

杂谷脑河下游坡面泥石流发育特征及防治对策

黄 海^{1,2}, 石胜伟^{1,2}, 谢忠胜^{1,2}

(1. 中国地质调查局 地质灾害防治技术中心, 成都 611734; 2. 中国地质科学院 探矿工艺研究所, 成都 611734)

摘 要:以杂谷脑河下游为研究对象,对干旱河谷气候区的坡面泥石流发育条件、固体物质类型与分布进行了分析,基于物源特征,将坡面泥石流分为崩滑型、沟谷冲蚀型、坡面侵蚀型和面蚀型四种类型。通过分析坡面土体启动的力学过程、泥石流启动机理、致灾方式三者之间的耦合关系,探索了土体失稳临界状态及造成其失稳的关键外力因素,揭示泥石流启动过程中的水、土相互作用及影响机制。研究表明,在相似的水力条件和地形地貌下,斜坡表层土体的空间分布及受力状态控制坡面泥石流频次、规模和致灾方式,由此提出基于物源受力过程和保护对象的优化防治模式,并为具有相似下垫面条件的川西北干旱河谷区的坡面泥石流防治提供参考。

关键词:杂谷脑河; 坡面泥石流; 启动机理; 力学过程; 防治对策

中图分类号: P642. 23

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)06-0111-06

Occurrence Characteristics and Preventions of the Debris Flow on Slope in the Lower Reaches Zagunao River

HUANG Hai^{1,2}, SHI Sheng-wei^{1,2}, XIE Zhong-sheng^{1,2}

(1. *Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS,*

Chengdu 611734, China; 2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu 611734, China)

Abstract: Base on the research of the downstream region of Zagunao River, the arid valley slope debris flow conditions, the process of formation mechanism of the solid material, and the affection mechanism of the different materials were analyzed. The slope mud rock flows were divided into four types such as slump-type, channel erosion type, slope erosion type and plane erosion type based on the characteristics of solid material. By analysis of soil slope disaster caused by mechanical process, mechanism of debris flow start, coupled relationship between the three explores the critical state of instability and cause instability of soils of key external factors, the startup process of debris flow mechanism of water-soil interaction and mutual influence were revealed. The results showed that under the similar hydraulic conditions and topography, frequency, size of slope debris flow and disaster were controlled by spatial distribution of surface soil from the slope and stress. The resulting force procedures and protection of objects based on source optimization control model were put forward and references were provided for debris flow control slope with imilar underlying surface conditions in arid river valley region in northwest Sichuan.

Key words: Zagunao River; slope debris flows; formation mechanism; strained condition; prevention counter-measures

坡面泥石流主要发育在具有汇流条件的自然斜坡上,微地貌形态主要表现为发育初期的浅沟、细沟和冲沟,一般其长度小于 1 km,汇水面积小于 0.5 km²,纵比降大于 600‰。国内学者主要对坡面泥石流的定义、分类及外部发育条件开展了大量研究工

作。姚一江^[1]将坡面泥石流定义为发育于无明显沟谷形态的斜坡上的小型冲沟内的泥石流灾害,从灾害发育的地形地貌条件上与沟谷泥石流相区分,并根据物源类型对其进行了分类,徐刚^[2]、刘成^[3]、彭涛^[4]等以重庆北碚区为研究对象,对坡面泥石流的特点、发

育地貌条件、植被等因素进行了总结。黄勇^[5]、黄慧^[6]等对危害公路、铁路等线性工程的坡面泥石流的成因进行了描述,并提出了有效的防治措施。这些研究对坡面泥石流的三大发育条件进行了定性分析和较为系统的总结,但对决定泥石流特征的土体启动的力学过程分析较少,缺乏对坡面泥石流起动机理和致灾过程的定量描述。理论研究的不足导致坡面泥石流防治技术与灾害发育机理、致灾过程产生脱节。

杂谷脑河下游干旱河谷气候区具有山高坡陡的地貌特点,干湿交替和降雨集中的气候特征以及褶皱断层发育的地质构造,历来为泥石流灾害高易发区^[7-8]。由于泥石流堆积扇是高山峡谷中的人们生产生活的主要区域,因此前人针对该区的泥石流灾害研究更多偏重于沟谷型泥石流,对具有发育面积广、单次灾害规模小、单点灾害危险性小的坡面泥石流研究相对较弱。随着社会经济的发展,杂谷脑河河谷区域人类活动越来越强烈,近年相继投资建设的大量基础工程,如 G317 国道改造、汶(川)—马(尔康)高速公路以及当地的新农村建设等,给研究区的坡面泥石流灾害防治提出了新的要求。

