

基于加权信息量和 GIS 方法的二郎山—折多山 输电工程地质灾害易发性评价

范荣全¹, 唐 杨¹, 田 峰², 文兴志³, 周先平³, 殷立浩³, 向 军³

(1. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041; 2. 地质灾害防治与地质环境保护
国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 3. 国网四川省电力公司
甘孜供电公司, 四川 康定 626000)

摘要:西部地区输变电工程面临频繁的地震活动、崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的威胁,开展输变电工程地质灾害易发性评价,对西部山区输变电通道及站址的选择、地质灾害的监测与防控具有重要的理论与工程实际意义。以二郎山—折多山输电走廊沿线为研究区,基于遥感解译和地质灾害调查方法,在地质灾害发育特征研究基础上,从气象水文、地形地貌、岩土类型及构造等方面选取评价因子,采用皮尔逊相关系数法、CRITIC 权重法、独立性权系数法构建了加权信息量模型。基于 ArcGIS 技术结合加权信息量法对二郎山—折多山输电工程地质灾害易发性进行评价,并采用 ROC 曲线和 AUC 值对所构建模型效果进行了验证,其 AUC 值为 0.816 5,表明所建模型评价精度较高。

关键词:地质灾害; 输变电工程; 易发性评价; 信息量模型

中图分类号: P 694 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)04-0078-09

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240412

Geological Hazard Susceptibility Evaluation for Erlang Mountain– Zheduo Mountain Transmission Project Based on Weighted Information Value and GIS Method

FAN Rongquan¹, TANG Yang¹, TIAN Feng², WEN Xingzhi³, ZHOU Xianping³, YIN Lihao³, XIANG Jun³

(1. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Key
Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection (Chengdu University
of Technology), Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. State Grid Ganzi Electric Power
Supply Company, Kangding 626000, Sichuan, China)

Abstract: Transmission and transportation projects in western China face the threat of frequent seismic activities and geological hazards, and it is of great theoretical and engineering practical significance to carry out the susceptibility evaluation of geological hazards for transmission and transportation projects to select transmission and transportation channels and substation sites, and monitor, prevent and control geological hazards in the western mountainous areas. Based on remote sensing interpretation and geological hazard survey methods, and taking the areas along the transmission corridor from Erlang Mountain to Zheduo Mountain as the study area, the evaluation factors are selected from meteorology and hydrology, topographic features, lithology type and formation etc. based on the feature development researches of geological hazards, and a weighted information value model is constructed using Pearson correlation coefficient method, CRITIC weighting method and independence weighting coefficient method. The susceptibility evaluation of geological hazards for transmission projects from Erlang Mountain to Zheduo Mountain is carried out based on ArcGIS technology combined with weighted information value method. The DJIV model is verified by ROC curve and AUC value, and its AUC value is 0.816 5, which indicates that the DJIV model has high evaluation accuracy.

Key words: geological hazards; transmission and transportation project; susceptibility evaluation; information volume model

0 引言

在输变电工程建设前,必须研究工程区的地质环境条件,分析自然地理、地质环境条件对输变电工程的影响程度,选择优良的工程建设场址,并对可能发生的灾害采取相关的防治措施,以避免对输变电工程在施工及运营期造成危害。国内对输变电工程中的受灾影响研究多以气象灾害为主,而对输变电工程的地质环境、地质灾害研究较少。文献[1]根据统计表明输变电系统中75%的事故由地质灾害和气象灾害所造成,其中滑坡是输变电系统中最常见的地质灾害类型。文献[2]根据调查,得出川藏联网工程线路上的地质灾害类型主要有崩塌、滑坡、泥石流及不稳定斜坡等,并对其影响进行了评价。文献[3]通过航空遥感、无人机航测、岩体结构分析工具等对山区输变电工程中发生的崩塌地质灾害进行了识别与预测。文献[4]对川藏联网工程中大型地质灾害进行了识别解译,共解译出地质灾害点共计101处,其中滑坡70处、崩塌12处、泥石流19处。开展输变电通道及站址区地质灾害易发性评价,对西部山区输变电通道及站址的选择、地质灾害的监测与防控具有重要的理论与工程实际意义。

目前,常用的地质灾害易发性评价模型主要有:层次分析模型^[5]、信息量模型^[6]、证据权模型^[7]、逻辑回归模型^[8]及支持向量机模型^[9]等,这些模型总体上可以归纳为统计分析模型、数学模型两大类。其中,信息量模型属于统计分析模型的一种,由于该评价方法物理意义明确、操作简单,在地质灾害易发性评价中有广泛应用。如文献[10]采用基于层次分析法的加权信息量模型进行滑坡易发性分区,结果表明信息量值排名靠前的评价因子不一定起主导作用。文献[11]以川藏交通廊道为研究区,采用逻辑回归模型和信息量模型进行滑坡易发性分区,结果表明逻辑回归模型不需要预设评价因子的分布,能够很好地拟合各评价因子间的非线性特征。文献[12]基于信息量模型和逻辑回归模型耦合进行地质灾害易发性评价,结果表明采用耦合模型较信息量或逻辑回归单一模型评价结果更合理、精度更高。文献[13]构建了信息量-逻辑回归耦合模型,剔除回归系数显著性值大于0.05的致灾因子,将致灾因子信息量作为自变量代入逻辑回归模型。

文献[14]将信息量模型与随机森林和径向基函数神经网络模型相结合,进行滑坡易发性评价,使得评价准确性和效率提高。

下面以二郎山—折多山输电工程为研究区,结合区内地形地貌等地质条件及灾害发育特点,选取栅格单元作为评价单元^[15]。将皮尔逊相关系数法、CRITIC(criteria importance though intercriteria correlation)权重法、独立性权系数法与传统信息量模型相结合,提出了基于加权信息量模型和叠加法的地质灾害易发性评价,并选用受试者工作特征曲线(receive operating characteristic, ROC)对地质灾害易发性评价模型进行验证,探索适应于输变电工程的地质灾害易发性评价方法。

