

泥石流沟道侵蚀初探^{*}

潘华利^{1,2,3}, 欧国强^{1,2}, 柳金峰^{1,2}

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

摘要: 泥石流是广泛分布于我国山区、破坏力极强的山地自然灾害之一, 对山区经济发展、人民生命财产安全都有着极大的威胁。泥石流沟道侵蚀作为一种特殊的侵蚀类型, 与一般水流相比, 其侵蚀作用非常强烈, 在一次过程中便可刷深沟床数米甚至数十米。泥石流沟道侵蚀的危害(桥梁、堤防基础暴露等)不亚于泥石流淤积。鉴于目前国内外在泥石流沟道侵蚀研究方面仍处于主要对野外观测资料进行简单分析的现状, 对泥石流沟道侵蚀的模式和影响因素进行了探讨, 建议今后应着重对泥石流沟道侵蚀动力学过程和机理的研究, 建立泥石流沟道侵蚀特征与泥石流运动特征(流速、容重等)参数之间的定量关系。

关键词: 泥石流; 沟道侵蚀; 动力学; 定量关系

中图分类号: P642.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2009)01-0039-05

0 引言

土壤侵蚀及其导致的河道淤积、江河泥沙是人类社会所面临的最重要的环境问题之一, 造成了巨大的经济损失, 严重地制约了人类社会的可持续发展。土壤侵蚀主要有坡面侵蚀和沟道侵蚀, 其中沟道侵蚀主要分流水侵蚀和泥石流侵蚀。

泥石流作为一种常见的山地自然灾害, 形成过程复杂, 暴发突然, 破坏力强, 常对山区的经济建设和人民生命财产安全造成严重的危害。如2008年“5.12”汶川大地震后, 暴发多次泥石流, 掩埋村庄, 侵蚀农田, 冲毁道路、桥梁等, 不仅给人民生命财产安全造成巨大损害, 而且, 由于泥石流中断道路、冲毁通信设施等, 还极大地阻碍了灾区的救援行动。处于大山深处的汶川县龙溪乡 533 hm² 田地, 在滑坡、泥石流的侵蚀下, 仅余 66.7 hm²。1984年7月18日, 四川省九寨沟县关庙沟暴发容重达 2.23 t/m³ 的粘性泥石流, 泥石流强烈掏蚀沟床, 使沟床刷深 2.0~3.0 m, 沟道展宽 3.0~5.0 m, 将大量的固体物质输移出沟口, 冲毁房屋 35 925 m², 公路 40 km, 土地 5.17 hm², 造成 26 人死亡^[1]。川藏公路西藏境内的索通沟 1991 年暴发泥石流, 强烈冲刷沟床, 使穿越泥石

流沟道的桥梁基础暴露, 造成这座桥面高出沟床 10 m 的混凝土双曲拱桥完全被毁^[2]。

1 国内外研究现状

目前, 国内外在泥石流方面的研究, 特别是对泥石流淤埋危险的研究已经取得了诸多成果^[3-12]。但是, 关于泥石流侵蚀的研究还比较少。而泥石流侵蚀的危害并不亚于泥石流淤埋。因此, 对于泥石流灾害的治理, 也迫切需要解决侵蚀的问题。

1.1 普通水流对沟道侵蚀的研究

迄今为止, 已有众多学者在清水和普通挟沙水流对沟道的侵蚀方面作了比较全面的研究并取得了丰富的成果。

(1) 以沟道形态、地貌的变化发展为依据探讨沟道侵蚀的发展机制, 是沟道侵蚀研究中最基本的方法之一。尤其从长时间尺度来看, 通过对不同历史时期典型沟谷地质地貌资料的对比可以定性分析出不同时期沟谷的侵蚀速率。而在小尺度上, 该方法也同样适用。如 Sidorchuk^[13] 就将影响沟道切割的各特性因子(流量、流速、水流紊动状态、温度、土壤特征及植被条件等)与土体的连续性方程及河床断面形态变化相结合, 利用动力

* 收稿日期: 2008-06-20

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAB04A08); 国家“973”项目(2003CB415202)

