

# 公路沿线地质灾害孕灾环境与诱灾因子分析

王振刚, 赵甫

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 山区公路建设区内滑坡、泥石流等地质灾害的形成与其区内的地质环境因素密切相关, 地质灾害频发成为制约公路建设的重要因素。以新疆国道 G218 巩乃斯林场段为研究对象, 对国道沿线两侧进行工程地质测绘与勘探工作, 分析区内孕灾环境因素与诱灾因子。研究表明: 区内孕灾环境因素主要包括河流侵蚀、斜坡坡度、斜坡坡向、岩土体类型、断裂、大气降水六大因素, 它们共同作用构成了地质灾害的孕灾基础; 区内断裂构造活动加剧了灾害的形成与发展; 巩乃斯河流对其两岸斜坡坡脚的侵蚀作用是滑坡灾害发生的诱灾因子, 连续的强降雨是泥石流地质灾害发生的诱灾因子。研究成果可为山区高等级公路建设中地质灾害的孕灾环境和诱灾因子的识别、灾害绕避等方面提供参考。

**关键词:** 山区公路; 滑坡; 泥石流; 孕灾环境; 诱灾因子

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2020)05-0085-06

## Geological-disaster Environment and Disaster-inducing Factors Along the Highway in Mountain Area

WANG Zhengang, ZHAO Fu

(Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an, Shaanxi 710077, China)

**Abstract:** The formation of geological disasters in mountainous highway construction area, such as landslide and debris are closely related to the geological environment factors in the area, and it has become an important factor which restrict the highway construction. Through the geological mapping and exploration along the G218 Gongnaisi forest section of Xinjiang national highway, the distribution characteristics of geological environment and the main inducement factors were summarized. The results are as follows. The main environmental factors for risk are topography, water erosion, rock and soil structure, fault and rain. The fault tectonic movement aggravated the formation and development of disasters. The scour effect of water was the main inducement factor for geological risk and heavy rainfall was also the main inducement factor for debris in this area. This paper can be used to identify inducing factors for risk and suggested the avoidance of geological hazards for highway construction in mountainous areas.

**Keywords:** highway; Landslide; Debris; disaster environment; inducement factor

随着国家经济建设发展的需要, 公路建设工程数量日益增多, 尤其是山区公路建设工程, 已成为区域经济发展的重要交通运输纽带。西部山区公路建设中, 由于工程地质条件复杂, 崩塌、滑坡和泥石流成为常见的地质灾害类型<sup>[1-4]</sup>。地质灾害的发生经常与其所处的地质环境存在必然联系, 即孕灾环境是地质灾害形成与发生的基础条件<sup>[4-8]</sup>; 在一定的

外在因素的影响下, 诱发了地质灾害的发生, 即致灾因子成为地质灾害爆发的诱发因素<sup>[9-14]</sup>。

本文通过对新疆国道 G218 巩乃斯林场段沿线进行了野外勘探及调查研究的基础上, 总结调查区内造成地质灾害的主要的孕灾环境因素并揭示其诱灾因子, 为高等级山区公路建设选线阶段遇到的地质灾害孕育环境和诱发因子的识别、灾害绕避等方

面提供参考。

## 1 孕灾环境特征

新疆 G218 国道巩乃斯林场段,位于巩乃斯河流河谷区右岸漫滩上,全长约 5 km。研究区属侵蚀河谷地貌类型,受巩乃斯河流冲刷侵蚀影响,沟谷切割强烈、河道狭窄、沿河谷走向左右两侧发育连续陡坡,陡坡后缘区与常年积雪的高山区相连,且区内发育深大断裂与断层,裸露的岩石破碎、风化层较厚。图 1 为研究区内地形地貌特征图。由于区内工程地质条件复杂,崩塌、滑坡与泥石流等地质灾害频发。研究区内的 G218 国道位于滑坡坡脚与泥石流堆积区的路面均出现了不同程度的开裂变形,路面坑洼不平,影响车辆正常通行。



