 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i10.12072

Typical Geological Disaster Development Characteristics and Risk Assessment of a Transmission Line in a High-Altitude Permafrost Region

Yuping Liu

China Power Construction Corporation Qinghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Xining, Qinghai, 810008, China

Abstract

The construction of transmission lines in high-altitude permafrost environments faces unique geological disaster challenges. This study takes a 330 kV transmission line project in the Qingnan area of Qinghai Province as its research subject. Based on a field survey covering an area of 91.02 km², this paper systematically analyzes the distribution characteristics and formation mechanisms of four types of geological disasters—landslide, debris flow, freeze-thaw mudflow, and thermal thaw settlement—in the assessment area, and conducts a current risk assessment in accordance with the "Code for Geological Disaster Risk Assessment" (DZ/T0286-2015). The study reveals that the assessment area contains one landslide occurrence, 20 debris flow events, five freeze-thaw mudflow events, and one thermal thaw settlement occurrence; the types of geological disasters are closely related to the permafrost environment. Among these, 11 debris flow events have already caused significant economic losses, indicating a high current risk level; the section of Line II featuring strong thaw settlement and strong frost heave in saturated frozen soil exhibits intense development of freeze-thaw disasters, also indicating a high current risk level. These research findings can serve as a reference for optimizing transmission line route selection and conducting disaster prevention and mitigation design in high-altitude regions.

Keywords

high-altitude cold regions; permafrost; transmission lines; geological hazards; distribution characteristics; risk assessment

高寒多年冻土区某输电线路典型地质灾害发育特征及危险性评估

刘宇平

中国电建集团青海省电力设计院有限公司，中国·青海 西宁 810008

摘要

高寒区多年冻土环境下的输电线路工程建设面临独特的地质灾害挑战。本文以青海省青南地区某330kV输电线路工程为研究对象，基于91.02km²的地质灾害实地调查，系统分析了评估区崩塌、泥石流、冻融泥流及热融沉陷四类地质灾害的分布特征与形成机制，并依据《地质灾害危险性评估规范》（DZ/T0286−2015）进行危险性现状评估。研究表明：评估区发育崩塌1处、泥石流20条、冻融泥流5条、热融沉陷1处，地质灾害类型与多年冻土环境密切相关；其中11条泥石流已造成明显经济损失，现状评估危险性大；Ⅱ号线强融沉−强冻胀饱冰冻土段冻融灾害发育强烈，现状评估危险性大。研究成果可为高寒区输电线路的选线优化与防灾设计提供参考。

关键词

高寒区；多年冻土；输电线路；地质灾害；分布特征；危险性评估

1 引言

青藏高原高寒区多年冻土分布广泛，生态环境脆弱，地质条件复杂。随着国家能源战略西移和西部大开发的深入推进，越来越多的重要电力基础设施在高寒多年冻土区规划建设。该类区域独特的地质环境——冻融循环强烈、寒冻风化显著、地表覆盖层敏感——使输电线路工程建设面临崩塌、泥石流、冻融泥流、热融沉陷等多类型地质灾害的叠加威胁。如何在复杂地质环境条件下科学评估地质灾害危险性、合理规避工程风险，已成为高寒区输电线路建设的关键技术问题。

以往关于高寒区地质灾害的研究多聚焦于公路、铁路等线性工程，对架空输电线路这一特殊性工程类型的地质灾害评估研究相对薄弱。输电线路具有点多线长、塔基分散、荷载点状的特点，其对地质灾害的

【作者简介】刘宇平（1995-），男，中国青海西宁人，硕士，高级工程师，从事电力工程勘察与设计研究。

响应模式与公路、铁路存在本质差异。本文以青海省青南地区某330kV输电线路工程为研究对象，基于系统的野外地质调查，查明评估区地质灾害的类型、分布及发育特征，分析其形成机制，并开展危险性现状评估，旨在为高寒区输电线路的选线优化和防灾减灾提供科学依据。

