

二郎山—折多山大渡河深切峡谷区地质灾害发育特征及对输变电工程的影响

范荣全¹, 曾文慧¹, 夏敏², 张文涛¹, 任志超¹, 罗毅¹, 许文杰¹, 陈中国¹

(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)

摘要:以二郎山—折多山大渡河深切峡谷区输电走廊沿线为研究对象, 基于遥感解译及地质灾害调查对区内地质灾害发育特征以及对输变电工程的影响进行了研究。结果表明: 研究区内地质灾害主要形成控制因素有地形地貌、坡向、地质构造、工程地质岩组、年降雨量等; 地质灾害主要分布于2200 m以下高程, 坡度介于15°~50°, 崩塌主要发育于坚硬或较坚硬岩, 滑坡发育于软硬互层岩组; 崩塌、滑坡主要分布于降雨量为834~965 mm的区域, 泥石流主要分布于降雨量为892~1085 mm的区域; 二郎山—折多山大渡河深切峡谷区输电走廊沿线现状地质灾害发育对输变电工程的杆塔及其基础的稳定性造成威胁。研究成果可为输电走廊沿线地质灾害评价与防治提供理论依据, 为输变电工程规划选线、设计及施工提供技术指导。

关键词: 地质灾害; 大渡河深切峡谷; 输变电工程

中图分类号: TM 752 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)03-0039-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240307

Development Characteristics of Geological Disasters in Deep Cut Canyon Area of Dadu River from Erlang Mountain to Zheduo Mountain and Its Impact on Power Transmission and Transformation Projects

FAN Rongquan¹, ZENG Wenhui¹, XIA Min², ZHANG Wentao¹, REN Zhichao¹,
LUO Yi¹, XU Wenjie¹, CHEN Zhongguo¹

(1. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection
(Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: Based on remote sensing interpretation and geological disaster investigation, and taking the transmission corridor in deep cut canyon area of Dadu River from Erlang Mountain to Zheduo Mountain as research object, the development characteristics of geological disasters in this area and the impact on power transmission and transformation projects are studied. The results show that the main controlling factors for the formation of disasters in this area include topography, slope orientation, geological structure, engineering geological petrofabric and annual rainfall, etc. Geological disasters in this area are mainly distributed at elevations below 2200 m, with slopes ranging from 15° to 50°. Collapses are mainly developed in hard or relatively hard rocks, and landslides are developed in soft hard interbedded rock masses. Collapses and landslides are mainly distributed in areas with rainfall ranging from 834 to 965 mm, and debris flows are mainly distributed in areas with rainfall ranging from 892 to 1085 mm. So, the current geological disasters along the transmission corridor in deep cut canyon area of Dadu River from Erlang Mountain to Zheduo Mountain pose a threat to the stability of towers and its foundation of power transmission and transformation projects. The research results can provide a theoretical basis for the evaluation and prevention of geological disasters along the transmission corridor, and provide a technical guidance for the planning, route selection, design and construction of power transmission and transformation projects.

Key words: geological disaster; deep cut canyon of Dadu river; power transmission and transformation project

0 引言

西南地区为国家“西电东输”战略的建设地区^[1],电力资源是关乎国家发展的重要资源。输变电工程及其附属配套设施投入大、占地大,且大多直接暴露在自然条件下,受环境因素影响较大。川西大渡河深切峡谷区地质灾害频发,各类地质灾害的发生直接影响着输变电系统的安全运行,严重的会导致电网崩溃和大面积停电事故,更有甚者将威胁到人民的生命财产和社会的稳定^[2]。

