

DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2016.02.001

# 2015年4.29甘肃黑方台党川2<sup>#</sup>滑坡基本特征与成因机理研究\*

许强 彭大雷 亓星 董秀军 李骅锦 巨袁臻

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

**摘要** 2015年4月29日早上7点55分,甘肃省永靖县盐锅峡镇党川村发生了小规模黄土滑坡,约 $5\times 10^4\text{m}^3$ 失稳的黄土从黄河IV级台塬黑方台冲向黄河II级台塬。滑坡后仅3h,再次产生较大规模的黄土滑坡,约 $35\times 10^4\text{m}^3$ 黄土泥流冲向下游,形成长约780m,宽100m的堆积体,最大的堆积厚度17m,在党川段是少有的灾难性的滑坡。本文在滑前位移监测和裂缝分布变形研究的基础上,结合详细地质调查、低空摄影测量、现场工程地质测绘、含水率实验等手段,对党川2<sup>#</sup>滑坡的基本特征进行了分析,并形成滑坡发生及成灾原因初步认识。结果表明:(1)从时间上来看,党川2<sup>#</sup>滑坡共发生2次滑动,根据滑动模式和堆积特征上分析,第I次相对独立,第II次分为3轮滑动,共4轮滑动;(2)第I次滑动区域面积 $8396\text{m}^2$ ,变形区域仅在台塬边较小范围内,滑前长期蠕变变形是第I次滑动发生诱发因素;(3)第II次滑动区域面积为 $27422\text{m}^2$ ,地表裂缝较少,滑前裂缝无明显位移变形,底部黄土的液化对台塬黄土滑坡的运动起了非常重要的作用,该次滑动滑距长、破坏强,具有突发性;(4)党川段开始发生大规模静态液化型黄土滑坡,并以落水洞形成滑坡边界,这对其他区段早期识别和监测预警研究具有重要意义。

**关键词** 党川2<sup>#</sup>滑坡 静态液化 远程泥流 二次滑坡 成因机理

中图分类号: P642.22 文献标识码: A

## DANGCHUAN 2<sup>#</sup> LANDSLIDE OF APRIL 29, 2015 IN HEIFANGTAI AREA OF GANSU PROVINCE: CHARACTERISTICS AND FAILURE MECHANISM

XU Qiang PENG Dalei QI Xing DONG Xiujun LI Huajin JU Yuanzhen

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

**Abstract** A small scale of loess landslide occurred at Heifangtai in Dangchuan village of Yongjing county. Its occurrence is at 7:50 of April 29, 2015. The site is at the edge of the loess plateau. The instability of loess has a volume of  $5\times 10^4\text{m}^3$ . It runs from the forth terrace to the second terrace of the Yellow river. After 3 hours later, however, a large scale of mudstone occurred at this place. Its volume is of  $3.5\times 10^5\text{m}^3$ . The mudstone deposit is 780meters long, 100meters wide and the largest thickness of deposit is 17meters. The landslide is one of the few catastrophic landslides. This paper examines the sliding displacement monitoring and the crack distribution. Such examinations are combined with site geological investigation, low-altitude photogrammetry, site engineering geological survey and site moisture content test. This paper analyses the basic characteristics of the landslide and the

\* 收稿日期: 2015-07-26; 收到修改稿日期: 2015-10-20.

基金项目: 国家重点基础研究计划(973计划)项目(No: 2014CB744703), 国家杰出青年科学基金(41225011)资助.

第一作者简介: 许强(1968-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事地质灾害评价预测与防治处理研究. Email: xq@cdut.edu.cn

formation and reasons of landslide by preliminary understanding. The results show that: (1) There are two sliding cases at Dangchuan 2<sup>#</sup> landslide from the time. There is only one sliding case time in first time sliding and three sliding cases in second times landslide from sliding mode and deposit characteristic. Dangchuan 2<sup>#</sup> landslide has four times sliding cases in all. (2) The area of the first sliding is 8396m<sup>2</sup>. Deformation distribution area is only at the edge of plateau and is smaller compared with the sliding area. The long-term creep deformation at the bottom of loess is the inducing factors of the first time landslide. (3) The area of the second sliding is 27422m<sup>2</sup>. There is rarely any crack at this part and the crack has no obvious deformation before the second times sliding. The liquefaction of the loess at the bottom of landslide plays a very important role in the second times sliding. The landslide has the characteristics such as sudden occurrence, movement long distance and destructive stronger. (4) The Dangchuan section begins to start mass type static liquefaction loess landslide and the boundary of landslide is the sinkholes, which is of great significance that is the research about other section of early recognition of loess landslide and monitoring and early warning of loess landslide.

**Key words** Dangchuan 2<sup>#</sup> Landslide, Static liquefaction, Long rang mudstone, Secondary slide, Failure mechanism

## 0 引言

黄土覆盖着约 10% 的地球陆地表面,主要集中在北半球的温带和沙漠前缘的半干旱地带(刘东生, 1985; Derbyshire et al., 1988),其中中国、美国、俄罗斯(前苏联)和欧洲较为典型(Derbyshire et al., 1988; Sun, 1988; Rogers et al., 1994)。中国黄土覆盖面积约  $6.31 \times 10^4 \text{km}^2$ ,其中黄土高原面积为  $3.17 \times 10^4 \text{km}^2$ ,主要分布于陕西省、宁夏回族自治区、甘肃省和山西省等省份,在这些地区黄土厚度从 50~200m,整个黄土高原最大厚度位于靖远县,约为 500m(刘东生, 1985),在这些地方,每年发生大量的黄土滑坡(黄润秋, 2007; 蔺晓燕等, 2013; 石菊松等, 2013; 杨璠等, 2014),其中地处甘肃省永靖县的黑方台就是黄土高原的滑坡地质灾害的缩影(Meng et al., 1998; Xu et al., 2014)。黑方台面积约  $11.5 \text{km}^2$ ,冲沟中发育最长的虎狼沟,其将黑方台分为两块,西边的面积较小为方台,约  $1.5 \text{km}^2$ ,东边的面积较大为黑台,约  $9 \text{km}^2$ ,东西长约 7.7km,南北最宽约 2.5km,最窄约 0.6km。从 1968 年以来,发生了 100 多次滑坡,平均每年 3~5 次,如 2015 年 1 月 29 日焦家 4<sup>#</sup>发生体积约  $0.6 \times 10^4 \text{m}^3$  的滑坡,造成电路中断,灌溉水渠改线,2015 年 2 月 4 日陈家 3<sup>#</sup>滑坡发生约  $0.3 \times 10^4 \text{m}^3$  的滑坡,直接威胁兰新高铁的运行安全,2015 年 3 月 28 日上午 11 点陈家 8<sup>#</sup>滑坡发生  $0.5 \times 10^4 \text{m}^3$  的滑坡,导致中国移动通信光缆中断。党川段最近于 2014 年 11 月发生的党川 7<sup>#</sup>崩滑型黄土滑坡,体积约  $0.4 \times 10^4 \text{m}^3$ ,造成坡下的引水灌

溉渠淤积。而在 2015 年 4 月 29 日早上 7 时 55 分左右,党川村后方的黑台突然发生小型崩滑型黄土滑坡,约  $5 \times 10^4 \text{m}^3$  滑坡体沿台塬临空面沟道冲到台塬下方空地上,冲毁了坡脚的引水渠道,并堆积到坡下的碳化硅厂背后;3 个多小时后,10 点 47 分,党川 2<sup>#</sup>滑坡再次产生大规模的滑动,约  $35 \times 10^4 \text{m}^3$  黄土产生远程滑动,最大滑距 782m(滑坡后壁到前缘的距离,图 15),摧毁掩埋了党川村群众房屋 14 户、附近工厂 3 家、耕地 80 余亩、水渠 1km 以及部分自来水通村管道,造成盐锅峡至党川、黄茨的盐集路中断,水渠和电网线路受损,直接经济损失达 5650 万元。由于预警及时,人员撤离迅速,滑坡未造成人员伤亡。

对于单体滑坡,多数学者针对岩质单体滑坡的变形特征及其变形机理,做了大量的研究工作(廖秋林等, 2005; 许强等, 2009; Xu et al., 2012),但对黄土单体滑坡多集中在滑坡机理方面,但对滑坡的滑动过程、堆积过程和滑坡体积没有详细研究(Zhang et al., 2009; Zhuang et al., 2014; Peng et al., 2015)。2015 年上半年黑方台发生的 4 次滑坡有一个共同的特点,饱和黄土在上覆黄土自重作用下,向前缘临空向产生塑性流动,由此而形成静态液化型黄土滑坡。关于此类滑坡国内外学者对其的滑坡机理进行了大量的研究,黑方台黄土滑坡不仅具有缓慢拉裂的特点,同时还表现出突发性和速度高等特点(王家鼎等, 2001; 王志荣等, 2004; 武彩霞等, 2011),众多学者对滑坡的形成机理与启动原因有着不同的解释。一些学者提出了黄土滑坡的蠕动液化机理(王家鼎, 1992),一些学者认为灌溉引起地