本文拟通过分析杂谷脑河下游坡面泥石流灾害的成灾机理,提出基于土体启动的力学过程的坡面泥石流防治思路,初步分析坡面泥石流防治工程的适宜性,为包括杂谷脑河、黑水河、大金川上游、岷江松潘县至汶川县的川西北干旱河谷区的坡面泥石流灾害的防治提供理论支撑。

1 泥石流发育条件

1.1 固体物源条件

泥石流灾害的物源主要受区域内地质构造影响,活跃的新构造运动加速了斜坡演化,为泥石流灾害提供了丰富的松散物质。杂谷脑河地处龙门地震带中段,地质构造复杂,发育有薛城 S 型构造,研究区主要受中段和北东段控制。区内地层岩性复杂,以泥盆系危关群和志留系茂县群的千枚岩、砂岩为主,河谷两侧斜坡主要覆盖有残坡积层,高海拔区域还分布有冰水堆积(图 1)。在杂谷脑河强烈下切及区域新构造运动强烈的抬升作用下,河谷两岸松散堆积边坡具有高陡临空面,为其土体失稳提供了良好的地形条件,尤其受“5.12”汶川地震影响,斜坡发育大量表层溜滑、坡面侵蚀、崩塌滑坡等不良地质现象,这也是区内坡面泥石流灾害点急剧增加的直接因素。受地震影响,斜坡土体结构更加松散,植被进一步被破坏,因此未来坡面泥石流将进入新的活跃期^[9]。

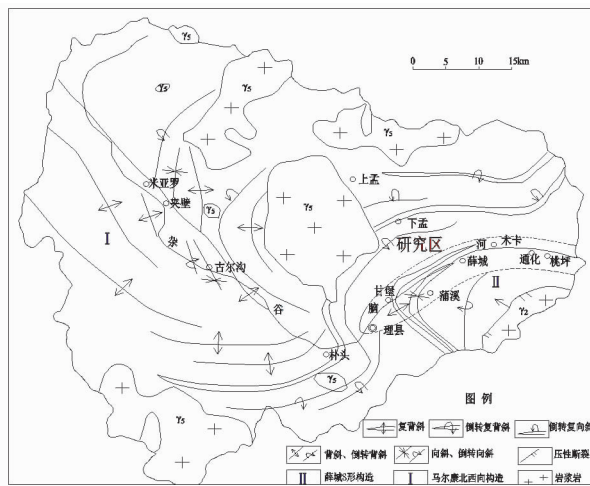


图 1 研究区地质构造

1.2 水力条件

杂谷脑河流域位于川西北山区,属岷江上游半干旱河谷地区,气候受地形影响显著,年降水量在四川境内属偏少的地区。气候垂直分带明显,总体气候干燥,降水量少且季节分配不均,干雨季分明,雨季集中于 5—9 月。从理县县城杂谷脑镇至桃坪乡,降雨量呈减小趋势,且降雨的集中度呈增加趋势,7—9 月的降雨量占全年的 70% 以上,越往杂谷脑河下游,降雨的集中程度越高^[10]。

据吴积善^[11]的研究成果,川西北山区泥石流激发雨量一般为一次雨量 48~50 mm 左右或 10 min 雨量 8~12.2 mm,1 min 雨强 0.8~1.2 mm 左右。研究区降雨集中,20 a 一遇的频率下 10 min 雨强均在 20 mm 以上,其暴雨雨强能够满足激发泥石流的条件,暴雨是泥石流的主要诱发因素。

1.3 地形地貌条件

研究区地貌类型属于侵蚀深切河谷区,沿杂谷脑河谷呈条带状分布,河谷呈 V 型,两岸坡度 35°~60°,其中 45° 以上的坡一般基岩裸露,物源补给以崩塌为主;35°~45° 的斜坡则主要发育着滑坡、坡面侵蚀等不良地质现象。区内斜坡相对高差 200~450 m。斜坡平面上可分为凹形、凸型以及平直型三类,下凹状坡面主要为泥石流的汇流区域,上凸状区域则主要为老滑坡崩塌等形成的堆积斜坡,平面型为斜坡演化初级阶段,沟谷下切与斜坡堆积基本处于平衡阶段。斜坡的形态与坡面泥石流灾害的规模密切相关。研究区内典型坡面泥石流地貌特性如表 1 所示。

