

【水土保持】

泥石流沟道纵剖面形态演化试验研究

李浦^{1,2,3}, 胡凯衡^{2,3}, 陈成^{1,2,3}

(1.中国科学院大学,北京 100049; 2.中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室,四川成都 610041;
水利部
3.中国科学院成都山地灾害与环境研究所,四川成都 610041)

摘要:通过室内水槽试验,探讨了坡度不连续沟道经泥石流侵蚀后纵剖面形态的演化特征。试验中底床纵剖面由3个坡度不连续的坡段组成,相邻坡段间形成了纵向上的坡度转折点,即凹转折点和凸转折点。结果表明:凸转折点附近在侵蚀过程中并没有产生溯源侵蚀,而是逐渐平滑化;凹转折点附近的侵蚀具有明显的冲击侵蚀特性,出现了明显的侵蚀坑;侵蚀后纵剖面起伏与沟床转折角有关,当转折角较小时,以水力侵蚀为主,侵蚀后纵剖面起伏较小,当转折角增大时,重力侵蚀逐渐增强,出现局部崩塌或滑坡,侵蚀后沟道纵剖面起伏增大。

关键词:纵剖面; 形态演化; 坡度转折点; 泥石流

中图分类号: S157.1; P642.23 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.08.017

Experimental Study on Longitudinal Profile Evolution in Debris Flow Channels

LI Pu^{1,2,3}, HU Kaiheng^{2,3}, CHEN Cheng^{1,2,3}

(1.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2.Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, CAS & MWR, Chengdu 610041, China;

3.Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS & MWR, Chengdu 610041, China)

Abstract: This paper adopted flume experiments to explore the bed longitudinal evolution of debris flows in slope-changing channels. The original bed longitudinal morphology was composed of three sections with varying slopes and every two adjacent slope-discontinuous sections produced longitudinal inflexion points, including concave and convex points. By means of experimental observation and data analysis, the following conclusions have been obtained: in concave sections, the inflexion points are gradually smoothed and headward erosion seems quite weak; in convex sites obvious impact erosion is detected with rather deep erosion hole; the topographic relief of post-experiment bed profile also correlates with inflexion points. Small transition angles imply lower relief where the erosion process is dominated by hydraulic erosion. When transition angle grows, mass erosion is intensified and landslides and avalanches emerge on a small scale, generating higher relief in the post-experiment bed profile.

Key words: longitudinal profile; morphology evolution; inflexion point; debris flow

泥石流是重要的地貌外营力作用之一。在泥石流沟道的演化进程中,如果没有其他强地质事件影响,在侵蚀下切和堆积淤高等作用下,泥石流就会持续地改造沟道纵剖面形态,直至形成均衡纵剖面(此时泥石流沟道达到了动态冲淤平衡,处于相对稳定的状态)。沟道纵剖面形态的演化过程对沟道侵蚀防治和地貌发育程度判别有着十分重要的意义^[1]。田连权^[2]通过调查蒋家沟流域的地貌和泥石流之间的关系,认为蒋家沟泥石流的发生、发展受控于流域地貌(坡地和沟道)演变过程,又影响着流域地貌演变。李泳等^[3]利用积分形式重新定义泥石流沟道的比降,用比降曲线的变化直观反映流域物质通过沟道的改变。张妮等^[4]通过对232条泥石流沟道资料进行分析,发现发展期泥石流的形成区地貌因子分维值相对较小,旺盛期泥石流的形成区相对接近圆形,衰退期泥石流沟一

般具有较缓的沟槽比降。蒋忠信^[5]以西藏帕隆藏布冰雪融水泥石流沟谷为研究对象,提出了描述泥石流稳定和发育程度的沟谷纵剖面形态指数,用来刻画沟谷纵剖面的凹凸性。

一次强烈的地震或强降雨过程往往会重新塑造泥石流沟道地貌,打破外营力作用下沟道的冲淤平衡和

收稿日期: 2016-07-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41371039);国家重点基础研究发展计划项目(2015CB452704);中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金资助项目(Y3K2040040)。

