

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.01.02

# 四川金川-小金公路沿线滑坡、崩塌影响因素分析

谢洪波<sup>1</sup>, 刘正疆<sup>1</sup>, 文广超<sup>1</sup>, 陈红旗<sup>2</sup>, 杨运航<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454000; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

**摘要:**高原山区地质灾害是交通线路最大的危害,而有效避险的关键是掌握沿途地质灾害发生的工程地质条件内因及诱导因素。本文以川西阿坝州高原山区金小公路沿线带状区域内的滑坡、崩塌为研究对象,以地理、地质、气象、遥感资料和实地调查为基础,运用空间分析和数理统计方法,对其形成的影响因素进行了系统研究。结果表明:(1)金汤弧形褶皱形成的同时,区内软硬互层的炭质泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩的地层发生劈理化,喜山期构造运动及频繁的地震活动,加剧了岩石的破碎程度,为区内滑坡、崩塌提供了物源,并为高山峡谷地形地貌的塑造创造了有利条件;(2)区内6-9月份的集中降雨是诱发滑坡、崩塌的主要因素;(3)高山、峡谷、高角度斜坡等地形地貌以及公路建设中坡脚开挖为崩塌、滑坡等埋下了隐患;(4)季节性冻融作用加速了基岩风化破坏,对滑坡、崩塌的形成具有促进作用。

**关键词:**滑坡;崩塌;金小公路;影响因素

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)01-0010-08

## Influencing factors of landslides and rockfalls along the Jinchuan-Xiaojin highway in Sichuan

XIE Hongbo<sup>1</sup>, LIU Zhengjiang<sup>1</sup>, WEN Guangchao<sup>1</sup>, CHEN Hongqi<sup>2</sup>, YANG Yunhang<sup>1</sup>

(1. Institute of Resource and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. China Institute for Geo-environmental Monitoring, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Geological hazards in plateau mountainous areas are the greatest hazards to traffic lines, and the key to effectively avoid risks is to grasp the engineering geological factors and inducing factors of geological hazards along the high way. Based on the geographical, geological, meteorological, remote sensing and field investigation, the paper systematically studies the influencing factors of the landslide and collapse in the belt area along the Jinxiao Highway in the plateau of Aba Prefecture in western Sichuan. The results indicate that: (1)the cleavage transformation of the carbonaceous mudstone, silty mudstone and siltstone in the zone, as well as The Himalayan period tectonic movement and frequent seismic activity intensified the fracture of rock mass, provided the material source for the landslide and collapse in the area and created favorable conditions for shaping the topography of the alpine valley; (2)concentrated rainfall in the region from June to September is the main factor triggering landslides and collapses; (3)high mountains, valleys, high-angle slopes and other terrain and geomorphology background and slope foot excavation are also an important factor that triggeringcollapse, landslides;(4)seasonal freezing-thawing accelerates the bedrock weathering failure and promotes the formation of landslides and rockfalls.

**Keywords:** landslides; rockfalls; Jinxiao highway; influencing factors

收稿日期: 2020-02-09; 修订日期: 2020-03-10

基金项目: 四川省自然资源科技计划项目(KJ-2018-23)

第一作者: 谢洪波(1968-),男,安徽砀山人,博士,教授,主要从事地学信息工程、地质灾害预测与评价方面的教学和科研工作。E-mail: XIEhb@hpu.edu.cn

通讯作者: 文广超(1979-),男,河南西平人,博士,副教授,主要从事地质灾害综合防治与生态环境监测、地学信息技术与“3S”集成应用等方面的教学与科研工作。E-mail: wengc366@163.com

## 0 引言

川西高原地处青藏高原东南缘的横断山区,区内地形多变、地质构造背景复杂、新构造运动强烈、内外动力作用活跃,是我国滑坡、崩塌等地质灾害的高发区<sup>[1-2]</sup>。近年来频发的地质灾害不仅威胁当地人民群众的生命财产安全,而且严重影响公路等基础设施的正常运转。金小公路是阿坝州县际公路的重要组成部分,也是小金县与金川县连通的重要生命线之一,更是沿线地区居民出行的唯一通道,沿线经过十个行政村和一些零散的牧区和景区,区内居民主要是藏族和羌族。沿线山高谷深<sup>[3]</sup>,地形复杂,近年来由于旅游业和其他经济产业的快速发展导致交通流量不断增加,每年雨季沿线的滑坡、崩塌灾害常常导致道路堵塞,危及过往车辆和行人的安全,也严重制约着地区经济发展。同时道路沿线日常维护和抢险工作难度大、耗资高<sup>[4]</sup>,因此对金小公路沿线地区地质灾害形成的影响因素进行分析,对于沿线地区的灾害防治、保护人民生命财产安全以及地区经济发展具有重要的现实意义。

针对上述问题,以四川金川-小金公路沿线地质灾害为对象,通过对小金县抚边乡至金川县城的四川金川-小金公路沿线约 89.26 km 带状区域内滑坡、崩塌灾害的现状调查和资料梳理,利用统计分析、空间分析和遥感解译等方法,对研究区内滑坡、崩塌的空间分布特征、发展变化规律进行系统的研究,从而对区内滑坡、崩塌形成的影响因素形成初步的认识,以期为区域地质灾害防治等提供依据。

