

Ice Early-warning System and the Automatically De-iced Technology
Research on the High Risk Section of Expressways

高速公路早期凝冰预警及 高危路段凝冰自动化处置技术

朱宝林 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

高速公路早期凝冰预警及 高危路段凝冰自动化处置技术

朱宝林 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书内容包括路面凝冰形成机理与环境条件分析、路面凝冰信息采集与预警技术、高危路段凝冰自动化处置技术、实体工程应用案例分析、系统的经济社会效益评价等。

本书可供从事道路工程及机场、土建工程的科研、设计、施工(新建及养护)与养护管理技术人员参考,亦适合高等级院校与科研机构的教师、学生、相关专业技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

高速公路早期凝冰预警及高危路段凝冰自动化处置技术 / 朱宝林著. —北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015.6

ISBN 978-7-114-12232-3

I. ①高… II. ①朱… III. ①高速公路-结冰-预警系统②高速公路-防冰系统-自动化系统 IV. ①U418.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 113646 号

书 名: 高速公路早期凝冰预警及高危路段凝冰自动化处置技术

著 作 者: 朱宝林

责任编辑: 赵瑞琴

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 中国电影出版社印刷厂

开 本: 720×960 1/16

印 张: 7

字 数: 115 千

版 次: 2015 年 6 月 第 1 版

印 次: 2015 年 6 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12232-3

定 价: 38.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

编审委员会

主 任：朱宝林

委 员：萧 赓 田苗苗 魏道新 陈 景

边 莉 王 瞳 江睿南 李亚非

杨万里 罗代松 李 霖 琚晓辉

周小焕 宣登殿 孙建民 王秋才

曹艳华 许 严 石扬钊 李晓军

曾庆展 凌桂香 杨建国 陈 明

柴 智

前 言

2008年初,我国出现50年一遇的雨雪冰冻灾害,其范围覆盖大半个中国。加之适逢春节期间,在某种程度上加大了自然灾害的消极影响。在突发事件中,我国公路基础设施严重受损,人民群众基本生活保障受到了不同程度的影响。据不完全统计,在这次雨雪冰冻灾害中,造成直接经济损失1516.5亿元,致129人死亡,4人失踪。广东、贵州、湖南、江西等19个省份直接经济损失达573亿元,据灾后分析,此次灾害的影响其衍生危害还将持续3~5年。

随着现代公路运输体系所追求的快速、高效和安全理念的提出,在极端气候条件下的道路交通安全越来越受到交通管理部门的广泛关注。目前,许多国家对雨雪冰冻天气灾害发生过程中,冰雪灾情分布、气候条件、机理研究、灾情评估等多方面形成了初步研究成果,这对于各国交通管理部门制定极端气象灾害的服务预案有积极的作用,并为相关科研机构进一步提高此类灾害的预报技术和深入研究提供了一定的理论基础。但是,这些监测体系和预警系统的应用尚不够完善,是否适用于我国的路面凝冰处置也未经实际工程验证,并且引用国外技术相对成本较高。而对于在路面凝冰发生前、凝冰形成期和路面凝冰形成灾害后这一全过程中的预警、监测及处置技术,国内还尚未开展全面系统的研究工作,能满足我国交通路域气象服务的专业监测网基本上是空白。

近年来,围绕着路面凝冰预警及处置技术研究与应用中出现的問題,研究开发了具有我国自主知识产权的、针对路面凝冰的有效预警及处置技术。

作者主持的交通运输部西部交通建设科技项目“高速公路早期凝冰预警及高危路段凝冰自动化处置技术研究”提出了一套完整的高速公路早期凝冰预警及自动化处置技术及装备系统,并取得了重大创新成果。首先在凝冰仿真实验室对道路凝冰产生的温度、湿度、风速等环境条件进行模拟,基于Bayes判别理论,揭示了凝冰形成机理与环境条件,为道路凝冰预警系统的开发提供了基础依据。其次开发了具有我国自有自主知识产权的主动式凝冰预警传感器,捕捉了不受路面介质影响的真实冰点,实现了路面凝冰的提前感知。同时,提出“高速公路路面凝冰危险性等级评定方法”,明确特殊路段和普通路段的路面凝冰危险