作者简介:李浦(1990—),男,江西萍乡人,博士研究生,研究方向为泥石流动力学过程和数值模拟。

通信作者:胡凯衡(1975—),男,江西瑞金人,研究员,博士,从事泥石流减灾理论与技术、泥石流动力学过程和数值模拟研究工作。

E-mail: khhu@imde.ac.cn

自然演化过程。比如:汶川地震引发的四川清平文家沟大型滑坡,堆积了8 000万m³的松散物质在沟道中,完全改变了原有的沟道形态,形成了从12°到32°的不连续陡坡段^[6];2000年发生的象神台风使台北青山区日降雨量达到774 mm,引发了大量的山体滑坡,产生了大约20万m³的松散物质,改变了沟道的纵剖面形态^[7]。泥石流发生过程中,受崩塌、滑坡或地震等自然因素影响,泥石流沟道中突然增加大量的松散堆积物,产生了一系列坡度转折点:凹点和凸点(凹点表示地形坡度由陡变缓,凸点表示地形坡度由缓变陡),纵剖面的形态由原来的光滑曲线变为不光滑的折线(见图1)。受强烈干扰的沟道在后期泥石流的动力作用下,形态不断进行调整,最终重新形成一个动态平衡的沟道纵剖面。

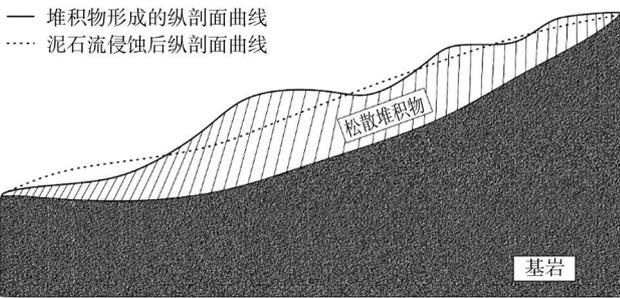


图1 地震松散物质堆积对沟道纵剖面的影响和演变示意

为了研究震后泥石流沟道纵剖面的演变过程,笔者尝试通过水槽试验研究在泥石流动力作用下存在坡度转折点的泥石流沟道纵剖面形态发展特征,揭示泥石流在沟道纵剖面凹点和凸点处的侵蚀机理,以期震后泥石流的工程防治提供参考。

1 试验设计和方法

试验在云南省昆明市东川蒋家沟泥石流观测研究站进行。试验装置主要包括料斗、水槽和尾料池3部分。主体部分的水槽长4.0 m、宽0.3 m、高1.0 m,倾角 θ_0 固定为10°(见图2)。通过在水槽底部铺设包含转折角的底床物质模拟实际沟道中存在坡度转折点的纵剖面形态,底床物质形态包含两个显著坡度转折点,即上游的凸点和下游的凹点,厚度上游为0.6 m、下游为0.2 m,中间转折角处按线性规律过渡。转折角 α_0 为中间坡面与下游坡面的夹角,分别设为15°、25°、35°。上游料斗中装有混合均匀的泥石流料0.5 m³,容重为1 400~1 800 N/m³。

试验水槽底床物质采用 $d < 10$ mm的蒋家沟原型沙土,含水率为5%~8%,其颗粒组成见表1。根据颗粒级配曲线,计算出中值粒径 d_m 为3 mm。试验中通过控制松散沙土的密实度来控制强度,底床物质容

重为1 800 N/m³,直剪试验得到的土体内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$ 。由于底床物质含水量较小且较松散,因此认为土体内摩擦角 φ 为强度的主要控制因素,可忽略黏聚力的影响。

