

廖玉芳,段丽洁. 湖南电线覆冰厚度估算模型研究[J]. 大气科学学报,2010,33(4):395-400.

Liao Yu-fang, Duan Li-jie. Study on estimation model of wire icing thickness in Hunan Province[J]. Trans Atmos Sci,2010,33(4):395-400.

湖南电线覆冰厚度估算模型研究

廖玉芳,段丽洁

(湖南省气候中心,湖南长沙 410007)

摘要:基于湖南省97个地面气象观测站(其中28个站有电线积冰观测业务)自建站至2008年的日气象观测资料,雪峰山、东山峰高山站的部分电线积冰观测资料,NCEP/NCAR再分析资料及地理信息资料,开展了气象要素、温度垂直结构、地理信息等环境因子对电线覆冰厚度的影响分析;利用逐步回归方法建立了电线覆冰厚度与环境因子的回归模型;在对回归模型进行统计检验的基础上,开展了自建模型与其他两种相关模型的比对分析。检验及比对结果表明,自建模型具有可用性。

关键词:电线覆冰;厚度;模型

中图分类号:P413.2 文献标识码:A 文章编号:1674-7097(2010)04-0395-06

Study on Estimation Model of Wire Icing Thickness in Hunan Province

LIAO Yu-fang, DUAN Li-jie

(Hunan Climate Center, Changsha 410007, China)

Abstract: Based on the daily meteorological data from the 97 observation stations (28 with wire icing observation) in Hunan province from their establishment to 2008, part of the wire icing data from the stations at Xuefeng and Dongshan mountain, the NCEP/NCAR reanalysis data and geographic information data, the influence of such environmental factors as meteorological elements, vertical structure of temperature and the geographic information on the thickness of wire icing was analyzed. By using the stepwise regression method, a regression model between wire icing thickness and environmental factors was established. Based on the statistical testing of the regression model, comparisons between this model and other two related models were carried out. Results show that the new model is valid.

Key words: wire icing; thickness; model

0 引言

冰冻是雨淞、雾淞和冻结雪的总称。雨淞(也称冻雨)是空气中过冷却雨滴、毛毛雨滴或雾滴以及冻结雪附着在 0°C 左右或以下的裸露物体表面形成的一种冻结物。湖南75%以上的冰冻灾害由雨淞和雨淞加冻结雪造成^[1],常将雨淞天气称为冰冻天气。冰冻使输电线路的荷重增加,造成断线、倒杆(塔)、闪络事故,对电网的安全运行造成严重威胁,因此,冰冻灾害问题是世界上经常遭受冰害的国家

普遍关心和亟待解决的难题之一。早在20世纪50年代,国内外学者就开始了电线覆冰机理研究。Imai^[2]认为单位时间单位长度上的雨淞量与空气温度成正比,与降水强度无关。Lenhard^[3]则认为覆冰量只与降水量有关。Makkonen^[4]基于导线半径、气温、风速、降水率、风吹角度及覆冰时间建立覆冰模型,得出最大覆冰荷载发生在气温 0°C 左右时;McComber和Govoni^[5]、Mckay和Thompson^[6]基于实测资料研究得出的覆冰增长模式均认为雨雾淞持续时间越长,覆冰量和冰厚越大;刘和云等^[7]基于降

收稿日期:2010-01-12;改回日期:2010-03-29

资助课题:湖南省科技计划重大专项(2008FJ1006);2009年中国气象局业务项目《全国气象灾害风险区划》

作者简介:廖玉芳(1962—),女,湖南安乡人,正研高工,研究方向为气象灾害分析评估技术与方法研究,lyf_13975681873@163.com.

水率、风速、冻雨持续时间建立电线覆冰厚度模型;还有众多学者^[8-15]从不同角度开展了电线覆冰机理分析和研究。

由于电线覆冰地域性特点明显,形成机理复杂,被提出或正在使用中的模型或公式都不能充分表明它是完备的,因而电线覆冰厚度模型仍在探索中。同时,由于开展电线积冰观测业务的气象站相对较少,不能满足输电线路工程设计、建设的需求。利用现有气象观测台站电线积冰观测资料,通过一定的数学方法,建立环境因子与电线覆冰厚度的转换关系,不仅对输电线路规划、工程设计有现实意义,而且能提高电线覆冰监测预警能力。

