

文章编号: 1001-8166(2010)09-0934-07

## 崩滑堰塞坝(湖)的地貌环境效应<sup>①</sup>

余国安<sup>1,2</sup>, 王兆印<sup>2</sup>, 黄河清<sup>1</sup>, 刘怀湘<sup>3</sup>

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2 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; 3 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:**崩滑堰塞坝(湖)具有显著的地貌环境效应,这种效应在时间尺度上分为短期和长期 2 种,主要表现在河流水文过程、地貌演变、环境生态、景观等方面。堰塞坝形成初期河流原有生境受到干扰,河流生态和景观出现退化。堰塞体溃决强烈改变下游水文过程及河流地貌,严重冲击河流生境和生态,并可能对下游基础设施和群众生命财产造成灾难性破坏。长期稳定维持的堰塞坝深刻影响河流地貌过程,并显著改善河流生境、生态,提升景观水平。堰塞坝(湖)是河床持续下切,岸坡失稳而自然反馈形成的裂点,能增加河流阻力,控制河床下切,如能长期维持是河流健康稳定的促进因素。

**关键词:**堰塞坝(湖);裂点;地貌过程;环境生态;效应

中图分类号: P642.2 X14 文献标志码: A

受暴雨、地震等外界营力诱发引起山体崩塌、滑坡或泥石流堵塞河道(谷)形成堰塞体,堰塞体壅水形成堰塞湖,将对河流(谷)的水文过程、地貌演变、环境生态和景观产生显著影响。这种影响在时间尺度上可分为短期和长期 2 种,短期影响主要指较短时间(几小时、几天或几个月)局部河段河流地貌的剧烈变化、水文过程波动及堰塞湖水质、泥质、景观的可能变化;还包括由于堰塞体溃决对下游基础设施和居民生命财产的巨大破坏以及对河道水生及滨河生态环境和景观的强烈冲击;而长期影响则是指长时间尺度上(几年至几十年甚至更长时间)堰塞体上下游河道河床地貌、环境、生态、景观的逐发性演替及变化。

对于崩滑堰塞坝(湖)的地貌环境效应,近年国外的研究较多涉及青藏高原及喜马拉雅山脉区域,分析其对河流泥沙淤积和侵蚀作用的持续影响<sup>[1~3]</sup>,崩塌滑坡及大型裂点对控制青藏高原河床下切的作用<sup>[4]</sup>;述评全球堰塞坝分布、稳定性及其

影响<sup>[5]</sup>;分析大规模滑坡和堰塞体对河流地貌和纵剖面形态的影响<sup>[6~9]</sup>。我国学者开展的研究也较多,如对汶川地震堰塞湖分布和风险评估<sup>[10]</sup>;堰塞湖综合管理策略<sup>[11]</sup>;典型滑坡崩塌事件发生机理及地质灾害效应<sup>[12,13]</sup>和滑坡堵江事件的环境生态效应<sup>[14~16]</sup>等。总体看,对滑坡堰塞坝(湖)开展的研究主要以野外调查、遥感解译为主,辅助室内试验和理论分析。本文对崩滑堰塞坝(湖)地貌环境效应的相关研究进行述评,主要涉及水文及地貌过程、环境生态和景观等方面。

### 1 对河流水文及地貌过程的影响

#### 1.1 对水文过程的影响

堰塞坝对河道水文过程的影响主要表现在两方面:初期壅水和坝体溃决冲击。堰塞坝形成初期壅堵上游来水,上游河道水位抬升,而下游河道来水减少甚至无来水。堰塞体蓄水一定程度后,堰塞湖来水和出流过程渐趋平衡,下游河道的水文条件逐渐

① 收稿日期: 2010-03-08 修回日期: 2010-06-01

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“次生灾害链生效应、潜在次生灾害判识及风险控制”(编号: 2008CB425803); 国家杰出青年基金项目“河流过程与流域管理的复杂性研究”(编号: 40788001)资助。

