

doi: 10.12029/gc20220323005

万飞鹏, 杨为民, 邱占林, 向灵芝, 渠敬凯, 吴季寰, 张田田. 2023. 甘肃岷县纳古呢沟滑坡-泥石流灾害链成灾机制及其演化[J]. 中国地质, 50(3): 911-925.

Wan Feipeng, Yang Weimin, Qiu Zhanlin, Xiang Lingzhi, Qu Jingkai, Wu Jihuan, Zhang Tiantian. 2023. Disaster mechanism and evolution of Nagune Gully landslide-debris flow disaster chain in Minxian County, Gansu Province[J]. Geology in China, 50(3): 911-925(in Chinese with English abstract).

甘肃岷县纳古呢沟滑坡-泥石流灾害链成灾机制及其演化

万飞鹏^{1,2,3}, 杨为民^{1,2}, 邱占林⁴, 向灵芝⁵, 渠敬凯^{1,3}, 吴季寰^{1,2,3}, 张田田^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 4. 龙岩学院, 福建 龙岩 364012; 5. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要:【研究目的】纳古呢沟位于甘肃省岷县茶埠镇耳阳沟流域, 构造上处于临潭-宕昌断裂分支断裂带内, 是一条小规模高频泥石流沟。流域内发育的滑坡使得流域产生特殊的滑坡-泥石流灾害链, 该灾害链的成灾机制和演化过程是值得深入研究的问题。【研究方法】通过野外调查及遥感解译, 结合室内试验等手段, 厘清了纳古呢沟灾害发育特征, 研究了滑坡-泥石流灾害链的成灾机制, 剖析了该小流域内断裂活动下的滑坡-泥石流灾害链演化过程。【研究结果】研究表明: 纳古呢沟内滑坡-泥石流灾害链表现为泥石流-滑坡-溃决型洪水泥石流往复发展的形式, 断裂现今活动导致沟内松散物源及不稳定坡体的发育, 奠定了灾害链形成的物质基础, 高频短时强降雨或连阴雨激发泥石流多次发生, 泥石流侧蚀沟谷坡脚使得坡体失稳形成滑坡, 滑坡堵塞沟谷形成堰塞湖, 溃坝后形成溃决型洪水泥石流。灾害链的演化过程表现为: 泥石流初发冲蚀沟道阶段、坡体变形逐渐接近临界失稳阶段、滑坡体下滑堵塞沟道形成堰塞湖阶段、堰塞湖溃决形成溃决型洪水泥石流阶段、对岸坡脚侵蚀坡体失稳下滑阶段、泥石流-滑坡-溃决型洪水泥石流往复发展阶段。【结论】纳古呢沟内灾害链的形成, 是现今断裂活动、短时集中降雨或连阴雨共同作用的结果。纳古呢流域内每年雨季泥石流的多次发生与滑坡的蠕滑变形, 导致纳古呢沟泥石流-滑坡-溃决型洪水泥石流灾害链往复进行。

关键词: 灾害链; 断裂带; 泥石流; 滑坡; 形成机制; 地质灾害调查工程; 纳古呢沟; 岷县; 甘肃省

创新点: 厘清了活动构造区小流域内滑坡-泥石流灾害链的成灾机制; 提出了小流域内泥石流-滑坡-溃决型洪水泥石流往复发生的灾害链演化模式。

中图分类号: P694 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)03-0911-15

Disaster mechanism and evolution of Nagune Gully landslide-debris flow disaster chain in Minxian County, Gansu Province

WAN Feipeng^{1,2,3}, YANG Weimin^{1,2}, QIU Zhanlin⁴, XIANG Lingzhi⁵,
QU Jingkai^{1,3}, WU Jihuan^{1,2,3}, ZHANG Tiantian^{1,2,3}

收稿日期: 2022-03-20; 改回日期: 2022-05-24

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察项目(2019QZKK0902)资助。

作者简介: 万飞鹏, 男, 1997年生, 硕士生, 地质工程专业; E-mail: 1947384989@qq.com。

通讯作者: 杨为民, 男, 1965年生, 博士, 研究员, 从事地质灾害、工程地质、构造地质等方面研究; E-mail: snon_72@163.com。

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Beijing 100081, China; 3. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 4. Longyan University, Longyan 364012, Fujian, China; 5. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing 400074, China)

Abstract: This paper is the result of geological hazards survey engineering.

[Objective] Naguni gully is located in the Eryang watershed in Chabu Town, Minxian County, Gansu Province. Structurally, it is situated within the Lintan–Dangchang fault branch zone. It is a small–scale, high–frequency debris flow gully, and the development of landslides within the watershed results in a unique landslide–debris flow disaster chain. The mechanisms and evolutionary processes of this disaster chain are worthy of in–depth study. **[Methods]** Through field investigations, remote sensing interpretation, and laboratory experiments, the development characteristics of the Nagune gully disaster were clarified. The disaster mechanisms of the landslide–debris flow chain were studied, and the evolutionary process of the landslide–debris flow disaster chain under fault activity within the small watershed was analyzed. **[Results]** The research results indicate that the landslide–debris flow disaster chain in Nagune gully manifests as a cyclic development of debris flows, landslides, and burst flood debris flows. The current fault activity results in the development of loose materials and unstable slopes within the channel, establishing the material basis for the formation of the disaster chain. High–frequency, short–duration heavy rainfall or continuous rainfall triggers multiple occurrences of debris flows. The lateral erosion of the gully foot by debris flows causes slope instability and leads to landslides. The landslides block the gully, forming a barrier lake, and the breach of the barrier lake results in burst flood debris flows. The evolutionary process of the disaster chain includes the initial erosion phase of debris flow, gradual deformation of slopes approaching critical instability, the formation of a blocked gully due to landslide movement, breach of the barrier lake leading to burst flood debris flows, erosion of the opposite slope foot causing further instability and downslope movement, and the cyclic development of debris flows, landslides, and burst flood debris flows. **[Conclusions]** In summary, the formation of the disaster chain in Nagune gully is the result of current fault activity and the combined effects of short–duration, concentrated rainfall or continuous rainfall. The repeated occurrence of debris flows during the rainy season and the creeping deformation of landslides within the Nagune watershed contribute to the cyclic development of the landslide–debris flow–burst flood debris flow disaster chain.

Key words: fault zone; disaster chain; debris flow; landslide; formation mechanism; geological hazards survey engineering; Nagune gully; Minxian County; Gansu Province

Highlights: The disaster mechanism of landslide–debris flow disaster chain in small watershed in active tectonic area was clarified, and the disaster chain evolution model in small watershed as debris flow–landslide–collapse flood debris flow reciprocate process was put forward.

About the first author: WAN Feipeng, male, born in 1997, master candidate, majors in geological engineering; E–mail: 1947384989@qq.com.

About the corresponding author: YANG Weimin, male, born in 1965, doctor, researcher, engaged in the study of geological hazards, engineering geology and structural geology; E–mail: snon_72@163.com.

Fund support: Supported by the Second Comprehensive Scientific Investigation of the Qinghai Tibet Plateau (No.2019QZKK0902).

1 引 言

青藏高原东北缘处于青藏高原块体、阿拉善块体、鄂尔多斯盆地交汇地带,是青藏高原向大陆内部扩展的最前缘地带,因此造成了东北缘形变量大且构造活动性强的特点(张培震等,2003;叶茂盛,2018)。航空磁测等研究表明(Xiong, 2021),青藏高原现今强烈隆升,导致高原块体向东北向扩展,

岷县—武都段3.6 Ma以来平均的隆升速率在0.42~0.57 mm/a(郭进京等,2006),地壳的变形加剧,形成由断裂和褶皱构成的复杂构造带和地震活动带。该区域发育多条活动性很强的区域性大断裂,包括西秦岭北缘断裂、海原断裂、阿尔金断裂、祁连山断裂、东昆仑断裂等,这些断裂活动引起地震频发,在历史上均发生过强烈的构造地震活动(张培震等,2006;唐红涛等,2019)。强烈的构造运动除导致地