1 资料及方法

(1) 资料

湖南省 97 个地面气象观测站自建站至 2008 年,雪峰山高山站 1971—1989 年,历年冬季(12 月—次年 2 月)逐日平均气温(T)、最高气温(T_m)、最低气温(T_n)、降水量(R)、平均相对湿度(RH)、平均风速(V)、天气现象及其中 28 站和雪峰山、东山峰站的电线积冰观测资料^[16];97 个地面气象观测站经度、纬度、海拔高度;NCEP/NCAR 再分析格点资料^[17];湖南省高程 1:5 万 GIS 数据。

(2) 再分析资料处理方法

① 标准冰厚换算

电线覆冰按冻结成因分为雨淞、雾淞、湿雪与混合凝结 4 类,在电线覆冰厚度研究过程中,为了使得观测资料具有可比性,需要将观冰站资料转换成密度为 0.9 g/m^3 的标准冰厚。

选择适用于气象部门电线积冰观测的 2 个标准冰厚换算公式^[18-19],即根据实测冰重计算标准冰厚和根据实测覆冰长短径计算标准冰厚。

根据实测冰重计算标准冰厚。

$$b_{0.9} = \sqrt{\frac{W \times 10^3}{0.9\pi} + \frac{d^2}{4}} - \frac{d}{2}. \quad (1)$$

式中: W 表示每米电线上的覆冰质量 (kg/m); d 表示电线直径 (4 mm); $b_{0.9}$ 表示密度为 0.9 g/cm^3 时的标准冰厚 (mm)。

根据实测覆冰长短径计算标准冰厚。

$$b_{0.9} = \frac{0.96}{4}(b + a) - \frac{d}{2}. \quad (2)$$

式中: a 、 b 分别为南北(东西)方向直径、厚度; d 表示电线直径 (4 mm)。

分别采用公式(1)、公式(2)对湖南省 30 个电

线积冰观测站的电线积冰观测资料进行标准冰厚换算,计算样本数为 1 458,从表 1 可以看出,公式(2)的计算结果有 87.1% 的样本大于公式(1),平均偏大 7.9 mm 。分析其原因,由于公式(2)计算只含直径、厚度因子,当覆冰成分是混合淞(由湿雪、雾淞、雨淞混合构成)时,其密度较纯雨淞小,因而换算成标准冰厚时计算结果会偏大。考虑到换算结果的合理性,文中选用公式(1)进行标准冰厚换算。

表 1 两种标准冰厚换算公式计算结果比较

Table 1 Comparison of the standard ice thickness calculated by two different methods

样本数	公式(1)计算的 平均冰厚/ mm	公式(2)计算 的平均冰厚/ mm	(1)式标准冰厚小于 (2)式标准冰厚的样本数
1 458	12.4	20.3	1 270

② 地面气象观测站高空温度分析资料的获取

NCEP/NCAR 925、850、700 hPa 温度再分析资料分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,为与地面气象观测站站点相对应,采用五点反距离权重方法进行插值,见公式(3)。

$$T_{i,j} = \sum_{k=1}^n T_k d_k^{-2} / \sum_{k=1}^n d_k^{-2} \quad (3)$$

式中: $T_{i,j}$ 为待插值站点气温值,有 n 个格点被引用到插值点; k 为第 k 个被引用到的插值点; T_k 为第 k 个点的温度; d_k^{-2} 为第 k 个点对待插值点的距离的平方的倒数。

(3) 台站坡度、坡向计算方法

基于湖南省高程 1:5 万 GIS 数据,以地面气象观测站站点为中心,取 3×3 行列的高程数据计算获取。具体计算方法略。

2 电线覆冰厚度影响因子分析

参考已有研究成果,选择气象因子和地理因子作为电线覆冰厚度影响因子展开分析。其中气象因子有: T 、 T_m 、 T_n 、 R 、 RH 、 V 、925 hPa 温度(T_9)、850 hPa 温度(T_8)、850 hPa 与 925 hPa 温度差($T_8 - T_9$)、700 hPa 与 925 hPa 温度差($T_7 - T_9$)、700 hPa 与 850 hPa 温度差($T_7 - T_8$)、冰冻持续日数、冰冻持续期间日降水量分别大于等于不同量级(0.0、0.1、1.0、5.0、10.0 mm)的降水日数、冰冻持续期间日平均相对湿度分别大于等于不同量级(70%、80%、90%)的高湿日数及日平均气温小于等于 0°C 的日数。地理因子有:纬度、经度、海拔高度、坡度、坡向。基于日电线积冰观测标准冰厚资料(不含雪峰山、