性评定,为凝冰自动化处置系统的布设与喷洒量的选定等提供了决策依据。最后,开发了凝冰智能喷洒系统,该系统根据凝冰预警系统的反馈信息实现了自动化智能喷洒。基于物联网技术,为道路管理者提供了监控中心远程控制、手机无线控制、现场控制等三种智能喷洒管理模式,并实现了喷洒融冰剂剂量的精确控制,最大限度地减少了对周围植被和桥梁结构的影响。项目研究成果总体达到了国际先进水平,在液固相变凝冰预警传感器研发方面达到国际领先水平,研究成果对进一步提高高速公路的应急保通能力具有重要意义。结合重庆物联网重大专项,2013年6~12月,在重庆石忠路上安装了喷洒设备,运行一年性能稳定,效果良好,物联网重大专项示范工程被由院士组成的评审专家组评为“物联网技术在公路网运行管理中得到成功应用的一个缩影”。目前已在云南楚大、大保高速公路进行了项目的推广应用,在其高危路段安装了13套该系统。项目研究成果已于2014年10月获得部科技司颁发的交通运输科技成果推广证书(编号2014062)。

本书以作者近年来的科研成果为基础,介绍了我国高速公路凝冰灾害形成的气象及环境特点,提出了我国高速公路路面凝冰环境条件标准和凝冰危险性等级评定标准;并建立了高速公路早期凝冰预警系统管理平台,研发出特殊高危路段凝冰自动化处置技术。在依托实体工程验证的基础上,力求为广大读者呈上一本全面、系统地介绍高速公路早期凝冰预警及自动化处置全套技术体系的著作,以填补国内外该研究领域的技术空白,为我国交通事业的发展,特别是冬季交通安全的建设与维护贡献力量。

在课题研究与本书编写过程中,得到了贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司、重庆高速公路集团有限公司等多家单位的鼎力支持,作者要深深感谢相关科研合作单位、交通建设管理单位及所有课题研究人员,每一项研究成果的取得都凝聚着各参研人员的辛劳与智慧。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,敬请专家和读者提出宝贵意见。

本书的编写及出版得到了国家西部交通建设科技项目的经费资助。

朱宝林

2015年3月于北京

目 录

第一章 绪论	1
第一节 路面凝冰的不利影响	1
第二节 路面抗凝冰技术发展	4
第二章 路面凝冰形成机理与环境条件	8
第一节 路面凝冰的物理特征	8
第二节 冻雨形成机理	8
第三节 凝冰形成机理	11
第四节 凝冰形成环境条件	14
第三章 高速公路路面凝冰气象信息采集系统	21
第一节 系统组成	21
第二节 系统主要功能和特点	23
第三节 系统使用效果验证	24
第四章 高速公路路面凝冰信息采集与预警技术	32
第一节 非埋入式信息采集技术及凝冰检测机理	33
第二节 埋入式路面凝冰信息采集及预警技术	46
第三节 高速公路路面凝冰危险性等级评价研究	56
第五章 高危路段凝冰自动化处置技术	70
第一节 自动喷洒系统	70
第二节 路面凝冰监控器设计及实现	75
第三节 路面凝冰融雪自动喷洒监控软件设计及实现	81
第四节 自动化喷洒系统模拟现场试验验证	94

第六章 凝冰预警与自动化处置系统实体工程应用案例分析 96

 第一节 工程背景及总体实施方案 96

 第二节 主要技术质量要求 97

第七章 系统效益评价 101

 第一节 经济效益分析 101

 第二节 社会效益分析 101

参考文献 103

第一章 绪 论

第一节 路面凝冰的不利影响

2008 年 1 月中旬至 2 月初,我国南方广大地区遭遇 50 年一遇大范围低温雨雪冰冻天气。持续的低温雨雪冰冻天气给贵州、湖北、湖南、安徽、江西、广西等 20 个省(区、市)造成重大灾害。据国家民政部统计,此次灾害受灾人口达 1 亿多人,直接经济损失达到了 500 多亿元。特别是对春运期间的交通运输、能源供应、电力传输、通讯设施、农业及人民群众生活造成严重影响和损失。灾害损失情况统计见表 1-1。