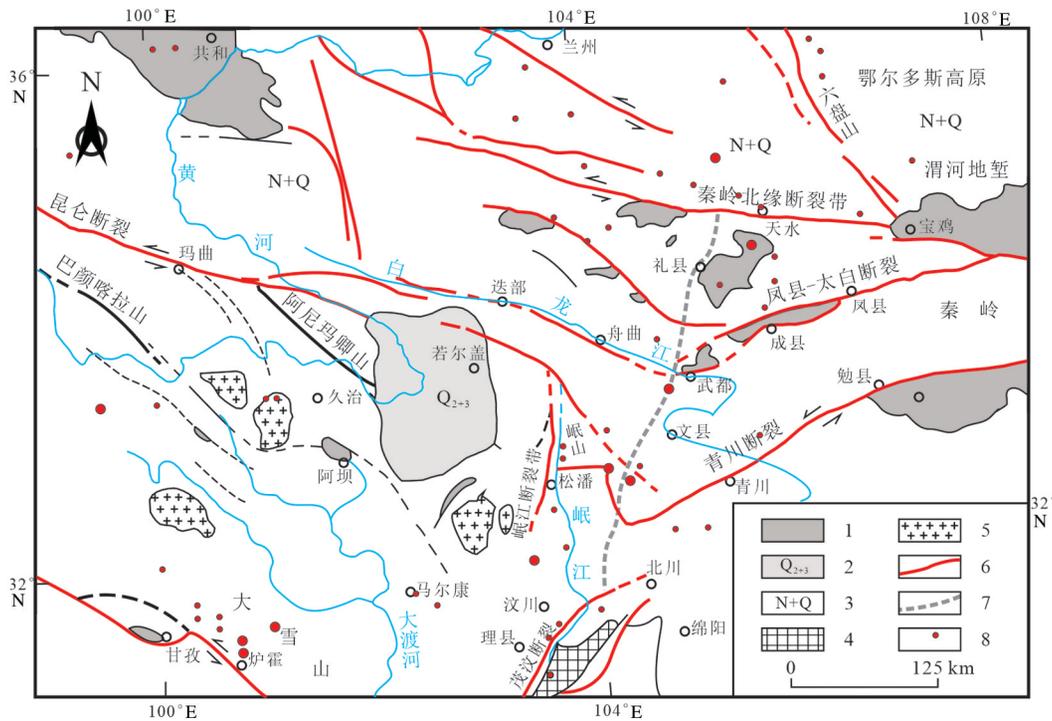


图1 研究区块体、断裂及地震分布图(据张岳桥等,2005修改)

1—新近系;2—中晚更新统;3—新近系—第四系;4—基底冲断块体;5—花岗岩;6—活动断裂;7—地形梯度带;8—历史地震(大圆为7级以上地震,小圆为6~7级地震)

Fig.1 Blocks, faults and seismic distribution in study area (modified from Zhang Yueqiao et al., 2005)

1—Neogene; 2—Middle late Pleistocene; 3—Neogene to Quaternary; 4—Basement thrust block; 5—Granite; 6—Active fault; 7—Topographic gradient zone; 8—Historical earthquakes (Large circle are earthquakes with $M \geq 7$ and small circle are earthquakes with 6-7 M)

震多发,研究区周边历史上7级以上地震发生16次(图1),如1973年的炉霍7.6级地震、2008年的汶川8.0级地震等,活跃的地震使得岩土体的稳定性大大降低,在特殊的地形及气象条件下,常导致崩塌、滑坡、泥石流灾害的发生(殷跃平等,2017)。

由于地质环境恶劣,活动断裂带内滑坡、泥石流的形成机制及演化模式往往较单体地质灾害复杂。国内有学者对断裂带内滑坡、泥石流进行了较为详细的研究。断裂带滑坡是指其形成受断裂构造、断裂活动所控制且沿断裂带发育分布的、滑动方向与断裂走向基本一致的滑坡。杨为民等(2014)基于坪定—化马断裂带滑坡的研究,提出断裂带滑坡的形成是在断裂的现今活动与降雨、前缘坡脚冲刷、堆载作用等耦合作用下形成,常呈现蠕滑累进变形的特点。郭长宝等(2015)通过对鲜水河断裂带地质灾害的研究,认为断裂活动对滑坡的影响主要表现在断裂活动通过影响岩体结构对滑坡产生的控制作用、断裂带剧烈活动对滑坡的诱发

作用、断裂蠕滑引起的滑坡变形三大方面。以上研究表明,断裂对滑坡的控制作用可总结为断裂对坡体形态、结构及应力环境的改变,而断裂对泥石流灾害的影响往往通过影响其物源供给及地形地貌实现。唐永仪(1992)认为,在新构造运动的活跃期,地貌差异的形成及崩塌、滑坡的发展处于旺盛阶段,泥石流活动的旺盛阶段发生在这一阶段之后。孙梦宇(2020)指出,历次构造变动及断裂新活动过程,都会对断裂带及其周围岩体造成损伤破坏,岩体发育节理裂隙进而破坏其完整性,最终导致断裂带沿线形成大量的松散物源堆积。

对于断裂对滑坡的影响与断裂对泥石流活动的影响,以往的研究在断裂活动诱发的单类型地质灾害的研究上取得了一定的成果,厘清了断裂对单体灾害的控制机制,但断裂带内灾害链的形成过程及演化研究较少,对于滑坡-泥石流灾害链之一常见的灾害转化过程的研究,常见的如“滑坡-堰塞坝-泥石流”过程,即在降雨活动下诱发的滑坡灾

害,在沟谷或江中形成的堰塞坝,坝体溃决诱发泥石流灾害这一过程(付尚瑜,2011;王涛等,2020)。同时,也有学者提出,泥石流过程往往可以通过侵蚀、冲刷作用促成或促发滑坡过程的发生,使得滑坡、泥石流呈现出往复的发展关系(冯玉涛和肖盛燮,2009),或降雨先期诱发滑坡,后期启动泥石流,从而构成滑坡泥石流灾害链(冯文凯等,2022)。由此可见,滑坡-泥石流灾害链发展过程并非单一的危害发展过程,而国内现有的灾害链研究又多局限于自然状态下的灾害转变过程,很少涉及断裂带这一特殊构造背景下的灾害链研究,尤其是断裂活动下滑坡-泥石流的动态演化过程研究。在活动断裂带内,断裂活动的参与使灾害链的演化更为复杂。因此,本文以青藏高原东北缘岷县耳阳沟支沟——纳古呢沟发育的滑坡、泥石流为典型案例,基于流域地质环境背景,分析纳古呢沟内泥石流及滑坡的发育特征,研究断裂带滑坡、泥石流及滑坡-泥石流灾害链的形成机制,探讨断裂带内滑坡-泥石流灾

害链的演化过程及发展规律,以期在活动构造区地质灾害防灾减灾提供科学依据。

2 地质背景

岷县纳古呢泥石流沟发育于耳阳沟左岸,系耳阳沟流域一级支沟。耳阳沟流域构造上处于临潭—宕昌断裂及其分支断裂带。临潭—宕昌断裂西起合作,向东经临潭、岷县至宕昌南东与礼县—罗家堡断裂交汇,断裂带全长大于250 km,由数条规模不等,长20~60 km,相互平行或斜列的断裂组合而成,断裂破碎带宽度在300 m以上,断裂带影响宽度范围在5~10 km。临潭—宕昌断裂走向NW,主断裂(以下简称 F_1)及其分支断裂—北西向茶埠—西江断裂(以下简称 F_{1-1})斜穿耳阳沟纳古呢沟小流域(图2)。已有的研究表明(刘廷,2015;高明星等,2015;刘方斌等,2018;李光涛等,2020),临潭—宕昌断裂为第四纪活动断裂,断裂带内地震频发,构造活动强烈。受断裂现今活动的影响,漳县—岷县