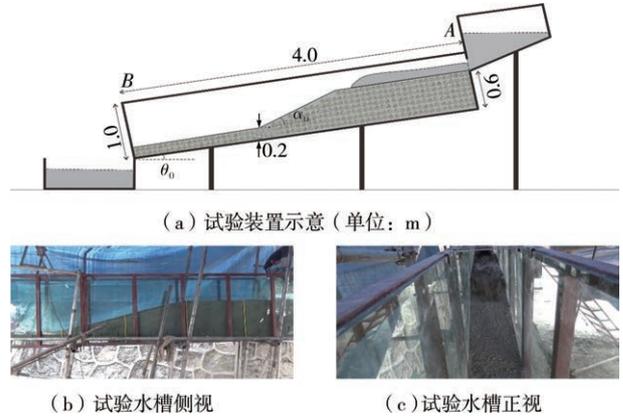


图2 试验装置

表1 水槽底床物质颗粒组成

粒径/mm	小于某一粒径所占百分比/%	
	样品1	样品2
10.00	100	100
5.00	69	75
2.50	43	49
1.00	21	24
0.50	19	21
0.25	17	19
0.10	14	16
0.05	10	12
0.02	7	8
0.01	2	3

试验开始前通过罗盘仪测定水槽的坡度,并分别在水槽的侧面和顶部架设数码摄像机。试验中通过摄像观测侵蚀过程,利用浮标法测定流体的表面流速和龙头流速,得到泥石流龙头流速约为6.5 m/s。在料斗出口处设有泥位计,用于测量泥位变化(见图3)。由图3可知,一次试验泥石流放料时间约为15 s,泥石流泥位从 $t = 10$ s开始骤升至峰值(约为7 cm),泥位峰值一直维持至 $t = 20$ s左右,然后出现明显的下降,至 $t = 25$ s左右降为0,因此可以得到泥位峰值持续时间约为10 s(见图3红框)。试验后测量一次泥石流侵蚀后底床物质纵剖面形态,测量间距为每10 cm一个测量点。

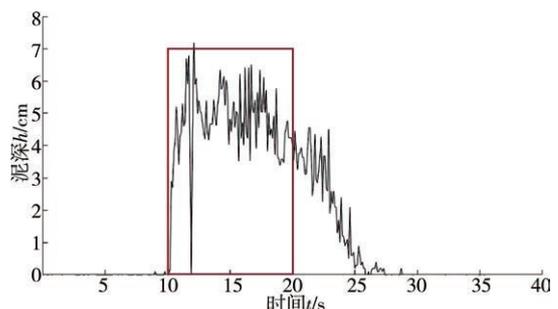


图3 料斗出口处泥位变化

2 纵剖面形态演化特征

试验中泥石流对底床物质的侵蚀作用会引起底床纵剖面形态变化,底床形态演化主要受转折角和泥石流容重影响。将不同转折角的侵蚀试验组测量的底床各点侵蚀深度分别进行平均处理,绘制了3种转折角情形下侵蚀试验后的底床形态曲线,见图4。

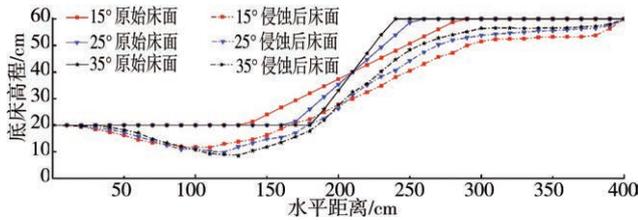


图4 不同转折角情形下底床形态演化曲线

水槽纵坡使泥石流所具有的势能转化为侵蚀动能,上下游转折角之间的陡坡段坡度越大,泥石流所具有的侵蚀动能就越大,陡坡段上下游削坡能力就越强。从图4可以看出,侵蚀后的底床纵剖面仍存在上下游两个明显的坡度转折点,侵蚀沿着最初的转折点向上游和下游发展。下游转折角后端局部坡度变缓,存在明显的泥石流冲击产生的侵蚀坑。随着底床转折角增大,下游侵蚀坑深度逐渐增大,存在明显的冲蚀效应。

为了研究坡度转折点泥石流沟道演化中的发展过程,可以借鉴一些河流地貌研究成果。在一般的河流沟道中,其纵剖面存在转折点如裂点(河流纵剖面上坡度急剧变化的点,也称溯源侵蚀^[8])时,为了达到均衡,河流会不断调整自身形态,在特定情况下产生溯源侵蚀,裂点不断向上游移动,使原来的河床变成阶地。但是裂点的发育也有其他的模式,即裂点不会向上游传播^[9-10],而是通过坡度的调节变得比较平滑。从本试验可以看出,上游裂点的位置并没有发生较大的移动,只是产生了局部的平滑。Howard等^[8]认为当侵蚀速度与河水的流速均衡时,裂点向上游移动;但当侵蚀的速率和河流底部剪切力相均衡时,裂点磨圆,不向上游溯源侵蚀。