2008 年凝冰灾害损失情况统计表

表 1-1

省份	公路灾害损失(亿元)				救灾投入 (亿元)	通行费损失 (亿元)
	高速公路	普通公路	农村公路	合计		
贵州	3.2	5.03	5.72	13.95	1.8	1.2
湖南	47	13	4.44	64.44	7.7	8.6
广东	3.09	0.69	0.56	4.34	2.75	1.37
湖北	1.5	5.5	4.2	11.2	2.27	1.14
浙江	6.27	5.52	3.01	14.8	1.92	0.3
江苏	0.27	3.64	3.15	7.06	1.52	0.41
安徽	7	8	12	27	1.56	0.27
江西	3.19	2.88	0.89	6.96	1.45	3.5

冰雪天气一般出现在具备降水的大气环流背景下。北方冷空气在南下过程中与南方强暖湿气流相遇,在大气近地面层形成 0℃ 以下的冷空气楔(冷垫),而在大气低层则出现较强逆温层,当冷空气楔上的逆温层也处在 0℃ 以下时,降落到地面的降水形式为雪;而当逆温层处在 0℃ 以上(空气中存在液态水或过冷水滴)时,则降水形式为雨,但到达冷垫层内后迅速凝结为雨淞,凝聚在地面上形成冰层即为路面凝冰。另外,有些地区阴面积雪区在白天气温有所升高,地面降雪融化,在夜间气温又降至 0℃ 以下,融化的雪立即凝结成冰,出现冰层覆盖地表,也应为路面凝

冰。路面凝冰灾害和通常的路面积雪灾害不同。积雪灾害多发生于北方寒冷地区,由于气温和空气湿度较低,积雪不会在路面上留下融冰。积雪经汽车行驶压实后,即使在上坡路段,车辆轮胎加装防滑链后仍可以在雪面上安全行驶。其摩擦力也远高于水雪相容态凝聚路表面形成润湿的状态。

路面凝冰厚度一般可达 10~20mm,最厚的可达 200mm 以上。由于凝冰多发生于空气温度略低于 0℃ 的温度范围,路面凝冰表面处于润湿状态,凝冰上的水膜使得路面表面完全丧失摩擦力,大大降低机动车辆的可操控性与行驶安全性。调查表明,路面凝冰会导致路面抗滑能力大幅度降低,既削弱了道路的通行能力,容易产生恶性交通事故,又会对道路及其附属构造物产生破坏,严重时甚至造成交通中断、人们的生活和生产无法正常进行,甚至危害人民生命和财产的安全。

据相关研究成果表明,冻雨灾害性天气在我国部分省、市区均有发生,分布特点是山区比平原多,海拔高地区极为显著。云贵川高海拔地区是我国冻雨频发地区,湖南、江西、湖北、河南、安徽、江苏等地每年均有冻雨发生,山东、河北、陕西、甘肃、辽宁南部等地也偶有发生。据贵州 79 个气象观测站 1961~2007 年近 46 年冻雨观测有关资料进行统计分析,冻雨出现次数最多、持续时间最长的为贵州省,约占全国冻雨频数的 70%。

冻雨灾害波及面广,包括农业、林业、电力、交通等领域,而交通行业遭受灾害首当其冲。以贵州省公路交通管理部门近五年的统计结果为例,历年 12 月至次年 3 月的凝冰发生期间,高速公路平均车辆通行速度仅为设计时速的 70%,部分路段仅为设计时速的 30% 以下,高速公路封闭日数为 10~20 天。普通公路行车速度显著降低,由于交通事故频发,路网通行能力不足 60%。如图 1-1、图 1-2 所示。