## 1 研究区概况以及数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省西北部,阿坝藏族羌族自治州南端。金小公路沿金川县境内万林乡西里寨溪沟和小金县境内抚边乡万里城沟、美卧沟的“V”字形河谷两岸展布,中途翻越万里城梁子。西至金川县城,与 S211 省道相连,东至小金县抚边乡,与 S210 省道相通(图 1)。区内海拔最高 4 725 m,最低 2 078 m。

研究区内地层岩性简单,由老到新依次为三叠系西康群的杂谷脑组( $T_2z$ )、侏倭组( $T_3zh$ )、新都桥组( $T_3x$ )及第四系更新统(Qp)地层,以  $T_3zh$ 、 $T_3x$  出露最为广泛,其主要岩性分别为炭质板岩、粉砂质板岩和变质砂岩、粉砂质板岩等。

区域上处于松潘—甘孜地槽区,构造以褶皱为主,断裂构造规模小且不发育,褶皱构造表现为金汤弧形构造北侧环状构造形迹群<sup>[5]</sup>,近南北向延伸,弧形朝南,此

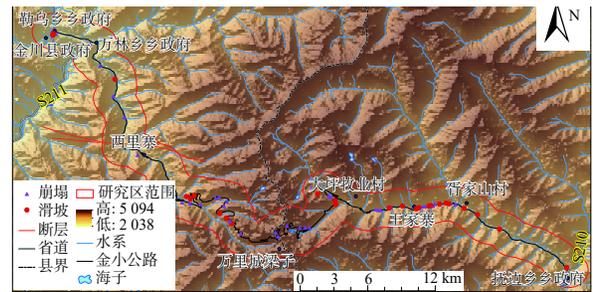


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

环状构造的四周以复式褶皱的形式存在。

本区属大陆性高原季风气候,具有明显的垂直分带性,冬寒夏凉,气温变化剧烈。区内年平均气温 12.4 ℃,无霜期 220 d,全年光照 2 214 h。

### 1.2 数据来源

本文研究采用研究区域道路、气象、数字高程、和灾害点 4 类数据,数据来源如下:

(1) 道路矢量资料来源于 OpenStreetMap 网站 (<https://www.openstreetmap.org>);

(2) 研究区气象资料来源于中国天气网 (<http://www.weather.com.cn>) 2009—2018 年数据;

(3) 收集研究区 1 : 50 000 的地形图资料,利用 ArcGIS 平台将其转换为数字高程模型 (DEM) 数据,并进行地理配准;

(4) 通过对地区高分辨遥感数据目视解译,圈定可疑的地质灾害点,汇总所有资料,合理地规划野外调查路线,对研究区内灾害点做野外调查验证和补充。最终确认在研究区内共发生滑坡、崩塌灾害共 62 处,其中滑坡 25 处、崩塌 37 处。

## 2 滑坡、崩塌发育特征

### 2.1 滑坡发育特征

沿线发育的滑坡以中小型浅层滑坡为主,其中中型 4 处,小型 21 处。从坡面形态来看,发育滑坡的斜坡平面上以圈椅状为主,其次为方形等。剖面上主要为凸形,其次为阶梯形;从力学性质看,主要有牵引式滑坡,占滑坡总数的 84%,其次为推移式滑坡,占滑坡总数的 16%。滑坡前缘多存在高 10~50 m 的临空面,后缘多呈弧形,斜坡多呈圈椅状。滑体主要为第四系残坡积物、冲洪积物;滑带土主要为黏土、亚黏土等组成;滑床为炭质板岩和绢云母板岩等组成。

### 2.2 崩塌发育特征

研究区内崩塌灾害分布广泛、活动频繁且以拉裂

式崩塌为主<sup>[6]</sup>, 占崩塌总数的 72.97%, 其次为滑移式和倾倒式, 占崩塌总数的 27.03%。规模上中型 2 处, 小型 35 处。破坏模式通常情况下为临空面的基岩岩体节理裂隙交错发育, 在长期的风化侵蚀以及重力作用下, 纵向节理与横向节理交错贯通, 被切割的孤立岩块沿节理裂隙面逐渐崩落<sup>[7]</sup>。崩塌堆积体宽度范围多在 10 ~ 30 m 之间, 崩落的岩土体块度 1 ~ 250 cm 不等。平面形态多为长条形和半圆形, 坡面形态有凸形和直线形两类。

### 3 滑坡、崩塌影响因素分析

滑坡与崩塌通常都属于斜坡岩土体失稳问题, 成因上往往相互关联, 可以作为一类问题考虑<sup>[8]</sup>。基于主导因素优先原则并结合野外调查结果, 综合考虑选取岩性、构造、地形、降雨、人类工程活动、季节性冻融和地震等条件对区内滑坡、崩塌形成的影响因素进行分析。

#### 3.1 岩性特征

地层岩性对滑坡、崩塌灾害的发育有着最为直接的控制作用。通过野外调查并结合 ArcGIS 空间分析对滑坡、崩塌地质灾害点和研究区地层进行叠加分析, 灾害点在不同地层中的发育规律如表 1 所示。

