

基于关联规则和证据理论的输电线路水土流失 地质灾害风险评估

白剑锋^{1,2}, 高峰^{1,2}, 吴振^{1,2}

(1.长沙电力职业技术学院, 湖南长沙 410131; 2.国网湖南省电力有限公司
技术技能培训中心, 湖南长沙 410131)

摘要: 为了及时发现输电线路潜在的地质灾害隐患, 提出了架空输电线路水土流失地质灾害风险评估方法。首先, 结合架空输电线路环境特征、气象数据和巡线相关数据, 利用关联规则量化环境特征与水土流失灾害的关联关系, 基于证据理论以坡度、坡向、坡位、海拔等特征因子为证据体计算水土流失灾害基本信度; 然后, 结合雨温联合致灾风险概率分布函数, 构建了架空线路水土流失灾害风险概率计算模型。以某 500 kV 线路为例, 分析了该评估模型的详细计算流程, 划分了输电线路水土流失灾害风险等级, 提出了差异化的地质灾害风险防范措施。该方法能有效评估架空输电线路的水土流失灾害风险, 为线路的智能化运维管理提供理论支持。

关键词: 水土流失; 架空输电线路; 地质灾害; 风险评估

中图分类号: TM 726 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)01-0015-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240103

Geological Hazard Risk Assessment of Soil and Water Loss for Transmission Lines Based on Association Rules and Evidence Theory

BAI Jianfeng^{1,2}, GAO Feng^{1,2}, WU Zhen^{1,2}

(1. Changsha Electric Power Technical College, Changsha 410131, Hunan, China; 2. State Grid
Hunan Technical Skills Training Center, Changsha 410131, Hunan, China)

Abstract: In order to promptly identify potential geological hazards of transmission lines, a method to assess the risk of soil erosion disasters on overhead transmission lines is proposed. Combined with the environmental characteristics, meteorological data and patrol related data of overhead transmission lines, the correlation between environmental characteristics and soil erosion disasters is quantified by association rules. Based on evidence theory, the basic reliability of soil erosion disasters is calculated using characteristic factors such as slope, aspect, position and altitude as evidence bodies. A probability calculation model for soil erosion disaster risk of overhead lines is constructed using the joint probability distribution function of rain and temperature disaster risk. Taking a 500 kV transmission line for example, the detailed calculation process of the evaluation model is analyzed, the risk levels of soil erosion disasters for the transmission line are divided, and the differentiated geological disaster risk prevention measures are proposed. This proposed method can effectively evaluate the risk of soil erosion disasters for overhead transmission lines, and provide theoretical support for the intelligent operation and maintenance management of the lines.

Key words: soil and water loss; overhead transmission line; geological hazards; risk assessment

0 引言

随着中国经济的快速发展, 电网可靠性要求逐

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(21C1551); 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216AP230001)

步提高, 架空输电线路作为电力网络中的“生命线”, 承受着高温、暴雨等的影响, 容易发生水土流失地质灾害^[1]。输电线路水土流失是指杆塔基础在水力、重力等作用下, 水土资源的破坏和损失, 包括基础附近的土地表层侵蚀和水土损失等。相关数据表明, 输电线路水土流失是最为常见的地质隐患,

一旦任其发展将会形成滑坡、泥石流等灾害,造成巨大的经济损失,产生严重的社会负面影响^[2]。为了及时发现输电线路地质灾害隐患,做到防患于未然,电网公司每年都会通过无人机巡线、人工巡线、卫星灾害数据分析等开展输电线路沿线的水土流失地质灾害隐患点排查工作,存在着工作基数大、覆盖面广、历时长、效率低、巡线难等难题^[3]。