作者简介: 余国安(1978),男,安徽怀宁人,博士,助理研究员,主要从事河流综合管理研究, E-mail: yugan@gsnrr.ac.cn

接近自然状况。堰塞体对水文过程的影响持续时间一般不长。

新生堰塞坝有可能溃决,与堰塞体形成初期壅水及其次生影响相比,堰塞坝溃决对水文过程的影响更为短暂,但冲击更为严重,往往造成灾难性后果。堰塞体溃决时,洪水从决口处挟带大量沙石进入水流,如果决口处河床不能形成高强度阻力结构,决口将迅速扩大,堰塞体裂点迅速蚀降后退,在较短时间内即可能引起堰塞体完全解体。坝体突然溃决所形成的洪水将产生比原有水文记录高很多倍的瞬时洪峰过程,在短时间内能完全改变河道的自然水文过程,造成巨大破坏,如 1786 年四川康定—泸定堰塞湖和 1933 年叠溪海子堰塞湖溃决事件均造成极为严重的人员伤亡和财产损失。2000 年西藏易贡堰塞湖溃决时,最大流量达雅鲁藏布江年均流量的 28 倍,溃口下游易贡藏布两岸形成约 50 m 高的冲刷带,冲刷带森林植被被剥夷殆尽,沿线公路、桥梁等基础设施几乎全部被毁,洪水甚至波及雅鲁藏布江下游(布拉马普特拉河)的广大印度地区,灾害非常严重。

## 1.2 对河流地貌的短期影响

堰塞坝溃决除形成低频洪水外,在很多情况下还诱发崩塌、滑坡、泥石流等次生灾害,对河流输沙和地貌过程等产生显著影响。易贡湖溃决洪水即造成数百公里河谷发生不同程度坡脚失稳,诱发崩塌滑坡<sup>[12]</sup>。坝体溃决所引发的高强度输沙导致下游河道和洪泛区严重淤积,强烈影响河流地貌的中长期演变过程及其稳定性<sup>[17,18]</sup>。1993 年南美厄瓜多尔南部因暴雨引发山体滑坡,2 000 万 m<sup>3</sup> 土石沿山谷倾泄而下进入亚马孙河支流 Paute 河,并在 La Jasefina 附近形成堰塞坝,一个月后人工促进使其溃决。La Jasefina 坝的形成及溃决对 Paute 河水文过程和泥沙运动产生深刻影响<sup>[19]</sup>。该坝溃决 8 年后,坝体下游 9 km 河段河床形成砾卵石床面,床面高程比滑坡发生前仍高出 30 m 左右<sup>[20]</sup>。加拿大温哥华西北 90 km 处 Cayley 山附近的 Avalanche 和 Tubil 溪堰塞坝溃决形成了高速泥石流(大约 34 m/s),并携带大量冰块和漂石,造成下游河道严重淤积抬升<sup>[21]</sup>。

关于堰塞湖对河流地貌形态和过程的影响,国际减灾战略机构(The International Strategy of Disaster Reduction, ISDR)认为可能体现在以下 3 个方面<sup>[22]</sup>: ①湖泊相沉积、河流冲积和三角洲泥沙沉积引起河流坡度、地貌形态和坝上游河道地质过程变化;②堰塞坝破坏过程中坝体及湖相沉积物受水流

侵蚀冲刷形成高强度输沙,引起坝体下游河道淤积抬升,趋于游荡;③堰塞体壅水和溃决引起的水流快速泄降导致周边岸坡发生次生崩塌和滑坡。

事实上,堰塞体形成之初,大量泥沙堆积,抬高局部河谷谷底,增加谷底宽度,改变河谷形态,并可能促进河谷的侧向侵蚀<sup>[23]</sup>,而这种河谷地貌的突然变化可能会对人类活动带来负面影响。台湾桃岭滑坡(Tsao-ling Landslide)形成的堰塞体及其上游厚实的淤积层严重干扰清水溪(Chin-Sui-Chi)上规划水利工程的设计和施工<sup>[24]</sup>。1992 年哥斯达黎加一高达 100 m 的堰塞坝部分溃决,大量泥沙输往下游,造成堰塞体下游 700 m 处一水利工程泄水口和电站河床被淤高 10 m<sup>[25]</sup>;1963 年意大利 Vaiont 滑坡形成 2.5 亿 m<sup>3</sup> 堆积物,滑坡体实际上掩埋了该位置此前修建的大坝<sup>[26]</sup>。因此,对已经形成或有可能形成堰塞体的河谷,在设计和修建工程建筑物时其灾害影响充分考虑。

