

夏智宏,周月华,刘敏,等. 湖北省电线积冰微地形因子影响识别研究[J]. 气象,2012,38(1):103-108.

# 湖北省电线积冰微地形因子影响识别研究<sup>\*</sup>

夏智宏 周月华 刘 敏 刘来林 任永建

武汉区域气候中心,武汉 430074

**提 要:** 电线积冰是影响电网正常运行的重要因素,研究电线积冰与微地形因子的关系对于电线积冰风险区划、电网建设可行性论证等具有重要指导意义。本文利用湖北省 1:5 万基础比例尺地形图数据和湖北省电网线路冰害故障调查统计数据,对电线积冰厚度与其对应的微地形因子进行相关性分析,识别对电线积冰有显著影响的微地形因子,分析电线积冰厚度与其影响显著的微地形因子的定量关系,解析微地形因子对电线积冰敏感性等级。结果表明:地形起伏度、海拔高度、离水体远近程度、下垫面类型等是影响积冰厚度最显著的微地形因子;地形起伏度与积冰厚度呈乘幂函数关系,海拔高度与积冰厚度呈对数函数关系,离水体远近程度与积冰厚度呈分段函数关系,下垫面类型与积冰厚度无显式的函数关系,但积冰灾害发生点具有明显的随下垫面类型分布的特征;积冰厚度随地形起伏度、海拔高度的增加而增加,而其变化率和敏感性则逐渐减小;地形起伏度小于 40 m 时,其对积冰风险最敏感;海拔高度在 25~100 m 时,其对积冰风险最敏感;积冰厚度随离水体距离的增加呈先增后减的变化趋势,其变化率绝对值和敏感性也呈先增后减的变化趋势,当离开水体距离在 2~2.7 km 时,其对积冰风险最敏感;电线积冰灾害多发区域的下垫面主要为水体、林地,其次为农田和草地,水体对积冰风险的敏感性等级分别是林地、农田、草地的 1.5、3.6 和 16.7 倍。

**关键词:** 电线积冰,微地形,相关性分析,敏感度

## The Recognition and Study of Microrelief's Influence on Wire Icing in Hubei Province

XIA Zhihong ZHOU Yuehua LIU Min LIU Lailin REN Yongjian

Wuhan Regional Climate Centre, Wuhan 430074

**Abstract:** Wire icing is an important influencing factor of power grid's safety. It is of important directive significance for the risk division of wire icing and the feasibility demonstration of power grid construction to study the correlativity between wire icing and microrelief elements. The paper uses 1:50000 large-scale topographic maps and investigation data of wire icing disasters to study the correlativity of different microrelief elements and icing thickness, distinguish the microrelief elements which influence icing thickness remarkably and analyze quantitative relations between icing thickness and microrelief elements. Thus we obtain the sensitivity levels of the microrelief elements to different icing thickness range. The results show that, among the microrelief elements, the topographic roughness, altitude, distance from water body and land use type are the most significant elements which influence the icing thickness; the relationship of topographic roughness and design icing thickness is a power function; the relationship of altitude and design icing thickness is a logarithm function; the relationship of distance from water body and design icing thickness is a piecewise function, and the function relation of land use type and design icing thickness is not obvious. However, icing disaster is of obvious distribution configuration with land use type. While topographic roughness and altitude increase, icing thickness increases, its change rate and sensitivity descend; when topographic roughness is less than 40 m, it is the most sensitive to icing

\* 2008 年国家科技支撑计划项目(2008BAC48B00)资助

2011 年 6 月 4 日收稿; 2011 年 7 月 26 日收修定稿

第一作者:夏智宏,主要从事卫星遥感灾害评估及地理信息系统应用与研究。Email:zhongxia@126.com

risk; when altitude is between 25—100 m, it is the most sensitive to icing risk; while distance from water body increases, icing thickness decreases after increasing trend, its change rate and sensitivity also decrease after increasing trend; when the distance is between 2—2.7 km, it is the most sensitive to icing risk. It is found that wire icing disasters mainly occur in water body, woodland, cultivated field and meadow, the sensitivity level of water body to icing risk is 1.5 times of woodland, 3.6 times of cultivated field, 16.7 times of meadow respectively.

