

杨强, 王思源, 叶振南. 2019. 燕子河流域地质灾害发育特征及破坏模式分析[J]. 工程地质学报, 27(增): 289-295. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2019136

Yang Qiang, Wang Siyuan, Ye Zhennan. 2019. Analysis on the development of geological hazard and failure mode in Yanzi river basin[J]. Journal of Engineering Geology, 27(S): 289-295. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2019136

燕子河流域地质灾害发育特征及破坏模式分析*

杨强 王思源 叶振南

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心 保定 071051)

摘要 在分析燕子河流域地质环境背景基础上,依托调查成果,探讨了流域滑坡、崩塌灾害的破坏模式及演化过程。研究表明:受到地质、地貌及气候等条件的影响,流域内地质灾害主要为崩塌、滑坡、泥石流。空间上主要分布在沿岸斜坡及人类活动强度较大且相对集中的“一路一带”上,时间上多发生在7~9月降雨量集中期,具有群发性、突发性及反复性的特点。区内滑坡以覆盖层、浅层、小型、新滑坡为主,崩塌以岩质、小型、复合式、中低位为主,泥石流以中小型、暴雨沟谷型为主。崩塌灾害主要破坏模式可以分为碎裂-坠落、弯折-倾倒及碎裂-滑移3类;滑坡的主要破坏模式为蠕滑-拉裂式、滑移-拉裂式,各种破坏模式演化过程均经历灾害体变形、结构面受力变形扩展、结构面贯通、灾害体失稳破坏的演化过程。研究成果可以为地质灾害防治、城市规划、土地利用等提供技术支撑。

关键词 燕子河流域; 地质环境; 地质灾害; 发育特征; 破坏模式

中图分类号: P642.23 **文献标识码**: A **doi**: 10.13544/j.cnki.jeg.2019136

ANALYSIS ON THE DEVELOPMENT OF GEOLOGICAL HAZARD AND FAILURE MODE IN YANZI RIVER BASIN

YANG Qiang WANG Siyuan YE Zhennan

(Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding 071051)

Abstract Based on the surveying results of geological hazard investigation, the development characteristics of geological hazard in the Yanzihe river basin were analyzed. Then, the failure modes of landslide and rockfall were studied. Results shows that the geological hazards in the study area are mainly consist of landslides, rockfalls and debris flows. Those disasters are mainly located in the valley slopes especially in the Kangxian County-Yangba town road where human activities are concentrated. Most of the geological hazards are occurred during the rainy season from July to September. The landslides are mainly in small scale and occurred within shallow cover layers. The main type of rock fall is in small scale and are occurred in low rocky slopes. Then, the majority of debris flows were occurred in valley and driven by rainstorms. From the aspect of failure modes: most of the rock could be classified as fracturing-load falling, bending-topping and fracturing-sliding; the landslides could be classified as creep-tension creaking and sliding-tension cracking. The results offers technical support for geological hazard prevention, town planning, land use and so on.

Key words Yanzi River Basin; Geological environment; Geological hazard; Development characteristics; Failure mode

* 收稿日期: 2019-06-03; 收到修改稿日期: 2019-07-03.

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190628, DD20190646, 121201012000150015)资助.

This study is supported by Chinese Geological Survey Projects(Grant Nos. DD20190628, DD20190646, 121201012000150015).

第一作者简介: 杨强(1980-),男,高级工程师,长期从事地质灾害调查、监测和预警方面的研究工作. Email: yang5359535@126.com

0 引言

燕子河流域地处甘肃陇南市,流经康县东南部及陕西宁强县西北部汇入嘉陵江,属嘉陵江一级支流。该河流是长江上游重要水源区,是国家“两屏三带”生态安全的重要组成,位于“十三五”脱贫攻坚秦巴山区连片扶贫区,是精准脱贫攻坚主战区,战略地位十分重要。该区地质环境脆弱、降雨充沛,特殊的地形地貌、地层岩性及地质构造孕育了大量的地质灾害,该区是全国地灾防治“十三五”规划中的高易发区及重点防治区,也是“5·12”汶川地震重灾区(穆鹏等,2012)。受汶川地震及强降雨事件(如2009年7月7日、2010年8月11日的暴雨)的共同影响,该地区地质灾害发生频率始终较高,其危害性也不断加强(Wang,2013;黄江成等,2014;郭鹏,2015;熊木齐等,2016)。地质灾害威胁人民生命财产及公共设施安全,因灾返贫、因灾致贫现象在该区屡有发生,严重制约该流域经济发展和人民生活幸福指数(王莉霞等,2012;张小辉等,2017)。

