

# 典型微地形区输电线路覆冰厚度影响因子分析

吴建蓉<sup>1,3</sup>, 何锦强<sup>2</sup>, 李昊<sup>2</sup>, 文屹<sup>1,3</sup>, 龚博<sup>2</sup>, 张厚荣<sup>2</sup>, 曾华荣<sup>1,3</sup>

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550000; 2. 南方电网科学研究院有限公司, 广东 广州 510663; 3. 南方电网有限责任公司防冰减灾重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** 导线覆冰是架空电力线路的主要自然荷载之一, 由于典型微地形的影响造成局部地区的气象要素突变, 在冬季形成严重的覆冰过载现象, 导致线路跳闸、受损甚至倒塔, 威胁电网的安全运行。以毕节市为例, 研究提取区域易覆冰微地形方法, 收集历史覆冰观测样本, 采用随机森林 (Random Forest, RF) 和梯度提升树 (Gradient Boosting Decision Tree, GBDT) 机器学习模型, 分析不同易覆冰微地形区输电线路的覆冰影响因子。

**关键词:** 导线覆冰; 气象因子; 地理因子; 梯度提升树

## Analysis on influencing factors of transmission line icing thickness in typical micro terrain area

WU Jianrong<sup>1,3</sup>, HE Jinqiang<sup>2</sup>, LI Hao<sup>2</sup>, WEN Yi<sup>1,3</sup>, GONG Bo<sup>2</sup>, ZHANG Hourong<sup>2</sup>, ZENG Huarong<sup>1,3</sup>

( 1. Electrical Science Institute of Guizhou Power Grid Co.,Ltd., Guiyang 550000, China;  
2. CSG Electric Power Research Institute, Guangzhou 510663, China;  
3. CSG Laboratory of Ice Prevention and Disaster Reduction, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** One of the primary natural loads on overhead transmission lines is conductor icing. Because of the impact of typical micro-topography, local meteorological elements change abruptly, causing serious ice overload in winter, which is very easy to cause serious line accidents such as tripping and tower collapse, threatening the safe operation of the power grid. By extracting ice prone micro-topographic areas and historical ice covering samples from the study area, this study used Random Forest(RF) and Gradient Boosting Decision Tree(GBDT) machine learning models to analyze the influencing factors of the ice covering thickness of overhead transmission lines in various types of micro-topographic areas, using Bijie City as an example.

**Key words:** conductor icing; meteorological factors; geographical factors; gradient lifting tree

## 0 引言

导线覆冰是架空电力线路的主要自然荷载之一, 覆冰过载可能导致跳闸、线路受损甚至倒

塔, 威胁电网的安全运行。导线覆冰发生在冬季, 受微地形、气候影响较大<sup>[1]</sup>。随着国家“西电东送”战略深层推进, 越来越多的输电线路经

中国南方地区电网自然覆冰大数据分析与应用 (南方电网公司科技项目 066600KK52190063)

过各类微地形区域,这些区域往往存在诱发严重覆冰的因素,且存在电网安全隐患。因此,在线路规划、设计、建设、运行和维护中需重点考虑微地形的特殊性,减少恶劣气象条件下重大冰灾事故的发生<sup>[2-4]</sup>。

微地形通常指在局部地形下各气象因子在小范围内产生综合突变的地形,尚无相关明确标准,行业上主要指的是迎风坡、风口、垭口、峡谷、分水岭、山脊、湖泊、江河、背风坡和林带等范围相对较小的地形。目前,已有许多学者对输电线路覆冰风险做了研究。文献[5]基于支持向量机和灰色预测技术,提出了两种实用的输电线路运行可靠性预测模型,真实地反映了元件的运行可靠性水平。文献[6]根据线路荷载-强度的随机特性与干涉理论,建立了线路冰风荷载风险模型,应用模糊理论对线路的短期冰风荷载风险进行预测,并给出了时间尺度上线路的风险测度。文献[7]建立了顾及不同气象等级和气象因素的输电线路故障率模型,提出一种基于灰色模糊理论的多气象因素组合的输电线路风险分析方法。文献[8]根据气象约束条件计算导线垂直荷载,与利用杆塔参数计算的垂直荷载比较,再根据导线参数计算等效导线长度变化范围,进行导线覆冰厚度范围计算。文献[9]根据各个气象参数对输电线路导线覆冰的影响系数不同,对各个微气象点进行建模,提出了一种基于神经网络及模糊逻辑算法的输电线路导线覆冰组合预测模型。由于对输电线路覆冰受气象、地理因素影响的发生机理认识还相对不足,当数据规模急剧增加时,上述方法存在难以加载大规模数据、计算复杂度高和计算速度慢等问题。同时上述方法缺少典型微地形条件下不同气象、地理等影响因子对输电线路覆冰贡献的定量分析,很难提供输电线路设计指导。