川西地区的金沙江、雅砻江、大渡河、岷江流域水电可开发量占四川省的 90%,其中,大渡河流域属于中国五大生态脆弱区之一的西南山地区。该地区地形地貌起伏大,地质环境条件复杂,地质灾害频发,是气候和生物响应的敏感地带。文献[3]以大渡河下游沿岸为研究区,基于地质学、地理学、生态学等多学科理论知识与方法,结合地理信息空间分析技术,建立了该研究区生态环境脆弱性评价模型,探索了影响研究区生态环境脆弱性的主要地质因素,研究表明地质因子对研究区生态环境脆弱性的影响程度排序为:岩类>岩石坚硬程度>断层密度>距断层距离>断层走向。文献[4]以大渡河为研究区,采用逻辑回归模型、信息量模型、信息量模型与逻辑回归模型相结合、空间逻辑回归以及信息量与空间逻辑回归模型相结合等 5 种方法对大渡河流域地质灾害敏感性进行评价,揭示地质灾害“高”与“极高”易发区主要沿大渡河两岸展布,道路距离因子及河流距离因子在评价过程中具有较高贡献度。文献[5]以川西地区的康定市为研究区,基于斜坡单元采用证据权模型及折减系数法进行滑坡灾害易发性分区,结果表明“极高”易发区和“高”易发区主要分布于康定市炉城镇、二道桥村附近和康定河及雅拉河沿岸。另外,文献[6-8]也对大渡河流域深切峡谷区地质灾害发育特征与分布规律进行了研究。

对处于地质环境复杂地区的长距离输变电工程而言,线路需要跨越众多地貌、地质单元,沿线岩土类型复杂,工程建设及运营过程中容易遭受多种地质灾害的威胁。虽然部分学者针对山区输电线路工程勘察中的地质灾害问题及其治理措施、地震诱发区域性地质灾害对输电工程塔基地选择的影响以及输变电线路地质灾害危险性评价等方面开展了系

列工作^[9-14],但川西地区频发的地质灾害对输变电工程选址、输电线路规划、设计的影响以及如何在川西复杂的地质环境条件下选择相对优良、适宜的工程场址等问题仍待研究。下面以二郎山—折多山大渡河深切峡谷区输电走廊沿线为研究对象,基于遥感解译及地质灾害调查对区内地质灾害发育特征以及对输变电工程的影响进行了研究,以期对输电走廊沿线地灾评价与防治提供理论依据,为输变电工程规划选线、设计及施工提供技术指导。

1 研究区地质环境概况

二郎山—折多山大渡河深切峡谷区位于四川省甘孜藏族自治州和雅安市交界处,范围涉及康定市、泸定县、天全县、荣经县和汉源县,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。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,坡度大于 40°,区内输电线路西起折多山、东至二郎山,大致沿河谷布设,如图 1 所示。

研究区地层岩性十分复杂,地层时代从太古代至中生代均有分布,沉积岩、变质岩及岩浆岩均有出露。地质构造也十分复杂,分布断层主要有鲜水河断裂带、大渡河断裂带及龙门山断裂带,如图 2 所示,构造活动强烈,根据 GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》^[15],研究区基本地震动峰值加速度为(0.2~0.4)g。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;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。

2 研究区地质灾害发育特征

研究区地质灾害发育分布如图 3 所示,结合现场调查及遥感解译统计,研究区共发育崩滑流地质灾害 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%。

2.1 崩塌

研究区崩塌灾害发育特征如表 1 所示。研究区内崩塌灾害主要分布于康定河及大渡河沿岸。按物质成分分类,以岩质崩塌为主;规模上以小型、中型崩塌为主,失稳模式包括倾倒式崩塌、坠落式崩塌及