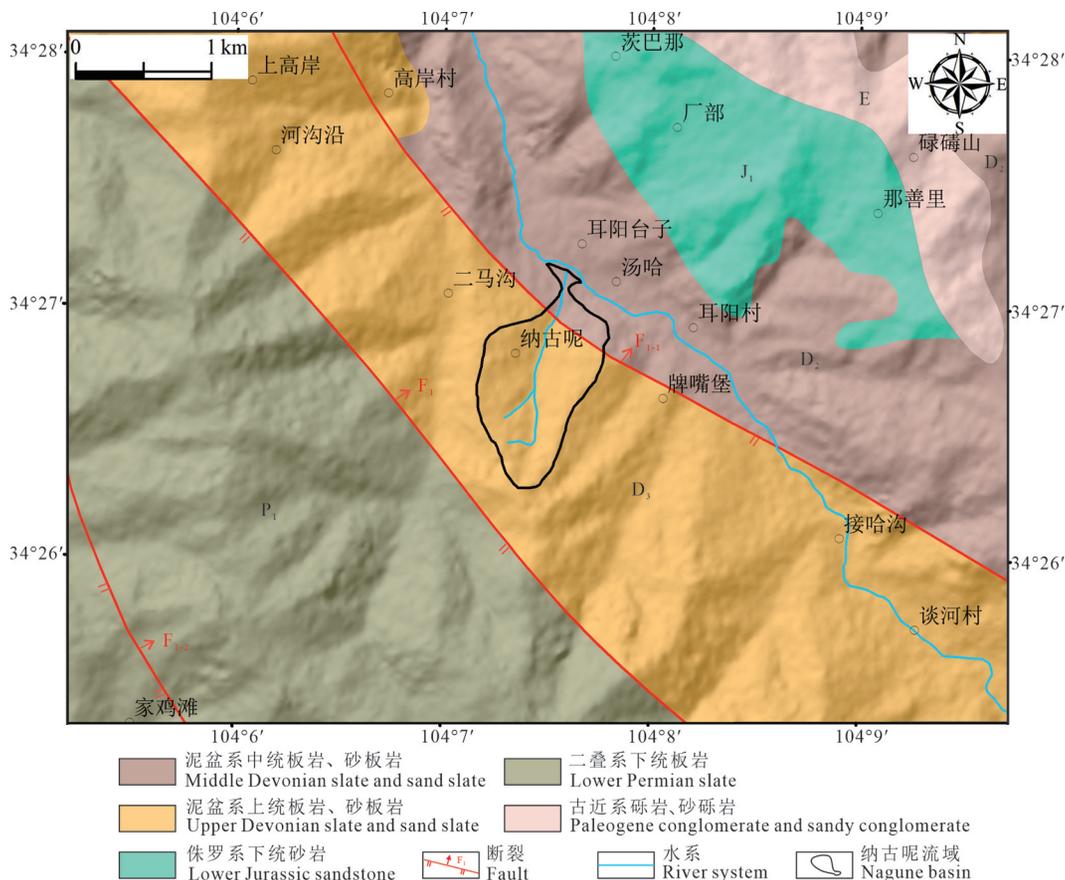


图2 纳古呢沟流域及周边地质简图

Fig.2 Geological sketch of debris Nagune gully and surrounding areas

在2013年7月22日发生6.6级地震,诱发大量的滑坡、崩塌,为泥石流提供了大量的固体物质。

临潭—宕昌断裂分支断裂(F₁)西起岷县茶埠乡,向东经高岸村、牌嘴堡,走向由北西转为近东西又转为北北西,断裂长度约20~30 km,断裂带影响宽度范围在1~2 km,断裂破碎带发育,活动性较强。该断裂上盘以上泥盆统(D₃)灰绿色板岩为主,地层总体倾向NE,倾角20°~60°,近断裂处地层产状变陡;下盘以下二叠统(P₁)黑色含炭质板岩及中泥盆统(D₂)灰绿色板岩为主,近直立,断裂破碎带及影响宽约300~1000 m,由搓碎的碎裂板岩、断层角砾岩、断层泥组成,岩体十分破碎。

纳古呢沟小流域内出露上—中泥盆统青灰—灰黑色板岩及砂板岩,且以板岩为主,其中上泥盆统地层总体倾向NE,倾角30°~50°,中泥盆统板岩近于直立,受断裂活动影响,板岩岩体破碎严重,发育多组节理裂隙,其强—全风化带厚>10 m,岩体完整性差,风化带上覆第四系黄土,黄土厚度多在0~6 m,局部可达6~10 m。

3 纳古呢沟泥石流及滑坡特征

3.1 泥石流

3.1.1 泥石流基本特征

纳古呢沟泥石流流域面积0.886 km²,主沟长度1.56 km,主沟流向22°,流域高差330 m,沟谷纵坡降210‰,流域形态呈纺锤形,沟谷呈“V”字型(图3a)。该泥石流沟的形成区面积较小(图4c),为0.27 km²,流通区沟道长为940 m,堆积区为沟口至耳阳河主河段,泥石流堆积扇对主河道有明显的挤压作用(图3b)。纳古呢沟每逢雨季特别是强降雨时,均发生泥石流,为沟谷型高频泥石流沟。

现场实测纳古呢冲积扇,可见冲积扇大致由2次较大规模的泥石流堆积及数次小规模堆积体组成。其中,第I期次泥石流堆积扇长150 m,扇径200 m,面积约为15000 m²,均厚为2 m,堆积体扩散角为80°,计算其堆积量为3×10⁴ m³;第II期次泥石流堆积扇长75 m,扇径80 m,面积约为3000 m²,均厚为0.5 m,堆积体扩散角为72°,计算其堆积量为1500 m³。除2期次稍大规模的泥石流堆积体外,还可见多期次的小规模泥石流堆积体,多期次堆积体呈现“扇切扇”的位置关系(图3c),即新扇堆积前

泥石流切割老扇,其形成原因主要为以下2点:首先,在青藏高原东北缘隆升的新构造运动背景下,地壳抬升,河流下切,先前泥石流发生时形成的冲积扇堆积位置较高,而后期泥石流堆积则沿着下切的河道发生;其次,随着一次大规模泥石流活动的发生,流域内固体物质减少,泥石流规模减小,新形成的泥石流流体沿着沟道流动,切割老扇,其流量难以溢过老扇而发生堆叠。由纳古呢泥石流堆积扇特点及多期堆积扇的切割关系来看,纳古呢沟泥石流发生频率虽较高,但均为小规模泥石流。

泥石流的重度是衡量泥石流性质的一个重要指标,按重度大小可以确定泥石流类型。采用常规水土比法,计算出纳古呢沟的三组泥石流堆积体样本重度依次为1.71 t/m³、1.70 t/m³、1.68 t/m³。由于传统的通过堆积样计算稀性泥石流容重时有较大的误差(陈宁生等,2003,2010;余斌,2008a),因此,这里采用余斌(2008b)提出的稀性泥石流容重计算的改进方法进行修正:

$$\gamma_D = P_{05}^{0.35} P_2 \gamma_v + \gamma_x \quad (1)$$

式中: γ_D 为泥石流流体容重(t/m³); γ_v 为黏性泥石流的最小容重,为2.0 t/m³;P₀₅为<0.05 mm的细颗粒百分含量(小数表示);P₂为>2 mm的粗颗粒的百分含量(小数表示); $\gamma_x=1.4$ t/m³。

依据颗分试验结果(表1),通过上式计算修正后纳古呢沟泥石流堆积体的重度依次为:1.78 t/m³、1.74 t/m³、1.74 t/m³。故纳古呢沟泥石流属稀性泥石流。

3.1.2 泥石流活动性

根据岷县自然资源局历年地质灾害资料,纳古呢沟历年暴发的泥石流大多以小规模为主,近十年2次大规模泥石流发生在2012年5月10日及2020年8月17日,形成了现今清晰可见的2期次大规模的泥石流堆积体。据对沟口处耳阳台子村村民的访问及现场调查,纳古呢沟几乎每年雨季均暴发泥石流,小规模泥石流的发生频率为3~5次/年,中—大规模泥石流发生频率为7~8年1次,且新发泥石流侧蚀老泥石流堆积体现象明显。纳古呢沟主沟侵蚀速度大于支沟,沟口扇形堆积微地貌发育,扇缘边界及扇高逐年变化,主河耳阳河河道受纳古呢泥石流堆积体影响,松散物质储量丰富,沟道两侧岸坡滑坡发育等,表明纳古呢沟目前处于泥石流发展的壮年期。



图3 纳古呢沟滑坡-泥石流及沟谷特征

a—纳古呢沟“V”字型沟谷;b—堆积扇挤压耳阳河;c—多期次堆积扇的位置关系;d—滑坡体挤压谷坊坝;e—滑坡体A形成的后壁陡坎;
f—滑坡体C后缘拉裂缝;g—纳古呢沟内广泛发育的破碎板岩风化带;h—岩-土混合类二元斜坡结构

Fig.3 The Nagune Gully landslide-debris and its features

a—"V" shaped valley in Nagune gully; b—Accumulation fan compresses Eryang river; c—Positional relationship of multi-stage accumulation fans;
d—Landslide mass extrusion Valley Dam; e—Rear wall scarp formed by landslide mass a; f—Tensile crack at the trailing edge of landslide C;
g—Weathered zone of broken slate widely developed in Nagune gully; h—Rock-soil mixed binary slope structure

表1 纳古呢沟泥石流堆积体颗粒分析及重度计算结果

样品 编号	各粒径组成的百分含量(粒径单位/mm)											计算参数 (以小数计)		计算重度 (t/m ³)
	80~60	60~20	20~10	10~5	5~2	2~0.5	0.5~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	<0.005	P ₀₅	P ₂	γ _b
S01	0.7	10.6	16.6	19.2	19	11.8	5.9	5.6	5.5	1.3	3.8	0.07	0.53	1.78
S02	0.6	11.2	15.8	18.4	17	12.6	6.2	5.2	7.6	1.2	4.2	0.06	0.50	1.74
S03	1.1	11.3	15.3	19.4	17	12.4	6.1	5.1	6.8	1.5	4	0.06	0.50	1.74

纳古呢沟泥石流堆积体挤压河道明显,一次大规模泥石流过程的发生可能堵塞耳阳河。而耳阳沟为一高危险性泥石流沟(郭富赞,2014),流域面积较大,小规模堵塞沟道会加重下一期次耳阳沟泥石流暴发时的危险性,大规模的堵塞使得耳阳河上游的洪水或泥石流无法沿沟道排出,对沟道两侧产生洪水或泥石流威胁。其次,多期次泥石流堆积扇的前缘为耳阳台子及汤哈村住宅区(图4a,图4c),虽然当前泥石流规模较小,但由于沟内流通区大规模滑坡的发育有可能导致大规模泥石流的发生,直接威胁沟口村庄生命财产安全。

由于纳古呢泥石流形成区和流通区处于临潭—宕昌断裂分支断裂F₁内,流域内岩体破碎,风化带深度大,泥石流物源丰富,加之流域流通区段内纳古呢滑坡向沟道蠕滑,滑坡体前缘受雨水冲刷侵蚀不断补给。所以,纳古呢沟在今后数十年内仍将处于泥石流发展的活跃阶段。如若发生强震,或滑坡下滑堵塞沟道形成堰塞坝,则有可能发生大规模的泥石流活动。为降低泥石流灾害的危险,沟内已修建17座谷坊坝(图4c)。