目前对于输电线路水土流失的地质灾害风险评估,主要集中在巡线、数据分析、在线监测等方面。在巡线评估上,文献[4]以沿线涉及黄土丘陵地貌、山地地貌和平原地貌的±800 kV 特高压输电线路工程为例,通过野外调查和测钎法监测水土流失,对其水土流失特征、强度及其治理体系进行探讨;文献[5]采用资料收集分析与工程现场查勘相结合的方法,探讨输电线路工程水土流失特征及其影响因子的关系。在数据分析上,文献[6]通过采集遥感影像,计算植被指数、坡度因子、水体指数、裸土指数等水土流失影响因子,构建了基于 ArcGIS 的水土流失动态分析模型;文献[7]以湖泊水文网格分析模型为基础,利用支持向量机(support vector machine, SVM)方法构建水土流失预测模型;文献[8]结合几何图元法、纹理可视化方法,进行区域水土流失特征的遥感特征检测和区域信息重组,提取地理矢量场复合信息熵,通过遥感影像图像分析,实现区域水土流失特征识别。在在线监测上,文献[9]通过水土流失动态监测数据及监测站点长时序观测数据,分析了水土流失的时空变化特征,构建了基于 RUSLE 模型的水土流失定量评价方法;文献[10]提出了一种以气象站监测数据为基础的输电线路水土流失监测方法,并实际应用于陕西—湖北±800 kV 特高压直流输电工程,效果显著。

有鉴于此,下面结合电网公司积累的输电线路基本台账数据、水土流失地质灾害记录、输电线路所处的微地形及气象数据等,采用关联分析方法获取地质灾害风险因子值,并结合数据融合方法有效融合各个关联因子来评估输电线路的水土流失风险,为输电线路水土流失地质灾害隐患的排查提供参考。

1 理论基础

1.1 水土流失与特征因子的关联规则量化方法

相关研究表明输电线路水土流失主要与地势、

地貌等因素相关。所提方法评估分析海拔高度、坡度、坡向、坡位、河网密度、下垫面类型、地表类型、河网密度等相关因素的影响,采用关联规则量化不同因素与输电线路水土流失风险的关联关系。

关联规则量化是为了寻找不同事务项集之间的关联关系,常用支持度和置信度来表示,支持度越小,偶然性越大;置信度越大,依赖度越大。这里采用置信度来量化不同特征因子与输电线路水土流失地质灾害的关联关系,置信度越高即该属性特征的杆塔单元发生水土流失的可能性越高。

记 U 为关联规则的前项,表示线路杆塔单元的属性特征; V 为关联规则的后项,表示线路杆塔单元是否发生水土流失,1 为是,0 为否。先计算事务 $U_{j,k} \rightarrow V_1$ 的支持度,计为 $S(U_{j,k} \rightarrow V_1)$,表示第 j 个特征因子的第 k 类别或区间属性特征对此类杆塔单元发生水土流失灾害的支持度^[11-12]。

$$S(U_{j,k} \rightarrow V_1) = \frac{\sigma(U_{j,k} \cup V_1)}{|T|} \times 100\% \quad (1)$$

用 $g_{j,k}$ 表示第 j 个特征因子的第 k 类别或区间属性特征与地质灾害事故的关联关系,用置信度来表示即有^[11-13]

$$\begin{cases} C(U_{j,k} \rightarrow V_1) = \frac{S(U_{j,k} \rightarrow V_1)}{S(U_{j,k})} = \frac{\sigma(U_{j,k} \cup V_1) / |T|}{\sigma(U_{j,k}) / |T|} \\ g_{j,k} = C(U_{j,k} \rightarrow V_1) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\sigma(U_{j,k})$ 为第 j 个因子第 k 类别或区间的总杆塔单元数量; $\sigma(U_{j,k} \cup V_1)$ 为第 j 个因子第 k 类别或区间发生过地质灾害事故的总杆塔单元数量; $C(U_{j,k} \rightarrow V_1)$ 表示地质灾害事故杆塔单元落在相应特征属性(第 j 个特征因子第 k 类别)区内的概率。

1.2 水土流失灾害风险确信度

1) 水土流失基本信度分配函数的确定

在复杂的环境下,输电线路的水土流失影响因素相对较多,且在评估的过程中所采集的数据具有不确定性、精确性不足、信息不完备等问题。证据理论是一种不确定性推理的数学方法。通过引入信任函数,对各指标下不同目标的信息进行融合,从而有效地判别不确定性、不完全及主观不确定信息的各类问题^[14-17]。

对于待评估电网拥有 m 基输电杆塔单元,那么可知识别框架集合为 $\Theta = \{T^1, T^2 \dots T^m\}$,基本

信度分配函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 满足 $m(\emptyset) = 0$ 且 $\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1$ 。若 m_j 表示以第 j 特征因子为证据体的基本信度分配函数, 那么 $m_j(T^i)$ 表示在第 j 个特征因子为证据体下, T^i 杆塔单元发生水土流失地质灾害的基本信度。 $m_j(T^i)$ 计算方法如下:

①若第 i 个杆塔单元处于第 j 个特征因子的第 k 类别或区间, 其发生水土流失地质灾害风险的可能性表示为 $g_{j,k}^i = g_{j,k}$, 简记作 g_j^i 。那么可得 n 个特征因子指标、 m 基杆塔的架空线路地质灾害风险关联矩阵为 $G = (g_j^i)_{m \times n}$, 归一化为

$$Y = (y_j^i)_{m \times n} = (g_j^i / \sum_{i=1}^m g_j^i)_{m \times n} \quad (3)$$

②在第 j 个特征因子为证据体下, T^i 杆塔单元发生地质灾害风险的基本信度值 $m_j(T^i)$ 计算公式^[16]为

$$\begin{cases} D_{oi}(u_j) = \frac{1}{m} \left| \sum_{i=1}^m (y_j^i)^q \right|^{1/q} \\ m_j(T^i) = [1 - D_{oi}(u_j)] \cdot y_j^i \end{cases} \quad (4)$$

式中, $D_{oi}(u_j)$ 为指标 j 下的 q 阶不确定信度, 一般取 $q=2$ 。

若以 T^Θ 表征整个计算中的不确定性, 那么表征以第 j 个特征因子为证据体的基本信度值 $m_j(T^\Theta)$, 表示为不能辨识哪一个杆塔单元发生水土流失地质灾害, 其计算公式为

$$m_j(T^\Theta) = 1 - \sum_{i=1}^m m_j^i \quad (5)$$

③通过上述分析可得, 对于待评估电网若有 m 基输电杆塔、 n 个特征指标, 可得基本信度矩阵为

$$T_{m \times n} = \begin{bmatrix} m_1(T^1) & m_2(T^1) & \cdots & m_j(T^1) & \cdots & m_n(T^1) \\ m_1(T^2) & m_2(T^2) & \cdots & m_j(T^2) & \cdots & m_n(T^2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_1(T^i) & m_2(T^i) & \cdots & m_j(T^i) & \cdots & m_n(T^i) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_1(T^m) & m_2(T^m) & \cdots & m_j(T^m) & \cdots & m_n(T^m) \end{bmatrix} \quad (6)$$

2) 孕灾环境基本信度分配函数的融合

在证据理论体系中, 以坡度、坡向、坡位、海拔等特征因子为证据体, 以各个杆塔单元作为识别体, 通过 Dempster 合成规则, 依据证据体的基本信度分配函数即可计算在该证据体下各杆塔单元发生水土流失地质灾害的确信度^[17-21]。若以信任函数 $B_{ei}(T^i)$

表示确信第 i 杆塔单元发生水土流失地质灾害的最小值, 即为 T^i 发生地质灾害事故的确信度, 则在同一个识别框架之下, 利用多个特征因子的基本信度分配函数 $m_1, m_2, \dots, m_j, \dots, m_n$, 采用 Dempster 合成规则即可融合成 $B_{ei}(T^i)$, 其计算式^[20-21]为

$$B_{ei}(T^i) = (m_1 \oplus m_2 \oplus \cdots m_j \cdots \oplus m_n)(T^i) = \frac{\sum_{T_1 \cap T_2 \cap \cdots \cap T_n = T^i} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2) \cdots m_j(T_j) \cdots m_n(T_n)}{\sum_{T_1 \cap T_2 \cap \cdots \cap T_n \neq \emptyset} m_1(T_1) \cdot m_2(T_2) \cdots m_j(T_j) \cdots m_n(T_n)} \quad (7)$$

式中: T_j 为焦元, 有 $\forall T_j \subseteq \Theta$ 成立, 表示在以第 j 个特征因子为证据体下, T_j 可以是识别框架幂集 $(A_1, A_2 \cdots A_n, h=2^m)$ 中的任意一个; 若 $T_j = \{T^1, T^2\}$, 那么有 $m_j(T_j) = m_j(T^1) + m_j(T^2)$ 成立。式(7)满足 $B_{ei}(T^1) + B_{ei}(T^2) + \cdots B_{ei}(T^i) \cdots + B_{ei}(T^m) + B_{ei}(T^\Theta) = 1$, 其中 $B_{ei}(T^\Theta)$ 反映整个计算中的不确定性程度。