东山峰样本),分别计算各因子(当日资料缺测时则去掉该样本)与电线覆冰厚度的相关系数,结果见表2。

海拔高度小于等于1 000 m的样本数为269,若给定 $\alpha=0.05$, $t_{0.05}=1.906$,相关系数绝对值大于等于0.115 9时,可通过0.05信度的显著性检验。从表2可看出,气象要素因子(T 、 T_m 、 T_n 、 T_9 、 T_8 、 R 、 RH 、 V)均未通过显著性检验,说明气象要素值的变化对电线覆冰厚度无明显影响。温度垂直结构因子除 T_8-T_9 外, T_7-T_8 、 T_7-T_9 均通过0.05信度显著性检验,以 T_7-T_9 相关性最好,说明浅层逆温对电线覆冰厚度影响小,逆温层厚度越厚对电线覆冰厚度影响越大。地理因子中只有经度和坡向通过0.05信度的显著性检验,说明电线覆冰厚度与坡向相关较坡度更密切,与经度相关密切反映出了湖南特殊的地形特点。电线覆冰厚度与高相对湿度日数、降水日数、冰冻持续日数及日平均气温低于 0°C 日数均通过了0.05信度的显著性检验,且远高于前面所提及的因子,说明高湿、低温、降水、积冰的持续时间对电线覆冰厚度影响最大;不同等级高湿日数中与日平均相对湿度大于等于80%的持续日数相关性最好,不同等级降水日数中与日降水量大于等于0.1 mm的日数相关最密切,说明适度的湿度和降水量是电线覆冰厚度的关键影响因子。值得一提的是为了分析冰冻持续时间与坡向对电线覆冰厚度的综合作用,将2个因子进行了组合(x^d , x 为冰冻持续日数, d 为坡向,当坡向在 $80^\circ\sim 315^\circ$ 时取值1,否则取值2),组合因子与电线覆冰厚度的相关系数可高达0.65。

海拔高度大于1 000 m(1个站,因而地理因子被滤掉)的样本数为749,给定 $\alpha=0.05$, $t_{0.05}=1.906$,则相关系数绝对值大于0.069 6时通过显著性检验。从表2可以看出,高海拔影响因子与低海拔影响因子有较大差异。海拔高度大于1 000 m时,与温度垂直结构相关最密切,其次是温度因子,与冰冻持续时间、降水日数、高相对湿度日数相关并不密切。

3 电线覆冰厚度估算模型

3.1 电线覆冰厚度估算模型的建立

分析已得出,对电线覆冰厚度影响显著的因子有很大差别。因此,基于前面分析的26个因子及1个组合因子采用逐步回归方法分别建立海拔1 000 m以上和其以下的电线覆冰厚度模型。

表2 影响因子与覆冰厚度的相关系数

Table 2 Correlation between the impacting factors and the standard ice thickness

	海拔高度 $\leq 1\ 000\ \text{m}$	海拔高度 $> 1\ 000\ \text{m}$
T	-0.034 6	-0.193 5 ¹⁾
T_m	-0.025 6	-0.153 7 ¹⁾
T_n	-0.016 0	-0.158 4 ¹⁾
T_9	-0.040 9	-0.179 5 ¹⁾
T_8	0.000 9	-0.129 1 ¹⁾
R	-0.069 5	0.112 7 ¹⁾
RH	-0.086 5	0.034 0
V	-0.022 9	-0.040 2
T_8-T_9	0.112 0	0.133 0 ¹⁾
T_7-T_8	0.132 4 ¹⁾	0.218 9 ¹⁾
T_7-T_9	0.155 7 ¹⁾	0.231 1 ¹⁾
纬度	-0.080 4	
经度	0.121 4 ¹⁾	
海拔高度	-0.094 0	
坡度	0.020 0	
坡向	0.126 8 ¹⁾	
冰冻持续日数	0.452 5 ¹⁾	0.022 5
$R\geq 0\ \text{mm}$ 日数	0.452 1 ¹⁾	0.034 6
$R\geq 0.1\ \text{mm}$ 日数	0.467 8 ¹⁾	0.043 3
$R\geq 1.0\ \text{mm}$ 日数	0.423 0 ¹⁾	0.064 9
$R\geq 5.0\ \text{mm}$ 日数	0.265 3 ¹⁾	0.089 6 ¹⁾
$R\geq 10.0\ \text{mm}$ 日数	0.271 2 ¹⁾	0.107 0 ¹⁾
$RH\geq 70\%$ 日数	0.452 5 ¹⁾	0.030 8
$RH\geq 80\%$ 日数	0.474 8 ¹⁾	0.040 3
$RH\geq 90\%$ 日数	0.435 2 ¹⁾	0.063 9
$T\leq 0^\circ\text{C}$ 日数	0.452 7 ¹⁾	0.015 5