汶川地震在大约 44 万 km<sup>2</sup> 的范围内触发了 15 000 多处滑坡、崩塌和泥石流,地质灾害隐患点达 1 万余处<sup>[27]</sup>,而在整个地震核心区内则形成了 104 处滑坡堵江塑造的堰塞湖(截止 2008 年 8 月 22 日资料)<sup>[28]</sup>,影响巨大。以崇州市鸡冠乡为例,这里发生多处山体滑坡,造成六顶沟、火石沟等多处河段塌方,并诱发泥石流,堵塞河道形成堰塞湖。此外,震后持续的大雨使得堰塞湖水位迅速攀升,在人工排导促进下,堰塞体溃决。溃坝过程中,爆发了至少 2 次大规模的泥石流,使堰塞坝下游河道严重淤积,并伴随强烈的泥沙运动和河床演变。地震引发的大规模崩塌、滑坡将河道堵塞形成堰塞坝,这些堰塞坝在很大程度上改变了震区河流地貌与河床结构发育情况<sup>[29]</sup>。由于堰塞坝抬高了河床高程,使得坝体上游一段距离内坡降变缓,在河流纵剖面上表现为一个从缓坡急剧转折到陡坡的裂点,不少堰塞坝的泄洪道多形成一个上凸型的纵剖面(图 1)。当然,堰塞坝对于河流纵剖面的影响有时并不限于堰塞坝内与坝上游的堰塞湖段。对于细颗粒比重较大的坝体,坝内物质被冲刷后携带至下游沉积,大型堰塞坝在极端情况(如暴雨)下甚至会形成泥石流向下游输移物质。这些物质在下游的淤积相当程度上也延缓了河床下切作用,而且其影响范围比堰塞坝本身的尺度往往要大许多。

## 1.3 对河流地貌的长期影响

如果说堰塞体形成初期其对河流地貌的影响急变而短暂,那么稳定维持的堰塞湖对河流地貌的影

响则渐变而持续。从长期看, 由于堰塞坝(湖)的存在, 河床侵蚀基准抬升, 并常常在河床形成显著裂点, 河流阻力增大, 上游河床下切受到控制, 岸坡变缓, 趋于稳定, 这一点对喜马拉雅山及青藏高原边缘的众多河流如印度河、雅鲁藏布江、大渡河、岷江、金沙江等尤为突出<sup>[30]</sup>。滑坡体的空间聚集对河床局部侵蚀下切速率和宏观河流地貌过程也有显著影响, 在影响最为强烈的河段, 它能降低河床长期侵蚀速率达 50%, 使河道形态呈现凸起状外形<sup>[31]</sup>。堰塞坝的这种作用在遇到床面快速下切时更为显著。

岷江支流白沙河深溪沟正位于龙门山断裂带上, 汶川地震后可以看见公路两旁西北地块相对于东南地块上升了 3~4 m(图 2(a))。由于古代发生的几次大滑坡形成的堰塞湖稳定维持, 汶川地震没有引发新的滑坡和崩塌, 植被没有受到损伤, 仍郁郁葱葱。图 2(b)为深溪沟的纵剖面, 图中点子和实线根据 1:5 万地形图和实地测量校正做出, 虚线为推测 3 次滑坡之前的沟床纵剖面。上游 2 处堰塞坝已

经基本淤满, 下游较小的堰塞湖还有一些库容。堰塞坝和泥沙淤积抬高了此段河床, 使得滑坡势能大大减小, 即使处于汶川震区中心区域, 山体依然基本保持稳定<sup>[11]</sup>。堰塞湖稳定维持形成的裂点对于整条河流的稳定以及河流纵剖面的演变都是至关重要的。图 2(b)显示古代的堰塞湖在深溪沟上形成了裂点, 使得沟谷不再下切, 在地震作用下仍能维持岸坡稳定。

堰塞坝形成的裂点可能强烈影响河床演变和河流地貌<sup>[32]</sup>。金沙江虎跳峡左岸巨大的崩塌和滑坡阻塞金沙江, 拦挡了推移质泥沙, 形成平滑如镜的堰塞湖, 如图 3(a)所示。紧接虎跳峡堰塞湖的是已经发育良好的阶梯深潭河段, 巨大石块在洪水作用下排列成结构, 抵抗水流的冲刷, 消耗了水流能量, 水流势能急降 213 m(图 3(b))。虎跳峡已经成为金沙江最重要的裂点(图 3(c)), 假如这个裂点被破坏, 虎跳峡上游数百公里河段会急剧下切, 大量的崩塌和滑坡就会发生。

