

## 汶川地震引发的流域管理新课题

王兆印<sup>1</sup>, 施文婧<sup>1</sup>, 余国安<sup>2</sup>, 漆力健<sup>1</sup>

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:**汶川地震引发了大量的山体滑坡和崩塌. 巨型滑坡夷平了山谷, 创造了平缓坡地. 这些新生地非常不稳定, 易引发泥石流. 尽快稳定和开发新生地是一个新问题. 滑坡造成的堰塞湖引起剧烈河床演变, 对河流地貌和稳定产生长远和深刻的影响. 大量的崩塌体形成大石块堆积体, 表面没有土壤, 如何修复植被是一个严峻的挑战. 本文通过野外测量和试验, 对上述问题进行了探索并取得了初步成果. 成果表明, 采用阶梯-深潭结构稳定滑坡体, 可以控制或减轻泥石流; 发生于崩塌和滑坡体上的泥石流含水量小且大石块多, 不是黏性泥石流而是两相泥石流, 运动速度仅为黏性泥石流的1/10; 堰塞坝发育成尼克点会显著改变河流纵剖面, 稳定岸坡减少滑坡崩塌灾害; 在花岗岩崩塌体上引种紫萁蕨能显著加快植被演替, 绿化裸露的石块堆积体.

**关键词:**汶川地震; 滑坡; 泥石流; 阶梯-深潭系统; 植被修复; 尼克点; 堰塞湖

中图分类号: P315.9:X141

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)04-0022-11

2008年5月12日14点28分在我国西南龙门山断裂带爆发了8级大地震, 造成40多万人伤亡, 数百万人无家可归, 重灾区面积达12万km<sup>2</sup>. 地震主灾区位于四川西部山区, 山高谷深, 岸坡陡峭, 地震引发各种类型不同规模的崩塌和滑坡<sup>[1]</sup>. 大量的崩塌和滑坡活动为泥石流形成提供了丰富的条件, 灾后一年来暴雨引发频繁的泥石流灾害, 导致灾区公路和河流经常被堵塞. 大型滑坡堵塞江河形成堰塞湖, 引起江湖水沙条件的改变和河流地貌巨变.

滑坡也创造了很多平缓坡地, 这对于“地无三分平”的四川西部山区是一个很大的资源. 但是, 滑坡产生的新生地很不稳定, 原来的水系被掩埋, 新的水系正在发育. 由于堆积物松散孔隙多, 降雨量小时, 降水全部入渗; 降雨量大时则砂石俱下, 形成泥石流. 如何控制泥石流、稳定滑坡体, 开发利用大片新生平缓坡地是一个新挑战.

堰塞湖引起的河床演变有两种, 如果堰塞坝由碎屑颗粒组成, 洪水将这些泥沙冲刷带往下游, 引起下游河段推移质输沙率增加, 年复一年, 河床基本可恢复到震前模样; 如果堰塞坝含有大量巨石(直径大于1m的巨石超过10%), 堰塞湖可以长久保存. 堰塞坝下游几十米至数百米河段发育成有高强度结构的稳定新河床, 河床坡降增大数倍至数十倍. 这样的河床坡降急剧变化的河段在地貌学上称为尼克点. 堰塞坝一旦发育成尼克点, 河床纵剖面发生急剧变化, 对河流的长远演变有着深刻影响.

灾区重建的一项重要任务是修复植被, 滑坡体表面大多有一层土体或较细的颗粒体, 植被修复比较容易, 只要没有泥石流的威胁, 以苔藓草本物种为主体的植被可以在1~5年内修复起来. 但是, 如果大量的崩塌体都是大石块的堆积, 表面没有或仅有极少土壤, 其植被修复则要困难得多. 在四川康定观测到发生在55年前和232年前的崩塌体, 有的已经绿化, 有的还是光秃秃的大石堆.

收稿日期: 2009-08-04

基金项目: 国家科技部973项目资助项目(2008CB425803), 水利部公益专项(2007HSZ0901034)

作者简介: 王兆印(1951-), 男, 山东济南人, 教授, 主要从事河流动力学及河流生态学研究.

E-mail: zywang@tsinghua.edu.cn

地震灾区的泥石流,都是发生于崩塌和滑坡体上.由于这些固体碎屑非常松散,没有较大的集水区,泥石流含水量非常低,稍强的降雨就能引发泥石流,泥石流的发生频率极高.大量的石块在运动中推挤碰撞,极大地消耗能量,故泥石流运动距离短且运动速度小,一般只有 $1\sim 2\text{ m/s}$ .而黏性泥石流的速度可达 $10\sim 15\text{ m/s}$ .震区频频发生的泥石流,含水量很低,但不是黏性泥石流而是两相泥石流,其运动规律还需研究.汶川地震引发的这些新问题,都是传统河流研究中没有碰到或者极少发生的,是对流域管理的新挑战.本文作者在震后一年多来通过不断探索,对这些新问题及其解决方法有了一定的认识.文中简略介绍这些新问题和初步研究成果,希望吸引更多的河流研究工作者深入探讨,为震区修复和河流综合管理的发展做出贡献.

## 1 滑坡堆积体的治理

由于汶川地震发生在河流严重下切、地形剧烈起伏的山区,因此引发了无数不同规模的滑坡.有的滑坡体积巨大,如安县大光包滑坡体达 $7\text{ 亿 m}^3$ 、绵竹文家沟滑坡 $8\ 160\text{ 万 m}^3$ 、北川唐家山滑坡 $2\ 000\text{ 多万 m}^3$ 、东川东河口滑坡 $1\ 000\text{ 多万 m}^3$ 、崇州火石沟滑坡 $646\text{ 万 m}^3$ .这些滑坡对人民生命和财产造成极大危害,但也创造了很多平缓坡地,这对于“地无三分平”的四川西部山区是一个很大的资源.在震区, $2\sim 3\text{ km}^2$ 的平缓坡地就可以建一座县城.

