

# 导线积冰的云雾特征观测研究<sup>\* 1</sup>

罗 宁<sup>1)</sup> 文继芬<sup>2)</sup> 赵 彩<sup>3)</sup> 唐 磊<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(贵州省气象局, 贵阳 550002) <sup>2)</sup>(贵州省人工影响天气办公室, 贵阳 550002)

<sup>3)</sup>(贵州省山地环境气候研究所, 贵阳 550002) <sup>4)</sup>(贵州省气象台, 贵阳 550002)

## 摘 要

导线积冰在贵州山区是常见的气象灾害, 导线积冰增长率与气象云雾因子密切相关。研究选择贵州西部、北部、中部 3 个积冰区进行了专门外场观测, 观测项目有: 云滴谱、含水量、气温、风向、风速、导线上积冰的长径、短径。观测分析表明: 贵州云滴浓度、特征平均直径没有显著性地区差异; 云滴平均浓度 140 ~ 312 个/cm<sup>3</sup>, 云滴算术平均直径、均立方根直径、中值体积直径分别为 7.5 μm, 11.3 μm 和 20 μm; 14 μm 以上大云滴浓度平均占云滴总浓度的 12.5%, 但对含水量的贡献高达 78%, 大滴与导线碰撞效率高, 大滴是导线积冰的关键因子; 云雾含水量平均 0.20 g/m<sup>3</sup>; 在 0 ~ -6 °C 之间, 含水量随温度的降低而降低; 南北向导线积冰比东西向的积冰多; 导线积冰增长率与含水量的大小成正比, 风速超过 3 m/s 时, 积冰增长率与风速有较明显的正比关系。

**关键词:** 导线积冰; 云雾特征; 积冰增长率

## 引 言

导线积冰在贵州山区是常见的气象灾害。由雨雾凇形成的架空导线积冰对电力输送危害大。1984, 2004 年贵州电网曾因导线积冰造成局部崩溃。

研究表明<sup>[1-2]</sup>, 影响导线积冰的主要因子是云雾含水量、云雾滴谱、风向、风速和温度。由于架空高压输电线途经十分复杂的地理环境, 各地气象因子复杂多变且时空分布差异极大, 使积冰研究十分困难。少数发达国家及我国曾建立观冰站<sup>[3]</sup>, 在长期积累资料的基础上总结出积冰直径随海拔高度变化的规律。这些研究对选择导线架空路径有一定意义, 但这仅仅反映积冰产生的气候特征, 未涉及积冰形成机理的实质研究。Makkonen<sup>[4]</sup>以云雾滴谱分布、风速、风向、捕获系数及冻结系数为主要参数, 探讨积冰的形成机理, 导出了积冰重量的理论公式, 研究较为深入。此外, 还有一些研究对积冰增长进行了数值模拟<sup>[5]</sup>, 并通过风洞试验进行比较和验证<sup>[6]</sup>, 揭示了这些因子对积冰产生的相对重要性, 但毕竟

只反映理想条件的规律, 而实际积冰产生的大气条件比模拟风洞条件复杂得多。还有一些历史资料和外场观测研究对雾的形成机理进行探讨<sup>[7-12]</sup>。

导线积冰事故多发生在重积冰区。云雾多是重积冰区重要天气气候特征。为更准确揭示贵州高原山区导线积冰的产生规律, 选择贵州省有代表性的 3 个重雾区进行了专门外场观测, 分别为西部水城县的马落菁(电力部门的观冰站)、北部遵义娄山、中部贵阳云雾山。海拔高度分别为 2128 m, 1780 m, 1659 m。观测时间为 1988, 1989, 1990, 1991, 1994 年冬季。观测项目包括云雾中的云滴谱、含水量、气温、风向、风速、能见度、导线上积冰的长径、短径。云滴谱和含水量均用国产三用滴谱仪水平抽吸法采集。积冰观测设有专门的雾凇观测架, 在东西、南北方向离地面 1.5 m 高各架设 1 m 长的 8#铁丝。