3.2 纳古泥滑坡群

3.2.1 滑坡基本特征

纳古呢滑坡群发育于泥石流沟流通区沟道两侧岸坡,由三个次级滑坡A、B、C组成,其中左岸发育滑坡A、B,右岸发育滑坡C,滑坡A、B与滑坡C在平面上呈对滑式(图4a、c)。滑坡A长190 m,宽500 m,厚度15~25 m,体积约为95×10⁴ m³,属中型滑坡,其平面形态呈半椭圆形(图4)。滑坡体A由次生黄土、D₃强风化带内板岩组成,其中次生黄土厚度5~10 m,下部强—全风化带板岩厚度10~15 m,滑床为板岩强—全风化带下部中风化板岩岩体,主滑面为板岩强—全风化带与中风化带的分界面,主滑方向为110°,滑坡下滑后冲入纳古呢沟沟道。滑坡A是老滑坡,目前基本稳定。

滑坡B滑坡体长50 m,宽120 m,厚5~10 m,体

积约2.3×10⁴ m³,属小型滑坡,平面形态形似锐角三角形。滑坡体由次生黄土所组成,滑床为黄土下伏强—全风化带板岩岩体,黄土与板岩的分界面为其主滑面,其主滑方向与滑坡A一致,为110°。滑坡B目前正处于蠕滑变形阶段,滑坡体下滑后冲入沟道内,推挤沟道内谷坊坝(图3d)。

滑坡C长76 m,宽630 m,厚16~24 m,滑坡体体积约48×10⁴ m³,属中型滑坡,滑坡体由次生黄土、D₃、D₂强风化带内板岩组成(图5),其中黄土厚度6~9 m,下部强—全风化带板岩厚10~15 m,且以D₃板岩为主,其滑床为D₂、D₃中风化带板岩岩体,主滑面为板岩强—全风化带与中风化带的分界面,主滑方向290°。滑坡C目前处于蠕滑变形阶段,滑体下滑后推挤拦挡坝,造成谷坊坝损毁甚至失效。但由于拦挡坝修建后,泥石流携带的大量固体物质堆积于坝上游,造成坝内淤满,这对滑坡C前缘产生压脚作用,又提高了坡体的稳定性。

3.2.2 滑坡变形特性

纳古呢滑坡群中滑坡A目前基本稳定,而滑坡B、滑坡C正处于变形失稳阶段。滑坡B坡体表面变形强烈,梯田错动明显,滑坡体中部发生大量塑性变形,滑坡舌向沟内延伸,黄土流失严重,呈现中间薄—两边厚的变形特征,其后部与滑坡A间发生拉裂,形成垂直位移约为1 m的陡坎(图3e)。

滑坡C变形强烈,主要表现为滑坡体的蠕滑变形,且在后缘形成宽大的拉裂缝(图3f),据图4c中所布置的21个测点对拉裂缝的实测结果显示,其变形特征如下:

(1)滑坡体后缘拉裂缝发育。图6为滑坡后缘拉裂缝测量结果,拉裂缝的最大宽度可达32 m(图6a),裂缝两侧的垂直落差最大可达7.7 m(图6b),表明滑坡沿水平方向及垂直方向变形强烈。

(2)滑坡体整体虽蠕滑变形,但滑坡体各部位蠕滑变形量不一致。从后缘拉裂缝宽度及落差变化可知,滑坡C南侧(沟谷上游)蠕滑变形量小,而北

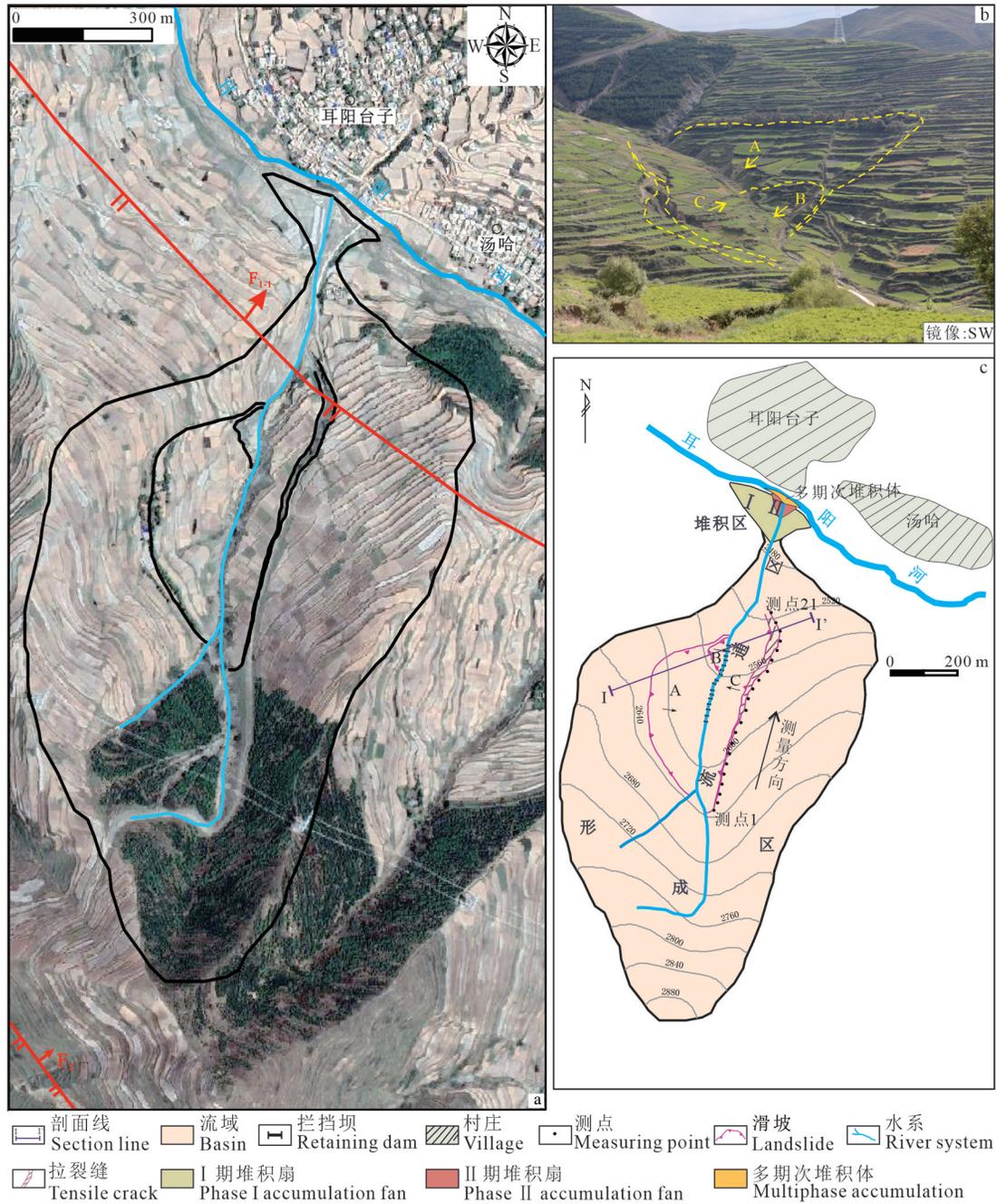


图4 纳古呢滑坡、泥石流遥感精细解译平面图

a—纳古呢滑坡、泥石流遥感解译;b—纳古呢滑坡群图示;c—纳古呢滑坡、泥石流平面示意图

Fig.4 Remote sensing interpretation and plane sketch of Nagune landslide and debris flow

a—Remote sensing interpretation of Nagune landslide and debris flow; b—Diagram of Nagune landslide group; c—Sketch plan map of Nagune landslide and debris flow

侧变形量大。

4 活动断裂带滑坡-泥石流灾害链成灾机制

当在一定范围内发育有两种或两种以上的地

质灾害,且各灾害间表现出一定的相关性及成生联系,这些灾害可称之为地质灾害链(韩金良等,2007;李明等,2008)。纳古呢沟流域内的滑坡、泥石流先后发生,泥石流侵蚀坡脚促进滑坡发生,滑坡体下滑又为泥石流提供物源,二者关系密切,表

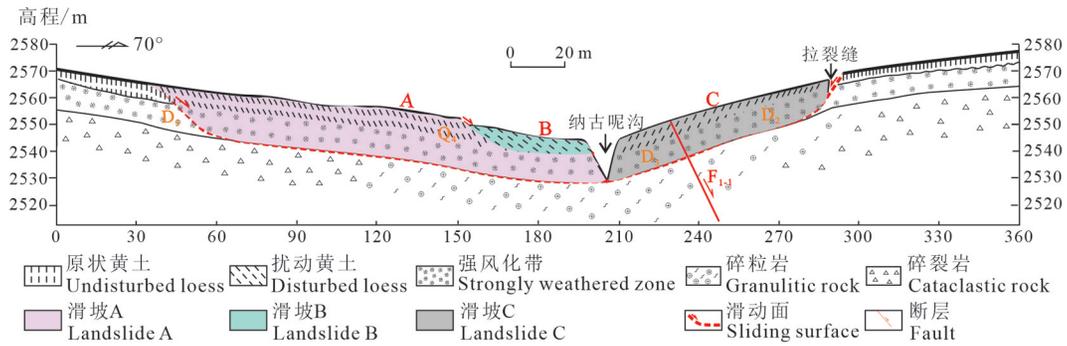


图5 纳古呢沟岸坡滑坡地质剖面图
Fig.5 Typical section of Nagune landslide

现为滑坡-泥石流灾害链式发展过程。

4.1 灾害链成生条件

(1) 泥石流物源丰富。高频的泥石流沟内往往物源丰富,岩性软弱(马超等,2015),研究区临潭—宕昌断裂分支断裂 F_1 及主干断裂 F_{1-1} 现今活动强烈,断裂破碎带宽度及影响带宽度大,在二叠系、泥盆系板岩分布区其宽度可达数百米至1~2 km。纳古呢沟整体处于 F_1 和 F_{1-1} 所控制的断裂破碎带内,断裂破碎带岩体破碎,未重新固结成岩,易风化,风化带厚度大,全风化带和强风化带厚度大多超过10 m,强烈风化的断裂破碎带为多期次泥石流的发育快速提供物源(图3g),且物源不会枯竭。