**Key words:** wire icing, microrelief, correlation analysis, sensitivity

## 引 言

地形地貌与电线积冰的关系非常密切。一般而言,在高山的山顶和冬季迎风坡面地带是强冰冻区。在高原边缘气流抬升造成降水增强的地区积冰更严重。在背风及气流下沉区积冰减弱。小地形的作用则是在强冰区内的峡谷、风口、朝向河流、湖泊、水库等水体的坡地等区段造成重冰区<sup>[1-4]</sup>。国内外学者均作过地形地貌条件与电线积冰之间关系的研究。如苏联学者研究了顿巴斯地区海拔高度与积冰厚度的关系;国内学者对资源县电线积冰的气象因素研究发现,山峰和山坳比同一高程的山谷地区积冰较重;北坡比南坡(背风坡)积冰较重;河谷中心地带的山峰较谷地两边同一高程的山峰积冰重<sup>[5]</sup>。

以上研究成果主要是对微地形因子与电线积冰关系的定性研究,缺乏对其相互关系的定量评价。本文利用湖北省 1:5 万基础比例尺地形图和电网线路冰害故障调查统计数据,判识对电线积冰厚度影响显著的微地形因子,分析研究微地形因子与电线积冰

厚度的相关关系(如电线积冰厚度随海拔高度的变化),确定各微地形因子对电线积冰的敏感性等级,为湖北省电线积冰孕灾环境敏感性评估提供参考依据。

## 1 资料收集与整理

### 1.1 电线积冰调查资料收集整理

电线积冰调查资料来源于中南电力设计研究院,包括 2008 年湖北省冰害故障所在地域(市、县、乡),线路名称、维护单位、电压等级(kV)、故障发生时间、故障点杆塔号、杆塔型号、故障点位(经度、纬度、海拔高度)、积冰厚度、故障类型、设备损坏情况报告、受灾停电线路故障点的地形地貌条件(高山、丘陵、平原河道)和气象条件(风速、温度、湿度)等。

### 1.2 微地形资料收集处理

地形地貌资料来源于国家基础地理信息中心 2005 年发布的 1:5 万基础比例尺地形图,包括高程、河网、下垫面类型等数据(如表 1)。通过高程数

表 1 微地形资料信息

Table 1 Microrelief data information

微地形类别	微地形资料意义与说明	详细程度	获取时间
高程栅格数据	反映地表海拔高度	湖北省 1:5 万	2005 年
河网矢量数据	用于提取河道、湖泊水库与电网最短距离	湖北省 1:5 万	2005 年
下垫面类型数据	湖北省 TM30M 土地利用/覆盖数据,用于分析下垫面类型与电线积冰的关系	湖北省 1:5 万	2005 年
坡度	某点所处 TIN 表面与水平面的夹角	湖北省 1:5 万	2005 年
坡向	某点所处三角形面的法线方向在平面上投影所指的方向	湖北省 1:5 万	2005 年
地表照明度	计算栅格单位照明值,表征地形立体形态	湖北省 1:5 万	2005 年
坡度变率	地面坡度在微分空间的变化率,表征地面高程相对于水平面的二阶倒数	湖北省 1:5 万	2005 年
坡向变率	反应地表局部微小范围内坡向的最大变化情况	湖北省 1:5 万	2005 年
地表粗糙度	特定区域内地球面积与其投影面积之比,反映地表形态的宏观指标	湖北省 1:5 万	2005 年
地表起伏度	特定区域内,最高海拔与最低海拔高度差,描述区域地形特征的宏观指标	湖北省 1:5 万	2005 年
山脊线	山脊和山谷线构成地形起伏变化的骨架线,山脊表示分水性、山谷表	湖北省 1:5 万	2005 年
山谷线	示汇水性	湖北省 1:5 万	2005 年