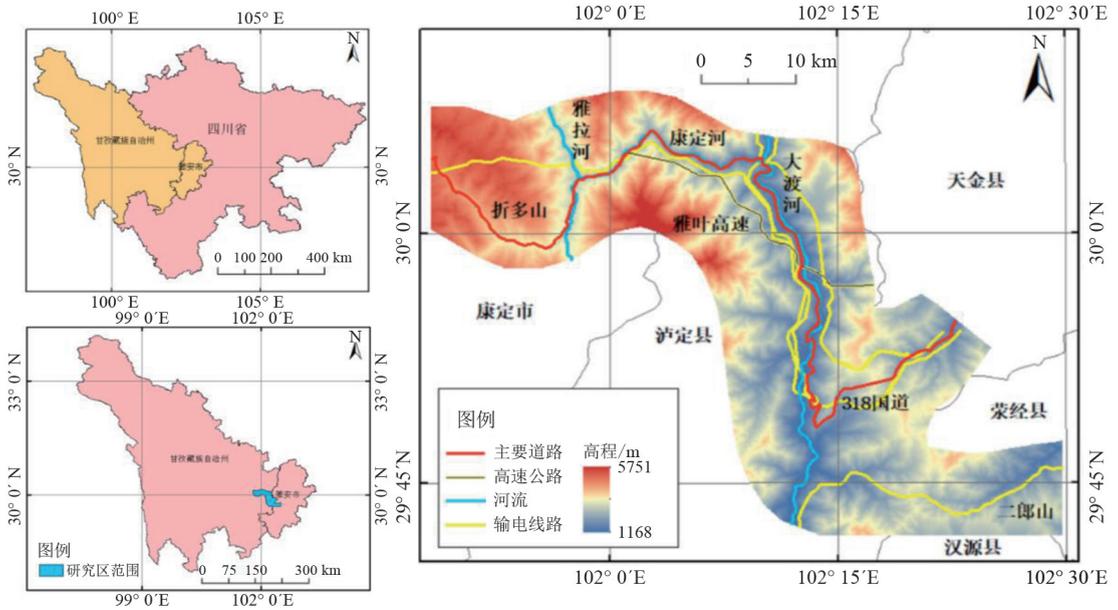


图1 二郎山—折多山大渡河深切峡谷区输变电走廊分布位置

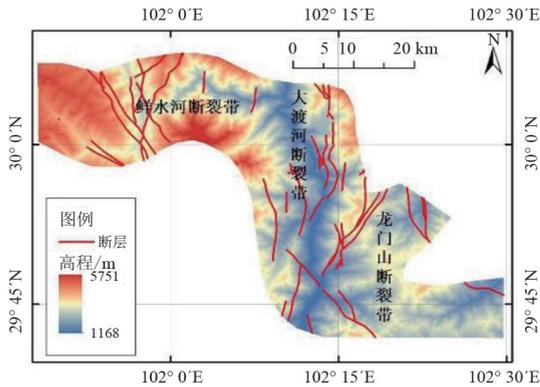


图2 研究区构造断裂带分布

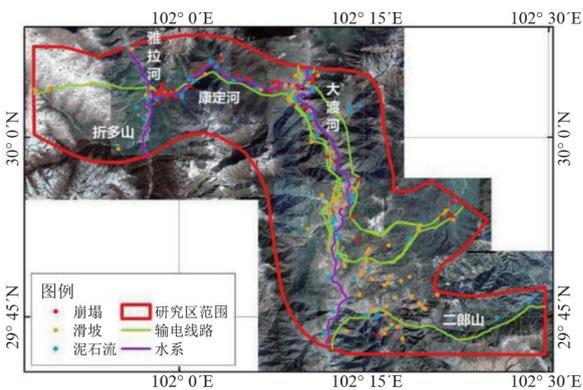


图3 研究区地质灾害发育分布(底图为卫星影像)

滑移式崩塌。研究区内崩塌多为高位、中位崩塌。

2.2 滑坡

研究区内滑坡灾害主要分布于大渡河沿岸及二郎山附近。物质组成上以岩质滑坡为主,滑坡规模从小型滑坡到特大型滑坡均有发育,其中,小型滑坡、中型滑坡、大型滑坡、特大型滑坡数目分别为32处、17处、9处、3处,分别占滑坡总数的52.5%、27.9%、

14.8%、4.9%;岩性上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,如表2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。

表1 崩塌灾害发育特征

分类依据	发育类型	特征描述
物质组成	岩质崩塌	主要发育于坚硬或较坚硬岩体中。
形成机理	倾倒式崩塌、 坠落式崩塌、 滑移式崩塌	主要发育于康定河和大渡河沿岸,地貌上以峡谷和陡倾岸坡为主,有30处崩塌的斜坡坡角大于30°,占总崩塌数的71.4%。
规模	小型、中型、 大型	崩塌规模多在 $1 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 间,小型崩塌、中型崩塌、大型崩塌数目分别为24处、16处、2处,分别占崩塌总数的57.1%、38.1%、4.8%。

2.3 泥石流

研究区内泥石流灾害发育特征如表3所示。该区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。

3 研究区地质灾害形成控制因素

地质灾害的孕育受控于内、外两大因素控制,内因是斜坡所处的地质环境条件与自身物质组成及坡体结构条件决定的,是斜坡变形演化的物质基础;外因即各种外动力触发因素。内部因素包括地形地貌、岩土体类型及其结构、地质构造等;外部因素包括河流冲刷、降雨、地震、人类工程活动等因素。结合二郎

