断线、掉串和闪络事故频发,使得电网遭受前所未有的重创,最严重的时候曾造成18个县全城停电。此次冰灾造成低压线路损坏长达11748m,10kV及以上电压等级输电线路受损5072条,其中500kV线路26条、220kV线路94条、110kV线路277条、35kV线路645条以及10kV线路4030条;杆塔倾倒损坏184875基,其中500kV铁塔216基、220kV铁塔241基;变电站停运648座,占当时总数的83%;贵州电力通信网中断通信光缆共计78条,中断率达到21.4%。冰灾使得贵州电网500kV“日”字形环网完全被破坏,被迫分裂成四片区域运行,最严重时统调负荷、供电量分别只有冰灾前的45%、36%,西电东送由425万kW转为倒送50万kW^[1]。

1.2 电网覆冰的气象条件及特点

1.2.1 覆冰的气象条件

1 贵州省位于北半球中低纬度地区,每年冬季,北方南下的冷气团活动频繁,而来自南方海洋的水气又十分丰富,加之贵州地处云贵高原东北侧斜坡地带,平均海拔1100m左右,地势西高东低,频繁南下的北方冷气团受到云贵高原地形阻挡,在贵州西部与云南东部之间上空形成了气象学上有名的“云贵静止锋”。云贵静止锋长期停滞在贵州上空,还有来自孟加拉湾暖湿气流源源不断的丰富的水气输送补充,从而导致贵州冬季的冻雨次数多、持续时间长。

低温冰冻灾害的具体气象特点有:一是每年入冬后西南暖湿气流很强,与东北气流长时间在贵州上空交汇,具备持续性雨淞天气产生的降水条件;二是贵州冬季会长期处于强大的蒙古高压的底部,地面不断有冷空气从东路补充南下,造成持续性低温天气,地面温度低于0℃,形成了有利于强冰冻产生的深厚的冷下垫面;三是在1500~3000m高空有温度高于0℃的暖气流北上,形成一个暖空气层或云层,而在3000m以上则是高空大气,温度低于0℃,云层温度往往在-10℃以下,大气垂直结构呈上下冷、中间暖的状态,即近地面存在一个逆温层。大气层自上而下分别为冰晶层、暖层和冷层。如此,从冰晶层掉下来的雪花通过暖层时融化成雨滴,接着当它进入靠近地面的冷气层时,雨滴便迅速冷却,成为过冷却雨滴,降至温度低于0℃的地面及树枝、电线等物体上时,便集聚起来布满物体表面,并立即冻结,形成雨淞。

贵州持续低温冰冻的极端气象情况呈现出如下的重要气象特征:气温-5~0℃,相对湿度大于90%,风速1~8m/s,持续时间多数地区在10天以上,终日持续冻

雨、轻雾、毛毛雨、雨淞、雨、雨夹雪或小雪等日气象现象,在这种气象条件持续作用下,形成严重的雨淞、雾淞、雪淞或混合淞等形式的覆冰。

覆冰是受温度、湿度、风速风向、空气中或云中过冷却水滴直径及空气中液态水含量等多种因素影响的综合物理现象。根据气候条件不同,导线的覆冰分为雨淞和雾淞两大类。其中雾淞的密度较小,为 $100\sim 400\text{kg/m}^3$,而雨淞密度较大,一般约为 $400\sim 900\text{kg/m}^3$ 或更高,在导线上冻结成透明状冰壳,导线上的覆冰一般指雨淞。形成雨淞的气象条件一般是温度为 $-10\sim 0^\circ\text{C}$ 、风速 $5\sim 15\text{m/s}$ 、湿度 80% 以上。除以上气象条件外,覆冰和地理条件有很大的关系,特殊的地形条件往往造成局部的特殊气候,促使过冷却雨(或湿雪)下降,造成局部地域覆冰增大。

覆冰程度一般都是由于特殊的地形条件(“微地形”)形成局部的特殊气象(“微气象”)造成的。“微地形”一般有以下两个特征:一是地形突出,比周围地形明显更高(特别是相对于迎风面);二是迎风面一侧较大范围的地域内,海拔高程处于相对较低的范围内。当线路处于“微地形”中的风口、垭口、迎风面以及当“微地形”的迎风面有河流或水库等水源时,导线覆冰情况更为严重。