文家沟是绵远河的支流,位于绵竹市清平乡绵远河左岸,正位于汶川地震所发生的龙门山活动断裂带上.文家沟流域面积 $7.81\text{ km}^2$ ,主沟汇水面积 $4.5\text{ km}^2$ 、长 $3.25\text{ km}$ .地震前,文家沟由主沟和左右两条支沟组成树枝状水系,冲沟切割深度为数十米到一百多米.最低点位于沟口(海拔高程为 $890\text{ m}$ ),最高点位于东部分水岭顶子崖(海拔高程为 $2\ 402\text{ m}$ ).根据地震前的 $1:25\ 000$ 地形图和震后对滑坡体的测量,地震引发的大滑坡使 $4\ 450\text{ 万 m}^3$ 岩体和残、坡积物从山上滑下,将沟谷填平,造成厚度 $20\sim 180\text{ m}$ 的滑坡堆积层,堆积物总量达 $8\ 160\text{ 万 m}^3$ <sup>[2]</sup>.文家沟滑坡体造成了长达 $2\ 300\text{ m}$ 、宽 $100\sim 800\text{ m}$ 的平缓坡地,堆积体表面坡度基本都在 $15^\circ$ 以下.2008年6~9月间发生许多不同规模的泥石流,在堆积体两侧冲出新的冲沟,右侧冲沟发展成主流冲沟,深度达 $50\text{ m}$ .目前,沟里没有水流,降雨量较小时,降水全部入渗,降雨量较大时则砂石俱下,形成泥石流.2008年9月22~24日间发生日降雨超过 $80\text{ mm}$ 的暴雨,形成大规模泥石流,带到沟口的碎屑沉积物大约 $90\text{ 万 m}^3$ .

如何尽快控制泥石流,稳定滑坡体,恢复植被和景观,开发利用大片新生平缓坡地是一个新课题.传统的控制沟谷泥石流的方法是建设坝群,已计划拨款 $960$ 万元在文家沟新冲刷形成的沟里建设 $19$ 座坝,控制冲刷并挡住上游的泥石流.但由于滑坡淤埋达 $180\text{ m}$ ,坝群只能建在滑坡体上,滑坡体的沉陷和变形都有可能使坝体断裂甚至在泥石流的冲击下发生溃坝.另外,坝群建设投资很大,对生态也有负面影响.

阶梯-深潭系统是山区河流中一种河床结构现象,河床由一段陡坡和一段缓坡加上深潭相间连接而成,呈一系列阶梯状<sup>[3,4]</sup>,每个阶梯都由巨石堆迭形成稳定结构,在洪水冲击下仍然能保持稳定.阶梯-深潭系列大大增加了水流阻力,消耗水流动能,从而起到保护河床沉积物、稳定河道的作用<sup>[5-7]</sup>.阶梯-深潭系列是一种健康的山区河流地貌,在生态学上具有特殊意义,由于创造了不同河床底质、不同流速、不同水深的水生生物栖息地和产卵地,有利于保持较高的生物多样性.通过野外试验和测量发现,发育阶梯-深潭的河流底栖无脊椎动物的物种数比同样条件但不发育阶梯深潭的河段高 $3$ 倍,单位面积生物量则高 $10$ 倍<sup>[8,9]</sup>.

近年来,人工阶梯-深潭系统已经在德国、意大利、美国、韩国和加拿大等国家应用于山区河流生态修复,在维持河床稳定和改善生态上取得了显著成效<sup>[10-13]</sup>.本文作者采用人工阶梯-深潭系统对云南某条严重下切、经常发生泥石流的小河进行治理,成功地控制了沟谷下切,显著改善了生态,并在一定程度上减轻了泥石流灾害<sup>[14,15]</sup>.人工阶梯-深潭系统的建设费用只有坝系建设的 $1\%\sim 2\%$ .

利用人工阶梯-深潭技术治理新生沟谷,关键技术是将冲沟两边 $20\sim 50\text{ m}$ 高的岸坡上直径 $1\sim 5\text{ m}$ 的巨石挪至沟底,并使其堆迭成图1中的结构,每一级阶梯有 $1\sim 2$ 块巨石.洪水流过每一级阶梯都会发生水跃,从 $1\sim 3\text{ m}$ 高的阶梯跌入下游深潭,水流的大部分能量消耗在跌水和水跃中.这样,阶梯-深潭结构造成极大

的阻力,从而使得流速减小、水深增加、沟床稳定<sup>[16,17]</sup>. 阶梯-深潭系统保护沟床不再下切,通常还会导致小幅度的淤积,两岸沟坡不再变陡甚至略微变缓;坡上的滑坡碎屑堆积物可以保持稳定;沟里能够形成水流而不是泥石流.

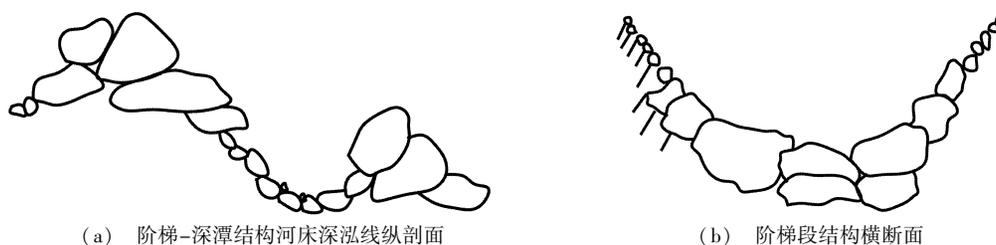


图1 阶梯-深潭结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of step-pool system

主要根据野外观测的天然发育的阶梯-深潭系统来设计阶梯和深潭,阶梯高度  $h$ 、阶梯间距离  $L$ 、沟床坡降  $s$  间的关系大致可表示为<sup>[18]</sup>

$$h/L = 1.5 s \quad (1)$$

2009年5~6月,在文家沟做成的33级试验性阶梯,一般高度在1~2.5 m之间,阶梯间距离大部分在10~15 m,由于试验经费和时间所限,治理的冲沟长度仅有400 m(见图2(a)). 采用阶梯-深潭结构治理后,2009年6月28日发生50 mm/3h的暴雨,触发泥石流,治理沟段的泥石流基本被阶梯深潭拦挡,转化成含沙水流,沙石沉积在深潭段,使部分深潭变浅或淤满(见图2(b)).