随着现代公路运输体系所追求的快速、高效和安全理念的提出,在凝冰等极端气候条件下道路行车安全越来越受到交通管理者的广泛关注。尤其山区道路建设大多存在于较为恶劣的地理条件下,如长下坡、陡坡急弯、高海拔、一侧悬崖等,这些道路线形一旦与路面凝冰结合,就会对行车安全产生更大危害。针对我国高速公路凝冰易发地区及特殊高危路段冬季交通事故多发现状,在对凝冰易发地区地理环境条件、气候条件和历史事故调查分析的基础上,依据我国气象学凝冻区域划分原则,对凝冰易发路段的海拔高度、地形地貌、道路线形、环境气候、凝冰期、事故发生率等实际情况进行调查与分析,开展了“高速公路早期凝冰预警及高危路段凝冰自动化处置”成套技术研究。

该技术建立了完善的凝冰信息自动化采集系统,可实时监测到道路凝冰发生的概率、趋势并发出凝冰预警信息,对凝冰路段进行科学、有效、及时的防凝冰和融

冰处置,起到抑制道路凝冰规模延续发展的作用,从而防止大面积凝冰灾害的发生,提高道路交通系统抵御冰雪灾害的能力,保证冰雪灾害期道路交通安全、畅通。



图 1-1 凝冰路面上的汽车



图 1-2 凝冰路面上的交通事故

运用该路面凝冰状况自动化检测与预知提前处置的整套技术及设备装备,可实现对高危险路段路面出现凝冰的实时监控和预警,并采取有效路面抗凝冰技术措施,最大限度地减少了由凝冰带来的不利影响。该系统对解决我国高速公路冬季道路行车安全问题、降低交通事故率与交通事故损失和保障人民群众的正常生产生活具有重大的经济效益和社会意义。

第二节 路面抗凝冰技术发展

目前,许多国家对雨雪冰冻天气灾害发生过程中,冰雪灾情分布、气候条件、机理研究、灾情评估等多方面形成了初步研究成果,这对于各国交通管理部门制定极端气象灾害的服务预案有积极的作用,并为相关科研机构进一步提高此类灾害的预报技术和深入研究提供了一定的理论基础。

在雨雪冰冻等天气信息采集系统研究方面,美国、德国和瑞士等发达国家正在相继建立不同形式的公路气象服务系统或道路气象信息系统 RWIS(Road Weather Information System, RWIS),一些国家的交通管理机构把 RWIS 和智能交通系统 ITS(Intelligent Transport System)进行整合,通过准确及时的气象信息提高交通管理的智能化水平与交通安全方面的公共服务能力。

美国联邦公路局一直将道路天气作为首要关注对象,不断优化气象观测网,以获得更多、更细致、更准确的气象资料,为天气预报制作提供更多依据。交通管理部门已经将气象保障作为指挥交通、防止交通事故的重要手段,根据天气监测和专业天气预报,确定高速公路的关闭、开启条件和车速限定。

德国非常重视公路气象预报的开展。一般要求气象部门提供 1~3 天的公路气象预报,用于制订公路管理计划,另外需要当天 2~24 小时气象预报作为详细公路区域气象预报的补充和解释,预报明确给出 24 小时内时间和空间的气象变化情况,包括路面温度和公路路况等。

瑞士是欧洲中西部的一个内陆国,境内山、湖众多,遭受极端气候影响较严重,特别是冰雪灾害。通过安装于全国高速公路上的 RWIS(道路气象信息系统),确保了整个高速公路网络和机场在过去几十年间从不因为冰雪气候而关闭。

在路面凝冰或积雪的道路交通安全预警研究方面,国外一些研究机构正在开展应用的研究。

日本成田国际空港股份有限公司、三机工业株式会社、日立电线株式会社于 2005 年共同申请了“路面结冰检测传感器及其设备方法和路面结冰检测方法专利”。该发明涉及的路面结冰检测传感器,由接触路面的感温部件和从该感温部件

竖直设置的鳍部组成。鳍部呈 T 字形,由高导热性金属制造。将具有光反射峰值波长随变形而变化的光纤布拉格光栅(FBG)黏结在上述感温部件的鳍部上。以壳体隔热部件包围上述感温部件的鳍部和光纤。用光缆对在路面上设置规定数量的各路面结冰检测传感器进行连接,从光缆的一端射入脉冲光,接收从各路面结冰检测传感器传来的反射波长,来测量路面温度。