因此,本研究以毕节市为例,基于GIS结合区域数字高程模型识别出山谷、山脊、垭口、迎风坡和水汽上行区五类典型的易覆冰微地形区,采用随机森林和梯度提升树两种模型,对常见的坡度、坡向和高程等地理因子以及日平

均温度、日最低温度、风速、气压、湿度、月降水量和日照时数等气象因子<sup>[2,10]</sup>,结合覆冰观测记录,开展典型微地形条件下输电线路覆冰厚度影响因子分析研究,为减少输电线路覆冰现象提供参考。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

毕节市位于贵州省西北部,地处川、滇、黔三省结合部,是国家“西电东送”的重要能源基地。毕节市整体呈现西高东低,海拔最高点为2 900.6 m,最低点为457 m;属于北纬亚热带季风湿润气候,季风气候比较明显,降雨量较为充沛<sup>[11]</sup>。由于特殊的地理、气候条件,毕节市范围内输电线路覆冰现象严重,覆冰灾害频发<sup>[12]</sup>。

为了有效监测架空线路覆冰情况,电网公司在易覆冰线路塔位安装了输电线路覆冰监测终端。另外,气象部门也安装了气象站点,在金沙县、黔西县、大方县、织金县、纳雍县、赫章县、威宁彝族回族苗族自治县及市区均设有气象站。毕节区域高程、覆冰监测终端及气象站分布如图1所示。电网公司开展地貌特征、气候特征和覆冰勘探调查,结合运行经验绘制的毕节区域冰区分布图如图2所示,冰区分布图与高程地图基本分布规律相似,其局部差异多来源于微地形、微气象影响。

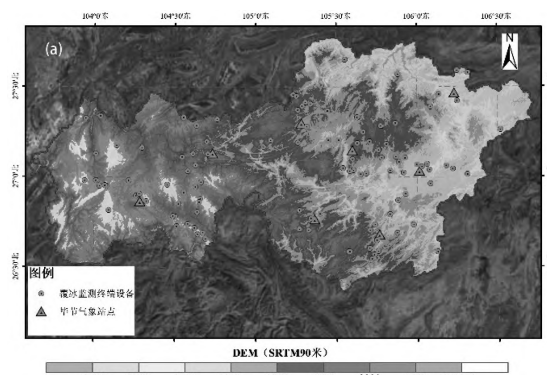


图1 研究区高程、覆冰监测终端及气象站分布

Fig. 1 Distribution of elevation, icing monitoring devices and weather stations

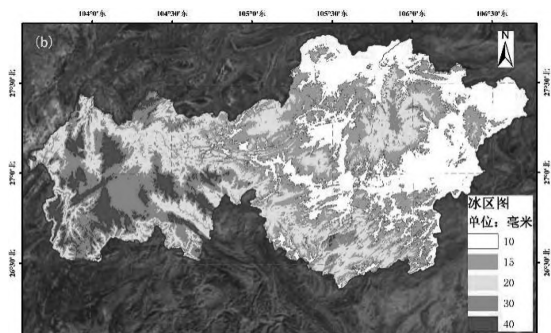


图2 冰区等级分布图

Fig.2 Distribution of ice level

## 1.2 数据处理与分析

### 1.2.1 微地形参数提取

在微地形识别方面,本研究综合现有文献报导和电网运维经验,认为易覆冰微地形主要类型为山谷、山脊、垭口、迎风坡及水汽上行区。背风坡受地形不同程度的阻挡屏蔽影响背风坡风速不大或偏小,气流因下沉而升温,难成云致降水,暂不进行讨论。基于GIS分析方法结合90 m分辨率的数值高程数据进行研究区相应微地形的识别与提取<sup>[14]</sup>。

山谷、山脊和垭口地形根据地表流水物理模型进行识别和提取。将分水岭定义为山脊,通过对零值的汇流累计量栅格的提取,得到分水线,即山脊线;将汇水区定义为山谷,用一个较大的值减去DEM,得到的反转DEM中的汇水线为分水线,即山谷线;将分水线与汇水线的交叉区域定义为垭口地形,通过山脊和山谷单元进行空间叠置分析<sup>[15-16]</sup>。