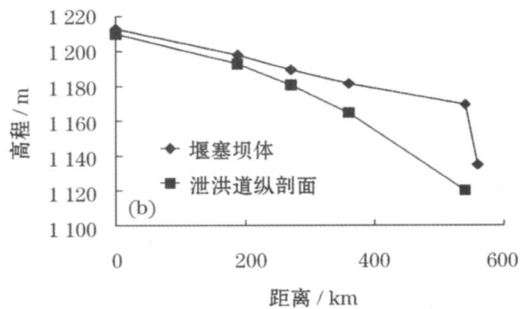
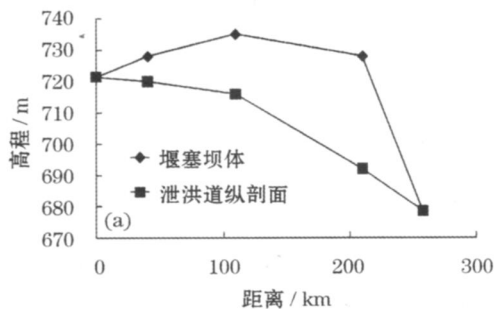


图 1 堰塞坝中的泄洪道纵剖面

Fig. 1 The longitudinal profile of spillway of dammed lake

(a) 罐滩; (b) 火石沟

(a) Guantan; (b) Huoshi Ravine

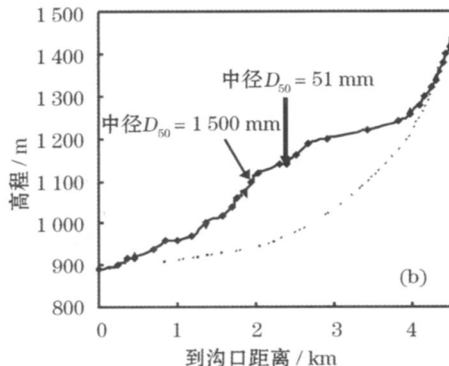


图 2 (a) 白沙河深溪沟公路两旁西北地块相对于东南地块上升了 3~4 m; (b) 深溪沟河床纵剖面

Fig. 2 (a) Tilted and broken highway along the Shenxi Ravine during the Wenchuan Earthquake; (b) Bed profiles of the Shenxi Ravine, showing three landslide dams and filled lakes