本试验中可以近似认为峰值泥位持续时间(10 s)内泥石流容重、速度、泥深均恒定,因此影响泥石流侵蚀沟床的因素主要为沟床形态。通过数码摄像机读取关键帧的侵蚀数据,得到试验中每隔3 s泥石流对底床的侵蚀差异,然后绘制不同转折角、不同时刻的底床形态曲线,见图5。

每个转折角情形均进行6组平行试验,18组泥石流侵蚀试验在3个峰值泥位时段(0~3、3~6、6~9 s)对应的侵蚀量见表2。

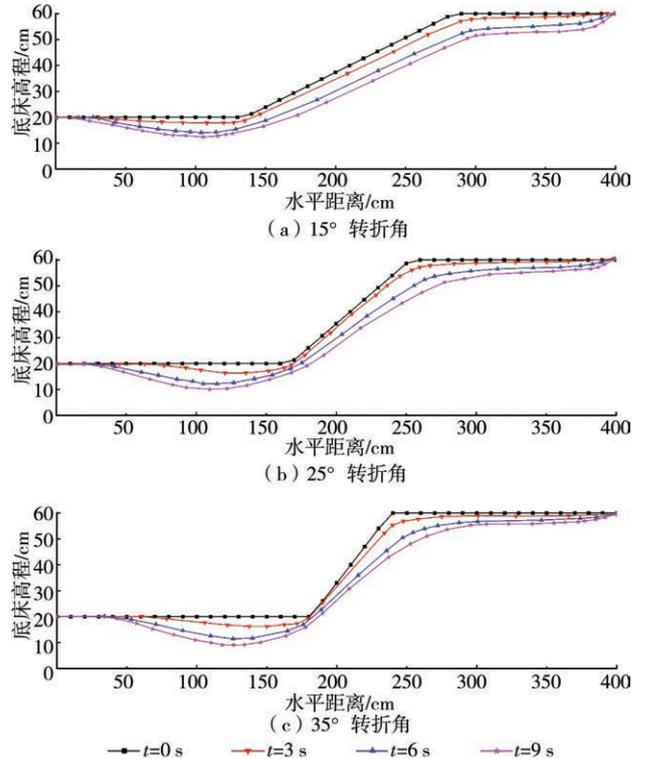


图5 不同转折角不同时刻的底床形态曲线

表2 不同转折角情形下的沟床侵蚀量 cm^3

转折角	不同时段侵蚀量			总侵蚀量
	0~3 s	3~6 s	6~9 s	
15°	16 506	40 915	27 128	84 549
	13 340	38 322	31 597	83 259
	17 296	38 528	32 875	88 699
	15 197	40 653	27 556	83 406
	20 091	41 780	37 776	99 647
	18 044	40 978	29 847	88 869
25°	12 143	36 201	32 998	81 342
	17 228	37 947	30 641	85 816
	17 015	37 118	32 637	86 770
	11 334	35 452	28 703	75 489
	17 226	35 574	30 577	83 377
	17 661	35 683	32 906	86 250
35°	15 276	33 758	30 958	79 992
	14 731	34 108	28 388	77 227
	17 306	35 693	32 404	85 403
	17 449	35 119	33 507	86 075
	18 619	35 553	32 773	86 945
	16 766	33 374	31 894	82 034

由表2可以看出:

(1)3个峰值泥位时段中,初始时段0~3 s内底床侵蚀量明显偏小。原因是:初始底床物质较为干燥,泥石流最初与底床接触时,底床物质会对泥石流最开始的龙头产生吸水,削弱泥石流的侵蚀能力。Iverson等^[11]通过水槽试验发现,底床物质含水量较低会对泥石流侵蚀过程产生负反馈,因此初始阶段泥石流对底床侵蚀作用会较弱,随着泥石流中水分逐渐下渗,底床

