

DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2017.01.020

地下水诱发渐进后退式黄土滑坡成因机理研究——以甘肃黑方台灌溉型黄土滑坡为例*

亓星 许强 彭大雷 董秀军 陶叶青

(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 黑方台位于我国甘肃省永靖县,该区由于长期灌溉导致地下水位上升,诱发了大量的黄土滑坡,其中最典型的一类滑坡为渐进后退式黄土滑坡。通过对比代表性滑坡多期 Google 影像,并结合现场调查分析了近年来新发生的滑坡,发现该类黄土滑坡具有典型的渐进后退式演化过程。现场调查和对典型滑坡剖面黄土含水率的实测发现,黄土层底部受地下水的长期浸泡软化所形成的软基效应是使黄土滑坡不断发生的主要原因,而滑坡发生后留下的弧形凹槽往往成为地下水局部集中汇聚和排泄点,滑源区被滑坡残留体覆盖导致地下水位局部雍高上涨,将导致同一滑坡发生多次渐进后退式破坏。

关键词 黄土滑坡 渐进后退式 软基效应 地下水局部雍高

中图分类号: P642.22 文献标识码: A

MECHANISM OF GRADUAL RETREAT LOESS LANDSLIDE CAUSED BY GROUNDWATER: A CASE STUDY OF THE IRRIGATION LOESS LANDSLIDE IN HEIFANGTAI, GANSU PROVINCE

QI Xing XU Qiang PENG Dalei DONG Xiujun TAO Yeqing

(State Key Laboratory of Geo-hazards Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract Heifangtai is located in Yongjing County, Gansu province. The loess landslide is very developed due to irrigation. One of the most typical landslides is the gradual retreat of the loess landslide caused by long-term irrigation. This paper compares the Google images and the field survey of representative landslide occurred in recent years. It shows that the loess landslides have the characteristics of gradual recession. It further investigates and analyze the water content of the loess landslide profile. It finds that the main reason for loess landslide occurred continuously are soft base effect formed by long-term soaking of groundwater. The arc groove of the landslide often becomes the concentration of groundwater and drainage points. The residual landslide accumulation in slide source area rises the local underground water. It is the main reason to make the same position more and more gradual retreat type landslide.

Key words Loess landslide, Gradual retreat, Soft foundation effect, Local enrichment of groundwater

* 收稿日期: 2015-12-14; 收到修改稿日期: 2016-04-10.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630640), 国家重点基础研究发展计划(2014CB744703), 国家杰出青年科学基金(41225011)资助。

第一作者简介: 亓星(1988-), 男, 博士生, 地质工程专业. Email: qixing2009@163.com

0 引言

甘肃省永靖县盐锅峡镇黑方台地处干旱少雨的西北黄土地区,为典型的黄土旱台地,20世纪60年代由于水库修建,大量人员移居在此,建立了引水灌溉工程将黄河水引至台塬上进行农业生产灌溉。长期灌溉使大量地表水进入黄土内部,造成黑方台大面积强烈湿陷,大量地下水富集在黄土底部粉质黏土层(隔水层)上方,形成饱水软弱黄土层,造成了台塬密布的黄土滑坡,直接经济损失超过4亿元,多人伤亡,农田被毁,公路中断(张茂省,2013)。由于黑方台黄土滑坡数量多、频率高、危害大,目前对黑方台黄土滑坡已开展了大量的研究,对典型黄土滑坡关键问题进行了分析(彭建兵等,2014),包括黑方台的滑坡类型及发育规律(许领等,2008; Xu et al., 2014)、危害特征(杨具瑞等,2003; 赵尚学等,1995)、黄土滑坡液化形成机理(王家鼎,1992; 王家鼎等,1999)、破坏机制(金艳丽等,2007; 武彩霞等,2011; Xu et al., 2012a; 胡炜等,2013)、黄土滑坡滑动模式(Xu et al., 2012b; 张茂省等,2013)等。