据提取坡度、坡向、坡度变率、坡向变率、地形粗糙度、地形起伏度、地表照明度、山脊/山谷线分布等微地形因子<sup>[6]</sup>。

### 1.3 实测冰厚与设计冰厚转化方法

电线积冰厚度随输电线路的不同高度、不同线径以及不同积冰密度等参数而不同。因此研究积冰厚度与微地形因子的相互关系须在同一积冰厚度计量标准下进行。本文根据《电力工程气象勘测技术规程》(DL/T 5158-2002)对实测冰厚与标准冰厚进行了转换<sup>[7]</sup>。实测冰厚标准化计算公式如下。

根据调查积冰直径计算标准冰厚:

$$B_0 = \left[ \frac{\rho}{0.9} (K_s R^2 - 4r^2) + r^2 \right]^{0.5} - r \quad (1)$$

然后,根据标准冰厚推算设计冰厚:

$$B = K_h K_T K_\varphi B_0 \quad (2)$$

式中,  $B_0$  表示标准冰厚,单位: mm;  $R$  表示积冰半径(包括导线),单位: mm;  $K_s$  表示积冰形状系数 ( $K_s = b/a$ );  $\rho$  表示实测或调查积冰密度,单位:  $g \cdot cm^{-3}$ ;  $r$  为导线半径,单位: mm;  $B$  表示设计冰厚,单位: mm;  $K_h$  表示高度订正系数;  $K_T$  表示重现期换算系数;  $K_\varphi$  表示线径订正系数。本文所提到的设计冰厚指 300 kV 且离地 15 m 高的输电线路的设计冰厚,下文分析中所提及的积冰厚度均是指该标准下的设计冰厚。

## 2 分析方法与流程

首先对输电线积冰调查资料进行空间信息化处理,导入空间数据库。根据积冰灾害调查资料的位置以及微地形因子数据,在识别与判断的基础上获取与积冰调查样本对应的有效微地形因子数据。接着,对调查积冰厚度进行标准化处理,获取标准冰厚数据,并推算特定的设计冰厚,使调查冰厚数据具有可比性。然后,应用逐步回归分析法,识别对电线积冰有显著影响相互独立的微地形因子。最后,分析研究积冰厚度与对其影响显著的微地形因子的定量关系,获取微地形因子对电线积冰敏感性等级(分析流程如图 1 所示)。

### 3 微地形对电线积冰影响研究

对设计冰厚与微地形因子进行相关性分析,并参考相关研究成果,识别对积冰灾害影响显著的微

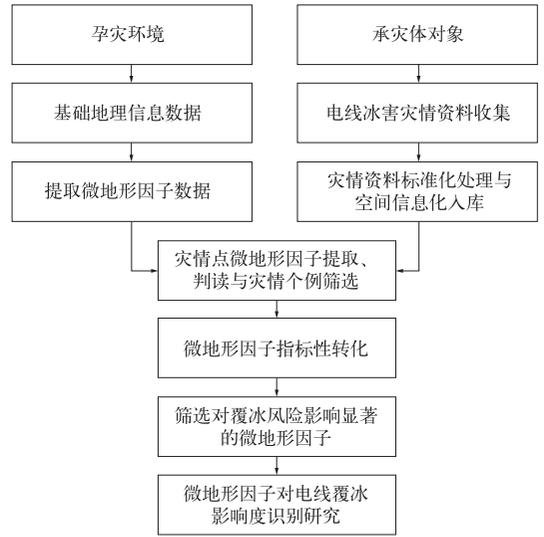


图 1 电线覆冰风险区划流程

Fig. 1 Risk division process of wire icing

地形因子,对其与积冰风险的关系进行定量解析。

### 3.1 设计冰厚与微地形因子相关性分析

对设计冰厚与起伏度、海拔高度、下垫面影响指标、与最近水体距离、坡度、坡向、表面照明度、坡向变率、粗糙度等微地形因子进行逐步回归分析(样本数为 29)。结果表明,对积冰厚度有显著影响且相互独立的微地形因子分别为起伏度、地表照明度、下垫面影响度、海拔高度、山脊点影响度、坡向变率,均通过了  $\alpha=0.15$  的显著性检验(如表 2 所示)。其中,地形起伏度对积冰贡献率最大。

