

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0074

黎佳,王运生,陈明,等.甘肃文县天池地质成因及环境效应分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(3):94-101,109. LI J, WANG Y S, CHEN M, et al. Analysis of the formation mechanism and environmental effects of Tianchi Lake in Wenxian, Gansu Province[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 94-101, 109. (in Chinese)

甘肃文县天池地质成因及环境效应分析

黎佳,王运生,陈明,梁瑞锋

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,成都 610059)

摘要:碳酸盐岩地区永久型堰塞湖地质成因鲜有研究,在少雨区域这类堰塞湖的环境效应也缺乏系统分析,其地质成因机制具有理论与现实意义,但目前其成因机理并不十分清楚。通过野外详细调查和 C_{14} 测年,对文县天池的形成原因和环境效应进行较深入研究,得出如下结论:天池是(6450±73)年前,强震触发下天池沟右、左岸同时发生相向高位高速远程滑坡堵塞天池沟形成的,滑坡堆积体的“反粒度堆积结构特征”使堰塞坝物质粒径结构具有“下部小上部大”和“中间小两边大”的特征,致使天池能够长期稳定存在,成为天然的水库,形成独特的小气候,进而塑造丰富、多样和异质的景观类型。天池的长期存在,加快了堰塞坝下游的侵蚀下切速率,使湖区内的下切受到控制,对湖区上游的沟谷下切速率影响较小。地貌上形成鲜明的对比。

关键词:文县天池;滑坡;成因分析;环境效应

中图分类号: P642.5; P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0094-08

Analysis of the formation mechanism and environmental effects of Tianchi Lake in Wenxian, Gansu Province

LI Jia, WANG Yunsheng, CHEN Ming, LIANG Ruifeng

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The geological formation mechanism of permanent barrier lakes in carbonate areas is rarely studied. Systematic analysis is also lacking on the environmental effects of such barrier lakes in arid areas. Their geological formation mechanism has theoretical and practical significance, but the mechanism is not very clear yet. Using detailed field surveys and C_{14} dating method, we conducted an in depth study on the formation mechanism and environmental effects of Tianchi Barrier Lake in Wenxian County. The results showed that Tianchi Lake was formed when a strong earthquake struck the Tianchi region (6450 ± 73) years ago, causing two high landslides in the right bank and left bank of Tianchi valley at the same time, blocking the Tianchi valley. The "inverse grading structure feature" of the landslide deposit causes the particle size structure of the landslide dam material to show the features of "smaller below and larger above" and "smaller in the middle and larger on the sides". This is the reason why the Tianchi Barrier Lake can stand long, becoming a natural reservoir, forming a unique microclimate, and generating a very rich, varied, and heterogeneous landscape type. The long existence of Tianchi Barrier Lake accelerated the erosion rate down the landslide dam, controlled the undercutting in the lake area, and had little effect on the undercut rate of the valley in the upper reaches of the lake, forming clearly contrasting landforms.

Key words: Tianchi Barrier Lake; landslide; cause analysis; environmental effects

收稿日期: 2018-01-08 修回日期: 2018-02-28 网络出版时间: 2018-03-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180320.1130.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1501000); 国家创新研究群体科学基金(41521002); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主课题基金(SKLG2015Z001)

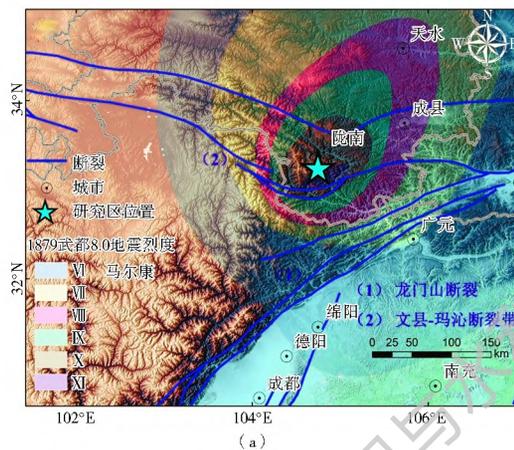
Funds: National Key Research and Development Program of China (2017YFC1501000); Funds for Creative Research Groups of China (41521002); Independent Fund of State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (SKLG2015Z001)

作者简介: 黎佳(1992-), 男, 四川眉山人, 主要从事工程地质及区域构造稳定性研究。E-mail: 1045893401@qq.com

通讯作者: 王运生(1960-), 男, 四川成都人, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质及区域构造稳定性研究。E-mail: wangys60@163.com

强震作用下高位斜坡失稳(滑坡)形成堰塞湖在复杂山区是十分常见的^[14],有一些堰塞坝可以稳定存在数百年、数千年,甚至数万年^[5],对周围环境产生深刻的环境效应。许多学者对滑坡的形成机制及地质灾害效应^[6-10]和滑坡堰塞湖的环境效应^[11-13]进行研究,提出了典型的斜坡(滑坡)变形破坏的地质力学模式,分析了堰塞坝存续期间对所在区域的地貌及地质环境演化的影响。

文县天池,又名洋汤天池,位于甘肃省陇南市文县天池乡境内(图 1(a)),为我国四大天池之一。由于研究区强震活动较为频繁,致使深切峡谷区高位山体滑坡^[14],天池沟谷被堵截,于是在海拔 2 400 余 m 的天魏山上,便汇成了状如葫芦的一湖碧水,古称“天魏湫”。文县旧志载,“文县天池,碧波万顷,如揩新绿,微风鼓浪,势若海潮,岩树倒影,隐如龙跃”。



本文对文县天池堰塞坝两岸斜坡变形破坏模式分析,旨在阐明文县天池形成以及长期稳定存在的原因,并对其在水文、地貌和景观方面的环境效应进行初步探讨。

1 地质环境背景

1.1 地貌

文县天池地理坐标: 104° 44' 40" E, 33° 15' 00" N, 属于中高山地和河川谷地地貌类型,具有地形起伏大,山高谷深的特点(图 1(b))。天池区内海拔 1 300~ 3 650 m,春冬季节山顶有积雪。山脊主要为高陡的单薄山脊,自然坡度在 20°~ 50°。山脊线主要呈南-北向延伸。区内天池沟近南-北向,沟谷的强烈下蚀作用为天池区内滑坡的形成提供了有利的地形条件。