图 1 河谷区地形地貌图

通过对研究区内滑坡与泥石流地质灾害点的工程地质测绘、钻孔勘探、物探等勘察方法,查明了研究区内地质灾害点的形成机制、发育特点以及稳定性特征。最后,总结了研究区内地质环境特点,对灾害的形成、发育与其所处的地质环境的关系即孕灾环境特征,进行了深入分析。分析表明地质灾害的形成和发生与区内的六大地质因素:河流(溪流)、斜坡坡度、斜坡坡向、岩土体类型、断裂、大气降水紧密相关。

### 1.1 河流(溪流)

新疆国道 G218 巩乃斯林场段为侵蚀河谷区地貌类型,区内分布的水系主要为巩乃斯河流及高山区融雪而形成的冲沟溪流。巩乃斯河流位于沟谷底部,是一条逆流河,由东向西,流经新源县全境,与喀什河、特克斯相汇流入伊犁河。其支流发育,流域面积 4 123 km<sup>2</sup>,多年平均径流量 16.4 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。主要接受大气降水与高山区融雪溪流的补给。受河流冲刷侵蚀作用,河道下切较深、两侧斜坡的坡脚高陡。尤其在汛期,河水涨幅较大、水流湍急,坡脚常发生淘蚀塌岸现象。高山区融雪后融水汇聚形成溪流,

流经斜坡过程中,坡体表面形成宽窄、深度不一的冲沟,在冲沟汇聚后向巩乃斯河流排泄。

### 1.2 斜坡坡度

巩乃斯河流常年的冲刷作用,使得沟谷切割较深,两侧斜坡发育,尤其是形成高而陡的坡脚;高山区积雪受季节性冻融作用,消融后形成的溪流沿着斜坡向坡脚的沟谷排泄,既对斜坡表面进行冲刷,又切割斜坡成大小不一的冲沟。尤其是滑坡分布区,坡体整体呈上部陡峻、中部缓降、坡脚高陡的“靴”状。滑坡体前后缘高差介于 160 m ~ 200 m,坡脚临空面坡度介于 35° ~ 60°。高陡的斜坡易受外动力因素影响,在倾覆力矩作用下土体发生滑塌、岩石更易发生弯曲变形进而造成失稳<sup>[3]</sup>。

### 1.3 斜坡坡向

该区斜坡形成过程中主要受巩乃斯河流的冲刷与切割作用,河流沟谷两侧的斜坡在整体上倾向河谷底,且倾向与河道近于垂直。位于河道的坡脚处形成天然临空面,坡体受重力作用下,斜坡整体上有向坡脚倾覆变形趋势,坡脚区成为斜坡体的应力集中区。水流对坡脚的冲刷作用,加剧了坡脚岩土体的失稳变形,从而影响了坡体整体的稳定性。

斜坡后缘高山区积雪融化形成的溪流,流经斜坡过程中,对坡体也起到冲刷和切割作用,在斜坡侧方形成了深大冲沟,产生侧向临空面,坡体侧向约束的减弱降低了斜坡整体的稳定性。

### 1.4 岩土体组成

斜坡浅部地层主要为黏土与碎石夹杂而成的松散堆积物,其下为基岩层分布。斜坡中上部覆盖着松散堆积物(碎石土层),其孔隙、裂隙发育,松散且透水性强。主要由后缘出露的基岩风化、崩塌产生的碎块石在重力和水流冲刷作用下与粘土混合搬运并堆积而成。斜坡中下部主要由砂、卵砾石及黏土层组成,其表面植被发育,形成天然草地。

松散堆积层下部的基岩主要由软—硬质的泥岩和砂岩等软岩组成。斜坡受区内断裂与断层等地质构造作用的影响,岩层节理与裂隙发育,岩石易破碎;在受上部松散堆积物入渗水的影响下,岩石风化程度加剧,风化层较厚。风化的基岩层内,节理与裂隙发育的软弱结构面易于贯通发展,形成软弱破碎带。研究区内的滑坡钻孔勘探中,该软弱破碎带在大型基岩滑坡中,其滑动带中都有揭露。