下水位变动是滑坡发生的主要因素(董英等, 2013); 多数学者从静态液化的观点出发, 认为黄土剪缩孔隙水来不及排除, 产生超孔隙水压力, 进而导致土体液化破坏(Wang et al., 2007; 金艳丽等, 2007, 2008; 武彩霞等, 2011; Zhang et al., 2013)。关于黄土滑坡静态液化, 引起液化发生的荷载类型有静荷载和临时荷载之分(Yamamuro et al., 1998), 临时荷载包括一般由地震引起的循环荷载、动荷载等。静态液化是由单调加载或在静荷载作用下引起的液化, 所称之静态是为了区分引起液化的荷载类型不同(Poulos et al., 1985; Kramer et al., 1988)。尽管不少学者从不同角度对黑方台黄土滑坡的形成机理进行了大量研究, 并取得了众多成果, 但对其滑动机理持有不同的观点。结合黑方台的地下水位监测和此类滑坡的位移变化情况, 笔者认为黑方台的党川2<sup>#</sup>黄土滑坡存在静态液化现象。

党川2<sup>#</sup>单体滑坡前后两次滑动在成因机理、运动堆积特征以及成灾模式等方面存在较大差别, 对此滑坡的研究具有重要的科学价值。从黄土滑坡的空间分布来看, 以前党川滑坡段主要是以崩塌型滑坡类型为主, 自2012年7月党川3<sup>#</sup>发生静态液化型以来, 到今年(2015年)的党川2<sup>#</sup>大型静态液化型黄土滑坡发生, 党川段的滑坡类型正悄悄的变化, 这对黄土滑坡的早期识别和灾害预警研究具有重要的意义。

## 1 党川滑坡的基本环境

### 1.1 黑方台滑坡历史概况

黑方台位于甘肃省永靖县黄河北岸, 盐锅峡水库下游5km, 六盘峡水库库区内, 距兰州市45km, 距永靖县城20km。黑方台面积约11.5km<sup>2</sup>, 冲沟中发育最长的虎狼沟, 其将黑方台分为两块, 西边的面积较小为方台, 约1.5km<sup>2</sup>, 东边的面积较大为黑台, 约9km<sup>2</sup>, 黑方台东西长约7.7km, 南北最宽约2.5km, 最窄约0.6km。黑方台黄土滑坡在空间上具有以下特点: (1) 黑台共发育滑坡67处(图1), 以野狐沟和陈家庙为分界线划分为A和B两个区域, A区主要分布体积相对较大的基岩滑坡, 一般体积为(1~10)×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>, 最大达600多万立方米; B区则以黄土层内部滑坡为主, 体积相对较小, 一般数千立方米到数万立方米。具体地又可将滑坡细分为6个段, 即新塬段(①段)、党川段(②段)、黄茨段(③段)、焦家崖段(④段)、焦家(⑤段)和磨石沟段(⑥段)6个区段(图3), 其中①段和③段以黄土基岩型为主, ②段以浅层崩塌型为主, ④段以黄土泥流型为主, ⑤段和⑥段以静态液化型为主; (2) 结合台塬地质结构、黄土底部基岩产状分布以及台塬边出水点位置, 揭示了黄土滑坡分区分段出露的原因和特点: A区的新塬段(产状190°∠11°)和黄茨段(产状160°∠10°)黄土底部基岩顺层发育, 地下水出水点也主要在基岩内分布, 因此此段主要产生规模相对较大的基岩滑坡。其中党川段基岩倾向与坡面倾向近于直交, 很难发生基岩滑坡。因黄土层内地下水饱水厚度为东厚西薄, 所以党川段以前滑坡较少, 但随着近年来黄土内地下水位不断上升, 也开始发生黄土内滑坡。B区随近年来黄土内地下水位不断上升, 开始不断产生因底部饱水导致的“软弱基座型”黄土内滑坡。尤以焦家和陈家段最为发育和典型, 这两段近年来不断有滑坡发生。其中焦家崖段为通过人工放台阶削方措施使该段黄土厚度变薄, 目前主要以黄土塑性流动变形为主。

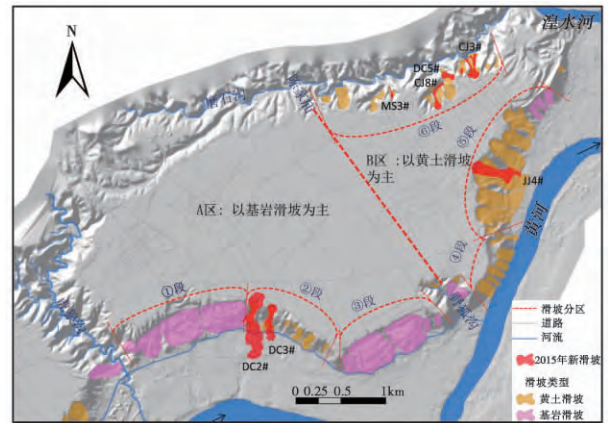


图1 黑方台滑坡的空间分布及党川2<sup>#</sup>的位置

Fig. 1 The distribution of landslides in Heifangtai and the location of Dangchuan 2<sup>#</sup> landslide

家崖段(④段)、焦家(⑤段)和磨石沟段(⑥段)6个区段(图3), 其中①段和③段以黄土基岩型为主, ②段以浅层崩塌型为主, ④段以黄土泥流型为主, ⑤段和⑥段以静态液化型为主; (2) 结合台塬地质结构、黄土底部基岩产状分布以及台塬边出水点位置, 揭示了黄土滑坡分区分段出露的原因和特点: A区的新塬段(产状190°∠11°)和黄茨段(产状160°∠10°)黄土底部基岩顺层发育, 地下水出水点也主要在基岩内分布, 因此此段主要产生规模相对较大的基岩滑坡。其中党川段基岩倾向与坡面倾向近于直交, 很难发生基岩滑坡。因黄土层内地下水饱水厚度为东厚西薄, 所以党川段以前滑坡较少, 但随着近年来黄土内地下水位不断上升, 也开始发生黄土内滑坡。B区随近年来黄土内地下水位不断上升, 开始不断产生因底部饱水导致的“软弱基座型”黄土内滑坡。尤以焦家和陈家段最为发育和典型, 这两段近年来不断有滑坡发生。其中焦家崖段为通过人工放台阶削方措施使该段黄土厚度变薄, 目前主要以黄土塑性流动变形为主。

### 1.2 党川2<sup>#</sup>滑坡的基本情况

党川滑坡在黑方台滑坡群中处于党川段(②段) 这段主要是以黄土浅表层崩滑为主, 但在2012年7月党川3<sup>#</sup>发生小型静态液化型滑坡, 随后的3年中, 还是以崩滑型滑坡为主, 直到2015年4月29日早上7点党川2<sup>#</sup>中型静态液化型滑坡的发生。党川2<sup>#</sup>滑坡长217m, 宽176m, 滑坡平均厚度约20m(滑源区), 滑距782m, 后缘到前缘的落差122m。通过Trimbel Terramodel软件计算滑源区前后体积变

化为  $31.72 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 由于滑源区有一部分堆积体, 根据剖面 1-1' 计算 (图 18), 平均厚度 4m, 滑源区面积  $2.74 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 据此推测, 滑坡体积大约  $44.40 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。通过 Trimbel Terramodel 软件计算堆积区前后体积变化为  $49.96 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 再加上滑源区堆积的  $12.69 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 滑坡后总的堆积体积约为  $62.65 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 滑体体积膨胀系数约为 0.411。滑坡的剪出口在粉质黏土内, 位于卵石层上方 1m 多的位置。

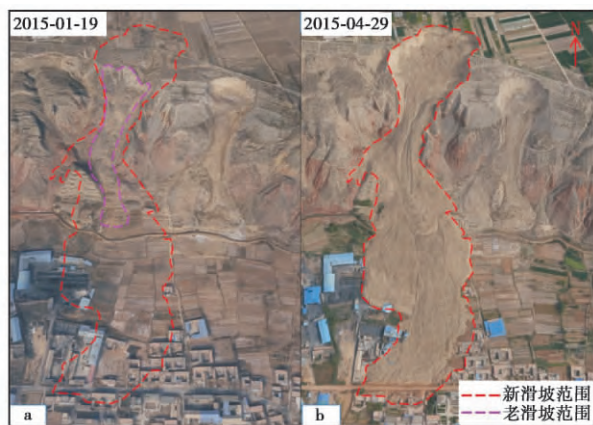


图 2 党川 2<sup>#</sup>滑坡发生前地形地貌 (a)  
和党川 2<sup>#</sup>滑坡后地形地貌图 (b)

Fig. 2 Pre-sliding photo taken on January 19, 2015 (a);  
Post-sliding photo taken on July 29, 2015 (b)

### 1.2.1 地形地貌

黑方台地貌单元属于黄河 IV 级阶地, 台塬下方的党川村属于黄河的 II 阶地, 黑台地势总体由西北向东南倾斜, 相对高差约 30m, 在 1968 年移民后, 对黑台进行平整, 使得整个台塬上地势总体较平坦。临近塬边的边坡较陡, 坡度范围变化较大, 高度相差将近 115m。在党川 2<sup>#</sup>滑坡前, 由于降雨作用和灌溉作用, 形成侵蚀型冲沟; 在灌溉和农民耕作习惯的影响下, 在台塬边缘形成一些塌陷土坑, 这些土坑面积大小和深度差别较大 (图 2a 和图 4)。党川 2<sup>#</sup>在本次滑坡之前曾发生过崩塌型滑坡, 同时, 该滑坡的