前人对黑方台黄土滑坡的类型、特征和机制有较多的研究,但并未具体针对地下水诱发黄土内滑坡的特征和成因机理进行深入研究。现场调查发现

黑方台发育的大量滑坡中,有一类滑坡最为常见并具有典型性。该类滑坡主要发生在黄土层底部地下水相对较丰富的台塬边缘,从平面上看,这类黄土滑坡后侧边界严重凹向台塬内,呈半圆形甚至近圆形。而新滑坡大多呈突发性,并在已有滑坡的后侧发生,使台塬逐渐向内后退,形成大量的口小内大的圆形凹槽,我们称这类滑坡为渐进后退式黄土滑坡。现场调查分析表明,此类滑坡的发生与灌溉形成的丰富地下水关系密切。本文结合已有资料和现场调查,归纳了地下水诱发渐进后退式黄土滑坡的特点,并初步分析了这类滑坡的形成过程和成因机理。

1 渐进后退式黄土滑坡特征

1.1 地质环境概况

黑方台位于甘肃省永靖县,地处湟水河与黄河交会口上游,分为黑台和方台两个台塬,西起方台,东至黑台湟水河,南界为黄河北岸,北界为磨石沟(图1),为黄河IV级阶地。台塬面西高东低,顶面高程为1664~1864m。黑方台地层岩性(图2)由上往下依次为:Q₃黄土(26~48m),结构松散,发育较多垂直裂隙;Q₃粉质黏土(3~19m),结构致密,弱透水;Q₃砂卵石层(1~6m),透水性较好;最下部为单斜构造的砂质泥岩K₁hk₃,岩层倾向125°~220°,