迎风坡的提取方法为:将山谷、山脊和垭口地形外的区域定义为山坡地形,根据DEM计算每个山坡像元的坡度值,循环每个待分的山坡栅格像元,搜索与像元位置最邻近的气象站并计算冬季平均风向,将风向与山坡坡度夹角小于90°的划分为迎风坡,否则为背风坡。

特别地,在河流、湖泊和水库等大型水体附近极易导致冬季水汽聚集,是输电线路覆冰的重点监测区域。水体对临近陆地的影响,主要是通过两者增温不同和水汽含量不等,使临近的小气候发生变化。影响的范围与水体的大小、深度和

陆地地貌等相关,距离水体越近,影响越大。本研究对水汽上行区地形的定义为与临近水体在一定距离范围且与迎风坡交叉的区域。水体有效影响覆冰的空间半径定义为缓冲距离。通过收集区域内水体边界数据并进行GIS空间缓冲区分析,获取大型水体的水汽影响范围,水体面积与缓冲距离的关系详见表1。最后将水汽影响范围与迎风坡地形进行空间求交,识别出水汽上行区。

表1 大型水体的缓冲距离

Tab.1 Definition of buffer analysis distance of water bodies with different areas

| 面积 $S/\text{km}^2$ | 缓冲距离 /km |
|--------------------|----------|
| $S < 1$            | 不作处理     |
| $1 \leq S \leq 10$ | 取值为 $S$  |
| $S > 10$           | 10       |

注:水汽影响范围为大型水体边界向四周扩散一个缓冲距离空间的水汽面。

识别出毕节市山谷、山脊、垭口、迎风坡及水汽上行区等微地形后,本研究进一步对微地形与冰区等级分布图中、重冰区(15 mm及以上)进行空间叠加分析,获取研究区内五种易覆冰微地形分布,如图3所示。

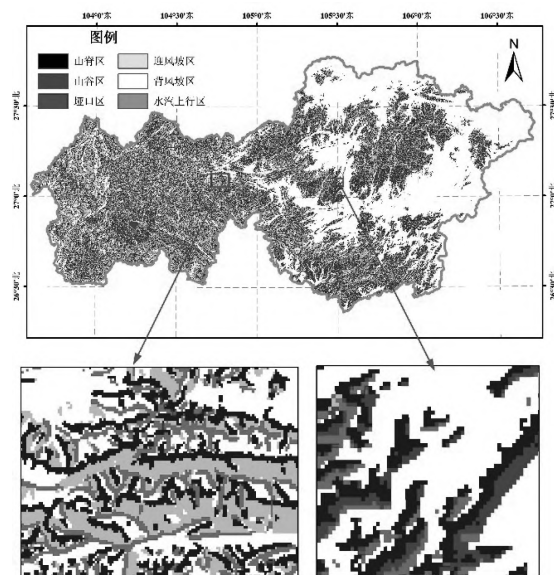


图3 毕节市 15 mm 以上易覆冰微地形识别和划分结果

Fig.3 Identification and division of easily icing microterrain above 15mm of Bijie region

### 1.2.2 历史覆冰样本构建

在图3基础上,结合输电线路路径和坐标,得到处于易覆冰微地形的线路杆塔。收集和整理2015—2021年冬季毕节地区输电线路覆冰在线监测和人工观测数据并分析覆冰情况,并且收集覆冰观测记录的同期气象因子和地形因子,完成覆冰样本库的构建。

地形因子指的是坡度、坡向以及高程,采用GIS分析手段实现。

覆冰受多种气象因子影响,本研究收集了日平均温度、日最低温度、湿度、风速、气压、降水量和日照时数。考虑到降水受地形、气候影响,跨年统计更具意义,降水量选用的是多年月平均降水量。对于覆冰监测终端监测气象数据存在异常和缺失,采用邻近气象站监测数据进行空间插值补全处理。

以提取的10个气象因子及地形因子作为 $X$ 序列,覆冰观测记录中的等值覆冰厚度为 $Y$ 序列,构建覆冰样本库。经过合理的数据清洗、空间匹配和质量控制,最终获取毕节地区历史覆冰样本2 128个,其分布和统计信息如图4所示。