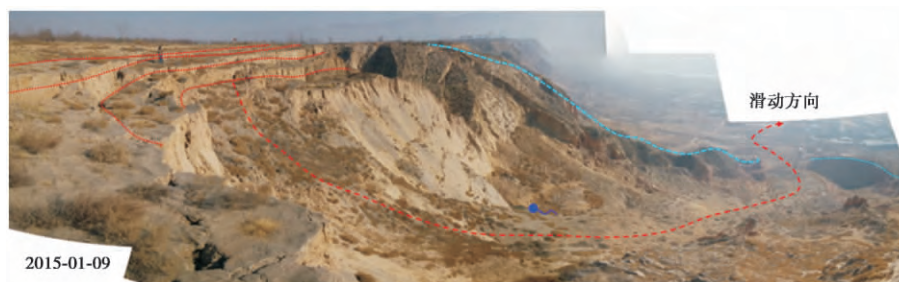


图 3 党川 2<sup>#</sup>滑坡滑前裂缝发育

Fig. 3 The crack distribution in Dangchuan 2<sup>#</sup> landslide (before the landslide)

黄河上游方向为党川 1<sup>#</sup>滑坡, 党川 1<sup>#</sup>滑坡发生于 2004 年 5 月, 形成黄土基岩型滑坡地貌特征; 该滑坡黄河下游方向为党川 3<sup>#</sup>滑坡, 在地下水的作用下, 形成潜蚀型地貌; 党川 7<sup>#</sup>是在重力作用下, 形成崩滑型地貌。在整个党川段小范围内, 形成齐全的黄土地貌类型, 在整个黄土地区还是很少见的。

笔者于 2015 年 1 月份对整个黑方台进行低空摄影测量 (无人机飞行高度 500m), 其中党川 2<sup>#</sup>如图 2a, 滑坡发生后, 于 2015 年 5 月 15 日再次对该滑坡进行拍摄如图 2b, 图 2 和图 3 的摄影倾角均为  $45^\circ$ , 可以非常清晰地看出滑坡影响范围、滑坡的形态特征和滑坡前后的地貌变化。

### 1.2.2 地层岩性

黑台地区地貌属黄土高原西部丘陵沟壑区, 以黄土台塬、河谷地貌为主。出露地层分别为 (图 18): ①全新统滑坡堆积 ( $Q_4^{\text{del}}$ ), 由滑动后的黄土、卵砾石及砂泥岩组成, 土体杂乱破碎, 堆积于斜坡中下部; ②上更新统黄土 ( $Q_3^{\text{eol}}$ ), 灰黄色, 以粉粒为主, 土质均一、疏松多孔, 厚 30m 左右; ③中更新统冲积物 ( $Q_2^{\text{al}}$ ), 可分为两层, 上部离石黄土经水流作用后, 变为具有水平层理的上褐红色粉质黏土层, 厚度 3~20m, 下部的粉细砂层, 厚 1~10m 不等, 砂卵石层, 厚 2~3m; ④下白垩系河口群 ( $K_1hk$ ), 为紫红色-暗红色泥岩、砂质泥岩, 产状约为  $135^\circ \angle 11^\circ$  (王志荣等, 2004)。

## 2 滑源区变形历史及失稳前兆

党川 2<sup>#</sup>滑坡靠近台塬边的裂缝非常发育, 已经形成明显的错台, 同时在黄土和粉质黏土层的分界处, 出现渗水现象 (图 3)。笔者于 2014 年 7 月和 2015 年 5 月用摄影测量和 RTK 测得了党川 2<sup>#</sup>裂缝、落水洞分布图 (图 5) 和滑坡滑动前后影像图 (图 4)。滑坡前党川 2<sup>#</sup>坡体前缘有大量的裂缝发育, 而后缘存在大量的黄土落水洞, 深度不一, 最深

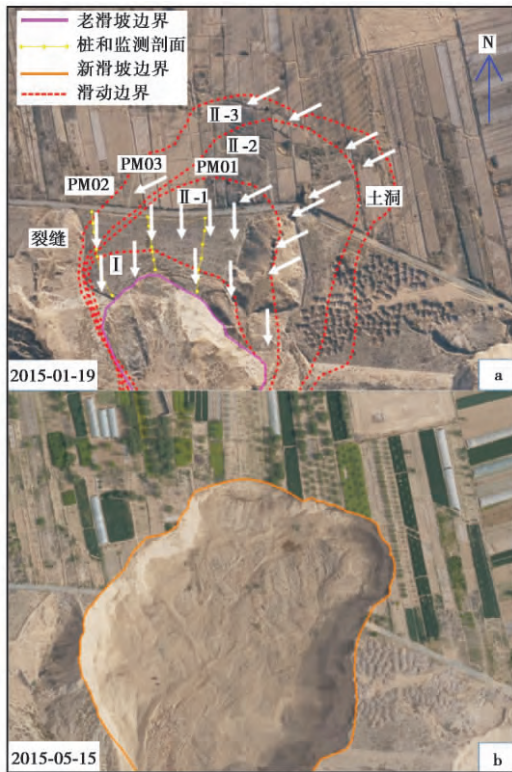


图4 党川滑坡2#滑源区前后地貌对比图

Fig. 4 Pre-sliding aerial photo at the top of Dangchuan 2# landslide; (a) Post-sliding aerial photo at the top of Dangchuan 2# landslide (b)

的落水洞超过3m,落水洞的分布有一定的规律,大体上呈串珠状连成线,党川2#第I次滑坡的后缘位于裂缝发育处后缘,第II次滑坡的后缘也正好位于串珠状落水洞处,同时第II次的中间前两轮基本是沿着落水洞和串珠裂缝发育。裂缝和落水洞的发育与滑坡边界在空间具有一定的相关性。

党川2#滑坡自2014年8月开始进行了持续的裂缝位移监测,通过在滑坡体上布设的3条裂缝监测剖面(图5)获取了裂缝位移变形特征。已布设了大量的监测桩进行定期的裂缝监测,平均每隔7d进行一次读数。根据前期裂缝位移监测曲线可见(图6),从2014年12月开始,党川2#滑坡前缘滑体持续蠕变变形,至临滑前3天,位移变形速率仍然大体上匀速变化,未表现出典型的加速现象,而滑体中部的裂缝无明显变形。第I次滑坡发生后半小时,笔者组织人员冒险对后方未掉落的监测桩进行补测,发现前缘滑坡发生后,中部的裂缝仍然没有明显的变形,说明该滑坡第II次具有突发性。第II次滑坡在第II-1次滑坡之后约3h才发生,不仅规模大大增强,而且呈多轮连续滑坡,并以泥流为主,可见

黄土底部的饱水软化带的液化效应非常强,属于典型的静态液化型黄土滑坡。

### 3 党川2#滑坡过程与变形特征

#### 3.1 党川2#滑坡过程

通过调查工程地质调查,党川2#滑坡总共发生了两次滑动。其中第I次滑坡规模较小,为黄土崩滑型滑坡;第II次滑动可分为三轮连续滑动,分别为II-1、II-2和II-3,总规模远大于第I次,滑坡体含水率也明显增大,具有液化流动特性,其滑动次数和分布(图7)。

##### 3.1.1 第I次滑动

由于坡体长期的蠕变,党川2#滑坡后缘产生大量的张裂缝(图5),第I次滑坡滑源区主要以前期已有明显变形的后缘裂缝为边界,滑坡长度约20m,平均宽度115m,滑动方向190°,滑坡后使台塬形成半圆形凹槽,面积约8396m<sup>2</sup>,水平滑动距离437m,滑坡后可见后缘黄土底部含水率明显较高且有渗水现象。滑坡后大量黄土解体松散堆积在台塬下方并顺着台塬边的沟道冲向台塬下方,形成扇形堆积体,淤埋了台塬下方耕地,并冲至碳化硅厂房背后(图8),堆积体组成物质主要为黄土,颜色较浅,含水率较小,体积约8×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>(图7)。

##### 3.1.2 第II次滑动

第I次滑坡后约3h,早上10点47分,位于滑源区的巨厚黄土突然启动并再次顺着沟道冲向台塬下方,摧毁14间房屋和3家工厂并淤埋了滑坡下游的耕地。此次滑动使原滑坡后壁向台塬内退了130m,滑动区域面积为2.7422×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>,滑坡体体积约32.4×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,水平滑动距离782m,所幸由于当地村民提前撤离,未造成人员伤亡。

通过调查发现,第II次滑坡可分为三轮连续滑动,其中,第II-1轮滑动规模较大,沿着原来地貌冲沟的落水洞和台塬公路内侧的落水洞发育(图4,图5),水平滑动距离618m,解体后迅速沿着流通区沟道冲向台塬底部,部分黄土在流通区翻过山头抛洒到山头一侧,大部分堆积体冲至台塬底部,将原堆积体向四周挤压,在台塬下方形成了巨大的扇形堆积区,使得堆积区周围的建筑物和耕地形成挤压破坏。图9为挤压破坏的工厂混凝土柱,图10为铲卷的耕地和破坏的电力设施。