1.3 致灾风险的雨温联合概率分布函数

输电线路地质灾害的发生与所处地区的微气象关系密切, 其中降水量和温度是影响地质灾害发生的强关联因素, 因此通过风雨联合分布规律, 才能反映地质灾害发生的时空关联特征。假定杆塔所处地区最近微气象站月累积降水量为 R_a (单位: mm), 月平均气温为 T_{em} (单位: $^\circ\text{C}$)。参考式(2)的计算, 可以得到不同属性下的置信度, 分别计为 $f_s(R_a)$, $f_w(T_{em})$ 。那么第 i 个杆塔基础在该环境下的地质灾害风险雨温联合概率为 $F_i(R_a, T_{em})$, 计算式为

$$F_i(R_a, T_{em}) = 1 - [1 - f_s(R_a)] \times [1 - f_w(T_{em})] \quad (8)$$

式中: $f_s(R_a)$ 表示在降水量为 R_a 所在属性段的地质灾害风险发生置信度; $f_w(T_{em})$ 表示在气温为 T_{em} 所在属性段的地质灾害风险发生置信度。

1.4 地质灾害风险值的映射关系

通过上述理论推导, 若一个电网识别框架由 m 个杆塔单元组成, 证据体由 n 个特征因子组成, 那么可以计算得到 $B_{ei}(T^1), B_{ei}(T^2) \cdots B_{ei}(T^i) \cdots B_{ei}(T^m), B_{ei}(T^\Theta)$ 共计 $m+1$ 个地质灾害孕灾风险确信值, 以及处在特定降水量和气温下的 $F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_m$ 共计 m 个地质灾害风险发生概率。

若在该电网中存在一回架空输电线有 M 个计算杆塔单元, 以月为单位每个杆塔基础每年有 12 个

地质灾害风险发生概率值。假定每月每个杆塔从基础发生地质灾害风险的概率为 P_i (单位:次/月),而从上述分析可知 $B_{ei}(T^i)$ 表示地质灾害的确信值,其值越大,地质灾害事故率越大。 $F_i(R_a, T_{em})$ 为地质灾害风险雨温联合发生概率,其值越大,地质灾害事故率越大。则近似认为 P_i 与 $B_{ei}(T^i)$ 、 $F_i(R_a, T_{em})$ 符合一次函数关系, P_i 与孕灾环境的确信度和地质灾害风险雨温联合发生概率计算式为

$$P_i = K \cdot B_{ei}(T_i) \cdot F_i(R_a, T_{em}) + C \quad (9)$$

式中: K 为概率修正系数; C 为概率修正常数, 两者的计算方法可以参考文献[11]附录部分。

2 架空线路地质灾害风险的划分

根据架空线路地质灾害发生的可能性将其划分为 5 个等级。利用式(9), 可计算得到每一个杆塔基础发生水土流失地质灾害的风险, 其含义为该输电杆塔基础在评估月份出现地质灾害隐患风险的概率。若 P_a 为所有架空输电线路发生水土流失地质灾害风险的平均值, 该值可以通过历史地质灾害隐患数据获得, 其计算式为

$$P_a = \frac{N_Y}{12 \cdot Y} \quad (10)$$

式中, N_Y 为 Y 年累积发现的架空线路地质灾害风险次数。

这里采用架空线路地质灾害发生概率来表征地质灾害风险等级, 由于划分定级标准与相应样本总量和具体风险状况相关, 参考文献[22]的风险分级方法, 确定水土流失风险分级, 如表 1 所示。结合输电线路水土流失地质灾害风险等级, 即可采取对应的防范措施。

3 架空线路地质灾害风险评估流程

架空输电线路地质灾害风险评估流程如图 1 所示, 主要包括获取评测数据、量化关联规则、构建水土流失地质灾害关联度矩阵、计算水土流失地质灾害风险确信度、计算水土流失地质灾害风险雨温联合概率、计算水土流失地质灾害风险发生概率、确定线路水土流失地质灾害等级共 7 个步骤。