注:1)表示该因子与电线覆冰厚度的相关系数通过了0.05信度的显著性检验。

(1)海拔高度小于1 000 m

电线覆冰厚度模型为

$$y = 0.494\ 898 + 0.114\ 808X_1 + 0.492\ 867X_2。$$

式中: X_1 为组合因子; X_2 为冰冻期间日平均相对湿度 $\geq 90\%$ 的天数。

总样本数269,平均绝对误差1.79 mm,复相关系数0.675 7, $F=111.7$,均通过0.01信度的显著性检验。模拟值与实际观测值的绝对误差 $\leq 1\ \text{mm}$ 的个数为141,占总样本数的52.4%; $\leq 5\ \text{mm}$ 的个数为253,占总样本数的94.1%; $> 10\ \text{mm}$ 的个数为7,占总样本数的2.6%。

(2) 海拔高度大于 1 000 m

$$y = 16.385851 + 1.082174X_1 + 0.238100X_2。$$

式中: X_1 为 700 hPa 温度与 925 hPa 温度的差; X_2 为日降水量。

总样本数 749, 平均绝对误差 9.63 mm, 复相关系数 0.254 1, $F = 25.7$, 均通过 0.01 信度的显著性检验。模拟值与实际观测值的绝对误差 ≤ 1 mm 的个数为 44, 占总样本数的 5.9%; ≤ 5 mm 的个数为 238, 占总样本数的 31.8%; ≤ 10 mm 的个数为 510, 占总样本数的 68.1%; > 20 mm 的个数为 56, 占总样本数的 7.5%。

3.2 电线覆冰厚度估算模型与其他模型比较

(1) 刘和云模型

刘和云等^[7]建立的冰厚与风速、降水率、过冷却水滴直径的关系式为

$$\Delta R = 0.035N[P^2 + (0.2412VP^{0.846})^2]^{1/2} / (1 + 21.65/(Vd))。 \quad (4)$$

式中: V 为风速 (m/s); P 为降水率 (mm/h); N 为冰冻小时数; d 为过冷却水滴的直径 (μm), 取值 20 ~ 30 μm 。

将有电线积冰观测气象台的日降水量、日平均风速及冰冻持续时间代入 (4) 式, 计算出对应台站的日冰冻厚度模拟值, 然后计算模拟值与实测值的绝对误差, 结果见表 3。高山站绝对误差在 5 mm 以下的样本数占该类总样本数的 31.4%, 其他站绝对误差在 5 mm 以下的样本数占该类总样本数的 69.7%; 高山站平均绝对误差在 10 mm 以上, 其他站为 4.6 mm。

表 3 电线覆冰厚度模拟值与实测值的比较

Table 3 Comparison of the simulated and observed wire icing thickness

	样本数	绝对误差	绝对误差	平均绝对
		≤ 5 mm 样本	5 ~ 10 mm 样本	
南岳山	1 019	300	216	17.2
雪峰山	150	67	16	12.2
其他站	274	191	50	4.6
所有站	1 443	558	282	14.3

(2) 基于海拔高度的电线覆冰厚度推算模型

先基于耿贝尔分布函数推算出有电线积冰观测的各台站 5、10、15、30、50、100 a 一遇冰冻厚度值

$$F(x) = P(x < x_p) = e^{-e^{-\alpha(x_p - \beta)}}。 \quad (5)$$

对系数 α 、 β 采用最小二乘法进行估计。

然后根据国外及我国西南地区研究成果, 在云

层以下导线覆冰厚度随海拔呈指数规律变化。求得对应的 a 、 b 值。

$$y = ae^{bh}。 \quad (6)$$

根据有电线积冰观测气象台的冰厚实测值利用公式 (5) 计算出 5、10、15、30、50、100 a 一遇的冰厚推算值, 根据公式 (6) 计算出对应台站 5、10、15、30、50、100 a 一遇的冰厚模拟值, 然后计算模拟值与推算值的差值 (误差), 见表 4。5、10、15 a 一遇冰厚的拟合误差在 5 mm 以下的样本数占总样本数的 60% 以上, 30、50 a 一遇冰厚的拟合误差在 5 mm 以下的样本数占总样本数的 53.8%, 100 a 一遇冰厚的拟合误差在 5 mm 以下的样本数只占总样本数的 46.2%。

