论崩塌滑坡一碎屑流高速远程问题

刘传正1,2)

1) 国土资源部地质灾害应急指导中心,北京,100081;2) 中国地质环境监测院,北京,100081

内容提要:高速远程崩塌滑坡一碎屑流具有规模大、速度快、滑程远、多态化、常转向、冲程多、冲击性和摧毁性 等特征。崩塌或滑坡高速远程实质上是其解体后的碎屑流运动形式。碎屑流高速远程与崩塌滑坡规模、物质成分 结构、地形高差、沟道形态和引发因素及运动路经的环境等因素密切相关。崩塌滑坡变形破坏形式一般显示为蠕 动一拉裂—剪断—滑移—冲出—解体—碎屑流化的过程。崩塌滑坡形成机理主要基于残余强度、蠕变作用和孔隙 水压力等理论认识进行解释。碎屑流运动机理主要立足于势能动能转化传递、气体浮托和颗粒流运动理论予以解 释。动势能转化、气体浮托作用和颗粒流运动三种解释是层次不同、相互补充的关系,不是彼此独立的。基于成年 人在复杂地形下能够奔跑逃生,崩塌滑坡一碎屑流前锋的运动速度 5m/s 作为高速运动的下限值是比较合理的。崩 塌滑坡一碎屑流区域的前后缘高差(H)与前后缘水平距离(L)的比值小于 0.4 或 L/H 值大于 2.5 可作为其远程运 动的判据。崩塌滑坡一碎屑流成灾模式包括直接压覆、解体推挤、碰撞冲击、气浪吹袭、激流涌浪、堰塞湖淹没与滑 坡坝溃决—洪水泥石流等多种形式。

关键词:崩塌滑坡一碎屑流;高速;远程;势能动能转化;气体托浮;颗粒流

崩塌滑坡高速远程问题是一个常常被提及或使 用,但又似乎是一个含义不清、指代不明、应用随意 的名词。何谓高速?何谓远程?成因机理何在?高 速远程的主体是崩塌滑坡还是碎屑流?学术界尚未 形成共识。

人类关于崩塌滑坡远程现象的科学观察可能肇 始于 1881 年 9 月 11 日瑞士 Elm 滑坡一碎屑流, Buss & Heim(1881)、Heim(1882,1932) 描述了该次 事件的崩落一跳跃一激流特征,并推荐使用德文 "sturzstrom"专门描述此类现象。高速远程崩塌滑 坡一碎屑流成因机理认识可追溯到 1904 年, McConnell & Brock(1904) 针对 1903 年 4 月 29 日 加拿大 Frank 高速远程滑坡进行了调查研究。2006 年菲律宾莱特岛 Guinsaugon 岩质滑坡碎屑流造成 1221 人遇难也是一个重大案例(Guthrie et al., 2009)。在中国,甘肃洒勒山、湖北新滩、云南头寨 沟、西藏易贡、重庆鸡尾山和贵州关岭等地发生的崩 塌滑坡一碎屑流常被认为是高速远程事件(吴玮江 等,1989;王兰生等,1988;谭继中,1993;刘伟,2002; 刘传正,2010a,2010b)。

徐峻岭(1997a)、程谦恭等(2007)和张明等 (2010)先后综述了国内外对高速远程崩塌滑坡— 碎屑流的研究状况,对形成一般性认识起到了推动 作用。作者基于诸多案例的现场"原型观测"、应急 处置体验和学术认识,总结描述了崩塌滑坡—碎屑 流的运动特征,探讨了其成因机理,讨论了高速远程 碎屑流运动与崩塌滑坡物质成分、初始变形能、引发 因素、崩塌滑坡规模、运动路径落差、沟道变化和环 境因素的关系,提出了高速远程的判别标准,意在推 动该方向的研究与转化应用。

1 崩塌滑坡一碎屑流基本特征

崩塌是危岩破坏向下坠落的现象,崩塌体解体 后变为碎屑流出现高速远程运动。只要坡面足够陡 长和相对顺直,下垫面的摩擦能不致于过快减损势 能转化来的动能就可能持续运动很远的距离。滑坡 是斜坡岩土体沿着滑动面冲出滑床后,滑坡体解体 为碎屑流后类同于崩塌碎屑流的过程。碎屑流一般

注:本文为国家财政专项(编号:1211221481001)"国家级地质灾害应急防治"的成果。

收稿日期:2017-05-09;改回日期:2017-08-15;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2017.06.011

作者简介:刘传正,男,1961年生,博士,研究员。研究方向为地质灾害防治、工程地质与环境地质。通讯地址:北京市海淀区大慧寺路 20 号,邮编:100081;电话:010-62175999。Email:liucz@mail.cigem.gov.cn。

是固气二相体,运动形式宏观上表现为岩土块体或 颗粒的集团式流动。

崩塌或滑坡高速远程运动的实质是岩土体崩落 或滑动过程中解体,高陡地形孕育的重力势能转化 的动能一部分使岩土块体解体碰撞碎屑化,一部分 形成岩土碎屑流运动的初速度。在后续运动过程 中,碎屑流历经多级地形陡坎补充势能转化为动能, 以克服下垫面和块体或颗粒之间摩擦耗能的急剧减 速抑制作用,使碎屑流运动高速远程得以实现。高 速远程崩塌滑坡一碎屑流一般具有规模大、速度快、 滑程远、多态化、常转向、冲程多、冲击性和摧毁性等 特征。

(1)规模大:规模大是指崩塌或滑坡体的体积 足够大,体积越大,运动速度越高,滑动距离越远。 据统计,碎屑流运动距离与崩塌或滑坡的体积正相 关,且其体积一般大于1.0×10⁶ m³,存在所谓"尺寸 效应"或"体积效应"(Hsu, 1975; Davies,1982;詹 威威等,2017)。美国阿巴拉契亚南部辛肯一克里 克山曾发生10.0×10⁸ m³的大规模古滑坡,中国汶 川地震区大光包滑坡体积超过11.0×10⁸ m³,二者 均出现高速远程运动(Schultz, 1986;黄润秋等, 2014)。

(2)速度快:程谦恭等(2007)提到多数学者认 为高速滑坡平均运动速度大于 20 m/s。张明等 (2010)提到高速远程滑坡一碎屑流的运动速度一 般在 30 m/s 以上。Evans(1989)考虑摩擦损失推算 加拿大 Mackenzie 山区岩崩湖滑坡—碎屑流的最大 速度达 213 m/s。1970 年,秘鲁安第斯山脉 Yungay 城区域因 Ms7.7 级地震引发岩崩,造成死亡人数超 过18000人,垂直落差近4250m,水平运动16km, 估算一些碎屑物的最大运动速度达到 278 m/s (Voight, 1978)。Heim(1932)推算瑞士 Elm 滑坡--碎屑流最大速度 70 m/s, McConnell & Brock(1904) 推测加拿大 Frank 滑坡一碎屑流最大速度 28 m/s。 Muller(1964)估算意大利瓦依昂(Vajont)水库顺层 岩质滑坡的最大速度为25 m/s。中国学者(王恭先 等,2004; 谭继中,1993; 胡广韬, 1995; 王兰生等, 1988)推算甘肃洒勒山、湖北新滩、云南头寨沟、陕 西石家坡等滑坡碎屑流的最大速度在 20~40 m/s 之间。速度快是造成滑程远、冲击力大和摧毁性强 的主要原因,目认为碎屑流运动速度一般比泥石流 运动速度大一个数量级(程谦恭等,2007)。

(3) 滑程远:滑程包括了崩塌块体翻滚或坡体 滑动和碎屑流运动的总长度,水平运动距离一般可 以达到数千米甚至超过十千米。在近乎水平的地面上,或下垫面摩擦损耗低的情况下,会出现异常运行距离和显著的流动性,如岩崩碎屑在冰冻面上滑动。高速崩塌滑坡一碎屑流更多地是依靠速度实现远距离运动,形成冲击破坏。在土体液化或后期加水等情况下,低速滑坡土体也会出现远程漫流涌动,如深圳滑坡土体高含水状态导致液化流动,在平缓地形下运动距离超过1km(刘传正,2016)。

(4)多态化:多态化是指崩塌滑坡一碎屑流运 动过程中形态多变的现象。崩塌滑坡阶段主要表现 为块体蠕动、转动、崩塌、滑动,解体变为碎屑流后宏 观上出现明显的"流态化"现象,表现为飞越、冲击、 跳跃、激流、滚动、堆积等不同现象(Bagnold, 1968; Hsu, 1975)。大块石特别是扁平状块石在碎屑体表 面快速滑动飞跃。碎屑流颗粒的相互碰撞实现彼此 间作用力的传导。大型滑坡一碎屑流堆积物中有时 可观察到气孔,Sharpe(1938)就描述了美国 Madison 峡谷 滑坡一碎屑流堆积物中的气体作用特征。 Miles(1914)访问到,"家具、房屋和人在被掩埋前被 气流输送了很远而没有受伤"的现象。崩塌滑坡一 碎屑流运动的沟谷上空往往粉尘或灰尘高扬,弥漫 山谷。