作者简介: 潘华利(1982-), 女, 重庆合川人, 博士研究生, 主要从事泥石流与泥沙的学习与研究. E-mail: phl0902@126.com

平衡模式推估出了沟道流的瞬时冲刷模式。

(2) 对沟道侵蚀三种主要类型——沟床侵蚀、沟岸侵蚀和溯源侵蚀的过程和机理分别作了较多的研究。不少学者报道和研究了典型的沟床侵蚀——黄河“揭底冲刷”现象,并对其临界条件进行了研究^[14-15]。并由此展开了一系列对沟床侵蚀的研究,或从河床或沟底泥沙的起动入手,或从流体动力条件与沟底泥沙的抗剪强度之间的关系出发,对沟床侵蚀的影响因素作了比较全面的考虑,包括流体条件(流体流速、流量等)和沟床条件(沟底泥沙的极限抗剪强度)。而对沟岸侵蚀的研究方法和途径也非常丰富,主要包括从河岸的稳定性出发建立河岸的稳定性模型、从河岸土体的力学性质出发进行理论分析和从水流动力条件出发进行研究等^[16-18]。另一方面,对溯源侵蚀的研究虽然起步较晚,但近年来也有不少学者开始在这方面投入大量工作并取得了不少成果,对溯源侵蚀的发生、发展过程以及与沟头以上汇水面积等之间的关系等都有了一定认识^[19-20]。

1.2 泥石流沟道侵蚀研究现状

泥石流和普通挟沙水流相比,由于泥石流流体中的固体物质的含量和颗粒粒径都远远大于普通挟沙水流,泥石流的物理力学性质、运动规律、侵蚀特性等与普通挟沙水流都有明显区别。因此,不能将清水或普通挟沙水流侵蚀的研究成果直接、简单地应用于泥石流,对于泥石流沟道侵蚀作用需要作专门的研究。虽然如此,相较于已经较为成熟的泥石流理论以及泥石流淤积的研究来说,目前对泥石流沟道侵蚀的研究还相对比较薄弱,仍然主要是对野外泥石流现象的报道和基于对沟道断面进行调查的数据分析。

(1) 对影响泥石流沟道侵蚀的各种因素,虽然早就有所报道,并且有不少学者专门论及影响泥石流沟道侵蚀的各种因素^[21,23],指出泥石流沟道侵蚀的主要影响因素有容重、流量、流速以及侵蚀基准面、沟道的坡度、沟床物质组成和抗冲性等。但是迄今为止,涉及各因素对侵蚀过程、机理的具体影响机制的研究仍然鲜有报道。总的来说,对泥石流沟道侵蚀的各种影响因素目前主要还是基于现象描述,对主要控制因素没有区分,更没有反应各主要控制因素与侵蚀规模、侵蚀速率的定量表达式等方面的研究。

(2) 对泥石流沟道侵蚀过程与机理的认识还有待进一步加强。由于泥石流流体与清水或一般挟沙水流在结构和运动性质上有很大的不同,是介于

挟沙水流和滑坡体之间的一种特殊流体,不属于纯粹的流体和土体,同时又兼有流体和土体的一些性质。因此,泥石流在对沟道进行侵蚀的过程中,不像清水或挟沙水流使颗粒发生单粒的运动和落淤,也不像滑坡体那样呈整体的起动或停积,它具有介于二者之间特有的机理。鉴于野外泥石流观测的难度,因此目前的描述主要是从不同性质泥石流与挟沙水流或滑坡之间的相似性进行理论分析。例如,吴积善^[24]认为稀性泥石流侵蚀与挟沙水流比较接近,高粘性泥石流的冲淤则比较接近滑坡。将泥石流与挟沙水流和滑坡进行类比对于我们认识泥石流沟道侵蚀过程确实起到了很大的帮助,提供了一种思路。但由于其难以定量描述侵蚀速率变化等侵蚀过程的发展,也不能对侵蚀深度等物理过程特征进行预测,因此,要以此为依据指导泥石流沟道的治理还是远远不够的。