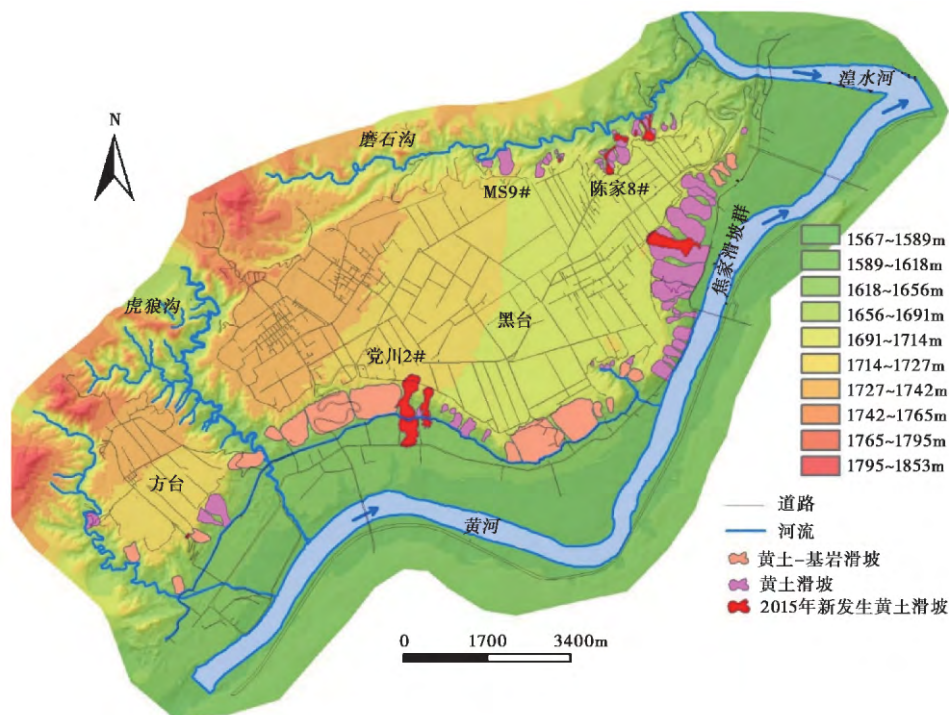


图1 黑方台滑坡分布图

Fig. 1 Heifangtai landslide distribution

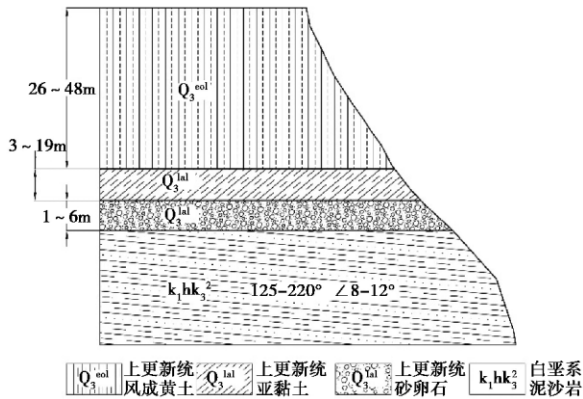


图2 黑方台地层剖面

Fig. 2 Lithologic section in Heifangtai

倾角 $8^{\circ} \sim 12^{\circ}$ (图2)。

20世纪60年代前,黑方台为旱台,台塬边滑坡并不发育,随后由于大量移民定居在此,丰富的黄河水被抽至台塬,至今已有50多年的灌溉史,年灌溉总量 $600 \sim 800 \times 10^4 \text{ m}^3$ (蔺晓燕等,2014)。灌溉产生的大量地表水进入黄土内部,富集在粉质黏土隔水层上方,在上部形成较厚的饱水黄土层,并向台塬边渗出。干燥的黄土可保持高陡斜坡的长期稳定(王恭先等,2004),但在有地下水作用的情况下,黄土强度会随着含水率的增加迅速降低,导致研究区发生了大量的滑坡,其分布与地下水出露也有着密切关系。

1.2 渐进后退式滑坡基本特征

黑方台黄土滑坡可分为黄土-基岩滑坡和黄土内部滑坡两类。黄土-基岩滑坡仅发育在台塬南侧,受底部基岩产状(砂质泥岩,倾向 $125^{\circ} \sim 220^{\circ}$)控制;黄土内部滑坡主要发育在台塬东侧(图1、图3),受地下水分布控制;灌溉下渗的地下水受粉质黏土层(顶面高程西高东低)的阻隔,在黄土内部不断富集,地下水位逐年上升,并由台塬西侧向东侧排泄,前人研究也证实了地下水主要由西向东运移,主要在台塬东侧排泄(武彩霞等,2011;蔺晓燕,2013)。从图3可以明显地看出,焦家段黄土滑坡滑源区平面形态大多呈半圆形甚至近似圆形,滑坡后侧边界严重凹向台塬内,部分滑坡剪出口部位宽度甚至小于后壁宽度,呈半封口状(图3)。这类特殊的滑坡形态究竟是如何形成的,引起了我们的关注。

2 渐进后退式黄土滑坡形成过程

为了查明上述特殊地貌形态滑坡的形成原因,



图3 黑方台焦家黄土滑坡群

Fig. 3 Group of Jiaojia loess landslide in Heifangtai

首先利用多期 Google 影像分析研究了图1中位于黑方台北侧的MS9#滑坡的发展演化过程(图4)。

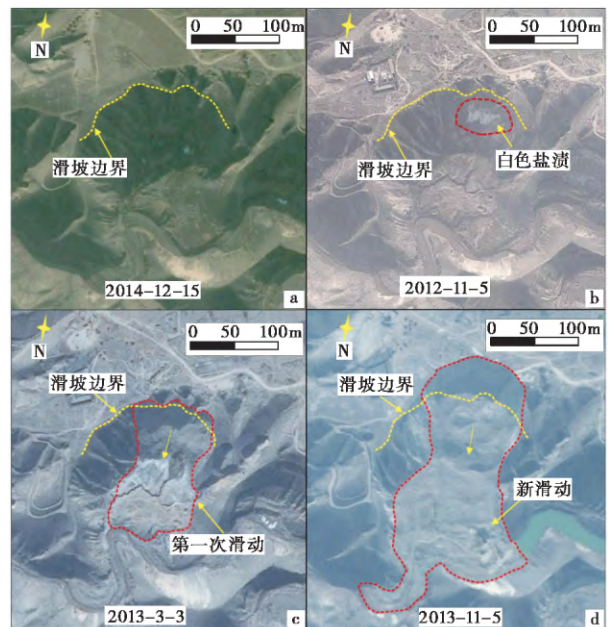


图4 MS9#滑坡滑动前后影像(来源于 Google)