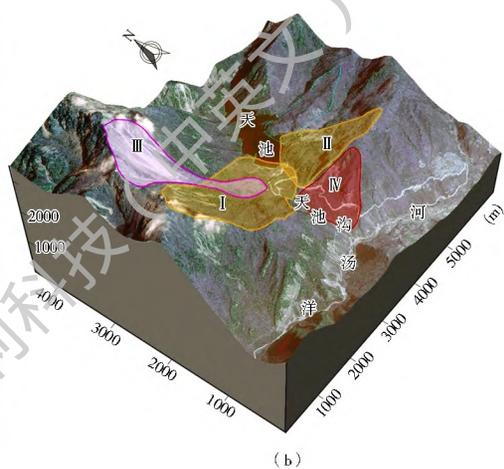


图 1 天池位置及地貌图

Fig. 1 Location and landform map of Tianchi Lake

1.2 地层岩性

天池区内地层由老到新为泥盆系中统三河口组 6 段($D_2^1 s_6$)和 7 段($D_2^1 s_7$)、石炭系(C)、二叠系下统(P_1^{24})。滑坡区出露地层为三河口组 7 段($D_2^1 s_7$)灰色薄-厚层状灰岩夹灰黑色含碳千枚岩和钙质千枚岩,弱风化,节理发育,天池沟左右岸地层产状分别为 $332^\circ \angle 46^\circ$ 和 $328^\circ \angle 41^\circ$ (图 2)。天池区内基岩主要发育三组节理。节理 J_1 : 产状 $34^\circ \angle 57^\circ$, 节理面平直光滑,延伸较好,间距 2 条/m; 节理 J_2 : 产状 $108^\circ \angle 54^\circ$, 节理面平直光滑,延伸一般,2 条/m; 节理 J_3 : 产状 $214^\circ \angle 31^\circ$, 节理面平直光滑,延伸较好,3 条/m。

1.3 地质构造

文县天池大地构造位置处于印度、扬子、华北板块汇聚形成的倒三角形构造区域的北部^[15],秦岭造山带与松潘-甘孜造山带相结合部位。区内大地构造以特有的“文县弧形”构造为主。天池位于文县弧

形构造弧顶偏东翼的冷堡子-吕家坝背斜的西北侧,天池区内褶皱总体为倾向 NW 的单斜岩层,倾角一般为 20°~ 60°。天池距离堡子坝-椿树坪-梨坪断裂(F1) 16 km,距高楼山-吕家坝-冷堡子断裂(F2) 22 km(图 2(a))。F1 和 F2 均为全新世活动的挤压逆冲断裂兼具右旋走滑特征,新活动性强,且为 1879 年武都南 8 级地震的主要发震断裂^[16]。天池区内发育两条次级断裂(图 2),一条南-北向的断层从天池西侧山体穿过,另一条东-西向的断层从天池北东侧山体穿过。据《中国地震动参数区划图》(GB 18306-2015),天池乡峰值加速度 0.30 g,反应谱特征周期 0.40 s。综上所述,天池区地处地震强烈活动区,受断裂的影响较大。

2 斜坡变形破坏

天池区内发育 4 处主要的滑坡(图 2),其中 \tilde{N} 和 \tilde{O} 号滑坡系强震触发滑坡,是堵塞天池沟形成天

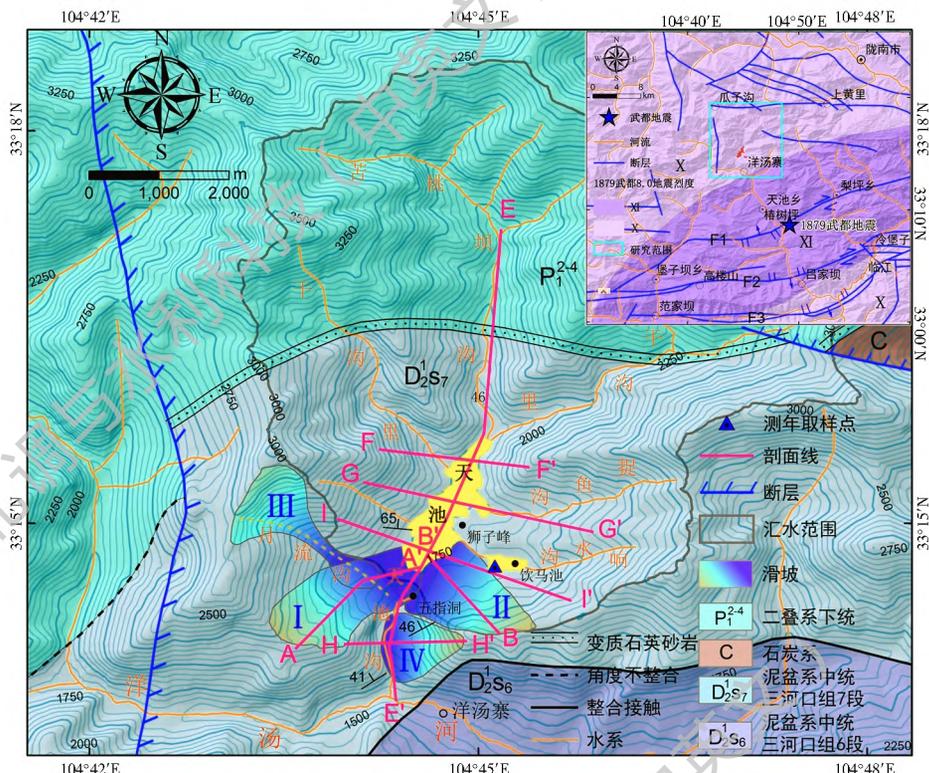


图 2 天池地质图

Fig.2 Geological map of Tianchi Lake

池的重要滑坡，0 和 0 号滑坡并未对天池造成太大的影响。

2.1 N 号滑坡

N 号滑坡形态呈长条状，主滑方向为 N40°E，后转向为 S80°E。前缘高程 1 741 m，后缘高程 2 180 m，滑坡体平均宽度约 680 m，最大宽度约 800 m，纵长约 1 830 m (图 2)，体积约 3 846 万 m³，是典型的高位高速远程滑坡^[17]。