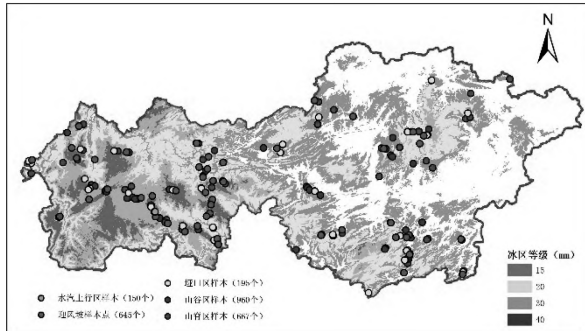


图4 15 mm 以上易覆冰微地形输电线路覆冰观测样本分布

Fig.4 Distribution of observation samples of transmission line icing under easily icing microterrain above 15mm of Bijie region

## 2 研究方法

本研究采用随机森林(Random Forest, RF)和梯度提升树(Gradient Boosting Decision Tree, GBDT)算法进行覆冰样本的训练和覆冰厚度模拟。对比基于两种模型进行覆冰厚度模拟的准确度,分析不同易覆冰微地形区线路覆冰的

主要影响因子和贡献因子。

### 2.1 随机森林

随机森林(RF)模型是决策树的集成算法,通过对大量分类树的汇总以提高模型的预测准确度。RF算法通过多个决策树来降低过拟合风险,核心思想是Bagging算法和随机特征选取。RF模型通过对训练样本重新采样的方法得到不同的训练样本集;在新的训练样本集上分别进行训练学习,因为每个学习器相互独立,所以此类方法更容易并行;最后合并每一个学习器的结果,从而得到最终的学习结果。RF模型的一个缺点是在噪声较大的分类或者回归问题中容易过拟合<sup>[17]</sup>。

### 2.2 梯度提升树

梯度提升树(GBDT)是一个集成模型,由许多分类回归树(Classification and Regression Tree, CART)线性相加组成;具有可灵活处理各种数据、预测准确率高、使用健壮的损失函数和对异常值具有很强的鲁棒性等优点,可有效进行回归预测。

假定 $f_t(x)$ 表示第 $t$ 轮的模型, $h_t(x)$ 表示第 $t$ 棵决策树,则GBDT模型可以表示为

$$f_t(x) = \sum_{i=1}^T h_i(x) \quad (1)$$

采用前向分布算法,第 $t$ 轮的模型由第 $t-1$ 轮的模型形成,则

$$f_t(x) = f_{t-1}(x) + h_t(x) \quad (2)$$

损失函数定义为

$$L(f_t(x), y) = L(f_{t-1} + h_t(x), y) \quad (3)$$

使用损失函数的负梯度拟合本轮损失的近似值,进而拟合一个CART,即每次需要拟合的是模型的负梯度。则第 $t$ 轮的第 $i$ 个样本的损失函数的负梯度表示为

$$r_{t,i} = - \left[ \frac{\partial L(y, f(x_i))}{\partial f(x_i)} \right] \quad (4)$$

利用 $(x_i, r_{t,i})$ 可以拟合一棵CART,  $i=1,2,\dots, m$ ,得到第 $t$ 棵回归树,其对应的叶结点区域为 $R_{t,j}$ ,  $j=1,2,\dots,J$ ,其中 $J$ 为叶子结点的个数。则每一个叶子结点的最好输出值为

$$c_{i,j} = \arg \min_{x_i \in R_{t,j}} L(y_i, f_{t-1}(x_i) + c) \quad (5)$$

因此，本轮的决策树拟合函数为

$$h_t(x) = \sum_{j=1}^J c_{t,j} I(x \in R_{t,j}) \quad (6)$$

式中， $I(x)$ 为指示函数，表示相应样本属于的区域，在相应区域其值为1，否则为0。

本轮的强学习器为

$$f_t(x) = f_{t-1}(x) + \sum_{j=1}^J c_{t,j} I(x \in R_{t,j}) \quad (7)$$

依次迭代，直到损失函数收敛。

### 2.3 准确度评价

本研究采用交叉验证进行模型的训练和参数优化，并选择平均绝对误差（Mean Absolute Error, MAE）、均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）和判定系数（记为 $R^2$ ）作为模型准确度的评价指标。其中MAE表示模拟值和观测值之间绝对误差的平均值，该值越小，表明模型拟合得越好。RMSE表示模拟值和观测值之间差异（称为残差）的样本标准差，该值越小，表明模型拟合得越好。设 $x_i$ 的模拟值为 $h(x_i)$ ，真值为 $y_i$ ，则