1) 获取待评估电网的地理环境特征数据和气

表 1 架空线路地质灾害风险定级

判定方法	灾害风险 (10 ⁴ 次/月)	风险等级	风险含义	防范措施
$P_i > 1.5P_a$	[6.78, ∞)	I	出现地质灾害隐患风险极高	加强巡视, 密切关注, 做好启动相应地质灾害风险防范的措施
$P_a < P_i < 1.5P_a$	[4.52, 6.78)	II	出现地质灾害隐患风险较高	注意关注, 必要时开展线路巡视工作
$0.75P_a < P_i < P_a$	[3.39, 4.52)	III	出现地质灾害隐患风险一般	正常开展架空线路巡视时, 需注意地质灾害情况
$0.5P_a < P_i < 0.75P_a$	[2.26, 3.39)	IV	出现地质灾害隐患风险较低	按照正常线路巡视工作进行
$P_i < 0.5P_a$	[0, 2.26)	V	出现地质灾害隐患可能极低	无

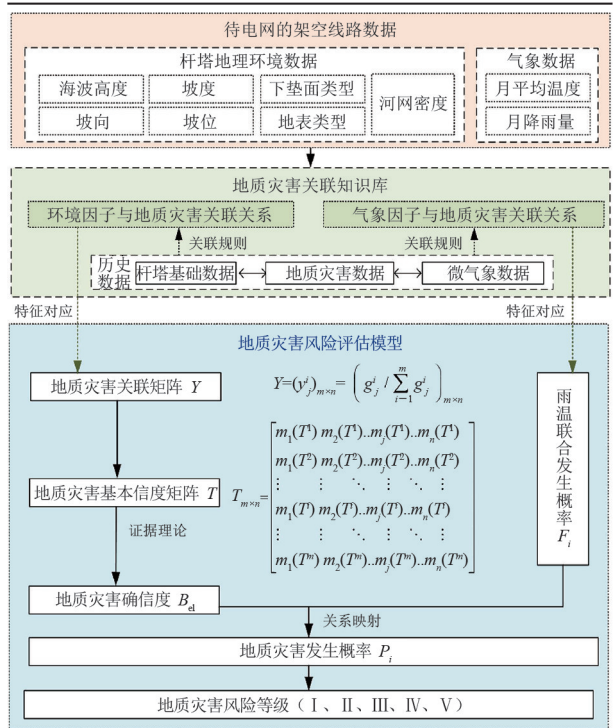


图 1 地质灾害风险评估流程

象环境数据, 地理环境特征数据主要包含海拔高度、坡度、坡向、坡位、下垫面类型、地表类型和河网密度数据; 气象环境数据主要是月度平均气温、月度降雨量。

2) 通过架空输电线路历史地质灾害风险数据的关联性分析, 以置信度作为关联规则, 利用式(2) 量化线路所处环境的特征因子和气象特征因子与输电线路水土流失地质灾害的关联关系, 构建由置信

度组成的关联规则量化表。

3) 结合输电线路的环境特征,依据关联规则量化表获取特征属性对应的置信度,得到不同杆塔单元的各特征因子水土流失地质灾害关联度值,构建水土流失地质灾害关联度矩阵 $G = (g_j^i)_{m \times n}$,结合式(3)即可得到架空输电线路地质灾害风险关联矩阵为 $Y = (y_j^i)_{m \times n}$ 。

4) 通过证据理论融合以不同特征因子为证据体的基本信度分配值,利用式(4)计算各级杆塔单元的水土流失地质灾害风险确信度 $T_{m \times n}$ 。采用 Dempster 合成规则,结合式(7)即可计算在该证据体下各杆塔单元发生水土流失地质灾害的确信度 $B_{cl}(T^i)$ 。

5) 依据式(8),结合月累积降水量和平均气温,即可得到水土流失地质灾害风险雨温联合概率 F_i 。

6) 依据式(9),利用水土流失地质灾害风险雨温联合概率和风险确信度,结合映射关系即可得到水土流失地质灾害风险发生概率 P_i 。

7) 依据架空线路地质灾害风险定级方法,将线路地质灾害风险划分为 5 级,结合计算所得水土流失地质灾害风险值,确定线路水土流失地质灾害等级,从而采取相应的防范措施。