1 研究区地质条件概况及数据源

1.1 研究区地质条件概况

二郎山—折多山输电走廊线路位于四川甘孜州境内,地处东经 $101^{\circ}4' \sim 102^{\circ}45'$,北纬 $30^{\circ}6' \sim 31^{\circ}43'$,研究区内线路长322.2 km,走廊面积 $1\,961.7\text{ km}^2$,研究区东起折多山脉,沿国道318经康定市、泸定县至二郎山,如图1所示。线路地处青藏高原东南麓,由折多山跨越横断山脉至东缘的二郎山。地貌受区域地质构造控制作用明显,山脊多沿构造线延伸^[16]。研究区主要位于高山峡谷区,地形切割强烈,区内有大渡河、康定河及雅拉河3条河流,沿河谷两岸呈深切峡谷地貌,以深切割的中高山为主,区内海拔最高处为泸定县燕子沟贡嘎山,最高峰海拔达5751 m。

研究区内地层岩性十分复杂,主要分布火山喷出岩以及变质岩:火山喷出岩主要为玄武岩等;变质岩主要为板岩、大理岩、千枚岩、斜长岩。研究区内还分布侵入岩与沉积岩,在河谷两岸发育第四系地层。同时,研究区内河网密布,跨越雅砻江、大渡河水系;沿江分支众多,构成不对称的羽状水系。输电走廊内构造主要呈北西走向,发育有鲜水河断裂、磨西断裂、大渡河断裂、龙门山断裂。研究区内地下水类型主要分为松散岩类孔隙水、基岩裂隙水两大类型。研究区内破坏地质环境的人类工程活动主要有修房筑路、水利设施建设、输变电工程建设等。

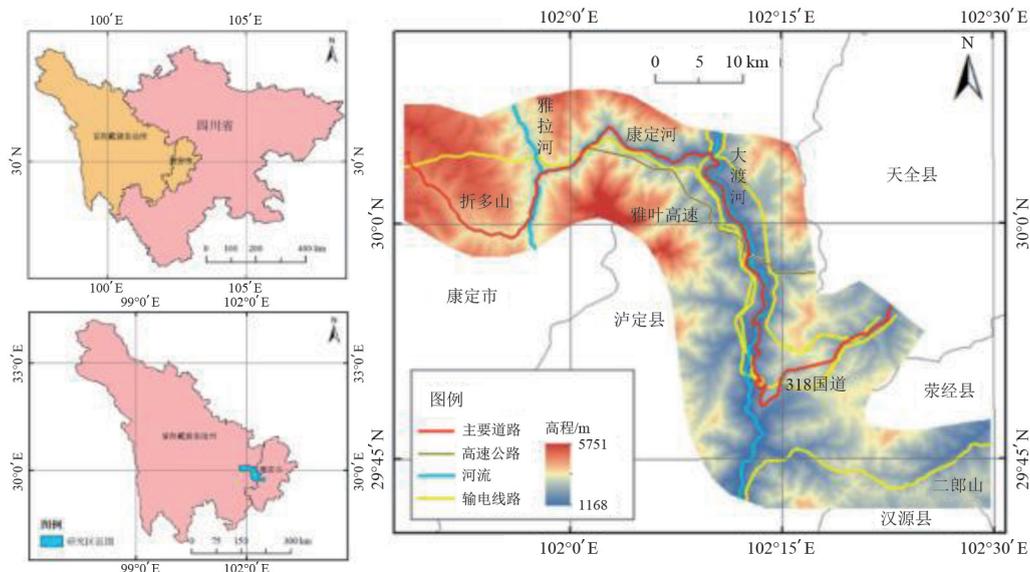


图 1 二郎山—折多山输变电走廊线路分布位置

据二郎山—折多山输电走廊线路地质灾害遥感解译及现场调查,研究区共发育崩塌、滑坡、泥石流地质灾害 149 处,其中:崩塌灾害 42 处,滑坡灾害 61 处,泥石流灾害 46 处;研究区内滑坡灾害最多,占总灾害的 40.94%;崩塌灾害最少,占总灾害的 28.19%。研究区滑坡灾害主要发育于须家河组—白田坝组、平驿铺组—观雾山组、红石崖组—回星哨组等地层中,共发育了 28 处滑坡灾害,占滑坡总数的 45.90%;其岩性以砂岩、粉砂岩夹泥岩、泥灰岩为主,为软硬互层岩组。崩塌灾害主要发育于早元古代酸性岩、古元古代酸性岩、南华纪酸性岩和康定岩群;岩性上以石英闪长岩、花岗岩、斜长角闪岩等坚硬或较坚硬岩为主。研究区内共发育泥石流灾害 46 处,主要分布于康定河及大渡河两侧沟谷流域,以沟谷型泥石流为主,规模上以小型泥石流为主。

1.2 数据源

二郎山—折多山输电走廊沿线地质灾害易发性评价所用的数据源为:

1) 地层岩性数据来源于全国地质资料馆的《川渝(四川、重庆)1:50 万地质图》,用于提取岩土体类型、地质构造信息等。

2) 数字高程模型来源于日本对地观测 ALOS 卫星公开版 12.5 m 分辨率数据。

3) 植被覆盖度来源于国家青藏高原科学数据中心的《川藏交通廊道植被覆盖度(1985—2020)数据集》,采用其中 2015—2020 年 5 年平均数据;土地利用类型来源于 LandCover Viewer 网站,采用 2022 年数据。