表 2 逐步回归参数

Table 2 Stepwise regression analysis

序号	入选变量	偏相关 $R^2$	回归模型 $R^2$	F 值	$P_r > F$
1	起伏度	0.3707	0.3707	15.90	0.0005
2	地表照明度	0.2144	0.5851	13.44	0.0011
3	下垫面指标	0.1377	0.7228	12.42	0.0017
4	海拔高度	0.0395	0.7623	3.98	0.0574
5	山脊点影响	0.0396	0.8019	4.60	0.0428
6	坡向变率	0.0227	0.8246	2.85	0.1056

选定了以上对设计冰厚影响显著且相互独立的微地形因子建立设计冰厚回归模型,并对实测设计冰厚值与模型预测值进行了分析检验。模型如下:

$$SJBH = -16.413 + 0.17QFD + 17.34 \times LandUse - 0.01DEM - 0.08 \times SOA + 11.85Shanji + 0.10 \times ModelShadow \quad (3)$$

其中,  $SJBH$  (mm),  $QFD$ ,  $LandUse$ ,  $DEM$ ,  $SOA$ ,

*Shanji, ModelShadow* 分别为设计冰厚预测值、起伏度、下垫面影响度、高程、坡向变率、是否为山脊点、表面照明度。逐步回归模型的检验分析结果表明,预测冰厚与调查冰厚序列的拟合程度较高,其相关系数平方  $R^2$  达 0.82(如图 2);预测冰厚均值较实测冰厚略大,对实测冰厚低值的模拟偏大,对实测冰厚高值的模拟偏小;预测冰厚的变化幅度较大,没有实测冰厚序列线性变化趋势稳定(如图 3)。

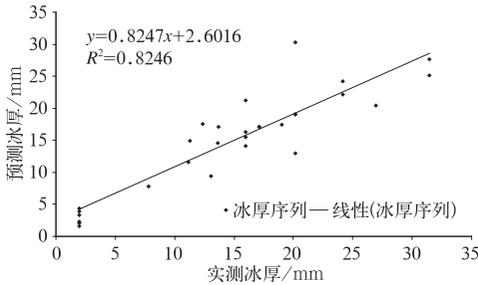


图 2 实测冰厚与预测设计冰厚拟合图  
Fig. 2 Fitting diagram of observed and predicted icing thickness

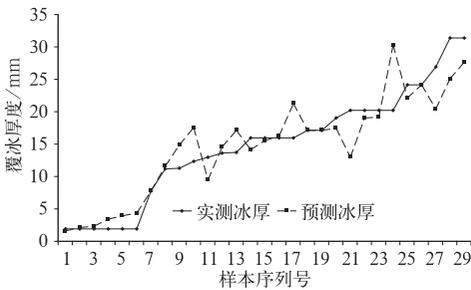


图 3 实测冰厚与预测冰厚对比图  
Fig. 3 Comparison diagram of observed and predicted icing thickness

### 3.2 微地形因子对积冰风险影响研究

选取与积冰风险关系密切的水体距离因子<sup>[8-9]</sup>,以及根据设计冰厚与微地形因子相关性分析结果所得到的地形起伏度、海拔高度、下垫面影响度共 4 个因子来解析微地形对积冰风险影响的机理,并给出敏感性等级<sup>[10-11]</sup>。

#### 3.2.1 地形起伏度对电线积冰的影响

地形起伏度是指特定的区域内,最高点海拔高度与最低点海拔高度的差值。它是描述一个区域地形特征的宏观性指标。对设计冰厚与起伏度的相互关系研究表明,湖北省电线积冰厚度与起伏度呈乘幂函数关系(式 4),相关性较显著,其相关系数平方  $R^2$  为 0.85。随着起伏度的增加,积冰厚度递增,而积冰厚度变率呈幂函数式递减( $y = 0.94x^{-0.48}$ )(如图 4);根据不同起伏度区间,积冰厚度随起伏度的变化关系,利用归一化方法给出了起伏度对电线积冰敏感性等级(如表 3)。可见,随起伏度上升,其对电线积冰的敏感性指标递减;起伏度在 0~40 m 区间,其对积冰厚度最敏感。