4 实例分析

4.1 水土流失地质灾害关联规则量化

1) 研究样本分析

以某电网的 500 kV CMJ 线为研究对象,该线于 2013 年投产,沿线经过山地、丘陵等地区,共有输电铁塔 138 基,总长度为 63.9 km。主要数据包含地质灾害线路、相应杆塔编号、电压等级、巡线时间、查线情况等信息。地理环境参数主要包含河网密度、坡度、坡位、海拔高度、坡向、下垫面类型、地表类型 7 项数据。气象信息主要包含降雨量、温度等信息。

2) 关联规则量化

通过该地区架空输电线路历史地质灾害风险数据的关联性分析,以置信度作为关联规则,利用式(2)量化线路所处环境的特征因子和气象特征因子与线路地质灾害事故的关联关系,即可构建由置信度组成的关联规则量化表^[23],如表2所示。在实

表 2 水土流失地质灾害关联规则量化

特征因子	特征属性	置信度/%
海拔高度 H/m	≤ 0	0.407
	$0 < H \leq 50$	0.143
	$50 < H \leq 100$	2.885
	$100 < H \leq 150$	7.433
	$150 < H \leq 200$	6.202
	$200 < H \leq 250$	8.032
坡度 $\theta/(^\circ)$	$H > 250$	4.598
	$0 < \theta \leq 5$	0.434
	$5 < \theta \leq 10$	3.533
	$10 < \theta \leq 15$	4.108
	$15 < \theta \leq 20$	3.531
	$20 < \theta \leq 25$	2.128
坡向	$\theta > 25$	1.087
	正北	1.739
	东北	2.481
	正东	3.953
	东南	6.934
	正南	6.723
	西南	3.254
	正西	1.916
坡位	西北	1.447
	平地	0.434
	山脊	1.425
	山上	1.917
	山腰	1.469
	平地	0.794
下垫面 类型	山下	0.775
	水稻土、湖泊	0.130
	赤红壤	2.613
	红壤、滨海盐土	0.645
	潮土、滨海风沙土	1.591
	石灰土	0
地表 类型	石质土	0
	水田	1.546
	旱地	3.955
	有林地	0.943
	灌木林	0.990
	疏林地	1.639
	其他林地	0.283
	高覆盖度草地	2.548
	河渠	1.212
	水库坑塘	0.602
	城镇用地	0.159
河网密度 ρ	农村居民点	0.587
	其他建设用地	1.172
	$0 \leq \rho < 0.2$	1.209
	$0.2 \leq \rho < 0.4$	1.171
	$0.4 \leq \rho < 0.6$	0.714
	$0.6 \leq \rho < 0.8$	0.571
	$\rho \geq 0.8$	0

际运用中连续特征因子的属性划分方式等将会一定程度地影响置信度的分布,可能带来难以解释的情况,但随着样本数量的累积,相信置信度的分布将会更加趋向于实际。

4.2 水土流失地质灾害风险评估流程

1) 水土流失地质灾害关联度矩阵

结合输电线路的环境特征,依据关联规则量化表获取特征属性对应的置信度,得到不同杆塔单元的各特征因子的水土流失地质灾害关联度值,构建水土流失地质灾害关联度矩阵。结合电网架空输电线路所有的杆塔计算单元,以杆塔单元属性特征匹配关联规则量化表即可得到水土流失灾害风险的关联度矩阵 G 。结合式(3)即可得到归一化的矩阵 Y 。

2) 水土流失地质灾害风险确信度

利用式(4)、式(5)和式(6)确定各杆塔基础在以 7 个特征因子为证据体下的地质灾害风险基本信度分配值,可得到水土流失地质灾害基本概率分配信度值矩阵 T 。通过证据理论融合以不同特征因子为证据体的基本信度分配值,利用式(7)计算各级杆塔单元的水土流失地质灾害风险确信度。

3) 雨温联合概率分布

基于 500 kV CMJ 线各基杆塔所处位置的经纬度,判别其与微气象站的位置关系,选择距离最近的气象站作为杆塔基础的微气象数据(月累积降水量为 R_a ,月平均气温为 T_{em})。通过特征对应,结合式(8)得到每个杆塔基础的地质灾害风险雨温联合发生概率 $F_i(R_a, T_{em})$ 。