N 号滑坡 A-A' 剖面见图 3，滑坡堆积体主要为灰岩的块碎石，前缘有大的孤石，具有一定的“反粒

序堆积结构特征^[18-20]。粒径较小的碎屑物质主要分布于堆积物的中下部，而大块石主要分布在堆积物的表面和前端。如图 3(a) 所示，滑坡堆积体的中部位置的坡体结构具有明显的分层，上层为胶结密实块石层，主要为 8~10 cm 的块石，块石含量在 70%~80%，为钙质胶结；下层为胶结密实碎石层，主要为 1~5 cm 的碎石，碎石含量在 60%~70%，为钙质胶结。如图 3(b) 所示，此为滑坡前缘的孤石区，主要为直径 0.5~2 m 的孤石，其中最大为 3 m × 2 m × 2 m。

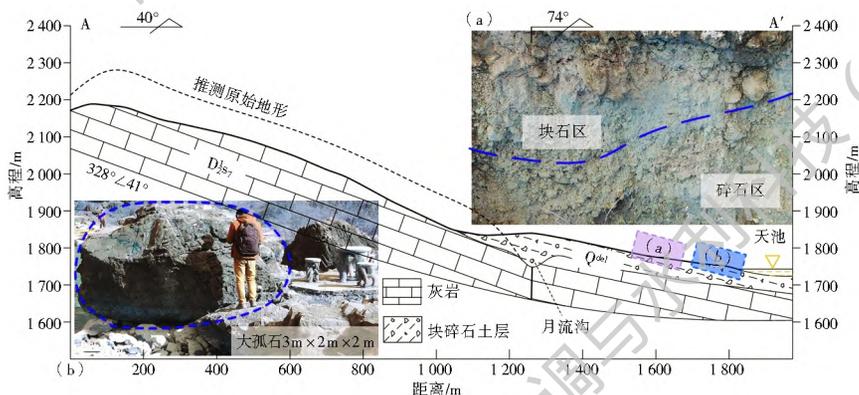


图 3 N 号滑坡 A-A' 剖面

Fig.3 Geological section A-A' of Landslide I

滑源区岩层总体产状 328°∠41°。滑源区 E 侧受天池沟切割呈陡坡，NE 侧有月流沟 (图 2)。滑源区斜坡岩体内发育两组分别与倾向和走向近于平行

的陡倾长大结构面，其产状分别为 J₂: 108°∠54° 和 J₁: 34°∠57°。上述两组结构面与 E 侧和 NE 侧临空面相互组合将滑源区斜坡岩体切割成块状。在地震

强大的动力作用下,这些弱面上产生拉应力并且反复的震动会导致结构面产生累进性位移,致使层面的强度不断地被克服和削弱,并最终越过峰值,迅速降低到残余值。块状岩体首先沿后缘 NW 向陡倾结构面拉裂,并不断的加深,形成陡峻的后缘拉裂边界,以山体内侧 NE 向陡倾结构作为侧裂面,以岩层中钙质千枚岩的软弱夹层作为底滑面,在 3 个边界趋于交会的瞬间坡体的摩阻力降到最低,坡体最终高速溃滑下来。整体沿 $N40^{\circ}E$ 运动,冲覆月流沟,遇到山体阻挡,碰撞碎裂解体转向 $S80^{\circ}E$,形成高速碎屑流,最后在天池沟形成堆积。其地质力学模式为地震触发的拉裂-溃滑模式。

2.2 0 号滑坡

0 号滑坡形态呈不规则扇形状,主滑方向为 $N38^{\circ}W$ 。前缘高程 1 741 m,后缘高程 2 130 m,滑

坡体平均宽度约 960 m,最大宽度约 1 180 m,长约 1 310 m(图 2),体积约 $4\ 948\text{万 m}^3$,是典型的高位高速远程滑坡。

0 号滑坡 B-B' 剖面见图 4,滑坡堆积体主要为灰岩的块碎石,前缘有大的孤石,具有一定的“反粒序堆积结构特征”。粒径较小的碎屑物质主要分布于堆积物的中下部,而大块石主要分布在堆积物的表面和前端。如图 4(a)所示,滑坡堆积体的中前部主要为 2~5 cm 的碎石,含量在 65%~70%;块石含量为 25%~30%,其中直径为 0.3~0.5 m 的大块石含量约为 10%,为钙质胶结,胶结密实。如图 4(b)所示,此为滑坡前缘,主要为 10~30 cm 的块石,含量在 55%~60%,其中夹有大孤石,较大的有 $0.6\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.2\text{ m}$,主要分布在上部;碎石的含量为 25%~30%;为钙质胶结,胶结密实。

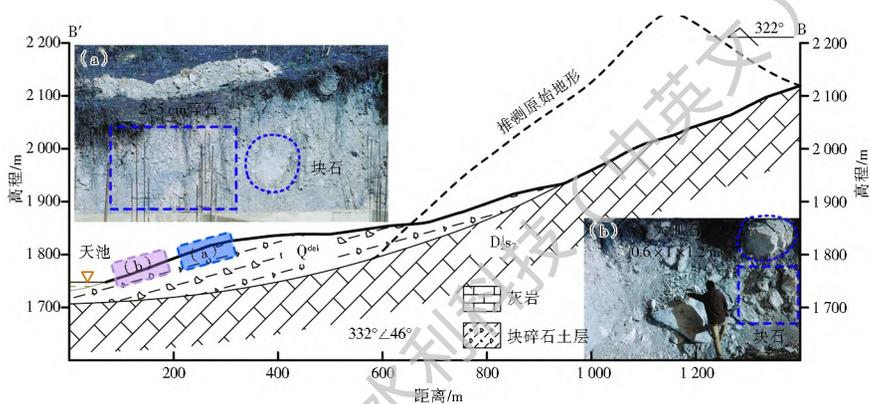


图 4 0 号滑坡 B-B' 剖面

Fig. 4 Geological section B-B' of Landslide II

沟谷下切,产生临空条件,受到薄-中层灰岩层面 $332^{\circ}/46^{\circ}$ 的控制,在重力作用下沿着钙质千枚岩层面发生蠕滑,由于前缘自然坡度小于岩层的倾角,发生弯曲变形,成为锁固段。节理 J_3 : 产状 $214^{\circ}/31^{\circ}$ 以及沟谷临空面为滑坡的滑动提供边界条件。在地震触发下,弯曲部分节理裂隙贯通,滑体沿