湿润度逐渐增大,这种负反馈效应将逐渐减弱。

(2)不同转折角情形下,时段3~6 s内底床物质的侵蚀量均明显比6~9 s的大一些,说明随着泥石流侵蚀进行,沟道转折角逐渐平滑,底床形态逐渐趋于均衡纵剖面,侵蚀强度逐渐减弱。

3 底床纵剖面比降沿程变化

泥石流对底床物质的侵蚀过程主要受自身容重、流速、泥深以及物质组成等内部因素控制,同时与地形坡度和底床土体强度等外部因素有关。泥石流的局部侵蚀过程与区域的地形条件有较大的关联性,局部地形坡角 θ 是一个重要参数。从图5可以看出,底床纵剖面形态的变化过程就是“尖点”逐渐光滑的过程,纵剖面上每一点都存在局部的调整。为了更直观地反映纵剖面的变化过程,采用坡角分布曲线(即纵剖面曲线的一阶导数)来分析。坐标系见图6,试验后与原点距离为 x_0 的点A处坡角为 θ_{x_0} 。初始水槽倾角 $\theta_0=10^\circ$,即沿程坡角初始值为 10° 。不同转折角 α_0 底床纵剖面的坡角沿程变化曲线见图7(坡角 $\theta = \theta_0 + \alpha_0$)。

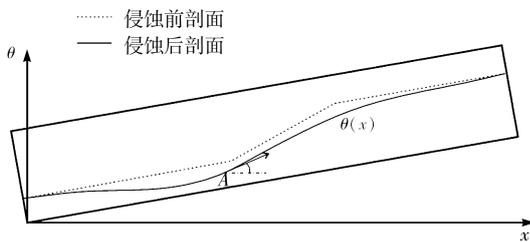


图6 坡角沿程变化坐标系

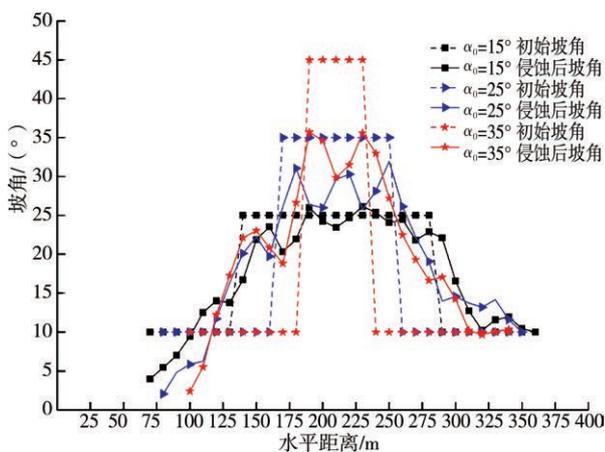


图7 不同转折角 α_0 情形下裂点附近的坡角沿程变化情况

由图7可以看出,对于不同的转折角($\alpha_0 = 15^\circ$ 、 25° 、 35°),纵剖面形态的变化有显著的不同。 $\alpha_0 = 35^\circ$ 时,泥石流侵蚀后的纵剖面坡角出现2个峰值(分别在凸点和凹点处),凸点和凹点之间的平直段坡度下

降; $\alpha_0 = 25^\circ$ 时,纵剖面坡角出现3个峰值,除凸点和凹点处外,两者之间的平直段也出现1个坡角峰值; $\alpha_0 = 15^\circ$ 时,纵剖面坡角出现5个峰值,除凸点和凹点处外,两者之间的平直段出现3个坡角峰值。这说明泥石流侵蚀底床时,底床形态演化并不是线性的,而是呈波浪状,这也与泥石流自身存在紊流特性有关。考虑底床凹凸转折点的存在对沟道纵剖面演化的影响,试验中转折角处的坡角变化规律主要从两方面进行分析(见图8):