$$y = 1.8059x^{0.5221} \quad (4)$$

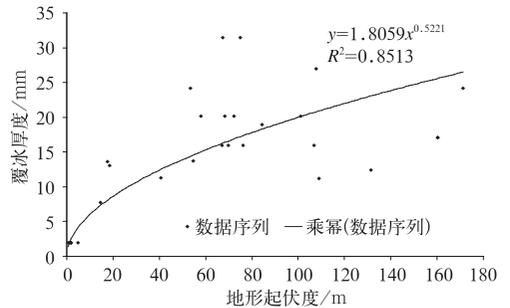


图 4 地形起伏度与积冰厚度关系图  
Fig. 4 Relationship of topographic roughness and wire icing thickness

#### 3.2.2 下垫面类型对电线积冰的影响

考虑到直接利用下垫面类型数据来定量研究其对电线积冰灾害的影响比较困难,因此作者对下垫面类型数据进行了指标化处理,以便于研究。

本文根据积冰灾害调查资料的位置信息以及湖北省下垫面数据,获取各积冰灾害点的下垫面信息(如水体、林地、农田等),分别计算不同下垫面积冰灾害发生概率,初步以此作为湖北省下垫面类型对电线积冰风险的影响指标;同时,考虑到有限的样本可能导致仅根据概率来确定影响度指标的局限性(如未能反映水体对积冰风险的影响),需要对上述

表 3 地形起伏度对电线积冰敏感性等级表

Table 3 Sensitivity levels of topographic roughness to wire icing

起伏度区间/m	0~40	40~80	80~120	120~160	>160
积冰厚度随起伏度变化率/mm·m <sup>-1</sup>	0.31	0.14	0.10	0.09	0.05
敏感性等级	1.0	0.45	0.32	0.29	0.16

指标进行修正。参考王守礼等<sup>[8-9]</sup>的研究成果——湖泊、水库或江河的近旁是覆盖灾害重发区,给予水体最大影响度指标“1.0”,以反映水体与积冰风险的密切关系,得到湖北下垫面类型对电线积冰风险影响度指标(如表 4)。

将各下垫面对积冰风险的影响度进行归一化处理,得到下垫面类型对积冰风险的敏感性等级(如表 4)。结果表明,与影响度指标相对应,水体对积冰风险敏感性等级最高,其次是林地、农田、草地,而城乡工矿居民地、未利用地对积冰风险的敏感性可以忽略。

表 4 下垫面类型对电线积冰敏感性等级

Table 4 Sensitivity levels of land use type to wire icing

下垫面	水体	林地	农田	草地	城乡工矿居民用地	未利用地
积冰灾害个例数	0	19	8	2	0	0
影响度指标	1.0	0.66	0.28	0.06	0	0
敏感性等级	1.0	0.66	0.28	0.06	0	0

3.2.3 海拔高度对电线积冰的影响

对设计厚度与海拔高度相互关系的研究结果表明,湖北省电线积冰厚度与海拔高度呈对数变化关系(式 5),其相关系数平方  $R^2$  为 0.55。随着海拔高度的增加,积冰厚度逐渐增加,而积冰厚度变率呈幂函数式递减(如图 5);根据不同海拔高度区间积冰厚度随海拔高度的变化关系,利用归一化方法给出了海拔高度对电线积冰敏感性等级(如表 5),在 25~100 m 区间,海拔对积冰风险最敏感;随后敏感性逐渐减弱;当海拔超过 1000 m,积冰风险对海拔高度变化的敏感性最低,并趋于稳定。