(5)常转向:常转向指碎屑流运动路径不是单 一顺直,而是在曲折多变的沟谷内遇到阻挡而会改 变"流动"方向。顺直沟道是少见的,沟道转折使碎 屑流运动方向多变,每次转向都是一次碎屑流颗粒 的集群式碰撞行为。碎屑流在沟道内的折转碰撞是 能量损失过程,也是颗粒破碎过程,常出现弯道超 高、仰冲、俯冲和冲撞折返现象。狭长沟谷有利于空 气圈闭,使得空气润滑和浮托作用成为碎屑流运动 的主控因素。在下垫面堆积物饱含水分或者冰冻面 上运动时,底部铲刮物的摩擦耗能降低也有利于远 程运动。

(6)冲程多:大型崩塌滑坡一碎屑流往往历经 多级陡坎和缓坡接续,动势能转化形成多次加速与 减速,仰冲和俯冲交替的多级冲程和多次碰撞转折 等运动形式(Anma et al.,1988;胡广韬,1995;刘传 正,2010b)。顺直沟道每一个跌坎下的缓坡段形成 一个冲程。弯曲沟道转向一次就开始一个新的冲 程,由于碰撞和仰冲消能,冲程可能减少。

(7)冲击性:冲击性指岩土碎屑流强大动能具 有的冲击力,表现为能够弯道仰冲爬坡甚至翻越高 坡或推动空气或水体涌浪爬升。崩塌滑坡一碎屑流 从启动到停止,地形落差越大,运动的斜坡越长,下 垫面摩擦阻力越小,摩擦能耗越小,就越有利于大型 崩塌滑坡形成高速远程碎屑流。崩塌冲击可以复活 老崩塌滑坡体形成碎屑流,冲入堵塞沟溪在对岸形 成反坡地形,如2016年9月28日浙江苏村先崩塌 后推动滑坡。顺层基岩滑坡则会整体冲入河湖,冲 击爬上河流对岸形成地形反坡和地层反倾,如2003 年长江三峡水库区千将坪顺层滑坡和1963年意大 利瓦依昂水库顺层滑坡(杨海平,2009;刘传正, 2013)。

(8) 摧毀性: 崩塌滑坡一碎屑流高速冲撞压覆 运动路径上的人居建筑、田地或工程设施,强烈的冲 击气浪粉尘或磨蚀性"砂云"吹折树木,掀翻房屋建 筑,具有巨大的破坏力,致灾范围大,毁灭性强。 Wieczorek 等(2000) 报道美国加州某岩崩形成的冲 击气浪推翻或折断了约1000 棵树,碎屑流像翻动的 犁一样,将沿途树木、植被和土层铲刮殆尽。

2 崩塌滑坡成因机理

2.1 一般认识

崩塌滑坡变形破坏形式一般显示蠕动一拉裂— 剪断—滑移—冲出—解体直至碎屑流化。崩塌滑坡 成因机理的科学认识主要依赖于岩土孔隙水压力理 论(Terzaghi,1950)、残余强度理论(Skempton,1964))和蠕变理论(Saito,1969)。

中国学者结合具体案例研究提出了"平卧支撑 拱"(王兰生等,1988)、溃屈破坏(孙广忠,1988)、顺 层视滑力作用(刘传正等,1995;刘传正,2009)、"闸 门效应"(徐峻岭,1997b)、强度锐减或脆性破坏(王 恭先等,2004)、"锁固效应"(程谦恭等,2004)、平推 式滑动及"挡墙溃决"(黄润秋,2007)等观点,不同 程度地反映了崩塌滑坡前岩土体变形积聚的应变能 释放问题。胡广韬(1995)研究陕西宁强石家坡滑 坡时区分了"滑动冲程"和碎屑流的"流动冲程"。 刘传正(2014)基于主导因素优先的原则把崩塌滑 坡灾害成因类型划分为降雨引发型、地震激发型、自 然演化型、冻融渗透型、地下开挖型、切坡卸荷型、工 程堆载型、水库浸润型、灌溉渗漏型和爆破振动型等 10种。唐亚明等(2013)提出陕北黄土高原降雨入 渗引发黄土滑塌模式可划分为缓慢下渗诱发型、下 渗阳滞诱发型、下渗贯通诱发型三种。

2.2 典型因素作用机理解析

降雨引发型崩塌滑坡的作用机理是降雨渗流导 致斜坡岩土体重度增加、岩土软化、滑带岩土强度降 低、裂缝注水水楔作用、斜坡内地下水位形成或升高 后的浮托作用、斜坡体内水力梯度形成的渗透压力 或承压水形成之孔隙水压力作用等。降雨地表汇流 渗入地下需要时间,大滑坡的发生常滞后于降雨过 程多日之后。地下水转化为岩土体中孔隙水压力, 其瞬态释放会为滑坡一碎屑流提供运动的初速度。 1985 年湖北新滩滑坡整体冲出时,前缘有地下水水 柱喷出,地下水流浮托力使滑坡前缘凌飞于长江水 面之上。

地下开挖型崩塌滑坡一般地形上高陡临空,为 开裂倾倒乃至发生大规模崩塌滑坡提供自由空间。 山体地质结构中存在竖直裂隙或溶蚀脆弱带和软弱 夹层使山体易于张裂拉开和蠕动滑移。山体下部或 底部存在一定范围的采空区形成"悬板"或"悬臂 梁"张拉作用效应引起山顶开裂变形直至崩塌滑坡 破坏,顺层视滑力作用常常占优势,盐池河、鸡尾山 危岩体是高位视倾向滑移式剪出崩塌的典型案例 (孙玉科等,1983;刘传正,2010a)。

水库浸润型崩塌滑坡主要起因于水库水位涨落 在斜坡内部产生软化作用、浮托作用和动水压力作 用。水位上升会造成岩土体的强度软化和悬浮减重 效应。水位下降则会在坡体内引起向外的动水压力 增大而坡面的库水压力减小,从而引发斜坡变形甚 至整体滑坡。

地震激发型崩塌滑坡的作用机理是强烈地震的 反复张拉、快速剪切和瞬态抛射。地震引发的斜坡 破坏模式是层间脱离、脆性剪断或拉断等。2008 年 5月12日汶川地震激发的大型滑坡主要分布在IX ~XI烈度区域,一般出现在顺向斜坡结构地带,且地 震作用方向与斜坡坡向基本一致。地震作用IX烈度 区及其相应的加速度参数可以作为大型崩塌滑坡发 生的一个临界判据(Liu,2008)。许冲等(2010)划 分了汶川地震引发的滑坡类型、分析了地震作用机 制和影响因子敏感性。

工程堆载型崩塌滑坡的作用机理主要是松散土 石堆积斜坡倾角逐渐超过其临界休止角导致前缘蠕 动,后续加载出现后缘推动,最后松散土体结构出现 崩溃而形成推移式滑坡一碎屑(石)流。

自然演化型崩塌滑坡起源于长期的物理、化学 和生物风化作用以及区域地震与断裂构造活动长期 影响引起的斜坡岩土体变形破坏,表现为渐进式松 动、开裂、蠕动和滑移。长期蠕动积累的应变能瞬时 释放、剪断带岩土强度急剧降低和高势能的转化等。 1991年云南昭通头寨沟滑坡一碎屑流和 2016 年浙 江遂昌苏村崩塌一滑坡一碎屑流就具有长期演化的 地质环境背景。徐则民等(2010)等研究了大规模 滑坡的规模、运动方向与区域地质构造控制约束的 关系。

3 碎屑流成因机理

一般地,崩塌滑坡块体的碎屑流化是其高速远 程运动的原因。总结国内外诸多案例研究、理论推 演和试验模拟,以下几种观点能够比较合理地解释 碎屑流运动特征,得到学术界比较普遍的认可。碎 屑流运动机理的认识可以作为通解,实际案例研究 还是要结合具体情况进行具体分析。

3.1 能量转化传递论

崩塌滑坡岩土体与下方坡面碰撞后,一部分岩 土体会在下方坡面上停积下来,另一部分岩土体会 呈流态化的形式向前运动。势能转化的动能使碎屑 颗粒之间相互碰撞,岩土块体或碎屑从后部向前部 进行能量传递,前部碎屑物质不断接受能量继续向 前运动,直至整个运动系统获得的能量消耗完毕。 能量转化与传递不仅发生在崩塌滑坡体与地面碰撞 的坡脚处,也发生在复杂路径上整个碎屑流的运动 过程中。崩塌滑坡岩土块体规模和地形高差越大, 蕴含的势能越大,转化的动能也越大,颗粒之间的碰 撞强度越高,频次越多,破碎越彻底,持续的时间越 长,宏观上碎屑流运动的距离就越远,"尺寸效应" 或"体积效应"就越明显(Scheidegger, 1973; Eisbacher, 1979; Vallejo, 1980; Davies et al., 1999)。