能量吸收系统公司于 2002 年申请了“路面结冰点监测系统和方法专利”。该专利涉及一种改进的路面结冰点监测系统和方法,包括改进的采样井,用于精确测量路面液体的结冰点。采用只需要两个导体的温度传感器来接收功率以及发送和接收数字地址和温度信息,改进了算法,以检测路面上液体的结冰点,使用传导性测量值验证检测到的结冰点,并通过因特网向远程计算机发送温度信息。

在路面凝冰状况的传感器研发方面,1998 年,Pettier 等研发了一种机械式的路面冰冻传感器。这种传感器的原理和结构都很简单,主要部分仅是铺设在路面下的一条压缩空气管道,管道的出口开设在路面上。当路面冻结时,管道出口就会被堵塞,通过测量管内气压的变化就可判断路面冰冻程度。虽然构思巧妙,实际上,这种装置需要比较复杂的设施,比如压缩空气的设备和气压测量仪表,这导致了成本上升。2007 年,Gailius 提出,探测轮胎与路面之间的摩擦噪声,可以获得路面的冰冻信息,并且开展了初步的试验,但这个方法目前还很成熟。

路面传感的另一个重要方面是路面积水厚度的传感。测量水膜厚度的最常用方法是基于多普勒雷达原理,通过测量雨滴的密度、速度、体积等获得降雨量的数据,并且由此推算出路面的水膜厚度。这种方法可以达到 0.01mm 的测量精度,0 ~ 3mm 的量程。基于这种原理的水膜厚度传感器,有 Lufft 公司的 R2S、IRS21, Vaisala 公司也生产了基于雷达原理的路面水膜传感器。如图 1-3 所示为 AV Lufft 公司的 IRS21 路面状态传感器。

水膜厚度传感的另一个重要技术路线是光学方法。

光学方法可以利用空间光波也可以利用光纤导光。Vaisala 的水膜厚度传感器 DRS511 将发射和接收光纤埋设在路面之下,光纤的端面朝向路面,如图 1-4 所示。输出光纤向水膜发射一个光波,水膜的上表面将光波反射,并由接收光纤收集反射回的光能量,由此判断出水膜的厚度。

在路面凝冰的处置技术研究方面,国外一些研究机构也开展了相关应用研究。路面主动除凝冰技术是一种利用路面特殊的力学特性或构造特性,通过行驶车辆反复作用,无需其他人为辅助即可清除路面凝冰的技术,包括物理类抗凝冰路面和化学类抗凝冰路面。

日本及北美、北欧的一些国家开展了粗糙路面和自应力弹性路面物理类抗凝

冰路面技术的研究,在积雪不深、凝冰冰层较薄的潮湿山区公路具有一定应用价值。



图 1-3 AV Lufft 公司的 IRS21 路面状态传感器

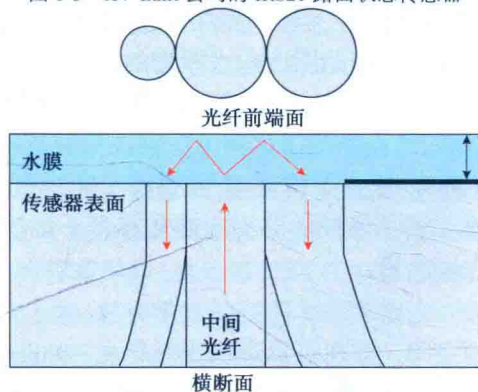


图 1-4 光纤路面水膜厚度传感器

日本在化学类抗凝冰路面技术上对蓄盐路面技术、FAP 纤维路面技术有一定研究,但在如何有效控制释放融冰材料的浓度与数量方面仍需完善。

我国在公路气象服务系统研究方面起步较晚,近年来,国内开展了一些交通气象服务方面的研究,在路面信息传感和采集方面也开展了一定研究。

我国武汉理工大学路单等人研究了不利天气情况下的道路信息采集,包括能

能见度、环境温湿度、路面状况、路面微观形貌、路况数据无线传输等。长安大学王少飞等研究了高速公路恶劣气象信息采集系统的总体框架等问题。王位亚全面地研究了高速公路恶劣气象信息的采集和传输系统。大连大学的张长君等利用 Markos Papageorgiou 的公路交通流模型对各种气象条件进行分析,使用神经网络方法,建立了交通流模型和匝道入口控制系统;利用 BP 神经网络的算法进行了仿真,对其中的参数进行辨识,但现有气象灾害综合监测方法、技术、探测范围、精度、时空、分辨率等方面尚不能满足高速公路气象防灾减灾的需求,能满足我国交通路域气象服务的专业监测网基本上是空白。

