

论文

电线积冰微物理机制初步研究: 观测和模拟

牛生杰^{①*}, 周悦^①, 贾然^①, 杨军^①, 吕晶晶^①, 柯怡明^②, 杨志彪^②

① 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044;

② 湖北省气象局, 武汉 430073

* E-mail: niusj@nuist.edu.cn

收稿日期: 2010-09-01; 接受日期: 2011-02-18

科技支撑计划项目(编号: 2008BAC48B01)和江苏省青蓝工程创新团队项目资助

摘要 利用 2008/2009 和 2009/2010 年冬季在恩施雷达站观测得到的能见度、云雾滴和雨滴微物理特征量以及积冰厚度资料, 结合同期的自动气象站和常规气象资料, 对恩施地区电线积冰产生、增长、维持和脱落阶段的天气背景、气象条件以及云雾和降水粒子的微物理特征进行分析. 结果表明: 积冰发生期间, 地面形势场表现为冷锋过境, 850 hPa 高空受冷高压和冷温度槽控制, 500 hPa 高空的西南气流提供水汽; 积冰的开始时间基本为傍晚以及凌晨, 而积冰的脱落时间为中午 12 时左右, 脱落时的气温为 $-1\sim 0^{\circ}\text{C}$; 积冰增长期云雾滴的平均液水含量要明显大于其他 3 个阶段, 且在积冰厚度的增长期都出现了降水; 液水含量与积冰厚度的增长率呈正相关, 相关系数达 0.62; 同时对积冰厚度进行了模拟, 模拟结果能较好反映实际冰厚变化.

关键词

电线积冰
积冰增长
气象条件
微物理特征
积冰模拟

在环境温度低于 0°C 的情况下, 大气中的过冷小水滴或者雨滴碰冻在输电线表面, 形成冰层, 影响输电网络的正常运行, 严重时会造成绝缘子闪络、输电线舞动后断线、杆塔倾斜和倒塌等事故, 从而给电力系统造成巨大的损失.

从 20 世纪 50 年代起, 输电线路受覆冰影响较大的芬兰、挪威、冰岛、英国和加拿大等国的学者开始进行研究, 尝试探讨气象要素与电线积冰之间的关系^[1-3], 并建立了一些算法和模式来模拟积冰过程^[4-6]. 我国最早有记录的输电线路冰害事故出现于 1954 年^[7], 而近几十年来各类输电线路冰害事故在我国已经发生了上千次, 造成了大量的财产损失, 尤其是最近十年, 严重覆冰事故已经危及到了 500 kV 输电系统的安全运行. 2008 年 1 月中旬至 2 月初, 我

国南方地区出现的大范围持续低温雨雪冰冻天气, 给输电线路的安全运行造成严重影响, 其中国家电网公司系统 500 kV 倒塔 506 基、220 kV 倒塔 821 基、110 kV 塔 1788 基、35 kV 倒塔 2305 基、10 kV 倒杆塔 166371 基, 直接财产损失达 104.5 亿元, 灾后电网恢复重建和改造需要投入资金 390 亿元^[8].

我国对输电线路覆冰研究起步较晚, 早期的研究主要有滕中林^[9]、谭冠日^[10]等人分析了距地不同高度处冰厚的变化, 以及冰厚与风向夹角和电线直径之间的关系. 江祖凡^[11]利用 1978~1981 年冬季庐山云雾试验资料对电线积冰增长率与气象条件之间的关系进行了分析. 之后的研究相对较少, 直到 2000 年以后, 蒋兴良和易辉^[7]主要使用气象和电力系统部门的观测资料, 较全面的分析了输电线路覆冰和气

象要素、地形与地理条件的关系, 并进一步通过实验室和理论研究方法提出了输电线路覆冰的模型. 张国庆等^[12]、吴素良等^[13]分别对青海东部和兰州至关中地区的积冰演变特征, 及其与架设高度、导线直径和常规气象要素的关系进行了分析. 综上所述, 我国学者对输电线路覆冰的研究主要是针对积冰与周围宏观气象要素特征的关系进行分析, 而对与输电线路覆冰密切相关的云雾滴微物理特征分析较少, 主要集中在贵州地区^[14], 缺乏对输电线路较密集且易发生覆冰区域云雾滴微物理特征的分析.

本文通过分析 2008/2009 和 2009/2010 冬季恩施石板岭雷达站观测得到的 3 mm 和 4 mm 导线积冰厚度和同时间段自动气象站、雾滴谱仪、雨滴谱仪和能见度仪的数据, 并结合该时段的常规气象资料, 分析得出恩施地区电线积冰产生、增长、维持和脱落阶段的天气背景、气象条件以及云雾滴和雨滴的微物理特征. 同时细致分析 2010 年 1 月 9 日积冰过程中 3 mm 东西向导线的积冰情况, 得到影响积冰增长的主要微物理特征量与积冰厚度的演变规律, 并对 4 次积冰过程冰厚进行了模拟. 通过上述的研究为电线积冰预测预警模型的建立提供帮助.

1 观测及仪器

1.1 观测站点选择

地处鄂西的恩施是葛洲坝电厂和三峡电站输电

工程 500 kV 出线所经过的地区, 同时因为高海拔山区和多风口的特点, 受雾凇和混合凇影响严重. 2008 年冰雪灾害期间张恩 1 回倒塔 3 基, 多次跳闸, 致使与川渝电网间的环形联网长期处于解环运行状态, 且在湖北省受损的 10 条线路中有 4 条在恩施地区^[15]. 选取海拔 1722 m 的恩施雷达站(30°17'N, 109°16'E)作为积冰观测的地点, 能够较好的反映该地区易于积冰发生的地形地势和气候特点.

1.2 观测仪器

2008/2009, 2009/2010 年冬季冰冻雨雪天气外场综合观测试验中, 综合使用了雾滴谱仪、雨滴谱仪、宽范围气溶胶粒谱仪、碳黑气溶胶浓度计、能见度仪、超声风速仪、自动气象站等先进观测设备(表 1).