第II-2轮滑动基本沿着落水洞为边界发育

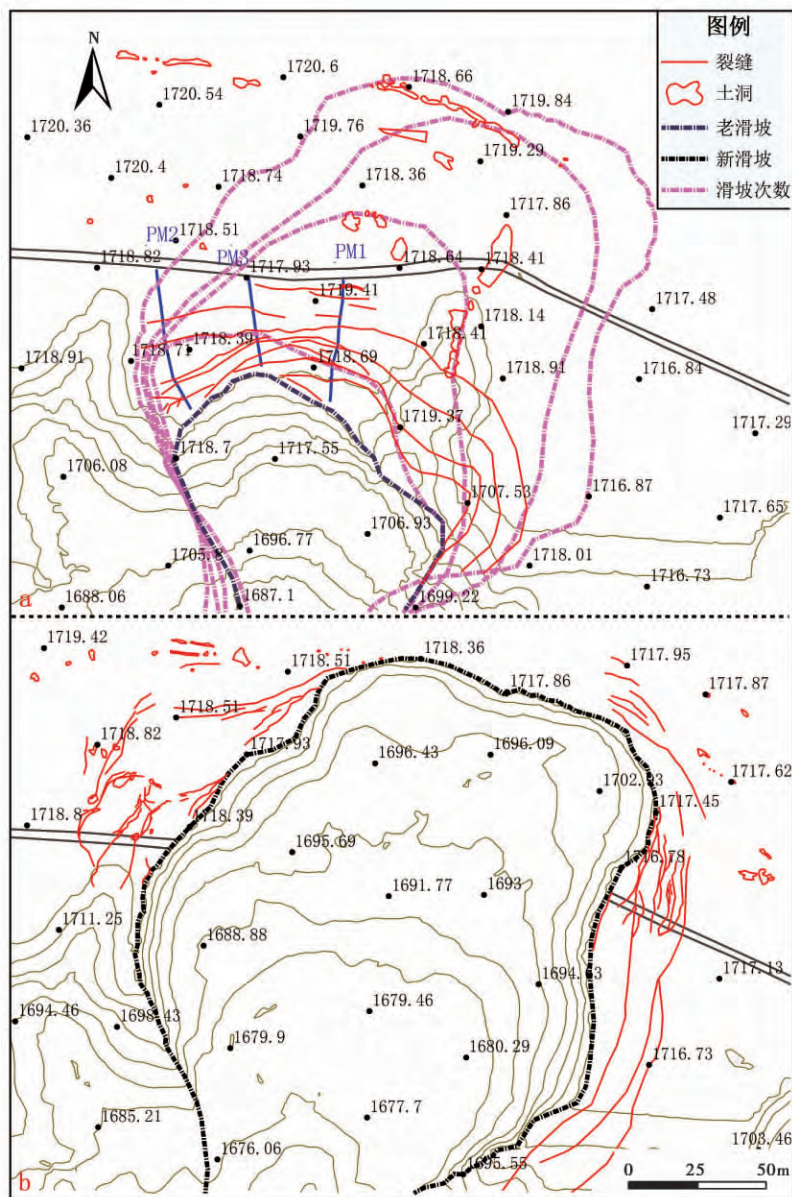


图5 党川2<sup>#</sup>滑坡前后裂缝落水洞的分布

Fig. 5 Distribution map of crachs and sinkholes of pre-sliding(a) ; Distribution map of crachs and sinkholes of post-sliding(b)

(图4,图5) ,高含水率的黄土泥流呈流塑状快速滑动。第II-2滑动在II-1轮的基础上,向前运动遇到的阻力变小,沿着中间的滑槽继续向前滑动,从而使第II-2次相对于第II-1继续向前运动了104m,II-2水平滑动距离772m,首先在剪出口将底部粉质黏土铲刮向滑坡右侧(图11),随后顺着沟道冲向台塬下方,在原堆积扇中直接冲刷出一条宽数十米的通道,并将黄土向两侧积压,将地表耕植土推挤至滑坡堆积体前缘四周(图12),直到冲过盐兰公路(图13),由于房屋的阻挡而停下(图14),形成长条形堆积区(图7)。

第II-3轮规模较小,紧接着前两轮发生,叠加在了第II-2次滑坡堆积体上,沿着第II-2轮形成的冲槽中流动,水平滑动距离474m,在已有的堆积体上继续堆高3m,形成层叠的黄土堆积体(图15)。滑源区在底部泥流滑动后,被上部干黄土体覆盖,泥流在通道两侧形成了明显的擦痕滑。

### 3.2 党川2<sup>#</sup>滑坡分区

党川2<sup>#</sup>滑坡滑坡体后缘位于黑台台塬上,海拔1718m,根据党川2<sup>#</sup>滑坡滑后的形态可分为滑源区(A区)和堆积区(B区)两部分(图16)。其工程地

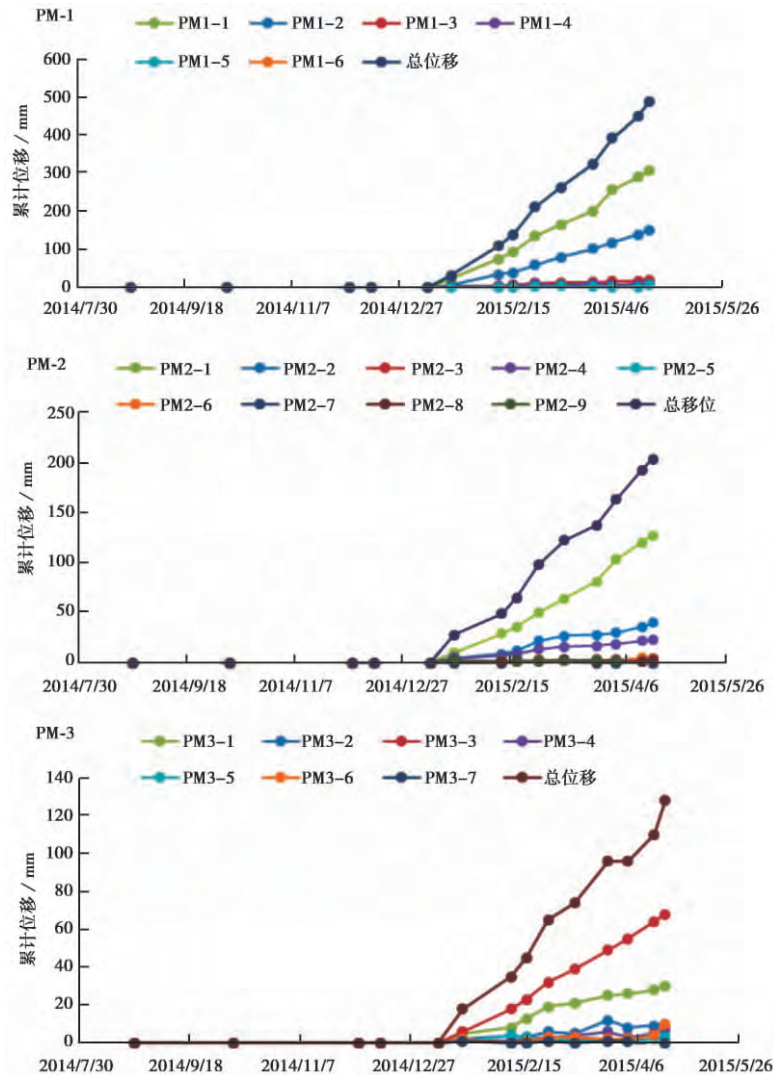


图6 党川2#滑坡前变形特征

Fig. 6 The deformation characteristics of before landslide

质平面图见图17,其主剖面1-1'见图18,其余的3条横断面分别如图19、图21和图22所示。

### 3.2.1 滑源区(A)基本特征

滑源区位于黄河IV阶地的台塬上,长217m,宽176m,面积为 $2.7422 \times 10^4 \text{m}^2$ ,主滑方向为 $S190^\circ W$ ,滑坡后形成了高21m、坡度 $80^\circ$ 的黄土滑坡后壁(图20)。滑源区的断面图如图19和图21所示,第I次以崩滑滑源区为主,第II次的II-1和II-2轮以主滑源区为主,第II-3轮以滑塌滑源区为主。其剪出口位于卵石层上部1m的位置,如图18和图21所示。

#### 3.2.1.1 崩滑滑源区( $A_1$ )

党川2#第I次滑坡滑源区主要以前期已有明显变形的后缘裂缝为边界(图5和图17),崩滑滑源区前缘和后缘的高程分别为1663m和1712m,底

部滑面沿粉质黏土层顶部滑动,滑向 $190^\circ$ ,长约49m,平均宽度115m,滑坡后使台塬形成半圆形凹槽凹进台塬内,面积约为 $8396 \text{m}^2$ ,体积约为 $8 \times 10^4 \text{m}^3$ 。崩滑滑源区发生前,前缘出现0.5~1m的错台(图4),自2014年8月监测以来,前缘裂缝宽度呈持续变化到加速的过程(图6)。同时,从2014年12月开始起前缘底部高程约1685~1688m(粉质黏土与黄土分界的位置)出现渗水现象,由于滑坡前是一个老滑坡留下的冲沟,临空条件较好。

#### 3.2.1.2 主滑源区( $A_2$ )

主滑源区主要是第II滑动的II-1和II-2的滑源区,面积为 $1.36 \times 10^4 \text{m}^2$ ,体积约为 $31 \times 10^4 \text{m}^3$ 。滑坡发生前,由于农业灌溉,灌溉水沿黄土下渗,并形成优势通道,其地表特征表现出大量落水洞和农户为防止水下渗填筑的田埂。在长期灌溉下,滑坡侧