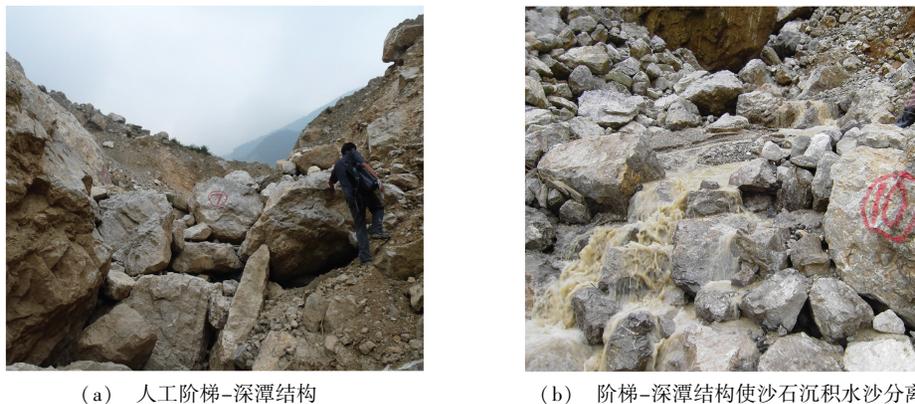


图2 文家沟的人工阶梯-深潭结构

Fig. 2 Artificial step-pool system in Wenjiagou

## 2 堰塞湖引起的河床演变及管理方略

汶川地震引发了大量滑坡,有的滑坡堵塞河流形成堰塞湖. 实际上,滑坡的动力来自河流的下切,下切得愈深,滑坡的势能愈大. 如图3所示,河流下切切穿了滑动面,滑坡体失去了下部的支撑,在地震作用下发生滑坡. 如果滑坡体体积巨大,就会堵塞江河形成堰塞湖<sup>[1]</sup>.

新生堰塞湖很不稳定,可能发生溃决造成洪水灾害, Korup<sup>[19]</sup>对232个堰塞湖的统计表明,10年内大约37%的堰塞湖发生不同程度的自然溃坝. 对堰塞湖有两种处理方法,



图3 河流下切形成滑坡

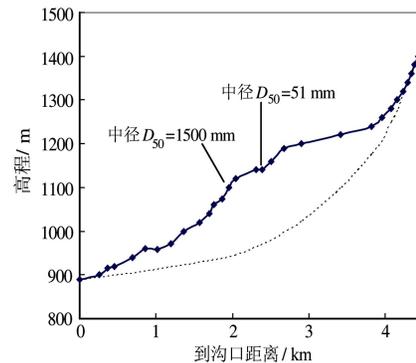
Fig. 3 Channel bed incision causing landslide

一是开挖泄流槽,降低水头固定流路,然后自然或人工辅助形成由巨石和石块群体构成的槽床,消耗水流量.如有足够的巨石发育出阶梯-深潭结构,就能抵抗水流的冲击,稳定整个堰塞体.但这种方法有一定的风险,发生大洪水时如果泄流槽还没有稳定,有可能发生溃决,造成洪水灾难.另一种方法是在洪水到来之前人工清除泄流槽内的巨石,帮助水流冲刷堰塞体排除湖内水量,这样可以保证下游的安全.唐家山堰塞湖库容2亿多 $\text{m}^3$ ,蓄积了巨大的水体势能,而堰塞湖坝体由大量坡积物碎屑组成,在洪水作用下容易冲刷,溃决的风险较大.肖家桥堰塞体主要由粒径100 mm以下的碎屑组成,在洪水冲击下非常容易冲刷.类似的具有较高溃决风险的堰塞湖都需及早清除.

对危险性较小的堰塞湖,应尽可能保存利用.一条正在往下深切的河谷就象地球表面的一道伤口,堰塞湖是地球自愈结的痂.在不危及人类安全的前提下,应该尽量促其保持稳定.由于青藏高原的抬升,造成了青藏高原东边缘的所有河流都在下切<sup>[20]</sup>,而下切造成了山体的不稳定<sup>[21]</sup>.河床高程在水流和携带卵石的摩擦作用下侵蚀降低,形成V字形山谷.河床每年下切可达几厘米至十几厘米,河床下切导致岸坡变陡,因此,下切河流的两岸都处于不稳定的状态.堰塞湖的存在使得阻力增大、河流停止下切并使岸坡变缓.保存堰塞湖有助于稳定河流和两岸山体,不再发生新的滑坡.白沙河深溪沟位于龙门山断裂带上,汶川地震后,公路两旁西北地块相对于东南地块上升了3~4 m(图4(a)).但是由于古代发生的几次大滑坡形成的堰塞湖保存了下来,这次地震没有引发新的滑坡和崩塌.植被没有受到损伤,仍然郁郁葱葱.根据1:50 000地形图和实地测量校正,给出了深溪沟的纵剖面(见图4(b)),图中虚线是推测3次滑坡之前的沟床纵剖面.堰塞坝和泥沙淤积把河床抬高了200 m,使得滑坡势能大大减小,即使处于汶川地震的中心附近,仍然保护了山体稳定.



(a) 白沙河深溪沟公路



(b) 深溪沟的河床纵剖面

图4 汶川地震后的白沙河深溪沟

Fig. 4 The Shenxi ravine of the Baisha River after the Wenchuan Earthquake

一般来讲,既没有堰塞坝被完全冲溃,也很少有堰塞坝完全保存.定义常年洪水过后保存下来的堰塞坝的高度与原始堰塞坝的高度之比为堰塞坝保存比 $R$ ,这个保存比取决于堰塞坝的颗粒组成、溢流槽阶梯-深潭系统发育程度和洪水流量<sup>[22]</sup>.如保存比 $R \geq 0.9$ ,就视为完全保存堰塞坝;如 $R \leq 0.5$ ,就视为溃决堰塞坝;如 $0.5 < R < 0.9$ ,就视为半溃决堰塞坝.如岷江上1933年地震形成的叠溪堰塞湖坝体大约1/3被洪水冲溃,属于半溃决堰塞坝,至今堰塞湖还有40多米深.