(2) 具易滑二元斜坡结构。受 F_1 及 F_{1-1} 断裂现今活动的影响,纳古呢沟流域内岩体的节理裂隙发育,上覆第四系黄土与下伏断裂破碎带内的 D_2 及 D_3 板岩碎粒岩、碎裂岩组成岩-土混合类二元斜坡结构(图3h)。第四系黄土和下伏破碎的断裂带岩体抗剪强度较低,坡体易在外力作用下沿着断裂破碎带内强—全风化带与中风化带的接触带或土岩接触带发生剪切变形甚至失稳。

(3) 降雨集中且分配不均。岷县地处温带半湿润向高寒湿润气候过渡带,多年平均降水量635 mm,降雨年内分配不均,雨水主要集中在5—8月。以2020年岷县茶埠镇石咀气象站观测资料为例(图7),2020年度该区域内年总降雨量663.5 mm,其中5—8月总降雨量498.8 mm,达到全年总降雨量的75%。连阴雨形式降雨在5—8月内频繁发生,如5月19日至6月1日间,7月8日至7月18日间,更甚者在7月23日至8月18日发生长达27天的连阴雨,长时间的雨水浸泡使得岩土体的强度大大降低。除连阴雨外,纳古呢沟内短时集中降雨频发,如7月18日降雨量58.3 mm,8月17日降雨量35.9 mm,降雨在日内也呈现出集中发生的形式,如表2中所统计的2010年“5.10”泥石流灾害的降雨数据,多数站点监测到的高强度暴雨集中在18:00—19:00,期间降雨量占到整个暴雨过程的80%以上。而据前人研究成果(周洪建等,2014)可知,6 h降水量大于10 mm是耳阳沟流域山洪泥石流灾害高危险的临界值。因此,特殊的降雨条件为泥石流的高频发生提供了充足的水力条件,同时也为滑坡变形破坏时的

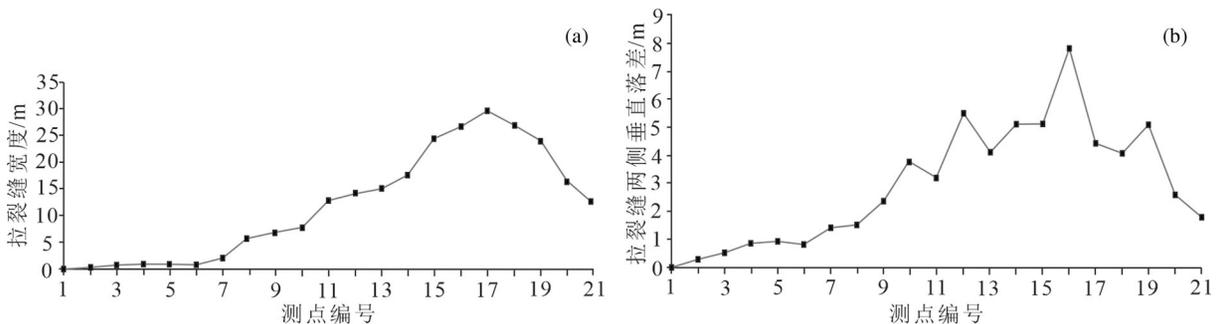


图6 右岸滑坡C后缘拉裂缝宽度(a)及垂直落差变化(b)
Fig.6 Variation curve of tensile crack width (a) and vertical drop (b) at the back edge of landslide C

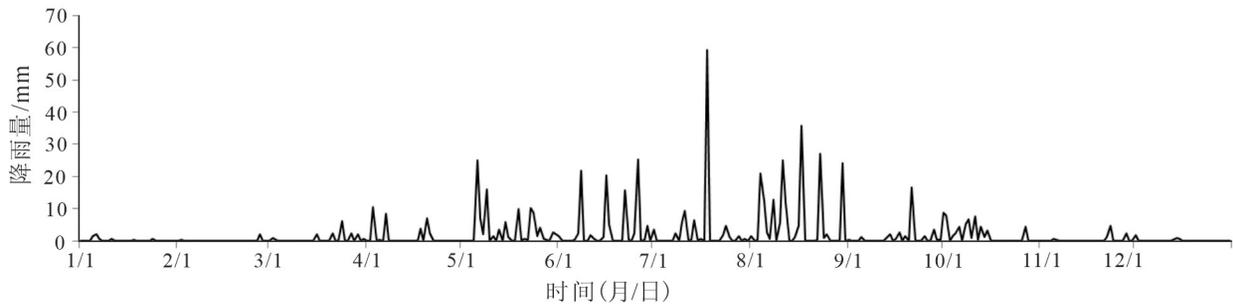


图7 2020年岷县茶埠镇日降雨量变化图

Fig.7 Daily rainfall variation chart of Chabu Town, Minxian County in 2020

的水文响应提供了充足的水源条件(Zhang et al., 2020)。

(4)区域性构造隆升增大地形高差。耳阳沟流域位于青藏高原东北缘,平均海拔2600 m以上,为典型的中高山侵蚀地貌,在青藏高原东北缘隆升的新构造运动背景下,流域内沟谷深切,在纳古呢沟内形成狭窄的V字型沟谷,沟谷坡度达11.8°,为滑坡体堵塞沟道形成堰塞湖提供了地形条件。此外,纳古呢沟形成区横向坡度集中在20°以上,为固体物质的运移及降雨的快速汇集提供了地形条件。

4.2 灾害链成灾机制

纳古泥流域 F_1 、 F_{1-1} 断裂破碎带一部分经风化剥蚀直接堆积在沟道或坡脚,一部分在降雨雨水冲刷作用下以坡面流形式流入沟道;而上覆马兰黄土及次生黄土在强震或极端降雨条件下,以滑坡和坡面流形式补给沟道,成为泥石流固体物源的细颗粒部分。当沟道中的固体物质累积到一定程度时,若遭遇强降雨或极端降雨,即连阴雨或6 h内大于10 mm的短时集中降雨,流域内汇集的水流将侵蚀沟道堆积物,此时,若水流侵蚀及渗透力超过堆积物的抗剪强度,则沟道堆积物将起动形成泥石流灾害。

表2 “2012.5.10”茶埠镇日降雨量统计(据凡炳文等,2013)

Table 2 Daily rainfall statistics of Chabu town on 2012.5.10 (after Fan Bingwen et al., 2013)

地点	地理位置		降水起止时间	降水量/mm
	东经	北纬		
茶埠镇耳阳村	104°08'23.5"	34°26'51.8"	17:20—18:10	50.5
茶埠镇半沟村	104°07'11.0"	34°28'16.7"	17:00—18:15	60.4
茶埠镇谈河村	104°08'59.0"	34°26'01.0"	17:30—18:15	61.8
茶埠镇寨子坡村	104°09'40.8"	34°25'29.2"	17:30—23:00	57.8
茶埠镇青山村	104°09'50.0"	34°23'47.2"	17:20—23:20	57.8

纳古呢沟道岩体破碎,物源丰富,泥石流高发。强降雨时,雨水沿黄土中发育的垂直节理及基岩构造裂隙入渗,滑坡岩土体自重应力增加,水流及泥石流对沟道下蚀,坡脚侧蚀,坡体临空面增加,稳定性降低,后缘出现拉裂缝(图8a)。受多期高频泥石流和流水侵蚀,先前形成的拉裂缝扩展,向深部延伸至板岩强—全风化带与中风化带之间的接触带,滑带逐渐贯通,坡体处于失稳下滑的临界状态(图8b)。一旦坡体的下滑力超过滑动带的抗剪强度时,滑坡失稳下滑冲入沟道。由于沟谷狭窄,滑坡堵塞沟谷,挤压河道,形成堰塞坝,并对对岸斜坡坡脚产生撞击,导致对岸坡体结构损伤,完整性降低(图8c)。此后,对岸坡脚遭受侧蚀,坡体稳定性降低,最终失稳下滑(图8d)。

纳古呢滑坡下滑后堵塞沟道形成堰塞坝,坝体由次生黄土及破碎板岩组成。其后遭遇降雨时,堰塞湖内水位的持续上升,坝体受到渗流作用不断增高。当坝体遭受的水力坡度达到超过临界水力坡度时,坝体发生渗透变形。若此时遭遇强降雨,坝前水头和洪水量急骤增加,则会导致堰塞坝溃决,溃决后形成的洪水裹挟滑坡体以及沟道堆积物倾泻而下,形成更大规模的溃决型洪水泥石流灾害。

