

文章编号: 1008 - 2786 - (2011) 4 - 474 - 09

## 裂点发育及其对堰塞坝的稳定性影响

张康<sup>1</sup>, 王兆印<sup>1</sup>, 刘怀湘<sup>2</sup>, 余国安<sup>3</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 10084;

2. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘 要:** 通过野外调查及试验对堰塞坝的稳定和裂点的发育进行研究, 发现堰塞坝的稳定性主要取决于泄洪道内阶梯 - 深潭系统的发育程度  $S_p$  和坝体上游洪峰的水流能量  $p$ 。堰塞坝的保存与溃决情况采用保留的坝高比进行定量描述, 对于洪峰流量小于  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  山区河流, 保留坝高比与  $S_p$  呈线性相关; 洪峰流量大于  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $< 30\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 时, 河道稳定所需的最小河床结构强度  $S_p$  随着单宽水流能量  $p$  的增加而增大。堰塞坝泄洪道内不发育阶梯 - 深潭系统或发育程度较低的坝体,  $S_p$  值小于稳定河床最小的阻力强度, 将会发生下切、溯源冲刷并引起溃坝。保留的堰塞坝在泥沙淤积和水流的长期作用下会形成裂点, 对河床下切起到控制作用, 降低再次发生滑坡的风险。大型裂点能改变河床演变和河流地貌, 连续堰塞坝形成的裂点能长期保存并形成优美的自然景观, 创造良好的河流生态环境。

**关键词:** 堰塞坝; 阶梯 - 深潭系统; 裂点; 河床下切; 汶川地震

中图分类号: P931.91

文献标识码: A

2008 - 05 - 12 四川汶川发生 8.0 级大地震, 在青藏高原东部边缘的山区河流上引发了大量崩塌滑坡, 形成许多堰塞湖。堰塞湖的弃留问题引起了广泛关注, 一些学者认为由于洪水过程中河道的侵蚀将导致堰塞坝最终溃决, 许多堰塞坝也都在 1 a 甚至不到 1 a 里溃决了<sup>[1]</sup>, 如 1933 年岷江叠溪地震形成的堰塞坝, 形成后仅 45 d 就溃决了。而堰塞坝一旦溃决将带来灾难性洪水和泥石流<sup>[2-3]</sup>, 程尊兰等<sup>[4]</sup>对中国西部 19 个溃决的堰塞坝进行了统计, 并就其中影响较大堰塞坝溃决事件进行了详细的描述, 这些堰塞坝从形成到溃决也就经历几分钟到数 10 d 之间。

Nicoletti 和 Parise<sup>[5]</sup>对西西里岛东南部滑坡形成的 7 个堰塞坝的稳定性进行了分析, 该地区共有

146 个堰塞坝, 主要分布在峡谷段, 在峡谷段以上及以下河段的只有很少一部分。这 7 个堰塞坝都由地震引发, 滑坡体在  $50 \times 10^4 \text{ m}^3$  到  $3\,400 \times 10^4 \text{ m}^3$  之间, 被认为是能够稳定保留的。虽然这 7 个堰塞坝都没有溃决, 但其中有 5 个堰塞坝出现了不同程度的下切侵蚀。

而堰塞湖也有有利的一面, Geertsema 和 Pojar<sup>[6]</sup>通过对加拿大西部(不列颠哥伦比亚省)的滑坡与生态多样性进行研究, 发现滑坡改变了地基、土壤、植被以及生态栖息地景观等, 且滑坡作为环境改变的重要因素能创造多样性的场所, 因此, 滑坡对生态多样性又起着重要的贡献作用。

Wang 等<sup>[7]</sup>提出保存堰塞坝能降低下切的山区河流再次发生山体滑坡的风险。但对于堰塞湖的管

收稿日期(Received date): 2010 - 08 - 10; 改回日期(Accepted): 2010 - 11 - 03.

基金项目(Foundation item): 国家 973 计划资助项目(2008CB425803); 清华大学水沙科学及水利水电工程国家重点实验室自主课题资助项目(2009 - ZY - 2); 优秀国家重点实验室研究项目基金(50823005)。[Supported by the National Basic Research Program of China (2008CB425803), the State Key Laboratory of Hydro-science and Engineering (2009 - ZY - 2), and the Excellent State Key Laboratory of China (50823005).]

作者简介(Biography): 张康(1981 -), 男, 新疆莎车人, 博士研究生, 研究方向河流综合管理。[Zhang Kang (1981 -), male, Ph. D. Candidate, researched on integrated river management.] E-mail: zhang - k08@mails. tsinghua. edu. cn

理还需要更直接的评价方法来判定堰塞坝的安全及稳定性。目前对堰塞湖评价采用标准化的方法,包括收集堰塞坝高度、堰塞湖库容、堰塞湖所在河流的洪峰流量、堰塞坝下游人口经济状况等资料,再根据这些因素对堰塞湖进行风险等级划分,而基于这些数据得出的结果却不一定正确。例如,金沙江虎跳峡若采用这种方法进行评价应被划为高危险堰塞湖,实际却并非如此。

本文通过现场调查实验,对堰塞坝溢洪道内的阶梯-深潭系统发育程度进行测量,研究阶梯-深潭发育程度对堰塞坝稳定性的影响,并分析堰塞坝形成的裂点对河床演变的影响。研究结果将对堰塞坝的稳定性及河床演变预测提供新的理论和方法。

## 1 研究区域及研究方法

图 1 为现场调查的龙门山断裂带附近河流以及汶川地震引起的堰塞坝位置。为研究堰塞坝的长期稳定性及其对河床演变的影响,对金沙江、雅鲁藏布江、易贡藏布、雅砻江及黄河源头等青藏高原及其周边河流历史上发生的堰塞坝(或保留或溃决)也进行了现场调查测量。