一是在不同转折角 α_0 情形下中间陡坡段纵剖面的坡角变化速率,用 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 和 $\Delta\theta_3$ 分别表示转折角 $\alpha_0 = 15^\circ$ 、 25° 、 35° 时的削坡速率。泥石流侵蚀过程中沟道的坡角变化会影响流体势能向动能的转化,从而改变流体本身的侵蚀能力,影响沟床纵剖面的演化。当沟道纵剖面局部存在坡角转折点时,该处的侵蚀和堆积特性会随之发生改变。对于凸转折点来说,坡面由缓变陡会使泥石流流量增大,同时底床土体的稳定性受凸点存在的影响也会降低,土体更易于被流体携带,加剧泥石流对底床的侵蚀;对于凹转折点来说,坡面由陡变缓使泥石流与底床物质产生法向冲击,泥深增大,流体速度减小,其动能转化为底床物质的启动动能,加大了泥石流的侵蚀作用。转折点处的转折角大小对于沟道纵剖面形态影响显著,由图8可知 $\Delta\theta_3 > \Delta\theta_2 > \Delta\theta_1$,根据试验结果得到 $\Delta\theta_1 = 2.5^\circ$ 、 $\Delta\theta_2 = 7^\circ$ 和 $\Delta\theta_3 = 12^\circ$ 。转折角 α_0 越大,单位时间内陡坡段侵蚀削坡速率就越大,即坡角转折点附近坡段在泥石流侵蚀作用下产生的削坡效应越大。

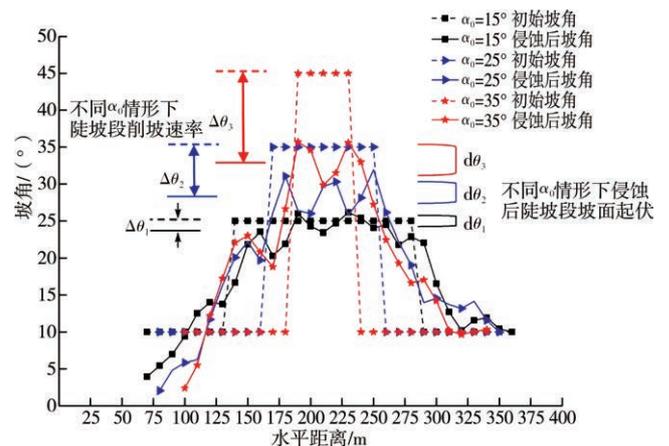


图8 不同转折角 α_0 情形下坡角沿程变化情况

二是不同转折角 α_0 时侵蚀后中间陡坡段地形坡面的起伏程度,分别用 $d\theta_1$ 、 $d\theta_2$ 和 $d\theta_3$ 表示转折角 $\alpha_0 = 15^\circ$ 、 25° 、 35° 的侵蚀后坡面起伏程度。在坡段较缓的水槽段,泥石流对底床物质的侵蚀主要为水力侵蚀,即通过层与层之间的剪切位移产生的拖曳力,使底床物

质被携带进入泥石流,因此侵蚀后形成的坡面形态较为平整,坡度起伏较小。当局部坡角增大至等于或大于土体的内摩擦角时,泥石流对底床物质的侵蚀更多地表现为重力侵蚀。此时泥石流对下覆土层施加的剪切力效果相当于增加了下滑力,使底床土体局部容易出现小规模崩塌或滑坡,坡度越大,这类小规模崩塌或滑坡发生的概率就越大,侵蚀后底床纵剖面起伏就会更显著。泥石流侵蚀形成的底床纵剖面仍存在坡度起伏情况,出现局部的小转折点,由图8可知, $d\theta_3 > d\theta_2 > d\theta_1$,凹凸转折点处的转折角越大,坡度起伏程度就越大。根据试验结果可得 $d\theta_1 = 2^\circ$ 、 $d\theta_2 = 3.5^\circ$ 和 $d\theta_3 = 5^\circ$,底床存在较大的转折角时,对应的侵蚀后该坡段地形坡度起伏也较大。由试验结果可以推测,实际发生的泥石流沟道中,当坡度逐渐减小时,沟道中存在坡度转折的凹凸点处重力侵蚀逐渐减小,水力侵蚀逐渐增大,沟道纵剖面形态逐渐趋于平滑。