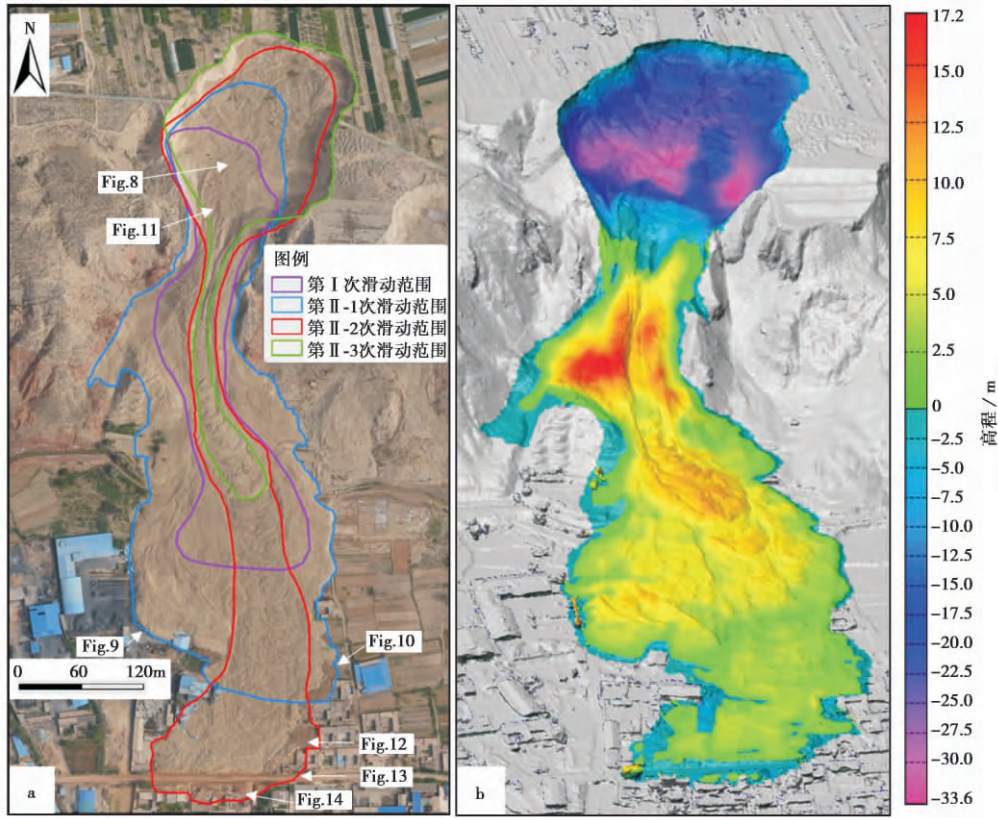


图 7 党川 2# 滑坡滑动次数分布图 (a) 和滑坡前后高程变化量 (b)

Fig. 7 Distribution map of sliding times (a) and the variation of elevation from pre-sliding to post-sliding (b)



图 8 党川 2# 滑坡第 I 次滑动后边界和堆积范围

Fig. 8 The boundary of landslide and deposit area after first time in the Dangchuan 2# landslide



图 9 第 II-1 轮滑动后被推动的混凝土柱

Fig. 9 The damaged factories fater the II-1 time slide

壁形成一定的软弱面。主滑源区基本是沿落水洞和串珠缝发育,在第 I 次发生后,形成一定临空面,地下水水位更高,随之产生的超孔隙水压在短时间无法及时消散。有了第 I 次的滑体做滑面,运动距离更远。

### 3.2.1.3 滑塌滑源区(A<sub>3</sub>)

滑塌滑源区主要是 II-3 的滑源,面积为  $0.54 \times 10^4 \text{m}^2$ , 体积约为  $5.4 \times 10^4 \text{m}^3$ , 由于第 II-1 和第 II-2 的滑动,下部的流塑态黄土流走,上部干黄土失去下

部支撑,在重力的作用下发生倾倒塌坏,出现图 17 和图 11 的情形,干黄土连同地表农作物和果树扑倒在滑源区内。同时,黄土在滑塌的过程中,连同主滑源区流塑态的黄土一起滑动,因而出现图 4 中的流通区堆积现象。

### 3.2.2 堆积区(B)基本特征

堆积区主要位于黄河的 II 级阶地上,如图 16 和图 18。从滑坡前地貌(图 3)可以看出,在流通区的右下边有一个山头,高出地面约 20m; 左边有一个山脊,在山脊的脚下有一个高出地面约 8m 的山包。





图 10 第 II-1 轮滑动后被破坏的耕地和电力设施

Fig. 10 The damaged cultivated land after the II-1 time slide

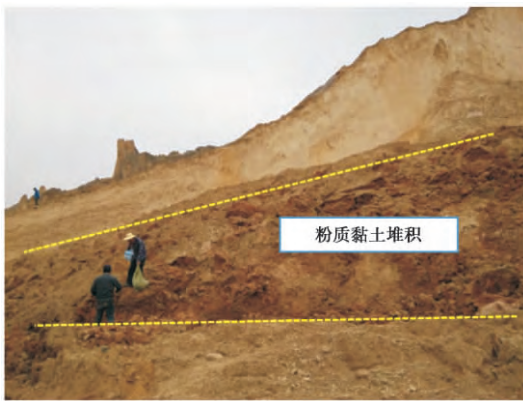


图 11 右侧铲起堆积的粉质黏土和滑坡左前方挤压堆积体

Fig. 11 The shovel deposit of silty clay on the right side of landslides

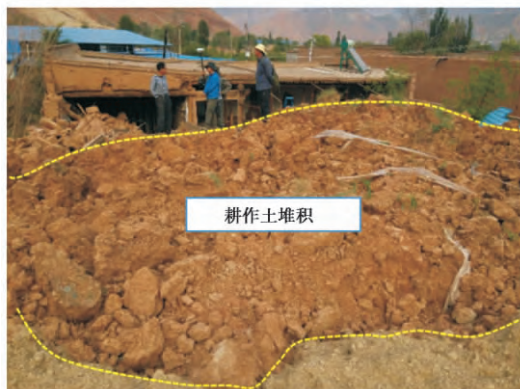


图 12 右侧铲起堆积的粉质黏土和滑坡左前方挤压堆积体

Fig. 12 The extrusion deposit on the left front of landslide

在上述地貌因子的控制作用下,决定了堆积区的范围和形态,也为黄土的长距离堆积创造条件。堆积区面积为  $7.78 \times 10^4 \text{m}^2$ 。在第 I 次和第 II-1 滑坡后,堆积体呈扇状堆积,在堆积过程中,对滑体产生铲卷效应(图 11),对周围建筑物(图 14)和耕地产生挤压破坏(图 10)。根据堆积区的堆积体特点将堆积区分为流通堆积区( $B_1$ )、铲卷流通区( $B_2$ )、挤压堆积区( $B_3$ )、二次堆积区( $B_4$ )和粉尘堆积区( $B_5$ ),如



图 13 堆积体堵塞道路

Fig. 13 The congestion road by the deposit



图 14 滑坡体前方的房屋

Fig. 14 The house in the front of landslide body



图 15 滑槽和滑动过程中形成的擦痕

Fig. 15 Chute and scratch in the landslide sliding

图 16 所示。

### 3.2.2.1 流通堆积区( $B_1$ )

根据流通堆积区的堆积过程将其分为上下两部分,分别为  $B_{1-1}$  和  $B_{1-2}$ 。上部流通堆积区( $B_{1-1}$ )位于台塬滑坡前缘沟道内,由于地形因素,使黄土滑坡解体后,顺着沟道冲向下游。 $B_{1-1}$  区的面积为  $0.855 \times 10^4 \text{m}^2$ ,长度 256m,特别是整个滑动过程中,大多数滑体从这个区域流过,在 II-3 滑动中,基本都是堆积在这个区域(图 16)。流通区的表面特征表现为

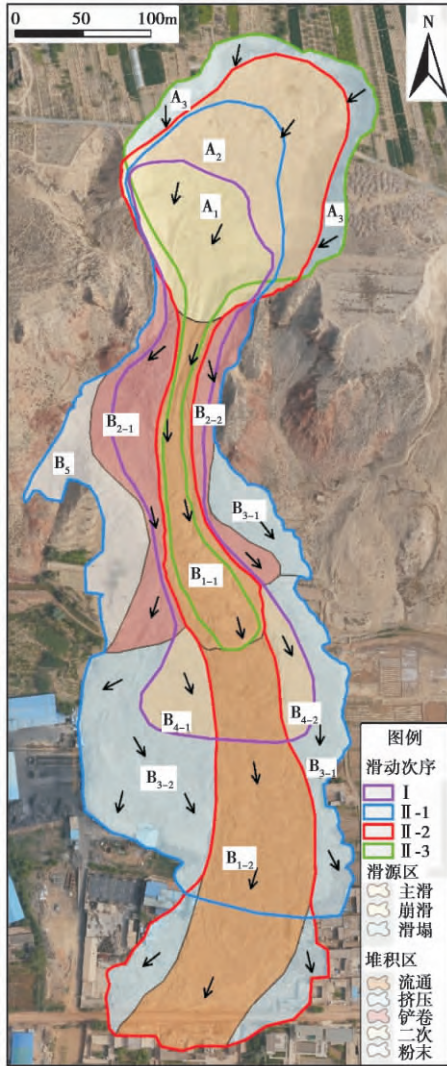


图 16 党川 2# 滑坡分区图及运动路径

Fig. 16 The movement route of Dangchuan 2# landslide by orthogonal projection intage