当前对类似区域地质灾害孕灾条件和灾害分布规律的研究较为丰富,主要包括对单体灾害发生发育机理的研究和区域地质灾害风险评价等方面(Bai et al.,2012;谭龙等,2014;曾宇桐等,2014;马金珠等,2015)。但是在此基础上,从灾害形成机理的角度出发,对灾害体破坏模式的研究相对较为欠缺。针对以上问题,本研究依托灾害调查数据,对研究区滑坡、泥石流、崩塌灾害的空间分布特征、孕灾条件进行了分析统计,并进一步在此基础上分析了该流域滑坡和崩塌灾害形成机理和破坏模式研究,对该区地质灾害防治、城镇规划、精准扶贫等均具有重要的理论和现实意义。

1 自然地理及地质环境概况

燕子河全长约 118.2 km,流域面积约 1400 km²,流域海拔 594~1930 m。年平均径流量 5.36×10⁸ m³、流量 16.98 m³·s⁻¹。境内交通以公路为主,城镇村落等主要集中在河漫滩等较为平坦的区域。区内经济活动以传统的农业生产为主。该区属构造侵蚀基岩中-低山山地、河谷地貌,山势陡峭,河谷狭窄。出露地层主要有前志留系碧口群、泥盆系、石炭系、第四系地层的黄土、千枚岩、板岩、片岩、变质砂岩、变质灰岩。研究区处于扬子板块,西

秦岭褶皱带及甘孜—松潘褶皱带 3 大构造单元的衔接地区,地震烈度为Ⅷ度。收到构造活动的影响,研究区地层岩体相对破碎。在此基础上,由于地层岩性也相对软弱,抗侵蚀能力差,研究区地表覆盖有丰富的松散物质。按照赋存条件的不同,区内地下水在不同的区域可分为断层带脉状水、基岩裂隙水以及松散岩类孔隙水。研究区多年平均气温 11℃,多年平均降水量 777.5 mm,且多以强降雨的形式集中在 7~9 月(超过年降水量的 70%),多年平均蒸发量 1062.4 mm。巨大的地形起伏、活跃的地质构造、松散的地表以及时空分布严重不均的降水共同造成了研究区地质灾害多发、频发的状况。统计结果表明,本区域已发生的主要地质灾害类型为滑坡、崩塌及泥石流 3 类。据 2015 年调查资料,燕子河流域有滑坡 222 处、崩塌 170 处、泥石流沟 44 条,灾害点共计 436 处。

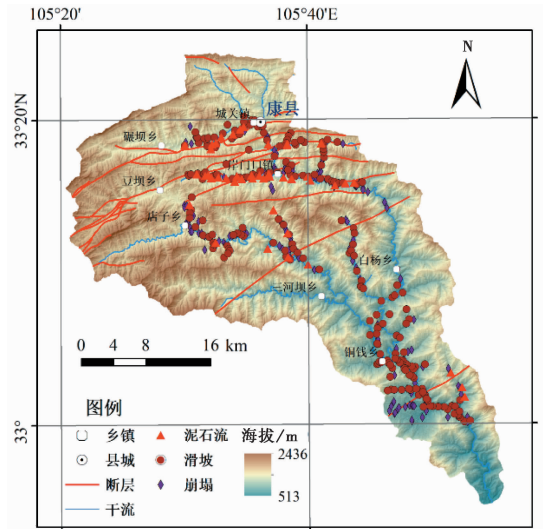


图 1 燕子河流域区位及地质灾害分布图

Fig. 1 The location and geological hazard development in the Yanzi River Basin

2 主要地质灾害类型及其发育特征

2.1 地质灾害的发育特征及影响因素

区域内地质灾害发育的成因主要有 3 方面:(1)地质环境条件的影响,流域内河流下切强烈,地形破碎,沟谷两侧斜坡坡度较大,为典型的“V”字型沟谷。此外,受到岩性和构造活动的共同影响,该变质岩区的岩土体软弱破碎,沟道内堆积有大量的松散堆积物。高陡的地形、软弱的地层岩性及活跃的构造活动,使得沟谷两侧斜坡成为崩塌地质灾害的