1.4 植被因素

植被对坡面浅表层土体的稳定性有较大的影响,主要表现在泥石流的水源汇流和固体物质补给两方面。良好的植被覆盖具有涵养水源,减小降雨产流等作用,植被越好,地表径流峰值流量越小,对斜坡作用

力越小;另一方面,降雨稀少区域的植物根系非常发育,根系对浅表层土体具有明显的锚固作用,有利于土体的稳定性和整体性。地表若缺少了植物的覆盖保护,降雨的侵蚀作用强烈、径流汇流过程短暂且峰值流量大时,为泥石流的形成提供了良好的水力条

件^[12];同时,植被具有延缓土体物理分化过程的作用。裸露土体温度上升和下降均非常迅速,昼夜温差大,加速了土体的物理风化过程,并使土层干湿循环速度加快,破坏土体细观稳定结构,在径流作用下,易启动形成补给泥石流。

表 1 研究区典型坡面泥石流地貌特性

泥石流灾害点	沟口高程/m	类型	坡面坡度/(°)		坡面形态	地貌形状
			汇流区	形成流通区		
八十脑	1820	崩滑型	40	54	凹	条带状
木堆沙场	1675	崩滑型	27	38	凹	柳叶状
蒲溪沟口	1630	冲蚀型	43	52	凸	条带状
薛城棚洞	1605	面蚀型	44	50	平	锥状
较场口	1595	崩滑型	23	37	凹	银杏叶状
黄土梁子	1570	坡面侵蚀型	35	37.8	凹	柳叶状
回龙桥电站后山	1565	崩滑型	34	38	凹	条带状
大河坝	1530	坡面侵蚀型	34	49	凹	银杏叶状
大槽沟	1481	冲蚀型	36	47.5	凸	条带状

研究区属于干旱河谷,植被覆盖差,以灌丛和低覆盖草地为主。以薛城镇为分界线,下游段河谷两岸以裸露土石为主,仅海拔 2 400 m 以上的高山区及部分阴坡面零星有森林分布;上游段则由草甸、灌丛过渡到森林,总体植被覆盖好于河谷下游,坡面泥石流空间分布上也表现为随着植被覆盖率的增加,泥石流活动越来越弱。

2 坡面泥石流分类及特征

2.1 坡面泥石流类型

坡面泥石流是坡面松散物质在地表径流的作用下启动,并与水流混合形成泥石流体的过程^[13]。不同类型的泥石流其松散物质的分布及与水流混合的过程均

有差异,根据固体物质特征将坡面泥石流划分为面蚀型、冲蚀型、坡面侵蚀型和崩滑型四种类型(表 2)。

2.2 坡面泥石流的特征

面蚀型坡面泥石流发育与冲沟不发育的平面型斜坡上,下覆地层主要为崩坡积堆积或残积等松散土体。受上部汇集的地表径流运动的侵蚀作用,形成小型冲蚀细沟,松散物质与水混合形成坡面泥石流,本类型的泥石流具有粘度高,流速缓,流量小等运动特征。在空间分布上,表现为在一段斜坡上密集平行发育,一个完整的汇水区斜坡一般发育 3~5 条面蚀型坡面泥石流。随着坡面的演化,细沟进一步发育,形成较大冲沟,则面蚀型坡面泥石流将向冲蚀型转化。泥石流基本特征如图 2a 所示。

表 2 坡面泥石流分类统计

序号	类别	物质补给方式
1	崩滑型	斜坡上发育崩塌、滑坡等,在地表径流侵蚀下,土体解体沿着沟道或凹槽往山脚运动
2	冲蚀型	冲沟内径流侵蚀沟底和沟岸,两侧土体往沟道内聚集并随着径流往下游运动
3	坡面侵蚀型	斜坡上松散物质在重力侵蚀等作用下往沟道内聚集,并在流水作用下补给形成泥石流
4	面蚀型	流水侵蚀斜坡松散土体,形成小型冲沟