1.3 观测方案

观测时间为: 2009 年 1~3 月和 2009 年 12 月~2010 年 1 月, 观测点位于湖北省西南部石板岭山顶的恩施雷达站(30°17'N, 109°16'E), 海拔 1722 m. 电线积冰架按照《地面气象观测规范》^[16]架设在恩施雷达站的观测场内, 一组积冰架呈南北向, 另一组呈东西向, 在距地面 1.6 m 高度处安装长度 1 m、直径 4 mm 的铁丝. 但是, 考虑到架设在观测场内的积冰架受风速风向影响较小, 很难反映实际高压输电线路积冰的情况, 所以在 2009/2010 年冬季的第二次观测中, 在距地面 16 m 高的雷达站楼顶东西向和南北向, 分别

表 1 恩施地区冰冻雨雪天气综合观测仪器一览表^{a)}

仪器名称	型号	生产商	观测项目	2008/ 2009 冬季	2009/ 2010 冬季
雾滴谱仪	FM-100	美国 DMT 公司	雾滴谱, 粒径范围为 2~50 μm	●	●
雨滴谱仪	Parsivel	德国 OTT 公司	雨滴谱, 粒径范围为 0.25~26 mm	●	●
能见度仪	ZQZ-DN2	中国江苏无线电科学研究所	能见距离	●	
能见度仪	VPF-710	英国 Biral 公司	能见距离		●
光声黑碳浓度仪	Pass-1	美国沙漠研究所和 DMT 公司	光散射、光吸收和质量浓度	●	
宽范围粒谱仪	WPS-1000XP	美国 MSP 公司	气溶胶粒子谱	●	
自动气象站		澳大利亚 ICT 公司	温度、湿度、气压	●	●
超声风速仪	CSAT3	美国 Campbell 公司	Ux, Uy, Uz, C	●	
红外 CO ₂ /H ₂ O 分析仪	LI7500	美国 Campbell 公司	水汽和 CO ₂ 脉动量	●	
空气温湿度传感器	HMP45C	美国 Campbell 公司	温度和湿度	●	
净辐射传感器	CNR1	美国 Campbell 公司	0.3~3 μm (太阳光辐射) 5~50 μm (远红外辐射)	●	
土壤热通量传感器	HFP01	美国 Campbell 公司	土壤热通量	●	
IRR-P 传感器	IRR-P	美国 Campbell 公司	地表温度	●	

a) ● 观测中使用的仪器

架设直径 3 mm 的导线. 其中 4 mm 导线积冰厚度每 6 h 观测一次, 而 3 mm 导线积冰厚度每小时观测一次, 同时由于观测中东西向导线的积冰厚度明显大于南北向, 所以下面将主要分析东西向导线的积冰情况.

观测期间同时对土壤、水泥和沥青三种不同下垫面的温度以及积雪的雪深、雪压变化情况进行观测分析, 并取得了一些成果^[17-19].

1.4 观测资料

通过两年冬季的观测, 共观测到 5 次积冰过程(表 2). 获取了较长时间、较高时间分辨率的积冰厚度、三种下垫面温度、积雪的雪深和雪压、云雾滴和雨滴粒子谱、三维脉动风、能见度、边界层结构以及各类气象要素等综合资料, 同时还收集常规业务观测站网和雷达、卫星等观测资料.

2 分析与讨论

2.1 积冰过程天气形势特征

通过分析 5 次积冰过程发生时的地面形势场、850 hPa 高度场、500 hPa 高度场以及与之对应的温度场和风场(图 1), 发现导致这 5 次积冰的主要原因都是受来自我国西北向东南推进的冷锋影响, 当冷锋过境时产生的层状云笼罩在石板岭山顶的恩施雷达站, 气温降低到 0℃ 以下, 冷锋云系中大量的过冷水滴与物体碰冻, 从而产生雨淞、雾淞.

下面对具有代表性的 2010 年 1 月 21 ~25 日积冰过程中 3 个层次的天气形势进行了分析. 地面形势场

的分析可以发现: 21 日 14 时位于我国西北部的冷高压携带着冷锋向东南方向移动, 于 21 日 20 时左右到达恩施雷达站, 大股冷空气被不断输送南下. 22 日 08 时到 25 日 14 时西北部形成的冷锋不断向东南部输送, 恩施雷达站一直处于冷高压控制和冷锋影响, 随后大陆冷高压东移入海, 寒潮过程宣告结束.

850 hPa 的天气背景为: 1 月 20 日, 切变线横穿恩施雷达站, 给当地带来了较丰富的降水, 21 日 08 时恩施雷达站转受切变线以北的东北偏东气流影响, 在冷高压影响下气温明显下降, 一直持续至 24 日 08 时恩施雷达站均受冷高压和冷温度槽控制, 24 日 20 时转为受槽后西北气流和我国西北部随着槽向东南移动的冷高压影响, 之后冷高压逐渐东移入海, 恩施雷达站受寒潮影响结束.

500 hPa 的天气背景为: 1 月 21 日 08 时, 位于我国西南部的南支大槽开始分裂东移, 恩施雷达站处于高空槽前西南气流影响, 之后受不断东传的小波动低槽影响. 23 日 08 时到 24 日 08 时恩施雷达站处于明显的高空槽前, 且受西南暖湿气流影响. 24 日 20 时高空槽过境, 到 25 日 20 时恩施雷达站处于槽后偏西气流中.

5 次积冰过程中天气背景场共同点为: 地面形势场为多次冷锋过境; 850 hPa 高度场中恩施雷达站受冷高压和冷温度槽控制; 500 hPa 表现为西南气流提供水汽.