4) 地质灾害风险值的映射关系

待评估线路 500 kV CMJ 线共有 138 个计算杆塔单元,结合式(9)即可得到地质灾害风险的概率位 P_i ,通过历史数据计算得到 $K=68.3$ 、 $C=0.000\ 012$ 。结合表 1 即可得到架空线路地质灾害风险等级。

4.3 评估结果的运用

以 2021 年 7 月的气象数据为例,可以得到 500 kV CMJ 线 7 月份历史地质灾害发生概率,如图 2 所示。由图可知 500 kV CMJ 线 7 月份水土流失风险主要集中在 15~20 号、57~60 号、68~75 号、82 号、112~118 号等杆塔。其中 82 号杆塔风险值最大为 0.009 75,属于 I 级风险区,出现地质灾害隐患风险极高,应该加强巡视,密切关注,做好启动相应地质灾害风险防范措施的准备。

图 3 为 500 kV CMJ 线水土流失发生概率的时空分布。结合图 3 可知输电线路杆塔 21~41 号、83~111 号属于水土流失的低风险区(V 级),全年

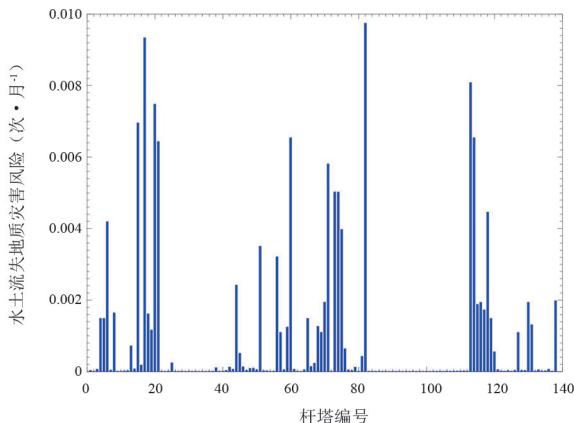


图 2 500 kV CMJ 线 7 月份地质灾害发生概率分布

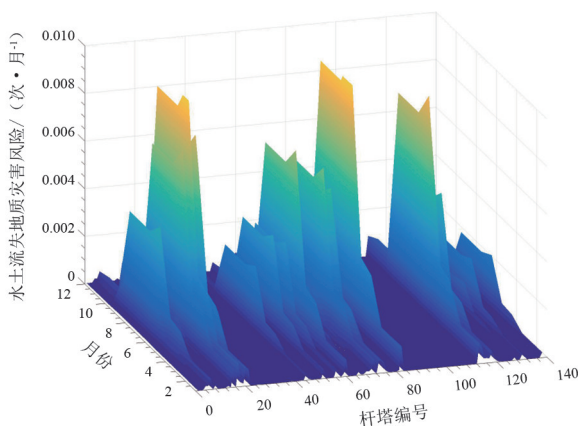


图 3 500 kV CMJ 线水土流失时空分布概率

该区域出现水土流失隐患的可能性极低;输电线路杆塔 16~21 号、56~61 号、70~75 号、82 号、113~120 号等,在 6~10 月份发生水土流失的可能性最大,属于极高风险区(I 级)。因此在这段时间内要重点加强对该处线路的水土流失风险防控,加强巡视管理,做好杆塔基础护坡的防护工作。

对于水土流失高风险区的输电线路基础,如果是属于土壤疏松易于流失土质的类型,可以采用混凝土加固坡面、增加植被等方式;对于降雨流量大的输电线路基础,可以依照坡面降雨产汇流过程和原理,合理设计排水沟。

5 结语

水土流失是输电线路常见的地质灾害,为了实现输电线路水土流失地质灾害风险评估,上面结合输电线路水土流失历史数据、环境特征数据、气象数据等开展了输电线路水土流失地质灾害风险评估研究,具体结论如下:

1)提出了输电线路水土流失地质灾害风险评估模型。该模型以置信度量水土流失与环境特征因子的关联关系,采用证据理论融合不同特征因子为证据体的基本信度值,结合雨温联合发生概率函数,通过映射函数关系得到水土流失发生概率,并以风险定级表划分水土流失风险。