2 泥石流沟道侵蚀模式

2.1 泥石流沟道侵蚀的危害

泥石流侵蚀既不同于一般径流冲刷,又是在径流冲刷和重力共同作用下的混合侵蚀。由于泥石流动力过程的突发性和瞬时性,对周围环境和人民生命财产安全等都具有极大的危害。

2.1.1 急剧改变山区地貌

泥石流沟道侵蚀作为一种特殊的侵蚀类型,与一般水流相比,其侵蚀作用非常强烈,在一次过程中便可刷深沟床数米甚至数十米,可使山区地貌和局部环境发生急剧变化。如1984年6月14日,云南东川蒋家沟在一场粘性泥石流侵蚀作用下,不仅冲蚀掉蒋家沟上游众多切沟沟床土层,亦冲刷掉梅子树沟、下竹箐沟等冲沟沟床的堆积层(拦砂坝回淤滩沟段除外),成为基岩裸露的沟床。对蒋家沟干流亦进行了强烈冲蚀,在多照沟沟床刷深2~3 m,在门前沟口的蒋家沟干流上刷深近16 m,在观测段刷深9.2 m,在导流堤沟段刷深2~3 m。这是自1980年以来,该沟泥石流侵蚀作用最强烈的一次过程^[24]。而从稍长时段来看,如西藏波密古乡沟上游主沟从1954年至1963年的10年间被泥石流刷深140~180 m,年均值达16 m^[23]。

2.1.2 威胁国民经济安全

泥石流沟道侵蚀最直接的威胁就是威胁沿沟各种设施。如2006年9月17日,云南大理漾洱暴雨引发泥石流,对320国道产生了严重冲刷,

4 500 m³ 泥石流冲毁公路, 导致 320 国道平坡段交通中断。

同时, 泥石流沟道侵蚀还会引发很多次生灾害, 诸如产生新崩塌、滑坡和水土流失, 或增强其危害程度, 促进分水岭外移, 扩大流域、导致沟道袭夺等, 危害非常严重。

2.2 泥石流沟道侵蚀类型

泥石流对沟道侵蚀方式主要有下蚀、侧蚀、溯源侵蚀、前进侵蚀和局部冲刷等。

泥石流下蚀又称为垂直侵蚀、深切侵蚀等, 是指当泥石流流速大于沟底土壤的临界不冲流速时, 沟底泥沙、土壤被冲起带走、沟床遭刷深的过程。下蚀的强度取决于泥石流性质、类型、流速、流量、持流时间和沟床物质的抗冲性等。局部冲刷又称为落差性的沟床下切, 包括过坝流体对坝脚的冲击侵蚀、束窄沟段集中冲击侵蚀和顶冲沟床的冲击侵蚀等。在泥石流冲击作用下, 往往出现冲刷坑, 冲刷坑向上游扩展, 可形成沟内新沟槽, 亦可毁坏拦挡或排导工程等。

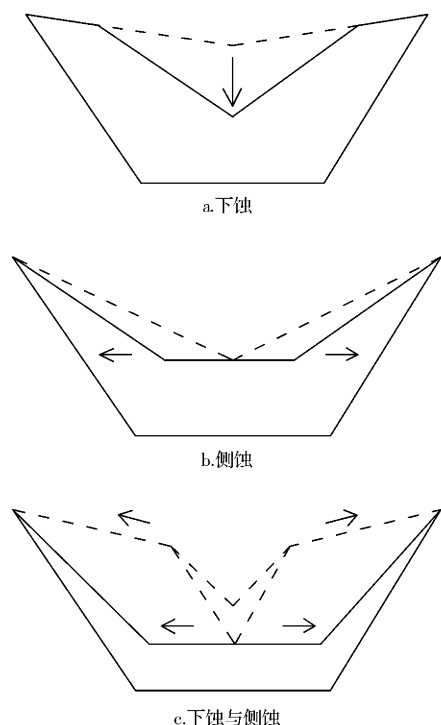


图1 沟床下蚀和侧蚀示意图(虚线表示原地面线)

侧蚀主要发生在沟岸, 尤其是弯道凹岸, 泥石流流体不断冲刷、掏蚀沟脚泥沙, 造成沟岸悬空, 由于重力作用而发生沟岸崩塌, 沟岸迅速后退。侧蚀的过程即是沟道朝横向展宽的过程。