## 1 云雾的微物理结构特征

### 1.1 云滴谱特征

根据西部水城和北部娄山的云滴谱资料, 计算了贵州重冰区过冷云雾的微观特征(表 1)。

\* 贵州省科技攻关项目“贵州省雾害时空分布、形成机理及其监测预警方法研究”资助。

2007-01-24 收到, 2007-08-28 收到再改稿。

表1 贵州重冰区过冷云雾的微观特征

Table 1 Micro Characteristics of super-cooling cloud fog in heavy ice region

参数	西部			北部		平均
	1988年	1989年	1991年	1990年背风面	1990年迎风面	
算术平均直径/ $\mu\text{m}$	4.3~13.8	3.7~7.0	5.4~14.3	4.1~15.8	4.1~19.8	7.52
均立方根直径/ $\mu\text{m}$	7.3~24.4	4.0~12.3	8.0~19.1	5.8~26.2	4.4~26.7	11.32
中值体积平均直径/ $\mu\text{m}$	14	18	26	22	20	20
众数峰值直径/ $\mu\text{m}$	4.0	4.3	4.2	4.2	4.0	4.1
峰值浓度占总浓度的百分比/%	62	73	51	63	64	63
云滴浓度/(个· $\text{cm}^{-3}$ )	37~546	41~1178	26~384	45~1000	39~1539	234
样本数	16	21	13	52	53	

由表1可知,西部不同年份之间云雾滴谱特征有一定的差异。西部、北部两地的云雾特征也有差异,但差异不大。滴谱分布的基本特征是:若云滴浓度小,滴谱的特征直径偏大(如1991年,西部);而云滴浓度大,则滴谱的特征直径偏小。大多数云滴谱的分布是单峰谱型,且在众数峰值直径以下,直径愈大,滴浓度愈大;而在峰值直径以上,直径愈大,则滴浓度愈小。这一规律满足 Khrgian-Mazin 给出的滴谱表达式<sup>[13]</sup>:

$$n'(r)dr = cr^2e^{-br}dr \quad (1)$$

式(1)中, $n'(r)$ 为半径在 $r+dr$ 间的滴浓度; $c$ 和 $b$ 为常数,不同云滴谱可以用不同的 $c$ 和 $b$ 值(可根据实测资料解出 $c, b$ 值)来区别。

由表1的资料,可求出不同年份不同测点的云雾滴谱表达式<sup>[14]</sup>,如表2所示。

表2 云雾滴谱表达式

Table 2 Cloud and fog droplet formulae

年份	地点	滴谱表达式
1988	马落菁	$n(d) = 7.28d^2e^{-0.25d}$
1989	马落菁	$n(d) = 7.55d^2e^{-0.235d}$
1991	马落菁	$n(d) = 5.38d^2e^{-0.235d}$
1990	娄山1(海拔1736 m)	$n(d) = 6.8d^2e^{-0.235d}$
1990	娄山2(海拔1780 m)	$n(d) = 7.45d^2e^{-0.25d}$

从表2得出贵州省雨雾淞天气的云雾滴谱平均表达式为:

$$n(d) = 6.88d^2e^{-0.24d} \quad (2)$$

## 1.2 云滴谱中的大滴特征及大滴对含水量的贡献

导线积冰主要是过冷云雾滴在导线上的碰撞冻结,有关碰撞效率试验研究表明:碰撞效率与流体粒子的半径成正比<sup>[13]</sup>。雾滴越大,与圆形导线的碰撞率越高,导线积冰量也越多。因此,研究导线积冰主要关注云滴谱中的大滴浓度。云滴谱的中值体积直径<sup>[14]</sup>是一个代表大滴的特征直径,贵州实测云滴资料计算的中值体积直径最低值是14 $\mu\text{m}$ 。因此本文