群发地带。(2)受降雨的影响,统计结果表明,该区域年降水量与崩塌灾害具有较强的正相关关系,而短时强降雨事件则是大范围地质灾害的主要诱发因素。(3)人类活动的影响,人工活动多集中在河流沟谷相对平缓的地带,修路、建房、采石等人类工程活动破坏了斜坡的稳定性,加之降雨等外部诱发因素的影响,致使修路、建房等人类活动密集地段发了大量地质灾害。

2.2 主要地质灾害类型及发育特征

滑坡、崩塌及泥石流为燕子河流域的主要地质灾害类型。

据 2015 年调查资料,燕子河流域已发生滑坡 222 处、崩塌 170 处、泥石流沟 44 条,目前已查明的地质灾害点共计 436 处。中华人民共和国地质矿产行业标准《滑坡崩塌泥石流灾害调查规范(1:50000)》(DZ_T0261-2014)的要求,可根据滑坡体物质组成和结构形式、滑坡体厚度、滑体体积、运动形式等对滑坡类型进行划分(表 1);按照崩塌物质组成、规模、破坏方式等进行划分(表 2);泥石流按照物质组成、流域形态、规模、易发程度等进行划

分(表 3)。

由表 1 得出,区内滑坡物质组成上以覆盖层滑坡为主,滑体厚度以浅层为主,滑体体积小滑坡占多数,运动形式多为牵引式,从形成年代上来看新滑坡略多,从稳定程度上来看基本稳定占多数,斜坡结构以顺向坡和横向坡居多,剖面形态以凸型居多。

由表 2 得出,区内崩塌主要为小型岩质崩塌,其破坏方式以复合式为主、坠落式相对较少,而崩塌的发生位置以中、低位不稳定斜坡为主,从斜坡结构以横向居多。

由表 3 得出,区内泥石流物质组成上以泥石流为主,流域形态上以沟谷型为主,规模以中、小型为主,易发程度为中、低易发,水源类型上全部为暴雨型。

2.3 地质灾害爆发规律总结

2.3.1 灾害发育的时间分布规律

区内常见的滑坡、泥石流、崩塌灾害的主要触发因素为强降水和地震,具有突发性,具有历时短、速度快、危害大的特点,容易造成人员伤亡及财产损失。丰水年崩塌地质灾害的发生频次明显高于干旱年份,7~9 月降水高峰期是地质灾害的多发期,发

表 1 燕子河流域滑坡分类表

Table 1 Classification of landslide in the Yanzi River Basin

物质组成	滑体厚度	滑坡体积	运移形式	形成年代	稳定程度	斜坡结构类型	剖面形态
覆盖层(79.3%)	浅层(86.2%)	小型(58.9%)	牵引式(81.3%)	新滑坡(54.1%)	基本稳定(63.4%)	顺向(27.3%)	直线型(16.3%)
						顺斜(13.9%)	阶梯型(4.9%)
岩质(20.7%)	中层(12.6%)	中型(34.6%)	推移式(18.7%)	老滑坡(45.9%)	不稳定(36.6%)	横向(28%)	凸型(57.7%)
	深层(1.2%)	大型(6.5%)				逆斜(12.5%)	凹型(17.1%)
						逆向(18.2%)	复合型(4%)

表 2 燕子河流域崩塌分类表

Table 2 Classification of collapse in the Yanzi River Basin

物质组成	崩塌规模	破坏方式	崩塌高差	稳定程度	斜坡结构类型
岩质(91%)	小型(84.7%)	倾倒式(14.7%)	低(46.3%)	基本稳定(31%)	顺向(18.4%)
		滑移式(13.7%)	中(47.4%)		顺斜(15.6%)
土质(3.7%)	中型(14.8%)	坠落式(29.5%)	高(4.2%)	不稳定(69%)	横向(38.5%)
		复合式(42.1%)	特高(2.1%)		逆斜(19.3%)
复合(5.3%)	大型(0.5%)				逆向(8.3%)