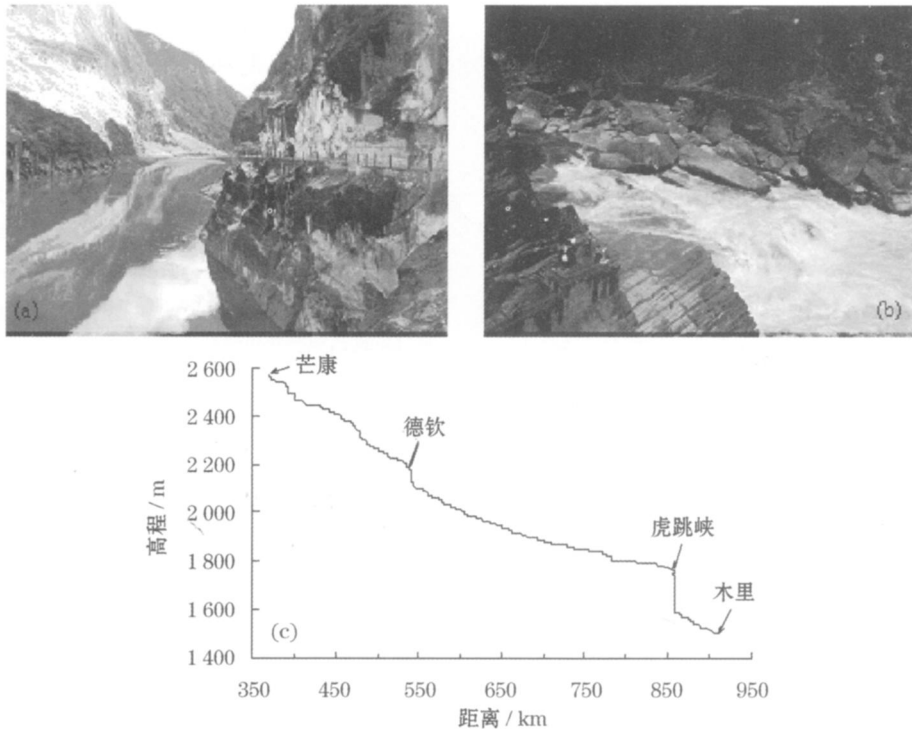


图 3 (a) 虎跳峡堰塞湖水面平滑如镜; (b) 虎跳峡发育良好的阶梯—深潭结构; (c) 金沙江纵剖面及虎跳峡堰塞坝形成的裂点  
 Fig 3 (a) Quake lake created by the Tiger-leaping Gorge landslide (b) Huge step-pool system on the Tiger-leaping Gorge landslide dam; (c) Longitudinal profile of the Jinsha River and the knickpoint formed of the Tiger-leap Gorge

## 2 环境生态效应

既往对滑坡及其形成的堰塞坝(湖)的研究较多关注其对环境生态的短期效应,即灾害链或环境效应链<sup>[16]</sup>。不可否认,在堰塞坝(湖)形成初期,由于崩塌滑坡体破坏了河谷原有的生物栖息地,对生态环境平衡会形成强烈扰动。另外,由于堰塞体阻断河道,其上下游水位、流量、流速、底质等生境条件与滑坡发生前相比发生很大变化。对于水生生物、植被等环境承载物而言,大多不能迅速适应这种生境条件的剧烈变化,物种数和多样性水平在堰塞坝形成初期会显著下降。

2009年3月对汶川震区未受地震及次生灾害影响的河段和崩塌滑坡泥石流形成的堰塞河段进行的水生底栖动物采样分析显示<sup>①</sup>,虽两河段底质和水流条件相似,底栖动物物种数却呈现很大差异,分别为16种和7种,且对生境要求苛刻的敏感物种(如毛翅目的原石蛾科,纹石蛾科,瘤石蛾科等)在堰塞河段均未发现。可见,在堰塞体形成初期,其上游(尤其是堰塞湖内)和下游的生态环境较滑坡发生前的自然河道会有一定程度的退化。

但如果堰塞湖能稳定维持,其生态环境将逐渐

向良性发展,并超越堰塞湖形成以前的生态环境水平。对加拿大不列颠哥伦比亚地区滑坡(及堰塞湖)的野外调查发现,滑坡改变了景观(这里“景观”的含义比通俗意义上的“景观”含义更加宽泛)的位置、土壤结构、植被构成以及相应的生境条件,从而影响生境多样性。这种影响从长期看是正面的,即增加了生境和生物多样性<sup>[33]</sup>。在树木茂密地区,滑坡形成的堰塞体堵塞河道,淹没上游的森林。被淹没的森林植被死亡后,将留下大量的树桩和断枝,为很多动物提供栖息地。死树桩对于找洞筑巢的鸟类尤其重要,可能会被某些猛禽用作栖木。在Inklin河上,堰塞坝能够通过暂时性的淹没使针叶树林凋亡而重新影响生态演替过程<sup>[34]</sup>。对土耳其东北地区Tortum堰塞湖形成前后环境生态状况的对比分析发现<sup>[35]</sup>,堰塞湖的形成改变了当地局部小气候,湖泊周边气候由大陆性气候变为半温和型气候。局部气候条件的变化提升了该地区蔬菜和水果产量,湖区还盛产鳟鱼、鲤鱼和胭脂鱼等珍贵鱼类。

长期来看,堰塞体和落入江中的石块改变了河

① 徐梦珍. 地震次生灾害链实例研究——以崇州市鸡冠乡火石沟为例(四川汶川震区考察报告), 2009.

流流速、底质和水深,形成多样性的栖息地,生态将趋于改善。对我国西南地区众多河流开展的野外调查发现,流速、水深、底质(河床物质)多样性的增加有助于提升生物多样性<sup>[36, 37]</sup>。目前,国内对堰塞湖生态环境效应的评价还缺乏持续且成系列监测成果的支持,汶川地震形成了一系列不同规模、不同几何形态的堰塞坝(湖),为开展此方面的监测工作提供了得天独厚的条件,可以选择典型的堰塞湖,对底栖和脊椎动物以及滨河植被的演替变化进行采样分析,通过多年系统监测综合评价堰塞湖对河流水生、滨河生境及生态的影响。