由于运动路径一般存在多级陡坡与缓坡交替,势能与动能的转化也会出现多次,只是后来的势能越来越弱。势能转化为动能是加速行为,快速运动 又是摩擦耗能过程,后续陡坡的势能补充低于动能 损耗,出现减速效应,直至最终碎屑流运动完全停 止。根据 Scheidegger(1973)的研究,忽略影响小的 内聚力(C)作用,崩塌滑坡一碎屑流运动的速度和 加速度公式可分别写成:

$$v^{2} = 2gh(1 - \tan\varphi \operatorname{ctan}\alpha) \tag{1}$$

$$a = g(\sin\alpha - \cos\alpha \tan\varphi) \tag{2}$$

式中,v — 崩塌滑坡 — 碎屑流运动速度(m/s);g— 重力加速度(m/s²);h— 崩塌滑坡 — 碎屑流运动落 差(m);a — 崩塌滑坡 — 碎屑流运动加速度 (m/s²);a— 崩塌滑坡 — 碎屑流运动坡面倾角(°); φ — 崩塌滑坡 — 碎屑流物质内摩擦角(°)。

3.2 气体浮托润滑论

碎屑流物质一般是固体碎屑与空气粉尘相互混

合的两相干碎屑流,固体碎屑表面可能是湿润的,但 不存在连续液相,使其碎屑流运动方式和运动机理 均不同于一般的泥石流。固气两相的干碎屑流蕴含 的高势能或高动能,具有强烈的冲击力、破坏力。碎 屑流体内暂态圈闭的空气有利于岩土碎屑在下垫面 上形成流态化,显著降低块体或碎屑间的碰撞耗能 并成为传力的媒介。岩土体颗粒运动过程就是空气 润滑浮托力产生、达到峰值与逐渐消散的过程。当 碎屑流岩土颗粒间的空气粉尘压力能够平衡甚至暂 态性抬升固体颗粒的重量时,就出现碎屑物高速流 态化,使其向前运动很长距离。初始时是应力能释 放产生的初速度或势能向动能的急剧转化,润滑气 体产生有助于碎屑流飞行或持速。冲击力达到峰值 时,冲击速度最大,但摩擦作用也达到峰值。当运动 速度下降,空气逐渐排出或逸出,气体托浮作用逐渐 减弱,重力及粒间摩阻作用逐渐占优势,使碎屑颗粒 逐次沉落,下沉堆积速度加快。接近下垫面摩擦阻 力大的区段最先沉积,上部碎屑滞后还要前行一段 时间。碎屑流前锋直接压缩空气,产生气垫层及孔 隙气压,对其前峰会产生向上的升力,延长碎屑流前 锋高速运动持时,利于增大碎屑流运动的距离 (Kent, 1966; Shreve, 1966; Shreve, 1968a; Shreve, 1968b)

堆积块石磨圆度差也是颗粒间气压浮托润滑作 用存在的证据。大颗粒能量大,常见沟道纵断面中 上部块径小者占比大,而中前部块径大者占比大,出 现所谓"筛子效应"(Scheidegger, 1974)。圈闭地形 (狭谷深沟)条件有利于空气压缩掺入,浮托润滑作 用增强,颗粒间粘度减小,雷诺数增大,阻力减小,增 强气垫托浮滑翔效应和碎屑物流态化作用。碎屑流 运动碰撞产生的"石粉"和细小碎屑的存在增加了 颗粒间"气体"浓度,增大浮托力、粒间气压和润滑 作用,有利于增强"持速效应",使碎屑流运动速度 更大,运动距离更远(胡广韬,1995;王恭先,2004)。

3.3 颗粒流作用论

碎屑流固体颗粒之间的内部碰撞是碎屑流流态 化运动的原因。认为高速碎屑流颗粒是纯固相的, 彼此之间无黏性,运动过程中受到了来自地面的剪 应力。碎屑流运动速度越大,底部颗粒受到下垫面 的剪切力越大,下部颗粒对上部颗粒逐级传递施加 的碰撞力越大,越能克服或减轻上部颗粒重量,碎屑 流内部的摩擦损耗就越低,出现所谓"力学液化", 形成"无粘性颗粒流"。"力学液化"会使碎屑流体 积膨胀,颗粒间涌入的空气流增加或粉尘"气化"会 使颗粒间接触次数和面积减少,导致有效应力减弱, 摩擦阻力降低,利于形成运动"持速效应"。随着运 动过程的持续,颗粒间碰撞消耗动能会使下部剪切 速率逐步下降,下部颗粒施加给上部颗粒的碰撞力 逐渐减小,逐渐不能平衡上部颗粒的重量,速度不能 够继续维持,碎屑流便在重力作用下逐次下沉堆积, 碎屑流体厚度逐渐变薄,直至停止运动。碎屑颗粒 之间碰撞导致部分颗粒破裂,破裂物一部分减速下 沉,一部分获得能量加速向前运动,碎屑流动实质上 是一个边运动边沉积的过程。颗粒粒径越大,受到 的正应力和剪应力也越高,大颗粒向上运动,碎屑流 堆积物也显现上部颗粒大,越往下颗粒越细,形成 "反序"分层现象。后期碎屑流下部及两侧的颗粒 会先于上部及中间的颗粒停止运动,常在碎屑流前 端和两侧形成高于原斜坡的堤状地形,即出现所谓 "边界层效应"(Heim, 1882; Buss et al., 1881; Davies et al., 2002; Bagnold, 1954; Bagnold, 1956; Bagnold, 1968; Bagnold, 1973; Goguel, 1972; Korner, 1977; 胡广韬, 1995)。

3.4 特殊情况

除上述外,一些特殊地质环境条件也会促进碎 屑流高速远程现象的出现,其物理本质还是遵从能 量传递、气体托浮和颗粒流作用机制的。当碎屑流 与下垫面之间存在低阻淤积层、冰雪崩积垫层或者 融冻时节的湿雪、湿冰作为下垫面时,碎屑流与下垫 面之间的有效剪应力降低,摩擦阻力减小,运动过程 中铲刮软弱物质会增强低阻效应,甚至摩擦热融使 蕴含的水分或冰雪汽化产生孔隙水(气)压力,形成 气垫,会加剧碎屑流高速远程现象(Sassa, 1988)。 崩塌滑坡起始或碎屑流底部水的参与加剧碎屑流体 液态化或流态化,快速运动使颗粒间产生瞬态孔隙 水压力,降低颗粒间摩擦角和碰撞耗能,促进空气动 力的作用,减小下垫面的摩擦消耗。石灰岩块石之 间的摩擦高温会产生 CO2气体,也会减小碎屑流底 部的摩擦阻力 (Erismann, 1979; Erismann et al, 2001)

4 问题讨论

高速远程主要是在崩塌滑坡体解体成为碎屑流 后出现的,通常说高速远程滑坡是不严密的,除非是 特殊情况,如顺层基岩滑动或土体超饱水液化流动 出现低速远程。碎屑流高速远程运动与崩塌滑坡体 的规模、成分结构、地形落差、沟谷特点和引发因素 及环境条件等相关联,研判高速远程问题需要正确 的认识论和方法论,既需要整体论或系统论的思维, 也需要分割论或还原论的解析(刘传正,2015)。

4.1 运动速度问题

4.1.1 初速度问题

崩塌或滑坡冲出剪出口的初速度主要来源于其 自身应变能释放或外力作用如地震等的激发效应。 "平卧支撑拱"(王兰生等,1988)、溃屈破坏(孙广 忠,1988)、"闸门效应"(徐峻岭,1997b)、强度锐减 (王恭先等,2004)、"锁固效应"(程谦恭等,2004)、 和"挡墙溃决"(黄润秋,2007)等提法都反映着危岩 崩塌或滑坡发生前岩土体内存在着应变能或变形 能。变形能作为启动能量释放产生崩塌滑坡的初速 度,如1981年湖北盐池河磷矿崩塌或2009年重庆 鸡尾山崩塌。自然斜坡在强烈地震抛射作用下也会 产生启动初速度,但大规模崩塌滑坡一般产生在顺 向坡且地震力作用方向与斜坡坡向相近的情况下, 如"5.12" 汶川地震引发的东河口、大光包和文家沟 等。持续强降雨或水库作用在斜坡体内引发的斜坡 中前部孔隙水压力瞬态释放会起到抬升推动作用, 托浮岩土体而产生初速度,如贵州大寨村滑坡、菲律 宾莱特岛滑坡等。詹威威等(2017)通过统计发现, 汶川地震区经历地震抛射或碰撞解体作用的滑坡水 平运动距离明显增大,说明地震抛射提供了初速度, 而不仅仅依赖于地形落差形成的势能向动能的转 化。