表 3 燕子河流域泥石流特征分类表

Table 3 The classification of debris flow characteristics in the Yanzi River Basin

物质组成	流域形态	规模	易发程度	水源类型
泥石流 (77.5%)	山坡型 (8.2%)	大 (4.1%)	中易发 (59.2%)	暴雨型 泥石流 (100%)
		中 (50%)		
水石流 (22.5%)	沟谷型 (91.8%)	小 (46.9%)	低 (40.8%)	

生时间多发生于降水过程或稍微滞后。2009 年及 2010 年的暴雨事件导致康县—阳坝公路沿线及燕子河流域两岸斜坡底部发生了数量众多的地质灾害。活跃的构造运动对崩塌地质灾害的影响是持续性的,存在于灾害孕灾演化循环的各个过程中。在许多沟谷中,松散堆积物储量十分丰富,如遇到强降水等诱发条件,灾害依旧会反复发生。

2.3.2 地质灾害发育空间规律

区域地质灾害具有群发性特征,主要分布在高陡的河谷斜坡地带。具体到燕子河流域,地质灾害呈条带状集中分布在康县—阳坝公路沿线这一人类活动集中区域的“一路一带”上(图 1),其他区域相对较少;此外,流域北部文康断裂带(近东西向)上地质灾害发育较为集中。

3 灾害破坏模式及演化过程分析

相对于泥石流,区域内滑坡和崩塌灾害数量多,机理相对复杂,分布广泛且影响严重,因此,进一步展开对崩塌和滑坡的破坏模式和演化过程进行分析和总结,不仅能够为燕子河流域合理的进行地质灾害防治提供依据,更能够为城镇规划和土地利用等提供了重要的技术支撑。

3.1 崩塌破坏模式及过程分析

以《崩塌滑坡泥石流地质灾害调查与风险评价技术要求》(中国地质调查局技术要求,2016)中对崩塌破坏模式(坠落式、倾倒式、滑移式)为基础,结合现场调查成果与《工程地质分析原理》(张倬元等,2009)中崩塌破坏模式,根据崩塌发育和形变的特点,燕子流域崩塌灾害主要破坏模式主要有 3 种:碎裂-坠落、弯折-倾倒、碎裂-滑移(图 2~图 4)。

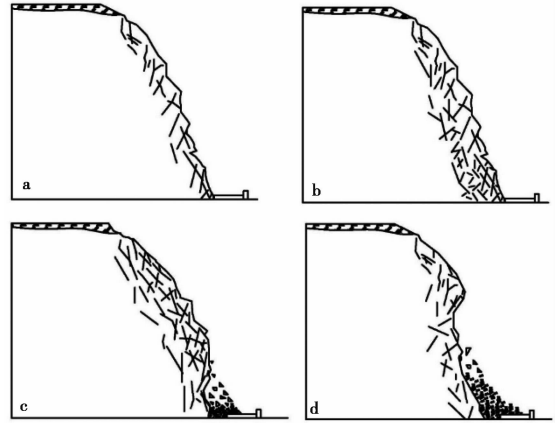


图 2 碎裂-坠落式崩塌破坏模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fracturing-load falling model

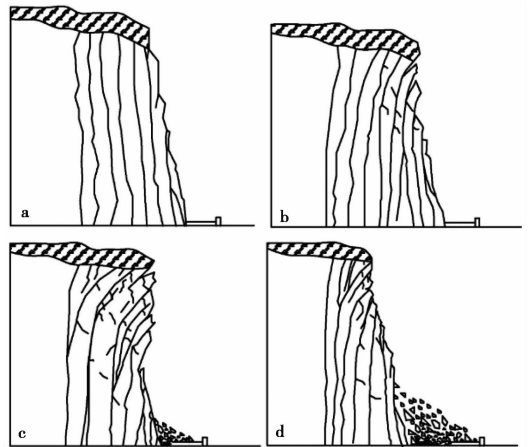


图 3 弯折-倾倒式崩塌破坏模式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bending-topping model