表 1 各地层中滑坡、崩塌发育频率

Table 1 Frequency of landslides and collapses developed in different strata

地层	主要岩性	发育密度/(处·km <sup>-2</sup> )	
		滑坡	崩塌
T <sub>3x</sub>	炭质板岩、粉砂质板岩及绢云母板岩	0.241	0.096
T <sub>3zh</sub>	变质砂岩、变质粉砂岩、含炭绢云母板岩、粉砂质板岩	0.043	0.249

由统计结果, 区内总体地层出露简单, 虽然出露有少部分三叠系中统杂谷脑组(T<sub>2z</sub>)和燕山早期第二幕葫芦海子黑云花岗岩, 但无灾害点发育。研究区的滑坡在新都桥组(T<sub>3x</sub>)的炭质板岩、粉砂质板岩等软质岩中发育 20 处, 占滑坡总数的 80%, 崩塌分布在侏倭组(T<sub>3zh</sub>)的变质砂岩、粉砂质板岩等硬质岩中有 29 处, 占区内崩塌总数的 78.38%。由于变质砂岩与板岩为浅变质岩, 属于易崩易滑工程地质岩组<sup>[9]</sup>, 软硬岩互层往往导致基岩强度虽然较大, 但性脆, 早期构造运动的剪切破坏使岩体结构破碎, 尤其张节理发育<sup>[10]</sup>, 导致坡体中应力分布不均匀、不连续, 在后期的应力调整过程中, 变质砂岩与板岩的强度差异和差异风化作用会导致在斜坡体某处先形成局部崩坏, 进而相互贯通失稳。实地调查过程中还发现表层第四系松散堆积物中混杂大量风化破碎物, 碎石含量达 20% ~ 70%, 颗粒间有较为明显

的架空迹象, 进一步导致岩土体稳定性降低。

#### 3.2 地质构造

地质构造是滑坡、崩塌形成过程中的关键内动力因素。研究区位于川青断块腹地南部, 被北东向的龙门山断裂带、北西向的鲜水河断裂带呈“V”字形交汇围限(图 2), 地质构造作用非常复杂<sup>[11]</sup>。研究区新构造运动表现为晚第四纪以来大面积间歇性急速抬升, 使河流快速下切, 形成深切峡谷地貌, 为群发性地质灾害的发生提供了有利的地形条件和空间基础<sup>[12-13]</sup>。

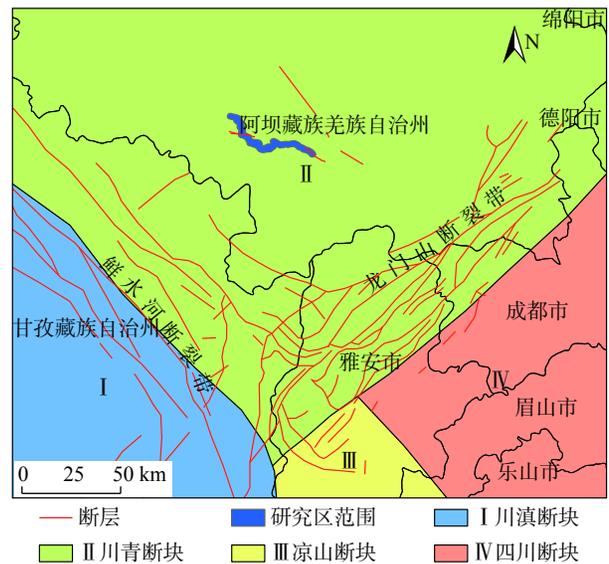


图 2 研究区构造背景<sup>[5-13]</sup>

Fig. 2 Geological structural background of the study area

研究区内断裂不发育, 仅西侧存在一条逆断层, 走向为北西西 280°左右, 倾向南南西, 倾角 55°, 延伸长度约 1 700 m, 据统计研究区坡向与断层走向大致平行的滑坡、崩塌数占灾害点总数的 38.7%。区内查明的小型褶皱构造共计 21 处, 所在斜坡体 12 处失稳, 7 处稳定性差, 2 处稳定。褶皱构造导致的斜坡体失稳多因层间挤压作用导致褶皱核部岩层变形强烈, 形成大量垂直层面的张节理且贯通性良好, 切割基岩体形成孤立块体, 为滑坡、崩塌灾害的形成提供了边界条件。同时褶皱出露面经过长期风化作用促使被分割的孤立岩块体进一步失稳, 在重力作用下逐渐产生大面积岩块崩落。

#### 3.3 地形条件

地形条件是崩塌、滑坡形成的最基本控制因素。基于该地区 DEM 数据, 运用 ArcGIS 空间分析功能对研究区的坡度、坡向和高程信息提取至各灾害点, 再根据实地勘察结果资料进行对比验证, 结果表明:

(1) 滑坡、崩塌的形成的控制因素中, 坡度占有非常重要的比例, 首先坡度大小控制着坡体能否形成有效

的临空面<sup>[14]</sup>,其次影响土体的抗滑能力与应力分布<sup>[15]</sup>。对研究区灾害点的坡度统计结果如图3(a)所示,区内滑坡、崩塌发育受坡度控制明显,滑坡多发生在坡度 $50^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 之间,占滑坡总数的76%;崩塌灾害主要发生在 $60^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 的斜坡上,占崩塌总数的67.57%。