4) 年降雨量来源于国家地球系统科学数据中心的《中国 1 km 分辨率年降水量数据集(2001—2020 年)》,采用其中 2001—2020 年平均数据。

5) 地质灾害数据主要来源于项目团队所构建的研究区地质灾害数据库。该数据库系统收集了近年来四川西部各县市地质灾害详细调查的成果,共收录了 20 000 多个地质灾害点的详细信息。因此,输电线路走廊地质灾害数据可直接由数据库提取,并在此基础上,利用高清遥感影像对输电线路走廊开展地质灾害解译,识别隐蔽灾害点,补充输电走廊内的地质灾害信息。

2 研究方法

2.1 评价指标因子的选取

地质灾害的发育受内部因素和外部因素作用控制,是各种地质环境因素相互影响及共同作用的结果。内部因素主要包括地形地貌、地层岩性、地质构造以及水文地质等;外在因素主要包括地形起伏、湿度、降雨以及人类工程活动等。综合研究区内地质地理概况、地质灾害发育类型及规模,从自然地理、地形地貌、地层岩性、地质构造、水文地质、人类工程活动等方面入手,选取了 8 个评价指标因子对二郎山—折多山输电走廊线路地质灾害易发性进行评价,结果如图 2—图 9 所示。

2.1.1 地形地貌

1) 高程

如图 2 所示,研究区 1168~5751 m 的高程区间

分布了 98 处地质灾害, 占总灾害的 65.8%, 其中: 崩塌灾害分布数量较多的高程区间依次为 2600~3200 m、1800~2200 m、1400~1800 m, 共分布 34 处崩塌, 占崩塌总数的 81.0%; 滑坡灾害主要分布于大渡河沿岸及二郎山附近, 滑坡灾害分布数量较多的高程区间依次为 1800~2200 m、1400~1800 m、2200~2600 m, 共分布 51 处滑坡, 占滑坡总数的 83.6%; 泥石流灾害主要分布于康定河及大渡河沿岸的沟口位置, 海拔较低, 泥石流灾害分布数量较多的高程区间依次为 1168~1400 m、1400~1800 m、2200~2600 m, 共分布 37 处泥石流, 占泥石流总数的 80.4%。

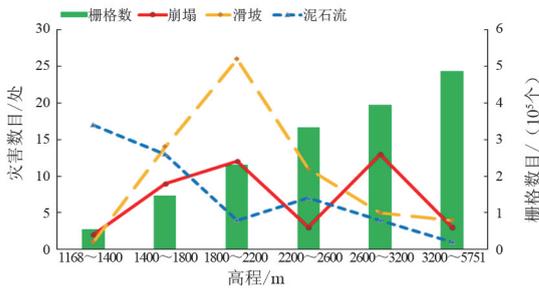


图 2 地质灾害发育与高程关系

2) 坡度

如图 3 所示, 研究区内坡度主要介于 15°~50°, 以 30°~40° 坡度的斜坡最为发育, 属典型的深切峡谷地貌特征。崩塌灾害分布数量较多的坡度区间依次为 40°~50°、30°~40°、50°~81°, 共分布 30 处崩塌, 占崩塌总数的 71.4%; 滑坡灾害分布数量较多的坡度区间依次为 30°~40°、0°~15°, 共分布 40 处滑坡, 占滑坡总数的 65.6%; 泥石流灾害分布数量随坡度增加而递减, 0°~15° 坡度区间, 发育 26 处泥石流, 占泥石流总数的 56.5%。

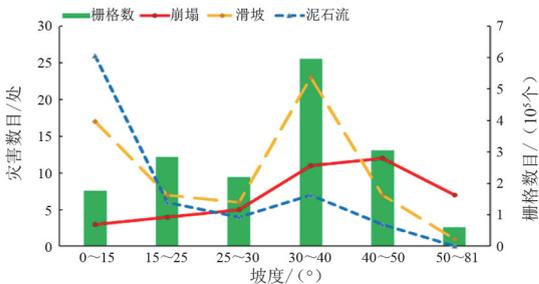


图 3 地质灾害发育与坡度关系

3) 坡向

研究区内坡向基本呈均匀分布, 地质灾害受坡向分布未表现出显著规律。如图 4 所示, 崩塌灾害分布数量较多的坡向区间依次为南东、北西、南西, 共分布 23 处崩塌, 占崩塌总数的 56.1%; 滑坡灾害

分布数量较多的坡向区间依次为南西、东、西, 共分布 31 处滑坡, 占滑坡总数的 50.8%; 泥石流灾害分布数量较多的坡度区间依次为北东、东、西、南西, 共分布 29 处泥石流, 占泥石流总数的 63.0%。

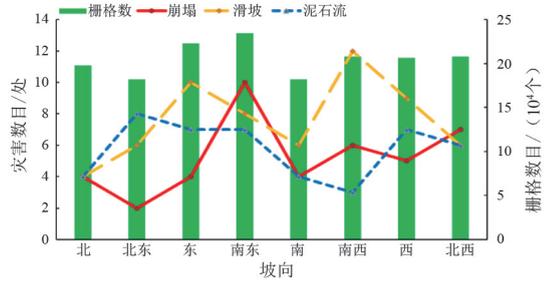


图 4 地质灾害发育与坡向关系

2.1.2 地质构造

采用距离断层直线距离的远近来衡量构造作用对岩土体稳定性的影响程度。如图 5 所示, 研究区距断层距离 1000~3000 m 区间共分布了 46 处地质灾害, 占地质灾害总数的 30.9%; 其次为 3000~9661 m 区间, 分布了 33 处地质灾害, 占地质灾害总数的 22.1%; 其余区间地质灾害基本呈均匀分布。