堰塞坝的稳定与坝体溢洪道内阶梯-深潭系统的发育程度有关,阶梯-深潭系统具有极强的河床阻力,能最大限度地消耗水流能量,从而保护河床不被冲刷下切<sup>[9-11]</sup>。采用无量纲数——河床结构强度

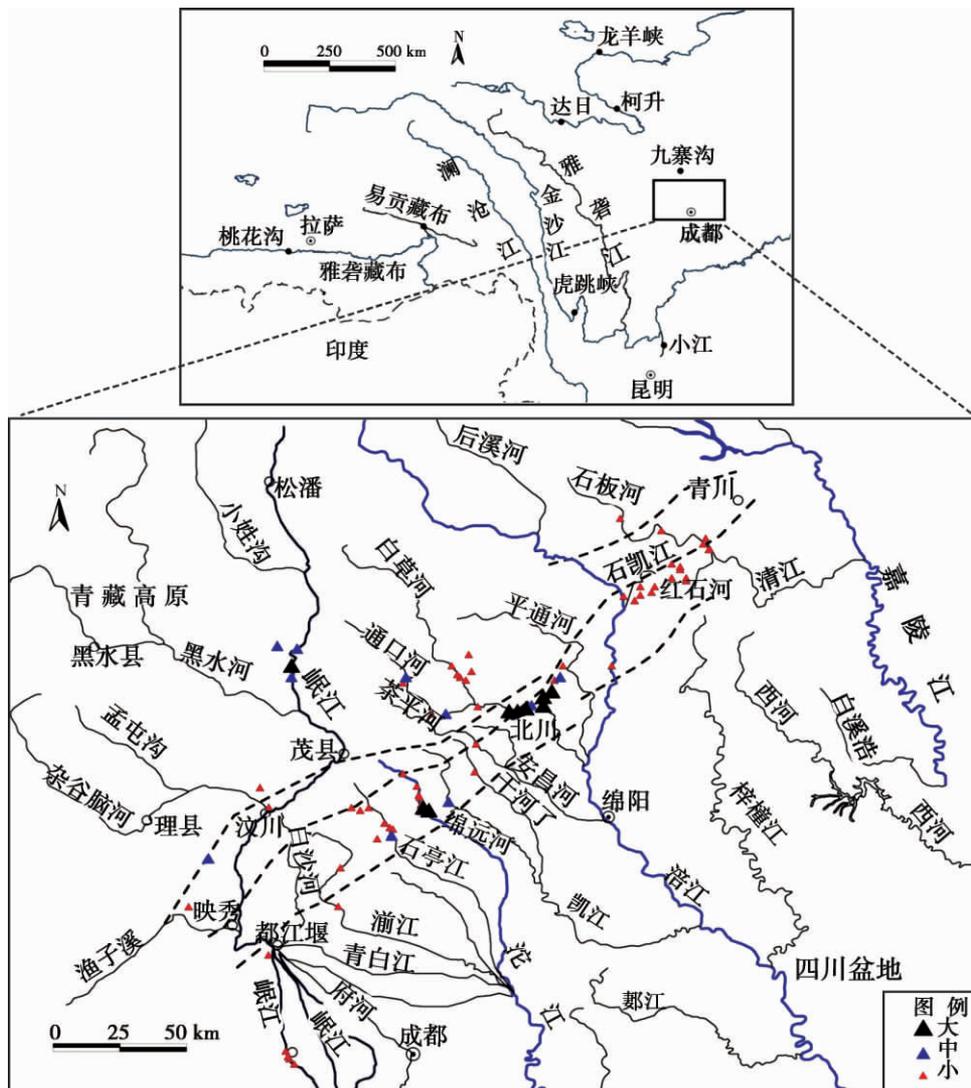


图 1 调查区域——龙门山断裂带附近及青藏高原的地震堰塞坝<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Studied area and landslide dams created by earthquakes around the Longmenshan fracture belt and on the Qinghai-Tibetan Plateau

$S_p$  定量描述阶梯-深潭的发育程度,并通过河床结构测量排对堰塞坝溢洪道河床的  $S_p$  进行测量,详见文献[12]的描述。

## 2 堰塞坝的稳定性分析

### 2.1 堰塞坝的保留程度与泄洪道阶梯-深潭系统的发育

堰塞坝大多在洪水漫坝后也不会完全被移除,仍会有少量粒径较大的物质最终停留在原来的河床附近,使得河床有一定程度的抬高;另一方面,即使保留的堰塞坝基本也不完整,在水流的长期作用下保留的坝高总小于初始形成的堰塞坝高,由此定义保留的堰塞坝高比  $R$  为

$$R = \frac{H_p}{H_0} \quad (1)$$

式中  $H_p$  指经过泄洪冲刷后保留的堰塞坝体高度;  $H_0$  为堰塞坝的初始高度。堰塞坝的保留坝高比若  $>0.9$ ,则认为堰塞坝被保留了下来,部分保留的堰塞坝其  $R=0.5 \sim 0.9$ ,而溃决的堰塞坝保留坝高比  $R$  则  $<0.5$ 。 $R$  值在堰塞坝形成的最初 1~2 a 里会出现减小趋势,而在经历一次特大洪水之后便会迅速自动调整稳定下来。

通常堰塞湖水位达到堰塞坝顶最低高度时,水流便从此冲刷松散物质形成泄洪道,堰塞坝的表面部分被水流冲刷带走,与此同时,泄洪道内形成漂石迭瓦及阶梯-深潭系统等抗侵蚀阻力结构,实验表明,阶梯-深潭系统一般性洪水难以撼动,其使得河床的阻力达到最大<sup>[13-14]</sup>。泄洪道内河床结构的发