(1) I. 第一次滑动; II-1. 第二次滑动的第一轮滑动, II-2. 第二次滑动的第二轮滑动, II-3. 第二次滑动的第三轮滑动; (2) A. 滑源区: A<sub>1</sub>. 崩滑滑源区, A<sub>2</sub>. 主滑源区, A<sub>3</sub>. 滑塌滑源区; B. 堆积区: B<sub>1</sub>. 流通堆积区, B<sub>2</sub>. 铲卷堆积区, B<sub>3</sub>. 挤压堆积区, B<sub>4</sub>. 二次堆积区, B<sub>5</sub>. 粉末堆积区

一个明显的滑槽 (图 15), 在 II-3 次滑动后, B<sub>1-1</sub> 区共抬高了约 10m, 堆积体积约为  $8.55 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。上部流通堆积区 (B<sub>1-2</sub>) 主要是 II-2 和 II-3 的流通通道, 在泥流推涌过程中, 滑体表面呈波浪形, 其面积为  $2.09 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 长度约 308m, 平均宽度约 67m, 平均厚度约 5m, 堆积体积约为  $10.45 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

### 3. 2. 2. 2 铲卷堆积区 (B<sub>2</sub>)

铲卷堆积区 (B<sub>2</sub>) 位于上部流通堆积区 (B<sub>1-1</sub>) 的两侧, B<sub>1-1</sub> 区右边是 B<sub>2-1</sub> 区, 左边是 B<sub>2-2</sub> 区 (图 16) 在滑坡发生过程中, 对两侧的地貌有铲卷过程

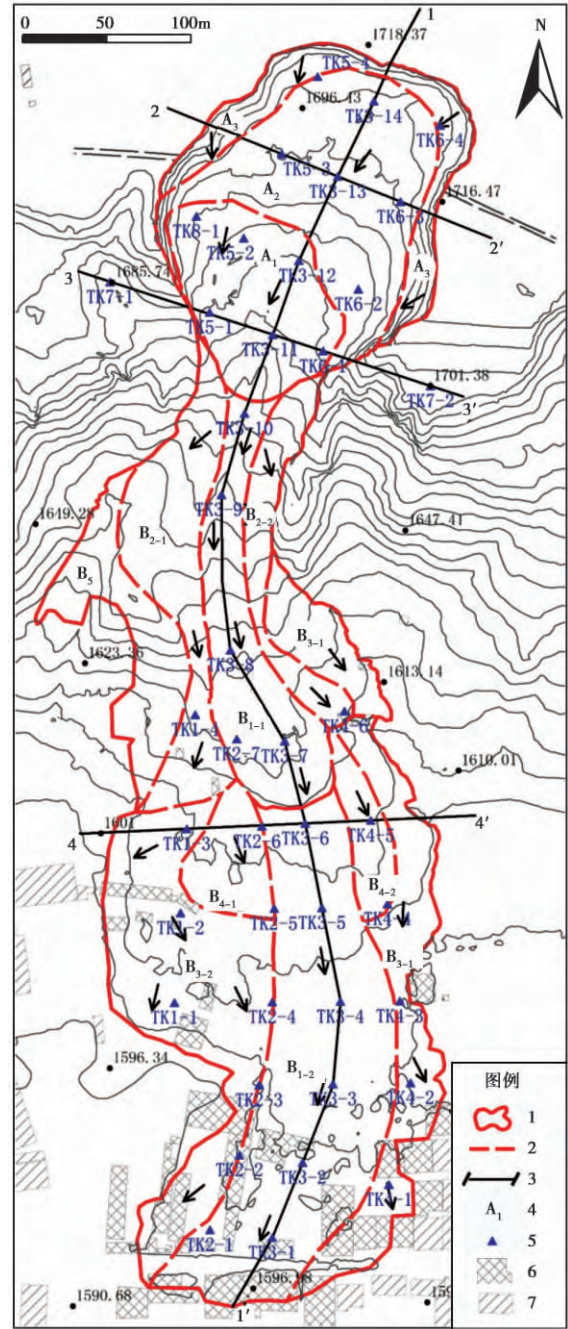


图 17 党川 2# 滑坡工程地质平面图

Fig. 17 Engineering geological map of Dangchuan 2# landslide  
1. 示滑坡分区; 2. 滑坡分区中的子分区; 3. 剖面图和断面图位置; 4. 滑坡分区的代码; 5. 探孔的位置; 6. 被毁坏的房屋和工厂; 7. 居民点

(图 3)。在滑坡前, B<sub>2-2</sub> 区有一个烟囱, 滑坡后, 烟囱被铲走, 同时滑动过程中, 对沟道的两侧进行铲卷。B<sub>1-1</sub> 区的面积为  $0.84 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 堆积厚度最深 17.2m, 平均堆积厚度将近 12m, 堆积体积约为  $10.13 \times 10^4 \text{ m}^3$ ; 左边铲卷区面积为  $0.38 \times 10^4 \text{ m}^2$ , 堆积厚度最深 12.5m, 平均堆积厚度将近 8m (图 7), 堆积体积约为  $3.05 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

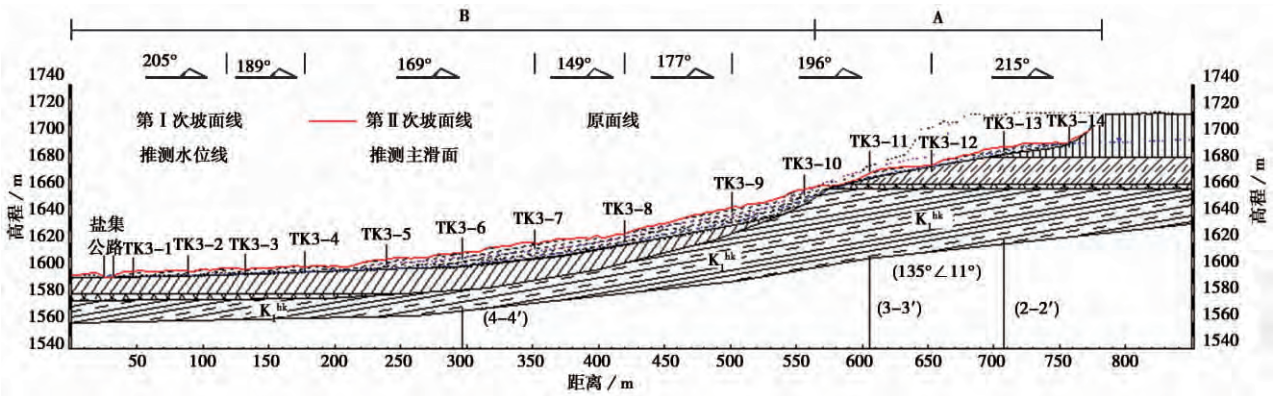


图 18 党川 2# 滑坡主滑纵剖面 1-1' (见图 17)

Fig. 18 Longitudinal geological profile 1-1' after slide

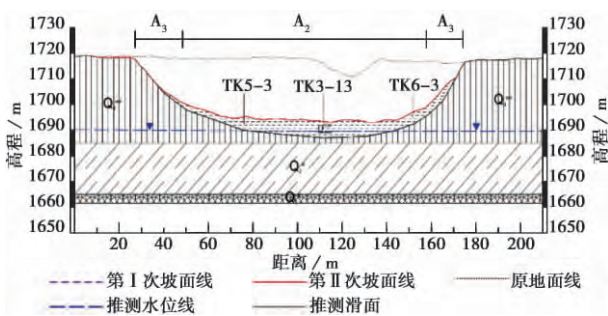


图 19 党川 2# 滑坡滑源区横断面图(剖面 2-2' )

Fig. 19 Cross-section of the top area along profile 2-2' in Fig. 17

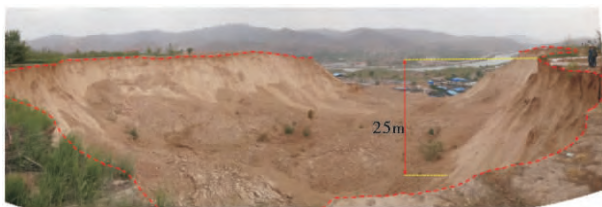


图 20 滑源区的特征

Fig. 20 Characteristics of the top area

### 3.2.2.3 挤压堆积区(B<sub>3</sub>)

挤压堆积区(B<sub>3</sub>)主要为Ⅱ-1和Ⅱ-2滑动后堆积的结果,根据形成过程和空间位置,将B<sub>3</sub>分为B<sub>3-1</sub>区、B<sub>3-2</sub>区和B<sub>3-3</sub>区。堆积区整体呈扇形分布,B<sub>3-1</sub>区位于B<sub>2-2</sub>区右边,是第Ⅱ-1次挤压堆积的结果,沿B<sub>2-2</sub>区右边小沟堆积(图3,图17),破坏房屋1间,面积0.28×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>,长度127m,堆积平均厚度约6m,堆积体积约为1.70×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>;B<sub>3-2</sub>区位于B<sub>1-2</sub>区左边,面积约1.42×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>,长约311m,平均厚度约为5m(图22),堆积体积约为7.09×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,主要是第Ⅱ-1次含水率较高的滑体,有一部分是将第Ⅰ次堆积体的挤压移动80多m后堆积的结果(图9);