$$y = 5.0751 \ln x - 11.541 \quad (5)$$

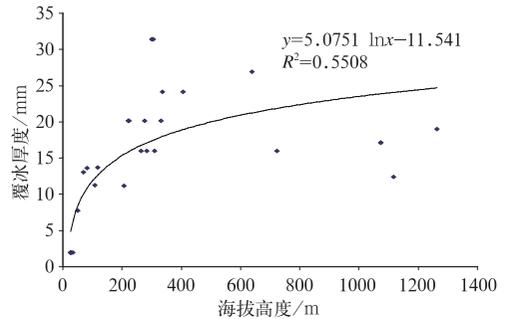


图 5 海拔高度与积冰厚度关系图

Fig. 5 Relationship of altitude and wire icing thickness

表 5 海拔高度对电线积冰敏感性等级

Table 5 Sensitivity levels of altitude to wire icing

海拔区间/m	0~25	25~100	100~200	200~400	400~600	600~800	800~1000	>1000
积冰厚度随海拔变化率/mm·m <sup>-1</sup>	0.000	0.093	0.035	0.018	0.010	0.007	0.006	0.003
敏感性等级	0.00	1.00	0.38	0.19	0.11	0.08	0.06	0.03

3.2.4 水体远近对电线积冰的影响

利用地理信息系统提取距各积冰灾害调查点最近的水体,量算各灾害调查点与水体的“最短距离”,在不考虑水体面积大小区别的前提下,对设计冰厚与对应的“最短距离”的相互关系进行分析研究。结果表明,积冰厚度与水体关系比较复杂,并非简单的线性或非线性变化关系,而是呈分段函数变化关系(如式 6),分段函数变化关系的“拐点”出现在 2.7 km 处。当“最短距离”小于或等于 2.7 km 时,积冰厚度与“最短距离”呈乘幂变化关系,随着“最短距离”的增加,积冰厚度逐渐增加;其变化率也呈幂函数变化关系( $y=8.68x^{0.27}$ ),随着“最短距离”的逐步增加,积冰厚度的变化率也增加,表明“最短距离”

对积冰风险的影响随“最短距离”的增加而增加。当“最短距离”大于 2.7 km 时,积冰厚度与“最短距离”呈对数变化关系,随着“最短距离”的增加,积冰厚度逐渐减小;其变化率呈幂函数变化关系( $y=-14.142x^{-1}$ ),随着“最短距离”的增加,积冰变化率逐渐减小,表明“最短距离”对积冰风险的影响随“最短距离”的增加而减弱(如图 6)。

根据不同“最短距离”区间的积冰厚度随“最短距离”变化率的绝对值,利用归一化方法给出了“最短距离”对电线积冰敏感性等级(如表 6),随“最短距离”增加,其对电线积冰敏感性随之提高;在 2~2.7 km 区间敏感性达极大值;“最短距离”继续增加,其对电线积冰敏感性逐渐变弱;“最短距离”在小

于 2.7 km 区间的敏感性均大于“最短距离”在超过 2.7 km 后的敏感性。

$$\begin{cases} y = 6.8449x^{1.2679} & x \leq 2.7 \\ y = -14.142\ln x + 31.484 & x > 2.7 \end{cases} \quad (6)$$

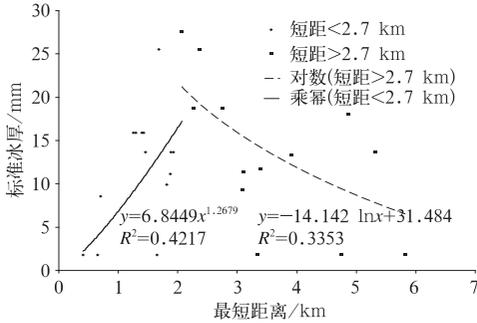


图 6 水体远近与积冰厚度关系图

Fig. 6 Relationship of distance from water body and wire icing thickness

表 6 水体远近对电线积冰敏感性等级

Table 6 Sensitivity levels of distance from water body to wire icing

最短距离/km	0~1	1~2	2~2.7	2.7~3	3~4	4~5	5~6	>6
积冰厚度随“最短距离”变化率/mm·km <sup>-1</sup>	6.84	9.63	10.90	4.97	4.07	3.16	2.57	2.18
敏感性等级	0.62	0.88	1.00	0.45	0.37	0.29	0.24	0.2