2.2 积冰过程气象条件特征

由于恩施雷达站海拔较高, 当有云雾覆盖时, 水汽条件较充足, 积冰期间相对湿度均为 100%, 所以

表 2 积冰及气象要素特征量

积冰过程编号	开始积冰时间/脱落时间	积冰类型	开始积冰温度/脱落温度(℃)	积冰准备时间(h)
Case-1	2009 年 2 月 15 日 16:20/2 月 20 日 09:30	雨淞	-0.1/-0.3	无
Case-2	2009 年 2 月 25 日 22:15/3 月 04 日 22:00	雨雾淞	-0.3/-0.2	3
Case-3	2009 年 12 月 14 日 6:10/12 月 20 日 12:00	雨雾淞	-0.4/-0.1	9
Case-4	2010 年 1 月 9 日 21:10/1 月 12 日 14:20	雨雾淞	-1.6/-0.5	5
Case-5	2010 年 1 月 21 日 18:50/1 月 25 日 11:00	雨雾淞	-0.3/-0.6	2

积冰过程编号	积冰期间最低气温(℃)	4 mm 东西向导线最大冰厚(cm)	积冰期间相对湿度(%)	积冰持续时间(h)
Case-1	-1.9	0.30	100	113
Case-2	-5.9	1.14	100	169
Case-3	-4.9	0.65	100	150
Case-4	-5.8	0.15	100	65
Case-5	-4.6	0.59	100	40

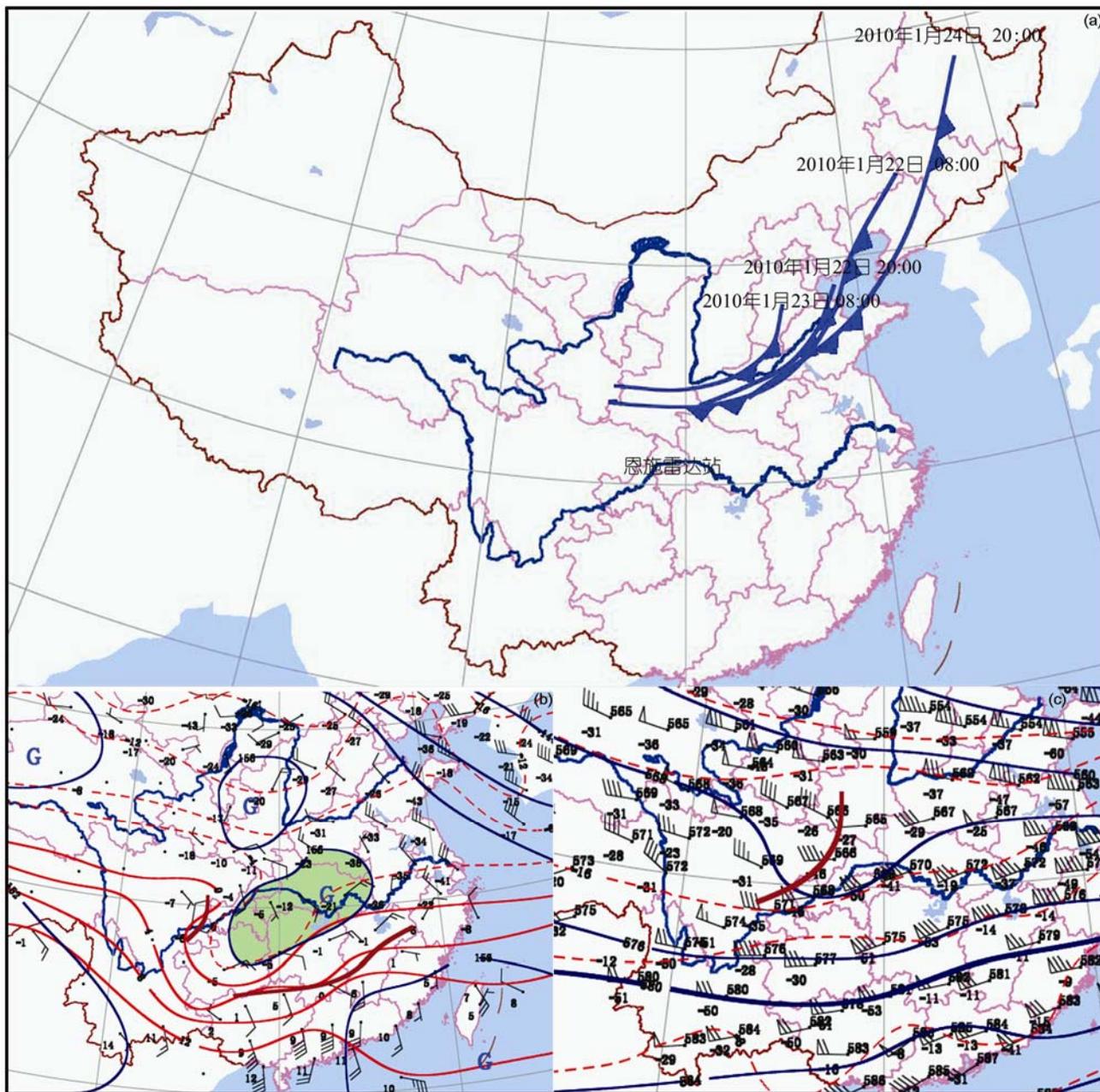


图1 2010年1月21~25日积冰过程中天气形势

(a) 地面形势场; (b) 850 hPa 高度场; (c) 500 hPa 高度场

下面主要分析气温对积冰的影响。图2为5次积冰过程中气温和4 mm 导线冰厚随时间的变化, 结合观测记录, 进一步归纳得到表2。积冰发生前有几个小时的积冰准备时间, 气温维持在0℃以下, 积冰的开始时间基本位于傍晚以及凌晨, 而积冰的脱落时间位于中午12点左右, 是一天中气温最高的时间段, 脱

落时的气温都为-1~0℃。同时发现在雨淞积冰过程中(Case-1), 最低气温一直大于-2℃; 而其他4次雨雾淞混合积冰过程中最低温度都较低, 为-5℃左右。Case-2过程中, 由于积冰时间较长, 冰层冻结严重, 尽管在3月4日11点气温逐渐上升并高于0℃, 但积冰直到晚上22点才完全脱落。