B<sub>3-3</sub>区位于B<sub>1-2</sub>区右边,面积约为0.81×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>,长约353m,在滑坡边缘上有少量的粉末堆积,主要是第Ⅱ-1次含水率较高的堆积体,有一部分是将第Ⅰ次堆积体的挤压移动30多m后堆积的结果,平均厚度约为6m(图22),堆积体积约为4.87×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>。挤压堆积区在堆积过程的,对周围的建筑物破坏程度最大,毁坏房屋11户农家,3家工厂,破坏了盐集公路边的电网和通信设备(图17)。

### 3.2.2.4 二次堆积区(B<sub>4</sub>)

二次堆积区(B<sub>4</sub>)主要是第Ⅱ-1次滑动过程将第Ⅰ次滑动堆积体挤压移动后,重新堆积的区域。结合滑前和滑后的影像分析(图2),工厂水泥柱在滑动过程中被推移了40多米;图9中卡车变形和水泥柱倾倒方向和滑动前后位置的变化,以及堆积体的颜色和探孔含水率情况,说明第Ⅱ-1次滑动对Ⅰ次滑动的堆积体有一个二次堆积的过程。根据B<sub>4</sub>区的空间位置,分为B<sub>4-1</sub>区和B<sub>4-2</sub>区。B<sub>4-1</sub>区位于B<sub>2-2</sub>区的左边,面积0.30×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>,平均堆积厚度7m,堆积体积为2.09×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>;B<sub>4-2</sub>区位于B<sub>2-2</sub>区的右边,面积0.22×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>,平均堆积厚度7m,堆积体积为1.56×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>。

### 3.2.2.5 粉尘堆积区(B<sub>5</sub>)

粉尘堆积区(B<sub>5</sub>)是滑坡过程中冲击下游的山体,激起的黄土粉尘,上部主要的滑坡过程中(图23)。B<sub>5</sub>位于B<sub>2-1</sub>区的左边,其面积大小为0.58×10<sup>4</sup>m<sup>2</sup>,粉尘的平均堆积厚度0.8m,堆积体积为0.46×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>。

## 4 党川 2# 滑坡滑动成因与机理分析

通过以上对滑坡的地质环境、变形特征、滑坡过

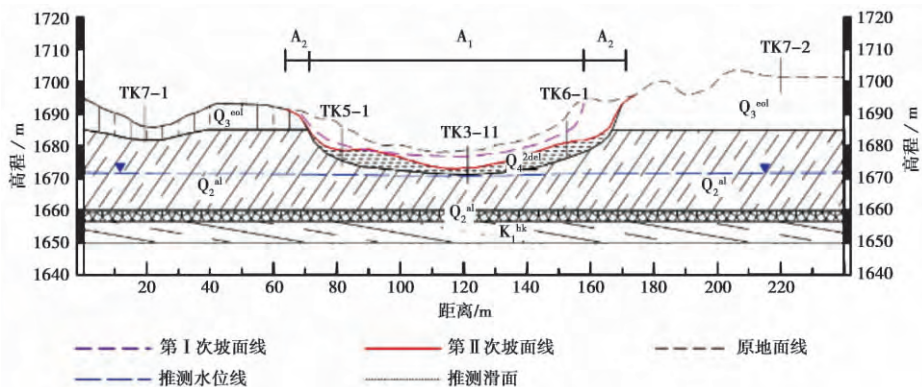


图 21 党川 2# 滑坡堆积区横断面图(剖面 3-3')

Fig. 21 Cross-section of the deposit area along profile 3-3' in Fig. 17

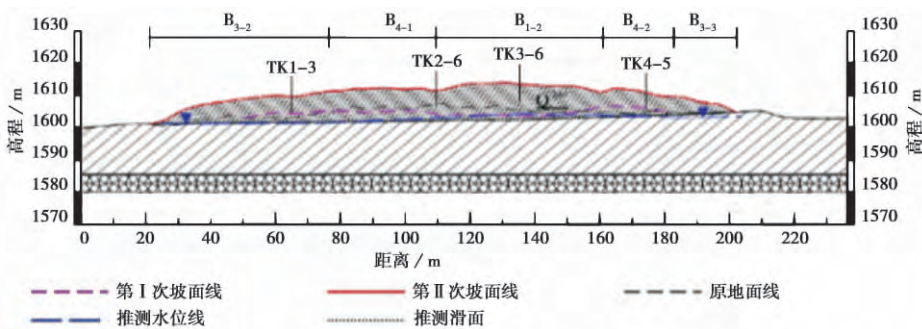


图 22 党川 2# 滑坡第 II 次后堆积区横断面图

Fig. 22 Cross-section of the deposit area along profile 4-4' after II time slide in Fig. 17



图 23 第二次滑动后激起粉末

Fig. 23 Stirring powder after II time

程和滑坡分区进行分析, 现将党川 2# 滑坡的成因机理归纳如下。

#### 4.1 独特的地形地貌特征

党川 2# 相对于党川段其他滑坡、焦家崖段、焦家和磨石沟段黄土滑坡来说, 从地形地貌上有以下特点: (1) 凌空条件好。1) 落差, 党川 2# 所处段台塬边到下面党川村庄落差有 120m, 而焦家段落差为

100m 左右, 焦家崖段下面为黄河, 磨石沟段小支沟落差仅为 70m, 磨石沟主沟最大只有 120m; 2) 前缘开阔, 党川段和焦家段类似, 临空面下部开阔, 而磨石沟段都在沟谷段, 运动距离有限。(2) 地形优势。党川 2# 滑坡相对于党川段其他滑坡, 其流通区右侧是山包, 左侧是山脊, 有利于泥流流动过程中能量积累。(3) 危害性大。其他段滑坡坡脚没有密集的居民点, 但党川滑坡下方都是村庄, 这也是此次滑坡造成较大危害的重要原因。

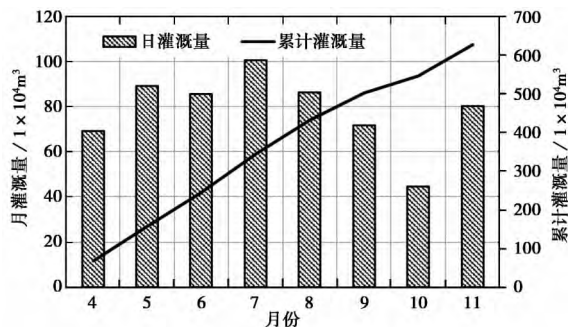


图 24 黑方台 2014 年灌溉量

Fig. 24 The irrigation amount in Heifangtai in 2014

## 4.2 滑坡滑动机理

自20世纪60年代以来,黑方台台塬长期采用漫灌方式进行农业灌溉,每年3月至11月,大量黄河水通过泵站抽至台塬上灌溉(图24),年平均灌溉量近 $600 \times 10^4 \text{ m}^3$ (张茂省,2013),灌溉水是地下水补给的最重要来源。由于粉质黏土的渗水性差,地下水在黄土底部富集并沿台塬边渗出,长期灌溉使地下水平均升幅达 $0.27 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ (董英等,2013)。由于台塬边黄土的阻挡作用,地下水只能沿优势通道向外渗出,当地下水的渗出诱发局部黄土滑塌后,新的临空面对滑坡后壁产生了卸荷影响,使后方黄土产生了蠕变,导致底部饱水黄土形成超孔隙水压力,土体继续蠕变使孔隙水压力逐渐增大,最终使底部黄土液化引起整体滑动。

## 4.3 液化运动机制

滑坡第I次滑动后,形成新的临空面,黄土土体产生卸荷变形,使底部饱水黄土层液化区扩大,最终导致完全液化进而继续产生滑坡。后续两轮滑坡的含水率有较大差别,通过在滑坡区域内取样,测得了党川2#滑坡不同区域内土样的干密度及含水率值。

从表1可以看出,中部主要滑坡堆积体的含水率明显比两侧堆积体高,对应了黄土泥流的高含水率特性,这与调查访问乡民以及获得第二次滑坡时的视频影像结论一致。由于高速黄土泥流的强烈冲击将中间的堆积体挤向两侧,使堆积体两侧的密度明显大于中间。而中间呈液化状态的饱水黄土泥流干密度仅 $1.04 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,饱水容重可达 $1.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。根据西北地区泥石流计算公式计算,黄土泥流速度得到黄土解体形成泥流冲向台塬底部后的最初运动速度可达 $27.56 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,为高速泥流,这与滑坡现场摄录的影像大致吻合。

## 5 结论与认识

(1)从滑坡发生的时间上来看,党川2#滑坡由两次滑动组成,分别发生在4月29日的7点和10点;根据滑动模式和堆积特征分析,第I次相对独立,第II次分为3轮滑动,共4轮滑动。

(2)第I次滑动区域面积较小,变形区域仅在台塬边较小范围内,滑前长期蠕变变形是第I次滑动发生诱发因素;第II次滑动区域面积较大,滑坡变形区域仅在台塬边较小范围内,地表裂缝较少,滑

表1 不同区域的土样的干密度、含水率和饱和度

Table 1 The dry density, moisture content and saturation of the soil sample in different regions

取土地点	干密度 $/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	深部1m处 质量含水率 /%	深部1m处 饱和度 $S_r$ /%	孔隙比 $e$
滑源区中部(TK3-13)	0.955	27.35	40.41	1.83
滑源区右侧推挤区(TK5-1)	1.049	7.99	13.71	1.57
剪出口中部(TK3-11)	0.999	16.32	25.88	1.70
剪出口左侧	1.021	9.17	15.06	1.64
剪出口右侧	1.095	7.02	12.93	1.47
堆积体中部(TK3-5)	0.913	29.33	40.46	1.96
堆积体左侧(TK4-4)	1.000	8.72	13.85	1.70
堆积体右侧(TK1-2)	0.997	14.94	23.62	1.71