厚度逐渐增加;积冰厚度随海拔高度的变化率呈幂函数关系,随海拔高度的增加,其变化率逐渐减小;海拔高度对积冰风险的敏感性随海拔增加而逐渐变弱。

(4) 下垫面类型与积冰厚度之间无确定的函数关系,但积冰灾害发生点具有明显的随下垫面类型分布的特征;水体、林地、农田、草地是对电线积冰影响较大的下垫面类型,其中水体对积冰风险的敏感性指标最大。

(5) 距离水体远近程度与积冰厚度之间的关系比较复杂,并非简单的线性或非线性变化关系,而是呈分段函数变化关系,分段函数变化关系的“拐点”出现在 2.7 km 处;与水体距离在 2~2.7 km 时,其对积冰风险的敏感性程度最高;当与水体距离小于 2.7 km 时,离水体愈近,其敏感性程度愈低;当与水体距离大于 2.7 km 时,离水体愈远,其敏感性程度愈低。

(6) 本文中为了简化水体与积冰厚度关系模型的研究,仅考虑了输电线路与水体距离远近的关系,而未考虑水体面积大小与积冰厚度的关系。因此作者考虑在后续的研究中,综合考虑水体远近、水体面积大小两个因子,进一步解析水体与电线积冰的关系。

(7) 考虑到积冰调查样本数量有限,所处时空背景不同,导致代表性不够强,可比性不确定,因此

## 4 结论与讨论

(1) 逐步回归分析结果表明,地形起伏度、下垫面类型影响、坡度变率、海拔高度、山脊点的影响和地表照明度是影响电线积冰厚度最显著且相互独立的微地形因子,上述微地形因子与积冰厚度的线性逐步回归模型的模拟效率为 0.82。

(2) 地形起伏度与积冰厚度均呈乘幂函数关系,其相关系数平方为 0.85;随地形起伏度增加,积冰厚度逐渐增加;积冰厚度随地形起伏度的变化率呈幂函数关系,随地形起伏度增加,其变化率逐渐减小;地形起伏度对对积冰风险的敏感性随起伏度的增加而逐渐变弱。

(3) 积冰厚度与海拔高度呈对数变化关系,其相关系数平方为 0.56;随着海拔高度的增加,积冰

微地形因子对积冰厚度影响的关系模型有待修正,模型的模拟效率有待进一步检验。

## 参考文献

- [1] 魏其巍. 电线积冰机理分析及在工程设计中的应用[J]. 电力建设, 2008, 28(3): 26-28.
- [2] 李登文, 杨静, 吴兴洋. 2008 年低温冰冻雨雪天气过程中贵州电线积冰气象条件分析[J]. 气象, 2011, 37(2): 161-169.
- [3] 陈柏堃, 郜庆林, 吴明江. 金华近 56 年电线积冰气候特征及灾害防御[J]. 气象, 2009, 35(8): 85-90.
- [4] 杨军, 谢真珍. 电线积冰物理过程与数值模拟研究进展[J]. 气象, 2011, 37(9): 1158-1165.
- [5] 罗桂湘, 陈斌, 覃峥嵘. 资源县电线积冰的气象因素探析[J]. 气象研究与应用, 2008, 29(3): 39-42.
- [6] 汤国安, 杨昕. 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学技术出版社, 2006.
- [7] 西南电力设计院. 电力工程气象勘测技术规程[M](DL/T 5158-2002). 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [8] 王守礼. 影响电线积冰因素的研究与分析[J]. 电网技术, 1994, 18(4): 18-24.
- [9] 朱瑞兆, 谭冠日, 王石立. 应用气候学概论[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [10] 顾骏强, 朱则则, 姜瑜君, 等. 探空资料在输电线路覆冰事故评估中的应用[J]. 气象, 2010, 36(8): 81-86.
- [11] 郑利兵, 陈林, 林云生, 等. 基于气象规范的电线积冰自动监测系统研究[J]. 气象, 2010, 36(10): 97-101.