将14 $\mu\text{m}$ 以上的云滴作为云雾中的大滴,统计各年14 $\mu\text{m}$ 以上的云滴浓度占总浓度的百分率:1988年为15%,1989年为6.3%,1990年为12%,1991年为18.6%。统计中发现:云滴中最大尺度云滴直径介于35~50 $\mu\text{m}$ 之间,且浓度仅占总浓度的1%左右。图1给出了西部、北部两地区云滴尺度对含水量的贡献。14 $\mu\text{m}$ 以上的大滴平均在云滴谱中的比率只占百分之十几以下,但对含水量的贡献却高达75%~81%。因此,研究云雾滴谱更应该重视能代表大滴特征直径如中值体积直径、均立方根直径等。

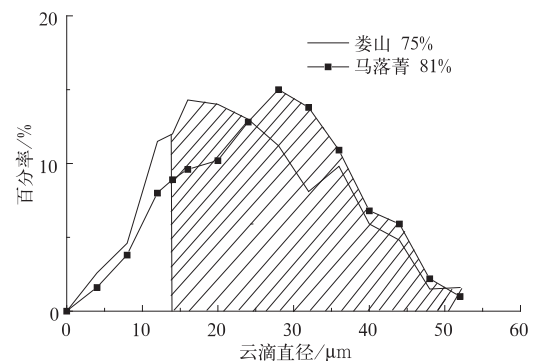


图1 各云滴尺度对含水量的贡献百分率  
(阴影部分是14 $\mu\text{m}$ 以上云滴对含水量的积分值)

Fig. 1 Contributing percent of different cloud droplet scale with water content  
(more than 14 $\mu\text{m}$  of integral value for cloud droplet to water content with shaded)

## 1.3 含水量

含水量是研究积冰的关键因子,将几年内用滤纸法测得的394份含水量资料列于表3中。由表3可知:西部海拔高度最高,含水量平均最低;中部海拔最低,但由于探测时温度较低,含水量并非最高。含水量不仅与地形的海拔高度有关,还与温度分布有关。将西部、北部、中部3地区的实测含水量资料按温度区间统计,得到其平均值列于表4中。

表 3 含水量  $W$  特征值Table 3 Eigenvalue of water content  $W$  in different area

区域	海拔高度/m	年份	$W_{\min}/(g \cdot m^{-3})$	$W_{\max}/(g \cdot m^{-3})$	$W/(g \cdot m^{-3})$	样本数	代表日数/d	温度/ $^{\circ}C$
西部	2128	1988	0.030	0.438	0.160	64	5	4.6 ~ -2.6
	2128	1989	0.040	0.318	0.148	64	4	-1.1 ~ -4.2
	2128	1991	0.017	0.473	0.180	23	3	0.0 ~ -2.2
北部	1736	1990	0.082	0.564	0.247	121	13	0.0 ~ -5.6
	1780	1990	0.023	0.412	0.261	112	12	0.0 ~ -5.5
中部	1659	1994	0.114	0.382	0.216	10	2	-4.0 ~ -6.0

表 4 不同高度温度区间内的含水量分布(单位: $g/m^3$ )Table 4 Distribution of water content in different height and temperature (unit: $g/m^3$ )

区域	海拔高度/m	温度/ $^{\circ}C$					平均
		0 ~ -1	-1 ~ -2	-2 ~ -3	-3 ~ -4	-4 ~ -5	
西部	2128	0.223	0.164	0.151	0.128	0.103	0.154
北部	1780	0.291	0.305	0.240	0.178	0.140	0.213
中部	1659					0.219	0.217

由表 4 可知:在 0 ~ -6  $^{\circ}C$  之间,含水量有随温度降低而降低的趋势。同时还表明:在同一温度区间内,海拔高度愈高,含水量愈低,反之亦然。这一现象主要与几个测点地理位置、环境和云贵高原冬季静止锋区位置的云层高度有关。中部地区因探测时的温度区间窄、样本少,温度与含水量的关系难以确定。