$N32^{\circ}W$ 滑动,运移过程中碎裂解体,最终在天池沟形成堆积。其地质力学模式为地震触发的滑移-弯曲模式。在 0 号滑坡的下部基岩中,发现明显的弯曲变形现象(图 5(d)),与其地质力学模式得到相互印证。0 号滑坡的形成演化过程可分为如下三个步骤(图 5)。

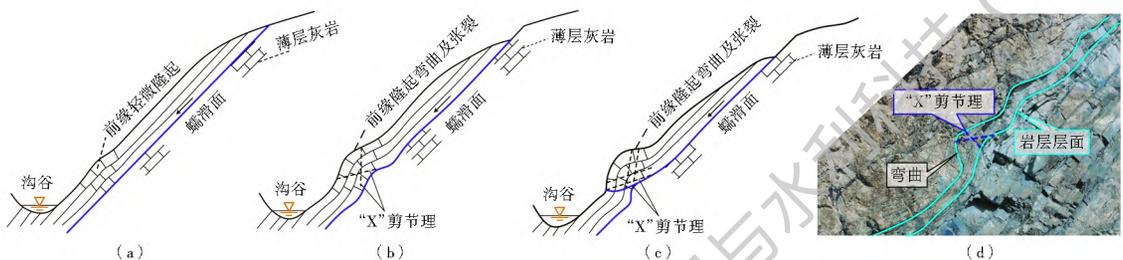


图 5 0 号滑坡变形破坏过程示意图

Fig. 5 Schematic profiles for the formation process of Landslide 0

(1) 单薄的山脊,在沟谷快速下切过程中,岩层倾角较大的薄层状灰岩在自重应力场的作用下沿钙质千枚岩(软弱面)层面蠕滑,在坡体前缘极易产生弯曲变形,坡顶产生拉张裂隙(图 5(a))。

(2) 随着沟谷继续下切,弯曲程度显著增强,并在层面中出现型错动,弯曲段成为“锁固段”,发育“X”剪节理,其中一组节理逐渐发展为滑移剪切面。由于累进性滑移的存在,地面持续隆起,岩体松动加

剧局部出现崩落或滑落现象(图5(b))。

(3)在地震作用下,力学性质较差的岩层层面,其抗剪强度进一步削弱,成为坡体的滑动结构控制面,“锁固段”的弯曲程度进一步增强,岩体节理裂隙密集发育,并逐步贯通,滑体沿着贯通的滑移面发生滑动(图5(c))。

2.3 0号滑坡

天池地处地震强烈活动区,在多期地震震裂效应作用下,山体结构遭受严重破坏,尤其是单薄的山梁在地震波的高程放大效应和地形放大效应^[21-22]作用下结构变得破碎,从而形成碎屑流。0号滑坡表面有较为新鲜的碎屑,表明0号滑坡仍在发生持续变形破坏。从滑坡堆积的范围(图6)来看,0号滑坡并未影响到天池,也未对堰塞坝产生影响。

为0.40 km,水域面积0.82 km²,最大水深97 m,平均水深29.3 m^[14],天池库容为24.17×10⁶ m³。天池的汇水面积为37.8 km²(图2),湖面海拔1741 m,是由N号滑坡和0号滑坡共同堵塞天池沟形成的滑坡堰塞湖。

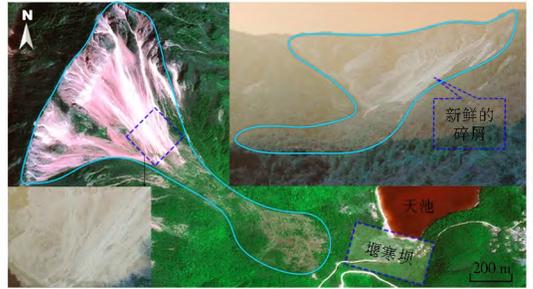


图6 0号滑坡全景图

Fig. 6 Bird view of Landslide 0

3 天池地质成因

文县天池(图1(b))有九道大湾,形状呈葫芦状。天池长度2.07 km,最宽处0.65 km,平均宽度

堰塞坝长320 m,宽450 m。坝顶较平坦(图8(a)),顶宽度90~110 m,相对水面高度24 m。坝体临池一侧坡度约10°,背池一侧坡度约15°~20°(图7)。

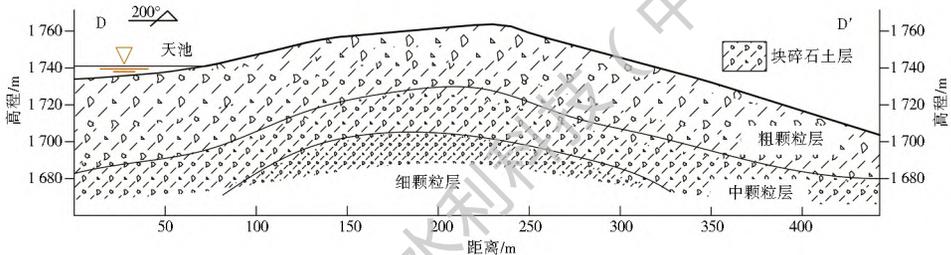


图7 堰塞坝D-D'剖面图

Fig. 7 Geological section D-D' of landslide dam

堰塞坝由N号滑坡和0号滑坡的堆积体组成,物质成分为钙质胶结密实的灰岩碎块石(图8(c))。其中碎石含量在55%~60%,粒径主要为1~5 cm(图8(g)),块石含量在25%~30%,粒径主要为10~30 cm。由于N号滑坡和0号滑坡都属于高位高速远程滑坡,其堆积体都具有一定的“反粒序堆积结构特征”。粒径较小的碎屑物质主要分布于堆积物的中下部,而大块石主要分布在堆积物的表面和前端。因而整个堰塞坝的物质组成的粒径从下到上具有“由小到大”的特点(图8),从迎水面到背水面物质组成的粒径呈“中间小两边大”特点(图7)。整个堰塞坝形成一个天然的堆石坝(图8(b))。1879年甘肃武都南8级地震,天池区的地震烈度至少达Ⅴ级^[16,23](图2(a)),但是天池堰塞坝仍然完好,表明堰塞坝的结构稳定。这也是天池能够在地震强烈活动地区长期存在重要原因。