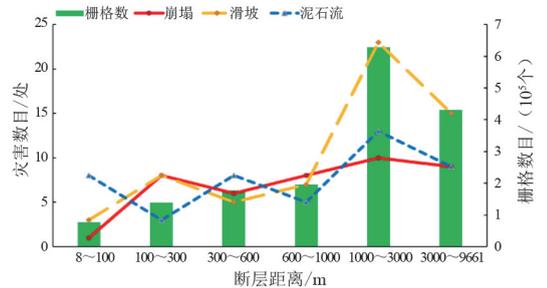


图 5 地质灾害发育与断层距离关系

2.1.3 工程岩组类型

根据地层年代及岩性, 将研究区内的地层分为 4 类: 坚硬岩组、较坚硬岩组、软硬互层岩组、软弱岩组。如图 6 所示, 研究区内坚硬岩组、较坚硬岩组、软硬互层岩组、软弱岩组的栅格数比例分别为 58.8%、30.1%、9.3%、1.8%。

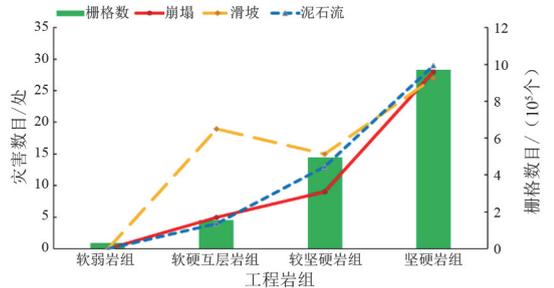


图 6 地质灾害发育与工程岩组关系

研究区内崩塌灾害主要发育于早元古代酸性岩、古元古代酸性岩、南华纪酸性岩和康定岩群,岩性上以石英闪长岩、花岗岩、斜长角闪岩等坚硬或较坚硬岩为主。坚硬的岩体有利于陡峻斜坡的形成,导致斜坡后缘拉应力集中,促进坡体后缘发生张性拉裂破坏,与坡体其他结构面切割组合,在降雨条件下易产生崩塌灾害。

研究区内滑坡灾害主要发育于须家河组—白田坝组、平驿铺组—观雾山组、红石崖组—回星哨组等地层中,如表 1 所示,共发育了 28 处滑坡灾害,占滑坡总数的 45.9%,其岩性以砂岩、粉砂岩夹泥岩、泥灰岩为主,为软硬互层岩组。这类软硬互层斜坡岩体的稳定性受降雨作用明显,尤其是每年汛期 6~9 月,在暴雨作用下泥岩等软弱层被软化,在静水压力、动水压力共同作用下,容易产生滑坡灾害。另外,康定岩群、三叠纪酸性岩地层中发育了 19 处滑坡灾害,占滑坡总数的 31.1%,其岩性以花岗岩为主,为坚硬或较坚硬岩。

2.1.4 降雨量

降雨是地质灾害主要诱发因素,这里采用多年平均降雨量进行分析。如图 7 所示,研究区内崩塌、滑坡灾害主要分布于降雨量为 834~965 mm 的区域,该区域崩塌、滑坡数量分别为 22 处、46 处,分别占各自灾害类型的 52.4%、75.4%;泥石流主要分布于降雨量为 892~1085 mm 的区域,分布 27 处泥石流,占泥石流总数的 58.7%,揭示泥石流灾害与降雨量的关系比崩塌和滑坡与降雨量的关系更加密切。

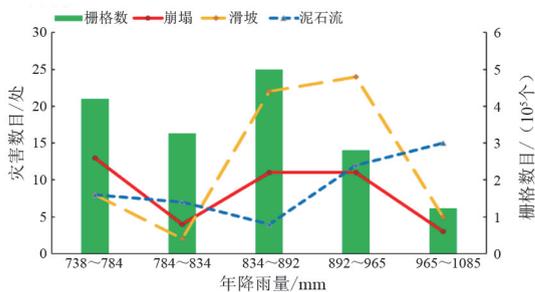


图 7 地质灾害发育与年降雨量关系

2.1.5 地形起伏度与湿度指数

1) 地形起伏度

地形起伏度指一定高程斜坡范围,斜坡最大高程值与最小高程值的差值^[17],可反映该区域范围斜坡的地形地貌。如图 8 所示,研究区地形起伏度较大的集中在高程 100~656 m 区间,栅格比例为 58.8%,共发育有 73 处地质灾害,占总地质灾害的 49.0%。

这是由于研究区内地貌以深切峡谷或高山为主,地形起伏大,更容易产生崩塌、滑坡这两类地质灾害。

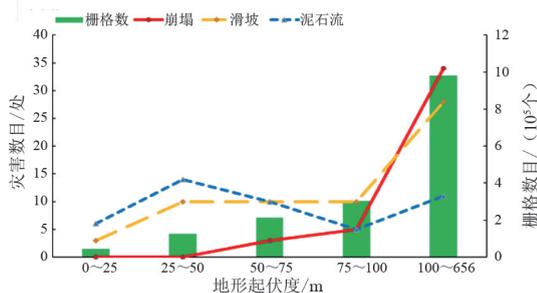


图 8 地质灾害发育与地形起伏度关系

2) 地形湿度指数

地形通过影响降水再分配,直接影响了土壤内部水分的空间分布,而水分的空间分布又控制了地表径流、岩土体的含水量和植被的生长分布等^[18]。地形湿度指数(topographic wetness index, TWI)是由 Beven 和 Kirkby 于 1979 年提出的,代表了降水在地形作用下的汇流方向和汇流面积。地形湿度指数越大,说明汇水面积越大,土壤含水量越高。地表 a 点的地形湿度指数可表示为

$$I_{TWI,a} = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan \beta}\right) \quad (1)$$