育使得坝体下游向上的溯源侵蚀速度逐渐减慢,当阻力结构发育足以抵挡水流冲刷侵蚀时,坝体便达到了相对稳定,洪水时进行再次的调整。如此往复,泄洪道最终变成切穿堰塞坝的窄深河道,但由于河床结构充分发育,阶梯-深潭系统消耗了水流能量,使得坝体最终达到一定的稳定程度,堰塞坝得以部分保存。

对于较小的山区河流(洪峰流量  $<30 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 堰塞坝的保留坝高比  $R$  与堰塞坝泄洪道内阶梯-深潭发育程度  $S_p$  呈较好的相关性。2008—2009 年通过对汶川地震形成的 8 个堰塞坝进行现场调查测量,对  $S_p$  与  $R$  进行分析(图 2),发现  $R$  与  $S_p$  呈线性正相关。而当  $S_p > 0.45$  时  $R$  几乎等于 1,即堰塞坝完整保存。而  $S_p < 0.27$  时  $R > 0.5$ ,即堰塞坝发生溃决。

对于大河而言(洪峰流量  $>30 \text{ m}^3/\text{s}$  的河流),堰塞坝的稳定性不仅同泄洪道内阶梯-深潭的发育程度有关,还与洪峰时的水流能量有关。为方便比较,水流能量采用单宽水流能量  $p$  进行定量描述,其定义为

$$p = \gamma q s \quad (2)$$

式中  $\gamma$  为水的重度,  $q$  为单宽流量,  $s$  为河床坡降。

图 3 反映了在堰塞坝体稳定情况下,堰塞坝上通过的洪峰单宽水流能量  $p$  与堰塞坝泄洪道阶梯-深潭系统发育程度  $S_p$  之间的相互关系。其中,不仅对 2008 年汶川地震形成的堰塞坝进行了调查测量,还调查测量有青藏高原河流上形成的部分堰塞坝(包括保留和溃决的)。如易贡藏布的易贡堰塞湖形成于 2000-04,其库容约  $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,形成后 2 个

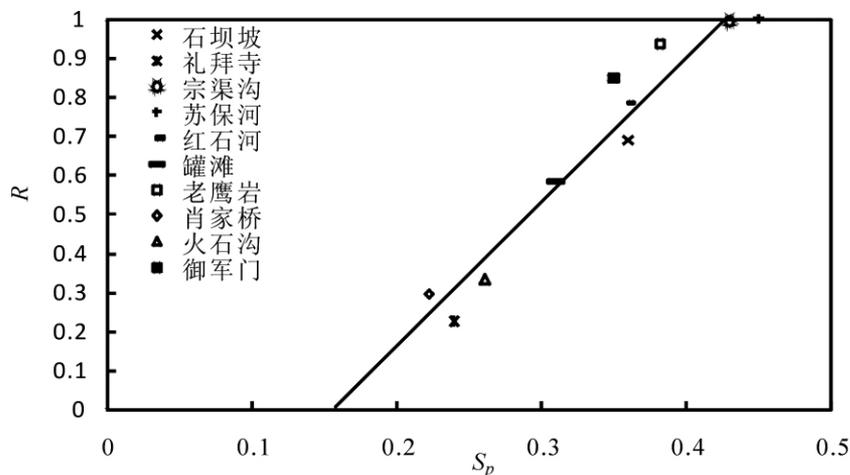


图 2 堰塞坝保留坝高比  $R$  与堰塞坝泄洪道阶梯-深潭发育程度  $S_p$  的关系图

Fig. 2 Preservation ratio of landslide dams,  $R$ , as a function of the development degree of step-pool system,  $S_p$ , for small streams

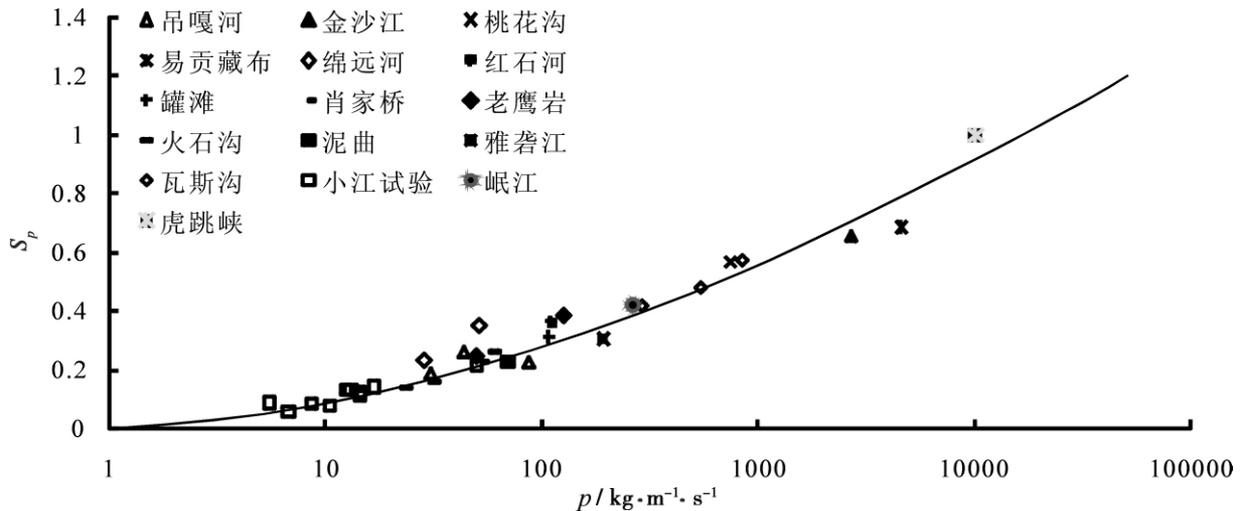


图3 堰塞坝泄洪道稳定的情况下阶梯-深潭的发育程度  $S_p$  与单宽水流量  $p$  的关系图

Fig. 3 Development degree of step-pool system as a function of unit stream power for stabilized channels on landslide dams