2 工程概况与地质环境条件

2.1 工程概况

某330kV线路建设工程地处青海省青南高寒地区，线路自唐乃亥330kV变电站出线，经玛多330kV变电站至玉树330kV变电站，全长约520km，全线采用单回路架设，沿线海拔3200～5000m。本次评估重点针对大河坝区段（I号线，长约4.8km）和赛宗寺西区段（II号线、III号线，各长约7km）开展工作。工程塔型以直线塔和转角塔为主，塔高40～50m，基础形式在大河坝区段采用人工挖孔基础（直径1～2m，深度7～12m），在多年冻土区采用灌注桩基础（直径1～2.5m，深度7～14m）。依据《地质灾害危险性评估规范》（DZ/T0286-2015），拟建工程属重要建设项目，评估级别为一级。

2.2 地质环境条件

评估区宏观地势西高东低，最高点鄂拉山海拔4824m，最低点约3230m。地貌类型包括侵蚀剥蚀构造高山区、山前冰碛高台地区、洪积倾斜平原区和河谷平原区4个单元，地形复杂，相对高差大于200m。出露地层以三叠系碎屑岩和第四系松散堆积物为主，其中第四系包括下更新统冲湖积层、中更新统冰碛层、上更新统冲洪积物及全新统冲积物、泥石流堆积物。

评估区地处西域板块宗务隆山-兴海坳拉槽，区域地质构造复杂，但评估区内未发现活动断裂。地震动峰值加速度0.10～0.15g，相应地震基本烈度VII度，区域地壳稳定性属基本稳定区。多年冻土主要分布于赛宗寺西区段海拔4000～4800m范围，阴坡冻土上限1.1～1.2m、下限5.0～8.0m，阳坡冻土上限1.1～1.4m、下限3.1～5.4m，以富冰～饱冰冻土为主，融沉等级为融沉～强融沉。冻结层上水水位埋深0.5～3.5m，局部形成沼泽湿地。区内人类工程活动以牧业为主，地质环境影响程度一般。综上，评估区地质环境条件复杂程度为复杂。

3 地质灾害类型及分布特征

据野外实地调查，评估区发育崩塌、泥石流、冻融泥流和热融沉陷四类地质灾害，共计27处灾害点，呈现明显的空间分带性：大河坝区段以泥石流和崩塌为主，赛宗寺西区段以冻融泥流和热融沉陷为主。

3.1 崩塌灾害分布特征

评估区内发育崩塌1处（编号B1），位于大河坝右岸岸坡，为自然土质崩塌。崩塌体长60m，宽600m，平均厚度4m，预测总方量约14.4×10⁴m³。坡体地层为第四系上更新统冲洪积含泥砂砾石，泥质含量＞25%，坡面裸露，上部近似直立。该崩塌成因机制为大河坝河凹岸侵蚀导致坡脚掏蚀、土体松散软化，上部土体悬空后在自重和冻融风化作用下形成拉裂式崩塌。坡顶发育3条拉张裂隙，近期有掉块现象，目前处于欠稳定-不稳定状态。其致灾模式以小型崩塌和坠石为主，崩塌堆积体部分阻塞河道，影响局部水流方向。

3.2 泥石流灾害分布特征

评估区共发育泥石流沟20条（编号N1～N20），均分布于大河坝河谷两岸，属沟谷型泥石流，其中6条规模为中型，14条为小型。泥石流沟的发育具有以下典型特征。

（1）形成条件方面，泥石流形成区发育于山前冲洪积倾斜平原前缘斜坡带，地形呈三面环山、一面出口的漏斗状，沟谷断面多呈“V”型，主沟纵坡降128‰～450‰，山坡坡度30°～47°。松散固体物质来源丰富，主要为坡面侵蚀物源、沟道侵蚀物源和潜在不稳定斜坡物源三类。以N7泥石流为例，汇水面积1.6km²，相对高差340m，主沟纵坡399‰，松散物动储量约0.2×10⁴m³，其形成区、流通区均在拟建线路穿越范围内。水动力条件方面，评估区降水集中在6—9月，占全年降水量的80%以上，且多暴雨，为泥石流启动提供了充足水源。

（2）发育程度方面，依据泥石流易发程度量化评分（15项因素综合评价），20条泥石流沟均属中易发。其中N1、N2、N5、N6、N7、N9、N10、N11、N12等处于旺盛期，其余处于发育期。N1～N11共11条泥石流沟已造成农田损毁、房屋破坏等直接经济损失，威胁沟口居民和基础设施安全。