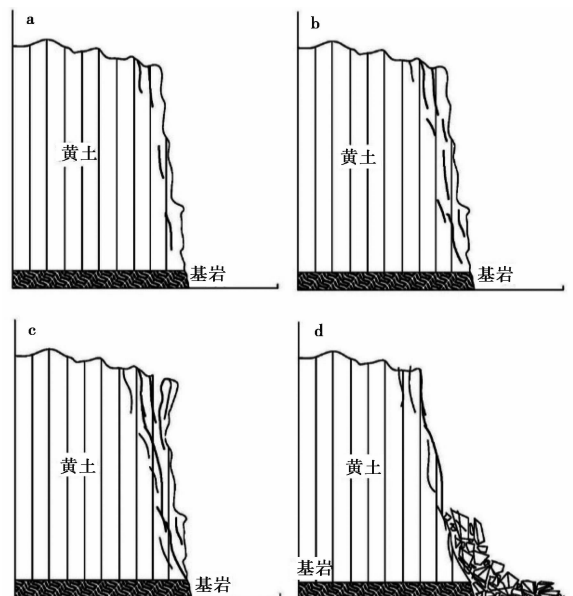


图 4 倾倒式崩塌破坏模式示意图

Fig. 4 Schematic diagram of toppling model

3.1.1 碎裂-坠落式

碎裂-坠落式崩塌破坏模式广泛发育于岩土体节理裂隙十分发育、岩土体破碎的逆向坡、逆斜坡体之中。发育地层的主要岩性为变质灰岩、变质砂岩、千枚岩、片岩等软弱、破碎、抗侵蚀能力差的岩石(图 2a)。该类型的崩塌发育的斜坡主要斜坡上的破坏过程主要可分为 3 个阶段:裂隙发育扩大(图 2b)、破裂面延伸贯通(图 2c)、破坏变形堆积(图 2d)。其破坏演化过程为:斜坡内部的卸荷裂隙,在地震、降水及人类活动等诱发因素的影响下逐渐扩展、延伸并形成了具有一定规模的破裂面,当破裂面最终贯通时斜坡将发生失稳并导致崩塌。由于其发育受到岩层结构(包括节理分布、节理密度及裂隙宽度)、的影响,而其启动则与降水等外部因素密切相关,因此,此类崩塌规模普遍较小,但是具有较强的突发性和反复洗。

3.1.2 倾倒式

根据其破坏过程,可以将倾倒式崩塌具体分为弯折-倾倒式和直接倾倒式两种。弯折-倾倒式崩塌主要发育在千枚岩、片岩等岩土体软弱、风化程度高但岩体具有一定韧性的反向坡及近直立斜坡上(图 3a)。其发育斜坡的典型地形主要的破坏过程主要可分为 3 个阶段:岩层弯折变形(图 3b)、倾倒面扩大贯通(图 3c)、崩解堆积(图 3d)。破坏演化过程为:斜坡陡峭的岩层在重力、上层荷载及降雨浸润等因素的影响下逐步产生形变,随着形变程度的不断增加,岩体上开始形成破裂面,并不断扩大直至贯通,当地层斜坡后部稳定地层无法支撑某部分岩体及其顶部的覆盖层时,该部分岩体将沿着破裂面倾倒,形成崩塌。该类型,崩塌规模、影响范围及破坏程度主要由斜坡原始地形、岩层产状、岩层风化程度等内在因素以及地震、降水等外部触发因素共同决定。由于岩石形变及风化过程相对缓慢,能够提供的物源有限,因此,该类型滑坡多呈现出群发的特征并且规模一般为中小型。此外,由于强降雨事件会润滑岩层并增加岩层上部盖层的质量,因此该类崩塌多发生在强降雨过程中。

与弯折-倾倒式不同,崩塌一般发生在具有基岩基座的陡直的黄土斜坡中(图 4a),其发育过程与黄土内部垂直节理及降雨入渗侵蚀密切相关。该类崩塌一般经历以下 3 个过程:黄土实现变形及裂缝扩张(图 4b)、滑移面逐渐形成并贯通(图 4c)、崩解堆积(图 4d)。其形变破坏过程可总结为:降雨作用下黄土斜坡发生湿陷及侵蚀,并导致垂直节理裂隙