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |h(x_i) - y_i| \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (h(x_i) - y_i)^2} \quad (9)$$

此外，判定系数 $R^2$ 常用于度量因变量的变异中，可由自变量解释部分所占的比例，以此来判断统计模型的解释力。该统计量越接近于1，模型的拟合度越高。设观测值为 $y_i$ ，模拟值为 $h(y_i)$ ，残差 $e_i = y_i - h(x_i)$ ，则平均观测值为

$$\bar{y} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_i \quad (10)$$

总二次方和为

$$SS_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 \quad (11)$$

回归二次方和为

$$SS_{\text{reg}} = \sum_{i=1}^m (h(x_i) - \bar{y})^2 \quad (12)$$

判定系数可定义为

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{reg}}}{SS_{\text{tot}}} \quad (13)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 覆冰厚度模拟准确度分析

本研究分别在80%样本上进行模型训练，在20%样本上进行测试模拟，将模型模拟的覆冰厚度与实测覆冰厚度进行对比，结果如图5所示。使用MAE、RMSE与 $R^2$ 三个指标定量描述两种模型的拟合准确度，见表2。

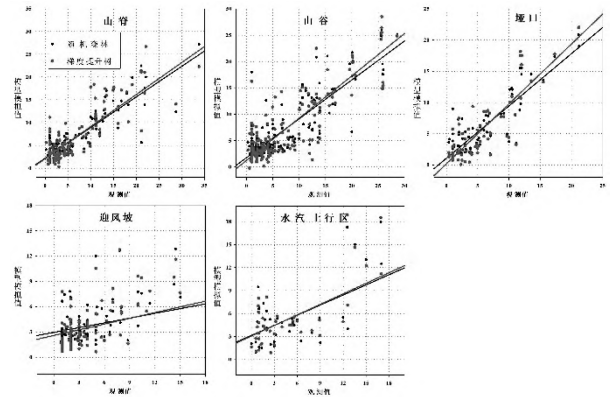


图5 典型微地形下覆冰厚度观测值与模型模拟值对比

Fig. 5 Comparison between ice thickness observation data and model simulation result under typical micro topography

由图5可知，这两种模型的拟合函数图形略有差异，梯度提升树模型的拟合准确度略优于随机森林模型。另一方面，在不同微地形约束下，这两种模型在山脊、山谷和垭口地形区的综合拟合表现优于迎风坡和水汽上行区，即在山脊、山谷和垭口地形区拟合函数图形更接近于理想状态。

由表2可知，在MAE指标下，五种微地形均体现出梯度提升树的模拟准确度高于随机森林模型，表现最佳的是在垭口地形区（1.690 mm）；在RMSE指标下，在山脊、迎风坡和水汽上行区地形上，梯度提升树的覆冰厚度模拟均方根误差明显低于随机森林，在垭口和山谷地形上两种模型差别较小；在 $R^2$ 指标下，除了在垭口地形区随机森林的准确度略优于梯度提升树模型外，在其他典型微地形区均为梯度提升树模型的准确度更高，最优准确度出现在山谷地形

(0.857 mm)。

表2 典型微地形区易覆冰训练样本的模型拟合准确度

Tab. 2 Model fitting accuracy of training samples in typical microterrain area

| 模型 / 指数 | MAE/mm |       | RMSE/mm |        | $R^2$ |       |
|---------|--------|-------|---------|--------|-------|-------|
|         | RF     | GBDT  | RF      | GBDT   | RF    | GBDT  |
| 山脊      | 2.503  | 2.439 | 18.524  | 18.083 | 0.702 | 0.746 |
| 山谷      | 2.480  | 2.406 | 12.154  | 12.230 | 0.798 | 0.857 |
| 垭口      | 1.750  | 1.690 | 5.985   | 6.035  | 0.756 | 0.731 |
| 迎风坡     | 2.230  | 2.080 | 19.375  | 18.559 | 0.145 | 0.174 |
| 水汽上行区   | 3.725  | 3.296 | 23.365  | 22.944 | 0.405 | 0.432 |

注：表中阴影为两种模型相比指标占优的一方。

总的来说，在易覆冰微地形区输电线路覆冰厚度模拟的对比分析中，从综合表现上梯度提升树模型取得比随机森林模型更好的拟合效果和准确度；两种模型在山脊、山谷和垭口地形区的拟合表现均优于迎风坡和水汽上行区。