月多就溃决了,造成巨大的洪峰下泄。在雅鲁藏布江干流对桃花沟堰塞坝进行了调查测量,该堰塞坝几乎完全溃决。通过比较发现这2个堰塞坝的  $S_p$  比较高,而堰塞坝的保留坝高比却非常低,这主要由于其拥有极高的水流能量导致。

图3中的曲线反映了堰塞坝上洪峰单宽水流能量与河道阶梯-深潭系统消耗的水流能量之间的平衡状态,可以看出,随着单宽水流能量  $p$  的增加,河床结构强度  $S_p$  出现增加的趋势,且由于图3反映的是在堰塞坝体稳定情况下二者的相互关系,因此曲线代表了河道稳定所需的最小河床结构强度  $S_p$  与单宽水流能量  $p$  的关系,反映出河道稳定所需的最小河床结构强度  $S_p$  值随着  $p$  的增加而增大的规律。同时,通过测量这两个量即可对堰塞坝的稳定性做出判断,若点绘的  $p - S_p$  在图3平衡曲线的左侧,说明堰塞坝泄洪道阶梯-深潭系统发育程度较高,其消耗的水流能量大于洪峰的水流能量,则意味着堰塞坝能在小于该洪峰的水流下保持稳定。反之,若点绘的  $p - S_p$  值位于图3平衡曲线的右侧,则堰塞坝泄洪道发育的阶梯-深潭系统不足以消耗洪峰水流能量,洪水将进一步引起堰塞坝体冲刷下切,直至阶梯-深潭系统发育程度足以抵抗水流冲刷为止。

### 2.2 堰塞坝体物质颗粒级配对坝体稳定性的影响

堰塞坝体的稳定性及其保留的坝高比受到许多因素的影响,其中最重要的有堰塞坝体的颗粒粒径组成、大粒径颗粒所占堰塞体的比例以及河谷的几何形状<sup>[15]</sup>。堰塞坝溃决的风险直接与颗粒粒径组

成、坝宽及堰塞湖水位有关。由颗粒粒径较小的土体或砾石组成的堰塞坝,由于在洪水的冲刷过程中缺乏形成的阶梯-深潭系统的物质材料,因此不能抵抗水流冲刷,遇水流漫顶冲刷就会很快冲刷殆尽;若堰塞坝多由颗粒粒径巨大的漂石卵石组成,则可以发育较好的阶梯-深潭系统,形成较强的河床阻力,极大消耗水流能量,使堰塞坝得以保存;而堰塞坝多由细颗粒组成,也有较大的粗颗粒物质时,阶梯-深潭系统发育及坝体稳定所需的时间就将延长,在此过程中坝体发生溃决的风险也就相应的增大了。

图4对调查测量的堰塞坝的物质组成进行了颗粒级配分析,其中保留及部分保留的堰塞坝采用实线及实心点进行描绘,溃决的堰塞坝采用虚线及空心点进行表述。从图4可以看出,调查的堰塞坝中所有漂石 ( $D > 1\text{ m}$ ) 组成超过10%的堰塞湖被保留或部分保留(图中虚线的御军门由于实施人工排险而未被保留)。而组成粒径  $D > 0.1\text{ m}$  所占比例不到50%的堰塞坝全部溃决。由此可以看出颗粒粒径较大的物质组成的堰塞坝相对更容易保留,这是由于这部分粗粒径对阶梯-深潭系统的形成发挥重要作用,也对抵抗水流冲刷和消耗水流能量起主要作用。

## 3 堰塞坝的保留与拆除

堰塞湖的危险性主要在于其巨大的非正常蓄水量,可能发生溃坝洪水,对下游的居民生命财产安全

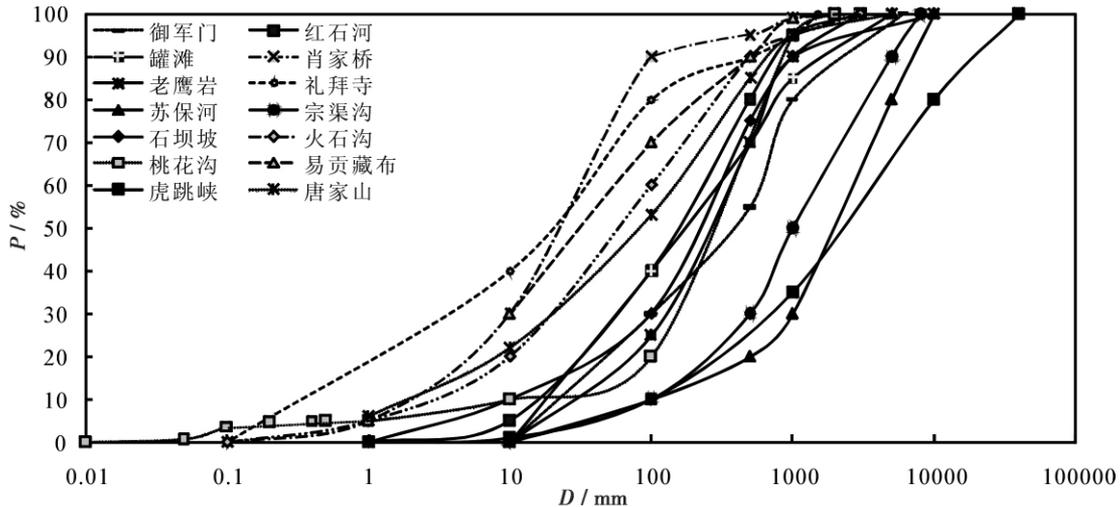


图4 调查堰塞坝组成物质的颗粒级配分布

Fig. 4 Size distributions of original landslide deposits

全造成巨大威胁。为消除溃坝洪水风险,一般对堰塞体进行人工开挖溢洪道,使堰塞湖所蓄水量安全下泄,堰塞坝蓄水位降至最低,由此消除堰塞坝下游的洪水风险。这种方案多用于堰塞湖下游人口密集的地区。如唐家山堰塞湖进行了工程排险<sup>[16]</sup>。