山—折多山大渡河深切峡谷区地质灾害发育特点,从地形地貌、坡向、地质构造、工程地质岩组、年降雨量等方面分析研究区内地质灾害形成的控制因素。

表 2 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

表 3 泥石流灾害发育特征

分类依据	发育类型	特征描述
类型	沟谷型泥石流	主要发育于山区沟谷中,沟槽中可见明显下蚀现象。
物质组成	泥石型泥石流、水石型泥石流	主要发育泥石型泥石流和水石型泥石流。
暴发规模	小型泥石流、中型泥石流	主要发育小型泥石流,小型泥石流、中型泥石流数目分别为 41 处、5 处,分别占泥石流总数的 89.1%、10.9%。

3.1 地形地貌

3.1.1 高程因素

研究区地质灾害分布与高程关系如图 4 所示。1618~2200 m 的高程区间分布了 98 处地质灾害,占总灾害的 65.8%,即研究区内地质灾害主要分布于 2200 m 以下高程。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,共分布有 34 处崩塌,占崩塌总数的 81%;崩塌灾害主要分布于西北部康定河沿岸,海拔较高。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%;滑坡灾害主要分布于大渡河沿岸及二郎山附近。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%;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。

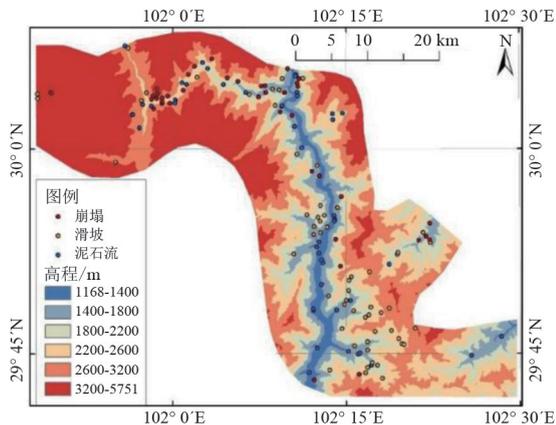


图 4 研究区地质灾害与高程分布

3.1.2 坡度因素

斜坡坡度越陡,越容易发生地质灾害。坡度显著影响斜坡岩土体应力重分布和应力分异过程。随坡度变陡,斜坡后缘拉应力分布范围及量值越大,坡脚剪应力集中程度越显著,即高陡斜坡不利于斜坡岩土体稳定。地质灾害分布与坡度关系如图 5 所示。

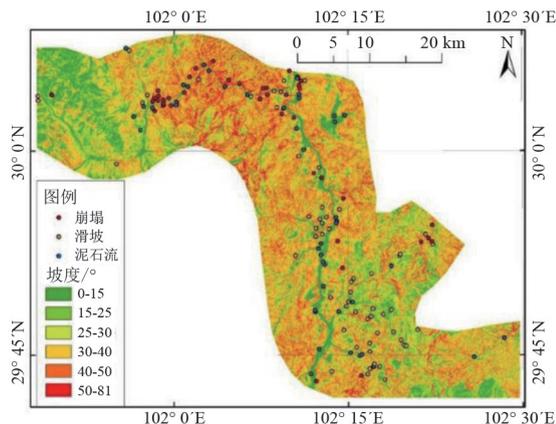


图 5 研究区地质灾害与坡度分布

由图 5 可见,研究区内坡度主要介于 15°~50°,以 30°~40°坡度的斜坡最为发育,其次为坡度 40°~50°的斜坡,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%,崩塌灾害分布数随坡度增加而增加;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°坡度区间栅格数占比为 10.7%,发育 26 处泥石流,占泥石流总数的 56.5%。

3.2 坡向

坡向很大程度上决定了斜坡接受太阳辐射的时间和强度,影响斜坡表面植被发育及风化剥蚀程度。

研究区内地质灾害发育与坡向分布如图6所示。

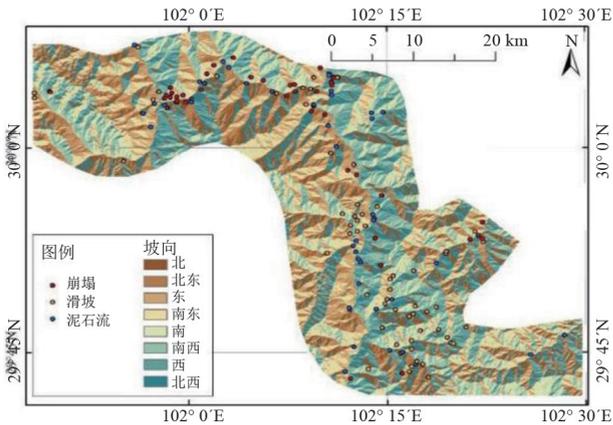


图6 研究区地质灾害与坡向分布

由图6可见,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。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向区间依次为北东、东、西、南西,共分布29处泥石流,占泥石流总数的63.0%。