### 3.2 微地形下输电线路覆冰厚度的影响因子

自然覆冰呈现多样性、随机性和不可预见性。微地形区在冬季极易造成局部区域气象差异。本研究根据两种模型模拟结果计算易覆冰微地形区的气象因子、地理因子对线路覆冰的相对贡献率，其结果如图6所示。

由图6a可知，地形因子对线路覆冰的贡献较小，温度因子和湿度因子是微地形区形成线路覆冰的主要贡献因子。对于山脊地形，温度对线路覆冰的贡献度相对较大。在垭口和水汽上行区地形，湿度是输电线路形成覆冰的最主要因子，其次是温度，这与垭口和水汽上行区的特征相关。

对比图6b中知，两种模型计算的覆冰贡献因子在整体上呈现出相似的趋势。两种模型对于覆冰的主要影响因子的判定是一致的，均主要为温度和湿度，并且不同易覆冰微地形下的主要影响因子表现出一致性。另外，梯度提升树模型在地形因子和其他气象因子对覆冰的影响程度上具有更强的区分能力。例如对于山脊地形，梯度提升树模型识别出来高程的贡献度更高，符合高寒山区易覆冰特点；对于迎风坡地形，梯度提升树模

型识别出来坡度的贡献度更高，凸显地形抬升作用与其坡度相关联的特点。

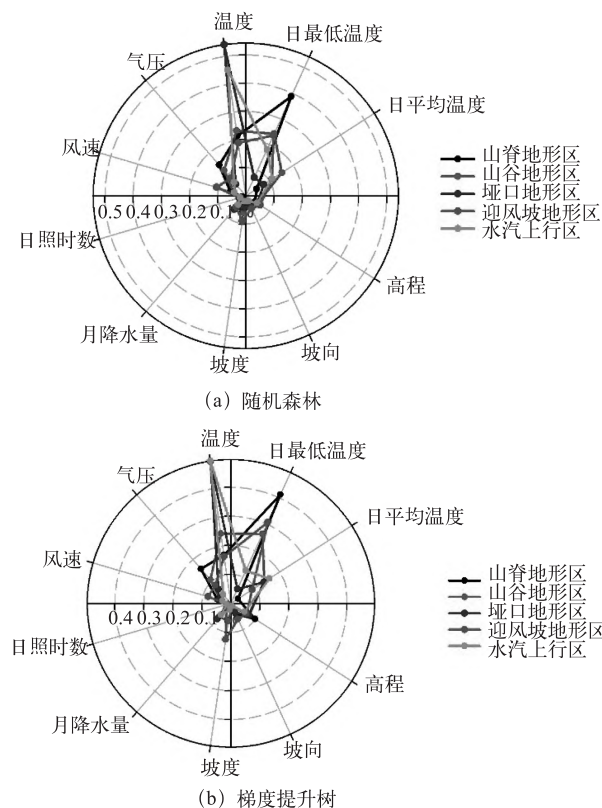


图6 易覆冰微地形区的气象、地理因子对覆冰厚度的相对贡献率

Fig. 6 Relative contribution rate of meteorological and geographical factors to ice cover thickness in easily icing microterrain area

经两种模型模拟分析相对贡献率，结合电网公司运行经验，湿度和日最低温度是五种微地形区域输电线路覆冰的最主要因素，其次是日平均温度，其他地形因子和气象因子对覆冰的作用偏向隐性或影响较小。

1) 山脊地形往往是线路翻越分水岭，地形空旷开阔，温度因子和湿度因子最为关键。在山区，尤其是海拔变化很大的山区，存在强烈的立体气候特征。研究表明，超过凝结高度后，海拔每上升100 m，气温下降0.6~1.0℃，覆冰可能性随之增加。两种模型中气压因子贡献度相对较大，考虑到气压主要受海拔影响，也可佐证认为山脊地形覆冰与海拔关联紧密。

2) 山谷地形是两山间低凹而狭窄处沿着一

个方向延伸的洼地，是集（积）水线，湿度对覆冰贡献度较大。另外，山谷地形有山体遮挡日照，除了日最低温度以外，日平均温度的数值大小也较为关键。

3) 垭口地形是在绵延的山脉所形成的垭口，当气流由开阔地带流入地形狭窄处时，由于空气质量不能大量堆积，气流加速流过狭窄处，湿度有所加强，对线路覆冰强度的发展有增幅作用。