然而,从长远来看在山区下切河流上对堰塞坝进行人工拆除却不一定是最好的办法。滑坡的根本原因在于河床下切,河床下切增大了滑坡体的势能,当河床切穿滑坡体的滑动面时,滑坡体则失去了原本山脚处沉积泥沙等的支撑,一旦发生暴雨或地震即将导致滑坡发生。而河床若不再下切,不切穿滑坡体的滑动面,则滑坡也就不会发生。

青藏高原的不断抬升导致河谷深切,许多断层构造运动频繁发生(包括汶川地震的龙门山断裂带)在青藏高原东部边缘河床下切仍为河床演变的主要营力。在初始阶段河道的岸坡随着河床的持续下切而增大,出现一种临界状态,任何的河床进一步下切以及地震暴雨等外界的扰动都将导致岸坡失稳,发生山体滑坡,使得整个地区极易受到堰塞湖的影响。于是,堰塞湖及其治理对地貌演变发挥着重要作用。事实上,下切创造了滑坡的条件,无论滑坡是否发生,堰塞坝及其形成的堰塞湖使得河床下切速度减缓甚至使得河床停止了下切。

堰塞坝及形成的堰塞湖是自然系统的反馈,堰塞坝可能会在河流纵剖面上形成裂点,从而引起其上游河段的淤积抬升,这对河床地貌形态、河流纵剖面及河床下切起控制性作用,甚至能防止河流由于地区构造运动再次进行调整。这种山区坡面的自然

反馈十分普遍,贯穿整个青藏高原东部边缘地区,是该地区地貌过渡时期的主要特征<sup>[17]</sup>。

地震堰塞湖通常自形成起就开始淤积,最终泥沙将淤满,陡岸的高度及两岸坡度也将降低,河岸因此而更加稳定,即使有地震发生,岸坡也有可能仍然保持稳定。如正处于映秀-北川断裂带上的深溪沟(图5),其上有3个堰塞坝形成时间超过1 000 a(N1, N2, N3),堰塞湖已淤满,由于堰塞坝由大量漂石组成,阶梯-深潭系统十分发育,因此尽管堰塞湖已淤满,仍能稳定的被保留下来。其中堰塞坝N2以上30 m的断面水深只有0.5 m,河床抬高约200 m,极大的降低了滑坡的可能性。在“5.12”汶川地震过程中,由于构造运动使得深溪沟左侧(西北)抬高近4 m(如图5b所示)。图5b为深溪沟旁的一条公路由于地震发生倾斜破坏,而河谷却没有发生崩塌滑坡等山地灾害,依然山清水秀,与地震带附近其他流域相差迥异,映秀-北川断裂带附近30 km范围,几乎所有山体都由于地震引发的山体崩塌滑坡变成秃山,而深溪沟的稳定很大程度上归功于古堰塞湖的保存。

下切的河流如同地球表面的一道道伤痕,而滑坡堰塞坝及其形成的堰塞湖则正是伤痕自愈形成的结痂。滑坡堰塞坝控制了河床下切,降低了新一轮滑坡的风险,与此同时也提高了河流的生态功能,并创造了美丽的河流景观。因此,若溃坝的风险不高且对生命财产安全不会造成威胁的堰塞湖,应尽可能加强使其稳定保留。一项对232个滑坡形成堰塞湖的统计发现,仅有37%的堰塞湖溃决了<sup>[18]</sup>,如果

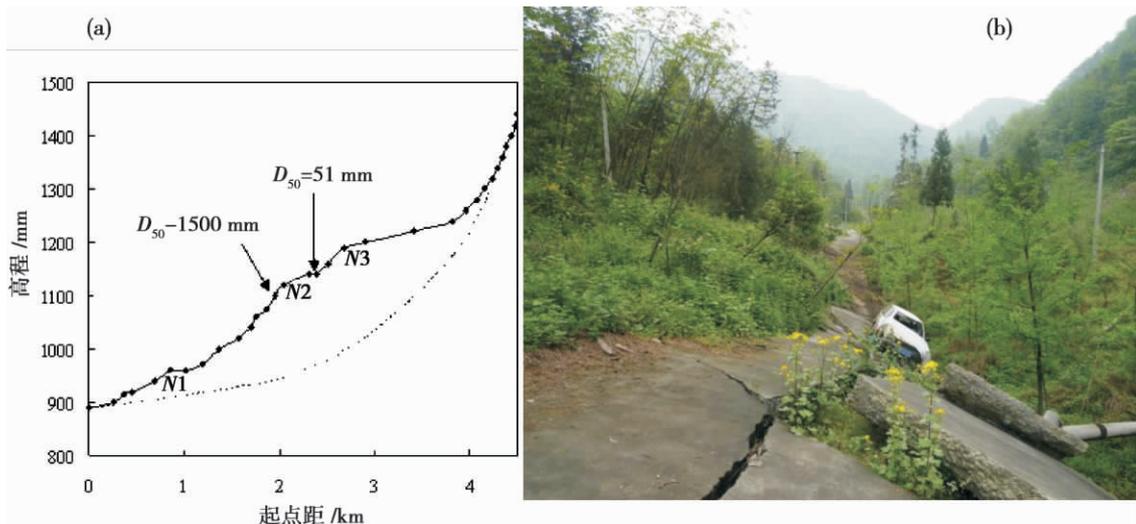


图5 (a) 深溪沟河床纵剖面(N1、N2、N3为3个已淤满的堰塞湖);(b) 汶川地震导致深溪沟旁公路倾斜破坏

Fig. 5 (a) Bed profiles of the Shenxi Ravine, showing three landslide dams and filled lakes;