由于堰塞坝物质粒结结构具有“下部小上部大”和“中间小两边大”的特征,使得整个坝体的渗透性

较差,可以起到较好的隔水作用,利于天池蓄水。在N号滑坡和0号滑坡堆积重叠区,由于处于两个滑坡的前缘,因而组成物质含较多的大块石(图8(e)),块石之间的空隙成为水流的渗流通道,在重叠区形成“五指洞”(图8(d))。五指洞是天池的重要排水通道,根据现场实测,五指洞的流量为0.5 m³/s,得出年地表径流量为15.76×10⁶ m³。据中国气象局数据中心,文县地面累年值年值数据集(1981-2010年)累计平均年降雨量440 mm,天池的汇水面积为37.85 km²,得出天池的年降雨补给量为166.54×10⁶ m³。累年平均年蒸发量2122 mm,天池水域面积为82.48万m²,湖水年蒸发量为17.50×10⁶ m³。年降雨量补给量远大于年地表径流量与湖水年蒸发量之和,也远大于库容量24.17×10⁶ m³。但据访问与池岸淹没痕迹显示,库水位变幅仅2~3 m,表明天池的补给量和径流量处于动态平衡状态,因而天池的蓄水量可以控制在一个相对稳定的值,不会因蓄水溢坝而产生溃坝,利于天池长期稳定存在。

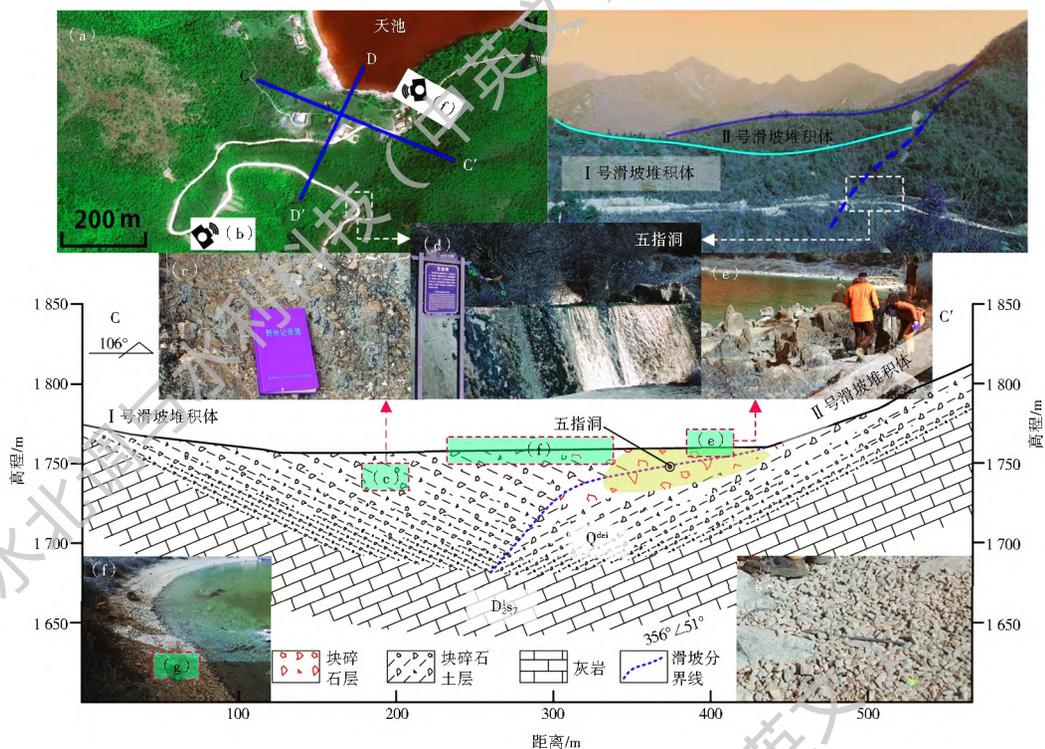


图 8 堰塞坝 G-C' 剖面图

Fig. 8 Geological section G-C' of landslide dam

除此之外,天池池水属贫营养类型,无任何污染。入湖径流有响水沟、捉鱼沟、苦桃坝沟等 6 条,其中响水沟和捉鱼沟为常年性流水,余为季节性流水。入湖径流沟道中物源较少,因而不会对天池造成泥沙淤积。天池池底全系大小不等的碎石块(图 8(f)),不见松软泥质沉积。这也是天池长期稳定存在的另一个重要原因。

0 号滑坡堵塞响水沟,形成饮马池。取饮马池底最下层的淤泥(取样位置如图 2 三角形所示),在成都理工大学环境科学与工程研究所进行 C_{14} 测年,测得其年龄为 (6450 ± 73) 年,可以大致代表 0 号滑坡形成时代,即天池的形成时代。

4 环境效应

天池对天池沟水文过程、地貌演变和景观具有显著的影响效应。天池深刻影响沟谷的地貌过程,并在整体上显著改善天池区内环境、生态,提升景观水平。天池堰塞坝是天池沟持续下切、岸坡失稳而自然反馈形成的裂点,使水流阻力增大,池区下切得到控制,岸坡趋于稳定。

4.1 水文影响

天池形成初期,堰塞坝壅堵上游来水,上游沟谷水位抬升,而下游沟谷来水减少甚至无来水。天池蓄水一定程度后,天池来水和出流过程渐趋平衡,堰塞坝下游沟谷的水文条件逐渐接近自然状况。由于天池蓄水作用,天池成为天然的水库,库容量 $24.17 \times$