(2)坡向能影响斜坡的光照条件、植被发育类型等呈现差异,从而间接影响不同坡向条件下的水热条件和沟谷发育状况。由图3(b)可知,研究区滑坡发生在北东向和南西向斜坡中数量最多,占滑坡总数的52%,崩塌发生在南向和南东向斜坡中数量最多,占崩塌总数的81.08%。

(3)高程决定了滑坡的滑动势能和崩塌的崩落运动特征。统计结果(图3(c))表明,研究区滑坡主要发生在3000~3500 m和2000~2500 m范围内,占滑坡总数的76.00%,崩塌主要发生在3000~4500 m范围内,占崩塌总数的94.59%。

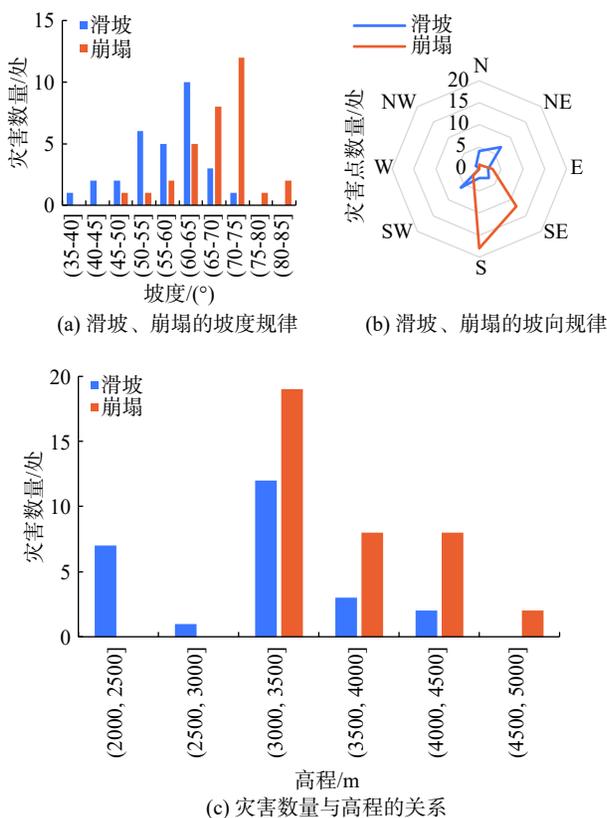


图3 灾害数量与坡度、坡向、高程的关系

Fig. 3 Relationship between the number of disasters and the slope, the aspect, and the elevation

### 3.4 降雨影响

短历时暴雨和降雨累积作用是研究区滑坡、崩塌灾害发生的最主要的诱发因素。由研究区2009—2018年气象资料显示,区内年平均降雨量626 mm,

6—9月份平均降雨量占全年降雨量的61.98%,其中全年逐月平均降水量峰值出现在6月份,占全年平均降雨量的21.09%,降雨天数达21天,占全年降雨天数总数的17.89%。研究区地质灾害的发生多集中在每年6—9月份(图4),其中6月发生频率最高,占灾害点总数的32.26%,地质灾害发生的高峰期与雨季同步。

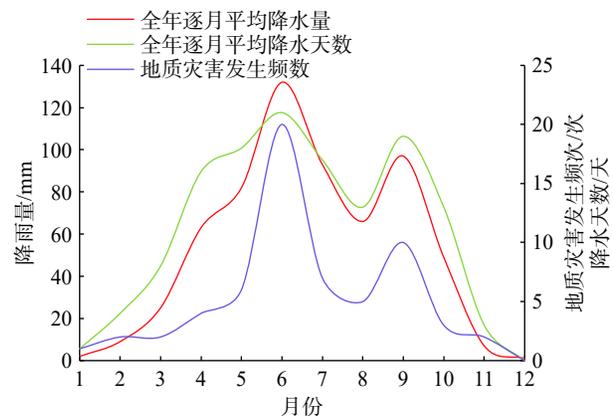


图4 地质灾害发生频率与平均降水量、降水天数关系

Fig. 4 Relationship between the frequency of geological disasters and the amount of precipitation and days of precipitation

一旦区内出现连续降雨或暴雨天气,大量雨水入渗坡体,一方面由于褶皱构造广泛分布而导致基岩裂隙发育,降水入渗使斜坡表层岩土体产生裂缝注水水楔作用而处于高含水状态,重量增加;另一方面由于区内斜坡表层土体堆积较浅并夹杂大量风化破碎物,加剧雨水下渗,基岩表面产生润滑和浮托作用<sup>[16]</sup>,大幅降低潜在滑动面与稳定岩体的抗拉强度,再加上高陡的天然地形,斜坡表层岩土体在重力作用下短期内就会失稳。因此研究区内发育的中小型滑坡、崩塌滞后效果不明显,基本在强降雨后短时间内就会形成。

### 3.5 人类工程活动

人类工程活动是滑坡、崩塌灾害重要诱发因素。实地调查过程中发现研究区内人类工程活动对沿线滑坡、崩塌的影响主要表现在三个方面:

(1)据《四川交通年鉴》记载,金小公路于2004年11月开工建设。通过遥感影像解译以及实地走访民众验证得知,公路修建前沿线地区基本无地质灾害发生,由于公路修建时受山区地形限制,切坡开挖首先破坏了坡脚处植被覆盖,使坡脚处岩土体失去原有的植物根系的支撑和保护作用;其次改变了内侧陡坡的应力分布,导致坡脚临空,加上岩体卸荷及风化等因素,导致斜坡大量失稳。实地调查结果显示区内坡脚开挖的一侧发育的滑坡、崩塌数占灾害总数的83.87%。

(2)公路沿线坡面和路面排水设施不完善,大量裂

隙水和大气降水一方面沿路面形成地表径流,长期冲刷不仅对路面形成侵蚀作用,而且会渗入路基,影响路基稳定性;另一方面在低洼处汇集浸润坡脚,增加了坡脚岩土体的重量和含水量<sup>[17]</sup>,从而易引发坡体失稳。

(3)研究区内有部分河道开挖,大规模采砂采石用于修房筑路等现象,导致河床下切且纵比降增加,水流落差加大,水动力条件增强,尤其在雨季河流流速增快,河流和溪沟宽度激增冲刷岸坡坡脚和公路路基,改变了两侧岸坡的初始应力分布状态,从而导致坡脚和路基在缺少护坡的情况下极易受损。

### 3.6 季节性冻融

季节性冻融对研究区滑坡、崩塌的形成具有重要促进作用。季节性冻融使松散沉积物受到扰动与再分选<sup>[18]</sup>,为滑坡、崩塌等地质灾害的发生提供了有利条件。研究区大部分海拔在 3 000 ~ 4 000 m,平均海拔 3 415 m。根据研究区气象资料显示,受高原季风气候的影响,区内各月平均温差在 12.2 ~ 15.2 ℃ 范围内,极端最大温差在 26.0 ~ 35.3 ℃ 范围内,最冷月为每年的 1 月份和 12 月份(图 5),每年的 11 月至次年的 3 月份为冰冻期,冻结期通常长达 4—5 个月之久,4 月中下旬进入解冻期。

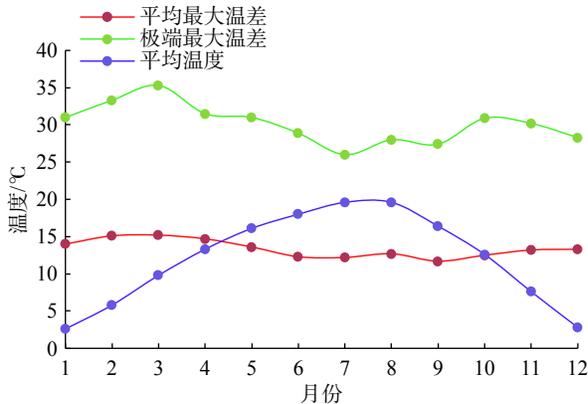


图 5 各月平均温度与温差变化规律

Fig. 5 Variation of monthly average temperature and temperature difference

受研究区海拔高度及温度差异强度的控制,再加上川西高原地区特有的土壤结构,通常斜坡表层土体有 10 ~ 20 cm 厚的腐殖层,与下层岩土体的物质组成和胀缩性等存在差异,从而导致研究区内季节性冻融作用对斜坡稳定性破坏严重,主要表现在如下两个方面:

(1)区内滑坡点周围多伴随季节性下降泉分布,冬季流量减小,多在 0.1 L/s 左右,由于进入冰冻期泉口冻结而导致斜坡体内地下水富集,土体大面积软化,表层土冻结导致含水量增加,产生静水压力浮托坡体,产生“季节性冻结滞水促滑效应”<sup>[19]</sup>;解冻期表层冻土逐渐

融化,冻结期滞留在坡体内部的水受重力作用影响,沿基岩裂隙从坡脚处排出,产生的动水压力使坡体内有效压力降低,破坏了斜坡整体稳定性,从而构成潜在滑动面。由于季节性冻融作用和 3—6 月份逐渐增加的降雨量导致滑坡主要发生在 11 月初的冻结初期和 4 月中下旬的冻融末期。

(2)沿线地区山高谷深,地形陡峭,小型褶皱构造发育,物理风化作用强烈,基岩节理裂隙发育,表层岩土体夹杂大量风化物而结构松散,强度较低,剧烈的温差产生反复冻融作用,不仅使表层土体浸润软化,下伏基岩承重增加,同时也使裂隙水在寒冷气候条件下冻结时体积急剧膨胀使岩石胀裂,使本就非常发育的节理裂隙不断扩大、加深<sup>[20]</sup>,最终在外界轻微扰动条件下便会引发基岩失稳崩落。

### 3.7 地震影响

地震是研究区滑坡、崩塌形成的又一内动力因素。地震会导致斜坡岩土体稳定性受到的一定程度的扰动<sup>[21]</sup>,长期的物理风化作用下使其进一步发展成为固体松散物质,为灾害孕育提供物源条件。研究区受地震的影响主要表现在以下 2 个方面:

(1)川西地区近年来地震活动频繁,强震明显受 NW 向、NE 向和近 SN 向活动断裂所控制<sup>[22]</sup>。研究区地处松潘—甘孜造山带,经历过多次剧烈的构造变动,本身处于地震活动频繁地带,虽然小金县内历史上没有发生过地震,但小金县境内地震频发,根据小金县相关地震资料记载,1976—1991 年期间共发生过 10 次 3 ~ 4 级地震<sup>[23]</sup>,有 3 次震级达到 5 级以上(表 2)。区内小型褶皱构造分布广泛,基岩节理裂隙发育,加之川西高原气候影响和物理风化剥蚀作用强烈,岩体卸荷现象显著,地震加剧了边坡岩土体的松动和破碎程度,对滑坡、崩塌灾害的发育起到促进作用。

表 2 小金县内历史上发生的 5 级以上的地震

Table 2 The occurred earthquake with the magnitude more than 5 in Xiaojin County in history

宏观震中	发生日期	震级
黄草坪—黑虎碛之间	1989年3月1日	5.0
梭罗寨附近	1989年9月22日	6.6
白果坪	1991年2月18日	5.2

(2)四川省“5·12”汶川特大地震期间在川西地区触发了大量的地质灾害<sup>[24]</sup>,根据中国地震局公布的汶川地震烈度图(图 6),研究区位于 VI ~ VII 度烈度带影响范围内,属于较重灾区。研究区内变质砂岩属坚硬岩组,板岩属较软岩组,受地震影响,硬岩地层中易发生崩塌类

型的灾害,而软岩地层中通常以滑坡居多<sup>[25]</sup>。同时由于高烈度区受地震影响强烈,不稳定斜坡在同震期或震后短期内就会失稳,剩下的短时间内发生的概率小,而低烈度区受地震影响较小,剩下的不稳定斜坡也更多,震后不稳定斜坡数量与烈度区级别呈反比关系<sup>[26-27]</sup>,因此区内在汶川地震后的3—5年内滑坡、崩塌等地质灾害进入高峰期。

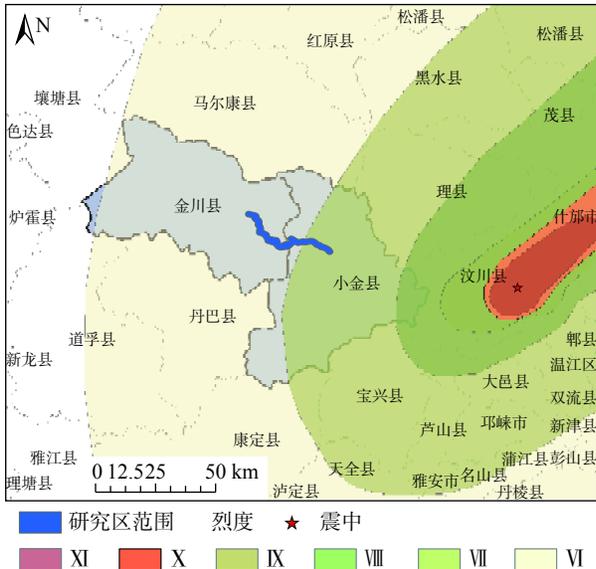


图6 汶川震后烈度区与研究区分布关系

Fig. 6 Distribution relationship between the seismic region and the study area after Wenchuan earthquake

## 4 结论与防治建议

### 4.1 结论

(1)滑坡、崩塌的分布与地层岩性有较好的对应关系。80%的滑坡分布在新都桥组( $T_3x$ )的炭质板岩等软质岩中最为发育,78%的崩塌则分布在侏倭组( $T_3zh$ )的变质砂岩等硬质岩中。区内软硬岩互层的特殊性导致岩层强度和抗风化能力存在差异,在构造运动下更加易破碎和失稳,为滑坡、崩塌的发生提供基础的物源条件。

(2)川西地区复杂的地质构造背景和活跃的新构造运动使研究区内形成深切高山峡谷地貌,为群发性地质灾害的发生提供了有利的地形条件和空间基础。地区广泛发育的小型褶皱和频发的地震扰动作用导致区内基岩节理裂隙发育,大幅降低斜坡体的稳定性,为滑坡、崩塌的形成提供了有利的边界条件。

(3)滑坡、崩塌分别集中发育于特定的地形条件下。滑坡多发生在坡度 $50^\circ \sim 65^\circ$ 、北东向和南西向斜坡之间,以及 $3\ 000 \sim 3\ 500\text{ m}$ 和 $2\ 000 \sim 2\ 500\text{ m}$ 高程范围内。崩塌灾害主要发生在坡度 $60^\circ \sim 75^\circ$ 、南向和南东向的斜坡上,以及 $3\ 000 \sim 4\ 500\text{ m}$ 高程范围内。

(4)暴雨和降雨累积作用以及人类工程活动是滑坡、崩塌形成的主要诱发因素。研究区雨季为每年的6—9月份,年均逐月降雨量和降雨天数达到峰值,大量雨水入渗不仅使岩土体重量增加,同时也使基岩表面产生润滑和浮托作用,导致斜坡体在短时间内大幅失稳,因此区内地质灾害发生的高峰期与雨季同步。人类工程活动对滑坡、崩塌的影响主要表现在公路修建时受地形限制开挖坡脚,坡脚处和路面排水不畅以及挖河采砂,破坏岸坡的初始应力分布。