一些研究者在气候气象对道路交通安全影响的分析理论与方法方面积累了初步经验,但在适合高速公路预报服务技术方面尚未形成系统的研究成果,也未能开展符合高速公路气象特征的服务。国家气象中心曾对我国气候气象及灾害性天气对交通系统造成的影响进行了分析评述,指出对公路交通具有重要影响的灾害天气因素有暴雨洪水、冰雪、风、雾及高温天气等。近年来,气象工作者已经开始重视开展灾害性天气与公路交通密切相关的“路域气象”的相关研究,但尚未达到公共服务实际使用的层面。

随着公路交通气象服务需求增强,我国一些气象台站正在开始建设高速公路沿线灾害性天气监测系统,但由于资金等条件的限制,进展比较缓慢,而且主要集中于对单一气象现象的监测,有关路面凝冰灾害的预警监测技术由于多种原因未能得到系统研究。因此,需要加强雨雪冰冻天气造成的路面凝冰预报预测机理研究,认真开展基于高速公路路面凝冰预报预测技术分析总结,探索有效技术方法,提高路面凝冰预报预测水平,把灾害天气预报科学有效地转变为灾害预警。

在除冰雪方面,国内也进行了一些研究。基于我国东北地区冬季寒冷、降雪及城市道路路面抗滑的需要,哈尔滨工业大学在橡胶沥青混凝土中掺加橡胶颗粒以增加路面压缩变形能力方面进行过研究,取得了一些初步研究成果,但对保证路面耐久性方面的平衡有待进一步完善。重庆鹏方路面工程技术研究有限公司开展了有关弹性浇筑式沥青混凝土、高变形橡胶沥青混凝土的研究工作。目前,影响自应力弹性路面广泛应用的技术难点是高变形弹性颗粒与沥青胶结料的黏附性不足,导致这类路面的使用寿命不及常用的沥青路面层长。

第二章 路面凝冰形成机理与环境条件

第一节 路面凝冰的物理特征

路面温度会随着气温的下降而降低,当大气降水、空气湿度过高时,在低温路面便会形成结冰(黑冰)、结霜、积雪、冰雪(包括黑冰)等现象。

不同的气候条件将引起不同的天气类型。冰雪天气一般出现在有利于降水的大气环流背景下,北方冷空气在南下过程中与南方强暖湿气流相遇,在大气近地面层会形成 0°C 以下的冷空气楔(冷垫),在大气低层则出现较强逆温。当冷空气楔上的逆温层也处在 0°C 以下时,降落到地面的降水形式为雪;而当逆温层处在 0°C 以上(空气中存在液态水或过冷水滴)时,则降水形式为雨。逆温层到达冷垫层内后迅速凝结为雨淞,凝聚在地面上形成冰层即为路面凝冰。

当空气温度略低于 0°C 时,路面最易发生凝冰。我国南方地区出现的冻雨是产生凝冰的主要诱因,其厚度一般可达 $10\sim 20\text{mm}$,最厚的达 200mm 以上。而在北方地区,少量降雪后,白天较高的气温使路面上的雪逐渐融化,在夜间气温又降至 0°C 以下,融化的雪立即凝结成冰,出现冰层覆盖地表,也形成路面凝冰。