2)确立了输电线路水土流失地质灾害风险评估流程。该流程主要分为获取评测数据、量化关联规则、构建水土流失地质灾害关联度矩阵、计算水土流失地质灾害风险确信度、计算水土流失地质灾害风险雨温联合概率、计算水土流失地质灾害风险发生概率、确定线路水土流失地质灾害等级共7部分。

3)以500 kV CMJ线为例详细分析了输电线路水土流失地质灾害风险评估流程,划分了灾害风险等级,说明了水土流失评估结果的具体运用。该方法能够有效开展输电线路水土流失灾害风险评估,为输电线路的差异化运检提供理论参考。

参考文献

- [1] 白剑锋. 基于大数据分析的输电线路状态评估和故障预测研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [2] 黄伟. 三峡库区输电线路地质灾害处置技术研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2018.
- [3] 刘书豪. 降雨条件下的输电线路滑坡风险评估与预警技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
- [4] 潘明九, 丰佳, 王文龙, 等. 陕北—湖北±800 kV 输电线路工程水土流失特征及其综合治理[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 206–212.
- [5] 冯华, 王文龙, 丰佳, 等. 长距离输变电线路水土流失特征及其影响因素: 以新疆山丘区为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(S2): 440–445.
- [6] 连燕. 基于 ArcGIS 的河道水土流失动态监测方法[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(9): 94–99.
- [7] 王霄, 齐春舫, 王亚妮, 等. 基于水动力模型数据样本的水土流失预测分析[J]. 人民黄河, 2022, 44(S1): 75–76.
- [8] 崔萌. 基于遥感影像的区域水土流失特征识别模型[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(6): 69–73.
- [9] 田培, 王哲, 喻海军, 等. 鄂西北山丘区水土流失时空格局及影响因子定量评价[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 76–85.
- [10] 雷磊, 王良, 吴健, 等. 基于气象站监测数据的特高压输变电工程水土流失监测[J]. 技术与市场, 2022, 29(6): 1–6.

- [11] 谢从珍, 白剑锋, 王红斌, 等. 基于多维关联信息融合的架空输电线路雷害风险评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6233–6244.
- [12] 严英杰, 盛戈皞, 陈玉峰, 等. 基于关联规则和主成分分析的输电线路状态评价关键参数体系构建[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2308–2314.
- [13] 胡军, 尹立群, 李振, 等. 基于大数据挖掘技术的输变电设备故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3690–3697.
- [14] 杨飞, 白冰, 郭磊, 等. 基于证据理论的混凝土桥梁耐久性状况评定方法[J]. 公路交通科技, 2022, 39(11): 76–83.
- [15] 徐德一, 王潇, 赵兴华, 等. 基于证据理论的航空发动机状态评估[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2022, 39(4): 60–68.
- [16] 李特, 冯琦, 张堃. 基于熵权灰色关联和 D-S 证据理论的威胁评估[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(2): 380–382.
- [17] 徐卫亚, 胡业凡, 吴伟伟, 等. 基于云模型和 D-S 证据理论的多源信息融合滑坡安全性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 59–66.
- [18] 张宽, 吐松江·卡日, 高文胜, 等. 基于云模型和改进 D-S 证据理论的变压器故障诊断[J]. 高压电器, 2022, 58(4): 196–204.
- [19] 魏曙寰, 曾强, 陈砚桥. 基于 AHP/D-S 证据理论的贝叶斯网络参数学习方法[J]. 海军工程大学学报, 2021, 33(6): 19–24.
- [20] 洪天炘, 刘宇舜, 严波, 等. 基于改进 Dempster-Shafer 证据理论的输电线路等值覆冰厚度计算方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(8): 126–130.
- [21] 袁存波, 田亮. 基于改进证据理论的中速磨煤机故障诊断[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(6): 84–91.
- [22] 王一枫, 汤伟, 刘路登, 等. 电网运行风险评估与定级体系的构建及应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 141–148.
- [23] 白剑锋. 基于大数据分析的输电线路地质灾害风险评估研究[R]. 湖南: 国网湖南省电力有限公司技术技能培训中心, 2022.

作者简介:

白剑锋(1992),男,硕士研究生,讲师,主要研究输变电设备状态评估和故障预测。

(收稿日期:2023-09-27)