式中: α 为流经地表 a 点的单位等高线长度上的汇流面积, m^2/m ; β 为 a 点处的坡度, $^\circ$ 。

如图 9 所示,研究区内 TWI 集中分布于 3~7 m^2/m 区间内,栅格数比例为 82.9%,共分布了 111 处地质灾害,占总地质灾害的 74.5%,崩塌流地质灾害分布数量随 TWI 的增加呈先增加后减小的趋势。

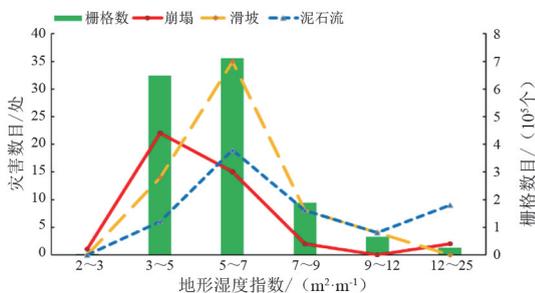


图 9 地质灾害发育与 TWI 关系

2.2 评价单元的选取及单元尺寸

地质灾害易发性评价最为常见的是斜坡单元和网格(栅格)单元。斜坡单元是利用山脊线和沟谷线将研究区域划分而成的若干个斜坡地貌单元,考虑到地形、集水条件与地质条件联系较紧密,斜坡单元不利于计算机快速计算,一般适用于小区域地质

表 1 滑坡灾害岩性分布特征

地层	地层岩性	滑坡数目
须家河组—白田坝组	须家河组主要为灰色石英砂岩、长石石英砂岩、厚层砂岩、薄层砂岩及粉砂岩,夹泥岩、煤层。 白田坝组主要为白灰色石英砂岩、深灰色钙质粉砂岩,泥岩,夹页岩及煤层,底部砾岩。	19
平驿铺组—观雾山组	平驿铺组主要为浅灰—深灰色中至厚层状夹块状细—中粒石英砂岩,夹细粒石英杂砂岩,粉砂岩及深灰色泥岩。 观雾山组主要为灰—深灰色中至厚层生物屑泥晶灰岩,及少量粉砂岩、泥灰岩及白云质灰岩	5
红石崖组—回星哨组	红石崖组主要为紫红—灰绿色条带状页岩、砂岩。 回星哨组主要为紫红色泥页岩,夹黄绿色粉砂岩、页岩。	4
康定岩群	主要为斜长角闪岩、混合片麻岩、变粒岩。	7
三叠纪酸性岩	以花岗岩为主,可见花岗闪长岩、石英闪长岩。	5

灾害危险性评价。网格(栅格)单元是直接研究区域划分而成的若干个固定尺寸的网格,在 1 个栅格范围内,对某一属性只用唯一的值来表示。网格(栅格)单元可使计算机直接实现快速划分和计算,但难以反映地形和集水等地质环境条件。研究区面积为 1 476.72 km²,为便于用机器学习方法实现易发性分区,所以选取栅格单元作为评价单元。

栅格的大小直接影响评价因子图层质量,这里采用文献[19]的经验公式计算栅格尺寸,如式(2)所示。

$$G_s = 7.49 + 0.0006 \times S - 2 \times 10^{-9} \times S^2 + 2.9 \times 10^{-15} S^3 \quad (2)$$

式中: G_s 为栅格单元尺寸; S 为图层比例尺的分母。

所用研究区图层数据以 1:50 000 为主,将其代入式(2)中,可得 G_s 为 32.853 m,为便于计算,取整为 30 m,即所采用的评价单元栅格尺寸为 30 m×30 m。

2.3 易发性评价模型

2.3.1 信息量模型

信息量模型主要基于统计模型和信息量,是通过比较评价单元信息量的大小来综合衡量该单元上地质灾害发生概率的方法。先单独计算每个评价因子的信息量,再计算各个评价因子的总信息量,总信息量越大,越容易发生地质灾害。信息量计算方法为:

$$I_i = \ln\left(\frac{N_i}{N} / \frac{S_i}{S}\right) \quad (3)$$

$$I = \sum_i^n I_i \quad (4)$$

式中: I_i 为评价因子 i 的信息量值; N_i 为分布在评价因子 i 的地质灾害点数量; N 为研究区内地质灾害点总数; N_i/N 为灾害比; S_i 为研究区内含有评价因子 i 的栅格数量; S 为研究区内栅格总数; S_i/S 为栅