冲蚀型坡面泥石流的主要物源为沟岸两侧的覆盖层在径流侵蚀作用下发育的小规模垮塌。坡面冲沟的纵比降较大,沟内径流流速大,且受粗糙沟床的影响,径流紊动强烈,冲刷能力强。沟道往下切蚀加深,和沟谷侧向侵蚀加宽的过程中,岸坡土层将产生垮塌进入沟道,混合径流后即形成泥石流。当沟道横向扩展至一定程度后,相同流量下,沟内径流流深减小,流速减小,紊动强度也相应减小,造成总体冲刷能力和挟沙能力均降低,此时,因沟道的冲蚀作用形成

泥石流的可能性很小,泥石流发育特征向坡面侵蚀型转化。泥石流基本特征如图 2c 所示。

坡面侵蚀型与崩滑型坡面泥石流两者发育特征具有较大的相似性,区别在于两者的固体物质来源不同,分别如图 2b 和图 2d 所示。前者为因坡面重力侵蚀堆积于沟道内的松散物质,后者则为冲沟汇水区域内发育的崩塌滑坡堆积体。崩滑型泥石流主要受滑坡崩塌灾害点控制,规模取决于崩滑体解体的方量。其具有突发性、规模频次随时间呈减小趋势等特点。

坡面侵蚀型泥石流则具有明显的周期性,主要原因为其固体物源的汇集需要一定的时间。周期的长短主要与区域新构造运动和地震等灾变因素密切相关,如研究区的坡面侵蚀型坡面泥石流受“5.12”汶川地震影响,其暴发频率明显提高。

由以上分析可知,四种类型坡面泥石流是斜坡和沟道演化过程中的不同阶段的表现,从地质年代看,其演化的先后顺序为:面蚀型—冲蚀型—坡面侵蚀型。而崩滑型则为沟道形成后,在人类活动或构造影响下的突变偶然事件。