贵州省的地形及气候非常符合上述最佳覆冰条件,致使整个覆冰过程持续时间可长达 30 余天,局部地区甚至长达 40 天以上,平均最长连续冰冻天气 20 天左右。在这样的条件下,雨淞覆冰一直处于发展与保持状态,完全没有消融脱冰机会,因而很容易形成大冰凌现象。

1.2.2 覆冰的特点

根据贵州省气象台统计,贵州全省 88 个县(市、区)在冬季均会出现不同程度的冰冻灾害。下面以 2008 年贵州省遭遇的罕见冰灾为例来阐述覆冰的特点。

(1) 凝冻影响范围广。2008 年冰灾期间,贵州省 84 座气象观测站每日雪凝站在 50 站次以上,占全省总数的 50% 以上,最大值分别为 1 月 27 日和 2 月 1 日的 76 站次。每日雪凝范围平均保持在 62 县(市、区),共有 1183 县(市、区)次出现雪凝天气,持续时间最长达 33 天。共有 83 个县(市、区)出现雪凝天气,占全省 88 个县市区的 94.3%,冰冻范围突破了 1984 年 76 个县(市、区)受冰冻灾害的历史记录,超过全省有气象资料以来的最大影响程度。

(2) 冰冻强度大。贵州省中部以东区域的冰冻灾害最为严重,部分县(市、区)结冰厚度达 $30\sim 60\text{mm}$ 以上,其中铜仁市万山特区结冰厚度最厚达到 83mm ,突破了威宁 1962 年出现的 62mm 结冰厚度历史极值,如图 1-1 所示。

此次持续的低温冰冻天气还表现为平均最低气温明显偏低,平均最高气温异常偏低,达历史同期最低。冰灾初期的 48h 内我省日平均气温下降幅度为 $5.7\sim 20.1^\circ\text{C}$,我省大部分地区日最低气温均在 0°C 以下。根据气象部门记录,贵州日平均最低气温虽未达历史最低,但平均最高气温异常偏低,较常年同期偏低达 5.7°C ,明显超过 1976~1977 年,达历史同期最低值(见图 1-2,数据出处:国家气候中心 2008 年 1 月《中国气候影响评价》报告)。

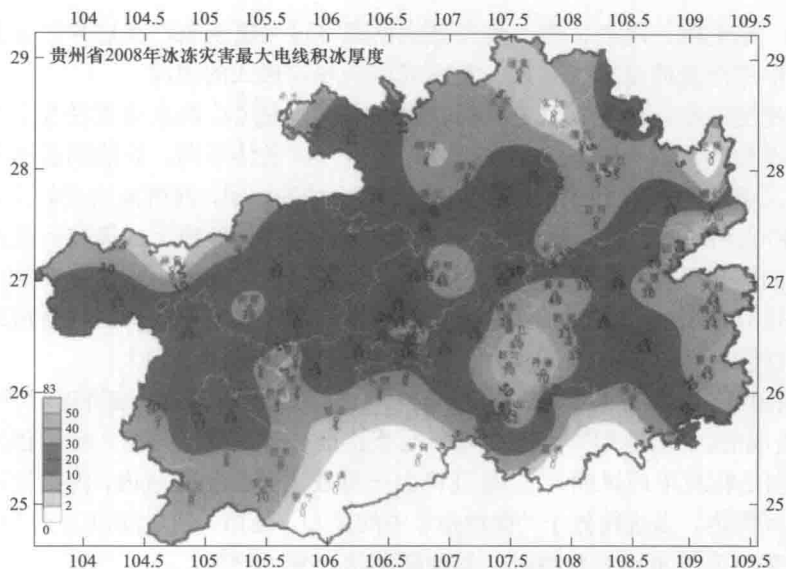


图 1-1 2008 年初贵州省最大电线结冰厚度 (mm)