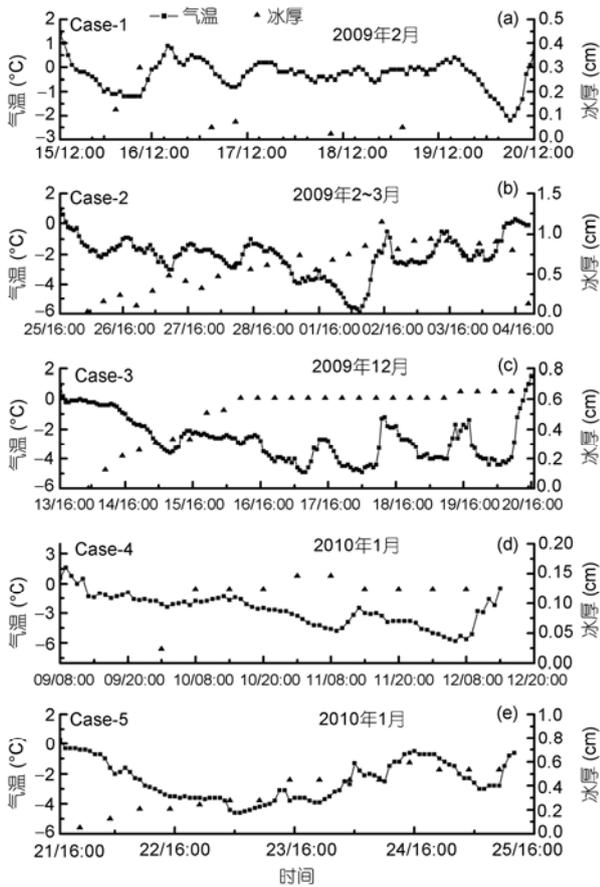


图2 积冰过程中4 mm 导线冰厚和气温随时间变化

2.3 积冰过程微物理特征

通过上述分析发现, 天气形势和气象条件是影响积冰产生、增长、维持和脱落的重要条件, 但仅分析这两个方面将无法对积冰增长这个重要的阶段有清楚的认识. 由于 Case-1 中积冰厚度变化不连续, Case-2 已经有一些分析结果^[20], Case-3 中雾滴谱和雨滴谱仪都还没完成架设, 所以下面将对持续时间较

长的 Case-4 和 Case-5 积冰过程中不同积冰阶段云雾滴和雨滴平均微物理特征量进行分析.

恩施雷达站海拔较高, 导致该地区积冰的主要类型是云中积冰, 对云中积冰厚度增长影响最大的是该时段云雾粒子和降水粒子的微物理特征^[21,22]. 根据积冰厚度的变化特征, 将积冰过程分为, 积冰准备期: 气温低于 0°C, 但没有发生积冰; 积冰增长期: 积冰厚度出现明显的增长; 积冰维持期: 积冰厚度不断振荡, 没有明显增加或者减小; 积冰脱落期: 积冰厚度减小并脱落.

2010 年的两次积冰过程冰厚为每小时测量一次, 能够较准确的区分出积冰的 4 个阶段, 表 3 给出了两次积冰过程中不同阶段云雾滴的平均数浓度、粒子半径、液水含量的变化特征. 两次积冰的其他阶段中云雾滴的微物理特征量变化范围都较小, 数浓度基本处在 120~300 个 cm^{-3} 之间, 平均半径为 1.5~4 μm , 液水含量为 0.01~0.11 g m^{-3} . 同时可以发现积冰增长期的平均液水含量要明显大于其他 3 个阶段, 这也正是该阶段积冰厚度迅速增加的原因. Case-4 的积冰脱落期由于云雾已经散去, 所以数浓度、平均半径和液水含量都很小.

图 3 为 Case-4 和 Case-5 两次积冰过程中每小时雨滴平均数浓度、平均半径和平均雨强. 可以发现雨滴数浓度变化范围较大, 为 130~800 个 m^{-3} , 值得注意的是 2 次过程中雨滴的平均半径变化较小, 基本都处在 0.2~0.4 mm 范围内, 雨强也较小, 为 0.02~0.25 mm h^{-1} .

通过研究发现, 降水都发生在积冰厚度的迅速增长期, 两次积冰过程中的最大冰厚也出现在降水发生期间, 说明雨滴在积冰增长的过程中具有显著贡献, 积冰过程中有着降水量小 (Case-4 中降水量为 0.63 mm (8 h)^{-1} , Case-5 中降水量为 1.32 mm (15 h)^{-1}),

表 3 积冰 4 阶段云雾滴微物理特征

积冰过程	积冰阶段	时间	数浓度(cm^{-3})	平均半径(μm)	液水含量(g m^{-3})
Case-4	积冰准备期	1 月 9 日 13:00~17:00	195.1	2.55	0.041
	积冰增长期	1 月 9 日 17:00~10 日 19:00	145.2	3.70	0.083
	积冰维持期	1 月 10 日 19:00~11 日 03:00	326.0	1.91	0.019
	积冰脱落期	1 月 11 日 03:00~08:00	7.4	1.59	0.0001
Case-5	积冰准备期	1 月 21 日 17:00~22:00	204.0	3.62	0.088
	积冰增长期	1 月 21 日 22:00~22 日 23:00/23 日 7:00~12:00	277.6	3.52	0.112
	积冰维持期	1 月 22 日 23:00~23 日 7:00 和 23 日 14:00~24 日 10:00	120.3	2.18	0.023
	积冰脱落期	1 月 24 日 10:00~13:00	153.9	2.87	0.047

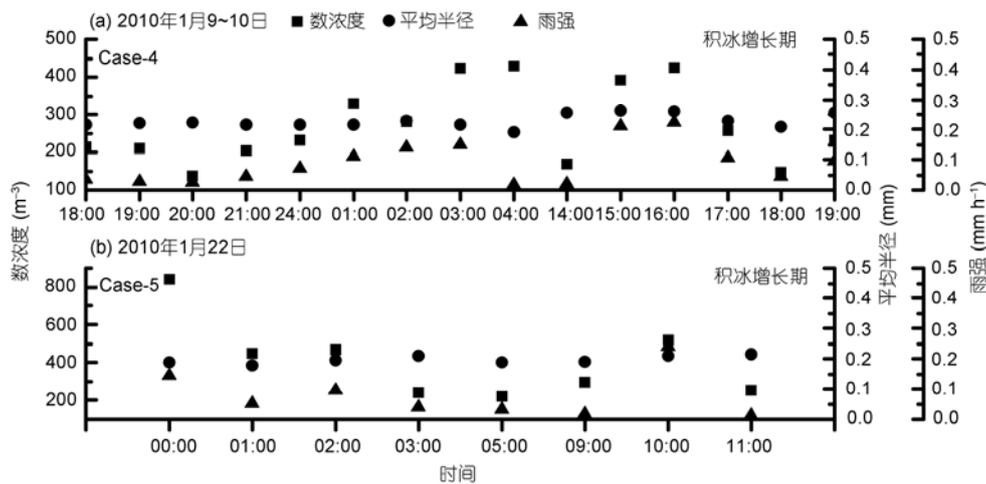


图3 积冰过程中雨滴微物理特征

雨滴平均半径小的特点. 影响积冰的云雾主要是由冷锋过境产生的锋面云系引起的, 当其与地面接触时又称为锋面雾或雨雾^[23], 所以推测积冰期间的降水主要为大量云雾滴碰并产生的毛毛雨.