(5)季节性冻融对滑坡、崩塌的形成具有重要的促进作用。冻结期和解冻期都会使岩土体含水量增加,软化土体,产生静水压力或动水压力,破坏斜坡体稳定性,易导致滑坡发生。反复冻融作用下使基岩本就非常发育的节理裂隙不断扩大、加深,严重破坏岩体的完整性,易产生崩塌。

### 4.2 防治建议

(1)今后研究区内及地质条件类似的高原山区修建道路时,应尽量避免坡度大于 $60^\circ$ 的高陡边坡。在切坡修路后,应结合工程地质条件对路基及高陡临空面进行加固或安装防护网。

(2)相关部门在每年的3—9月份期间,应加强公路沿线冻融及雨量雨情观测、地质灾害巡查,必要时采取适当的避让措施,同时在当地开展地质环境保护及地质灾害防治科普知识宣传,提高当地居民的地质灾害防治意识,不定期组织防灾演练,不断提升群众防灾减灾意识。

(3)在地质灾害易发段,特别是在圈椅状地形和基岩破碎强烈区,应设立警示标志并注明险情发生时的应急避险方案。

### 参考文献 (References):

- [1] 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454. [HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433-454. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王珂, 郭长宝, 马施民, 等. 基于证据权模型的川西鲜水河断裂带滑坡易发性评价 [J]. 现代地质, 2016, 30(3): 705-715. [WANG Ke, GUO Changbao, MA Shimin, et al. Landslide susceptibility evaluation based on weight-of-evidence modeling in the Xianshuihe fault zone, east Tibetan Plateau [J]. Geoscience, 2016, 30(3): 705-715. (in Chinese)]
- [3] 梁瑞锋, 王运生, 马保罡, 等. 杂谷脑河流域薛城段地质灾害分布特征与影响因素 [J]. 科学技术与工程, 2016,

- 16(21): 27-33. [ LIANG Ruifeng, WANG Yunsheng, MA Baogang, et al. Distribution characteristics and influencing factors of geohazards in Xuecheng section along the zagunao river [ J ] . *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(21): 27-33. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 4 ] 罗菲,任光明,李惠民,等.四川省道S216沿线滑坡、崩塌发育规律 [ J ] . *长江科学院院报*, 2019, 36(6): 37-41. [ LUO Fei, REN Guangming, LI Huimin, et al. Development rules of landslides and collapses along provincial highway S216 in Sichuan [ J ] . *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36(6): 37-41. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 5 ] 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. [ BA Renji, WANG Li, ZHENG Wanmo, et al. Characteristics and distribution of the geology disasters of the Dadu River in Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Sci & Technol Ed)*, 2011, 38(5):529-537.(in Chinese with English abstract) ]
- [ 6 ] 李毅,潘倩,张洪.小金县地质灾害的发育类型、分布特征及控制因素 [ J ] . *四川地质学报*, 2018, 38(2): 299-303. [ LI Yi, PAN Qian, ZHANG Hong. Type, distribution and control factors of geohazards in Xiaojin County [ J ] . *Acta Geologica Sichuan*, 2018, 38(2): 299-303. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] 蔡长发,陈廷方,成华雄,等.九环公路(平武段)崩塌地质灾害特征与成因分析 [ J ] . *西南科技大学学报*, 2012, 27(4): 58-64. [ CAI Changfa, CHEN Tingfang, CHENG Huaxiong, et al. The characteristic and cause hazards of jiuahuan analysis of collapse geological road (Pingwu area) [ J ] . *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2012, 27(4): 58-64. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 8 ] 刘传正.中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型 [ J ] . *地质论评*, 2014, 60(4): 858-868. [ LIU Chuanzheng. Genetic types of landslide and debris flow disasters in China [ J ] . *Geological Review*, 2014, 60(4): 858-868. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 邵铁全.滑坡地质灾害超前地质预判技术研究[D].西安:长安大学,2006. [ SHAO Tiequan. Research on the technique for pre-estimating geological hazard of landslide[D]. Xi'an: Changan University, 2006. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 朱煦,蒋礼.四川金川县城临江路斜坡稳定性分析 [ J ] . *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(4): 29-33. [ ZHU Xi, JIANG Li. Formation mechanism and stability of the Jinchuan landslide, Sichuan Province [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(4): 29-33. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] 段丽萍,郑万模,李明辉,等.川西高原主要地质灾害特征及其影响因素浅析 [ J ] . *沉积与特提斯地质*, 2005, 25(4): 95-98. [ DUAN Liping, ZHENG Wanmo, LI Minghui, et al. Geologic hazards on the western Sichuan plateau and their controls [ J ] . *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2005, 25(4): 95-98. (in Chinese) ]
- [ 12 ] 孟晖,张岳桥,杨农.青藏高原东缘中段地质灾害空间分布特征分析 [ J ] . *中国地质*, 2004, 31(2): 218-224. [ MENG Hui, ZHANG Yueqiao, YANG Nong. Analysis of the spatial distribution of geohazards along the middle segment of the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [ J ] . *Chinese Geology*, 2004, 31(2): 218-224. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] 杨振法.大渡河金川水电站外围抚边河断层的活动性研究[D].成都:成都理工大学,2006. [ YANG Zhenfa. Activity analysis of the Fubianhe fault near Jinchuan hydroelectric power station on Dadu River[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 14 ] 廖丽萍,于森,文海涛,等.广西东南部容县崩塌滑坡的易发性评价 [ J ] . *地球与环境*, 2019, 47(4): 518-526. [ LIAO Liping, YU Miao, WEN Haitao, et al. Evaluation on the susceptibility of collapse and landslide in Rongxian County, southeastern Guangxi [ J ] . *Earth and Environment*, 2019, 47(4): 518-526. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] 胡芹龙,王运生.基于GIS的川西地貌过渡带滑坡灾害易发性评价[J].成都理工大学学报(自然科学版),2018,45(6): 746-753. [ HU Qinlong, WANG Yunsheng. The susceptibility assessment of geological disasters in geomorphic transition zone based on GIS, western Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Sci & Technol Ed)*, 2018, 45(6): 746-753.(in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 周剑,邓茂林,李卓骏,等.三峡库区浮托减重型滑坡对库水升降的响应规律[J].水文地质工程地质,2019,46(5): 136-143. [ ZHOU Jian, DENG Maolin, LI Zhuojun, et al. Response patterns of buoyancy weight loss landslides under reservoirwater level fluctuation in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, 46(5): 136-143. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 李彩侠,马煜.四川东俄洛至炉霍段公路沿线地质灾害类型及其成因 [ J ] . *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(3): 105-110. [ LI Caixia, MA Yu. Types and causes of the geologic hazards along the highways along Dongeluo—Luhuo [ J ] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(3): 105-110. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 铁永波,白永健,宋志.川西高原的岩土体的冻融破坏类型及其灾害效应[J].水土保持通报,2015,35(2):241-245. [ TIE Yongbo, BAI Yongjian, SONG Zhi. Damage types and hazards effects from freezing mThawing process in plateau of