洪水冲刷堰塞坝,在堰塞体上形成一个新的溢流河槽.如果溢流槽发育成能够抵抗大洪水的结构,堰塞坝就能保存下来.调查研究<sup>[9]</sup>表明,堰塞坝的存亡主要取决于堰塞坝溢流槽阶梯-深潭系统的发育程度 $S_p$ ,堰塞坝的保存比 $R$ 和 $S_p$ 成明确的正比关系.大多数情况下,如 $S_p > 0.5$ ,堰塞坝可以完全保存.只要直径大于1 m的石块体积比达10%就可以发育成高强度的阶梯-深潭系统.根据堰塞坝的组成可以预测堰塞湖的稳定性和可以达到的保存比.

堰塞湖稳定下来形成所谓尼克点(Knickpoint),即河床纵剖面上坡度急剧变化的陡坡河段.尼克点的发

育对于整条河流的稳定以及河流纵剖面的演变都至关重要<sup>[20]</sup>. 图4(b)显示古代的堰塞湖在深溪沟上形成了尼克点,使得沟谷不再下切,在地震作用下仍能维持岸坡稳定. 金沙江虎跳峡堰塞湖形成于千百年前,左岸巨大的崩塌和滑坡阻塞金沙江,拦挡了所有推移质泥沙,形成平滑如镜的堰塞湖(见图5(a)),堰塞湖远没有淤满,说明虎跳峡堰塞湖形成的时代不会太久远. 紧接虎跳峡堰塞湖是已经发育良好的阶梯-深潭结构,巨大石块抵抗了水流的冲刷,消耗了水流能量,水流势能急降213 m(见图5(b)). 虎跳峡已经成为金沙江最重要的尼克点,假如这个尼克点被破坏,虎跳峡上游数百公里会急剧下切,大量的崩塌和滑坡就会发生.



(a) 虎跳峡堰塞湖



(b) 虎跳峡发育良好的阶梯-深潭结构

图5 虎跳峡堰塞湖

Fig. 5 The quake lake of Tiger Leaping Gorge

堰塞湖发育成尼克点,不仅稳定了河势,改变了河床纵剖面,还形成了美丽的景观. 四川九寨沟景区就是由一系列的堰塞湖组成的,许多堰塞体形成瀑布. 岷江叠溪海子由2个大堰塞湖组成,堰塞体上发育良好的阶梯-深潭系统,在河床纵剖面上形成尼克点. 堰塞湖发育成尼克点引起的河床演变包括:①上游河段从下切转变成淤积过程,以及在此过程中河流从顺直向弯曲和分叉河型的发育;②堰塞体上阶梯-深潭系统的发育和稳定过程.

### 3 崩塌体的植被修复

汶川地震引发的山体滑坡和大量崩塌造成植被破坏和大面积的裸露坡面,如滑坡体表面有土层或者土石层,植被修复只待时日;但是,如崩塌体由大片巨石堆积,表面几乎完全没有土壤,则很难自然完成植被修复. 图6为岷江映秀的崩塌体和渔子溪的崩塌体. 图7为汶川附近岷江两岸地震前后植被面积和裸露面积. 可见,地震后岷江两岸岩石裸露的面积剧增.



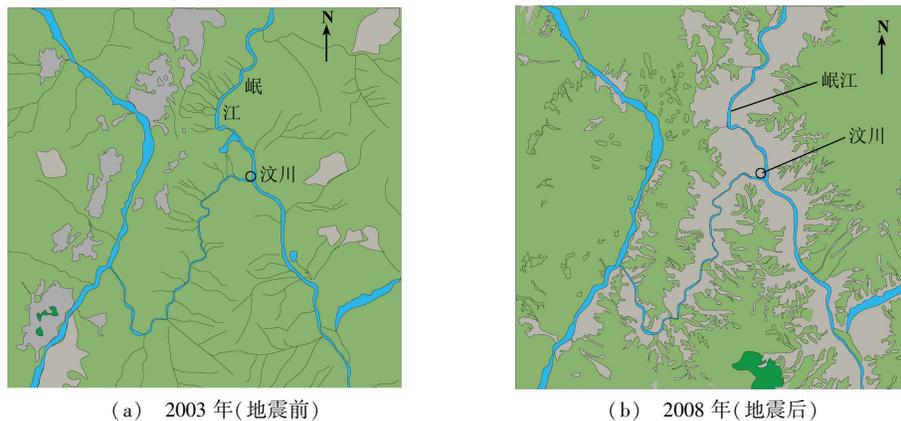
(a) 岷江映秀的崩塌体



(b) 渔子溪的崩塌体

图6 岷江映秀和渔子溪崩塌体

Fig. 6 Yingxiu and Yuzixi avalanches on the Minjiang River



(a) 2003年(地震前)

(b) 2008年(地震后)

图7 汶川地震前后汶川县城附近和岷江两岸裸露坡地示意图

(绿色表示有植被覆盖,灰色代表裸露坡地)

Fig.7 Bared slope areas before and after the Wenchuan Earthquake near county town and along the Minjiang River

(green indicates vegetation and grey indicates bared slope)

为了找到能使崩塌体植被尽快修复的方法,考察了一些古代地震滑坡崩塌体,并选取康定折多河为重点研究对象.折多河下游从康定到入汇大渡河河段又名瓦斯沟,是一条深切河流.两岸岩性与岷江和渔子溪相同,都是轻度变质的花岗岩.1786年康定南发生7.7级地震<sup>[23]</sup>,1955年4月14日,康定西南发生7.5级地震.自康定城至大渡河河口25 km长的折多河两岸分布有50多处巨大崩塌体,两次地震崩塌体叠加在一起,但即使在同一个崩塌体上,有的部位植被发育良好,几乎完全变绿;有的部位还是裸露的大石块.分析发现,崩塌体植被修复的关键是苔藓.苔藓吸附一些尘土,死亡的苔藓假根和枯落物堆积构成了蕨类、草本和灌木生长的基础.这样,在几乎没有土壤的崩塌体上从地衣苔藓开始,经过蕨类和草本,再到草灌混合的植被演替最终使山体变绿,而苔藓开始生长的时间决定了植被修复的速度.利用生长锥测量,生长在枯落物上的最早的灌木达23年之久.