4) 迎风坡地形的气流受地形强迫爬坡抬高，气温随海拔升高而下降，水汽凝结，空气湿度增加。抬升作用增强了温湿度、风场等覆冰环境，对线路覆冰强度的发展有增幅作用。

5) 大型水体（湖泊、水库和河流）周边地区是典型的水汽聚集区，叠加迎风坡地形时在风

力作用下沿山坡强制上升，覆冰气流遇冷凝结，极易形成覆冰。

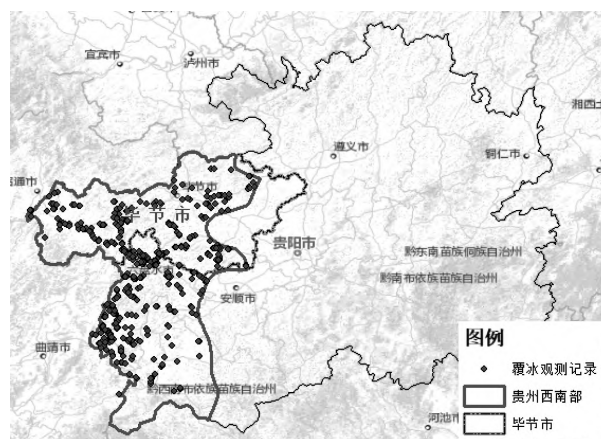


图7 贵州西南部地理位置及其覆冰观测记录分布  
Fig. 7 Geographical location and distribution of ice cover observation records in southwest Guizhou

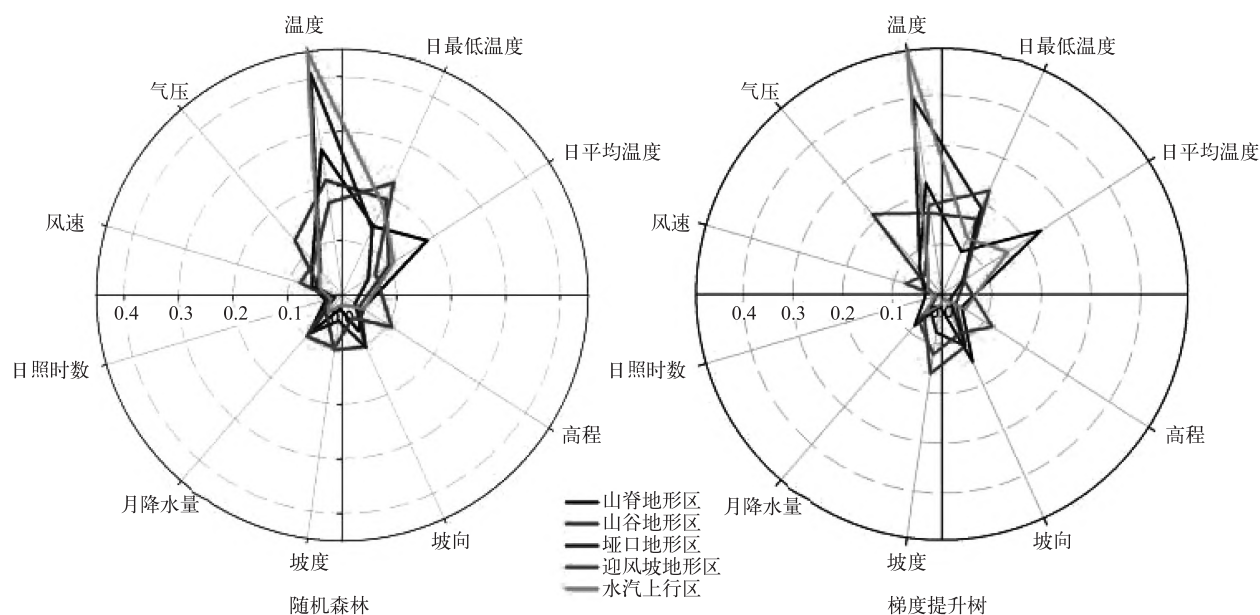


图8 贵州西南部微地形区的气象、地理因子对覆冰厚度的相对贡献率

Fig. 8 Relative contribution rates of meteorological and geographical factors to ice cover thickness in different micro-topography regions in southwestern Guizhou.