格比; I 为栅格单元总的信息量值; n 为评价因子总数量。

2.3.2 加权信息量模型

将皮尔逊相关系数法、CRITIC 权重法、独立性权重法与传统信息量模型相结合,提出了加权信息量模型,如图 10 所示。

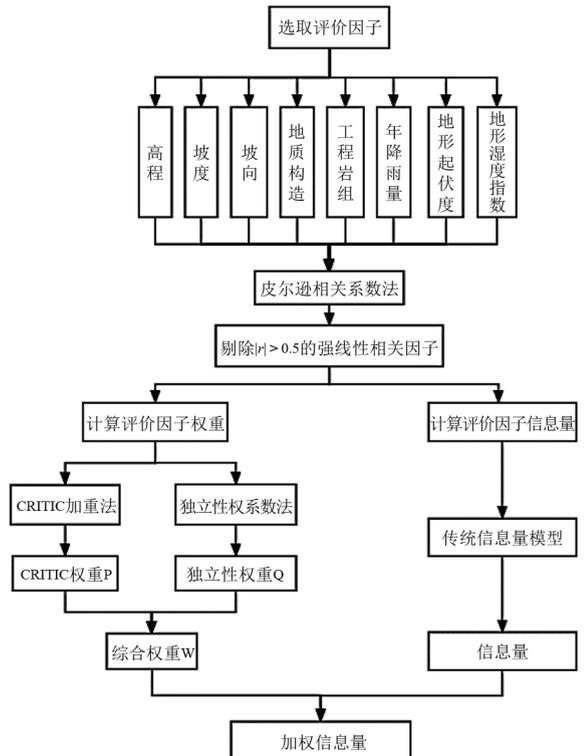


图 10 加权信息量模型

传统信息量模型在叠加时,各因子信息量是直接相加的,为了使加权信息量和原始信息量具有可比性,用式(5)进行加权信息量计算。

$$I_{wi} = I_i \times W_i \quad (5)$$

式中: I_{wi} 为评价因子 i 的加权信息量值; W_i 为评价因子 i 的综合权重,%。

获得加权信息量后,还应将加权信息量模型通过某些方法进行区间划分,得到易发性等级分区。所采用的区间划分方法是自然断点法,根据加权信息量的大小由高到低划分为 5 个易发性等级:极高易发区、高易发区、中易发区、低易发区、极低易发区。

所采用的加权信息量模型,分为以下几种:

1) 崩塌信息量模型(下面简称 BTIV); 2) 滑坡信息量模型(下面简称 HPIV); 3) 泥石流信息量模型(下面简称 NSLIV); 4) 地质灾害叠加模型(下面简称 DJIV), 将 BTIV、HPIV、NSLIV 3 种模型得到的加权信息量,分别进行归一化处理,再根据各自灾害点占总体地质灾害的比例,进行灾害类型权重叠加,得到地质灾害易发性分区图。

3 基于加权信息量模型和叠加法的地质灾害易发性分区

3.1 DJIV 概述

DJIV 不区分地质灾害类型,将崩塌灾害加权信息量(见图 11)、滑坡灾害加权信息量(见图 12)、泥石流灾害加权信息量(见图 13)分别进行归一化处理,将灾害类型比例作为权重进行叠加,采用叠加后的加权信息量来预测地质灾害发生的概率。其计算方法为

$$I_{DJIV} = q_{BT} I_{BTIV,g} + q_{HP} I_{HPIV,g} + q_{NSL} I_{NSLIV,g} \quad (6)$$

式中: I_{DJIV} 为由叠加法获得的地质灾害加权信息量; $I_{BTIV,g}$ 为归一化处理后的 BTIV 加权信息量; q_{BT} 为崩塌灾害占总地质灾害的比例; $I_{HPIV,g}$ 为归一化处理后的 HPIV 加权信息量; q_{HP} 为滑坡灾害占总地质灾害的比例; $I_{NSLIV,g}$ 为归一化处理后的 NSLIV 加权信息量; q_{NSL} 为泥石流灾害占总地质灾害的比例。

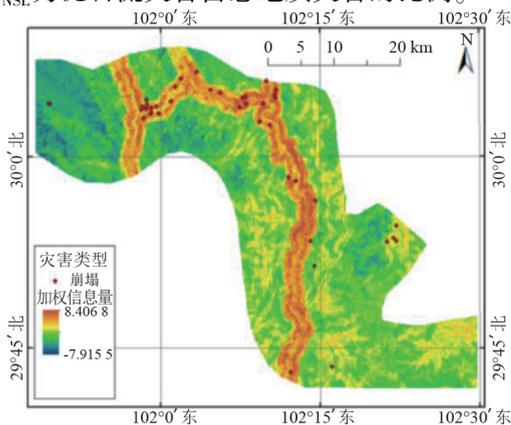


图 11 BTIV 加权信息量

研究区崩塌、滑坡、泥石流的灾害数量分别为 42 处、61 处、46 处,分别占总地质灾害的 28.2%、40.9%、30.9%,即 q_{BT} 、 q_{HP} 、 q_{NSL} 分别为 28.19%、40.94%、30.87%。