2.4 典型个例分析

图 4(a), (b)给出了积冰厚度和气温随时间的变化趋势, 图 4(c)~(f)分别给出了能见度 Vis , 液水含量 L , 数浓度 N 和平均半径 \bar{r} 随时间变化的趋势. 根据 3 mm 导线积冰厚度的变化情况, 得出此次积冰过程从 2010 年 1 月 9 日 17:00 开始, 到 11 日 13:00 积冰完全脱落, 持续了约 44 h(图 4(a)), 小于观测院内 4 mm 导线的积冰持续时间(图 2(d)). 而影响积冰的雾过程是从 2010 年 1 月 9 日 11:50 开始, 到 11 日 03:34 分消散, 持续时间为约 40 h. 雾发生的整个过程中气温都低于 0°C , 雾滴以过冷却小水滴的形式存在, 通常将其称为过冷却雾, 对于该种类型雾的研究相对较少^[24], 且由其产生的雨雾淤积冰对山区高压输电线路安全造成巨大威胁.

根据能见度和液水含量的变化, 可以将此次雾过程分为 3 个阶段: 1 月 9 日 11:50 至 17:00, 雾形成阶段(阶段 1), 同时也是积冰准备阶段(I). 随着气温在 12:00 左右下降到 0°C 以下, 能见度也迅速降低到 400 m 左右, 之后不断振荡下降, 最后维持在 60 m 左右. 此时的微物理特征有以下特点: 雾滴数浓度平均值为 180 cm^{-3} , 谱分布为双峰型, 峰值分别为 58.3 和 $8.6 \text{ (cm}^3 \mu\text{m)}^{-1}$, 位于 2.83 和 $8.94 \mu\text{m}$. 雾滴平均半径仅有 $2.55 \mu\text{m}$, 导致液水含量偏低, 为 0.035 g

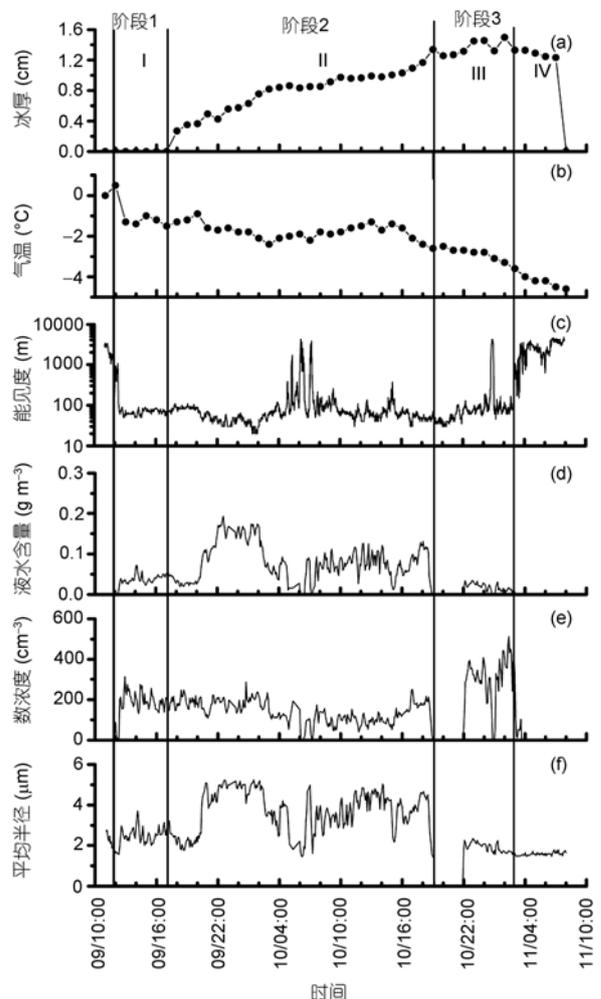


图4 2010年1月9~11日积冰过程 3 mm 导线积冰厚度、气温、能见度、液水含量、数浓度、平均半径随时间变化. 10日19:00~22:00下雪雾滴谱仪关机

m^{-3} . 说明在雾的形成阶段, 是以核化过程为主, 所以小滴迅速增加, 而雾滴粒径和液水含量都较小. 在较多的小滴和较小的液水含量, 同时气温低于 0°C 的时间也仅有 4 h 的情况下, 无法形成明显的积冰.

1月9日 17:00 至 1月10日 19:00, 为雾发展阶段(阶段 2), 同时也是积冰厚度明显增长时期(II). 该阶段气温在 $-2.5\sim-1.5^\circ\text{C}$ 之间, 积冰厚度从 0.35 cm 一直增长到了 1.42 cm . 雾滴数浓度与阶段 1 接近为 140 cm^{-3} , 平均半径为 $3.74\text{ }\mu\text{m}$, 且雾滴谱有非常鲜明的特征, 小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的雾滴数密度都要明显低于阶段 1, 仅有 $55.6\text{ (cm}^3\text{ }\mu\text{m)}^{-1}$, 但大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的雾滴数密度要明显高于阶段 1, 为 $23.2\text{ (cm}^3\text{ }\mu\text{m)}^{-1}$, 这也导致了该阶段液水含量远高于积冰准备期, 达到了 0.083 g m^{-3} , 为积冰厚度的迅速增长提供了大量的水汽. 这一方面由于在雾发展旺盛阶段, 雾滴的凝结和碰并作用加强, 另一方面积冰的发生造成冰晶效应加剧, 小滴不断蒸发减少. 同时出现了降水, 主要集中在 1月9日 17:00~10日 19:00. 雨滴谱分布为单峰型, 主要集中在小粒子端, 数密度峰值为 $957\text{ (m}^3\text{ mm)}^{-1}$, 位于雨滴直径 0.4375 mm 处, 同时使用伽马分布($N=N_0=D^\mu\exp(-\lambda D)$)对雨滴谱进行拟合, 其中 D 为雨滴直径, $N(D)$ 是每档雨滴的数浓度, μ 是形状因子项, N_0 和 λ 是两个经验参数. 伽马分布很好的反映出了该阶段雨滴谱的特征(图 5).