4.1.2 高速下限值问题

崩塌滑坡一碎屑流的不同运动阶段和不同部位 的速度是不同的,把滑坡一碎屑流速度确定在20m/ s或30m/s以上作为高速下限(可能类比了汽车的 高速行驶速度)理论与实际意义不大。从防灾减灾 角度,明确关注碎屑流运动前锋的速度才是重要的, 以成年人在复杂地形条件下能够逃生作为考虑问题 的出发点才是合适的。Varnes(1978)把3m/s作为 极快速滑动的低限。国际地科联滑坡工作组 (International union of geological sciences working group on landslide, 1995)提出滑坡高速运动下限为 5 m/s。王恭先等(2004)建议10m/s作为高速下 限,认为年轻人可以逃生。刘传正(2010b)建议取 斜坡块体运动大于7.5m/s作为下限,认为是青年 人能够逃生的最大速度。

本次研究认为,考虑山地丘陵区一般成年人的 逃生速度,碎屑流运动前锋到达或冲击人居建筑时 的速度 5m/s 作为高速下限是合适的,也便于与国 际交流接轨。

4.2 运动远程问题

崩塌滑坡一碎屑流运动距离是否远程取决于崩 塌滑坡体规模、地形落差、沟道形态、物质成分结构 和引发因素及环境条件等。

4.2.1 运动距离与崩塌滑坡体规模

碎屑流运动距离与崩塌滑坡体规模关系密切, "尺寸效应"或"体积效应"就是反映了碎屑流体积 与运动距离之间的统计正相关关系(Davies,1982; Crandell, et al., 1984;Okura, et al., 2000;詹威威 等,2017)。因为足够体积或规模的碎屑物不但能 满足让先期到达的碎屑流填平崎岖的沟道、使冲击 路径"顺直化",剩余部分还能够足以维持碎屑流的 持续运动,延长能量传递的持续时间,摧动碎块体持 续上抛、飞越、跃升。汶川地震区的大光包、东河口、 文家沟等高速远程滑坡一碎屑流均具有足够大的规 模(孙萍等,2009;黄河清等,2010;黄润秋,2014)。

实现远程运动也并非崩塌滑坡体积一定要达到 1.0×10⁶m³,特殊情形下规模小者也可以出现高速 远程。2016年9月28日,浙江遂昌县苏村崩塌— 滑坡事件中参与碎屑流运动的物质体积不足50× 10⁴m³。此次事件先是后山滑移式崩塌,而后推动下 方斜坡上的老崩积体滑坡,是一个山岩开裂—滑移 剪出—崩塌冲击—老崩积体滑坡—碎屑流摧毁上 村—堵河堰塞成湖的链式过程。滑坡运动路径地形 陡而平直,下垫面摩阻力小,体积不是绝对的条件。 1981 年 8 月 23 日,陕西宁强县发生的石家坡多冲 程高速滑坡体积也只有 48 × 10⁴ m³(胡广韬,1995)。

4.2.2 运动距离与地形落差

表1反映出,崩塌滑坡一碎屑流后缘与前缘的 地形高差与水平距离的比值虽然是离散的,但一般 在0.4以下。四川华蓥山溪口滑坡具有特殊性,其 本质是高陡斜坡表层土体在持续强降雨作用下的液 化流动。地形落差关系到势能的大小,是能否实现 远程运动的重要因素。高差大势能大,弯道碰撞不 致能量损失太多而不能继续前行。崩塌滑坡的下部 存在陡坡地形是重要条件,顺直长大斜坡有利于远 程运动,多级陡坎补偿能量分级加速,延长驱动能量 损耗时间。崩塌滑坡堆积的地形一般明显平缓下 来,这也是老滑坡区常常演化为居民点的原因,因为 滑坡区更易于开垦为土地,贮存地表地下水源。

2010年6月28日,贵州关岭大寨村滑坡一碎 屑流造成99人遇难。崩塌滑坡体为泥质粉砂岩,滑 坡后缘高程1115m,前缘高程965m,碎屑流前缘高 程780m。滑坡一碎屑流总体积约80×10⁴m³。滑 坡一碎屑流运动具有4级动势能转化(4级陡坎)和 4级冲程(4级缓沟道)的特点。第1冲程碎屑(石) 流主冲方向325°,冲击爬坡高度30m(含铲刮深度 2m)后到沟谷右岸的永窝村民组(960m),造成部分 房屋损毁,多名村民死亡/失踪;第2冲程碎屑(石) 流主体开始沿主沟运动,但冲击方向折为250°,冲

	1		•			
时间	名称	体积 (×10 ⁶ m ³)	i = H(m)/L(m)	引发因素	危害情况	资料来源
1980-06-03	湖北远安盐池河崩塌	1	0.4 = 365/900	崖下采矿	284 人遇难	孙玉科等(1983)
1983-03-07	甘肃东乡洒勒山滑坡	31	0.15 = 280/1850	自然演化	237 人遇难	吴玮江等(1989)
1985-06-12	湖北秭归新滩滑坡	30	0.38 = 860/2250	自然/降雨	12 人遇难	王兰生等(1988)
1989-07-10	四川华蓥山溪口滑坡	0.2	0.5 = 210/420	强降雨	221 人遇难	黄润秋(2007)
1991-09-23	云南昭通头寨沟滑坡	10	0.22 = 750/3400	自然/降雨	216 人遇难	谭继中(1993)
2000-04-09	西藏易贡扎木弄沟滑坡	330	0.4 = 3500/8800	冰雪融化	6月11日溃决	刘伟(2002)
2003-07-13	湖北秭归千将坪滑坡	24	0.27 = 340/1250	水库蓄水	24 人遇难	杨海平等(2009)
2008-05-12	四川安县大光包滑坡	1100	0.23 = 1050/4500	汶川地震	38 人遇难	黄润秋等(2014)
2008-05-12	四川青川东河口滑坡	15	0.25 = 600/2400	汶川地震	780 人遇难	孙萍等(2009)
2008-05-12	四川绵竹文家沟滑坡	44.5	0.35 = 1250/3600	汶川地震	48 人遇难	黄河清等(2010)
2009-06-05	重庆武隆鸡尾山崩塌	500	0.18 = 400/2200	自然/采矿	74 人遇难	许强等(2009)
2010-06-28	贵州关岭大寨村滑坡	1	0.32 = 335/105	强降雨	99 人遇难	刘传正(2010b)
2013-03-29	西藏墨竹工卡斯布滑坡	2	0.40 = 800/2000	冻融/弃碴	83 人遇难	刘传正(2014)
2013-07-10	四川都江堰三溪村滑坡	1.02	0.32 = 400/1250	强降雨	161 人遇难	作者实地调查资料
2015-12-20	广东深圳光明新区滑坡	0.27	0.11 = 125/1100	弃土地下水	77 人遇难	作者实地调查资料
2016-09-28	浙江遂昌苏村崩塌滑坡	1	0.40 = 460/1150	自然/降雨	28 人遇难	作者实地调查资料

表1 某些崩塌滑坡 – 碎屑流灾害基本特征

注:H—崩塌滑坡一碎屑流区域前后缘高差(m);L—崩塌滑坡一碎屑流区域前后缘水平距离(m);i=H/L,可称为等效摩擦系数。



图1贵州省关岭县大寨村高速远程滑坡一碎屑(石)流运动图解(据刘传正,2010b)

Fig. 1 Scheme of high speed and long-distance of Dazhai landslide—debris movement which consists of four striking stages happened at June 28, 2010 in Guanling county of Guizhou province, China (from Liu Chuanzheng, 2010b&)

击爬坡高度11m,最大高程900m,破坏了沟谷左岸 的部分松树林;第3冲程碎屑(石)流冲击方向转为 310°,冲击爬坡高度6m,最大高程825m,对沟谷右 岸的大寨村造成毁灭性危害;第4冲程碎屑(石)流 冲击方向转为255°,基本沿沟谷运动,直至的沟口 停止运动,并摧毁了沿途散居的民房(图1)。除第 4冲程只有俯冲外,其它三级冲程中都存在俯冲与 仰冲接续问题,每一冲程都存在摩阻和碰撞能量损 失,冲速逐渐降低,冲高逐渐变小。每个阶段都有势 能转化为动能的能量补充,只是随着冲击高度的逐 次减小,补充能量小于消耗能量,使碎屑(石)流能 量耗散完毕最终停止于沟口(刘传正,2010b)。

4.2.3 运动距离与沟谷地形

光滑坚硬的沟道最利于碎屑流运动,湿润饱水的黏土垫层也有利于底部滑动,而粗糙起伏或乱石堆积是最不利的,沟道转向碰撞耗能或悬崖下存在缓坡也不利于远程运动。Nicoletti 等(1991)提出碎屑流在狭长型、开阔型和T字型三种沟谷地形中的运动能量损耗依次增加,运动距离相应地依次减小。 1980年盐池河崩塌碎屑流直接碰撞崖壁受阻,运动距离受限。1991年云南昭通头寨沟沟谷顺直,实现了高速远程。