可见纳古呢沟滑坡—泥石流灾害链是多期次泥石流—滑坡—溃决型洪水泥石流往复发生的结果,此过程始自岸坡蠕滑型滑坡第一次发生,终于滑坡体全部滑入沟道被冲刷殆尽为止。

5 滑坡—泥石流灾害链演化过程

综合纳古呢沟内滑坡的变形演化机制及泥石流的发展演化历史,纳古呢沟滑坡—泥石流灾害链

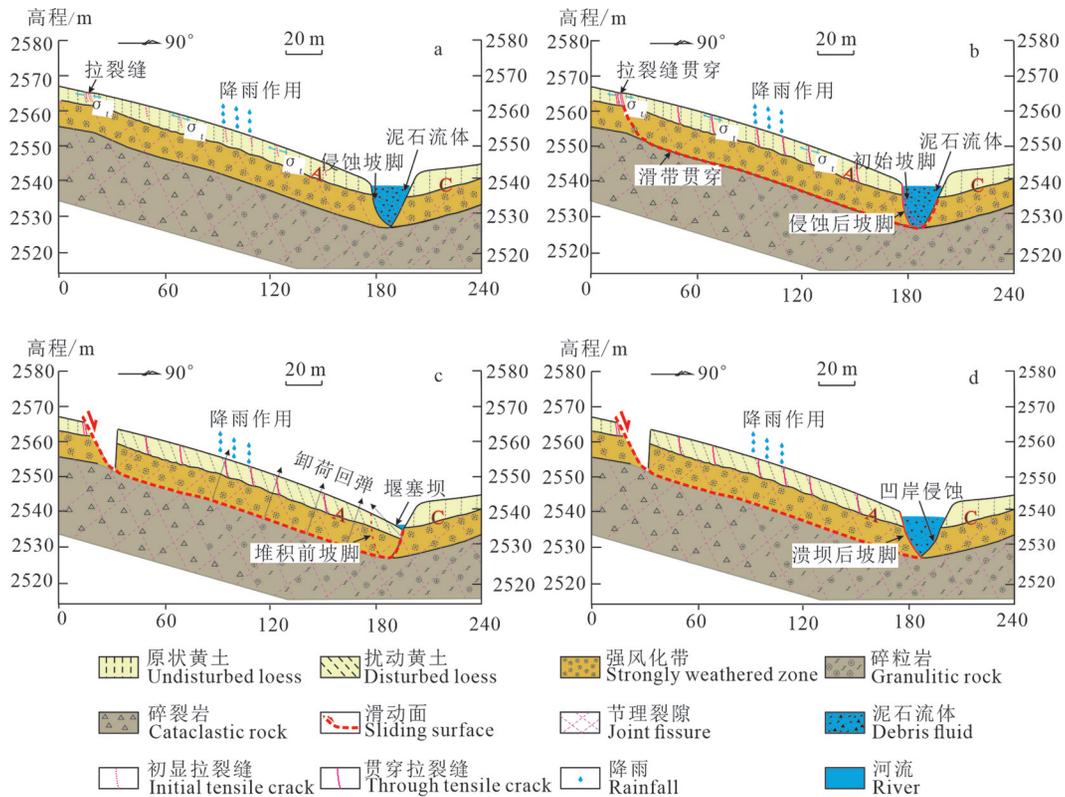


图8 纳古呢沟流通区岸坡滑坡形成机制

a—泥石流流体侵蚀至拉裂缝形成阶段;b—拉裂缝扩展至滑带贯穿阶段;c—滑坡A滑动至堰塞坝形成阶段;d—堰塞坝溃决至河流改道阶段

Fig.8 Formation mechanism of landslide in circulation area of Nagune gully

a—Debris fluid erosion to tensile fracture formation stage; b—Extension of tensile fracture to sliding zone penetration stage; c—Landslide A slides to the formation of weir plug dam stage; d—Dam break to river diversion stage

的形成发展大致分为6个阶段(图9):

(1)泥石流初发冲蚀沟道阶段:在沟谷形成初期,纳古呢沟内地质灾害类型以泥石流为主,该阶段内泥石流灾害频发。由于物源供给充足,只要沟谷水动力条件足够强,纳古呢沟均会发生泥石流。纳古呢沟谷坡脚遭受多期次泥石流的侵蚀冲刷,坡体开始变形,左岸滑坡A后缘拉裂缝初显(图9a)。

(2)左岸坡体临界失稳阶段:多年多期次泥石流及洪水作用,流通区岸坡坡脚进一步侧蚀,左岸坡体后缘拉裂缝加大,逐渐扩展延伸,坡体开始发生蠕滑变形,此时滑带尚未贯通,坡体处于失稳的临界状态(图9b)。

(3)滑坡下滑堵塞沟道形成堰塞湖阶段:受一次大规模泥石流侵蚀或强震振动,左岸坡体发生下滑,滑坡体A下滑堵塞沟道形成堰塞坝滑体推挤沟道,撞击作用下滑坡C后缘拉裂缝初显。随着降雨活动的进行,雨水在坝体上游汇集形成堰塞湖(图9c)。

(4)堰塞湖溃决形成溃决型洪水泥石流阶段:

堰塞湖形成后,强降雨会引起湖水位不断上升,当水压力超过坝体的抗倾覆能力时,坝体溃决,沟道向右岸迁移,洪水裹挟滑坡A的堆积体形成更大规模的溃决型洪水泥石流灾害(图9d)。

(5)沟道右岸坡体失稳下滑阶段:滑体A下滑后致使沟道向右岸迁移,右岸坡脚遭受侵蚀作用增强。与滑坡A的变形破坏相似,受流水或泥石流的长期侵蚀,滑坡体C后缘拉裂缝出现扩展,主滑面贯通,滑坡C发生失稳下滑,堵塞沟道形成新的堰塞湖(图9e)。

(6)泥石流-滑坡往复发生阶段:滑坡C形成的堰塞坝溃决后又导致新一期次的溃决型洪水泥石流发生,河流又重新改道至沟道左岸。由于纳古呢流域地形高差大,每一次泥石流后,沟谷内堆积物和滑坡前缘被侵蚀带走,岸坡滑坡再次向沟谷发生蠕滑,为下一次泥石流提供物源。流域内重复“泥石流-滑坡-溃决型洪水泥石流”过程,沟道往复改道,流通区两侧滑坡A、B、C不断下滑至沟道内并逐

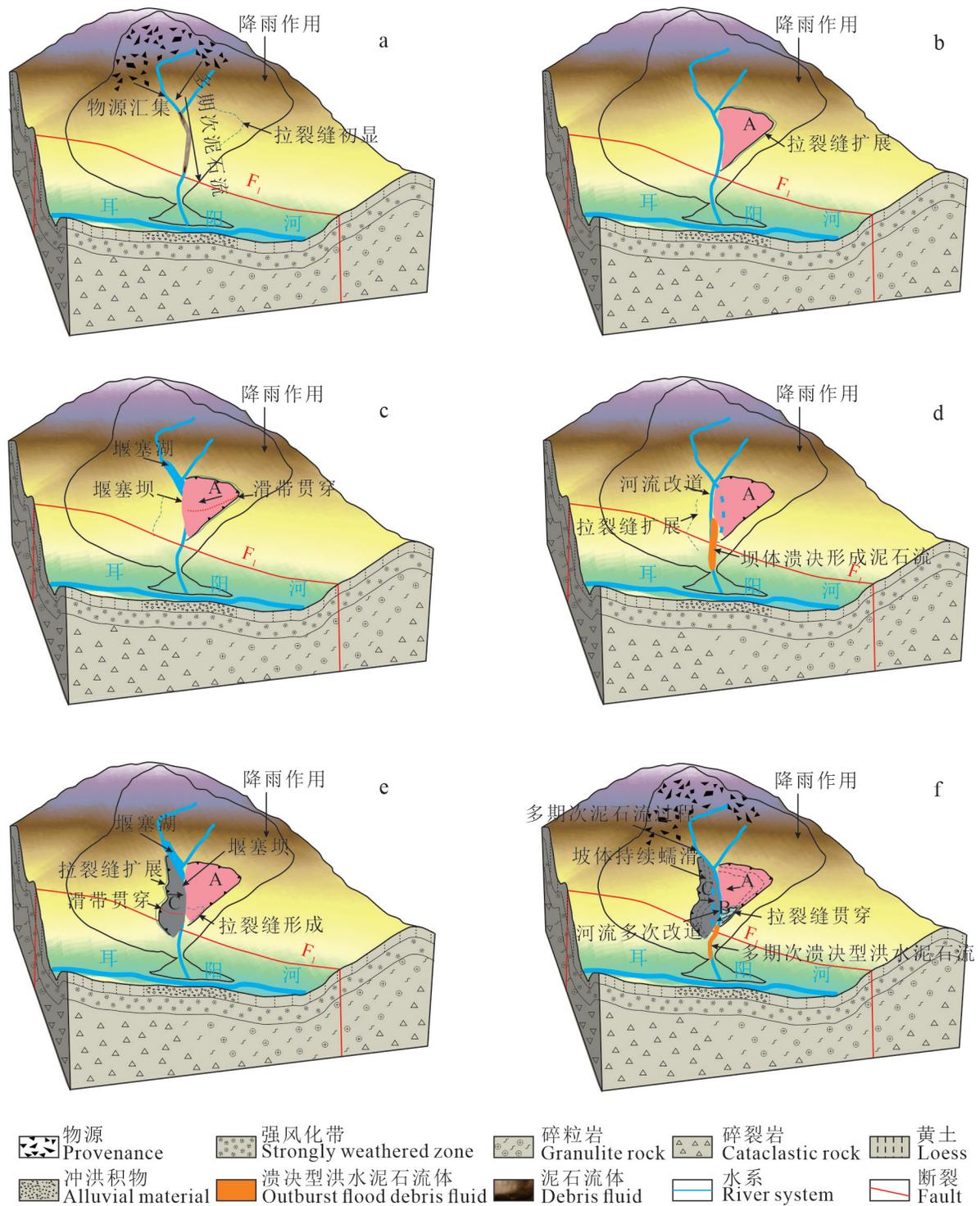


图9 纳古呢沟断裂带泥石流-滑坡灾害链演化模式

a—泥石流初发侵蚀沟道阶段；b—左岸坡体临界失稳阶段；c—滑坡A下滑堵塞沟道形成堰塞湖阶段；d—堰塞湖溃决形成溃决型洪水泥石流阶段；e—右岸坡体C失稳下滑阶段；f—泥石流-滑坡往复发生阶段