4 结 语

(1)对于沟道中凸转折点来说,泥石流对底床的侵蚀强弱取决于削坡速率,凸点处转折角越大,削坡速率就越大;对于凹转折点来说,泥石流对底床的侵蚀作用表现为冲击侵蚀特征,当转折角增大时,泥石流对底床物质的法向冲击增大、侵蚀增强。

(2)泥石流侵蚀后,底床纵剖面仍然存在较大的坡度起伏,起伏程度与凹凸点处的转折角大小有关。当转折角较小时,泥石流对底床物质的侵蚀主要表现为水力侵蚀,侵蚀后坡面起伏较小;当转折角增大时,重力侵蚀逐渐增大,可能会出现局部的小规模滑坡或崩塌,侵蚀坡面起伏显著。

(3)在泥石流沟道的侵蚀防治中,应该注重采取措施减小沟道陡坡段的坡度,对高危坡体提前进行削坡处理。陡坡段上下游应采取有效的拦挡或加固措施,防止因坡度凹凸转折点的存在而产生显著的滑塌或冲刷坑,加剧沟道侵蚀,危害下游建筑物。

参考文献:

- [1] 严宝文,包忠谟.均衡纵剖面形态的试验研究[J].水土保持通报,2000,20(1):14-16.
- [2] 田连权.蒋家沟流域的地貌与泥石流[J].山地研究,1987,5(4):203-212.
- [3] 李泳,陈晓清,胡凯衡,等.流域特征曲线与泥石流活动[J].山地学报,2006,24(3):320-326.
- [4] 张妮,梁收运,钟秀梅.泥石流类型与地貌分形特征的关系研究[J].工程地质学报,2010,18(5):664-668.
- [5] 蒋忠信.冰雪融水沟谷纵剖面的形态与演化模式[J].中国地质灾害与防治学报,2003,14(4):19-25.
- [6] TANG C, VAN ASCH T W J, CHANG M, et al. Catastrophic Debris Flows on 13 August 2010 in the Qingping Area, Southwestern China: the Combined Effects of a Strong Earthquake and Subsequent Rainstorms[J]. Geomorphology, 2012, 139: 559-576.
- [7] CHEN H, DADSON S, CHI Y G. Recent Rainfall-Induced Landslides and Debris Flow in Northern Taiwan[J]. Geomorphology, 2006, 77(1): 112-125.
- [8] HOWARD A D, DIETRICH W E, SEIDL M A. Modeling Fluvial Erosion on Regional to Continental Scales [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1994, 99 (B7): 13971-13986.
- [9] CROSBY B T, WHIPPLE K X. Knickpoint Initiation and Distribution Within Fluvial Networks: 236 Waterfalls in the Waipaoa River, North Island, New Zealand [J]. Geomorphology, 2006, 82(1): 16-38.
- [10] GARDNER T W. Experimental Study of Knickpoint and Longitudinal Profile Evolution in Cohesive, Homogeneous Material[J]. Geological Society of America Bulletin, 1983, 94(5): 664-672.
- [11] IVERSON R M, REID M E, LOGAN M, et al. Positive Feedback and Momentum Growth During Debris-Flow Entrainment of Wet Bed Sediment [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(2): 116-121.

【责任编辑 张华兴】

(上接第79页)

- [11] LANGMUIR I. The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass[J]. Mica and Platinum, 1918, 40(9): 1361-1403.
- [12] FREUNDLICH H M F. Uber Die Adsorption in Losungen [J]. Journal of Physical Chemistry, 1906, 57:385-470.
- [13] 廖敏,黄昌勇,谢正苗,等.pH对镉在土水系统中的迁移

- 和形态的影响[J].环境科学学报,1999,19(1):81-86.
- [14] 张海鸥,周维芝,马玉洪,等.微生物胞外聚合物对重金属镉的解毒作用及红外光谱分析[J].光谱学与光谱分析,2013,33(11):3041-3043.

【责任编辑 吕艳梅】