3.3 地质构造

研究区内地质构造复杂,断层发育。一般距离断层越近,岩土体稳定性受构造作用越强烈,越容易发生地质灾害。这里采用距离断层直线距离的远近,来衡量地质构造作用对岩土体稳定性的影响程度,研究区内地质灾害发育与断层距离分布如图7所示。可见,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。

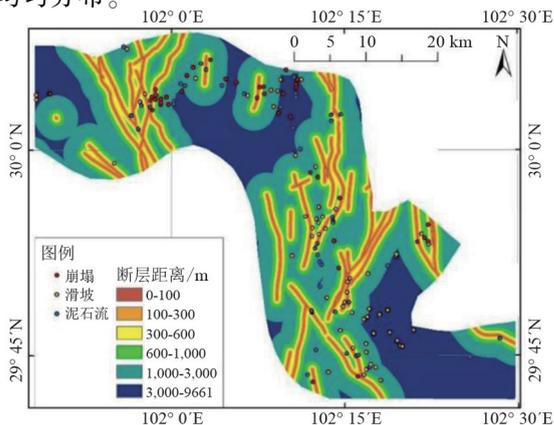


图7 研究区地质灾害与断层距离分布

3.4 工程地质岩组

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。研究区内地质灾害与工程岩组分布如图8所示。

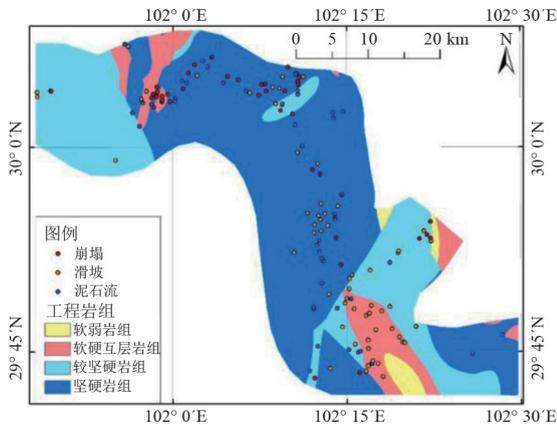


图8 研究区地质灾害与工程岩组分布

由图8可见,研究区内工程岩组分布数量依次为坚硬岩组、较坚硬岩组、软硬互层岩组、软弱岩组,其占比分别为58.8%、30.1%、9.3%、1.8%。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。这些坚硬的岩体能形成陡峭的斜坡,利于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。

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(见表2),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。这类软硬互层岩体的稳定性主要取决于软弱面,研究区内降雨主要集中于6—9月,在暴雨作用下泥岩等软弱层进一步软化、容易产生滑坡灾害。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。

3.5 年降雨量

降雨会显著降低斜坡岩土体的稳定性,是重要的地质灾害诱发因子。采用多年平均降雨量分析研究区内地质灾害与年降雨量分布,如图9所示。可见,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、滑坡灾害数量分别为22处、46处,分别占各自灾害类型的52.4%、

75.4%;泥石流灾害主要分布于降雨量为 892~1085 mm 的区域,有 27 处,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。