Fig.9 Evolution model of debris flow and landslide in fault zone of Nagune gully

a—Initial occurrence of debris flow and erosion gully stage; b—Critical instability stage of left bank slope; c—Landslide A slides down and blocks the channel to form a barrier lake stage; d—Barrier lake collapses and forms a burst flood cement flow stage; e—Instability and sliding stage of slope C on the right bank; f—Debris flow-landslide reciprocating stage

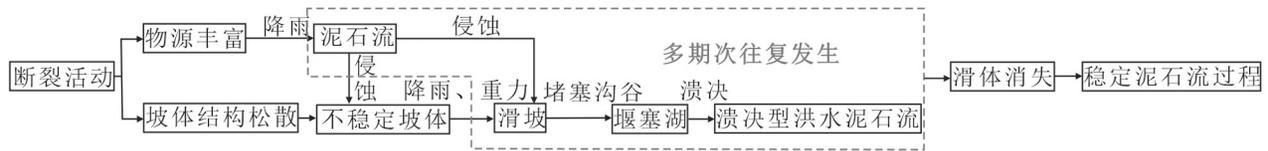


图10 纳古呢沟内断裂带泥石流-滑坡灾害链演化过程

Fig.10 Evolution flowchart of debris flow-landslide disaster chain in fault zone of Nagune gully

渐被侵蚀带走(图9f)。

当流域内滑坡体全部下滑至沟谷内,且被洪水或泥石流冲蚀带走后,滑坡-泥石流灾害链消失。随着沟道岸坡泥石流物源逐渐减少,岸坡坡度渐缓,泥石流发展逐渐衰退直至停歇。

综上,纳古呢沟内滑坡-泥石流灾害链的演化模式可概化为图10,即初期的断裂活动导致坡体结构松散破碎、沟内物源丰富,在强降雨条件下发生泥石流,水流及泥石流对岸坡脚侵蚀导致岸坡失稳下滑形成滑坡,滑坡体下滑堵塞沟道形成堰塞湖,当堰塞湖溃坝后暴发溃决型洪水泥石流灾害;其后,多期次的泥石流、降雨过程对沟谷岸坡产生长期侧蚀,致使滑坡不断蠕滑变形,堆积沟道产生新的堰塞坝,再次发生溃决型洪水泥石流;最终,沟道两侧岸坡滑坡体消耗殆尽,沟谷内转为发育稳定的泥石流过程。

6 结论

(1)纳古呢沟地质环境背景独特,受临潭—宕昌断裂及其分支断裂现今活动的影响,流域岩土体均处于断裂破碎带及断裂影响带内。因而,流域范围内岩体破碎,风化带深度大,泥石流物源供应充足。

(2)纳古呢沟谷形态呈纺锤形,泥石流容重介于 $1.7\sim 1.8\text{ t/m}^3$,属稀性泥石流。多期次堆积扇表明纳古呢沟泥石流发育演化历史长,发生频率高,目前仍处于壮年期,对耳阳河及沟口村庄具有威胁。高频泥石流的形成与断裂活动与滑坡蠕滑提供的大量物源,以及短时强降雨密切相关。

(3)纳古呢沟道两侧岸坡发育的滑坡A、B、C均位于流通区,滑坡后缘拉裂陡坎或拉裂缝明显,表现为蠕滑式滑坡,这与断裂活动形成的坡体结构和沟谷内活动频繁的泥石流对坡脚的强烈冲刷侵蚀作用密切相关。除蠕滑运动外,对滑坡C后缘拉裂缝的观测结果表明,滑坡体在平面上还表现出旋转运动特征。

(4)纳古呢沟滑坡-泥石流灾害链的形成是由于断裂活动导致岩体破碎,泥石流物源丰富,岸坡岩体裂隙发育、结构松散、稳定性差,当遭遇强降雨时激发泥石流发生。同时,泥石流流体对沟谷的侵蚀切割特别是对坡脚的侵蚀导致岸坡坡体失稳下滑,滑坡堵塞沟谷形成堰塞湖,溃坝后发生溃决型洪水泥石流。

(5)纳古沟滑坡-泥石流灾害链表现为泥石流-滑坡-溃决型洪水泥石流往复发生的演化模式,其发展过程可概化为泥石流初发冲蚀沟道阶段、坡体逐渐接近临界失稳阶段、滑坡体下滑堵塞沟道形成堰塞湖阶段、堰塞湖溃决形成溃决型洪水泥石流阶段、对岸坡体失稳下滑阶段、泥石流-滑坡-溃决型洪水泥石流往复发生阶段,灾害链的演化将持续至滑坡整体下滑且被侵蚀殆尽为止。

为治理纳古呢沟泥石流灾害,自然资源部门在沟道修建谷坊坝,以减小泥石流规模,抬高沟谷侵蚀基准面达到护坡固床的作用。采用梯级布置,在流通区即纳古呢滑坡体前缘共修建17座谷坊坝。野外考察发现,各谷坊坝坝前已基本淤满,这在一定程度上减少了泥石流固体物质向主河的输出量,同时坝体及淤积的固体物质对坡脚的压覆作用提高了滑坡的稳定性,整体上降低了泥石流发生的危险性。应当重视的是,一旦坝前淤积高度超过坝体,在遭受极端强降雨时,或遭遇滑坡下滑冲毁谷坊坝,泥石流将裹挟先期停淤的固体物质及失稳滑坡体,形成更大规模的泥石流灾害,对耳阳河及沟口处村庄造成严重威胁,一定程度上增加了泥石流灾害的风险。因此,定期检查拦挡坝结构的完整性和拦挡能力,清理淤积的固体物质等措施是降低灾害风险的必要手段,必要时可针对流通区滑坡开展专项治理。

References

- Chen Ningsheng, Cui Peng, Liu Zhonggang, Wei Fangqiang. 2003. Calculation of the debris flow density based on the content of clay