### 1.5 断裂

研究区内西南侧为那拉提断裂带,在巩乃斯河流上游通过。东北方向分布一条近东西走向的断

层,该断层是由那拉提活动断裂控制发育。

通过对断裂露头的实地调研,断裂带发育条带状高岭土风化蚀变带和碎裂石英带,显示出断裂带物质经受过剧烈的挤压、变质作用及多期次活动,断裂带垂直宽度约 600 m ~ 800 m。依据相关资料分析,那拉提断裂带属于全新世活动断裂,有发生 7 级地震的构造条件,且为发震断裂。区内东北方向分布的近东西走向的断层,通过物探勘查,表明断层走向长度约 3 km。该断层与那拉提断裂带相距较近,推测该断层的形成受那拉提断裂的控制。

断裂的发育与运动,使岩体切割错断,在其推挤与张拉作用下,促进岩石节理与裂隙的发育,岩石更破碎,斜坡中岩石的整体稳定性受到加速破坏。

### 1.6 大气降水

调查区属亚欧大陆的中心地带,为典型的湿润大陆性中温带气候。山间谷温暖湿润,光热条件充足,冬季寒冷,夏季清凉。夏季降雨充沛,雨雪天气主要集中在夏季与冬季,年均降雨量 980 mm。区内的降雨与降雪是巩乃斯河流补给和高山冰雪覆盖形成的重要补给来源。大气降水补给河流后,河流汛期水量与过水面积的增大,加剧河水对岸坡的淘蚀强度;降水通过斜坡表面入渗,一方面会增加坡体重度,另一方面入渗的水流将软化斜坡岩土体,降低其抗剪强度值,从而影响了斜坡的稳定性。

## 2 地质灾害发育特征

通过对调查区的地质测绘与勘探,查明主要的地质灾害类型为滑坡和泥石流,其中滑坡地质灾害 13 处、泥石流灾害 1 处,且沿研究区内国道 G218 及巩乃斯河流两侧呈“线”状分布、在 F1 与 F2 断裂所辖的“入”字型区内呈“群”状发育。研究区内地质灾害分布特征如图 2 所示。

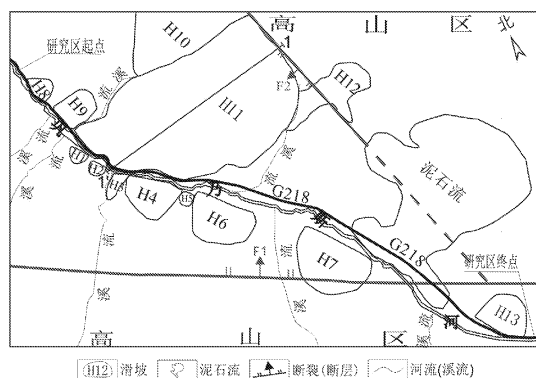


图 2 地质灾害分布图

### 2.1 滑坡地质灾害分布特征

滑坡灾害为研究区内的主要灾害类型,区内共分布 13 处,其中河流左岸 7 处(H1—H7)、右岸 6 处(H8—H13)。滑坡规模以大型为主,其中特大型 2 处、大型 8 处,中型 3 处;滑坡类型按照滑带位置分为两类:位于基岩顶面的松散堆积层滑坡、位于基岩内部的基岩型滑坡。

河流左岸滑坡规模主要为大一中型,滑体以松散的碎石土堆积层为主,滑体厚度介于 10 m ~ 25 m,滑床为中—微风化砂、泥岩基岩层,坡脚均为巩乃斯河流的阶地岸坡。且与 F1 那拉提断裂带距离越近,滑坡的滑体约厚、规模越大;河流右岸滑坡最深的滑带多位于强风化的砂岩与泥岩层中,滑体上部为松散堆积的碎石土层、下部为强风化的岩石层,且滑体较厚、厚度介于 15 m ~ 45 m,滑床为中—微风化的砂岩与泥岩,并且存在多级滑动面特征。如图 2 中的 H10、H11 为特大型滑坡,F2 断层由二者后缘切割通过。其中 H11 滑坡是研究区内滑体最长、滑带最深、规模最大的特大型滑坡:滑体中部纵向长度约 1 500 m、宽度约 900 m、滑体最深为地表以下 45 m。经野外钻孔勘探揭露与分析,滑动过程中滑体产生了多层滑动面即具有多期次滑动的特点,且滑体出现了分离。该滑坡滑动在整体上呈现出“分期、分级、分块”的滑动特征。