## 2 积冰期的温度分布

根据贵州几个气象站积冰期的温度历史资料<sup>[15]</sup>,对积冰期温度分布进行分析,研究表明:贵州积冰期逐日各时次温度分布范围主要是 0 ~ -8  $^{\circ}C$ 。选择贵州东、西、北、中几个气象站 1976,1984,1985 年积冰期的平均温度分布与重积冰区观测点的温度分析得出:海拔高度愈高,负温区分布愈宽。山区马落菁与水城气象站相距 8 km,马落菁 1976,1984 年的温度是用水城气象站温度作线性回归反推而得。

回归公式  $T_{\text{马}} = 1.03T_{\text{水}} - 2.17$ ,统计样本数 69,相关系数  $r = 0.89$ 。 $T_{\text{马}}$  是马落菁的温度, $T_{\text{水}}$  是水城气象站的温度。

贵州大部分山区的海拔高度在 1 ~ 2 km 之间,它们的温度分布一般不低于水城马落菁的温度。由此推断:贵州积冰期大多数地域的温度在 0 ~ -5  $^{\circ}C$  之间。积冰密度与温度的高低密切相关,即温度高,积冰密度大;温度低,积冰密度小。属较高温度条件下的积冰,冰密度大,冰对导线的粘附力强,冰不易脱落,这是处于低纬山区的贵州省导线积

冰易出现冰害事故的主要原因。本项工作在西部、中部曾测到 4 次积冰密度介于 0.79 ~ 0.89  $g/cm^3$ 。

## 3 风向与积冰厚度

圆柱体捕获云雾滴与风向密切相关。当风向与圆柱体正交时,云滴捕获量最大,积冰增长速度最快。风向与圆柱体平行时,理论上云滴不发生动力学意义上的捕获。为显示风向对积冰量的影响,取南北向为零度(东西向为 90 $^{\circ}$ ),若风向与南北向导线交角  $\theta > 45^{\circ}$ ,表明偏东或偏西风,反之偏南或偏北风。

用试验导线分别测出南北向和东西向导线上的积冰长径并以  $D_s$  和  $D_e$  表示。令  $K_d = D_s/D_e$ ,即南北向导线积冰长径与东西向导线上的长径值之比,按不同风向和风速级别列出  $K_d$ ,结果列于表 5 中。

表 5 不同风向、风速条件下  $K_d$  平均值Table 5 Mean  $K_d$  with different wind condition

风速 $V/(m \cdot s^{-1})$	$\theta > 45^{\circ}$	样本数	$\theta < 45^{\circ}$	样本数
$V < 2$	2.27	6	0.17	6
$2 \leq V < 4$	4.50	4	3.20	4
$4 \leq V < 5$	2.86	2	2.57	8

表 5 表明:南北向导线的积冰比东西向积冰严重(除风速小于 2 m/s)。这与贵州冬季积冰天气地面盛行东-东北风有关,有利于南北向导线积冰增长。当地面风向为偏北风时,云雾较淡薄,高山云雾含水量较小,不利于东西向导线积冰的增长。

## 4 导线积冰个例分析

在自然条件下,导线积冰及其增长受大气中的气温、风向、风速、云雾中的液态含水量等因子共同影响,并相互制约。理论上,单位长度导线上的积冰质量  $M$  用下式计算:

$$M = EnWV(D_0 + 2b)t \quad (3)$$

式(3)中, $E$ 为导线直径由  $D_0$  变到  $D = D_0 + 2b$  时的平均碰撞效率, $n$ 为雾滴碰撞在导线上的冻结率, $W$ 为液态含水量, $V$ 为风速, $D_0$ 为原始导线直径, $b$ 为冰层厚度, $t$ 为积冰时间。式(3)表明:积冰质量随时间的变化与含水量和风速正相关。液态含水量是积冰的水源,风速是输送水源的载体。 $E$ 为风速和滴谱直径的函数,由 Langmuir 给出的公式来计算, $n$ 与温度密切相关<sup>[5]</sup>。 $E, n$ 两项因子由一般野外试验研究很难确定,下面给出两个积冰个例,描述了与积冰增长同步的气象条件。