### 3 景观效应及水电资源利用

堰塞坝(湖)发育成裂点,如能够稳定维持,不仅稳定河势,改变河床纵剖面,还将塑造十分丰富、多样和异质的景观类型,因而具有十分突出的景观效应。景观生态学理论认为<sup>[38]</sup>,景观异质性是景观内各要素之间的差异性,景观异质性与干扰的生态效应存在密切关系,某种意义上看,它是不同时空尺度上干扰的结果。可以认为,崩塌滑坡及堰塞体壅水形成的堰塞湖等外界干扰在客观上促进、提升了局部区域的景观异质性。

国内外众多堰塞湖在稳定维持多年后均成为景色宜人的旅游景点。九寨沟即是由 118 个高山堰塞湖、17 个大型堰塞湖瀑布群及众多急流、跌水形成的串珠状大小不一的高山湖泊和瀑布构成,景色迥迥迷人;叠溪海子部分溃决后仍稳定遗留高几十米的天然“丁”字型石坝,构成独特的堰塞湖景观群。萨雷兹湖(Lake Sarez)悬于海拔 3 000 m 的山谷上,长 61 km<sup>[39]</sup>,蓄水量非常丰富,湖泊风光绮丽。新西兰最大的地震湖 W aikaremoana 湖 19 世纪末以来一直是旅游者,尤其徒步旅游爱好者向往的度假胜地。

由于滑坡形成的堰塞坝多是落差很大的裂点,构成显著的水头差,因此不少堰塞湖还具有开发水电资源的潜力。目前, W aikaremoana 湖、Tortum 湖以及我国藏东南的巴松措已进行水电资源开发。W aikaremoana 湖水开发早在 20 世纪 40 年代即开始实施,在新西兰水电开发进程中居重要地位; Tortum 湖年发电量达 10 亿 kW·h 巴松措目前从堰塞体处修建渠道引水至下游约 10 km 的电站发电,满足周边乡镇居民用电需求。

### 4 结 语

堰塞坝(湖)对河流水文过程、地貌演变、环境

生态和景观具有显著的影响效应。这种效应在时间尺度上分为短期和长期两种。堰塞体对水文过程的影响主要表现为初期壅水影响和坝体溃决冲击。堰塞坝形成初期河道局部河段淤积抬升,河谷局部几何形态发生变化;原有生境条件受到强烈扰动,河流生态环境和景观短期内出现退化。堰塞坝溃决可能对下游基础设施和人民生命财产造成巨大灾难,强烈影响下游河流地貌过程,并对河流生境和生态造成严重冲击。

长期稳定维持的堰塞坝(湖)深刻影响河流地貌过程,并在整体上显著改善河流生境、生态,提升景观水平。堰塞坝(湖)是河床持续下切、岸坡失稳而自然反馈形成的裂点,使河流阻力增大,河床下切得到控制,岸坡趋于稳定,因而长期维持的堰塞湖是河流健康稳定的促进因素。

### 参考文献 (References):

- [1] Hewitt K. Catastrophic landslides and their effects on the Upper Indus streams Karakorum Himalaya, northern Pakistan [J]. *Geomorphology*, 1998, 26: 47-80
- [2] Hewitt K. Disturbance regime landscapes Mountain drainage systems interrupted by large rock slides [J]. *Progress in Physical Geography*, 2006, 30(3): 365-393
- [3] Ouint 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
- [4] Konup O, Montgomery D R. Tibetan plateau river incision inhibited by glacial stabilization of the Tsangpo gorge [J]. *Nature*, 2008, 455(9): 786-790
- [5] Konup O. Recent research on landslide dams a literature review with special attention to New Zealand [J]. *Progress in Physical Geography*, 2002, 26(2): 206-235
- [6] Konup O. Geomorphic hazard assessment of landslide dams in south Westland, New Zealand. Fundamentals problems and approaches [J]. *Geomorphology*, 2005, 66: 167-188
- [7] Konup O. Geomorphic imprint of landslides on alpine river systems south west New Zealand [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(7): 783-800
- [8] Konup O. Rock-slope failure and the river long profile [J]. *Geology*, 2006, 34(1): 45-48
- [9] Konup O, Sturm A, Weidinger J. Fluvial response to large rock-slope failures: Examples from the Himalayas, the Tien Shan and the southern Alps in New Zealand [J]. *Geomorphology*, 2006, 78(1/2): 3-21
- [10] Cui Peng, Han Yongshun, Chen Xiaoping. Distribution and risk analysis of dammed lakes induced by Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2009, 41(3): 35-42 [崔鹏, 韩用顺, 陈晓清. 汶川地震堰