10^6 m^3 , 蕴含丰富的水资源。

4.2 地貌效应

通过横剖面 F-F' (图 9(a)) 和 H-H' (图 9(c)),发现天池堰塞坝下游的沟谷(忽略 0 号滑坡的影响)为窄而深的“V”型谷,与天池上游沟谷特征一致。天池沟谷左岸发育 0 号和 0 号滑坡,使得左岸坡度相对平缓,坡度在 $7^\circ \sim 20^\circ$ 之间,右岸自然坡度在 $30^\circ \sim 50^\circ$,通过横剖面 G-G' (图 9(b)) 和 F'F' (图 9(d)),发现天池区内横断面表现为沟谷左侧平缓右侧陡立“U”型谷特征。对比横剖面 F-F'、H-H' 和 G-G'、F'F',天池堰塞坝下游和天池湖区上游呈“V”字形的典型山区河谷特征,天池湖区呈“U”字形典型的平原或盆地河谷特征。天池堰塞坝下游和天池湖区上游在谷底的宽度从正常沟谷的数十米增大到天池湖区的数百米,可见天池对沟谷横断面的影响还是十分显著。

天池对沟谷纵断面的影响也十分显著(图 9(e))。天池沟谷的纵比降在 113% 左右。天池堰塞坝下游的纵比降为 217%,明显提高了河谷比降,加快河谷侵蚀下切速率。天池湖区为水平段,使得沟谷侵蚀基准抬升,在堰塞坝处形成显著裂点,流水阻力增大,湖区内河沟谷下切受到控制,岸坡变缓,趋于稳定。天池湖区上游沟谷的纵比降为 140%,比天池沟谷的比降增大了 27%,表明天池湖区上游沟谷仍然在继续下切,受到天池的影响不大。

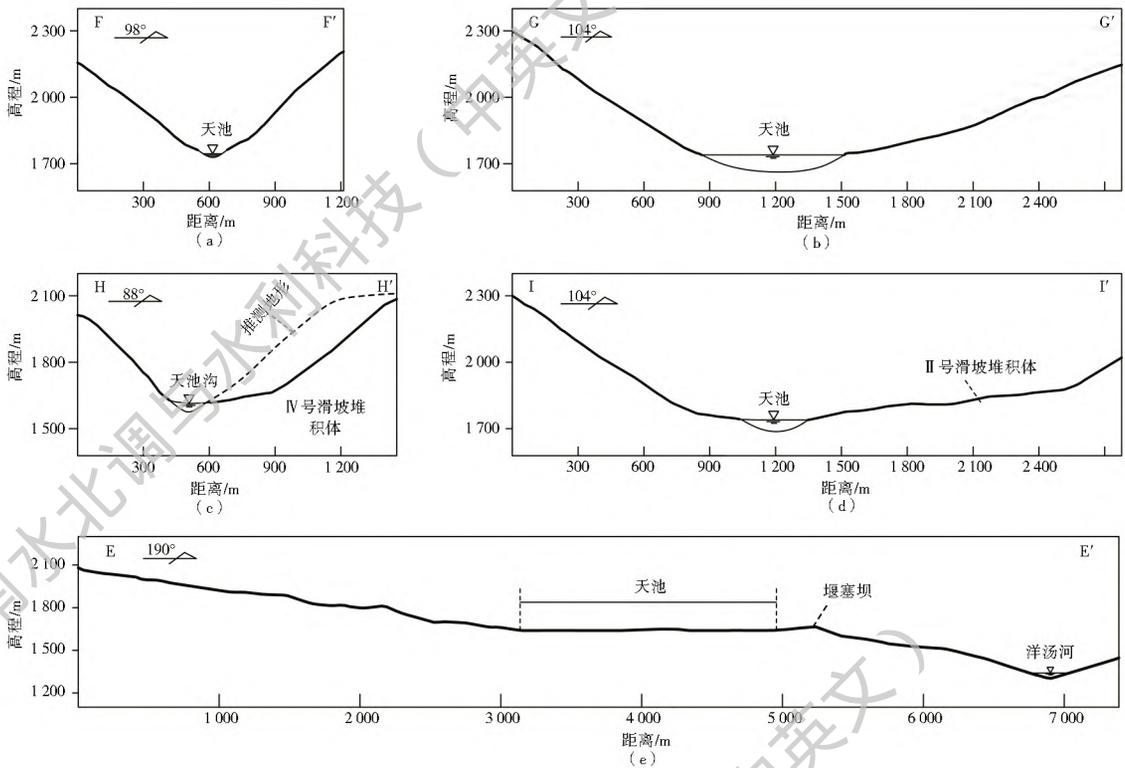


图 9 天池区内典型剖面(图中所示剖面的位置见图 2)

Fig. 9 Typical section of Tianchi (The position of the section is shown in Fig. 2)

综上所述,天池的存在,加快了堰塞坝下游的侵蚀下切速率,湖区内的下切受到控制,对湖区上游的沟谷下切速率影响不大。

4.3 景观效应

天池风光旖旎(图 10(a)),四季景色各异。湖畔多奇峰怪石、茂林修竹,在池水中留下倒影,湖光映衬、山光水色、相得益彰,形成众多的天池景色,如象嘴石、仙女石、狮子峰、捉鱼沟、饮马池、五指洞等景点。

天池乡境内属于半干旱地区,植被稀疏(图 10(b)),但天池区内形成独特的小气候,使得区内天然植被发育良好^[14](图 10(a)、10(c)),且具有显著的垂直分带特征。海拔 1 000~1 600 m 为常绿阔叶和落叶、阔叶混交林带,以华山松、油松、铁松、栓皮栋、麻栋、锐齿栋和柞栋等松栎林类型为主;海拔 1 600~2 300 m 为落叶阔叶林带,有枫杨、漆、黄连木、华山松、油松、三尖杉及铁坚杉等;海拔 2 300~2 900 m 为针叶阔叶混交林带,除生长桦椴、山杨等几种阔叶树外,还有云杉、青吊杉、华山松、柏铁杉等;海拔 2 900~3 300 m 为针叶林带,常以冷杉、云杉组成纯林或混生有红桦、松柏和红杉等;海拔 3 300 m 以上为冷杉、杜鹃、高山柳、棉柳、箭竹等高山灌丛或高山草甸。