采样分析发现,在裸露的花岗岩上,开始时维管束植物无法生存,但一些苔藓作为先锋物种出现于裸岩上,随着苔藓植物在岩石上的定居、生长及其面积的扩张,在岩石表面建立了一层有机质,使微生物可以侵入.久而久之,苔藓植物着生部位的矿物质发生变化,养分的可利用性增加.当有机层达到足够的厚度时,维管束植物便可以生长.崩塌体上的植被发育大致可以分为3个阶段:

(1) 裸露岩石表面长出地衣和矮小、粗壮、耐旱、垫状生长型苔藓.苔藓物种有紫萼藓、偏叶白齿藓、贴尖叶墙藓、贴生毛灰藓、拟阔叶小石藓;

(2) 矮小、粗壮、垫状生长型苔藓减少,平铺状生长型苔藓出现,草本和蕨类植物侵入.平铺状生长型苔藓死亡后填充岩石缝隙,新的苔藓、草本、蕨类在死亡苔藓堆积体上生长.此阶段出现的苔藓物种有丝灰藓、节茎曲柄藓、长叶纽藓、山羽藓等.同时出现草本植物禾本科、菊科、伞形科、苦苣苔科、凤仙花科凤仙花属、景天科景天属等,还有蕨类植物卷柏、石松、龙骨科瓦韦属等.图8(a)为生长在大石块上的地衣和苔藓以及生长在苔藓上的蕨类植物;

(3) 耐旱型苔藓消失,平铺、交织状生长型苔藓占优.除了草本、蕨类,灌木也开始生长,形成灌-草-蕨-苔藓植物群落.死亡苔藓个体和维管束植物根系交织,拦截更多的土石,形成厚厚的腐殖-土壤层,几乎完全覆盖崩塌体,使得崩塌体趋于稳定.此阶段出现的灌木有苦木科臭椿属臭椿、豆科羊蹄甲属、芸香科花椒属野花椒、大戟科海漆属、榆科峨眉山黄麻属、五加科五加属、胡颓子科、漆树科、豆科、虎耳草科等十余种.林下草本植物物种丰富,有蓼科荞麦属、蓼科何首乌属、菊科鬼针草属、禾本科、豆科豇豆属、景天科景天属、景天科八宝属、天南星科、兰科、唇形科、菊科蒿属、鸭趾草科竹叶子、葡萄科地锦属、璇花科、仙人掌等五十余种.蕨类有水龙骨科瓦韦属、铁角蕨科铁角蕨属厚叶铁角蕨、碗蕨科碗蕨属锡金碗蕨、剑蕨科槲蕨属川滇槲蕨等.图

8(b)为生长在死亡的苔藓假根和枯落物堆积层上的灌木。



(a) 地衣、苔藓以及生长在苔藓上的蕨类植物 (b) 生长在死亡的苔藓假根和枯落物堆积层上的灌木

图8 崩塌体大石块上的植被修复

Fig.8 Vegetation restoration on the avalanche deposit

根据康定折多河的调查研究结果,由于缺少土壤,崩塌体植被初步开始自然修复的时间至少需20多年,也可能要200多年,关键在于苔藓开始生长的时间.为加快汶川地震产生的大量崩塌体的植被修复,2008年11月在渔子溪进行人工播撒苔藓修复植被试验.采集5种石生垫状生长型和平铺、交织状生长型苔藓,洗净后用搅拌机打碎成2~3mm的碎片,分别加入沙土、面粉、鸡蛋等调成糊状,用毛刷在选定花岗岩表面刷匀,连续观察苔藓生长情况和物种组成.共做了20个不同物种、不同配方和不同部位的实验.2009年3月,5个物种中只有紫萼藓能够生长,已经长成厚5mm苔藓层,各种配方中只有加沙土的可以生长.倾斜石面下部涂抹的苔藓容易被雨水冲走,比较平缓的石面和石块棱角处容易生长.图9显示了试验崩塌体石块上涂抹的苔藓与沙土混合物(图9(a))以及4个月后的紫萼藓(图9(b)).

苔藓是一类适应性很强的低等植物群,可以在缺少土壤、直接暴露在阳光下的石堆上生长<sup>[24]</sup>.在渔子溪培育成功的紫萼藓叶片具有干燥时强烈卷缩、毛状尖反射光照减少水分蒸发和细胞壁疣状突起反射太阳辐射的特殊结构(图9(c)).