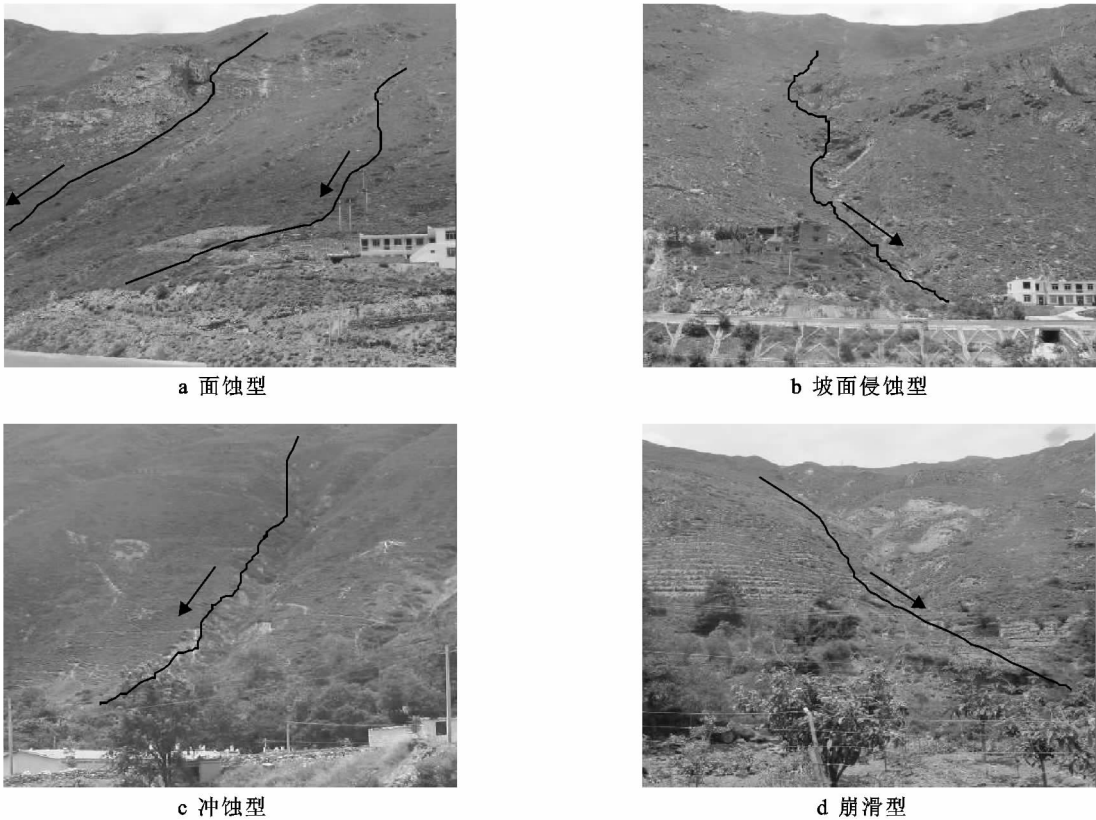


图 2 四种类型坡面泥石流特征

3 启动机理及致灾方式

在降雨和地表径流的作用下,坡面松散土体的整体性和稳定性遭受破坏^[14],启动并与水体混合形成泥石流的过程中,其力学模式有三种:整层土体所受的下滑力大于其抗剪强度,从而产生滑动;土体在流体的侧蚀作用下形成凹腔而悬空,悬空部分土体重力大于其粘结力,以坠落式运动至沟道内与水体混合形成泥石流流体;土体(块石)基座被破坏,在自重作用下运动。

3.1 整层土体启动

当土体微元厚度为 H ,斜坡表层水体向下渗透,使整个土层达到饱和,土体容重增加, φ 与 c 减小,出现 $\tau > \tau_L$,发生整层下滑,力学模式见公式(1)和(2),受力状态如图 3 所示。

$$\tau = \{ H[\gamma_s - N_e(\gamma_s - \gamma_w)] + h_o\gamma_m \} \sin\theta + F \tag{1}$$
$$\tau_L = \{ H[\gamma_s - N_e(\gamma_s - \gamma_w)] + h_o\gamma_m - \gamma_w(H + h_o) \} \cos\theta \tan\Phi + c \tag{2}$$

式中: τ ——土体微元受到的向下的剪切力; τ_L ——土

体微元临界剪力; H ——土层厚度; γ_s ——土体中固体颗粒的比重; γ_w ——水体的比重; θ ——斜坡或沟床的坡度; h_o ——超渗薄层表面径流深度; γ_m ——雨滴发生溅蚀产生的浑水容重; N_e ——土体孔隙度; c ——土体所受的粘结力; F ——径流运动对土体产生的冲刷力。

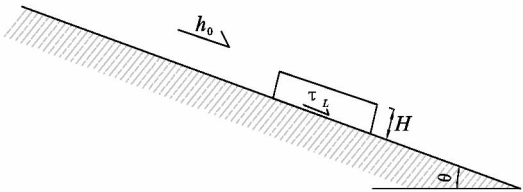


图 3 土层整体启动时受力分析图

土体受到的沿坡面的下滑力 τ 包含土体自重产生的下滑分力和地表径流对土体的冲刷作用力,其中自重部分的力是固定的,而冲刷力则为土体受到的主要外营力,包含径流的自重、径流运动的冲击力、径流流动的摩擦力。其下滑力主要受地表径流的影响,当地表径流为清水时,沟道中土层所受下滑力有限,表现为沟道中局部土体启动,而当沟道中径流为高含沙

水流或泥石流流体时,其作用在土体上的力大大超过清水,启动沟道中的土层作用非常明显,现实中主要表现为泥石流的规模以“滚雪球”式不断增大。

3.2 冲沟侧蚀沟岸

冲沟沟床在地表径流冲蚀作用下,产生向下的揭底侵蚀和向两侧扩展的侧蚀,两侧沟岸底部土体被径流携带后,形成悬空凹腔^[15](图 4)。悬空部分土体主要以粘结力与母体连接,当土体重力和地表径流压力大于破裂界面的粘结力时,发生滑动或坠落从而补给沟道流体。整个启动过程可分为 4 个阶段:冲沟侧蚀;土体产生凹腔;悬空部分土体产生裂隙;土体坠落沟道,混合沟道内流体形成泥石流^[7]。