3.3 冻融泥流与热融沉陷灾害特征

冻融泥流5条（编号N21～N25）集中发育于赛宗寺西侧山前阴坡，最低高程4270m，属寒冷潮湿环境下表层饱和土冻胀-融化循环形成的坡面蠕滑灾害。其基本形态为沿坡向呈舌状突起，高出地面数厘米至十余厘米，纵向上前后堆叠呈阶坎状。N25冻融泥流规模最大，长1050m，宽1736m，面积1.27km²，呈片状发育。各冻融泥流坡度4°～7°，面积0.018～1.27km²不等。N25已造成通信线路线杆歪斜倾伏，表明该类灾害对线性工程具有显著危害。

热融沉陷1处（T26），呈月牙状，坑口面积

2.8m²，深1.4m，为多年冻土区过剩冰融化排出、土体固结沉陷所致。

此外，评估区二号区块广泛分布冻土草甸和冻土草沼不良地质现象。冻土草甸高20～30cm，底面直径20～40cm，成群分布；冻土草沼呈片状发育，面积0.2～1.5km²不等。这些现象指示了冻土上限附近反复的冻融活动，是冻土工程地质性质不良的直接表征。

4 地质灾害形成机制分析

高寒区地质灾害的发育受地形地貌、地层岩性、冻土环境和水热条件等多因素协同控制，不同类型灾害的成生机制存在差异，但在冻融耦合作用下表现出内在联系。

（1）崩塌的形成受控于河流侵蚀与冻融风化的双重作用。大河坝河凹岸侧蚀导致坡脚应力集中，坡体下部含泥砂砾石在河水浸泡下强度降低；寒季冻胀力使坡体裂隙扩展，暖季冻融交替加剧结构面劣化，最终在自重作用下发生拉裂式崩落。此类崩塌的活跃期与冻融季节密切相关。

（2）泥石流的形成体现了高寒区“降水驱动-冻融储备”的特殊模式。评估区泥石流的松散物源主要来源于寒冻风化碎屑和坡面冻融侵蚀产物——冻融作用使岩土体结构松散、裂隙发育，为泥石流储备了大量“原料”；而夏季集中降水则是启动泥石流的“扳机”。N7、N10等泥石流沟在2000—2002年间集中暴发，与降水丰沛年份高度对应，验证了这一机制。

（3）冻融泥流与热融沉陷则是多年冻土区特有的灾害类型。冻融泥流的形成机理可概括为：表层粉土在冷季冻结时沿坡面法向抬升，暖季融化时沿垂直方向回落，在重力分量驱动下产生净向下坡位移，经年累月形成蠕滑堆积。当冻土中过剩冰含量较高时（如含水量28.3%～38.6%的饱冰冻土），融化产生的体积收缩和排水固结则导致热融沉陷。这两种灾害均与冻土类型和含水量密切相关：强融沉-强冻胀饱冰冻土段灾害发育强烈，少冰冻土段则基本不发育。

整体来看，评估区地质灾害的分布与多年冻土环境呈现显著的空间耦合：大河坝河谷非冻土区的泥石流、崩塌以突发性、短暂性为特征；赛宗寺西多年冻土区的冻融泥流、热融沉陷则以缓变性、持续性为特征。这种灾害类型的空间分异是高寒区输电线路选线必须考虑的核心问题。

5 地质灾害危险性现状评估

依据《地质灾害危险性评估规范》（DZ/T0286-2015），采用危害程度与发育程度双指标综合判定危险性等级，对评估区各灾种进行现状评估。

5.1 崩塌危险性现状评估

B1崩塌目前处于欠稳定-不稳定状态，发育程度强。据调查访问，该崩塌尚未造成人员伤亡和直接财产损失，但崩塌体规模较大（$14.4\times10^4m^3$），且位于大河坝河岸，一旦大规模崩落可能堵塞河道、影响河水流向。按灾情指标判定危害程度小，综合判定危险性中等。