(a) 石块表面涂抹苔藓糊

(b) 4个月后的紫萼藓

(c) 康定折多河崩塌体上采集的紫萼藓叶片毛状尖

图9 渔子溪人工播撒苔藓修复植被试验

Fig.9 Experiment of vegetation restoration with moss on Yuzixi avalanches

加快震区崩塌滑坡体植被修复还有很多课题需要研究.如果现在在震区人工喷洒带苔藓孢子粉的泥浆,

从生长苔藓开始,经过蕨类和草本,再到草灌混合的植被演替,最终可使山体变绿。

#### 4 高密度两相慢速泥石流

地震崩塌滑坡造成大量松散颗粒材料堆积在山坡上,较小的降雨强度就可引发泥石流. 这样的泥石流发生频率高,泥石流固体颗粒含量高,由于泥石流的含水量低,故运行距离短,堆积坡度大,一般出山口就淤积,大部分没有输送到大江大河. 在绵远河文家沟和楠木沟泥石流的3次采样中,泥石流的重量比含水量只有9%,8%和17%,密度达 $2.0 \sim 2.2 \text{ t/m}^3$ . 泥石流的固体颗粒中,粒径大于1 cm的砾石和大石块含量大于80%. 高密度的石块在运动中互相碰撞,消耗大量的能量,产生极高的阻力,因此运动速度小. 泥石流头部是能量消耗的集中部位,在同样水流流量下形成的泥石流,头部越高速度越小. 这种泥石流头部高度达到3~4 m,运动速度只有1~2 m/s. 由于速度小,遇到障碍物时撞击力很小,图10(a)显示高度达到5 m的泥石流撞击到二层小楼背面,小楼完好无损. 泥石流绕过小楼,堵住楼门,小楼主人及时逃脱. 由于速度很小,泥石流停止时表面坡度很大,一般 $8^\circ \sim 12^\circ$ ,前缘很高,有2~4 m,断面上呈上凸形(见图10(b)).



图10 汶川地震中的两相泥石流

Fig. 10 Two-phase debris flows in the Wenchuan Earthquake area

我国对泥石流有长久的观测记录和学术研究<sup>[25-27]</sup>. 但是过去认识的泥石流与震区发生的泥石流很不相同,在云南蒋家沟发生的黏性泥石流基本上是伪一相流,石块含量较少,石块与水、黏土沙构成的液相之间没有相对运动,头部越高速度越快. 根据实际测量,蒋家沟泥石流运动速度很快,虽然坡降只有6.5%,密度高达 $2.0 \text{ t/m}^3$ 、头部高度1.5 m的泥石流速度可达到 $12.5 \text{ m/s}$ <sup>[28]</sup>. 按照其速度计算的曼宁阻力系数只有清水水流的50%,具有减阻效应. 蒋家沟泥石流的撞击力非常大,还可以爬上10多米的高坡,停止运动时表面坡度一般都小于 $3^\circ$ . 东川泥石流观测研究站将泥石流划分为黏性、亚黏性和稀性泥石流<sup>[29]</sup>,主要反映了细颗粒的影响,适用于具有细颗粒物构成的泥石流.

汶川地震后,文家沟、走马岭、楠木沟发生的泥石流主要由大量石块组成,少量的黏土、粉沙及水的液相混合物在泥石流运动中起到润滑剂的作用. 石块与这种液相混合物之间、石块与石块之间存在剧烈的相对运动. 因此,这种高密度的泥石流不是黏性泥石流而是一种两相运动. 本文作者根据运动机理和泥石流组成的不同,把泥石流划分为黏滞性泥石流和两相泥石流<sup>[30]</sup>. 前者由黏土、沙和砾石组成混合体,以间歇流、铺床过程、减阻现象、沉积物不分选为特征,液体和固体之间无明显的相对运动;后者由大石块和砾石构成固相,水和少量黏土沙构成液相,液固相之间存在明显的相对运动,阻力很大. 在震区观测到的泥石流阻力系数比水流大10~30倍.

本文作者在泥石流槽中做过2种高密度两相泥石流实验<sup>[31,32]</sup>. 试验在一个长10 m、宽50 cm、高60 cm、可调坡度为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 的泥石流槽中进行,将粒径5~10 mm卵石和50~90 mm大卵石铺在槽床上,液相为清

水和黏土含量为  $100 \text{ kg/m}^3$  的稀泥浆. 当水流量较大时, 卵石在水流激发下运动形成高达  $20 \sim 30 \text{ cm}$  的头部, 以比正常水流小得多的速度前进. 在水槽上方和侧面用两台摄像机纪录泥石流的发生、发展和运动过程, 以此分析泥石流中卵石的速度和浓度分布. 实验发现, 泥石流头部液相含量很少, 石块翻滚前进, 推挤碰撞, 消耗大量能量, 因而阻力很大, 流速很小. 对于这样的泥石流, 应从能量的角度来分析. 设水流单宽流量为  $q$ , 激发泥石流后头部高度为  $h_d$ , 运动速度为  $u_d$ , 固体颗粒所占体积比为  $C_{vd}$ , 考虑泥石流在运动中所释放的势能, 水流传给固体颗粒的动能, 颗粒碰撞摩擦消耗的动能, 由此推导出泥石流头部运动速度公式<sup>[32]</sup>:

$$u_d = 2.96 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} \frac{q}{C_{vd} h_d \left[ 1 - 20J + 12.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} \right]} \quad (2)$$

式中:  $\gamma_s$  为固体颗粒重度;  $\gamma$  为水的重度;  $J$  为泥石流的能坡(当沟床坡降均匀时等于沟床坡降  $s$ ). 按照文家沟、楠木沟和走马岭的泥石流,  $h_d$  大约  $2 \sim 5 \text{ m}$ , 重量比含水量  $8\% \sim 17\%$ , 固体颗粒所占体积比  $C_{vd}$  大约  $0.65 \sim 0.79$ , 密度  $2.0 \sim 2.3 \text{ t/m}^3$ , 能坡  $J$  大约为  $0.15 \sim 0.25$ , 单宽流量  $q$  推算为  $2 \sim 5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . 根据公式(1) 计算得出泥石流头部运动速度大约  $0.5 \sim 1.5 \text{ m/s}$ . 这个结果与目击者所述十分吻合.

高密度两相慢速泥石流对于降雨强度要求很低, 所以发生频率非常高. 根据作者冒雨观察, 暴雨带着一定量的黏性细颗粒进入石块间隙, 在孔隙内形成润滑剂. 当地表径流带动某些颗粒运动时, 边坡上的大量堆积石块即运动形成泥石流. 然而, 泥石流经过短距离运动沉积下来后, 石块间的空隙被泥沙填满, 难以再次形成泥石流. 高密度两相慢速泥石流虽然对人畜危害不大, 但对公路和建筑物造成很大破坏, 有的地方在汛期天天发生, 公路每天都要用机械清除泥石流堆积物才能通行. 这种泥石流还需要深入研究寻找治理方法.