(b) Tilted and broken highway along the Shenxi Ravine during the Wenchuan Earthquake

堰塞坝存在的时间超过 10 a,那么就可以将其划分为相对稳定安全的。

#### 4 河床演变及裂点的发育

青藏高原的抬升是塑造我国西南地区地貌的主要营力,最终的地貌演变将使得陆地抬升的速率与下切的速率大致相等。而实际上,这种情况很难发生,由于大量的崩塌滑坡在河道中形成堰塞坝,尤其是那些保留的或半保留的堰塞坝进而发育为河流纵剖面上的裂点,使河流纵剖面变得非常不规则(见图5a),其中裂点是重要的控制点,阻止了河流的进一步下切,使得下切减缓甚至停止,对河流地貌的演变起到了重要的影响。

堰塞坝在形成的初始阶段引起剧烈的河床演变,一方面,泥沙在堰塞湖库区大量淤积,对上游回水区的河道变化起作用;另一方面,堰塞湖水位抬高后通过坝顶最低点开始泄流,水流的不断冲刷作用使得泄流通道上发育阶梯-深潭系统,直至水流冲刷能力与河床抗冲刷能力达到平衡。这两方面往往同时进行,使得堰塞湖河道变化十分迅速。

图6反映了绵远河上的御军门堰塞坝在2008-05地震前到2009-06纵剖面的变化。御军门堰塞坝初始坝高47 m,后因修路需要对堰塞坝体顶部进行了人工拆除,挖掘近7 m,水流从此下泄,泄洪道内阶梯-深潭系统在第一场洪水中就开始发育,经过两个汛期的洪水冲刷已基本趋于稳定。如今御

军门堰塞坝已逐渐发育成绵远河纵剖面上的裂点,对其上下游河道持续发挥着影响作用。由于地震造成山体破碎、植被破坏,产沙量巨大,使得御军门上游来沙充足,堰塞湖淤积速度很快,其中,悬移质泥沙主要淤积在靠近堰塞坝的河段(约1700 m),2009年在距离坝体约800 m的上游断面经测淤积层厚度达0.28 m,淤积体的比重为1.3~1.4,主要由细粒粘土组成( $D < 0.1$  mm)。推移质主要在坝体上游回水末端淤积,形成沙洲,沙洲将逐渐向下游扩展,扩展速度越来越慢。淤积的推移质泥沙颗粒粒径较为均匀( $D_{50} = 50$  mm),且远小于泄洪道内的颗粒粒径。

河床裂点的形成抬高了侵蚀基准面,使上游河道下切侵蚀速度减缓,甚至停止下切或转为淤积抬升,使得河流由纵向演变向横向演变发展。如图7所示,黄河上游达日附近的裂点上游河段坡降明显减缓,泥沙淤积后下形成了宽阔的河谷,河床转为淤积抬升趋势,而宽阔平缓的河谷也为水流提供了自由流动的空间,使该河段演变成成为分汊河道,上游水流携带的大量泥沙在浅水河槽淤积,使得河槽变得更加不稳定。

对于特大地震可能同时引发大量山体滑坡,在同一条山区河流或河段形成多个堰塞坝,溃坝的可能性及坡面侵蚀将极大降低,使得流域产沙降低到几乎为零,这种情况下,堰塞湖将会长期保存并形成十分优美的自然景观,例如金沙江的虎跳峡、岷江的叠溪海子等风景区就可能是由于地震引发的连续堰

塞湖形成。不仅如此,连续的堰塞湖在河流纵剖面形成许多裂点,且侵蚀沙量的减少也使得河流变得更加稳定,连续的堰塞湖创造了多样性的生态环境栖息地及自然景观,也有利于河流生态的良性发展。有关研究通过大型无脊椎底栖动物对山区河流生态进行评价,结果表明九寨沟的多样性指数和丰度指数在 60 多个山区河流中是最高的<sup>[19]</sup>。

### 5 结论

堰塞坝如若溃坝风险不高应当尽可能予以保留,因为保留的堰塞坝对河床下切起主要的控制作

用,从而降低再次发生滑坡的可能性。若堰塞坝由漂石和大卵石组成,在坝体的溢洪道内将发育阶梯-深潭系统,最终保护坝体不再下切,由此将坝体溃决风险减小到最低程度。对于洪峰流量  $< 30 \text{ m}^3/\text{s}$  的河流,堰塞坝的保留比与阶梯-深潭系统发育程度  $S_p$  成线性相关,当洪峰流量  $> 30 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $< 30\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 时,河道稳定所需的最小河床结构强度  $S_p$  值随着单宽水能量  $p$  的增加而增大。而对于堰塞坝溢流泄洪道内阶梯-深潭系统不发育或发育程度较低的坝体,其河床结构强度  $S_p$  小于稳定最小河床结构强度,将会发生下切、溯源冲刷引起溃坝。保留的堰塞坝在泥沙淤积和水流的长期作用下会形成裂点,