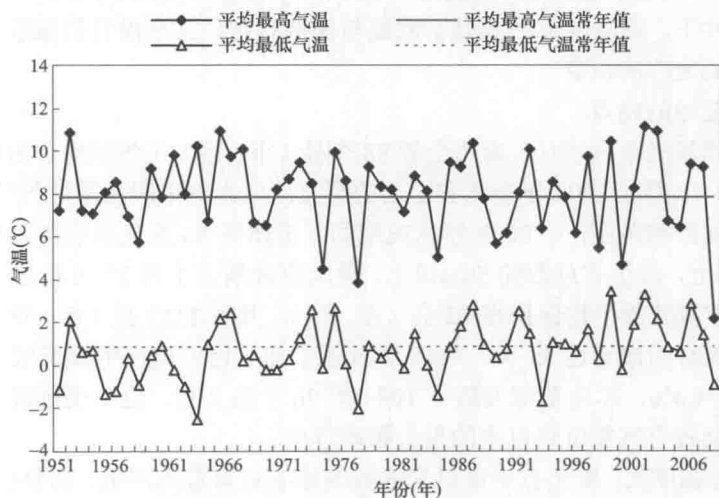


图 1-2 长江中下游及贵州地区历年 1 月 10 日~2 月 2 日平均最高、最低气温变化趋势

从降水量来分析, 贵州省平均降水量比常年值偏多, 为本次冰冻灾害提供了条件, 如图 1-3 所示。

(3) 冰冻持续时间长。此次低温雨雪冰冻天气持续时间长, 长江中下游及贵州地区日平均气温小于 1°C 的最长连续日数仅少于 1954~1955 年, 为历史同期次最大值。长江中下游及贵州冰冻日数 (日平均气温小于 1°C , 且雨雪量大于 0.1mm 为 1 个冰冻日) 超过 1954~1955 年, 为历史同期最大值 (图 1-4, 数据出处: 国家

气候中心 2008 年 1 月《中国气候影响评价》报告, 仅统计至冰冻前期的 2 月 2 日)。

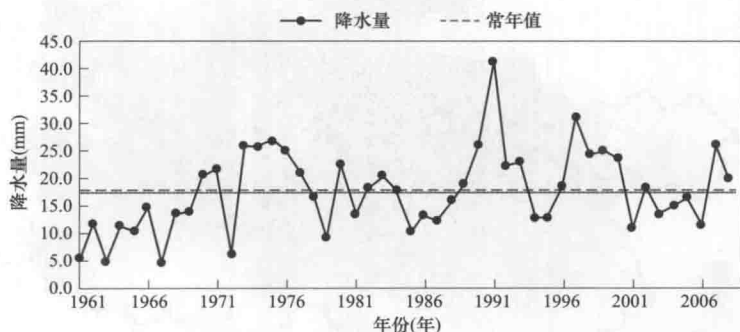


图 1-3 贵州历年 1 月 12 日~2 月 2 日平均降水量变化趋势

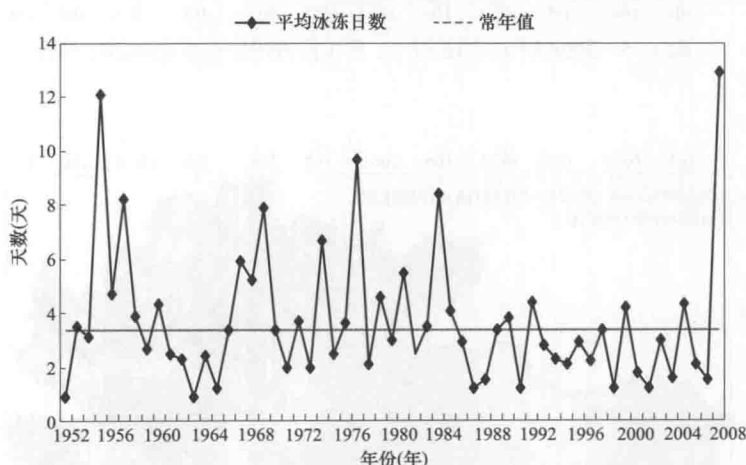


图 1-4 长江中下游及贵州地区历年 12 月 1 日~2 月 2 日冰冻日数变化趋势

2008 年冰灾中, 铜仁市万山特区冰冻持续 23 天, 贵阳、台江、石阡等 49 县(市、区)的冰冻持续时间则突破了历史纪录(见图 1-5), 贵州省的中部大部、遵义市、铜仁地区、毕节地区局部、安顺市局部、黔南州大部、黔东南州大部的 55 县(市、区)突破 1984 年纪录(见图 1-6)。