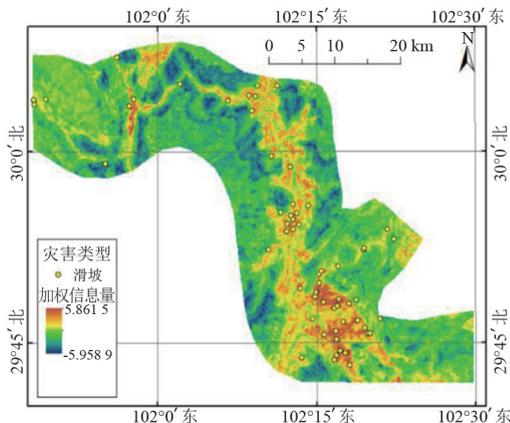


图 12 HPIV 加权信息量

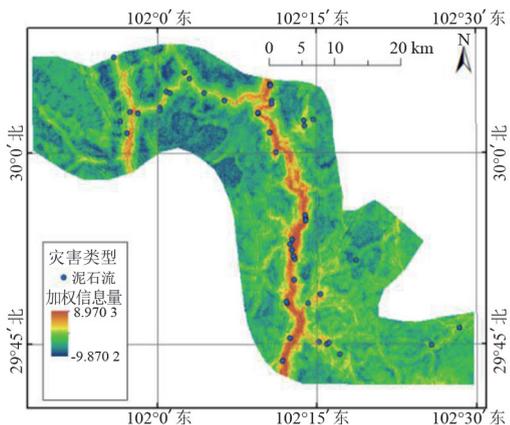


图 13 NSLIV 加权信息量

3.2 结果与讨论

图 14 为 DJIV 加权信息量图,将其按照自然断点法分为 5 个区间,如表 2 所示,得到 DJIV 易发性分区图,如图 15 所示。从图 15 可以看出研究区内容易发生地质灾害的区域为雅拉河、康定河、大渡河沿岸及老二郎山隧道靠泸定出口处,其中:滑坡灾害主要发育于须家河组—白田坝组、平驿铺组—观雾山组、红石崖组—回星哨组等地层中,崩塌主要发育于石英闪长岩、花岗岩、斜长角闪岩等较坚硬和坚硬岩组中;区内泥石流主要分布于康定河及大渡河两侧沟谷流域,以沟谷型泥石流为主,规模上以小型泥石流为主。综上,基于加权信息量模型和叠加法的地质灾害易发性分区结果与实际灾害发育特征规律基本一致。

计算各易发性等级内地质灾害数量见表 3, DJIV 模型预测的极高易发区面积仅占 9.67%, 地质灾害数

量占总灾害的 44.30%,灾害密度为 0.462 处/km²;高易发区面积占 13.68%,地质灾害数量占总灾害的 34.23%,灾害密度为 0.252 处/km²。

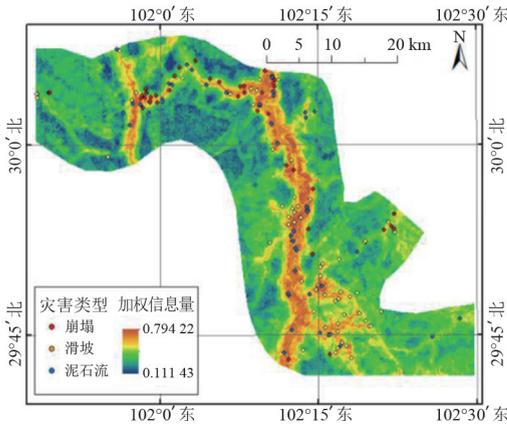


图 14 DJIV 加权信息量

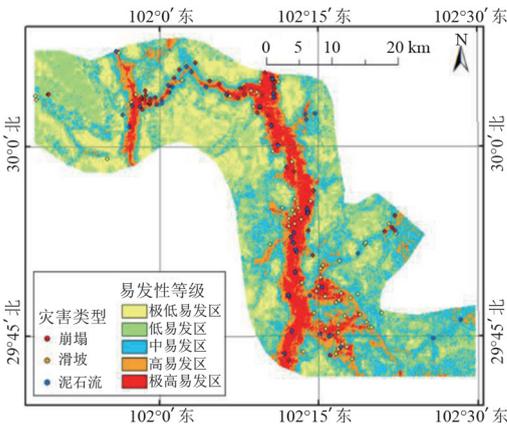


图 15 基于加权信息量模型和叠加法的地质灾害易发性分区 (DJIV)

表 2 DJIV 加权信息量分级

易发性等级	加权信息量区间
极低易发区	0.111 4~0.298 9
低易发区	0.298 9~0.373 8
中易发区	0.373 8~0.459 6
高易发区	0.459 6~0.566 6
极高易发区	0.566 6~0.794 2

表 3 DJIV 模型预测结果

易发性等级	面积/km ²	面积比例/%	灾害数/处	灾害比例/%	灾害密度/(处·km ⁻²)
极低易发区	300.50	20.35	4	2.68	0.013
低易发区	479.38	32.46	10	6.71	0.021
中易发区	352.08	23.84	18	12.08	0.051
高易发区	202.00	13.68	51	34.23	0.252
极高易发区	142.76	9.67	66	44.30	0.462

选用 ROC 曲线对地质灾害易发性评价模型进行验证,其利用 ROC 曲线下与坐标轴围成的面积

(area under curve, AUC)进行模型效果的比对,AUC 越大则说明模型结果越好。图 16 为 DJIV 模型的 ROC 曲线,其 AUC 值为 0.816 5,大于 0.5,故可认为 DJIV 模型评价精度较高。

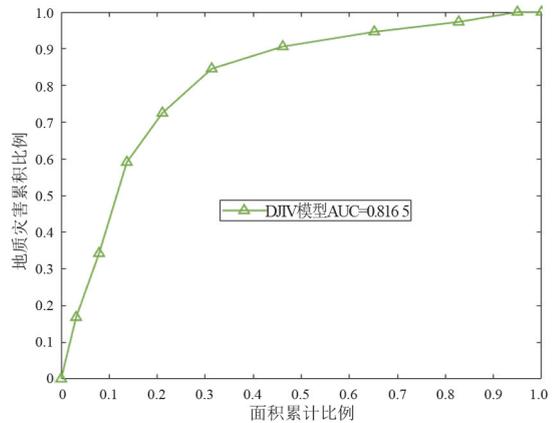


图 16 DJIV 模型 ROC 曲线

4 结 论

上面基于遥感解译及地质灾害调查,选取高程、坡向、坡度、工程岩组、距断层距离、工程岩组类型、降雨量等 8 个对地质灾害发育贡献程度较大的评价因子,采用皮尔逊相关系数法、CRITIC 权重法、独立性权系数法构建了加权信息量模型,对二郎山—折多山输电走廊沿线开展了地质灾害易发性研究,得到以下结论:

1)二郎山—折多山输电走廊沿线地质灾害的主要形成控制因素包括地形地貌、坡向、地质构造、工程地质岩组、年降雨量等,研究区容易发生地质灾害的区域为雅拉河、康定河、大渡河沿岸及老二郎山隧道靠泸定出口处,其中:滑坡灾害最多,占总灾害的 40.94%,主要发育于须家河组—白田坝组、平驿铺组—观雾山组、红石崖组—回星哨组等地层中,其岩性以砂岩、粉砂岩夹泥岩、泥灰岩为主,为软硬互层岩组;崩塌灾害最少,占总灾害的 28.19%。