图2是1991年在西部马落菁的观测实例:从积冰增长率的变化曲线趋势看,积冰增长率与含水量的关系最密切。在积冰的初始0~4h之内含水量上升,积冰增长率上升,6~24h之内含水量下降,增长率也随之下落。当含水量在24h处于最低值时,积冰增长率在24h前后也处在最低值。其后含水量明显上升,增长率也随之上升。风速与积冰增长率的关系中,在积冰的前20h之内,风速上升,增长率上升;风速下降,增长率也下降,但不明显。两者的对应关系较好。20h以后,这两者的对应关系变得不确定了。

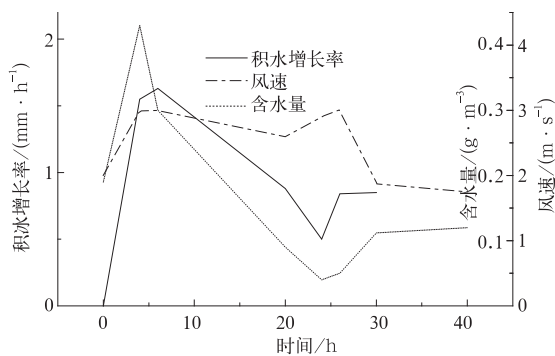


图2 马落菁1991年2月2—4日积冰过程

Fig. 2 Ice accretion process over Maluojing from Feb 2 to 4 in 1991

## 5 结论

本文基于多年大量野外观测资料,对导线积冰区的云雾特征进行了分析研究,得出如下结论:

1) 贵州测到的云滴浓度,特征平均直径没有显著地区差异,其各值之间的差异变化应为云雾的自然变差。总的特征如下:云雾滴平均浓度140~312个/cm<sup>3</sup>,云雾滴算术平均直径、均立方根直径、中值体积直径分别为7.5 μm, 11.3 μm和20 μm。众数峰值直径为4 μm,其峰值浓度占总浓度的百分率平均63%。

2) 14 μm以上大云滴浓度占云滴总浓度的12.5%,但对含水量的贡献平均高达78%,由于大云滴对含水量的贡献大,与导线碰撞效率高,因而大滴特征是导线积冰的关键因子。

3) 云雾含水量在0.03~0.56 g/m<sup>3</sup>之间,平均为0.20 g/m<sup>3</sup>。含水量与海拔高度、温度有很明显的关系。在0~-6℃之间,含水量随温度的降低而降低。

4) 根据贵州重积冰年的历史资料普查:贵州积冰期的温度分布区间为0~-8℃,其中温度在0~-5℃之间积冰出现率最高。

5) 导线积冰有非常明显的方向性,南北向导线上的积冰比东西向强。其原因是贵州积冰期间处于静止锋区,近地面风向为东-东北风,而且此时含水量较大,有较多的液水量吹附至南北向导线上。

6) 由导线积冰增长个例可知:导线上的积冰增长率与含水量的大小成正比,当风速超过3 m/s时,积冰增长率与风速有较明显的正比关系。

## 参考文献

- [1] Person P, Gaget J F. Ice accretion on wires and anti-icing induced by joule effect. *J Appl Meteor*, 1988, 27: 101-114.
- [2] Prudi F, Levi L, Levizzani V. Ice accretion on fixed cylinders. *Quart J R Met Soc*, 1986, 112: 1091-1109.
- [3] 谭冠日. 电线积冰若干气候特征的探讨. *气象学报*, 1982, 40(1): 15-22.
- [4] Makkonen L. Estimating intensity of atmospheric ice accretion on stationary structures. *J Appl Meteor*, 1981, 20: 595-600.
- [5] Makkonen L. Modeling of ice accretion on wires. *J Climate Appl Meteor*, 1984, 23: 929-939.
- [6] Loxowski E P. The icing of an unheated non-rotation cylinder: Icing wind tunnel experiments. *J Climate Appl Meteor*, 1983, 22: 2063-2072.