## 5 结 语

(1) 地震引发的巨型滑坡体创造了大量平缓坡地, 但是这些新生地很不稳定, 原来的水系被淤埋, 新的水系正在发育. 由于堆积物松散孔隙多, 降雨量小时全部入渗, 降雨量大时则形成泥石流. 泥石流在文家沟滑坡堆积体上切出  $50 \text{ m}$  深的沟谷, 洪水发生时冲刷沟底, 两岸立即垮塌, 沙石和水流混合形成泥石流. 采用阶梯-深潭结构治理滑坡堆积体, 可以控制或减轻泥石流. 在沟床上建造阶梯-深潭结构能造成极大的阻力, 控制沟床冲刷, 减少沟壁坍塌. 阶梯-深潭结构是稳定滑坡堆积体的有效方法;

(2) 如果堰塞坝含有大量巨石, 堰塞湖可以长久保存. 从堰塞坝顶往下游几十米到数百米河段发育成有高强度结构的稳定的陡坡河段(尼克点). 堰塞坝发育成尼克点后会显著改变河流纵剖面, 稳定岸坡减少滑坡崩塌灾害;

(3) 花岗岩崩塌体堆积物没有土壤, 可以通过培育苔藓, 经过蕨类和草本, 再到草灌混合的植被演替, 加快震区崩塌滑坡体的植被修复. 实验发现, 在几乎没有土壤的裸露大石堆上只有紫萼藓可以存活, 紫萼藓具有抗晒和减少水分散失的特殊结构. 苔藓生长后能够形成由死亡的假根和枯落物及吸收的尘土构成的生长基, 最终形成苔草灌结合的植被层. 震区人工喷洒带苔藓孢子的泥浆, 能节省 20 多年时间使山体变绿;

(4) 震区滑坡堆积体存在大量孔隙, 暴雨带着一定量的黏性细颗粒进入石块间隙, 在孔隙内形成润滑剂, 引发高密度两相慢速泥石流, 发生频率非常高. 这种泥石流的速度比黏性泥石流小的多, 水流流量愈大, 流速愈大, 泥石流头部愈高, 流速愈小. 这种泥石流对人畜危害不大, 但对于公路和建筑物造成很大破坏, 还需要深入研究寻找相应的治理方法.

## 参 考 文 献:

- [1] WANG Zhao-yin, CUI Peng, WANG Rui-yu. Mass movements triggered by the Wenchuan Earthquake and management strategies of quake lakes[J]. International Journal of River Basin Management, 2009, 7(1): 1-12.

- [2] 四川省地质工程集团公司. 四川省地震灾区 2008 年重大地质灾害应急勘查设计项目: 绵竹市文家沟泥石流勘查、可研、初设报告[R]. 成都: 四川省地质工程集团公司, 2009. (Sichuan Geological Engineering Group Corporation. Significant geo-hazards emergency, survey and design project of 2008 of earthquake disaster area in Sichuan Province: report of survey, feasibility and initial design of Wenjia Ranne of Mianzhu[R]. Chengdu: Sichuan Geological Engineering Group Corporation, 2009. (in Chinese))
- [3] GRANT G, SWANSON F J, WOLMAN M G. Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, western Cascades, Oregon[J]. Geological Society American Bulletin, 1990, 102: 340-352.
- [4] MILZOW C, MOLNAR P, MCADELL B W, et al. Spatial organization in the step-pool structure of a steep mountain stream (Vogelbach, Switzerland)[J]. Water Resources Research, 2006, 42(4): W04418.1-W04418.11.)
- [5] CHIN A. The morphologic structure of step-pool in mountain streams[J]. Geomorphology, 1999, 27: 191-204.
- [6] CHIN A. The periodic nature of step-pool mountain streams[J]. American Journal of Science, 2002, 302: 144-167.
- [7] WANG Z Y, XU J, LI C Z. Development of step-pool sequence and its effects in resistance and stream bed stability[J]. International Journal of Sediment Research, 2004, 19(3): 161-171.
- [8] 王兆印, 程东升, 何易平, 等. 西南山区河流阶梯-深潭系列的生态学研究[J]. 地球科学进展, 2006, 21(4): 409-416. (WANG Zhao-yin, CHENG Dong-sheng, HE Yi-ping, et al. A study of the ecological functions of step-pool system in southwest mountain streams[J]. Advance in Earth Sciences, 2006, 21(4): 409-416. (in Chinese))
- [9] WANG Z Y, MELCHING C S, DUAN X H, et al. Ecological and hydraulic studies of step-pool system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2009, 135(9): 705-717.
- [10] LENZI M A. Stream bed stabilization using boulder check dams that mimic step-pool morphology features in northern Italy[J]. Geomorphology, 2002, 45: 243-260.
- [11] NICKOLOTSKY A, PAVLOWSKY RT. Morphology of step-pools in a wilderness headwater stream: The importance of standardizing geomorphic measurements[J]. Geomorphology, 2007, 83: 294-306.
- [12] TODD M, MIKE L. Natural channel design of step-pool watercourses using the "key-stone" concept[J]. ASCE Conference Process, 2003, 18: 1-11.
- [13] WANG Z Y, LEE J H W, MELCHING C S. Integrated river training and management[M]. Beijing: Tsinghua University, Press, 2004.
- [14] WANG Z Y, YU G A. Step-pool system for erosion control and ecological restoration[C]//International Conference on Erosion and Torrent Control as a Factor in Sustainable River Basin Management, Belgrade, 2007: 1-14.
- [15] YU G A, WANG Z Y, DUAN X H, et al. Artificial step-pool system for ecological restoration of a debris-flow ravine[C]//32nd IAHR Congress, Venice, 2007: 1-10.
- [16] 余国安, 王兆印, 张康, 等. 应用人工阶梯-深潭治理下切河流-吊嘎河河床的尝试[J]. 水力发电学报, 2008, 27(1): 85-89. (YU Guo-an, WANG Zhao-yin, ZHANG Kang, et al. Field experiment for harnessing incised mountain stream (the Diaoga river) by using artificial step-pools[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(1): 85-89. (in Chinese))
- [17] 徐江, 王兆印. 山区河流阶梯-深潭的发育及其稳定河床的作用[J]. 泥沙研究, 2003(5): 21-27. (XU Jiang, WANG Zhao-yin. The formative mechanism of step-pool system and its role in bed stabilization of mountain streams[J]. Journal of Sediment Research, 2003(5): 21-27. (in Chinese))
- [18] ABRAHAMS A D, LI G, ATKINSON J F. Step-pool stream: adjustment to maximum flow resistance[J]. Water Resources Research, 1995, 31(10): 2593-2602.
- [19] KORUP O. Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams[J]. Engineering Geology, 2004, 73: 13-35.
- [20] OUMET W B, WHIPPLE K X, ROYDEN L H, et al. The influence of large landslides on river incision in a transient landscape: Eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Geological Society of America Bulletin, 2007, 119: 1462-1476.
- [21] KORUP O, SCHLUNEGGER F. Bedrock landsliding, river incision, and transience of geomorphic hillslope-channel coupling: Evidence from inner gorges in the Swiss Alps[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 76: 112,
- [22] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geol Soc Amer Bull, 1988, 100: 1054-1068.
- [23] 国家地震局地球物理所, 复旦大学中国历史地理研究所. 中国历史地震图集-清时期[M]. 北京: 中国地图出版社, 1983. (Institute of Geophysics of State Seismological Bureau, Institute of Historic Geography of Fudan University. The atlas of historic earthquakes of China (volume for Qing Dynasty)[M]. Beijing: China Cartographic Publishing House, 1983. (in Chinese))
- [24] 王文云, 张朝晖. 贵州老万场金矿石灰岩与红土矿体土壤结皮中苔藓植物种类及群落比较研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 244-247. (WANG Wen-yun, ZHANG Zhao-hui. Comparative study on species and communities of bryophytes associated with formation of soil crust on limestone and lateritic gold sites in Laowanchang lateritic gold deposit of Guizhou[J].

- Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(4): 244-247. (in Chinese))
- [25] 康志成, 李焯芬, 马嵩乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-4. (KANG Zhi-cheng, LI Chao-fen, MA Ai-nai. Research on debris flows in China[M]. Beijing: Science Press, 2004: 1-4. (in Chinese))
- [26] 崔 鹏, 高克昌, 韦方强. 泥石流预测预报研究进展[J]. 中国科学院院刊, 2005, 20(5): 363-369. (CUI Peng, GAO Ke-chang, WEI Fang-qiang. The forecasting of debris flow[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2005, 20(5): 363-369. (in Chinese))
- [27] 陈晓清, 李 泳, 崔 鹏. 滑坡转化泥石流起动研究现状[J]. 山地学报, 2004, 22(5): 562-567. (CHEN Xiao-qing, LI Yong, CUI Peng. An overview of transformation of landslide into debris flow[J]. Journal of Mountain Science, 2004, 22(5): 562-567. (in Chinese))
- [28] 张 军, 熊 刚. 云南将家沟泥石流运动观测资料集(1987-1994)[M]. 北京: 科学出版社, 1997. (ZHANG Jun, XIONG Gang. Datas of debris flow movement observation in Jiangjia Ravine, Yunnan (1987-1994)[M]. Beijing: Science Press, 1997. (in Chinese))
- [29] 康志成. 中国泥石流灾害与防治[M]. 北京: 科学出版社, 1996. (KANG Zhi-cheng. Debris flow hazards and their control in China[M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese))
- [30] WANG Zhao-yin, WAI ONYX W, CUI Peng. Field investigation into debris flow mechanism[J]. International Journal of Sediment Research, 1999(4): 10-22.
- [31] 王兆印, 张新玉. 水流冲刷沉积物生成泥石流的条件及运动规律的试验研究[J]. 地理学报, 1989, 44(3): 291-301. (WANG Zhao-yin, ZHANG Xin-yu. Experimental study of formation and laws of motion of debris flow[J]. Acta Geographica Sinica, 1989, 44(3): 291-301. (in Chinese))
- [32] 王兆印. 泥石流龙头运动的实验研究及能量理论[J]. 水利学报, 2001(3): 18-26. (WANG Zhao-yin. Experimental study on debris flow head and the energy theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(3): 18-26. (in Chinese))

## New challenges of river management induced by the Wenchuan Earthquake

WANG Zhao-yin<sup>1</sup>, SHI Wen-jing<sup>1</sup>, YU Guo-an<sup>2</sup>, QI Li-jian<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The Wenchuan Earthquake have triggered many landslides and avalanches. Huge landslides buried valleys and created many gentle slope lands. The newly created lands are unstable and debris flow often occurs. Stabilization and development of the new lands is a new challenge. The second challenge is due to the damming of rivers and creation of quake lakes by landslides, which induces intensive fluvial process and may have long term effects on the river morphology. Many avalanche deposits consist of large stones without soil and fine sediment on the surface. Vegetation restoration on the avalanche deposits is the third challenge. These problems are studied based on field investigation and field experiments. Artificial step-pool system may stabilize the landslide body and control or mitigate debris flows in the incised gullies on the newly created land. The debris flow occurring in the earthquake area consists mainly of gravel, cobbles and boulders. They are two-phase debris flow rather than viscous debris flow although its specific weight is extremely high. The velocity of these debris flows is much smaller than that of the viscous debris flows because the collision of boulders and cobbles consumes a lot of energy. Quake lakes may develop into knickpoints, which will change the bed profile of the river and eventually stabilize the river. Planting *Grimmia pilifera* on the avalanche deposit can accelerate vegetation restoration and finally green the bared mountains.

**Key words:** Wenchuan Earthquake; landslide; debris flow; step-pool system; vegetation restoration; knickpoint; quake lake