此次低温、冰冻天气持续时间长, 全省最长冰冻日数为历史同期最大值。从 1 月 12 日以来的历史资料分析, 贵州日平均气温小于 1°C 的最长连续日数仅少于 1977 年, 为历史同期次大值(见图 1-7), 最长冰冻日数(日平均气温 $<1^{\circ}\text{C}$, 且雨雪量 $>0.1\text{mm}$ 为 1 个冰冻日)大于 1984 年, 为历史同期最大值(见图 1-8)。

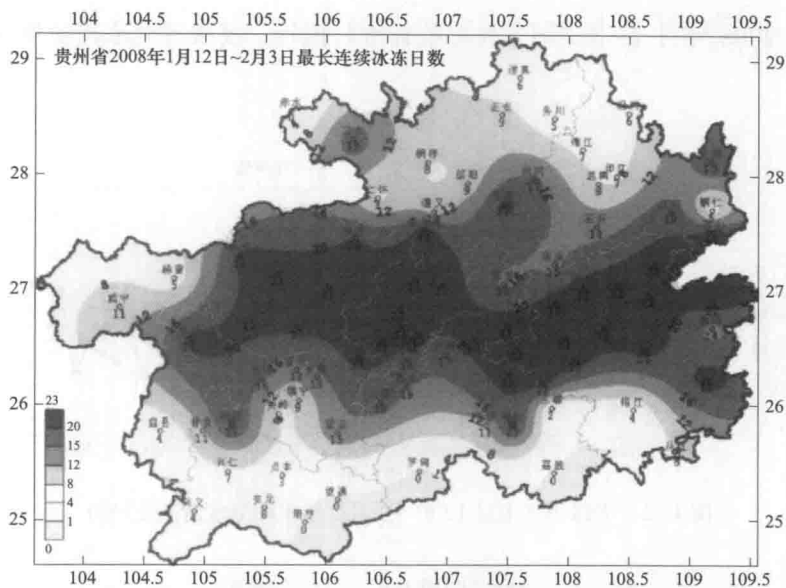


图 1-5 2008 年 1 月 12 日~2 月 3 日贵州省最长连续冰冻日数

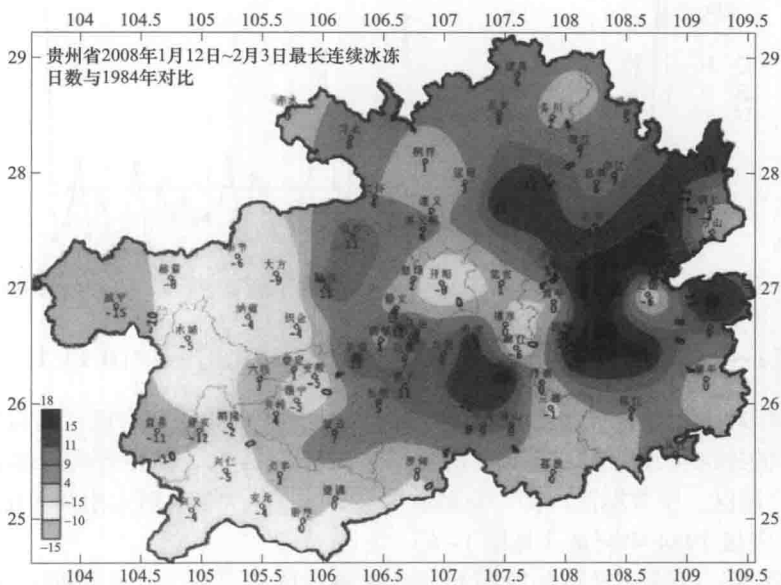


图 1-6 1984 年 1 月 12 日~2 月 3 日贵州省最长连续冰冻日数