表 4 基于模型计算出的冰厚重现期值与基于实测值利用耿贝尔分布函数推算出的重现期值的比较

Table 4 Comparison of the ice thickness in return period based on the model and based on the observed value by using Gumbel distribution function

重现期/a	误差 5 mm 以下 样本/%	误差 5 ~ 10 mm 样本/%	平均绝对误差 /mm
5	73.1	23.1	3.4
10	65.4	26.9	4.6
15	65.4	26.9	5.4
30	53.8	15.4	6.6
50	53.8	11.5	7.7
100	46.2	19.2	9.1

(3) 三种估算模型比较

① 平均绝对误差

基于数据源的可比性 (均来自于地面气象观测台站的日气象观测资料), 平均绝对误差的比较仅限于自建模型 (模型 I) 和刘和云模型 (II) 的比较, 从表 5 可以看出, 自建模型平均绝对误差明显小于刘和云模型, 绝对误差低于 5 mm 所占的百分比也远大于后者。

表 5 自建模型与刘和云模型误差比较

Table 5 Comparison of the error between the new model and the model of LIU He-yun

	自建模型	刘和云模型
海拔高度 < 1 000 m 的平均绝对误差/mm	1.8	4.6
海拔高度 ≥ 1 000 m 的平均绝对误差/mm	9.6	17.2
海拔高度 < 1 000 m 的绝对误差 < 5 mm 比例	94.1%	69.7%
海拔高度 ≥ 1 000 m 的绝对误差 < 5 mm 比例	31.8%	29.4%

② 重现期厚度分布图的比较

以3种模型推算出的30 a一遇冰厚分布(图1、图2、图3)开展对比分析可得,模型I显现出雪峰山、南岭各有一条高值带,湘江流域为相对高值区,湘西北除高寒山区外,为低值区,和实际情况较吻合。模型II分布图与模型I接近,但湘西北高寒山区的冰厚值偏小,与实际情况有差别。模型III(基于海拔高度的电线覆冰厚度重现期推算模型)与模型I、模型II分布差别较大,除高值带一致外,湘江流域为低值带,湘西为相对高值区,这种分布态势显然和实际情况差别较大。