- 塞湖分布规律与风险评估 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(3): 35-42.]
- [11] Wang Zhaoyin, Cui Peng, Wang Ruiyu. 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.
- [12] Liu Wei. Study on the characteristics of huge scale, super high speed, long distance landslide chain in Yigong Tibet [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2002, 13(3): 9-18. [刘伟. 西藏易贡巨型超高速远程滑坡地质灾害链特征研析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13(3): 9-18.]
- [13] Huang Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(3): 433-454. [黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. [J] 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433-454.]
- [14] Chai Hejun. Landslide dams induced by Daxi earthquake in 1933 and its environmental effect [J]. *Journal of Geological Hazards and Environmental Preservation*, 1995, 6(1): 7-17. [柴贺军. 1933年叠溪地震滑坡堵江事件及其环境效应 [J]. 地质灾害与环境保护, 1995, 6(1): 7-17.]
- [15] Chai Hejun, Liu Hanchao, Zhang Zhuoyuan. New progress of the study of landslide damming and its environment effects [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2000, 19(2): 87-90. [柴贺军, 刘汉超, 张俤元. 大型崩滑堵江事件及其环境效应研究综述 [J]. 地质科技情报, 2000, 19(2): 87-90.]
- [16] Chai Hejun. Research on the environmental effects of large scale natural water body [J]. *Journal of Geological Hazards and Environmental Preservation*, 1998, 9(2): 7-12. [柴贺军. 大型天然水体的环境效应研究 [J]. 地质灾害与环境保护, 1998, 9(2): 7-12.]
- [17] Jordan P. Impacts of Mass Movement Events on Rivers in the Southern Coast Mountains British Columbia [C] // Environment Canada Water Research Branch Summary Report, 1987.
- [18] Bathurst J C, Ashiq M. Dam break flood impact on mountain stream bedload transport after 13 years [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23: 643-649.
- [19] Harden C P. Book review: The 1993 landslide dam at La Josefina in southern Ecuador. A review of Sin Plazo Para La Esperanza [J]. *Engineering Geology*, 2004, 74: 157-161.
- [20] Abril J B. Master Plan for The Fluvio-morphologic Stabilization of the Pauté River [C] // University of Birmingham School of Civil Engineering Lecture for Advanced Study Course on River Basin Modelling for Flood Risk Mitigation, 2002.
- [21] Cruden D M, Lu Z Y. The rockslide and debris flow from Mount Cayley, BC, in June 1984 [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29: 614-626.
- [22] Alford D, Schuster R. Usoi landslide Dam and Lake Sarez. An Assessment of Hazard and Risk in The Pamir Mountains Tajikistan [C] // ISDR Prevention Series No. 1 United Nations New York and Geneva, 2000.
- [23] Hashagen I, Paola C. Landscape instability in an experimental drainage basin [J]. *Geology*, 2000, 28(12): 1067-1070.
- [24] Chang S C, Tsao Ling. Landslide and Its Effect on A Reservoir Project [C] // Proceedings of 4th International Symposium on Landslides Toronto, 1984, 1: 469-473.
- [25] Mora S, Madrigal C, Estrada J, et al. The 1992 landslide dam, Costa Rica [J]. *Landslide News*, 1993, 7: 19-22.
- [26] Brimhead E N, Coppola L, Rendell H M. Field reconnaissance of valley blocking landslide remnants. The Cordevole and Piave catchments [J]. *Journal of the Geological Society of China*, 1996, 39: 373-389.
- [27] Yin Yueping. Researches on the geohazards triggered by Wenchuan earthquake Sichuan [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(4): 433-444. [殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究 [J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 433-444.]
- [28] Hu Xiewen, Huang Runqiu, Shi Yubing, et al. Analysis of blocking river mechanism of Tangjia Shan landslide and dam-breaking mode of its barrier dam [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(1): 181-189. [胡卸文, 黄润秋, 施裕兵, 等. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 181-189.]
- [29] Liu Huaixiang. Research on the Distribution of Streambed Structures and Their Influence on Fluvial Morphology [D]. Beijing Tsinghua University, 2009. [刘怀湘. 山区河流河床结构及分布对河床演变的影响 [D]. 北京: 清华大学水利水电工程系, 2009.]
- [30] Burbank D W, Leland J, Fielding E, et al. Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the northwestern Himalayas [J]. *Nature*, 1996, 379: 505-510.
- [31] Safan E B, Peden D, Harrity K, et al. Impact of Landslide Dams on River Profile Evolution [C] // American Geophysical Union Fall Meeting, 2008.
- [32] Wang Z Y, Yu G A, Gary B, et al. Stream networks and knick-points in the Sanjiangyuan region [C] // Gary B, Li X L, Chen G, eds. Landscape and Environment Science and Management in the Sanjiangyuan Region. Xining: Qinghai People's Publishing House, 2010: 27-41.
- [33] Geertsema M, Pojar J J. Influence of landslides on biophysical diversity: a perspective from British Columbia [J]. *Geomorphology*, 2007, 89: 55-69.
- [34] Geertsema M. Flowslides in Waterlain Muds of Northwestern British Columbia, Canada [C] // Proceedings of the 8th Congress of the International Association of Engineering Geology and the Environment, 1998, III: 1913-1921.
- [35] Dumant Y. The largest landslide dam in Turkey: Tortum landslide [J]. *Engineering Geology*, 2009, 104: 66-79.
- [36] Wang Zhaoyin, Cheng Dongsheng, He Yiping, et al. A study of the ecological functions of step-pool system in southwest Mountain streams [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(4): 409-416. [王兆印, 程东升, 何易平, 等. 西南山区河流阶梯—潭瀑系列的生态学研究 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(4): 409-416.]
- [37] Wang Zhaoyin, Melching C S, Duan Xuqiu, et al. Ecological