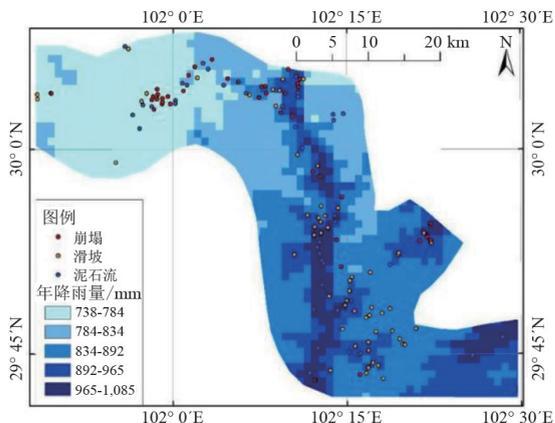


图9 研究区地质灾害与年降雨量分布

4 地质灾害发育对输变电工程的影响

已有学者从地质灾害对输变电工程的影响作用形式、诱发因素、威胁对象、影响范围方面,将地质灾害对输变电工程的作用影响分为 4 类典型危害模式^[16-17]:1)威胁变电站站址安全,导致设备损毁、中断片区供电;2)威胁变电站进场道路等附属配套设施,影响变电站正常运营、维护;3)损毁输电杆塔,造成线路中断;4)地震诱发区域性地质灾害,造成大区域电网瘫痪。

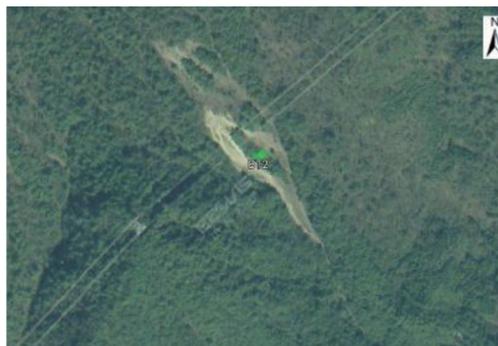
基于遥感解译及现场地灾调查表明,二郎山一折多山大渡河深切峡谷区输电走廊沿线现状地质灾害发育对输变电工程的影响主要为威胁杆塔及其基础的稳定性。下面分析典型灾害对输变电工程的作用影响。

4.1 典型崩塌灾害

1)BT2 崩塌发育特征如图 10 所示。BT2 崩塌发育的经纬度坐标为 $102^{\circ}21'48''$ 、 $29^{\circ}53'42''$,距离道路大于 500 m,遥感影像上可见明显的崩塌边界,为一中型岩质崩塌,左侧崩塌山体斜坡近直立,形成机理应为滑移或坠落式崩塌,崩塌后缘为输电杆塔基础,现状条件下崩塌稳定状态为欠稳定,降雨条件下存在失稳的可能,对输电杆塔稳定性构成严重威胁。

2)BT4 崩塌发育特征如图 11 所示。BT4 崩塌位于雅康高速边,经纬度坐标为 $102^{\circ}21'20''$ 、 $29^{\circ}58'12''$,斜坡坡向为 95° ,遥感影像及现场调查均可见清

晰的崩塌边界,属中型岩质崩塌。BT4 崩塌的崩源区岩体陡倾,现状条件下发育崩塌堆。



(a) 崩塌遥感影像 (图源于GEOVIS)



(b) 崩塌现场调查照片

图 10 BT2 崩塌发育特征



(a) 崩塌遥感影像 (图源于GEOVIS)



(b) 崩塌现场调查照片

图 11 BT4 崩塌发育特征

积物形成机理应为滑移或坠落式崩塌,现状条件下稳定状态为基本稳定~欠稳定。崩源区上方布置有多个输电杆塔基础,降雨作用会降低崩源区的

稳定性,存在失稳的可能,对输电杆塔稳定性构成严重威胁,甚至导致输电杆塔倒塌事故。

4.2 典型滑坡灾害

1) HP2 滑坡发育特征如图 12 所示。HP2 滑坡发育于泸定县冷碛镇 318 国道附近滴水岩大桥南约 200 m,经纬度坐标为 $102^{\circ}15'2''$ 、 $29^{\circ}49'43''$,斜坡坡度较陡约为 40° ,斜坡坡向为 130° ,滑坡类型属岩质滑坡,滑坡形态呈长舌状,滑坡边界明显,滑坡后缘布置有输电杆塔。因发育于 318 国道内侧边坡,滑坡对公路的正常运行构成威胁,已采用锚索+锚杆+排水孔等防治措施。从老二郎山隧道出口至泸定方向的 318 国道上,发育了多处类似规模的滑坡,现状条件下稳定状态都为基本稳定~欠稳定,但降雨会导致滑坡区域稳定性下降,存在局部或整体失稳的可能,对输电杆塔稳定性构成严重威胁,甚至导致输电杆塔倒塌事故。