公路路面的凝冰灾害和积雪灾害不同,一定厚度的积雪经汽车行驶压实后,其摩擦力远高于表面润湿状态的薄层凝冰,积雪表面撒煤渣或在车辆轮胎加装防滑链后,便可使交通工具在雪面上较为安全地行驶。而路面凝冰比积雪危险,即便采取了上述简易的路面防滑措施,也无法达到令人满意的防滑效果。路面凝冰的表面是处于润湿状态的,薄冰上的水膜使得道路表面完全丧失了摩擦力,从而导致路面抗滑能力大幅度降低,严重影响了路上行驶车辆的可操控性及安全性。据调查,路面凝冰灾害可对道路及其附属构造物产生破坏,削弱路网通行能力,严重时还将造成交通中断,使人们的生活和生产无法正常进行,甚至产生恶性交通事故,危害人民生命和财产的安全。

第二节 冻雨形成机理

冻雨是初冬或冬末春初时节可见的一种天气现象。当雨滴从空中落下来时,

由于近地面的气温很低,在电线杆、树木、植被及道路表面都会冻结上一层晶莹透亮的薄冰,气象上把这种天气现象称为“冻雨”。我国南方一些地区把冻雨又称作“下冰凌”,北方地区称它为“地油子”或者“流冰”。

冰冻灾害期间降水带主要分布在我国江淮、江南、华南以及西南地区东部(图 2-1),其中累积降水量超过 100mm 的地区包括江苏南部、安徽南部、浙江、江西、湖南南部、广西中东部、广东中北部、福建等省区。主要雨带呈东北—西南向,从广西东部经湘粤交界地区、经赣南、闽西延伸至皖南。

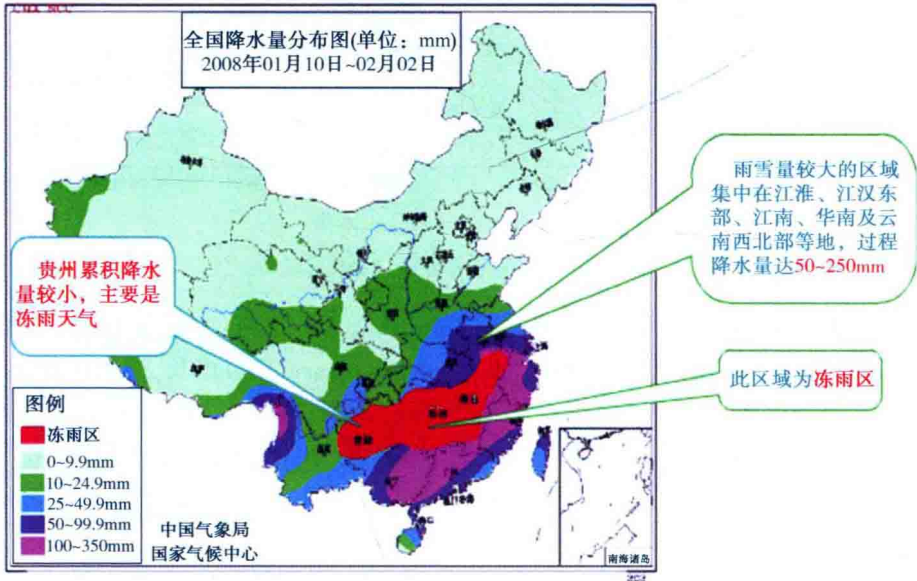


图 2-1 2008 年 1 月 10 日~2 月 2 日全国降水量分布图

冻雨的形成机制有以下两种。

(1) 融化过程 (Melting process): 大于 0°C 的暖空气层覆盖在冷空气上,雪花(冰晶)在下落过程中经过暖层溶解为液滴,然后经过近地面冷层冷却、再冻结。融化过程是大多数冻雨形成的原因。20 世纪初,很多科学家就认识到了冻雨天气过程中的“融化过程”。当较强的冷空气南下遇到暖湿气流时,冷空气像楔子一样插在暖空气的下方,近地层气温骤降到 0°C 以下,湿润的暖空气被抬升,并成云致雨。冻雨出现时上空为逆温,有一层温度高于 0°C 的暖层,这是“融化过程”的主要特点(图 2-2)。Huffman and Norman 统计了美国 48 个站的数据,提出有 62% 的冻雨天气是与暖层融化过程有关的,因此认为“融化过程”是冻雨天气发生的重要机制。