- particles[J]. Science in China (Series E), (S1): 164–174 (in Chinese).
- Chen Ningsheng, Yang Chenglin, Li Huan. 2010. Calculation of the debris flow concentration based on debris flow slurry[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 37(2): 168–173 (in Chinese with English abstract).
- Fan Bingwen, Niu Zuirong, Hu Jianxun, Du Kesheng. 2013. Investigation of "5.10" torrential rain and flood in Minxian county[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 49(2): 5–8 (in Chinese with English abstract).
- Feng Wenkai, Jia Bangzhong, Wu Yiying, Wu Zhongteng. 2022. Characteristics and mechanism of landslide–debris flow chain disaster in low mountain and hilly terrain[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 33(1): 35–44 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yutao, Xiao Shengxie. 2009. Chain mechanism and optimized control of collapses, landslides and debris flows[J]. Journal of Catastrophology, 24(3): 22–26 (in Chinese with English abstract).
- Fu Shangyu. 2011. The Study of Shattering Mountains Landslide–break Debris Flow Disaster Chain[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–63 (in Chinese with English abstract).
- Gao Mingxing, Chen Guihua, Xu Xiwei. 2015. Geomorphic indices recent differential tectonic uplift of the Lintan–Dangchang fault and the Minxian–Zhangxian earthquake[J]. Seismology and Geology, 37(3): 709–718 (in Chinese with English abstract).
- Guo Changbao, Du Yuben, Zhang Yongshuang, Zhang Guangze, Yao Xin, Wang Ke, Liu Jian. 2015. Geohazard effects of the Xianshuihe fault and characteristics of typical landslides in western Sichuan[J]. Geological Bulletin of China, 34(1): 121–134 (in Chinese with English abstract).
- Guo Fuyun. 2014. Formation mechanism and risk assessment of debris flow of "5.10" in Eryang gully of Minxian country, Gansu Province[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 50(5): 628–632 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jinjing, Han Wenfeng, Liang Yunshou. 2006. Tectonic geomorphic evolution and plateau uplift in Minxian–Wudu area on the northeast margin of Qinghai–Tibet Plateau[J]. Geology in China, 33(2): 383–392 (in Chinese with English abstract).
- Han Jinliang, Wu Shuren, Wang Huabin. 2007. Preliminary study on geological hazard chains[J]. Earth Science Frontiers, 14(6): 11–23 (in Chinese with English abstract).
- Li Guangtao, Cheng Li, Wu Hao, Su Gang. 2020. Geological and geomorphological evidence of Late Quaternary activity along the southeastern segment of the Lintan–Tanchang major fault[J]. China Earthquake Engineering Journal, 42(2): 376–383 (in Chinese with English abstract).
- Li Ming, Tang Hongye, Ye Siqiao. 2008. Research on chain rule of typical geological disaster[J]. Journal of Catastrophology, 23(1): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Liu Fangbin, Qu Junhao. 2018. Research on static coulomb stress changes and seismicity in Lintan–Tanchang fault and the adjacent area[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 38(9): 886–890 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ting. 2015. The Research of Fault Gouge and its Geochronology from Lintan–Dangchang Fault Zone in Western Qinling[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1–61 (in Chinese with English abstract).
- Ma Chao, He Xiaoyan, Hu Kaiheng. 2015. Rainfall parameter characteristics of high–frequency debris flow in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 26(2): 43–50 (in Chinese with English abstract).
- Sun Mengyu. 2020. Research on the Influence of Structural Damage Rock on the Formation of Debris Flow: Taking Anninghe fault Zone as an Example[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–72 (in Chinese with English abstract).
- Tang Hongtao, Zhang Xuegui, Gao Zirang, Ding Guoli, Li Ruisha. 2019. The fracture activity analysis of the northeast margin of Qinghai Tibetan block based on the synthetic rate method[J]. Earthquake Research in China, 35(2): 319–326 (in Chinese with English abstract).
- Tang Yongyi. 1992. The effect of neotectonic movement on formations of landslide and debris flow in southern Gansu[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), (4): 152–160 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Wang Jiakun, Pan Dong. 2020. Analysis on mechanism of Kangjiapo landslide and consequent debris flow in Hanyuan County of Sichuan Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 31(1): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Xiong S Q. 2021. Research achievements of the Qinghai–Tibet Plateau based on 60 years of aeromagnetic surveys[J]. China Geology, (4): 147–177.
- Yang Werimin, Huang Xiao, Zhang Chunshan, Si Haibao. 2014. Deformation behavior of landslides and their formation mechanism along Pingding–Huama active fault in Bailongjiang river region[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 44(2): 574–583 (in Chinese with English abstract).
- Ye Maosheng. 2018. Study of Activity Characteristics of Main Faults in the Northeast Margin of the Tibetan Plateau Ssing GPS[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, 1–50 (in Chinese with English abstract).
- Yin Yueping, Wang Wenpei, Zhang Nan, Yan Jinkai, Wei Yunjie, Yang Longwei. 2017. Long runout geological disaster initiated by the ridge–top rockslide in a strong earthquake area: A case study of the Xinmo landslide in Maoxian County, Sichuan Province[J]. Geology in China, 4(5): 827–841 (in Chinese with English abstract).
- Yu Bin. 2008a. Research on the calculating density by the deposit of debris flows[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 26(5): 789–796 (in Chinese with English abstract).
- Yu Bin. 2008b. Research on the improved calculating density of less viscosity debris flows[J]. Journal of Mountain Science, 27(1): 70–

- 75 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peizhen, Deng Qidong, Zhang Guomin, Ma Jin, Gan Weijun, Min Wei, Mao Fengying, Wang Qi. 2003. Mainland China strong earthquake activity and active block[J]. Chinese Science (D: Earth Sciences), (S1): 12-20 (in Chinese).
- Zhang Peizhen, Zheng Dewen, Yin Gongmin, Yuan Daoyang, Zhang Guangliang, Li Chuangwei, Wang Zhicai. 2006. Discussion on Late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Quaternary Sciences, 26(1): 5-13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang T L, Zhou A G, Sun Q, Wang H S, Wu J B, Liu Z H. 2020. Hydrological response characteristics of landslides under typhoon-triggered rainstorm conditions[J]. China Geology, 3(3): 455-461.
- Zhang Yueqiao, Ma Yansheng, Yang Nong, Zhang Huiping, Shi Wei. 2005. Late cenozoic left-slip faulting process of the east Kunlun-Qinling fault system in west Qinling region and its eastward propagation[J]. Acta Geoscientica Sinica, 26(1): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Hongjian, Wang Xi, Yuan Yi, Wang Dandan. 2014. Rapid assessing methods of loss in extremely heavy rainfall disaster chain in semiarid region[J]. Arid Zone Research, 31(3): 440-445 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈宁生, 崔鹏, 刘中港, 韦方强. 2003. 基于黏土颗粒含量的泥石流容重计算[J]. 中国科学E辑: 技术科学, (S1): 164-174.
- 陈宁生, 杨成林, 李欢. 2010. 基于浆体的泥石流容重计算[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 37(2): 168-173.
- 凡炳文, 牛最荣, 胡建勋, 杜克胜. 2013. “5·10”岷县特大暴雨洪水调查[J]. 甘肃水利水电技术, 49(2): 5-8.
- 冯文凯, 贾邦中, 吴义鹰, 吴钟腾, 白慧林. 2022. 低山丘陵区典型滑坡-泥石流链生灾害特征与成灾机理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 33(1): 35-44.
- 冯玉涛, 肖盛燮. 2009. 崩滑流地质灾害链式机理及其优化防治[J]. 灾害学, 4(3): 22-26.
- 付尚瑜. 2011. 震裂山体滑坡-溃决型泥石流灾害链研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1-63.
- 高明星, 陈桂华, 徐锡伟. 2015. 地貌参数指示的临潭-宕昌断裂带最新构造隆升差异与地震活动[J]. 地震地质, 37(3): 709-718.
- 郭长宝, 杜宇本, 张永双, 张广洋, 姚鑫, 王珂, 刘健. 2015. 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, 34(1): 121-134.
- 郭富赟. 2014. 甘肃省岷县耳阳沟5.10泥石流基本特征及危险度评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 50(5): 628-632.
- 郭进京, 韩文峰, 梁收运. 2006. 青藏高原东北缘岷县-武都地区构造地貌演化与高原隆升[J]. 中国地质, 33(2): 383-392.
- 韩金良, 吴树仁, 汪华斌. 2007. 地质灾害链[J]. 地学前缘, 14(6): 11-23.
- 李光涛, 程理, 吴昊, 苏刚. 2020. 临潭-宕昌主干断裂南东段晚第四纪活动的地质地证据[J]. 地震工程学报, 42(2): 376-383.
- 李明, 唐红叶, 叶四桥. 2008. 典型地质灾害链式机理研究[J]. 灾害学, 23(1): 1-5.
- 刘方斌, 曲均浩. 2018. 临潭-宕昌断裂及附近地区静态库仑应力变化及地震活动性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 38(9): 886-890.
- 刘廷. 2015. 西秦岭临潭-宕昌断裂带断层泥及年代学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-61.
- 马超, 何晓燕, 胡凯衡. 2015. 我国高频率泥石流的雨量特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 26(2): 43-50.
- 孙梦宇. 2020. 断裂带构造损伤岩体对泥石流物源形成影响研究[D]. 成都: 成都理工大学, 1-72.
- 唐红涛, 张学刚, 高子让, 丁国丽, 李瑞莎. 2019. 基于合成速率法的青藏块体东北缘断裂活动分析[J]. 中国地震, 35(2): 319-326.
- 唐永仪. 1992. 新构造运动在陇南滑坡泥石流形成中的作用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), (4): 152-160.
- 王涛, 王嘉昆, 潘冬. 2020. 四川汉源康家坡滑坡形成机理与滑坡-堰塞坝-泥石流灾害链分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 31(1): 1-7.
- 杨为民, 黄晓, 张春山, 司海宝. 2014. 白龙江流域坪定-化马断裂带滑坡特征及其形成演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 44(2): 574-583.
- 叶茂盛. 2018. 利用GPS研究青藏高原东北缘主要断裂活动特征[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 1-50.
- 殷跃平, 王文沛, 张楠, 闫金凯, 魏云杰, 杨龙伟. 2017. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究——以四川茂县新磨滑坡为例[J]. 中国地质, 44(5): 827-841.
- 余斌. 2008a. 根据泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究[J]. 沉积学报, 26(5): 789-796.
- 余斌. 2008b. 稀性泥石流容重计算的改进方法[J]. 山地学报, 27(1): 70-75.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 闵伟, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (S1): 12-20.
- 张培震, 郑德文, 尹功明, 袁道阳, 张广良, 李传友, 王志才. 2006. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J]. 第四纪研究, 26(1): 5-13.
- 张岳桥, 马寅生, 杨农, 张会平, 施炜. 2005. 西秦岭地区东昆仑-秦岭断裂系晚新生代左旋走滑历史及其向东扩展[J]. 地球学报, 26(1): 1-8.
- 周洪建, 王曦, 袁艺, 王丹丹. 2014. 半干旱区极端强降雨灾害链损失快速评估方法——以甘肃岷县“5·10”特大山洪泥石流灾害为例[J]. 干旱区研究, 31(3): 440-445.