不管发育和扩展,当裂隙逐渐贯通时,具有较好临空条件的外部土体岩破裂面发生局部滑动并最终倾倒崩解形成崩塌。

3.1.3 碎裂-滑移式

该类型崩塌主要发育在千枚岩、片岩、变质砂岩、变质灰岩等基岩呈层状变质岩区坡度较大的顺向斜坡上(图 5a)。其破坏模式可以分为 3 个主要阶段:裂隙延伸扩展(图 5b)、破裂面增大面贯通(图 5c)、崩解堆积(图 5d)。其破坏过程可概括为:顺向斜坡上部地层沿结构面逐渐风化破碎形成破裂面,随着破裂面逐渐贯通,下部地层与上部地层的联系持续减弱,当遇到强降水,地震等外部激发条件时,上部地层与下部地层脱离,发生崩塌。该类崩塌规模普遍较小,与强降雨事件同时发生或稍有滞后。

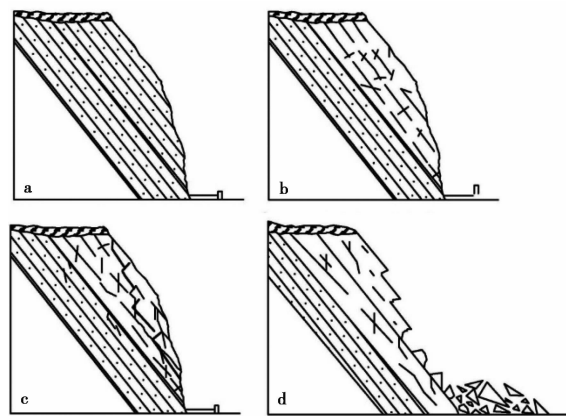


图 5 碎裂-滑移式崩塌破坏模式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of fracturing-sliding model

3.2 滑坡破坏模式分析

对燕子河流域滑坡灾害进行分析,根据燕子流域滑坡地质灾害的变形特征结合《工程地质分析原理》(张倬元等, 2009)中滑坡破坏模式,分析燕子河流域滑坡灾害破坏演化过程,总结出燕子流域滑坡灾害主要破坏模式主要有二种:蠕滑-拉裂式、滑移-拉裂式,滑移-拉裂式又分为顺向坡滑移拉裂式和逆向坡滑移拉裂式。

3.2.1 蠕滑-拉裂破坏模式

随着斜坡岩体不断风化,风化壳底部的应力不断集中,当斜坡下部的锁固段无法抵抗斜坡物质下滑趋势时发生变形破坏。该类型滑坡的滑动面可在对基层内部,也可在风化壳与基岩的接触面。此类滑坡广泛分布在基岩上部有一定厚度覆盖层的斜坡中。其破坏过程主要可分为 4 个阶段:表层岩土体风化(图 6a)、裂隙数量和深度的增加导致加速风化

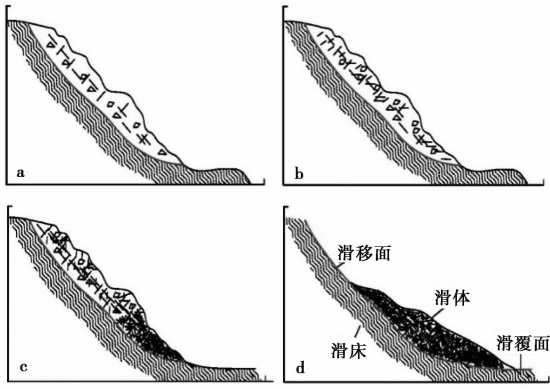


图 6 蠕滑-拉裂滑坡破坏过程示意图

Fig. 6 Landslide evolution of creep-tension creaking

(图 6b)、应力逐渐在坡脚集中(图 6c)、滑移动面逐渐贯通引起整体滑坡或局部滑动(图 6d)。

3.2.2 滑移-拉裂破坏模式

滑坡的滑移拉裂破坏多发生在岩质斜坡中,又分为顺向坡滑移-拉裂破坏(图 7)和逆向坡滑移-拉裂破坏(图 8b)。

逆向斜坡滑移-拉裂破坏广泛分布于岩体表层风化破碎、节理裂隙发育,存在软弱结构面的千枚岩、片岩逆向及逆斜陡倾地层中,其演化过程经历 5 个阶段:原始坡体坡脚在河流冲刷侵蚀或者坡脚开挖影响下开始出现裂缝并逐渐弯曲形成软弱滑移