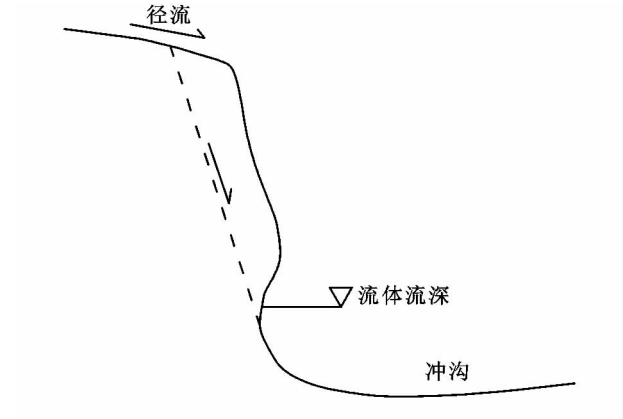


图 4 沟道冲蚀示意图

3.3 块石基座破坏启动

斜坡上的块石主要由上部崩塌滑坡体产生,本身其受力状态较差,外部给予一个极小的外力即可能造成力学状态的不平衡,块石将向下运动。在暴雨时期,地表径流翻越块石后,强烈的冲刷作用将在块石下部产生冲刷坑,减小维持块石平衡的反力,在地表径流给予向下的冲击力时,将诱发块石沿坡面滚落,进入冲沟后,将随着沟内地表径流或泥石流流体一起向下运动。其对下部建筑物产生的巨大冲击力,是坡面泥石流中破坏性最大的方式。块石基座破坏启动示意图见图 5。

3.4 坡面泥石流启动过程

实际上,坡面泥石流的固体物质的这三种启动方

式并不是单独存在的,灾害体往往是一个复杂的过程,包含了多种启动模式。根据物源的空间位置和物质组成,将四种类型坡面泥石流的启动方式概化为三种力学组合(表 3)。

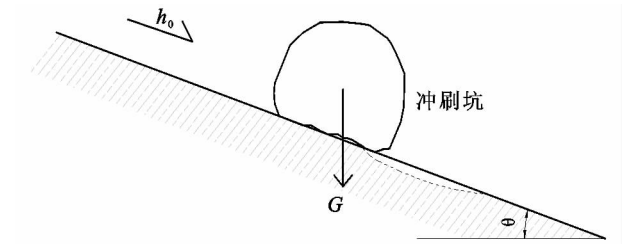


图 5 地表径流造成块石下部基座破坏示意图

表 3 坡面泥石流启动的力学模式

泥石流类型	力学组合模式	致灾模式
崩滑型	$a+b+c$	冲击和於埋
沟道冲蚀型	$b+c$	冲击和於埋
坡面侵蚀型	$a+c$	主要为冲击,可能产生小范围於埋
面蚀型	a	以於埋为主

注: a 为整层土体启动; b 为冲沟侧蚀沟岸; c 为块石基层破坏启动。

4 防治模式

针对泥石流灾害受灾对象的不同,一般采取不同的防治模式。线路工程如公路、铁路一般采用“被动避让”的防治思路,以泥石流灾害体顺利通过工程而不损害工程为防治目标,主要工程措施有棚洞、渡槽、排导槽等^[8],具体可根据实际地形地貌选择工程种类。针对居民点等点状保护对象一般采取“拦排结合”的治理思路,以避免房屋、耕地等遭受泥石流於埋和冲击为防治目标,主要工程措施有排导槽、单侧防护堤、谷坊坝等。针对流域综合治理则采取“固源防沙”的防治思路,主要工程措施有谷坊坝群、植树造林、停淤场等^[16],通过多种治理措施的组合预防斜坡松散土体启动形成泥石流,如王道杰^[17]提出的谷坊与植物结合的坡面泥石流防治方法。对于不同类型的坡面泥石流灾害,由于其启动模式的区别和致灾方式的不同,其灾害防治的原则也有所区别。综合致灾模式和保护对象两个因素的防灾对策如表 4 统计。

表 4 坡面泥石流的防治措施分析

保护对象	防治思路	主要工程措施	工程实例应用
公路等线性工程	面蚀型、崩滑型坡面泥石流宜采用棚(明)洞,沟谷冲蚀型和坡面侵蚀型宜采用渡槽或排导槽等	棚(明)洞、渡槽、排导槽等	薛城泥石流
居民及厂矿等重要设施耕地	面蚀型、崩滑型坡面泥石流宜采用排导槽和单侧防护工程,沟谷冲蚀型和坡面侵蚀型宜采用谷坊坝和排导槽等	谷坊坝、排导槽或单侧防护工程	黄土梁泥石流、大河坝泥石流
小流域水土保持治理	面蚀型宜采取生物措施进行固坡,崩滑型宜设置护坡工程、拦挡工程和停淤工程,沟谷冲蚀型和坡面侵蚀型宜设置谷坊坝和植物措施等	谷坊群、停淤场、截水措施、植物措施	较场口泥石流 大槽沟泥石流