### 2.2 泥石流地质灾害分布特征

泥石流灾害分布在研究区内的巩乃斯河右岸上游(位置见图 2)。按规模分,该泥石流属大型;按位置划分,该泥石流属山坡型泥石流。泥石流区纵向长约 1 300 m,横向宽 860 m。泥石流形成区较宽广,坡度介于 40° ~ 60° 之间。其组成物质主要为后缘高陡基岩风化后崩塌产生的碎块石与黏土混合而成的碎石土松散堆积物,其沟床主要由砂岩、泥岩组成。泥石流形成区物源汇集面积较开阔,灾害发生后在其坡面上形成数条洪流槽;流通区通道迅速变窄,为一相对狭长的过流通道;堆积区呈扇形,粘土和碎石大量地堆积于巩乃斯河流阶地及漫滩。泥石流发生后推挤原河道向左岸变弯甚至改向,且国道 G218 在其堆积体中部穿过。

## 3 孕灾环境与诱灾因子分析

### 3.1 孕灾环境分析

新疆 G218 国道巩乃斯林场段,全长约 5 km。研究区属侵蚀河谷地貌类型,沟谷切割强烈、河道狭窄、沿河谷陡坡发育,陡坡后缘与受季节性冻融影响

的高山积雪区相连,区内发育深大断裂。特殊的地形地貌、不良地质形成区内地质灾害频发的孕灾环境。

### 3.1.1 地形地貌

(1) 斜坡坡度。滑坡分布区,坡体整体呈上部陡峻、中部缓降、坡脚高陡的“靴”状。滑坡体前后缘高差介于 120 m ~ 200 m,且滑坡坡脚临空面整体坡度介于  $35^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ,如表 1 所示滑坡坡脚临空面坡度与坡体前后缘高差统计表。

表 1 滑坡坡脚临空面坡度及坡体前后缘高程差统计表

滑坡规模	特大型	大型	中型
临空面坡度/ $^{\circ}$	35 ~ 45	38 ~ 46	48 ~ 60
高程差/m	180 ~ 200	130 ~ 165	120 ~ 150

由表 1 可看出,特大型滑坡坡脚临空面坡度稍缓,但其高程差最大;大型滑坡次之;而中型滑坡临空面坡度最大,高程差最小。坡体前后缘高程差较大,受重力影响下,斜坡整体有向坡脚方向变形的趋势;坡脚开阔的临空面坡度较大,在水流冲刷等外力影响下,临空面坡度进一步变陡,浅部松散堆积物易滑移变形、节理与裂隙较发育的深部反倾岩石层易发生弯曲变形。

(2) 滑坡坡向。河流沟谷两侧的坡体整体上倾向河谷底,且倾向与河道近于垂直。表 2 为滑坡主滑方向与河道走向夹角统计表。

表 2 滑坡主滑方向与河道走向的夹角统计表

滑坡规模	特大型	大型	中型
夹角/ $^{\circ}$	83 ~ 85	83 ~ 86	80 ~ 87

位于河道的坡脚形成天然临空面,直接接受河水的冲刷。特别是在降雨汛期,河水位的急剧抬升,水的流速提高加剧了淘蚀强度、尤其是扩大了水流对斜坡的淘蚀面积。水流侵蚀的岩土体稳定性变差易发生失稳滑塌,失去坡脚支撑的下方岩土体易发生牵引式的渐进破坏。

(3) 岩土体组成。斜坡中上部覆盖的松散堆积物(碎石土层),孔隙、裂隙发育,松散且透水性强。地表水易于入渗,其下覆的基岩顶面成为相对隔水层,入渗水流聚集基岩顶面,增大了碎石土层的重度,产生了静水压力。因此,碎石土层与基岩的接触面成为了潜在的滑动面,如 H11 滑坡 1-1' 工程地质纵剖面示意图(见图 3)中的“浅层滑动面”。