- [ 7 ] 李子华. 中国近 40 年来雾的研究. 气象学报, 2000, 59(5): 616-624.
- [ 8 ] 黄玉生, 黄玉仁, 李子华, 等. 西双版纳冬季雾的微物理结构及演变过程. 气象学报, 2000, 58(6): 715-725.
- [ 9 ] 吴有训, 陈健武, 杨保桂, 等. 黄山冬季气温分类及雪、雨淞和雾凇的气候分析. 气象学报, 2000, (58)3: 376-384.
- [ 10 ] 何立富, 李峰, 李泽椿. 华北平原一次持续性大雾过程的动力和热力特征. 应用气象学报, 2006, 17(2): 160-168.
- [ 11 ] 刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 我国大雾的气候特征及变化初步解释. 应用气象学报, 2005, 16(2): 221-230.
- [ 12 ] 王继志, 徐祥德, 杨元琴. 北京能见度及雾特征分析. 应用气象学报, 2002, 13(增刊): 160-169.
- [ 13 ] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学. 北京: 气象出版社, 1989.
- [ 14 ] 文继芬. 雨雾天气的滴谱、含水量与积冰. 贵州气象, 1994, 18(6): 21-26.
- [ 15 ] 罗宁. 气象记录的雨雾凇冰与导线冰害事故的关系. 贵州气象, 1994, 18(6): 10-20.

## Observation Study on Properties of Cloud and Fog in Ice Accretion Areas

Luo Ning<sup>1)</sup> Wen Jifen<sup>2)</sup> Zhao Cai<sup>3)</sup> Tang Lei<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> (Guizhou Meteorological Bureau, Guiyang 550002) <sup>2)</sup> (Guizhou Weather Modification Office, Guiyang 550002)

<sup>3)</sup> (Guizhou Research Institute of Mountainous Area Environment and Climate, Guiyang 550002)

<sup>4)</sup> (Guizhou Meteorological Center, Guiyang 550002)

### Abstract

Ice accretion on conductors from freezing rain or glaze is a common meteorological disaster in Guizhou mountainous areas, causing serious damages with the warped wire, the collapsed pole and/or tower and broken circuit. For example, the severe ice accretion in 1984 in Guizhou brings the blackout in the local electricity transport network. The security of electricity transport is threatened by ice accretion on conductors. The glaze forms from freezing rain on conductors near surface with the air temperature between 0 °C and 6 °C in Guizhou. It is found in experiment that ice frozen between 0 °C and 6 °C is difficult to fall off with its great density, which is a main cause for Guizhou's ice accretion with the extreme danger. In Liupanshui of western Guizhou the site especially for observation of ice accretion on conductors is built by national power company. In this site and two other ice accretion areas in northern and central Guizhou the field observations are conducted with the elevations of 2128 m, 1780 m and 1659 m respectively. The growth rate of conductor ice accretion is closely associated with the cloud-and fog-conditions. The major observation factors include cloud droplet size distribution, water content in cloud and fog, air temperature, wind direction, wind speed, long and short diameters of ice accretion on conductors. The cloud droplets and water content in cloud and fog are collected with the method of integration suction. The ice accretion is measured in the specific stands in both east-west and north-south directions. In three observation areas there are no significant differences for cloud droplets on both the concentration of 140—312 droplets/cm<sup>3</sup> and the average diameters with arithmetic mean diameter of 7.5 μm, cube root diameter of 11.3 μm and median volume diameter of 20 μm; although the number concentration of cloud droplets with the diameter bigger than 14 μm are 12.5 % of the total concentration, water content contributed by them is as high as 78% due to the dominant contribution to water content considering the high collision efficient of these large cloud droplets on conductors, the distribution of large droplets is a key factor involving ice accretion; the water content with the average value of 0.20 g · m<sup>-3</sup> in cloud and fog decreases with air temperature from 0 °C to -6 °C; more ice accretes on conductors of north-south than east-west direction caused by prevailing northeast wind in the surface levels during the stationary front period in winter; the growth rate of ice accretion is proportional to the water content in cloud and fog and the wind speed, especially of more obvious direct ratio with the wind speed over 3 m · s<sup>-1</sup>.

**Key words:** ice accretion on conductors; properties of cloud and fog; growth rate of ice accretion