5 结论

(1) 杂谷脑河流域干旱河谷区地形平均坡度 $35^{\circ} \sim 60^{\circ}$, 且上缓下陡, 为泥石流的固体物质形成和启动提供了良好的地形条件和动力条件; 降雨集中, 雨强大, $P=5\%$ 频率 10 min 雨强在 20 mm 以上, 为泥石流形成提供了良好的水力条件; 区内地质构造复杂, 新构造运动强烈, 坡体松散, 为泥石流形成提供了丰富的松散固体物质; 干旱的气候导致坡体上植被覆盖稀少, 为地表径流提供了良好的汇流条件。

(2) 根据固体物质空间分布和物质组成的不同, 将干旱河谷区坡面泥石流分为崩滑型、沟道冲蚀型、坡面侵蚀型和面蚀型四种类型, 四种类型的坡面泥石流是斜坡沟谷发育不同阶段的表现。

(3) 研究表明, 地表径流对土体启动的三种力学模型均有决定性作用, 因此通过生物措施增大斜坡植被覆盖率可有效减小坡面泥石流的暴发规模和频次。

(4) 坡面泥石流固体物源的启动可概化为三种力学模式: 整层土体启动、冲沟侧蚀沟岸和块石基座破坏启动, 分别对应於埋、於埋+冲击、冲击三种致灾模式, 四种类型的坡面泥石流的启动机理可通过三种力学模式的组合来描述。

(5) 坡面泥石流的防治主要与保护对象密切相关, 线性工程主要采取被动防护如棚洞、明洞等措施, 而综合治理则主要利用稳固工程如谷坊坝群、停淤场、植树造林等措施。具体工程措施的选择由坡面泥石流的类型及启动的力学过程决定。

参考文献:

- [1] 姚一江. 坡面泥石流的类型, 分布规律及防治[J]. 中国水土保持, 1991(9): 24-25.
- [2] 徐刚. 坡面泥石流流域地貌要素的概率分布[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(2): 70-74.
- [3] 刘成, 徐刚, 杨娟, 等. 激发坡面泥石流发生的坡度因素探讨: 以重庆市北碚地区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 165-168.
- [4] 彭涛, 徐刚, 夏大庆. 坡面泥石流暴发的自组织临界特性及其预测预报[J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 104-108.
- [5] 黄勇, 杨三强, 周雁, 等. 高寒高海拔山区公路坡面泥石流防治研究[J]. 资源与环境工程, 2009, 23(专刊): 107-110.
- [6] 黄慧. 湘黔铁路 K711~K713 坡面泥石流病害工点的整治[J]. 路基工程, 2000, 89(2): 64-66.
- [7] 孟国才, 王士革, 谢洪, 等. 岷江上游泥石流灾害特征分析[J]. 灾害学, 2005, 20(3): 449-456.
- [8] 王晰. 岷江上游泥石流活动的分布特征研究[J]. 重庆师范学院学报: 自然科学版, 2000, 17(4): 70-74.
- [9] 冯文凯, 杜杰, 王豫川, 等. 一颗印沟泥石流评价及震后预测[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 43-46.
- [10] 黄海, 石胜伟, 谢忠胜, 等. 杂谷脑河流域暴雨型泥石流沟地貌特征分析[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 203-206.
- [11] 吴积善, 田连权, 康志成, 等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 192-214.
- [12] 夏大庆. 坡面泥石流发生中的植被因素分析[D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [13] 吴积善, 程尊兰, 耿学勇, 等. 粘性泥石流产流机理探讨[J]. 泥沙研究, 2007(2): 17-23.
- [14] 张万顺, 乔飞, 崔鹏, 等. 坡面泥石流起动模型研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 69-72.
- [15] 陈洪凯, 陈野鹰, 唐红梅, 等. 泥石流沟岸冲蚀演绎及动力学研究[J]. 公路, 2002(12): 149-154.
- [16] 王道杰, 陈吕容, 周麟, 等. 山地灾害治理中生物工程存在的问题[J]. 山地学报, 2004, 22(4): 461-466.
- [17] 王道杰. 一种泥石流沟谷生态工程泥沙拦固方法及其应用[P]. 中国专利, 201110009123, 2012-09-05.