5.2 泥石流危险性现状评估

20条泥石流沟的危险性呈显著分异（表1）。N1～N11共11条已造成明确经济损失（农田损毁、房屋破坏等），危害对象为沟口居民和基础设施，危害程度大，叠加中易发发育程度，现状评估危险性大。以N10为例，该泥石流2000年和2002年两次暴发，累计半毁房屋16间、农田17亩，危险性大。N16危害沟口堆积扇耕地，危害程度中等，现状评估危险性中等。其余8条（N12～N15、N17～N20）无直接威胁对象，危害程度小，现状评估危险性小。

表1 泥石流灾害危险性现状评估结果统计

危险性等级	泥石流编号	数量	主要危害特征
危险性大	N1、N2、N3、N4、N5、N6、N7、N8、N9、N10、N11	11	已造成农田损毁、房屋破坏等经济损失
危险性中等	N16	1	危害沟口堆积扇耕地
危险性小	N12、N13、N14、N15、N17、N18、N19、N20	8	无直接威胁对象

5.3 冻融灾害危险性现状评估

II 号线沿途发育5条冻融泥流和1处热融沉陷，所处地层为强融沉-强冻胀饱冰冻土（含水量28.3%～38.6%，融沉系数$10<\delta\leqslant25$，冻胀率$6<\eta\leqslant12$），冻土工程地质性质极差。已有通信线路线杆在该区段发生歪斜或倾伏，表明冻融蠕滑和融沉对杆塔基础的破坏作用显著。发育程度强，危害程度中等（潜在经济损失中等），现状评估危险性大。

III 号线周边发育热融沉陷、冻土草甸、冻土草沼等不良地质现象，场地地基土属融沉-冻胀富冰-饱冰冻土。周边通信线路线杆亦有歪斜现象，但发育程度中等，无直接工程危害对象，危害程度小，现状评估危险性小。

6 结论与建议

(1) 高寒区某330kV输电线路评估区地质环境条件复杂，发育崩塌1处、泥石流20条、冻融泥流5条、热融沉陷1处，共四类27处地质灾害。灾害类型和分布受多年冻土环境控制，呈现明显的空间分带性。

(2) 崩塌B1发育程度强、危险性中等；20条泥石流中11条危险性大、1条危险性中等、8条危险性小；II号线冻融泥流与热融沉陷段危险性大，III号线周边危险性小。评估区地质灾害危险性总体呈现“河谷区以泥石流为主、冻土区以冻融灾害为主”的格局。

(3) 泥石流灾害是高寒区突发性最强的灾害类型，其“冻融储备-降水启动”的成生机制决定了6—9月汛期为灾害高发时段；冻融泥流和热融沉陷则呈现缓变累积特征，对塔基的长期稳定性构成持续性威胁。高寒区输电线路的地质灾害防治应同时关注突发性和缓变性两类灾害。

(4) 建议后续工作重点关注：II号线强融沉-强冻胀段应尽量避让或采取专项抗融沉基础设计；穿越泥石流沟的塔位应选取沟道较窄、泥位较低处采取大跨越方式通过，并校核泥石流冲击力和淤埋高度；多年冻土区塔基施工应严格控制在9—10月进行，最大限度减少对冻土热状态的扰动。

参考文献

[1] 杨杰,张婧,周丹,等. 2018—2024年青海省气象灾害预警发布特征分析[J].青海科技,2025,32(5):166-174.

[2] 赵斌滨.输电线路滑坡灾害风险识别与监测预警研究[D].中国地质大学,2025.DOI:10.27492/d.cnki.gzdzu.2025.000205.

[3] 曹小岩. 极端降雨条件下青海省地质灾害发育分布特征[J].黑龙江环境通报,2024,37(9):21-23.

[4] 魏占玺,青海省典型泥岩边坡生态重建关键技术研究.青海省,青海九零六工程勘察设计院有限责任公司,2023-11-27.

[5] 张静,保广裕,马守存,等. 青海省公路交通地质灾害特征与影响分析[J].青海环境,2021,31(4):176-180.

[6] 魏正发,曹小岩,张俊才,等. 青海省滑坡崩塌泥石流灾害时空分布特征[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(6):134-142.DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.06-16.

[7] 陈永萍.横断山区西北部冻土退化对地质灾害的影响[D].青海师范大学,2021.DOI:10.27778/d.cnki.gqhzy.2021.000115.

[8] 逯克思.青海省玉树州治多县地质灾害易发性分区评价[D].长安大学,2016.