沟头在地表径流的作用下, 不断呈跌水形状坍塌前进, 由低处向高处延伸, 蚕食梁塬坡地, 即溯源侵蚀。泥石流沟道溯源侵蚀与河流的溯源

侵蚀相似, 即从沟口或沟道上某一沟段沟床遭刷深, 由此向上游迅速发展的现象。而泥石流的前进侵蚀却是由强烈下蚀处向下游扩展的现象。溯源侵蚀和前进侵蚀都是沟道沿纵向延长的过程。

2.3 泥石流侵蚀与流水侵蚀的区别

泥石流是我国山区常见的一种自然现象, 是一种含有大量泥石流石块和巨砾的固液两相流体(龙头部位或有的高浓度粘性泥石流还混合有气体), 呈粘性层流或稀性紊流等运动状态, 是各种自然因素(地质、地貌、水文、气象、土壤、植被等)和人为因素综合作用的结果。

泥石流流体与清水或一般挟沙水流在结构和运动性质上有很大的不同, 是介于挟沙水流和滑坡体之间的一种特殊流体, 不属于纯粹的流体和土体, 同时又兼有流体和土体的一些性质。因此, 泥石流在对沟床的冲淤过程中, 不像清水或挟沙水流使颗粒发生单粒的运动和落淤, 也不像滑坡体那样呈整体的起动或停积, 它具有介于二者之间特有的机理。

2.4 泥石流沟道侵蚀模式

泥石流沟道侵蚀有 3 种主要侵蚀类型: 沟床下切侵蚀、沟岸侧蚀和溯源侵蚀。它们因为发生的位置以及方向的不同而相互区别, 但并不是孤立存在的, 它们三者之间存在着相互促进的作用。

在一定的水动力条件下, 当沟床泥沙被冲起带走, 沟床被刷深, 发生沟床下切侵蚀, 这种侵蚀方式发生在沟床上, 并且由于它的作用结果是使沟床向下被刷深, 因此被称为沟床下切侵蚀; 当岸脚泥沙被淘刷冲出, 沟岸不断后退, 这种侵蚀类型发生在沟岸, 其结果是导致沟岸向后退, 沟床被拓宽, 因此被称为沟岸侧蚀; 而沟床下切侵蚀和沟岸侧蚀使沟床被刷深、拓宽的同时, 沟头临空面增高、变陡, 导致上部土体在重力作用下坍塌到沟底从而使沟头向上延伸。实际上, 沟头溯源侵蚀的发生就是沟头底部被下切侵蚀和向头壁的侧蚀掏空而发生崩塌的过程。同时, 沟床下切侵蚀使沟岸坡度变得陡峻, 临空面加高, 导致岸坡的滑动力(矩)增大而抗滑力(矩)减小, 相应的岸坡稳定系数减小, 发生滑坡、崩塌的危险性增加, 促使沟岸侵蚀的发生。

在一条沟道内, 泥石流的侵蚀具体方式, 一般上游以下蚀为主, 兼有溯源侵蚀; 中游的泥石流侵蚀时断时现, 并与间歇性堆积交替出现; 下游却以局部冲刷危害为主, 加速泥石流串流改道, 扩大堆积危害范围等。

从泥石流性质来看,粘性泥石流侵蚀集中于上游沟段,随其流速、流量的增加,逐渐向下游推进;稀性泥石流侵蚀在上游以下蚀作用为主,到中游侧蚀增强,到下游局部冲刷作用最为强烈,故沟口扇上水系往往呈辐射状,一旦泥石流来临,各沟均可过流,对各沟沿岸设施带来危害。

从一场次泥石流过程中流体性质变化来看,由稀性泥石流变为粘性泥石流,侵蚀作用移向上游,中、下段转为堆积;反之,泥石流侵蚀作用移向中、下游。在一场泥石流的上涨阶段,先为稀性泥石流,后经粘性泥石流短暂的铺床堆积后,便可转为侵蚀,先在弯道上出现局部冲刷,随着流速、流量增加而转为溯源侵蚀;在下落阶段,经粘性泥石流堆积后,又被稀性泥石流侵蚀,而成为新的沟道。当沟口侵蚀基础面下降时,泥石流的侵蚀作用将增强,且从沟口向上游推进,溯源侵蚀加剧;反之,泥石流侵蚀作用减弱,退居上游。