1月10日 22:00 至 1月11日 03:00, 雾消散阶段(阶段 3), 也是积冰厚度的维持阶段(III). 该阶段中云雾滴数浓度达 326 cm^{-3} , 而粒子平均半径仅为 $1.91\text{ }\mu\text{m}$, 液水含量为 0.03 g m^{-3} . 从该阶段的数浓度平均谱分布同样发现小滴的快速增加, 粒径 $2.83\text{ }\mu\text{m}$ 的云雾滴数密度超过 $100\text{ (cm}^3\text{ }\mu\text{m)}^{-1}$, 鉴于上述

微物理特点, 推测此时影响恩施雷达站的云雾团是新飘来的云团. 03:09 能见度上升到 1000 m 以上, 雾基本消散. 较低的气温($-4\sim-2.5^\circ\text{C}$)和处于雾气的包围中, 使得该阶段的积冰厚度振荡变化没有明显的增加.

1月11日 03:00 至 08:00, 积冰脱落的阶段(IV). 该阶段气温低于 -4.0°C , 根据观测记录、能见度仪和雾滴谱资料, 此时雾已经完全消散, 7:00 左右太阳出现, 使得与导线接触的积冰内层温度升高, 并开始融化破碎, 加之 3 mm 导线距离地面较高(16 m), 受风力的影响, 在 08:00 观测时发现积冰完全脱落, 与观测场内 4 mm 导线积冰脱落时间相比明显提前, 这种积冰直接脱落的情况同样出现在其他研究者的观测中^[25].

图 6 为此次积冰过程中液水含量与每小时积冰厚度增加量之间的关系, 可以看出液水含量与积冰厚度的增长率呈正相关, 相关系数达 0.62 , 在挪威西海岸山区的积冰研究也得到了类似的关系^[26].

2.5 积冰过程模拟

通过上述对积冰发生发展过程中的常规气象要素和云雾滴、雨滴的微物理变化特征的分析. 将根据下面的积冰增长公式来计算电线的积冰率^[19]:

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 w v A, \quad (1)$$

其中 α_1 为碰撞率, α_2 为捕获率, α_3 为冻结率, v 为有效粒子速度(即粒子相对于电线的速度), w 为粒子群含水量, A 为有效积冰横截面积.

碰撞率使用 Finstad 等^[27]基于观测和实验得到球形液滴的轨迹方程来计算:

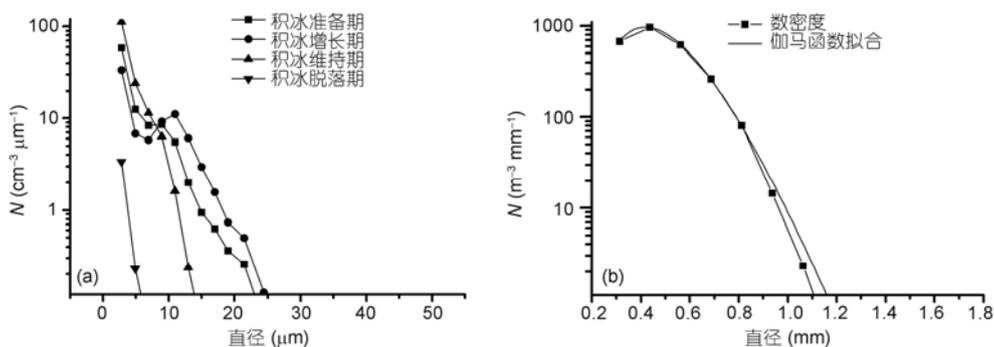


图 5 Case-4 中滴谱分布特征

(a) 云雾滴谱; (b) 雨滴谱

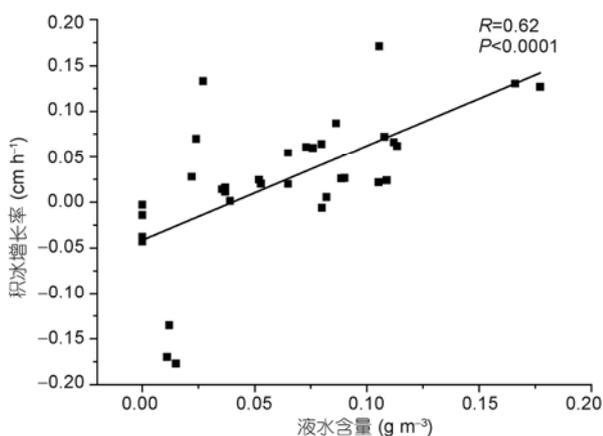


图6 Case-4中每小时积冰增长率与液水含量的关系

$$\alpha_1 = A - 0.028 - C(B - 0.0454), \text{ 其中,}$$

$$\left. \begin{aligned} A &= 1.066 K^{-0.00616} \exp(-1.102 K^{-0.688}), \\ B &= 3.641 K^{-0.498} \exp(-1.497 K^{-0.694}), \\ C &= 0.00637(\phi - 100)^{0.381}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

K, ϕ 为无量纲参量, Red 为雷诺数, $K = \rho_w v d^2 / 19 \mu D$, $\phi = Red^2 / K$, $Red = \rho_a d v / \mu$. D 为电线直径, d 为液滴直径, 水密度(ρ_w)为 $1.0 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$, 空气密度(ρ_a)为 1.293 kg m^{-3} , v 为风速, 空气绝对粘度(μ)为 $1.7984 \times 10^{-5} \text{ kg (m s)}^{-1}$.

捕获率使用 Admirat 等^[28]的经验公式来计算:

$$\alpha_2 = \frac{1}{v}, \text{ 当 } v < 1 \text{ m s}^{-1} \text{ 时, } \alpha_2 = 1. \quad (3)$$

而对于冻结率的计算, 分别考虑干增长和湿增长. 干增长时, 所有被电线捕获的液滴全部冻结在电线表面, $\alpha_3 = 1$.