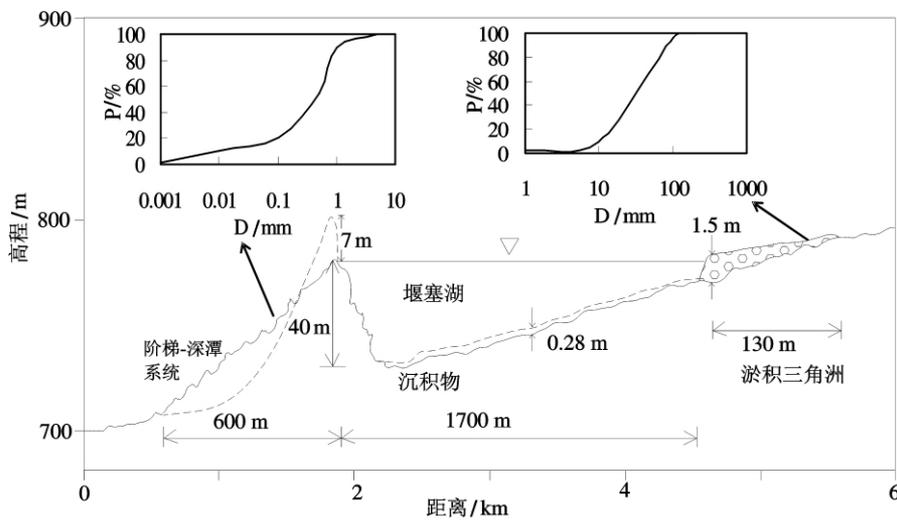


图 6 御军门堰塞坝纵剖面及其形成 1 a 的变化

Fig. 6 Bed profile of the Yujunmen landslide dam and quake lake measured one year after the formation of the dam

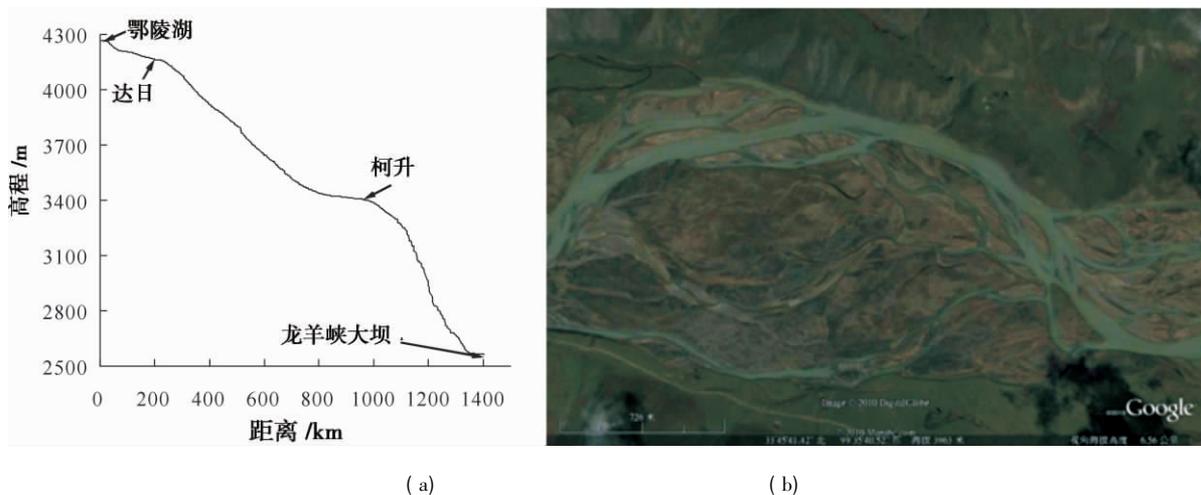


图 7 (a) 黄河上游河床纵剖面图(自鄂陵湖至龙羊峡);(b) 达日裂点上游的分汊河道  
Fig. 7 (a) Bed profile of the Yellow River from the source (the Eling Lake) to the Longyangxia Dam;  
(b) Satellite image of the branching channels upstream of the Dari knickpoint

大型裂点能改变河床演变和河流地貌。青藏高原的抬升引起几乎所有的河流河道下切,许多河流由于发育裂点部分控制了河床的进一步下切,裂点的上游河段则由于侵蚀基准面的抬高使得原本下切的河流变为淤积抬升的河流,河床由纵向演变转变为横向演变,裂点的上游会形成游荡的辫状河道。对于山区河流或河段如若同时发生大量的滑坡形成堰塞坝,溃坝的可能性及坡面侵蚀将极大降低,使得流域产沙降低到几乎为零,堰塞湖将长期保存并形成优美的自然景观,长期不被泥沙淤积填满的堰塞湖也创造了良好的河流水生生态环境。