3 泥石流沟道侵蚀影响因素

影响沟道侵蚀的因素很多,概括起来有两大类,即自然因素和人为因素。在无人干扰的泥石流地区,纯为自然影响因素;有人类干扰地区,除自然因素外,泥石流的侵蚀强度随着人为不合理干扰程度的增强而递增。

影响泥石流侵蚀的主要是自然因素,大体上可分为流体条件、沟床条件和流域、区域条件。其中,又以流体条件和沟床条件的影响最为突出。

3.1 流体条件

流体条件是沟道侵蚀的动力条件。流体类型决定着泥石流的侵蚀方式。通过野外观测,塑性泥石流一旦启动便呈整体搬运外移,成为整体性侵蚀;粘性泥石流的侵蚀一般呈层状侵蚀,或称为掀揭侵蚀;稀性泥石流却以散粒侵蚀作用为主。

流体的类型、容重、流速、流量等特征值都会对沟道侵蚀方式和强度产生重要的影响。

3.2 沟床条件

沟道侵蚀的载体是沟道,因此沟床的形态(包括纵剖面、横断面、侵蚀基准面等)和抗蚀性等均可影响沟道侵蚀的方式和强度。

沟床纵剖面和横断面对侵蚀的影响主要是通过改变沟道流体的流速来实现。沟床纵坡较大,横断面狭窄,则流体流速较大,侵蚀作用强烈;反之,如果沟床纵坡减小,横断面比降宽,则侵

蚀减弱,甚至出现沉积而不发生侵蚀。

沟床纵剖面形态的变化可由侵蚀基准面的升降而引起。侵蚀基准面上升,沟床纵坡减小,则侵蚀减弱,侵蚀基准面下降,沟床纵坡增大,侵蚀作用也增强。

沟道内物质的抗冲性也是影响沟道侵蚀的重要因素。若沟床和沟岸为基岩,抗冲性好,则冲刷下切缓慢,侵蚀作用不强;若沟床和沟岸由坡积物、残积物、近代泥石流堆积物或挟沙洪水的冲积物等松散物质所组成,则泥沙容易被冲起,在相同的动力条件下,侵蚀作用也较强。

4 结语

我国是一个山地面积占国土面积 2/3 之多的多山国家,泥石流分布广泛,成灾严重。随着国民经济的发展和西部大开发战略的实施,越来越多的重大工程、交通线路、管道等布置在山区。泥石流沟道侵蚀危及沿线交通干线、水利枢纽、桥梁、堤防等,给山区人民的生命和财产安全造成了极大的威胁。对泥石流沟道侵蚀的过程和机理进行系统的研究,建立泥石流沟道侵蚀动力学过程与泥石流运动特征参数(流量、流速、容重等)之间的定量关系,如极限可能冲刷深度、临界坡度等,对于加深对泥石流运动机理的认识、科学指导泥石流沟道的治理、泥石流防治工程的参数选择(如拦砂坝的基础埋深、排导槽的不冲不淤流速等)等具有重要的理论意义和实际意义。

致谢: 在本文初稿完成之后,中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所游勇研究员、吕娟高级实验师、陈顺理老师提出了宝贵的修改意见,在此,一并致谢!