2009 年 6 月 5 日,重庆武隆鸡尾山滑移式崩塌一碎石流造成 74 人遇难。鸡尾山危岩体具有层

状石灰岩地质结构,崩塌灾害是山体底部铁矿采空 和顺岩层的视滑力作用共同主导下的"山体拉裂— 弱面蠕滑—剪出崩塌—碎屑流冲击—灾难形成"的 链式反应过程(刘传正,2010a)。高速运动的崩塌 物质在堵塞前部宽约 200m, 深约 50m 的沟谷后, 形 成平均厚约30m,纵向长度约2200 m的堆积区,掩 埋了12户民房和正在开采铁矿的矿井入口。危岩 崩塌体积约5×10°m³,在跃下50m的陡崖后,巨大 的势能转化为动能使滑出的危岩体迅速解体,高速 运动,越过前方200m宽,深约50m的深沟后冲向对 岸。受对岸斜坡阻挡,高速"块石流"转向相对顺直 的沟谷向下游运动,在沟道内形成厚约30m,纵长约 2200m 的堆积区(许强等,2009)。"块石流"内部相 互碰撞使块石间实现能量传递,致使部分块石加速 运动,部分块石减速停积,沟道转折外侧出现沟边缘 块石堆积"壅高"。在地形陡坡段势能转化补充动 能,表现为持速或加速,缓坡段动能摩擦耗损为主表 现为减速。崩塌碎屑流运动时间约2min。

4.2.4 运动距离与物质成分结构

崩塌或滑坡本身是土体还是岩体,初始糙度是 棱角的还是"等粒度"的,岩土结构上是松散的、固 结的、结晶的或层状的还是块状的,均会影响碎屑流 的形成和运动特征。

碎屑流奔涌过程中颗粒不断"细小化"和"磨圆

化",颗粒越"圆",碎屑流运动距离越远。崩塌滑坡 解体成为碎屑流后,颗粒的"滚动摩擦"代替"滑动 摩擦"使下层颗粒的摩擦阻力远小于滑移阶段,"等 粒度"或"磨圆化"的颗粒流运动速度会大于粒径大 小不一或表面粗糙者,因为等粒径颗粒之间的滚动 摩擦能量损耗远小于滑动摩擦造成的能量损耗,运 动速度远大于滑移阶段,这是松散土崩塌滑坡很快 解体、斜抛、流态化运动的原因(刘传正,2014)。碎 屑流"流动"实质上是离散体或颗粒滚动与弹射的 宏观整体表象,颗粒间的接触方式和接触强度,如承 受张、剪、压力和暂态平衡,决定了颗粒集合体运动 的基本特征。

2013 年 3 月 29 日,西藏墨竹工卡县扎西冈乡 普朗沟泽日山东坡滑坡一碎屑流造成 83 人遇难。 滑坡后缘高程 5360m,运动冲击距离约 2km,碎屑流 终止高程 4560m。滑坡物质主要是采矿剥离的碎石 土,碎块石级配单一,运动特征表现为"等粒体"的 碎石流现象。滑坡起因是后缘不断堆载使松散堆积 体整体重力平衡逐渐向不稳定方向调整,碎块石点 接触与面接触的统计摩擦力学平衡逐渐被破坏,宏 观休止角最后被突破而逐渐蠕动一转动一开裂一崩 溃形成"颗粒流"运动(刘传正,2014)。

类似的案例有,2012 年7月31日,新疆新源县 阿热勒托别镇西沟矿山弃石土滑坡,造成28人遇 难。黄土滑坡后经常出现"粉尘化",类似"瀑布"现 象倾泻而下(王家鼎等,1999)。1983年甘肃东乡县 洒勒山黄土滑坡"旋涡瀑布"式碎屑流,是一种碎屑 粒度比较小的"等粒体"运动。

顺向坡地质结构出现高速远程滑坡主要表现为 整体性顺层滑动,一般不会出现碎屑流运动。1963 年10月9日,意大利瓦依昂水库发生巨型顺倾层状 岩体滑坡。2.75×10⁸m³的岩体冲入水库,并壅塞 到水坝前,致使坝前1.8km长的水库变为"石库"。 滑坡激起的涌浪翻越大坝,摧毁了下游的多个村镇, 造成1925人遇难。滑坡后的岩体基本保持原来的 层状,整体下滑,上部凌空飞越,下部触底冲向对岸, 滑坡地层到对岸后形成地层反倾(刘传正,2013)。 顺层滑坡是在水库蓄水经历三年多的蠕动变形后发 生的。滑坡成因归结为滑坡前缘河谷深切、卸荷节 理发育、岩体顺倾且存在软弱黏土夹层成为主要滑 动面、前期连续降雨、水库水位未能及时降低和斜坡 体内地下水位升高和孔隙水压力增大等。类似案例 有 2003 年长江三峡水库区的千将坪滑坡。

4.2.5 远程运动与引发因素及环境条件

崩塌滑坡一碎屑流是否远程运动与其引发因素 存在一定关系,如地震抛射提供初速度、降雨渗流在 前缘形成孔隙水压力或滑动土体完全饱水液化成为 流态。汶川地震区大光包、东河口和文家沟滑坡一 碎屑流就存在强烈地震抛射的因素。四川华蓥山溪 口滑坡是强降雨引发的斜坡土体超饱水液化流动, 滑坡运动路径陡而短,高位俯冲奔涌而下,与崩塌滑 坡解体的碎屑流不同(黄润秋,2007)。

深圳滑坡则是平缓地形条件下流塑态土体低速 远程涌动的典型案例。2015年12月20日,深圳光 明新区红坳弃土场滑坡造成77人遇难。工程弃土 堆填于废弃的采石场(坑)内,采坑底部大量积水使 堆填土体下部泥化,持续填方使隐伏地下水位上升 到出山口或挡土坝高度即具备了"人造山体"整体 沿液化面滑出的条件。滑坡成因机理是泥化地基、 承压浮托、堆载推挤和临空滑移等综合作用下出现 的"泥垫托筏效应"。滑出土体路经多个水塘的"加 水"作用,使工程弃土进一步湿化泥化甚至稀化,是 实现平缓地形条件下远程奔涌和漫流平铺的原因 (刘传正,2016)。当滑之时,监控录像显示整个滑 动时间约持续 11min 30s,粘滞塑流土体运动约 1100m。如风险管控到位,有关人员是有时间逃离 的。深圳滑坡是远程的,但不是高速的。

4.2.6 运动远程的下限值问题

崩塌滑坡一碎屑流运动远程的认定尚无定见。 一个提法是,崩塌滑坡体重心位置垂直位移(H)与 水平位移(L)的比值(称为等价坡度或等效摩擦系 数)小于0.6(相当于tan32°)即认为是远程的(Hsu, 1975;Evans et al., 2001;张明等,2010)。

实际应用上,崩塌滑坡体重心及其运动的垂直 位移与水平位移并不容易正确确定。作者建议以崩 塌滑坡一碎屑流区域的前后缘高差(H)与前后缘水 平距离(L)的比值进行判断。据表1统计数据,可 选择崩塌滑坡一碎屑流的 H/L 值小于 0.4 或 L/H 值大于 2.5 即认为崩塌滑坡一碎屑流是远程的。

一般地,远程崩塌滑坡一碎屑流均能够冲出所 在斜坡单元进入该段斜坡最低点如沟谷或出现明显 转向流动。从学术研究角度论,滑坡后缘到碎屑流 前缘的长度(*L*_s)与滑坡后缘到其剪出口的长度(*L*₁) 之比大于 1.5 也可以作为远程运动的一个判据,对 于危岩崩塌,该值可能要大一些,但实际工作仍容易 陷入争论,因为滑坡剪出口并非是一目了然的(刘 传正,2010b)。

1571

4.3 关于运动机理

能量转化传递论反映了高速远程运动的物理规 律,气体浮托润滑论从宏观上解释了能量消耗延时 的原因,颗粒流作用论从细观上解释了碎屑流颗粒 间的力学机理。碎屑流运动机理的三种理论解释显 然不是相互独立的,而是互相联系的,是"三位一 体"的,分别解释了不同层次的科学问题。能量转 化传递理论是根本性的宏观整体论,解释了崩塌滑 坡一碎屑流运动的动力来源及其损耗原因。气体浮 托润滑论解释了碎屑流运动路径摩擦消耗减轻、势 能转化为有效动能的比例增加,高速能够实现及维 持一定时间的原因。颗粒流学说更多地解释了能量 传递的内在物理本质及碎屑颗粒间的摩擦运动力学 作用。能量转化传递论、气体浮托润滑论和颗粒流 作用论可称为碎屑流运动的三定律。通解公式可写 为:

$$E_0 + E_h = E_v + E_f + E_s$$
 (3)