天池塑造十分丰富、多样和异质的景观类型,因而具有较为突出的景观效应。是我国四大天池之

一,被列为国家级森林公园、省级地质公园。

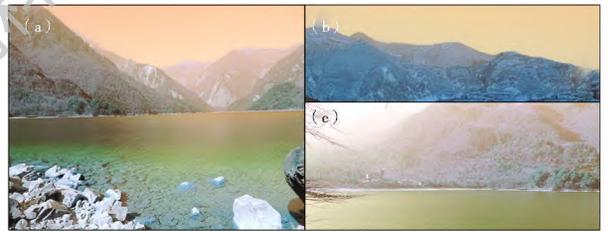


图 10 天池及附近景观

Fig. 10 Landscape of Tianchi and its adjacent area

5 结论

通过对文县天池边坡变形的机制进行分析,探讨文县天池的形成以及长期稳定存在的原因,并对其在水文、地貌和景观方面的环境效应进行分析,可以得出如下结论。

(1) 天池形成于(6 450 ± 73)年前,主要由两个同时发生的高速远程滑坡堵塞造成的。这个两个滑坡发生在天池沟的两侧,其破坏模型分别为:拉裂溃滑型(N号滑坡)和滑移弯曲型(O号滑坡)。滑坡堆积体具有“反粒序堆积结构特征”,这使堰塞坝物质粒径结构具有“下部小上部大”和“中间小两边大”的分布特征;这是天池能够长期稳定存在的重要原因,其次天池的补给量和径流量处于动态平衡状态,也利于天池长期稳定存在。

(2) 天池塑造十分丰富、多样和异质的景观类型,成为天然的水库,蕴含丰富的水资源。天池的存在,加快了堰塞坝下游的侵蚀下切速率,使湖区内的下切受到控制,对湖区上游的沟谷下切影响较小。某些地质灾害对环境的影响具有两面性,滑坡失稳堰塞时过程中对环境会造成暂时的破坏,但在长期的演化中,逐步趋于良好,最终形成优美的景观。

参考文献(References):

- [1] 王兰生,王小群,许向宁,等. 岷江叠溪古堰塞湖的研究意义[J]. 第四纪研究, 2012, 32(5): 998-1010. (WANG L S, WANG X Q, XU X N, et al. Significances of studying the Diexi paleo-dammed lake at the upstream of Minjiang River, Sichuan, China [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(5): 998-1010. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-7410.2012.05.16.
- [2] 许强,陈伟,金辉,等. 大渡河流域河谷深厚覆盖层特征与发育分布规律研究[J]. 第四纪研究, 2010, 30(1): 30-36. (XU Q, CHEN W, JIN H, et al. Characteristics and distribution of thick overburdens along the Dadu River valley[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(1): 30-36. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-7410.2010.01.02.
- [3] 李乾坤,徐则民,张天明. 永胜金沙江寨子村古滑坡和古堰塞湖的发现[J]. 山地学报, 2011(6): 729-737. (LI Q K, XU Z M, ZHANG J M. The ancient landslide and dammed lake found in the Jinsha River near Zhaizicun, Yongsheng, Yunnan, China [J]. Journal of Mountain Science, 2011(6): 729-737. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2011.06.013.
- [4] 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(3): 293-301. (NIE G Z, GAO J G, DENH Y. Preliminary study on earthquake induced dammed lake[J]. Quaternary Sciences, 2004(3): 293-301. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1007-7410.2004.03.008.
- [5] 柴贺军,刘汉超,张倬元. 中国滑坡堵江事件目录[J]. 地质灾害与环境, 1995(4): 1-9. (CHAI H J, LIU H C, ZHANG Z Y. The catalog of Chinese landslide dam events[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1995(4): 1-9. (in Chinese))
- [6] 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(3): 433-454. (HUANG R Q. Large scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(3): 433-454. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.03.001.
- [7] 许强,董秀军. 汶川地震大型滑坡成因模式[J]. 地球科学, 2011, 36(6): 1134-1142. (XU Q, DONG X J. Genetic types of large scale landslides induced by Wenchuan Earthquake[J]. Earth Science, 2011, 36(6): 1134-1142. (in Chinese)) DOI: 10.3799/dqkx.2011.119.
- [8] 黄润秋. 汶川 8.0 级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1239-1249. (HUANG R Q. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics & Engineering, 2009, 28(6): 1239-1249. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2009.06.021.
- [9] 王运生,唐兴君,石豫川,等. 西南某水电站中倾顺层滑坡稳定性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2006(5): 23-25. (WANG Y S, TANG X J, SHI Y C, et al. Analysis on the medium dip bedding slide stability in a hydropower station of the southwest of China[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006(5): 23-25. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2006.05.008.
- [10] 陈超,任光明,吴龙科,等. 西南某水电站库区古滑坡堵江成因及变形破坏机理研究[J]. 长江科学院院报, 2016(6): 94-98. (CHEN C, RENG G M, WU L K, et al. Formation of blocking river and deformation failure mechanism of ancient landslide in a hydroelectric power station reservoir area in southwest of China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016(6): 94-98. (in Chinese)) DOI: 10.11988/j.issn.1023-6460.20150306.
- [11] 柴贺军,刘汉超,张倬元. 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(2): 87-90. (CHAI H J, LIU H C, ZHANG Z Y. New progress of the study of landslide damming and its environment effects[J]. Geological Science and Technology Information, 2000(2): 87-90. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7849.2000.02.021.
- [12] 余国安,王兆印,黄河清,等. 崩滑堰塞坝(湖)的地貌环境效应[J]. 地球科学进展, 2010(9): 934-940. (YU G A, WANG Z Y, HUANG H Q, et al. Geomorphology and environment effects of landslide dams (dammed lakes) [J]. Advances in Earth Science, 2010(9): 934-940. (in Chinese))
- [13] 徐则民,刘文连,黄润秋. 滑坡堵江的地貌效应[J]. 第四纪研究, 2013(3): 490-500. (XU Z M, LIU W L, HUANG R Q. Geomorphological effects of landslide damming[J]. Quaternary Sciences, 2013(3): 490-500. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-7410.2013.03.09.
- [14] 姜加虎,窦鸿身. 文县天池环境调查[J]. 海洋湖沼通报, 1997(1): 13-17. (JIANG J H, DOU H S. Investigation of water environment of Tianchi Lake in Wenxian county[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1997(1): 13-17. (in Chinese))
- [15] 李建忠,刘洪波,张亿其,等. 甘肃省文县阳山金矿带控矿构造特征及找矿方向[J]. 四川地质学报, 2008(1): 13-17. (LI J Z, LIU H B, ZHANG Y Q, et al. Ore control structures and range of reconnaissance for the Yangshan Au ore zone in Wenxian, Gansu[J]. Acta Geologica Sichuan, 2008(1): 13-17. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-0995.2008.01.003.
- [16] 袁道阳,雷中生,杨青云,等. 1879年甘肃武都南 8 级地震的震灾特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014(5): 611-621. (YU AN D Y, LEI Z S, YANG Q Y, et al. Seismic disaster features of the 1879 southern Wudu M8 earthquake in Gansu Province[J]. Journal of Lanzhou University, 2014(5): 611-621. (in Chinese)) DOI: 10.13885/j.issn.0455-2059.2014.05.006.