面,随着上部荷载及诱发因素的持续作用,软弱面在前部坡体牵引作用下逐渐向上扩张,软弱面最终贯通,滑体整体弯曲滑移拉裂,最终整体滑移破坏。多受河道坡脚水流冲刷或人为切坡影响,以牵引式变形为主。

顺向斜坡滑移-拉裂破坏广泛分布于岩体表层风化破碎、节理裂隙发育,存在软弱结构面的变质砂岩、板岩、千枚岩顺向及顺斜陡倾地层中。其破坏演化经历 5 个阶段:原始坡体坡脚在河流冲刷侵蚀或者开挖影响下开始出现变形,随着上部荷载及外部影响因素的持续作用,坡脚应力逐渐集中,变形区沿着软弱面不断扩展,软弱结构面贯通后,滑体整体滑动,形成整体滑动。该类灾害在流水冲刷或人为切坡影响下,前缘易垮塌,牵引整体滑动。该类滑坡由于岩层坡度较大,临空面好,动力条件优秀,易形成高速滑动,突发性强,危害大。

4 结 论

(1)燕子河流域地形切割强烈,软弱变质岩广泛分布,新构造运动频繁,降雨量达且集中致使该区地质灾害十分发育。发育地质灾害有崩塌、滑坡、泥石流,其中崩塌、滑坡灾害发育十分严重,泥石流灾害发育一般。

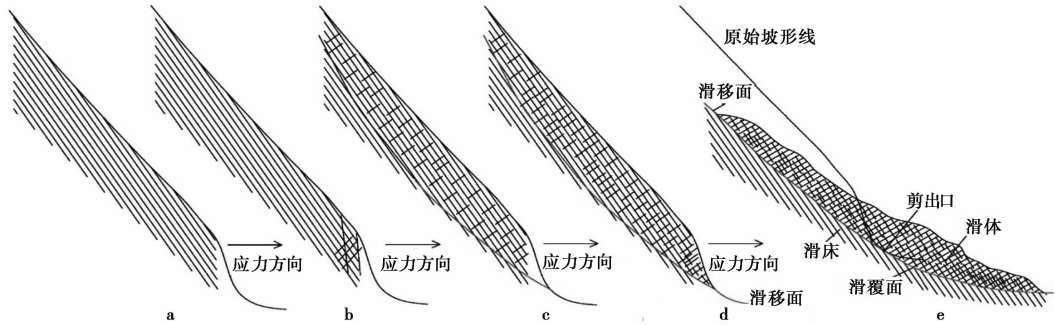


图 7 顺向斜坡滑移拉裂破坏模式

Fig. 7 Sliding-tension cracking failure mode in consequent slope

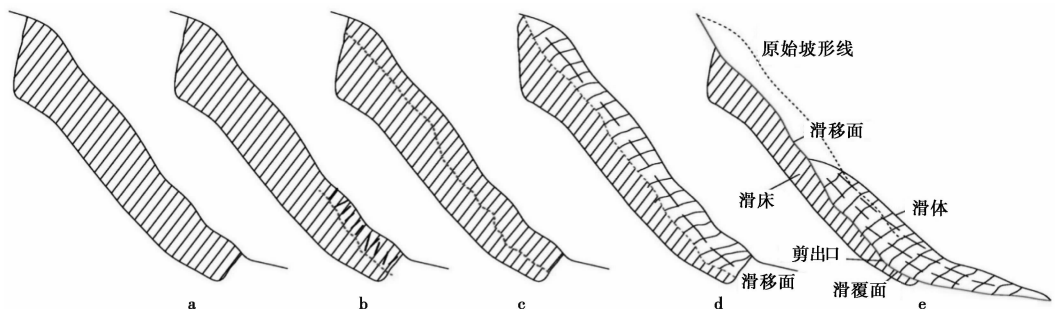


图 8 逆向斜坡滑移拉裂破坏模式

Fig. 8 Sliding-tension cracking failure mode in reverse slope

(2)区内滑坡以覆 b 盖层滑坡、浅层滑坡、小型滑坡、新滑坡为主,运动形式多为牵引式为主,多数处于基本稳定,以顺向坡和横向坡居多,剖面形态以凸型居多;崩塌以岩质、小型、复合式、中低位为主,多数处于不稳定状态,从斜坡结构以横向居多;泥石流以暴雨沟谷型泥石流为主,规模中、小型为主,中、低易发。