- E_0 一初始应变能或地震抛射能;
- E_{h} 总重力势能,由 n 级斜坡运动落差的势能 构成, $E_{h} = E_{h1} + E_{h2} + \cdots + E_{hn}$;
- E_v 势能转化的有效总动能, $E_v = E_{v1} + E_{v2} + \cdots E_{vn}$;
- E_{f} 一运动过程中消耗的总摩擦能, $E_{f} = E_{f} + E_{g} + \cdots E_{f_{n}};$
- E_{s} 一崩塌坠落冲击压缩土体做功, $E_{s} = E_{s1} + E_{s2} + \cdots E_{sn}$ 。

4.4 成灾模式问题

崩塌滑坡一碎屑流的成灾模式是多样化的,也 常常出现所谓地质灾害链,即原生致灾体是崩塌滑 坡,次生者是碎屑流灾害,衍生者是冲入河道形成的 激流涌浪危害,这些认识对于地质灾害的风险识别 或早期识别与风险控制是极为重要的。崩塌滑坡一 碎屑流的具体成灾模式可划分为:

(1)崩塌直接压覆,如2017年1月20日湖北南 漳县城关镇岩墙(壁)直接倾倒,长江三峡链子崖危 岩体前缘"劈条子"式开裂倾倒崩塌(刘传正等, 1996)。

(2)滑坡整体平移运动而后解体,高速冲击破 坏或推挤覆盖,如甘肃洒勒山黄土滑坡。

(3)碎屑流碰撞冲击,摧毁前方人居或工程设施,气浪吹袭折断掀翻沿途树木和建筑,如西藏易贡藏布滑坡一碎屑流。

(4)滑坡入江涌浪激流打翻船只,造成伤亡,如 湖北新滩滑坡冲入长江,涌浪沿长江峡谷逆流7km 在上游香溪支流成灾。

(5)滑坡堰塞湖淹没上游,如四川达州天台乡 滑坡和汶川地震区唐家山滑坡等(黄润秋,2007;胡 卸文等,2009)。

(6)滑坡坝溃决洪水冲击下游,造成灾害,如 1933年8月25日四川茂县迭溪地震区岷江地震滑 坡堵塞岷江,当年10月9日滑坡坝溃决酿成特大灾 难(刘传正,2014)。

(7)崩塌或滑坡以巨大势能直接冲入水体,形成的高速激流涌浪向上翻坝或翻越陡坡形成"瀑布式"洪水倾泻而形成重大灾害,如意大利瓦伊昂滑坡涌浪翻坝。2014 年 8 月 27 日,贵州福泉滑坡冲入山下水塘(露采矿坑形成)后,"冲天"激流勇浪翻越山丘,激流洪水摧毁山下村寨造成 23 人遇难。

(8)液化土体沿陡峻斜坡高速奔涌而下形成灾害,如四川华蓥山溪口滑坡,或液化土体漫流涌动, 平缓地势下低速远程涌动推挤覆盖形成灾害,如广 东深圳滑坡灾害。

5 结论

(1)崩塌滑坡变形破坏形式实质上包括了蠕动一拉裂—剪断—滑移—冲出—解体—碎屑流化的整个过程。崩塌滑坡成因机理的理论认识主要立足于岩土孔隙水压力理论、残余强度理论和蠕变理论。

(2)碎屑流运动机理主要立足于势能向动能转 化传递、气体托浮润滑和颗粒流作用理论予以解读。 三者不是相互独立的,而是层次不同、相互补充或相 互关联的。动势能转化是根本性的,气体作用可以 宏观地解释碎屑流现象及其持速效应,颗粒流理论 可以对碎屑流运动颗粒间的内部作用做出细观解 释。

(3)崩塌滑坡高速远程运动的实质是其解体后的碎屑流运动。碎屑流运动与崩塌滑坡规模、物质成分结构、地形高差、沟道形态和引发因素及运动路径的环境等因素密切相关。

(4)崩塌滑坡一碎屑流运动高速与远程并不一 定同时出现。高速运动沟壁阻挡则不会实现远程, 反之平缓地形低速液化流动也可以实现远程。

(5)从防灾减灾角度,5m/s 作为高速远程崩塌 滑坡一碎屑流前锋运动速度的下限是比较合理的, 这个速度成年人在复杂地形条件下能够奔跑逃生, 可以作为制定应急管理政策的依据,也与国际接轨。

(6)崩塌滑坡一碎屑流区域的前后缘高差(H) 与前后缘距离(L)的比值小于 0.4 或 L/H 值大于 2.5 可以作为崩塌滑坡一碎屑流远程运动的判据。

(7)崩塌滑坡一碎屑流成灾模式是多样化的, 崩塌滑坡直接压覆、解体碰撞、碎屑流冲击、气浪吹 袭掀翻、激流涌浪、堰塞湖淹没、滑坡坝溃决洪水、涌 浪直接翻坝或翻越陡坡形成瀑布激流和液化土体涌 动推挤等灾害形式是常见的。

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 程谦恭,张倬元,崔鹏. 2004. 平卧"支撑拱"锁固滑坡动力学机理与 稳定性判据. 岩石力学与工程学报, 23(17):2855~2864.
- 程谦恭,张倬元,黄润秋. 2007. 高速远程崩塌滑坡动力学的研究现 状及发展趋势. 山地学报, 25(1):72~84.
- 胡广韬. 1995. 滑坡动力学. 北京:地质出版社.
- 胡卸文,黄润秋,施裕兵,吕小平,朱海勇.2009. 唐家山滑坡堵江机 制及堰塞坝溃坝模式分析. 岩石力学与工程学报,28(1):181 ~189.
- 黄河清,赵其华.2010. 汶川地震引发文家沟巨型滑坡一碎屑流基 本特征及成因机制初步分析.工程地质学报,18(2):168~ 177.
- 黄润秋. 2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. 岩石力 学与工程学报, 26(3):433~454.
- 黄润秋,张伟峰,裴向军. 2014. 大光包滑坡工程地质研究. 工程地 质学报, 22(4): 557 ~ 585.
- 刘传正,施韬,张明霞. 1995. 链子崖危岩体 T8~T12 缝段开裂变形 机制的研究. 工程地质学报, 3(2):29~41.
- 刘传正,张明霞. 1996. 链子崖 T11~T12 缝段危岩体开裂变形机制. 地学前缘, 3(1~2):234~240.
- 刘传正. 2009,重大地质灾害防治理论与实践. 北京:科学出版社.
- 刘传正. 2010a. 重庆武隆鸡尾山危岩体形成与崩塌成因分析. 工程 地质学报, 18(3):297~304.
- 刘传正. 2010b. 贵州关岭大寨崩塌滑坡碎屑流灾害初步研究. 工程 地质学报, 18(5):623~630.
- 刘传正. 2013. 意大利瓦依昂水库滑坡五十年. 水文地质工程地质. 40(5):论坛.
- 刘传正. 2014. 中国崩塌滑坡泥石流灾害成因类型. 地质论评, 60 (4):858~868.
- 刘传正. 2015. 地质灾害防治研究的认识论与方法论. 工程地质学 报, 23(5):809~820.
- 刘传正. 2016. 深圳红坳弃土场滑坡灾难成因分析. 中国地质灾害 与防治学报, 27(1):1~5.
- 刘伟. 2002. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析. 中国地质灾害与防治学报,13(3):9~18.
- 孙广忠. 1988. 岩体结构力学. 北京:科学出版社.
- 孙萍,张永双,殷跃平,汪发武. 2009. 东河口滑坡— 碎屑流高速远 程运移机制探讨. 工程地质学报, 17 (6):737~744.
- 孙玉科,姚宝魁. 1983. 盐池河磷矿山体崩坍破坏机制的研究. 水文 地质工程地质, 10(1):1~7.
- 谭继中. 1993. 云南头寨沟大型高速滑坡运动特征探讨. 地质灾害 与环境保护. 4(1):37~44.
- 唐亚明,薛强,毕俊擘,孙萍萍,程秀娟. 2013. 降雨人渗诱发黄土滑塌 的模式及临界值初探. 地质论评, 59(1):97~106.
- 王恭先,徐峻龄,刘光代. 2004. 滑坡学与滑坡防治技术. 北京:中国

铁道出版社.