湿增长时, 被电线捕获的液滴有一部分没有立即冻结, 并且在积冰表面发生的热传递过程中会有部分积冰融化成为液态水, 这些液态水的一部分可能随着积冰发展会重新冻结到积冰表面, 也有一部分因自身重力, 离开电线表面, λ 表示冰表面未冻结部分(即液态水部分)所占比例, 取 0.3. 冰面热平衡公式:

$$Q_f + Q_v = Q_c + Q_e + Q_l + Q_s,$$

其中 Q_f 为水滴冻结释放的潜热, Q_v 为气流与冰面摩擦产生的热, Q_c 为气流带走的感热, Q_e 为冰面蒸发损失的热, Q_l 为加热过冷滴到冰点损失的热, Q_s 为短波辐射和长波辐射产生的热. 解此方程, 得到

$$\alpha_3 = \frac{1}{F(1-\lambda)L_f} \cdot \left[(h+\sigma a)(t_s - t_a) + \frac{h\epsilon L_e}{C_p P} (e_s - e_a) - \frac{hrv^2}{2C_p} + FC_w(t_s - t_d) \right]. \quad (4)$$

其中积冰表面水通量密度 $F = \alpha_1 \alpha_2 w v$, h 为对流热交换系数, 斯蒂芬波尔兹曼常数(σ)为 $5.6696 \times 10^{-8} \text{ W (m}^2 \text{ K}^4)^{-1}$, 辐射常数(a)为 $8.1 \times 10^7 \text{ K}^3$, 水汽的摩尔分子比(ϵ)为 0.62, P 为气压, t_s, t_a, t_d 分别为冰面温度、气温、液滴碰撞温度, e_a, e_s 分别为水汽压、饱和水汽压, 水冻结潜热(L_f)、蒸发潜热(L_e)分别为 3.34×10^5 和 $2.501 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$, 空气比热(C_p)和水的比热(C_w)分别为 1004.07 和 $4218 \text{ J (kg K)}^{-1}$, r 为电线表面局部恢复系数, 取 0.79.

使用以上模式对 2009~2010 湖北恩施雷达站观测到的 4 次积冰过程进行积冰模拟. 其中, 2009 年的两次积冰过程中, 电线为 4 mm, 积冰厚度每 6 h 一个数据; 2010 年的两次积冰过程中, 电线为 3 mm, 积冰厚度每 1 h 一个数据. 由于 2009 年 12 月的积冰过程雾滴谱仪和雨滴谱仪没有架设, 无法得到过冷水滴的粒径分布, 所以不进行模拟.

图 7 给出了 4 次积冰过程中模拟积冰厚度与实测值对比, 可以看出总体模拟效果较好, 能够反映出实际积冰厚度的变化情况.

3 结论

(1) 积冰过程的天气背景场特点: 地面形势场为冷锋过境; 850 hPa 高度场中恩施雷达站受冷高压和冷温度槽控制; 500 hPa 主要为西南气流的水汽供应.

(2) 积冰过程发生在低温的温度条件下: 积冰发生前有几个小时的积冰准备时间, 气温维持在 0°C 以下, 积冰的开始时间基本位于傍晚以及凌晨, 而积冰的脱落时间则位于中午 12 时左右, 脱落时的气温为 $-1 \sim 0^\circ\text{C}$.

(3) 2010 年 1 月 9~11 日和 1 月 21~25 日积冰过程的云雨粒子微物理特征表明: 云雾滴的微物理特征量变化范围都较小, 数浓度基本处在 $120 \sim 300$ 个 cm^{-3} 之间, 平均半径处在 $1.5 \sim 4 \mu\text{m}$, 液水含量为 $0.01 \sim 0.11 \text{ g m}^{-3}$. 雨滴数浓度变化范围较大, 但平均半径变化较小, 基本都处在 $0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$ 范围内, 雨强