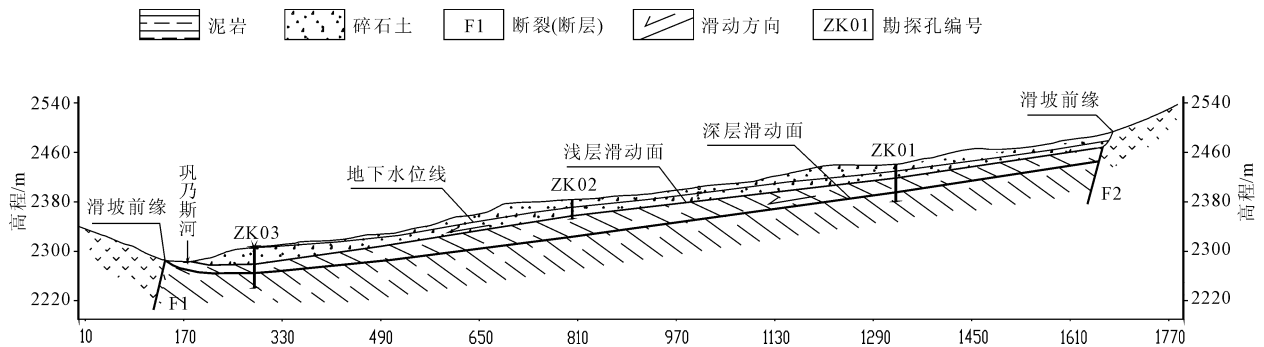


图 3 H11 滑坡 1-1' 工程地质纵剖面示意图

通过对研究区内滑坡附近基岩露头产状的量测与钻孔勘探的揭露,坡体内的基岩倾向坡内(产状  $29^{\circ} \angle 59^{\circ}$ ),属反坡结构。F1 与 F2 两条断裂将区内岩层切割并呈“入”字型,两条断裂所辖岩层在其活动过程中的推挤与拉裂作用下,节理与裂隙较发育,岩石破碎,尤其是靠近 F2 一侧的岩石更破碎。同时钻孔勘探试样显示,岩石层有弯曲变形迹象,说明倾向坡内的岩石发生了向坡外的弯曲变形过程(如图 3 中所示的位于上部松散堆积层与下部中一微风化基岩层之间的岩石弯曲变形带),进一步说明坡体内的软弱破碎带不断向深部发展,软弱破碎带的连续发展与贯通,形成了滑动面位于基岩内的基岩型

滑坡,如下图 3 中所示的滑动面位于基岩内的“深层滑动面”。

(4) 断裂。研究区内分布两条断裂(断层),F1 与 F2 两条断裂在区内相交并呈“入”字型。滑坡和泥石流中除一处滑坡外,其余均位于两条断裂左侧(上盘)。相关资料表明,活动断裂的上盘岩石较破碎,是地质灾害的频发区<sup>[11-12]</sup>。

巩乃斯河流上游通过的 F1 那拉提断裂带,经历过多期次活动,且活动剧烈。断裂活动过程中,受断裂挤压作用力影响,区内的岩土体易发生推挤、拉裂破坏,同时产生新的节理与裂隙,加速岩土体破碎,加剧了斜坡整体的稳定性降低。位于斜坡后缘的

F2断层,将完整的岩土体切割分离,促进了滑坡后缘失稳边界的形成。断裂活动的地质作用加剧了研究区内地质灾害的发生与发展过程。

(5) 水流侵蚀作用。斜坡沿巩乃斯河流两侧发育,坡脚岩土体受水流的淘蚀破坏与河谷下切的过程中,坡脚临空面面积逐渐扩大、坡度变陡。尤其是夏季接受降水补给后,河水位抬升、水流湍急,河水对坡脚松散堆积物的侵蚀作用加强,坡脚稳定性变差易发生失稳滑塌,变形的连续发展对后方岩土体的支撑作用减弱,后方岩土体也随着前方堆积物的滑动逐渐向坡脚方向产生渐进式的牵引变形。同时受坡脚临空面的扩大与变陡的连续发展,在重力的作用下,位于高陡斜坡体内的反倾岩层也随着河谷下切加深的过程,开始向坡外弯曲变形,即坡体内的基岩发生了反倾稳定—弯曲变形的过程。弯曲变形的岩层在进一步风化及断裂活动的作用下,岩层渐进破坏并出现软弱破碎带,此时岩层由弯曲变形阶段进入了折断失稳阶段,软弱破碎带的进一步发展并贯通后,产生了滑坡地质灾害。