- 王家鼎,张倬元.1999. 典型高速黄土滑坡群的系统工程地质研究. 成都:四川科学技术出版社.
- 王兰生, 詹铮, 苏道刚. 1988. 新滩滑坡发育特征和起动、滑动及制 动机制的初步研究. 见:中国地质学会工程地质专业委员会. 主编. 中国典型滑坡. 北京:科学出版社.
- 吴玮江, 王念秦. 2006. 甘肃滑坡灾害. 兰州:兰州大学出版社.
- 徐峻龄. 1997a. 高速远程滑坡研究现状综述. 滑坡文集(12). 北京:中国铁道出版社.
- 徐峻龄. 1997b. 再论高速滑坡的"闸门效应"及其运动特征. 中国地 质灾害与防治学报,8(4):23~27.
- 徐则民,黄润秋.2010.峨眉山玄武岩大规模灾难性崩滑事件的地质 构造约束.地质论评,56(2):224~236.
- 许冲,戴福初,徐锡伟. 2010. 汶川地震滑坡灾害研究综述. 地质论 评, 56(6):860~874.
- 许强,黄润秋,殷跃平,侯圣山,董秀军. 2009. 2009 年 6.5 重庆武隆 鸡尾山崩塌滑坡灾害基本特征与成因机理初步研究. 工程地质 学报,17(4):433~444.
- 杨海平,王金生. 2009. 长江三峡工程库区千将坪滑坡地质特征及 成因分析. 工程地质学报, 17(2):233~239.
- 詹威威,黄润秋,裴向军,李为乐. 2017. 沟道型滑坡一碎屑流运动 距离经验预测模型研究. 工程地质学报, 25(1):154~163.
- 张明,殷跃平,吴树仁,张永双. 2010. 高速远程滑坡一碎屑流运动 机理研究发展现状与展望. 工程地质学报,18(6):805~817.
- Anma S, Maikuma H, Yoshimura M. 1988. Dynamics of earthquake induced slope failure of Ontake. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Landslide. Vol. 1. Rotterdam: A. A. Balkema; 61 ~ 66.
- Bagnold R A. 1954. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newton fluid under shear. Royal Soc. London Proc., 225:49 ~ 63
- Bagnold R A. 1956. The flow of cohesionless grains in fluids. Royal Soc. London Proc., 249: 235 ~ 297.
- Bagnold R A. 1968. Deposition in the process of hydraulic transport. Sedimentology, 10:45 ~ 56.
- Bagnold R A. 1973. The nature of saltation and of bed-load transport in water. In: Proceedings, Royal society of London, Series A, 332: 473 ~ 504.
- Buss E, Heim A. 1881. Der Berg sturgsturz von Elm. Zurich, Wurster & Cie: 163.
- Cheng Qiangong, Zhang Zhuoyuan, Cui Peng. 2004 "&". Dynamical mechanism and stability criterion of landslide under lockup of soil arching. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23 (17): 2855 ~ 2864.
- Cheng Qiangong, Zhang Zhuoyuan, Huang Runqiu. 2007 "&". Study on dynamics of rock avalanches: state of the art report. Journal of Mountain Science, 25(1):72 ~ 84.
- Crandell D R, Miler C D, Glicken H X. 1984. Catastrophic debris avalanche on ancestral Mount Shasta volcano Califonia. Geology, 12:143 ~ 146.
- Davies T R. 1982. Spreading of rock avalanche debris by mechanical fluidization. Rock Mechanics, 15:9 ~ 24.
- Davies T R, McSaveney M J, Hodgson K A. 1999. A fragmentation spreading model for long runout rock avalanches. Canada Geotechnical Journal, 36: 1096 ~ 1110.
- Davies T R, Mcsaveney M J. 2002. Dynamic simulation of the motion of fragmenting rock avalanches. Can. Geothch. J., 39:789 ~ 798.
- Eisbacher G H. 1979. Cliff collapse and rock avalanches (sturstroms) in

the Mackenzie Moutains, northwestern Canada. Canada Geotechnical Journal, 16: 309 ~ 334.

- Erismann T H. 1979. Mechanism of large landslides. Rock Mech, $12: 15 \sim \! 46$
- Erismann T H, Abele G. 2001. Dynamics of Rockslides and Rockfalls. Berlin: Springer-Verlag.

Evans S G. 1989. Rock avalanche run-up record. Nature, 340: 271.

- Evans S G, Hungr O, Clague J J. 2001. Dynamics of the 1984 rock avalanche and associated distal debris flow on Mount Cayley, British Columbia, Canada: Implications for landslide hazard assessment on dissected volcanoes. Engineering Geology, 61 (1): 29 ~51.
- Goguel J P. 1972. Geologie et dynamique de lecoulement du Mt. Granier dans le massif de chartreuse en novenbre 1248. Bureau Recherches Geologie et Mineralogy, 3:29 ~ 38.
- Guthrie R H, Evans S G, Catane S G, et al. 2009. The 17, February, 2006 rock slide—debris avalanche at Guinsaugon Philippines: a synthesis. Bull. Eng. Geol. Environ., 68: 201 ~213.
- Heim A. 1882. Der Bergsturz von Elm. Deutsch. Geol. Zeitschr, 34: 74~115.
- Heim A. 1932. Bergsturz und Mensch enleben . Zötich: Naturforsch enden Gesel schaft (English translation by Skerner N A. Landslides and Human Lives. Vancouver, B. C: BiTech Publishers Ltd., 1989. 1~196).
- Hsu K J. 1975. Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls. Geological Society of America Bulletin, 86 (1) :129 ~ 140.
- Hu Guangtao. 1995 #. Landslide dynamics. Beijing: Geological Publishing House.
- Hu Xiewen, Huang Runqiu, Shi Yubing, Lv Xiaoping, Zhu Haiyong. 2009"&". Analysis of blocking river mechanism of Tangjiashan landslide and dam-breaking mode of its barrier dam. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(1):181~189.
- Huang Heqing, Zhao Qihua. 2010 "&". Basic characteristics and preliminary mechanism analysis of large scale rock slide—sturzstrom at Wenjiagou trigged by Wenchuan earthquake. Journal of Engineering Geology, 18(2):167 ~ 177.
- Huang Runqiu. 2007 "&" . Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(3):433 ~454.
- Huang Runqiu, Zhang Weifeng, Pei Xiangjun. 2014"&". Engineering geological study on Daguangbao landslide. Journal of Engineering Geology. 22(4):557 ~ 585.
- International union of geological sciences working group on landslide. 1995. A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, $52:75 \sim 78$.
- Kent P E. 1966. The transport mechanism in catastrophic rockfalls. Geology, 74:79~83.
- Korner H J. 1977. Flow mechanisms and resistances in the debris streams of rock slides. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 16: 101 ~ 104.
- Liu Chuanzheng, Shi Tao, Zhang Mingxia. 1995 "&". On the mechanism of deforming—cracking on the segment of cracks T8 ~ T12 of Lianziya dangerous rock body. Journal of Engineering Geology, 3(2):29 ~41.
- Liu Chuanzheng, Zhang Mingxia. 1996 "&". Mechanisms of deforming—cracking on the segment of cracks T11 ~ T12 of Lianziya dangerous rock body. Earth Science Frontiers, 3 (1 ~ 2):234 ~

240.

- Liu C Z. 2008. Research on the geohazards induced by "5. 12" Wenchuan earthquakes in China. In: Proceedings of the First World Landslide Forum: 353 ~ 357. Tokyo, Japan: Global Promotion Committee of the International Programme on Landslides (IPL).
- Liu Chuanzheng. 2009" &". Theory and its application on mega-geohazards mitigation. Beijing: Science Press.
- Liu Chuanzheng. 2010a "&" . Mechanism analysis on the Jiweishan rockfall disaster happened in Wulong, Chongqing, June 5, 2009. Journal of Engineering Geology, 18(3):297 ~ 304 .
- Liu Chuanzheng. 2010b " & " . Preliminary findings on Dazhai landslide—debris flow disaster in Guizhou province of June 28, 2010. Journal of Engineering Geology, 18(5):623~630.
- Liu Chuanzheng. 2013#, Fifty years for Vajont landslide event, Italy. Hydrogeology "&" Engineering Geology, 40(5): forum.
- Liu Chuanzheng. 2014"&". Genetic types of landslide and debris flow disasters in China. Geological Review, 60(4):858 ~ 868.
- Liu Chuanzheng. 2015 "&" . Epistemology and methodology on geohazard research. Journal of Engineering Geology, 23 (5): 809 ~ 820.
- Liu Chuanzheng. 2016 " & " . Genetic mechanism of landslide tragedy happened in Hong' ao dumping place in Shenzhen, China. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, $27(1):1 \sim 5$.
- Liu Wei. 2002"&". Study on the characteristics of huge scale—super highspeed—long distance landslide chain in Yigong, Tibet. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control., 13(3):9~18.
- McConnell R G, Brock R W. 1904. Report on the great landslide at Frank, Alberta, Department of the interior, Annual report for 1903. Ottawa. Part 8. Canadian.
- Miles F E. 1914. River of rock. MacLeans Mag. , 13:54 ~55.
- Mueller L. 1964. The rock slide in the Vajont valley. Rock Mechanics and Engineering Geology, 2:1489 ~ 1512.
- Nicoletti P G, Marino S V. 1991. Geomorphic controls of the shape and mobility of rock avalanches. Geological society of America Bulletin, 103:1365 ~ 1373.
- Okura Y, Kitahara H, Sammori T. 2000. Effects of rockfall volume on runout distance. Engineering Geology, 58 (2) : 109 ~ 124.
- Saito M. 1969. Forecasting time of slope failure by tertiary creep. In: Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal:[s:n]. 667~683.
- Sassa K. 1988. Geotechnical model for the motion of landslides. In: Proceeding of the 5th International Symposium on Landslides. Lausanne, Switzerland.
- Scheidegger A E. 1973. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. Rock Mechanics, 5: 231 ~ 236.
- Scheidegger A E. 1974. On the dynamics of scree slopes. Rock Mechanics, 6: 25 ~ 38.
- Schultz A P. 1986. Ancient giant rockslides sinking creek Mountain, southern Appalachians, Virginia. Geology, 14:11 ~ 14.
- Sharpe C F. 1938. Landslides and related phenomena. New York: Columbia University Press: 76 ~ 78.
- Shreve R L. 1966. Sherman landslide, Alaska. Science, 154:1639 ~ 1643.
- Shreve R L. 1968a. The Blackhawk landslide. Geol. Soc. America spec., 108:47.
- Shreve R L. 1968b. Leakage and fluidization in air—layer lubricated avalanches. Geol. Soc. America bull., 79:653~658.
- Skempton A W. 1964. Long term stability of clays slope. Geotechnique,