(a) HP2滑坡遥感影像 (图源于GEOVIS)



(b) 滑坡现场调查照片

图 12 HP2 滑坡发育特征

2) HP3 滑坡现场如图 13 所示。HP3 滑坡位于泸定县泸桥镇 318 国道附近,经纬度坐标为 $102^{\circ}58'35''$ 、 $29^{\circ}58'35''$ 。HP3 为堆积体滑坡,已采用多级挡土墙进行防治。滑坡后缘布置有多个输电杆塔,受降雨、公路开挖影响,公路后缘坡体崩塌灾害亦十分发育,边坡中设置多级防护网,大量崩、滑灾害的发育对输

电杆塔稳定性构成严重威胁。

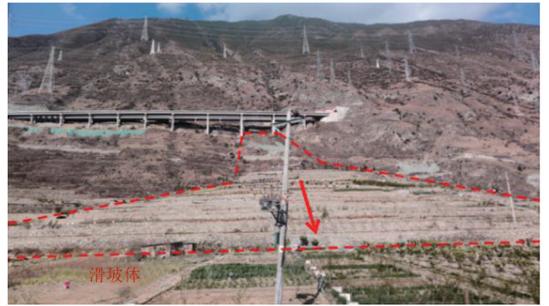


图 13 HP3 滑坡现场调查照片

综上,二郎山—折多山大渡河深切峡谷区输电走廊沿线现状地质灾害发育对输变电工程的影响主要为威胁杆塔及其基础的稳定性,现状条件下灾害稳定状态为基本稳定至欠稳定,降雨、人类工程活动开挖或者地震作用下存在局部或整体失稳的可能,对输电杆塔及其基础的稳定性构成严重威胁。

5 结 论

上面以二郎山—折多山大渡河深切峡谷区输电走廊沿线为研究对象,基于遥感解译及地灾调查对区内地质灾害发育特征及对输变电工程的影响进行研究,取得以下结论:

1) 研究区共发育地灾 149 处,其中崩塌灾害 42 处,滑坡灾害 61 处,泥石流灾害 46 处。崩塌灾害主要发育于康定河及大渡河沿岸,以中小型岩质崩塌为主;滑坡灾害主要发育于大渡河沿岸及二郎山,以中小型岩质滑坡为主;泥石流灾害主要发育于康定河及大渡河沿岸的沟口位置,以中、小型沟谷泥石流型为主。

2) 研究区地质灾害的主要形成控制因素有地形地貌、坡向、地质构造、工程地质岩组、年降雨量等,研究区内地质灾害主要分布于 2200 m 以下高程,地质灾害发育的斜坡坡度主要介于 $15^{\circ} \sim 50^{\circ}$,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。研究区距断层距离 1000~3000 m 区间内地质灾害最发育,其中崩塌灾害主要发育于坚硬或较坚硬岩,滑坡灾害主要发育于软硬互层岩组。

3) 二郎山—折多山大渡河深切峡谷区输电走廊沿线现状地质灾害发育对输变电工程的影响主要为威胁杆塔及基础的稳定性,现状条件下灾害稳定状态为基本稳定至欠稳定,降雨、人类工程活动开挖或者地震作用下存在局部或整体失稳的可能,对输电杆塔及其基础的稳定性构成严重威胁。

(下转第 51 页)