(下转第 109 页)

- of the construction of water landscape on urban river ecology health[J]. *Water Power*, 2014, 40(4): 48. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2014.04.002.
- [16] 陆志强, 李吉鹏, 章耕耘, 等. 基于可变模糊评价模型的东山湾生态系统健康评价[J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 4907-4919. (LU Z Q, LI J P, ZHANG G Y, et al. Ecosystem health assessment based on variable fuzzy evaluation model in Dongshan Bay, Fujian, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4907-4919. (in Chinese) DOI: 10.5846/stxb201312052899.
- [17] 许雪青, 刘忠波, 张晋, 等. 基于可变模糊评价法的渤海海洋生态环境综合评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2014, (3): 51-57. (XU X Q, LIU Z B, ZHANG J, et al. Assessment of the marine ecological environment in Bohai Sea based on a variable fuzzy sets method[J]. *Transaction of Oceanology and Limnology*, 2014, (3): 51-57. (in Chinese))
- [18] 曹永强, 朱明明, 张亮亮, 等. 基于可变模糊评价法的大连市水资源承载力分析[J]. *水利水运工程学报*, 2016(4): 40-46. (CAO Y Q, ZHU M M, ZHANG L L, et al. Analysis of carrying capacity of water resources in Dalian based on variable fuzzy assessment method[J]. *Hydr Science and Engineering*, 2016(4): 40-46. (in Chinese) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.04.006.
- [19] 刘玉玉, 许士国. 可变模糊评价方法在浑河上游河段健康评价中的应用[J]. *水利水电科技进展*, 2013, 33(3): 64-67, 88. (LIU Y Y, XU S G. River health assessment in the upper Hun River based on variable fuzzy model[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 33(3): 64-67, 88. (in Chinese) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2013.03.014.
- [20] 赵敏敏, 张兴珏, 闫永奎, 等. 山东省青州市利用亚行贷款地下水漏斗区域综合治理示范工程可行性研究报告[R]. 2015. (ZHAO M M, ZHANG X Y, YAN Y L, et al. The report on the feasibility of demonstration project of comprehensive management of groundwater funnel in Qingzhou City, Shandong Province by ADB Loan[R]. 2015(in Chinese))
- [21] 郑良勇, 齐春三, 宋炜. 潍坊市现代水网构建研究[J]. *水利规划与设计*, 2005(11): 3-5, 47. (ZHENG L Y, QI C S, SONG W. Study on modern water network construction in Weifang City[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2005(11): 3-5, 47. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2015.11.002.
- [22] 李莉, 彭慧, 王传荣, 等. 山东省青州市现代水网建设规划[R]. 2012. (LI L, PENG H, WANG C R, et al. Planning of modern water network in Qingzhou City, Shandong Province [R]. 2012. (in Chinese))
- [23] 董哲仁. 河流生态系统研究的理论框架[J]. *水利学报*, 2009, 2(2): 129-137. (DONG Z R. The theoretical framework of rivers ecosystem research[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 2(2): 129-137. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2009.02.001.
- [24] 山东省水资源综合利用中长期规划[Z]. 2016. (Medium and long term plan for comprehensive utilization of water resources in Shandong Province[Z]. 2006. (in Chinese))
- [25] 青州统计年鉴 2013[Z]. 山东省青州市统计局, 2013. (Qingzhou statistical yearbook in 2013[Z]. Statistics Bureau of Qingzhou City, Shandong Province, 2013. (in Chinese))

(上接第 101 页)

- [17] 许强, 董秀军, 邓茂林, 等. 2010年7·27四川汉源二蛮山滑坡-碎屑流特征与成因机理研究[J]. *工程地质学报*, 2010(5): 609-622. (XU Q, DONG X J, DENG M L, et al. The Erman-shan rock slide debris flow of July 27, 2010 in Hanyuan, Sichuan: characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, (5): 609-622. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2010.05.003.
- [18] CRUDEN D M, HUNGR O. The debris of the Frank slide and theories of rockslide avalanche mobility[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1986, 23(3): 425-432.
- [19] 王玉峰, 程谦恭, 朱圻. 汶川地震触发高速远程滑坡-碎屑流堆积反粒序特征及机制分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012(6): 1089-1106. (WANG Y F, CHENG Q G, ZHU Q. Inverse grading analysis of deposit from rock avalanches triggered by Wenchuan earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012(6): 1089-1106. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2012.06.002.
- [20] 郝明辉, 许强, 杨兴国, 等. 高速滑坡-碎屑流颗粒反序试验及其成因机制探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015(3): 472-479. (HAO M H, XU Q, YANG X G, et al. Physical modeling tests on inverse grading of particles in high speed landslide debris[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015(3): 472-479. (in Chinese) DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.03.004.
- [21] WANG Y S, HE J X, LUO Y H. Seismic response of the Lengzhuguan slope during Kangding Ms5.8 earthquake[J]. *Journal of Mountain Science*, 2017, 14(11): 2337-2347. DOI: 10.1007/s11629-017-4368-1.
- [22] 罗永红, 王运生. 汶川地震诱发山地斜坡震动的地形放大效应[J]. *山地学报*, 2013, 31(2): 200-210. (LUO Y H, WANG Y S. Mountain slope ground motion topography amplification effect induced by Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(2): 200-210. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1008-2786.2013.02.009.
- [23] 张俊玲. 1879年甘肃武都南8级地震新史料[J]. *西北地震学报*, 2007, 29(3): 264-266. (ZHANG J L. "A new historical record about Southern Wudu M8.0 Great Earthquake in 1879" [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2007, 29(3): 264-266. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2007.03.014.