斜坡后缘高山区的积雪融水排泄过程中,流经斜坡表面,入渗水流起到饱和、软化作用,斜坡岩土体重度,物理力学强度降低,促进了岩土体蠕变变形的发展。并且积雪融水后水流汇聚,在坡体上冲蚀成沟,将坡体切割成条、块状,斜坡侧向约束力减弱,坡体整体稳定性降低。同时,冲沟内的水流也对坡体进行了侧向渗流补给作用。

### 3.2 诱灾因子分析

研究区内滑坡类型按照滑带位置分为两类:河流左岸且滑动面位于基岩顶面的松散堆积层滑坡、河流右岸且滑动面位于基岩层中的基岩型滑坡。

#### 3.2.1 滑坡的诱灾因子

依据文前论述,斜坡上部堆积的碎石土层,松散且透水性强。地表水易于入渗,其下覆的基岩顶面成为相对隔水层,入渗水流聚集基岩顶面,增大了碎石土层的重度,堆积层储存了较多势能。当河流在低水位时期,高陡的坡脚基本保持稳定状态,如图4(a)所示;当高山融水与降水补给量增大,河流水位涨幅较大时,坡脚下部的松散堆积层浸入水位以下、在堆积层内形成滞留水位,如图4(b)所示;当河流水位降落后,坡体内的滞留水向外排泄时,滞留水产生动水压力,浸泡软化后的岩土体开始牵引式的失稳破坏,如图4(c)所示。

坡脚失稳对后方岩土体起到了渐进式的牵引作用,该牵引作用的持续增强,坡体内集聚的势能促进

了软弱带的形成与连通,而形成滑坡地质灾害。

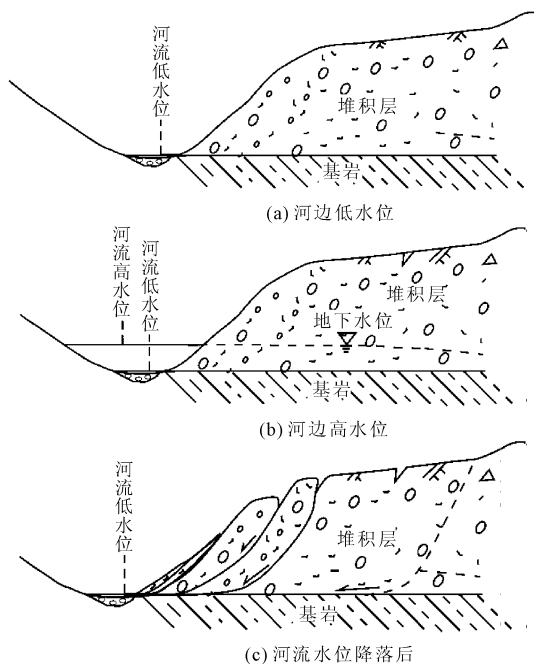


图4 坡脚松散堆积体失稳过程示意图

斜坡坡度与前后缘高差大、坡脚形成开阔的临空面,受重力影响下,斜坡整体有向坡脚方向变形发展的趋势。受入渗水流浸泡、断裂活动作用,坡体内的反倾基岩将经历了反倾稳定—弯曲变形过程。在重力与断裂活动作用下,岩石风化破碎加剧,当河道受水流侵蚀下切,将诱发坡脚基岩临空面变形加剧,从而牵引后方岩石发生渐进变形即后方岩石由弯曲变形阶段进入折断失稳阶段,岩层内软弱破碎带的进一步发展并贯通,最终产生了滑坡地质灾害。

因此,巩乃斯河流对其两岸斜坡坡脚的侵蚀作用是诱发区内滑坡地质灾害的主要因子。

#### 3.2.2 泥石流的诱灾因子

现场走访调研得知,研究区内的泥石流灾害是发生在夏季7月—9月的降雨期,且在集中降雨期内,坡面局部常出现岩土体的“塑性”滑动迁移,此期间也是堆积区国道G218路面破损最严重时期。