### 参考文献 (References)

- [1] Nie Gaozhong, Gao Jianguo and Deng Yan. Preliminary study on earthquake induced dammed lake [J]. *Quaternary Science*, 2004, 24(3): 293-301 [聂高众, 高建国, 邓砚. 地震诱发的堰塞湖初步研究[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(3): 293-301]
- [2] Cui Peng, Wei Fangqiang, He Siming, et al. Mountain disasters induced by the earthquake of May 12 in Wenchuan and disasters mitigation [J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(3): 280-282 [崔鹏, 韦方强, 何思明, 等. 5.12汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. *山地学报*, 2008, 26(3): 280-282]
- [3] Zhou Kuiyi, Su Kezhong, Jia Zhenwen et al. Study on the secondary flood disasters caused by strong earthquakes since the 14th century in China [J]. *Journal of Natural Disasters*, 1992, 1(3): 83-91 [周魁一, 苏克忠, 贾振文, 等. 十四世纪以来我国地震次生水灾的研究[J]. *自然灾害学报*, 1992, 1(3): 83-91]
- [4] Cheng Zunlan, Cui Peng, Li Yong, et al. Major disasters and control measures of dammed lakes from landslide and debris flows [J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(6): 733-738 [程尊兰, 崔鹏, 李泳, 等. 滑坡、泥石流堰塞湖灾害主要的成灾特点与减灾对策[J]. *山地学报*, 2008, 26(6): 733-738]
- [5] Nicoletti P. G. and Parise M. Seven landslide dams of old seismic origin in southeastern Sicily (Italy) [J]. *Geomorphology*, 2002, 46: 203-222
- [6] Geertsema M. and Pojar J. J. Influence of landslides on biophysical diversity—A perspective from British Columbia [J]. *Geomorphology*, 2007, 89: 55-69
- [7] Wang Zhaoyin, Cui Peng, Wang Ruiyi. 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
- [8] Wenchuan Earthquake Area Atlas of Earthquake-Geological Hazards [M]. Beijing: China Map Publishing House, 2008: 70-71 [国家汶川地震专家委员会. 汶川地震灾区地震-地质灾害图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2008: 70-71]
- [9] Rosport M. Hydraulics of steep mountain streams [J]. *International Journal of Sediment Research*, 1997, 12(3): 99-108
- [9] Lee A J, Ferguson R I. Velocity and flow resistance in step-pool streams [J]. *Geomorphology*, 2002, 46: 49-71
- [10] Wilcox A, Nelson, J M, Wohl, E E. Flow resistance dynamics in step-pool channels 2: Partitioning between grain, spill, and woody debris resistance [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42, W05419, doi: 10.1029/2005WR004278.
- [11] Wang Zhaoyin, Melching C S, Duan Xuehua, et al. Ecological and hydraulic studies of Step-pool systems [J]. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 2009, 135(9): 705-717
- [12] Wang Zhaoyin, Xu Jiang, Li Changzhi. 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
- [13] Maxwell A. R. and Papanicolaou A. N. Step-pool morphology in high-gradient streams [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2001, 16(3): 380-390
- [14] Costa J. E. and Schuster R L. The formation and failure of natural dams [J]. *Geol Soc Amer Bull*, 1988, 100: 1054-1068
- [15] Chen Xiaoqing, Cui Peng, Zhao Wanyu, et al. A discussion of emergency treatment of dammed lake caused by "5.12" Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010, 28(3): 350-357 [陈晓清, 崔鹏, 赵万玉, 等. "5.12"汶川地震堰塞湖应急处置措施的讨论——以唐家山堰塞湖为例[J]. *山地学报*, 2010, 28(3): 350-357]
- [16] Ouimet 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 (Sichuan, China) [J]. *GSA Bulletin*, 2007, 119(11-12): 1462-1476
- [17] Korup O. Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams [J]. *Engineering Geology*, 2004, 73: 13-35
- [18] Duan Xuehua. Ecological impacts of water and sediment transportation of macroinvertebrate community in rivers [D]. Beijing: Department of Hydraulic Engineering in Tsinghua University, 2009 [段学花. 河流水沙对底栖动物的生态影响研究[D]. 北京: 清华大学水利水电工程系, 2009]

## Effect of Knickpoint Development in Controlling the Stability of the Landslide Dam

ZHANG Kang , WANG Zhaoyin , LIU Huaixiang , YU Guoan

(1. State Key Laboratory of Hydro-science and Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic engineering , Nanjing Hydraulic Research Institute , Nanjing 210029 , China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research , Chinese Academic Science , Beijing 100101 , China)

**Abstract:** This paper studies the stability of landslide dams and development of knickpoints by field investigations and experiments , and analyzing satellite images. The stability of landslide dams depends mainly on the development of step-pool system and stream power of the flood flow. The development degree of step-pool system is represented by a parameter  $S_p$  , which was measured with a specially designed instrument. A preservation ratio of landslide dams is defined as the ratio of preserved height after flood scouring to the original height of the dam. For streams with peak flood discharge lower than  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  , the preservation ratio is linearly proportional to  $S_p$  . For rivers with peak flood discharge higher than  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $30 - 30\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ) , the minimum  $S_p$  value for stable channel increases with the unit stream power  $p$  . For a landslide dam with poorly developed step-pool system ,  $S_p$  is smaller than the minimum value and the outburst flood incises the spillway channel and causes failure of the dam. For preserved landslide dams with sediment deposits in the quake lakes , a knickpoint may be developed if it is stabilized by long-term action of the flow. Large knickpoints can totally change the fluvial processes and river morphology. If hundreds of landslide dams occurred simultaneously on a reach of a mountain river , the potential energy of bank failure and the slope erosion are greatly reduced and sediment yield from the watershed may be reduced nearly to zero. The quake lakes may be preserved for long term and become beautiful landscapes. Streams with long term unfilled quake lakes have good aquatic ecology.

**Key words:** landslide dams; step-pool system; Knickpoint; river-bed incision; Wenchuan earthquake

---

### 消息 3: 《山地学报》网上审稿操作说明

专家审稿有两种方式: 邮件审稿和登录系统审稿。

邮件审稿是可以不用输入用户名和密码直接打开自己的邮箱 ,邮件里有 [打开稿件](#) [填写审稿意见](#) [登录系统](#) [忘记密码](#) [退审](#) 5 个相关连接 ,点击“填写审稿意见”就可以审稿了。

登陆 <http://www.sdx1983.com> 系统审稿 ,点击“待审稿件”就可以了   。如果专家因某种原因不能审 ,可以点击第二个图标“退审”。

( 然子桐)