- [4] 凌晓斌,杜伟,周转,等.输电塔-线体系的风致动力稳定性分析[J].科学技术与工程,2022,22(8):3134-3143.
- [5] 张恩旺,潘金龙,梁鸿宇,等.钢结构的腐蚀及防腐措施的研究[J].安徽建筑,2022,29(6):70-71.
- [6] 史炜洲,童乐为,陈以一,等.腐蚀对钢材和钢梁受力性能影响的试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(7):53-60.
- [7] 陈尧.腐蚀环境下基于全寿命设计需求与时变可靠度的钢结构性能退化规律研究[D].南京:东南大学,2021.
- [8] 陈浩,张涛,房文轩,等.220 kV 输电铁塔塔腿腐蚀失效原因分析[J].材料保护,2020,53(12):139-142.
- [9] 高超,刘建军,郑逸川,等.锈蚀对输电塔角钢力学性能的影响[J].腐蚀与防护,2020,41(8):32-38.
- [10] 郑恒伟,余俊锋,施佳欢.腐蚀对输电塔交叉斜材力学性能影响[C]//2022年工业建筑学术交流会议论文集(下册).北京:中冶建筑研究总院有限公司,2022:514-518.
- [11] 葛兆军,张强,黄耀,等.输电铁塔耐候钢在不同大气环境下的腐蚀行为[J].中国电力,2016,49(12):8-14.
- [12] YE L G, LI W Z, HE C G. Research on detection method of tower corrosion based on hough transform[C]//2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA), 27-29 Jun. 2020, Dalian, China. IEEE, 2020: 433-436.
- 作者简介:**
 杨子焯(1988),男,博士,工程师,研究方向为输电线路结构设计;
 朱超杰(1987),男,硕士,高级工程师,研究方向为输电线路电气设计;
 施伟国(1970),男,高级工程师,从事电力系统设计研究与管理工
 作;
 杨婷(2002),女,本科生,研究方向为输电线路防灾减灾;
 何紫薇(1999),女,硕士研究生,研究方向为电力系统防灾减灾;
 何畅(1992),男,博士,讲师,从事电力系统防灾减灾研究。(收稿日期:2023-08-13)

(上接第45页)

参考文献

- [1] 陈宗器.西电东输的现状和展望[J].华通技术,2004(3):33-39.
- [2] 王昊昊,罗建裕,徐泰山,等.中国电网自然灾害防御技术现状调查与分析[J].电力系统自动化,2010,34(23):5-10.
- [3] 赖芳.大渡河中下游沿岸生态环境脆弱性时空分布及地质影响因素研究[D].成都:成都理工大学,2020.
- [4] 姚李.基于GIS的大渡河流域地质灾害危险性评价[D].成都:成都理工大学,2020.
- [5] 王家柱,高延超,铁永波,等.基于斜坡单元的山区城镇滑坡灾害易发性评价:以康定为例[J].沉积与特提斯地质,2023,43(3):640-650.
- [6] 徐如阁,郑万模,巴仁基,等.大渡河流域泥石流发育特征研究[J].人民长江,2013,44(S1):117-119.
- [7] 巴仁基,王丽,郑万模,等.大渡河流域地质灾害特征与分布规律[J].成都理工大学学报(自然科学版),2011,38(5):529-537.
- [8] 丁俊,鄢毅,岳昌桐,等.四川省大渡河流域地质灾害分布及其发展趋势浅析[J].中国地质灾害与防治学报,2007(S1):22-25.
- [9] 宋红伟,赵东力,姬道新,等.以地貌单元划分线路工程地质灾害危险性评估区段的可行性分析——以三门峡电厂~洛阳牡丹变500 kV输电线路工程为例[J].地下水,2007,29(2):115-117.
- [10] 李伟强,曾渠丰.山区输电线路工程勘察中的地质灾害问题与治理方法[J].湖北地矿,2002,16(4):47-50.
- [11] 陈先勇.浅析地震滑坡、崩塌及地裂缝性质特征和塔基场地选择原则[C]//四川省地质学会水文地质工程地质专业委员会,四川省地质学会环境地质专业委员会,四川省水力发电工程学会地质及勘探专业委员会,四川省水力分会工程地质与岩石力学专业委员会.2010四川省水文、工程、环境地质学术交流会论文集.《四川地质学报》编辑部,2010:59-64.
- [12] 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]//中国地质学会工程地质专业委员会.2016年全国工程地质学术年会论文集.科学出版社,2016:1464-1470.
- [13] 何永东.输电线路工程地质灾害事故的预防和整治管理[J].凉山大学学报,2003,5(1):25-27.
- [14] 林晋辉.锦屏一级水电站G1002电塔塔基边坡失稳机理及防治对策研究[D].成都:西南交通大学,2014.
- [15] 全国地震标准化技术委员会.中国地震动参数区划图:GB 18306—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [16] 李源亮.川西地区地质灾害危险性及其工程地质环境质量对输变电工程规划影响研究[D].成都:成都理工大学,2018.
- [17] 范荣全,董斌,李源亮,等.川西地区输变电工程地质环境质量评价[J].科学技术与工程,2020,20(2):544-549.
- 作者简介:**
 范荣全(1964),男,硕士,教授级高级工程师,从事电工程理论与新技术研究。(收稿日期:2023-07-13)