 $14\sim77.$

- Sun Guangzhong. 1988#. Structural Mechanics on Rockmass. Beijing: Science Press.
- Sun Ping, Zhang Yongshuang, Yin Yueping, Wang Fawu. 2009"&". Discussion on the long-runout sliding mechanism of Donghekou landslide—debris flow. Journal of Engineering Geology, 17(6):737 ~744.
- Sun Yuke, Yao Baokui. 1983 "&". Study on mountain landslide mechanism at Yanchihe phosphorus mine. Hydrogeology "&" Engineering Geology, 10(1): 1~7.
- Tan Jizhong. 1993"&". Study on Touzaigou landslide with large and high velocity in Yunnan province, Geological Hazard and Environment Preservation, 4(1):37~44.
- Tang Yaming, Xue Qiang, Bi Junbo, Sun Pingping, Cheng Xiujuan. 2013"&". Preliminary study on loess landslide rainfall triggering modes and thresholds. Geological Review, 59(1):97~106.
- Terzaghi K. 1950. Mechanism of landslide. In: Application of geology to engineering practice, Geol. Soc. New York, 83 ~ 123.
- Vallejo L E. 1980. Cliff collapse and rock avalanches (sturstroms) in the Mackenzie Moutains, Northwestern Canada: Discussion. Canada Geotechnical Journal, 17:149 ~151.
- Varnes D J. 1978. Slope movements, type and processes. In: Schuster R L and Krizek R J. eds. Landslide Analysis and Control, Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington DC, Special report, 176: 11 ~ 33.
- Voight B. 1978. Rockslides and Avalanches, Natural Phenomena. New York: Elsevier: 1 ~ 826..
- Wang Gongxian, Xu Junling, Liu Guangdai. 2004#. Landslide research and its geotechnology. Beijing: Chinese Railway Press.
- Wang Jiading, Zhang Zhuoyuan. 1999 "&". Research on system engineering geology of typical high speed loess landslide group. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press.
- Wang Lansheng, Zhan Zheng, Su Daogang. 1988 #. The preliminary studies of Xintan landslide's development characteristic and the mechanism of the starting and motioning and stopping. In: Chinese

Typical Landslides. Chief editor: Geological Engineering Committee of China Society of Geology. Beijing: Science Press.

- Wieczorek G L, Snyder J B, Waitt R B. 2000. Unusual July 10,1996, rock fall at Happy Isles, Yosemite National Park, California. Geological Society of America Bulletin, 112(1):75~85.
- Wu Weijiang., Wang Nianqin. 2006 #. Landslide disasters in Gansu province. Lanzhou : Lanzhou University Press.
- Xu Junling. 1997a#. A summary of present research on high speed and long distance landslide . Collected Works of Land slide (12). Beijing: China Railway Press.
- Xu Junling. 1997b"&". Recent study on the presumption of sluice valve and movement character of rapid landslides. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control., 8 (4): 23 ~ 27.
- Xu Zemin, Huang Runqiu. 2010 "&" . The geological constraint for massive and catastrophic landslides in Permian Emeishan basalt. Geological Review, 56(2):224 ~ 236.
- Xu Chong, Dai Fuchu, Xu Xiwei. 2010 "&". Wenchuan earthquake induced landslides: an overview. Geological Review, 56(6):860 ~ 874.
- Xu Qiang, Huang Runqiu, Yin Yueping, Hou Shengshan, Dong Xiujun. 2009"&". The Jiweishan landslide of June 5, 2009 in Wulong, Chongqing: characteristics and failure mechanism. Journal of Engineering Geology, 17(4):433 ~444.
- Yang Haiping, Wang Jinsheng. 2009 "&". Geological features and cause analysis of Qianjiangping landslide of July 13, 2003 on Three gorges reservoir. Journal of Engineering Geology, 17 (2): 233 ~ 239.
- Zhan Weiwei, Huang Runqiu, Pei Xiangjun, Li Weile. 2017 "&". Empirical prediction model for movement distance of gully-type rock avalanches. Journal of Engineering Geology, 25(1):154 ~163.
- Zhang Ming, Yin Yueping, Wu Shuren, Zhang Yongshuang. 2010"&"
 . Development status and prospects of studies on kinematics of long runout rock avalanches. Journal of Engineering Geology, 18(6): 805~817

Research on High Speed and Long-Distance of the Avalanches or Landslide—Debris Streams

LIU Chuanzheng^{1,2)}

Consultative Centre of Geo-Hazard Emergency, Ministry of Land and Resources. Beijing, 100081;
 China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing, 100081

Objectives: Some avalanches or landslide—debris streams are of many characteristics, such as large volume, high speed, long-distance of movement, polymorphic existing, changes in direction, many motion stages, impact force and mega-destroying energy. In fact, the high speed and long-distance of the movement occur primarily in the stage of debris streams after rock or soil-mass broken up.

Methods: The rapid and long-distance of the movement are related with the scale, component and structure of substance, difference of landform in elevation, valley features, induced factors and environmental condition which passed by avalanches or landslide. The deforming and breaking down types of rock or soil-mass slopes are often being a chain of action process which includes creeping, fissuring, shearing-off, sliding, rushing out, breaking up and eventually to be debris stream. Mechanism of the avalanches or landslide can be explained through the existing

theories such as residual strength of soil or rock-mass, creep action principle and effective stress or porous water press effect. At present, mechanism of the debris stream is complex that it is interpreted through transformation of potential to kinetic energy, buoyant force of gaseous fluid and motion of pellet flow. The understanding from actual examples of avalanches or landslide—debris stream is, the above three recognitions are not independent each other, but different gradation from macroscopic view to microcosmic grain action and mutual complementary in different measurements.

Results: Author suggests that the value of the speed of avalanches or landslide—debris stream vanguard is arriving 5m/s to be as lower limit of rapid movement based on the adult to flee for one's life. The ratio of H/L is less than 0.4 can be as criterion of long-distance of avalanches or landslide—debris stream in which H is difference of landform in elevation and L is horizontal distance from beginning to end of the motion. Basic disaster models of the avalanches or landslide—debris stream include direct pushing down, breaking up destruction, colliding and pounding, air wave blowing, turbulent current and tornado, blocking dam to be lake and bursting floods, etc.

Acknowledgements: This paper is a research of a project, namely China National Geo-Disaster Emergency and Prevention.

Keywords: avalanches or landslide-debris stream; high speed; long-distance; potential to kinetic energy transformation; buoyant force of gaseous fluid; motion of pellet flow

Author: LIU Chuanzheng, male, born in 1961, researcher, PhD. Mainly engaged in engineering geology and geological disaster reduction. Email:liucz@mail.cigem.gov.cn

Manuscript received on: 2017-05-09; Accepted on: 2017-08-15; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.06.011

《地质学报》和《地质论评》继续 入选"中国精品科技期刊"

2017年10月31日,科技部中国科学技术信息研究所 主办的"中国科技论文统计结果发布会"在北京国际会议 中心举行。

发布会上揭晓了"第四届中国精品科技期刊"的评选 结果,《地质学报》与《地质论评》继续入选。同时公布了 中国科技论文与引文数据库收录的中国中文科技期刊的 综合评价排名(不含港、澳、台地区)。在地质类科技期刊 中,《地质学报》总被引文频次5595,影响因子2.166;《地 质论评》总被引文频次2710,影响因子1.349。《地质学 报》与《地质论评》影响因子均有较大幅度的增长,两刊继 续被收录为"中国科技核心期刊"(中国科技论文统计源 期刊),并有多篇文章入选中国精品科技期刊顶尖学术论 文领跑者5000。

Acta Geologica Sinica and Geological Review Being Continuously Selected as Outstanding S&T Journals of China