参考文献:

- [1] 唐邦兴,柳素清.四川省阿坝藏族羌族自治州泥石流及其防治[M].成都:成都科技大学出版社,1993:116-124.
- [2] 中国科学院成都山地灾害与环境研究所.川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策[M].北京:科学出版社,1995:70-72.
- [3] 周必凡,李德基,罗德富.泥石流防治指南[M].北京:科学出版社,1991.
- [4] 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.
- [5] 中国科学院.水利部成都山地灾害与环境研究所.中国泥石流[M].北京:商务印书馆,2000.
- [6] 足立胜治,德山久仁夫,中筋章人,等.土石流发生危险度

- の判定にフやて[J], 新砂防, 1977, 30(3): 7-16.
- [7] 唐川, 段金凡. 云南小江流域泥石流堆积扇研究[J]. 山地研究, 1991, 9(3): 179-184.
- [8] 唐川, 刘希林. 泥石流堆积泛滥区危险度的评价与应用[J]. 自然灾害学报, 1993, 2(4): 79-84.
- [9] Staley, D. M., T. A. Waskiewicz. Blaszczynski, Surficial patterns of debris flow deposition on alluvial fans in Death Valley, CA using airborne laser swath mapping data [J]. *Geomorphology*, 2006, 74(1-4): 152-163.
- [10] 刘希林, 倪化勇, 苏鹏程. 四川德昌县凉峰沟泥石流灾害特征及防治对策[J]. 灾害学, 2005, 20(3): 68-72.
- [11] 刘希林, 赵源, 苏鹏程. 四川德昌县虎皮湾沟泥石流及灾害损失评估[J]. 灾害学, 2005, 20(3): 73-77.
- [12] 刘希林, 李秀珍, 苏鹏程. 四川德昌县凹米罗沟泥石流成灾过程与危险性评价[J]. 灾害学, 2005, 20(3): 78-83.
- [13] A. Sidorchuk. Dynamic and Static Models of Gully Erosion [J]. *Catena*, 1999, (37): 401-414.
- [14] 万兆惠, 宋天成. “揭河底”冲刷现象分析[C]//齐璞, 赵方林. 黄河高含沙水流运动规律及应用前景. 北京: 科学出版社, 1993: 92-104.
- [15] 韩其为. 黄河揭河底冲刷的理论分析[J]. 泥沙研究, 2005, (2): 5-28.
- [16] 连惠邦. 溪床堆积土体崩坏模式及其土石流化之研究[J]. 中华水土保持学报, 1996, 27(3): 175-183.
- [17] 包承纲, 李青云. 关于崩岸研究和预测的若干意见[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(1): 14-16.
- [18] 王延贵, 匡尚富. 河岸淘刷及其对河岸崩塌的影响[J]. 北京: 中国水利水电科学研究院学报, 2005, 3(4): 251-157.
- [19] 范建容, 刘淑珍, 周从宾, 等. 元谋盆地土地利用/土地覆盖对沟冲侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 130-132.
- [20] 韩鹏, 倪晋仁, 李天宏. 细沟发育过程中的溯源侵蚀与沟壁崩塌[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(2): 115-124.
- [21] 陈光曦, 王继康, 王林海. 泥石流防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [22] 刘江. 浑水沟1#拦砂坝下游的沟床演变[M]//泥石流(2). 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1983: 36-40.
- [23] 李鸿琰. 西藏东南部山区冰川泥石流的地质地貌作用[C]//中国地理学会 1965 年地貌学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 1965: 155-159.
- [24] 田连权, 吴积善, 康志成, 等. 泥石流侵蚀搬运与堆积[M]. 成都: 成都地图出版社, 1993: 53.

A Study on Debris-flow Gully Erosion

Pan Huali^{1,2,3}, Ou Guoqiang^{1,2} and Liu Jinfeng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Process and Hazards, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: Debris flow, widely distributed in mountain areas in China, is one of the mountain hazards with great destructive force. It is a severe threat to the economic development and safety of people and property in mountain areas. As a particular type of erosion, the gully erosion effect of debris flow is great relative to water flow. It can down cut the gully bed several meters even several tens of meters in one event. The debris flow gully erosion exposes the foundation of bridge or embankment. Its hazards are not inferior to that of silting. The current research at home and abroad on debris-flow gully erosion is still in the state of simply analyzing the field investigation data. In view of this, the mode and affecting factors of debris-flow gully erosion are studied in this paper. It is suggested that the research on dynamic process and mechanism of debris-flow gully erosion should be strengthened and the quantitative relations between characteristics of debris-flow gully erosion and kinematical characteristics of debris-flow (velocity and density) should be established.

Key words: debris-flow; gully erosion; dynamics; quantitative relation