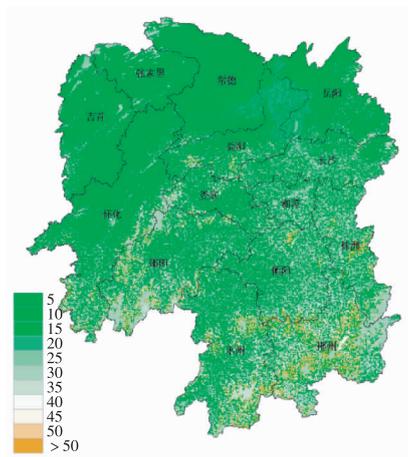


图1 基于电线覆冰厚度模型I计算出的30 a一遇冰厚分布

Fig. 1 Distribution of standard ice thickness once in 30 years based on model I

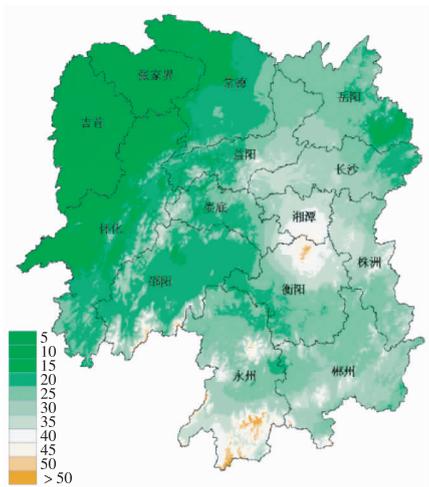


图2 基于电线覆冰厚度模型II计算出的30 a一遇冰厚分布

Fig. 2 Distribution of standard ice thickness once in 30 years based on model II

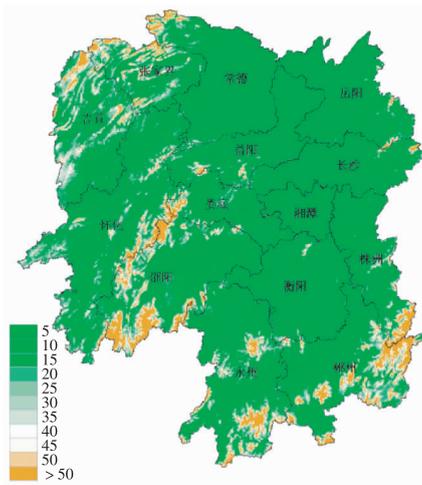


图3 基于电线覆冰厚度模型III计算出的30 a一遇冰厚分布

Fig. 3 Distribution of standard ice thickness once in 30 years based on model III

4 结论

(1) 验算结果表明,考虑积冰质量的标准冰厚换算公式更适用于气象观测台站积冰观测资料标准冰厚的换算。

(2) 影响电线覆冰厚度的因子随海拔高度不同有明显的差异。海拔高度低于1 000 m时,影响覆冰厚度的主要因子是冰冻持续日数、降水日数和高湿日数;海拔高度高于1 000 m时,影响覆冰厚度的主要因子则是温度的垂直结构,日降水量的作用变得比低海拔时重要。

(3) 检验及比对分析结果表明,自建电线覆冰厚度估算模型对湖南更适用。

(4) 应用自建电线覆冰厚度估算模型推算高海拔电线覆冰厚度时误差偏大,有待进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 《湖南省气象志》编纂委员会. 湖南省气象志[M]. 北京:气象出版社,2008.
- [2] Imai I. Studies on ice accretion[J]. Researches on Snow and Ice, 1953, 3(1):35-44.
- [3] Lenhard R W. An indirect method for estimating the weight of glaze on wires[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1955, 36(3):1-5.
- [4] Makkonen L. Modeling power line icing in freezing precipitation [C]//7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Montreal, 1996.
- [5] McComber P, Govoni J W. An analysis of selected ice accretion measurements on a wire at Mount Washington[C]//Proceedings

- of the Forty-second Annual Eastern Snow Conference. Montreal, 1985.
- [6] Mckay G A, Thompson H A. Estimating the hazard of ice accretion in Canada from climatological data[J]. *J Appl Meteor*, 1969 (8):927-935.
- [7] 刘和云,周迪,付俊萍,等. 电线雨淞覆冰预测简单模型的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(4):44-47.
- [8] 谭冠日. 电线积冰若干小气候特征的探讨[J]. *气象学报*, 1982, 40(1):13-23.
- [9] 魏其巍. 电线覆冰机理分析及在工程设计中的应用[J]. *电力建设*, 2007, 28(3):26-28.
- [10] 罗桂湘,陈斌,覃峥嵘. 资源县电线覆冰的气象因素探析[J]. *气象研究与应用*, 2008, 29(3):39-42.
- [11] 鲁俊,吴必文,卢燕宇. 安徽省电线积冰的特征及气象条件分析[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(24):10570-10572;10592.
- [12] 张勇,寿绍文,王咏青,等. 山东半岛一次强降雪过程的中尺度特征[J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(1):51-60.
- [13] 崔晶,张丰启,钱永甫,等. 2005 年 12 月威海连续性暴雪的气象背景[J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(6):845-851.
- [14] 吴素良,蔡新玲,何晓媛,等. 陕西省电线积冰特征[J]. *应用气象学报*, 2009, 20(2):247-251.
- [15] 麻巨慧,王盘兴,李丽平,等. “0801 南方雪灾”与同期蒙古高压中期活动的关系[J]. *大气科学学报*, 2009, 32(5):652-660.
- [16] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社, 2003.
- [17] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40 year reanalysis project [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77(3):437-471.
- [18] 西南电力设计院. DL/T 5158-2002 电力工程气象勘测技术规范[M]. 北京:中国电力出版社, 2002.
- [19] 贵州省电力工业局,贵州省气象科研所. 覆冰文集[C]. 1992:15-17.

(责任编辑:张福颖)