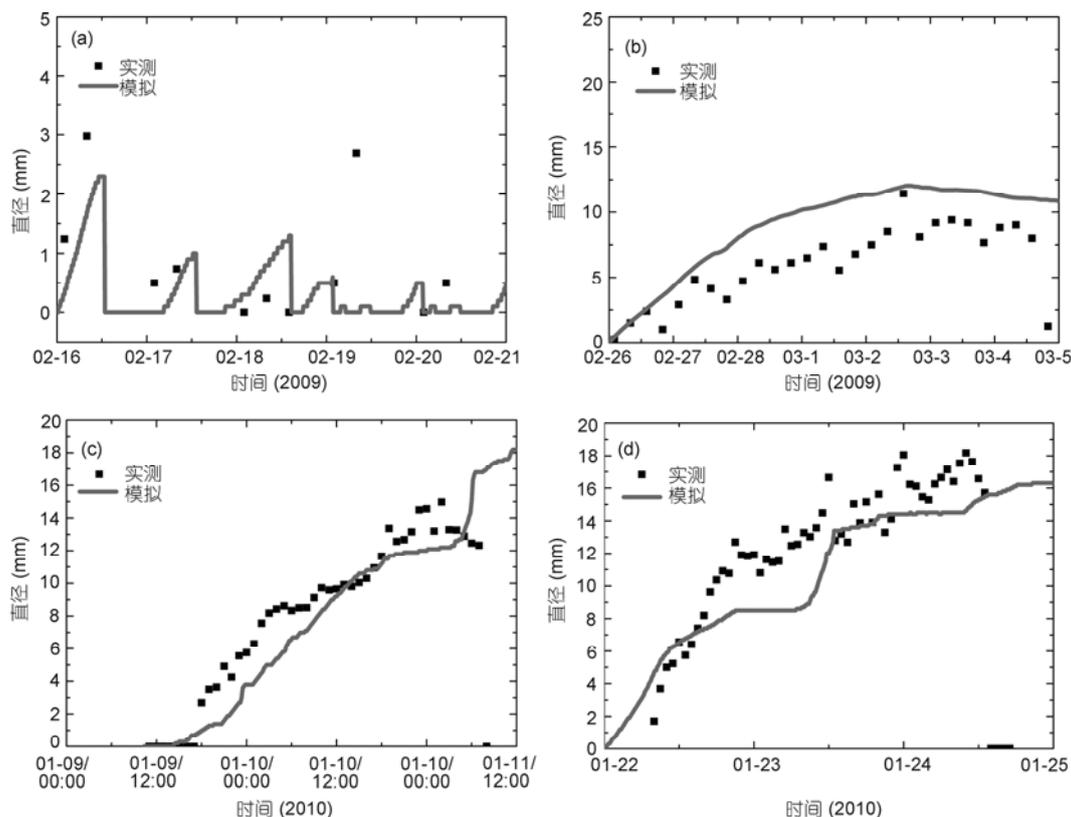


图7 积冰厚度模拟值与实测值对比

为 $0.02\sim 0.25 \text{ mm h}^{-1}$ 。积冰增长期云雾滴的平均液水含量要明显大于其他3个阶段,且在积冰厚度的增长期都有降水发生,液水含量与积冰厚度的增长率呈正相关,相关系数为 0.62。

(4)通过计算4次积冰过程中碰撞率、捕获率和冻结率等参量对积冰厚度进行模拟,模拟结果能较好反映实际冰厚变化。

分析天气形势可以对电线积冰是否发生进行较长期的预报预测,结合模式预报的气象要素和微物理特征量,并通过积冰模式可以对电线积冰厚度等

情况进行临近预报。但是对积冰状况进行较精确的预报仍存在两个主要问题:积冰气象要素和微物理特征量的预报要求较高的空间分辨率,常规气象业务模式 WRF 或 MM5 无法完全满足,尤其是微物理量,目前,大部分中尺度模式中对云雨滴谱没有详细的分档,不能给出对粒子具体的谱分布,如果把分档云模式耦合到中尺度模式中又会大大延长计算时间,不能满足预报的需求;对于我国电线积冰预报结果的检验,缺乏长期实际观测资料,即使对积冰情况做出了预报,但无法检验预报结果的准确性。

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献

- 1 Mckay G A, Thompson H A. Estimating the hazard of ice accretion in Canada from climatological data. *J Appl Meteorol*, 1969, 8: 927-935
- 2 Ahti K, Makkonen L. Observation on rime formation in relation to routinely measured meteorological parameters. *Geophysica*, 1982, 19: 75-85
- 3 Sundin E, Makkonen L. Ice loads on a lattice tower estimated by weather station data. *J Appl Meteorol*, 1998, 37: 523-529
- 4 Makkonen L. Modeling of ice accretion on wires. *J Appl Meteorol*, 1984, 23: 929-939

- 5 Lu M L, Popplewell N, Shah A H. Freezing rain simulations for fixed, unheated conductor samples. *J Appl Meteorol*, 2000, 39: 2385–2396
- 6 Ping F, Masoud F, Gilles B. Two-dimensional modelling of the ice accretion process on transmission line wires and conductors. *Cold Reg Sci Technol*, 2006, 46: 132–146
- 7 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护. 北京: 中国电力出版社, 2002. 2–3
- 8 杨靖波, 李正, 杨风利, 等. 2008年电网冰灾覆冰及倒塔特征分析. *电网与水力发电进展*, 2008, 24: 4–8
- 9 滕中林. 架空线路的结冰及冰厚计算. *中国电力*, 1978, 3: 53–56
- 10 谭冠日. 电线积冰若干小气候特征的探讨. *气象学报*, 1982, 40: 13–23
- 11 江祖凡. 电线积冰增长速度的研究. *科学通报*, 1983, 15: 928–931
- 12 张国庆, 张加昆, 祁栋林, 等. 青海东部电线积冰的初步观测分析. *应用气象学报*, 2006, 17: 508–510
- 13 吴素良, 范建勋, 姜创业, 等. 兰州至关中电线积冰与导线线径及高度关系. *应用气象学报*, 2010, 21: 63–69
- 14 罗宁, 文继芬, 赵彩, 等. 导线积冰的云雾特征观测研究. *应用气象学报*, 2008, 19: 91–95
- 15 朱昌成, 阮羚, 汪涛, 等. 湖北电网输电线路冰害事故分析及应对措施. *湖北电力*, 2008, 32(增刊): 82–84
- 16 中国气象局. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 2003. 96–100
- 17 柯丹, 汪玲玲, 牛生杰, 等. 基于常规气象资料融雪模式的建立及应用. *大气科学学报*, 2010, 33: 555–560
- 18 李蕊, 牛生杰, 汪玲玲, 等. 三种下垫面温度对比观测及结冰气象条件分析. *气象*, 2011, 37: 325–333
- 19 牛生杰, 李蕊, 吕晶晶, 等. 三种下垫面温度及结冰预报模型研究. *地球物理学报*, 2011, 54: 909–917
- 20 贾然, 牛生杰, 李蕊. 鄂西电线积冰微物理特征的观测研究. *气象科学*, 2010, 30: 481–486
- 21 Reisinger J, Rasmussen R M, Brientjes R T. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Q J R Meteorol Soc*, 1998, 124: 1071–1107
- 22 Farzaneh M. *Atmospheric Icing of Power Networks*. Quebec: Springer, 2008. 7–8
- 23 Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. Fog research in China: An overview. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27: 639–661
- 24 Gultepe I, Cober S G, Isaac G A, et al. The fog remote sensing and modeling field project. *Bull Amer Meteorol Soc*, 2009, 90: 341–359
- 25 Farzaneh M, Savadjiev K. Statistical analysis of field data for precipitation icing accretion on overhead lines. *IEEE Trans Power Del*, 2005, 20: 1080–1087
- 26 Drage M A, Gard H. Atmospheric icing in a coastal mountainous terrain: Measurements and numerical simulations, a case study. *Cold Reg Sci Technol*, 2008, 53: 150–161
- 27 Finstad K J, Lozowski E P, Makkonen L. On the median volume diameter approximation for droplet collision efficiency. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 4008–4012
- 28 Admirat P, Maccagnan M, Goncourt B. Influence of Joule effect and of climatic conditions on liquid water content of snow accreted on conductors. In *Proceedings 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Pairs, France, 1988. 367–371