- western Sichuan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(2):241-245.(in Chinese with English abstract)
- [ 19 ] 吴玮江. 季节性冻融作用与斜坡整体变形破坏[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1996, 7(4):59-64. [ WU Weijiang. Seasonal freeze-thaw action and the entire deformation, failure of slope[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1996, 7(4):59-64.(in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 胡高社. 巨厚松散层高陡斜坡的形成机理及其防治工程效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2006. [ HU Gaoshe. Research on the formation mechanism and control engineering effect of giant and thickness layer high-steep slope[D]. Xi'an: Changan University, 2006. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 乔建平, 王萌, 吴彩燕, 等. 汶川地震扰动区小流域滑坡泥石流风险评估——以都江堰白沙河流域为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(4):1-9. [ QIAO Jianping, WANG Meng, WU Caiyan, et al. Landslide and debris flow risk assessment for small water sheels in the Wenchuan earthquake disturbance area: Taking the Baishahe River Basin in Dujiangyan as an example[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(4):1-9.(in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] 孟国杰, 任金卫, 甘卫军, 等. 川西地区地壳形变特征及其对汶川8.0级地震成因的启示 [ J ] . *国际地震动态*, 2008( 11 ): 114. [ MENG Guojie, REN Jinwei, GAN Weijun, et al. Crustal Deformation in Western Sichuan and Its Enlightenment to the Origin of Wenchuan Ms8.0 Earthquake [ J ] . *Recent Developments in World Seismology*, 2008( 11 ): 114. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 23 ] 李娟. 小金县震后地质灾害危险性评价研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012. [ LI Juan. Risk assessment of geological hazard after earthquake in Xiaojin country[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 24 ] 温铭生, 刘传正, 刘艳辉, 等. 汶川地震高烈度区崩滑流灾害区域预警[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(1): 10-19. [ WEN Mingsheng, LIU Chuanzheng, LIU Yanhui, et al. Regional warning of geological hazards in high seismic intensity area of Wenchuan Earthquake[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1):10-19.(in Chinese with English abstract) ]
- [ 25 ] 范利学. 崩滑流灾变的渗透推移及阶段跟踪[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009. [ FAN Lixue. Landslide mud-rock flow passage of time and stages of the penetration of the disaster track[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 26 ] 高会会, 裴向军, 崔圣华, 等. 汶川震区震后地质灾害发育分布及演化特征统计分析 [ J ] . *长江科学院院报*, 2019, 36( 8 ): 73 - 80. [ GAO Huihui, PEI Xiangjun, CUI Shenghua, et al. Geological hazards after earthquake in Wenchuan earthquake area: distribution and evolvement features [ J ] . *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019, 36( 8 ): 73 - 80. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 27 ] 郭长宝, 杜宇本, 张永双, 等. 川西鲜水河断裂带地质灾害发育特征与典型滑坡形成机理 [ J ] . *地质通报*, 2015, 34( 1 ): 121 - 134. [ GUO C B, DU Y B, ZHANG Y S, et al. Geohazard effects of the Xianshuihe fault and characteristics of typical landslides in western Sichuan [ J ] . *Geological Bulletin of China*, 2015, 34( 1 ): 121 - 134. (in Chinese with English abstract) ]