(3)该区域地质灾害发育时空分布不均。空间上,灾害主要发生在沟谷斜坡地带,尤其在康县—阳坝公路沿线“一路一带”上较为密集;时间上,灾害事件大部分与强降水事件相关,因此,多集中在7-9月的雨季。整体上,受地质条件、人类开发活动、强降雨事件的影响,该区域地质灾害表现出群发性、突发性、反复性的特点。

(4)崩塌灾害受软弱岩层岩性及结构面的控制,主要破坏模式可分为碎裂-坠落、倾倒、碎裂-滑移3种类型。虽然其发育过程各不相同,但是整体上每种破坏模式均经历岩土体风化变形破碎、结构面不断扩展直至贯通、斜坡失稳发生破坏和堆积的过程。

(5)滑坡灾害的主要破坏模式为蠕滑-拉裂式、滑移-拉裂式,滑移拉裂式又分为顺向坡滑移拉裂式和逆向坡滑移拉裂式。蠕滑-拉裂式破坏形成的滑坡多沿着土-岩接触面发生,分布广泛,为燕子河流域主要滑坡形成模式;逆向滑移-拉裂式多发生于千枚岩等软弱岩层形成的滑坡,顺向滑移-拉裂式广泛分布于千枚岩、板岩、变质砂岩等致灾地层中,顺向滑移-拉裂式破坏速度快、威胁大,应重点防范。

参 考 文 献

- Bai S, Wang J, Zhang Z, et al. 2012. Combined landslide susceptibility mapping after Wenchuan earthquake at the Zhouqu segment in the Bailongjiang Basin, China[J]. *Catena*, 99(Supplement C): 18-25.
- Wang G L. 2013. Lessons learned from protective measures associated with the 2010 Zhouqu debris flow disaster in China[J]. *Natural Hazards*, 69(3): 1835-1847.
- 曾宇桐, 乔良, 曾润强, 等. 2014. 人工降雨条件下坡积层斜坡入渗与地表径流监测[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 50(5): 659-665.
- 郭鹏. 2015. 白龙江流域降雨型泥石流成因机理研究[D]. 兰州: 兰州大学.
- 黄江成, 杨顺, 潘华利, 等. 2014. 白龙江流域泥石流特征分析[J]. *水土保持通报*, 34(1): 311-315.
- 马金珠, 王雄师, 张鹏, 等. 2015. 白龙江流域滑坡泥石流地质灾害与风险分析[M]. 兰州: 兰州大学出版社.
- 穆鹏, 吴玮江, 折学森. 2012. 汶川地震重灾区陇南红土坡滑坡稳定性分析与防治对策研究[J]. *工程地质学报*, 20(2): 204-212.
- 谭龙, 陈冠, 王思源, 等. 2014. 逻辑回归与支持向量机模型在滑坡敏感性评价中的应用[J]. *工程地质学报*, 22(1): 56-63.
- 王莉霞, 姜桂霞. 2012. 康县的山地灾害及防治对策[J]. *中国水土保持*, (4): 58-60.
- 熊木齐, 孟兴民, 庆丰, 等. 2016. 甘肃省陇南市白龙江流域泥石流灾害事件与降水特征的关系[J]. *兰州大学学报(自科版)*, 52(3): 295-300.
- 张小辉, 杨强, 刘金辉, 等. 2017. 燕子河流域崩塌地质灾害成灾机理分析[J]. *水土保持研究*, 24(3): 351-356.
- 张俾元, 王士天, 王兰生, 等. 2009. *工程地质分析原理*[M]. 北京: 地质出版社.
- 中国地质调查局技术要求. 2016. 崩塌滑坡泥石流调查评价技术要求(试用版)[S]: 68-69.