泥石流区域内受高山区积雪融水排泄的影响,坡面在水流冲刷作用下,地形逐渐变陡,形成“喇叭状”的物源汇聚区。雪山融水流经坡面排泄时,基岩沟床阻隔水流继续下渗后坡体浅部松散层吸水饱和,局部开始形成滞留水体。当夏季来临时,高山区雪山融水量增大并持续补给,松散堆积层内滞留水体的面积随之扩大,当遇强降雨或连续降雨天气时,

雨水对坡面进行垂直补给,垂直补给将坡面分散的滞流水体相互连通,饱和的松散堆积层在静水压力与浮托力的共同作用下,随着坡面溪流“一拥而下”而发生泥石流地质灾害。

因此,强降雨是泥石流地质灾害发生的主要诱灾因子。

## 4 结 论

(1) 新疆国道 G218 巩乃斯林场段属河流侵蚀河谷区,研究区内共有 13 处滑坡、1 处泥石流地质灾害;滑坡以大型为主,其中特大型 2 处、大型 8 处、中型 3 处;滑坡类型分为两类:位于基岩顶面的松散堆积层滑坡、位于基岩内部的基岩型滑坡。泥石流灾害分布在河流右岸上游,属大型山坡型泥石流。

区内地质灾害整体上沿河流呈“线”状分布,F1 与 F2 断裂相交形成的“入”字型区内呈“群”状发育。

(2) 研究区内孕灾因素主要为:河流(溪流)、斜坡坡度、斜坡坡向、岩土体类型、断裂、大气降水,它们是地质灾害形成与发生的基础。断裂构造运动使区内的岩土体发生推挤、拉裂破坏,同时产生新的节理与裂隙,加速岩土体破碎,从而加剧了灾害的形成与发展。

(3) 斜坡坡脚河流的侵蚀作用使得坡体失稳破坏首先从坡脚的渐进破坏开始,坡脚失稳对后方岩土体起到牵引破坏作用。因此,巩乃斯河流对其两岸斜坡坡脚的侵蚀作用是滑坡灾害发生的主要诱灾因子。

高山区积雪融水在位于高陡开阔的泥石流沟床上部的松散堆积层内,形成了分散的滞留水体,降雨垂直补给作用将分散的滞留水体相互连通,饱和的松散堆积层在静水压力与浮托力的共同作用下,诱发了泥石流灾害。因此,连续的强降雨是泥石流灾害发生的主要诱灾因子。

## 参考文献:

- [1] 吴华金,张琳洪.山区公路选线[M].北京:人民交通出版社,2012.
- [2] 陈远川,陈洪凯.山区沿河公路地质风险形成机制[J].灾害学,2012,27(3):6-11.
- [3] 马 翊.高原山区公路水毁调查与防治措施[J].路基工程,2013(5):181-184.
- [4] 乔彦肖,李密文,张维宸.基于遥感技术支持的地质灾害及孕灾环境综合评价[J].中国地质灾害与防治学报,2002,13(4):85-89.
- [5] 殷跃平.中国地质灾害减灾战略初步研究[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):4-11.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 巨能攀,侯伟龙,赵建军,等.安县睢水河流域地质灾害发育、分布及影响因素[J].山地学报,2010,28(6):732-740.
- [9] 聂 娟,连 健,胡卓玮.汶川地震灾区滑坡空间特征变化分析[J].地理研究,2014,33(2):214-224.
- [10] 蒋德明,李益敏,鲍华姝.泸水县滑坡孕灾环境因素敏感性分析[J].自然灾害学报,2016,25(4):109-120.
- [11] 许 强,裴向军,黄润秋,等.汶川地震大型滑坡研究[M].北京:科学出版社,2009.
- [12] 武 鹤,刘春龙,葛 琪.寒区土质边坡冻融滑塌影响因素的研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(1):1-5.
- [13] 柳 旻,姚晨辉,张 超,等.东南亚某水电站厂房边坡开挖变形特征及成因机制分析[J].水利与建筑工程学报,2019,17(5):133-137.
- [14] 孙超伟,柴军瑞,许增光,等.求解三维均质边坡安全系数的稳定性图表法研究[J].岩土工程学报,2018,40(11):2068-2077.