and hydraulic studies of step pool systems [ J ]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 135( 9): 705-717

- [ 38 ] Liu Maosong, Zhang Mingjuan. Landscape Ecology—Principle and Method [ M ]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. [ 刘茂松, 张明娟. 景观生态学——原理与方法 [ M ]. 北京: 化学工业出版社, 2004. ]

学工业出版社, 2004. ]

- [ 39 ] Schuster R L, Alford D. U.S. landslide dam and lake safety in the Pamir mountains, Tajikistan [ J ]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2004, 10( 2): 151-168

## Geomorphology and Environment Effects of Landslide Dams ( Dammed Lakes )

YU Guoan<sup>1, 2</sup>, WANG Zhaoyin<sup>2</sup>, HUANG Heqing<sup>1</sup>, LU Huaixiang<sup>3</sup>

( 1 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3 Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China )

**Abstract** Landslide dams ( dammed lakes ) possess distinct geomorphologic and environmental effects, which can be grouped to short-term and long-term on time scale, and mainly embody on hydrologic process, fluvial morphology, environment and ecology, and landscape. During the initial stage of landslide dams, the aquatic ecology and landscape often undergo some kinds of degradation since the pre-existing habitats were violently disturbed or even destroyed. Burst of landslide dams intensively change the hydrological process and fluvial morphology within a short time, and have strong negative impacts, even devastation, on downstream aquatic habitats, ecology and landscape. The landslide dams ( dammed lakes ) may be preserved for long term, and they will develop into knickpoints by long-term action of the flow, and act as a primary control of river bed incision, thus, reducing the potential of new landslide. Landslide dams ( dammed lakes ) which stably maintain in long-term scale greatly affect the fluvial morphology. Large knickpoints can totally change the fluvial processes and river morphology. Uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau has caused extensive channel bed incision along almost all rivers. Form any rivers ( such as the upstream Yangtze ) the incision has been partly controlled by knickpoints. Upstream reaches of a knickpoint have a new and unchanging base level. If hundreds of landslide dams occurred simultaneously on a reach of a mountain river, the potential energy of bank failure and the slope erosion would be greatly reduced and sediment yield from the watershed might be reduced significantly. The long-term maintained dammed lakes can greatly enhance stream habitats, aquatic ecology, surrounding landscape, and sometimes cause a change in local micro-climate. Many dammed lakes have become favorable touring destination, and have potentiality for hydropower generation. Landslide dams ( dammed lakes ) are knickpoints formed by natural feedback to continually incision of stream bed and instability of bank slope, and they can increase flow resistance and control stream bed incision, and is a promotional factor to river stability and health.

**Key words** Landslide dams ( dammed lakes ); Knick points; Fluvial processes; Environment and ecology Effects