前且无明显位移变形,底部液化的黄土对台塬黄土滑坡的运动起了非常重要的作用,该次滑动滑距长、破坏强,具有突发性。

(3)以前此类滑坡主要发生在台面高程低和黄土厚的焦家段和磨石沟段,随着地下水的逐渐抬升开始影响台塬高程较高和黄土厚度较小的地方。党川段开始发生大规模静态液化型黄土滑坡,并以落水洞形成滑坡边界,这对其他区段早期识别和监测预警研究具有重要意义。

(4)灌溉对黑台边坡稳定的影响非常大,由于灌溉导致的地下水富集使台塬黄土滑坡具有典型的突发性,仅通过地表位移监测难以提前预警。而今后黑台台塬长期的灌溉使地下水还将在黄土底部不断富集,由于底部黄土软化和液化导致的这类黄土滑坡形成机制仍将持续存在,这类滑坡的治理也将是今后的重要思考方向。

## 参 考 文 献

- Dong Y, Jia J, Zhang M S et al. 2013. An analysis of the inducing effects of irrigation and the responses of loess landslides in Heifangtai area[J]. Geological Bulletin of China, **32**(6): 893~898.
- Derbyshire E, Mellors T W. 1988. Geological and geotechnical characteristics of some loess and loessic soils from China and Britain A comparison[J]. Engineering Geology, **25**(2-4): 135~175.
- Huang R Q. 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, **26**(3): 433~454.
- Jin Y L, Dai F C. 2007. The mechanism of irrigation-induced landslides of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, **29**(10): 1493~1499.
- Jin Y L, Dai F C. 2008. Experimental investigation of static liquefaction of saturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, **29**(12): 3293~3298.

- Kramer S L , Seed H B. 1988. Initiation of soil liquefaction under static loading conditions[J]. *Journal of Geotechnical Engineering* ,**114** ( 4 ): 412~430.
- Liao Q L , Li X , Li S D , et al. 2005. Occurrence , geology and geomorphology characteristics and origin of Qianjianpiang landslide in three gorges reservoir area and study on ancient landslide criterion[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* **24**( 17 ): 3146~3153.
- Lin X Y , Li T L , Zhang Z R , et al. 2013. Causes of Gaoloucun loess flowslide in Huaxian county , Shaanxi province[J]. *Journal of Engineering Geology* **21**( 2 ): 282~288.
- Liu T S. 1985. *Loess and the environment*[M]. Beijing: China Ocean Press: 1~481.
- Meng X M , Derbyshire E. 1998. Landslides and their control in the Chinese Loess Plateau: models and case studies from Gansu Province , China[J]. *Geological Society , London , Engineering Geology Special Publications* ,**15**( 1 ): 141~153.
- Peng J B , Fan Z J , Wu D , et al. 2015. Heavy rainfall triggered loess-mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui , China[J]. *Engineering Geology* ,**186**: 79~90.
- Poulos S J , Gonzalo C , France J W. 1985. Liquefaction evaluation procedure[J]. *Journal of Geotechnical Engineering* **111**( 6 ): 772~792.
- Rogers C D F , Dijkstra T A , Smalley I J. 1994. Hydroconsolidation and subsidence of loess: Studies from China , Russia , North America and Europe: In memory of Jan Sajgalik [J]. *Engineering Geology* **37** ( 2 ): 83~113.
- Shi J S , Li B , Wu S R , et al. 2013. Mechanism of large-scale slide at edge of loess plateau on north of Weihe river in Baoji urban area , Shaanxi province[J]. *Journal of Engineering Geology* **21**( 6 ): 938~949.
- Sun J Z. 1988. Environmental geology in loess areas of China[J]. *Environmental Geology and Water Sciences* ,**12**( 1 ): 49~61.
- Wang G H , Sassa K , Fukuoka H , et al. 2007. Experimental Study on the Shearing Behavior of Saturated Silty Soils Based on Ring-Shear Tests[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **133**( 3 ): 319~333.
- Wang J D. 1992. A mechanism of high-speed loess landslides-saturated loess creeping liquefaction[J]. *Geological Review* ,**38**( 6 ): 532~539.
- Wang J D , Xiao S F , Zhang Z Y. 2001. The mechanism for movement of irrigation-induced high-speed loess landslide[J]. *Journal of Engineering Geology* **9**( 3 ): 241~246.
- Wang Z R , Wu W J , Zhou Z Q. 2004. Landslide induced by over-irrigation in loess platform areas in Gansu Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control* ,**15**( 3 ): 43~46 , 54.
- Wu C X , Xu L , Dai F C , et al. 2011. Topographic features and initiation of earth flows on Heifangtai loess plateau[J]. *Rock and Soil Mechanics* **32**( 6 ): 1767~1773.
- Xu L , Dai F C , Tu X B , et al. 2014. Landslides in a loess platform , North-West China [J]. *Landslides* ,**11**( 6 ): 993~1005.
- Xu Q , Huang R Q , Yin Y P , et al. 2009. The Jiweishan landslide of June 5 , 2009 in Wulong , Chongqing: characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology* ,**17**( 4 ): 433~444.
- Xu Q , Fan X M , Dong X J. 2012. Characteristics and formation mechanism of a catastrophic rainfall-induced rock avalanche-mud flow in Sichuan , China , 2010[J]. *Landslides* **9**( 1 ): 143~154.
- Yamamoto J A , Lade P V. 1998. Steady-state concepts and static liquefaction of static liquefaction of silty sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **124**( 9 ): 868~877.
- Yang F , Chang W , Wang F W , et al. 2014. Motion simulation of rapid long run-out loess landslide at Dongfeng in Jingyang , Shaanxi[J]. *Journal of Engineering Geology* **22**( 5 ): 890~895.
- Zhang D X , Wang G H , Luo C Y , et al. 2009. A rapid loess flowslide triggered by irrigation in China[J]. *Landslides* **6**( 1 ): 55~60.
- Zhang F Y , Wang G H , Kamai T , et al. 2013. Undrained shear behavior of loess saturated with different concentrations of sodium chloride solution[J]. *Engineering Geology* ,**155**: 69~79.
- Zhuang J Q , Peng J B. 2014. A coupled slope cutting—A prolonged rainfall-induced loess landslide: a 17 October 2011 case study[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* **73**( 4 ): 997~1011.
- Zhang M S. 2013. Formation mechanism as well as prevention and controlling techniques of loess geo-hazards in irrigated areas: A case study of Heifangtai immigration area in the Three Gorges Reservoir of the Yellow River[J]. *Geological Bulletin of China* **32**( 6 ): 833~839.
- 董英 , 贾俊 , 张茂省 , 等. 2013. 甘肃永靖黑方台地区灌溉诱发作用与黄土滑坡响应[J]. *地质通报* **32**( 6 ): 893~898.
- 黄润秋. 2007. 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* **26**( 3 ): 433~454.
- 金艳丽 , 戴福初. 2007. 灌溉诱发黄土滑坡机理研究[J]. *岩土工程学报* **29**( 10 ): 1493~1499.
- 金艳丽 , 戴福初. 2008. 饱和黄土的静态液化特性试验研究[J]. *岩土力学* **29**( 12 ): 3293~3298.
- 廖秋林 , 李晓 , 李守定 , 等. 2005. 三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究[J]. *岩石力学与工程学报* **24** ( 17 ): 3146~3153.
- 蔺晓燕 , 李同录 , 张子然 , 等. 2013. 陕西华县高楼村黄土滑坡-泥流的成因分析[J]. *工程地质学报* **21**( 2 ): 282~288.
- 刘东生. 1985. *黄土与环境*[M]. 北京: 中国海洋出版社: 1~481.
- 石菊松 , 李滨 , 吴树仁 , 等. 2013. 宝渭渭河北岸黄土塬边大型滑坡成因机制研究[J]. *工程地质学报* **21**( 6 ): 938~949.
- 王家鼎. 1992. 高速黄土滑坡的一种机理——饱和黄土蠕动液化[J]. *地质论评* **38**( 6 ): 532~539.
- 王家鼎 , 肖树芳 , 张倬元. 2001. 灌溉诱发高速黄土滑坡的运动机理[J]. *工程地质学报* **9**( 3 ): 241~246.
- 王志荣 , 吴玮江 , 周自强. 2004. 甘肃黄土台塬区农业过量灌溉引起的滑坡灾害[J]. *中国地质灾害与防治学报* **15**( 3 ): 43~46 , 54.
- 武彩霞 , 许领 , 戴福初 , 等. 2011. 黑方台黄土泥流滑坡及发生机制研究[J]. *岩土力学* **32**( 6 ): 1767~1773.
- 许强 , 黄润秋 , 殷跃平 , 等. 2009. 2009年6·5重庆武隆鸡尾山崩滑灾害基本特征与成因机理初步研究[J]. *工程地质学报* **17**( 4 ): 433~444.
- 杨璠 , 常维 , 汪发武 , 等. 2014. 陕西泾阳东风高速远程黄土滑坡运动过程的模拟[J]. *工程地质学报* **22**( 5 ): 890~895.
- 张茂省. 2013. 引水灌区黄土地质灾害成因机制与防控技术——以黄河三峡库区甘肃黑方台移民灌区为例[J]. *地质通报* **32**( 6 ): 833~839.