为验证两种模型在其他地区的推广应用可能，本文也对贵州西南部（包含毕节、六盘水和黔西南等地区，如图7所示）进行了微地形分类和覆冰样本提取（共5 946条覆冰观测记录），并计算了贵州西南部各类微地形区的气象因子、地理因子的覆冰相对贡献度，结果如图8所示。

可知，贵州西南部存在相似结论，即湿度和温度是微地形区覆冰的主要气象因子。易覆冰微地形的显著特点之一是对局部覆冰小气候环境有显著影响，特别是垭口和水汽上行区，水汽聚集特征使得湿度局部集中，输电线路覆冰量级变化极大，是冬季覆冰灾害多发区和覆冰巡检的重点

区域。

## 4 结束语

本研究以毕节市为例,采用GIS技术结合DEM与冰区分布图,研究易覆冰微地形区划分方法。同时在易覆冰微地形区选取地形和气象因子,建立历史覆冰观测样本集,采用随机森林和梯度提升树两种模型,开展不同易覆冰微地形条件下输电线覆冰厚度影响因子分析研究,得出结论如下:

1) 在五种易覆冰微地形区的覆冰厚度模拟准确度上,梯度提升树模型综合表现优于随机森林,表现出更好的应用潜力。

2) 梯度提升树和随机森林模型在山谷、山脊和垭口地形区表现出更好的模拟效果,判定系数均在0.7以上;在迎风坡和水汽上形区的覆冰厚度模拟准确度表现不良,可能与其微地形识别时选取最邻近的气象站计算风向的工程近似做法有关。

3) 温度和湿度是输电线路在易覆冰微地形区形成导线覆冰的最主要的两个因子,其他地形因子和气象因子对覆冰的作用偏向隐性或影响较小。垭口和水汽上行区地形分别受狭管效应和水汽抬升影响,湿度对覆冰形成的影响极大。

### 参考文献

- [1] 金西平.微地形微气候对电力线路覆冰的影响[J].供用电,2008,25(4):17-20.
- [2] 何相奎,孔韬,董能伦,等.几种典型的微地形微气象区对输电线路的影响[J].湖北电力,2020,44(2):33-38.
- [3] 陆佳政,曾敏,田凌,等.基于微地形的输电线路覆冰等级判别方法[J].电力科学与技术学报,2013,28(4):24-30.
- [4] 陆佳政,曾敏,田凌,等.微地形对输电线路覆冰的影响[C].中国电工技术学会学术年会——新能源发电技术论坛,2013.
- [5] 朱清清,严正,贾燕冰,等.输电线路运行可靠性预测[J].电力系统自动化,2010,34(24):

18-22.

- [6] 孙羽,王秀丽,王建学,等.架空线路冰风荷载风险建模及模糊预测[J].中国电机工程学报,2011,31(7):21-28.
- [7] 熊小伏,王尉军,于洋,等.多气象因素组合的输电线路风险分析[J].电力系统及其自动化学报,2011(6):11-15.
- [8] 阳林,郝艳捧,黎卫国,等.架空输电线路在线监测覆冰力学计算模型[J].中国电机工程学报,2010,30(19):100-105.
- [9] 许家浩,郑伟,黄宵宁,等.微气象条件下输电线路导线覆冰预测模型[J].中国电力,2014,47(2):58-63.
- [10] 黄帅,郭新春.输电线路微气象研究综述[J].电力勘测设计,2019(S1):112-116.
- [11] 周洪,谷树忠,姚予龙.区域资源承载力的测算与规制——以贵州省毕节市为例[J].中国农业资源与区划,2013,34(1):58-64.
- [12] 吴建蓉,张迅,方阳,等.贵州地区导线覆冰关键影响因素研究[J].科技风,2021(3):193-194.
- [13] 倪星航.基于规则格网DEM提取地形特征线的方法研究[D].成都:西南交通大学,2008.
- [14] MINÁR J, EVANS I S. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping[J]. Geomorphology, 2008, 95(3-4): 236-259.
- [15] 郭新春,吴国强.基于GIS的微地形因子识别与提取[J].电力勘测设计,2019(S1):207-209.
- [16] 刘学军,周启鸣.数字地形分析[M].北京:科学出版社,2006.
- [17] 张宏鸣,刘雯,韩文霆,等.基于梯度提升树算法的夏玉米叶面积指数反演[J].农业机械学报,2019,50(5):258-266.

### 作者简介

吴建蓉(1986—),女,硕士,高级工程师,从事输电方面的研究。

(收稿日期:2023-02-13)