2)基于加权信息量模型和叠加法的地质灾害易发性分区结果表明,加权信息量模型 DJIV 预测的极高易发区面积仅占 9.67%,但地质灾害数量占总灾害的 44.30%,灾害密度为 0.462 处/km²;高易发区面积占 13.68%,地质灾害数量占总灾害的 34.23%,灾害密度为 0.252 处/km²。分区结果与二郎山—折多山输电走廊沿线调查的灾害发育特征规律基本一致。

3) 采用 ROC 曲线和 AUC 值对所建 DJIV 模型效果进行了验证,其 AUC 值为 0.816 5,表明 DJIV 模型评价精度较高。

参考文献

- [1] 程永锋,丁士君,赵斌滨,等.输变电工程滑坡灾害危险和风险性评估方法研究[J].中国农村水利水电,2015(6):148-152.
- [2] 陈满,陈龙,张世殊,等.川藏联网输变电线路工程地质灾害发育规律与特征研究[C]//2016年全国工程地质学术年会论文集.成都:中国地质学会工程地质专业委员会,2016:1464-1470.
- [3] 王学良,刘海洋,王瑞琪,等.山区输变电工程崩塌(滚石)灾害识别与预测方法[J].工程地质学报,2018,26(1):172-178.
- [4] 刘静.基于 RS 与 GIS 的川藏联网工程沿线地质灾害危险性评价[D].北京:中国地质大学,2018.
- [5] 许冲,戴福初,姚鑫,等. GIS 支持下基于层次分析法的汶川地震区滑坡易发性评价[J].岩石力学与工程学报,2009,28(S2):3978-3985.
- [6] LEE S W, KIM G, YUNE C Y, et al. Development of landslide-risk assessment model for mountainous regions in Eastern Korea[J]. Disaster Advances, 2013,6(6):70-79.
- [7] REGMI A D, DEVKOTA K C, YOSHIDA K, et al. Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014,7(2):725-742.
- [8] 焦伟之,张明,谢鑫鹏,等.基于 GIS 与加权信息量模型的城镇地质灾害易发性评价——以大新镇为例[J].安全与环境工程,2022,29(4):119-128.
- [9] 黄发明,殷坤龙,蒋水华,等.基于聚类分析和支持向量机的滑坡易发性评价[J].岩石力学与工程学报,

2018,37(1):156-167.

- [10] 孟晓捷,张新社,曾庆铭,等.基于加权信息量法的黄土滑坡易发性评价——以 1:5 万天水市麦积幅为例[J].西北地质,2022,55(2):249-259.
- [11] 杜国梁,杨志华,袁颖,等.基于逻辑回归-信息量的川藏交通廊道滑坡易发性评价[J].水文地质工程地质,2021,48(5):102-111.
- [12] 樊芷吟,荀晓峰,秦明月,等.基于信息量模型与 Logistic 回归模型耦合的地质灾害易发性评价[J].工程地质学报,2018,26(2):340-347.
- [13] 杜谦,范文,李凯,等.二元 Logistic 回归和信息量模型在地质灾害分区中的应用[J].灾害学,2017,32(2):220-226.
- [14] 周萍,邓辉张,文江,等.基于信息量模型和机器学习方法的滑坡易发性评价研究——以四川理县为例[J].地理科学,2022,42(9):1665-1675.
- [15] 王国卫,李明波,蒋明光,等.基于加权信息量模型的湖南省麻阳县地质灾害危险性评价与区划[J].地质与资源,2020,29(3):266-272.
- [16] 白永健,铁永波,倪化勇,等.鲜水河流域地质灾害时空分布规律及孕灾环境研究[J].灾害学,2014,29(4):69-75.
- [17] 隋刚,郝兵元,彭林.利用高程标准差表达地形起伏程度的数据分析[J].太原理工大学学报,2010,41(4):381-384.
- [18] 张彩霞,杨勤科,李锐.基于 DEM 的地形湿度指数及其应用研究进展[J].地理科学进展,2005(6):116-123.
- [19] 李军,周成虎.基于栅格 GIS 滑坡风险评价方法中格网大小选取分析[J].遥感学报,2003(2):86-92.

作者简介:

范荣全(1964),男,教授级高级工程师,硕士,从事电工程理论与新技术研究。

(收稿日期:2023-11-21)

(上接第 46 页)

- [10] SMEETS R, VAN EDR SLUIS L, KAPETANOVIC M, et al. Switching in electrical transmission and distribution systems[M]. United Kingdom: Wiley, 2015.
- [11] 姜仁卓,何柏娜,颀雅迪,等.双能式 SF₆ 高压断路器灭弧室结构设计及熄弧特性仿真研究[J].高电压技术,2020,46(6):2040-2048.
- [12] JIANG R Z, HE B N, XIE Y D, et al. Structural design of arc extinguisher for dual-energy SF₆ high voltage circuit breaker and simulation research of its arc-extinguishing characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2020,

46(6):2040-2048.

- [13] 郭煜敬,张豪,张权,等. N₂、CO₂ 和 SF₆ 喷口电弧电流开断能力的比较分析[J].高压电器,2016,52(12):31-40.

作者简介:

徐胜民(1997),男,硕士研究生,研究方向为气体绝缘;
庚振新(1983),男,博士,副教授,研究方向为高压电器及气体绝缘;
崔兆轩(1995),男,博士研究生,研究方向为气体绝缘。

(收稿日期:2024-03-29)