Fig. 4 Before and after sliding images of MS9# landslide (from Google)

MS9#滑坡位于黑方台北侧磨石沟中游,滑坡长250m,宽140m,总体积约 $25 \times 10^4 \text{ m}^3$,为黄土内部滑坡。2004年前该区地下水主要从黄土底部卵石层中渗出,黄土层内地下水并不丰富,台塬斜坡无明显变形破坏发生(图4a)。随着灌溉引发的地下水位逐渐升高,黄土底部也开始出现渗水,冬季会在渗水点附近留下白色盐渍(图4b)。地下水位的不断上升使黄土底部孔隙水压力不断增长,最终达到破坏临界状态(金艳丽等,2007),并由此诱发了黄土滑坡(图4c)。在地下水的继续作用下,2013年11月在已发生滑坡的后侧再次产生滑坡,形成更大、更

深的弧形凹槽(图4d),表现出明显的渐进后退式特点。

事实上,通过现场调查和分析研究表明,近两年发生于黑方台的数个新黄土滑坡同样具有显著的渐进后退式特点和突发性整体破坏特征。典型代表如2015年4月新发生的党川2#滑坡。党川2#滑坡位于黑方台南侧(图1),滑坡长217m,宽176m,滑源区平均厚度约20m,堆积体总体积 $62.65 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在滑坡发生前的2012年7月,在同一部位已发生一个小型滑坡(图5a)。

现场调查分析结果表明,党川2#滑坡总体上经历了两次大的滑动过程,即图5b的第1次滑动和第2次滑动。第1次滑动发生于2015年4月29日早上7时,此滑坡长约20m,平均宽度115m,滑动方向 190° ,体积约 $8 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡后,台塬形成半圆形凹槽,滑坡后壁黄土层底部也有地下水渗出。

第1次滑动约3h后,由于第1次滑坡产生新临空面,底部饱水黄土产生卸荷变形,激发了孔隙水压力的不断增加,早上10点47分出现第2次大的滑动。此次滑动历时仅3min,总体上使原滑坡后壁向台塬内退了130m,形成了长距离的流态状堆积体。通过现场调查和结合高精度航拍影像的解译分析,

以第2次滑动滑源区地形地貌和堆积区物质的接触关系、堆积物运动特征和形态等为依据,又可将第2次滑动进一步细分为3轮次级滑动,这3轮次级滑动在时间上具有先后顺序,空间上表现出不同的地貌形态和堆积特征(许强等,2016),具有显著的渐进后退式滑坡的特点。

3 渐进后退式黄土滑坡成因机理分析

3.1 地下水对滑坡形成的影响

现场调查发现,地下水的分布对渐进后退式黄土滑坡的发生起着重要作用。一方面,某一部位新发生滑坡后,在滑源区所形成的弧形凹槽和新的临空面,将成为一个新的地下水集中排泄点,滑坡体周围一定范围内的地下水都向此汇聚,并在滑坡壁底部呈带状排泄。地下水的集中排泄使新滑坡的滑源区底部地下水异常丰富,并长期处于饱水状态,因此容易导致滑坡的发生;另一方面,一次黄土滑坡发生后,尽管其主体已冲出剪出口运移到坡外,但也往往会在滑源区残留部分黄土,并覆盖在滑源区弧形凹槽的底部。从滑坡壁已排泄出来的地下水受到残留黄土的阻挡,将导致滑源区地下水位的局部上涨。

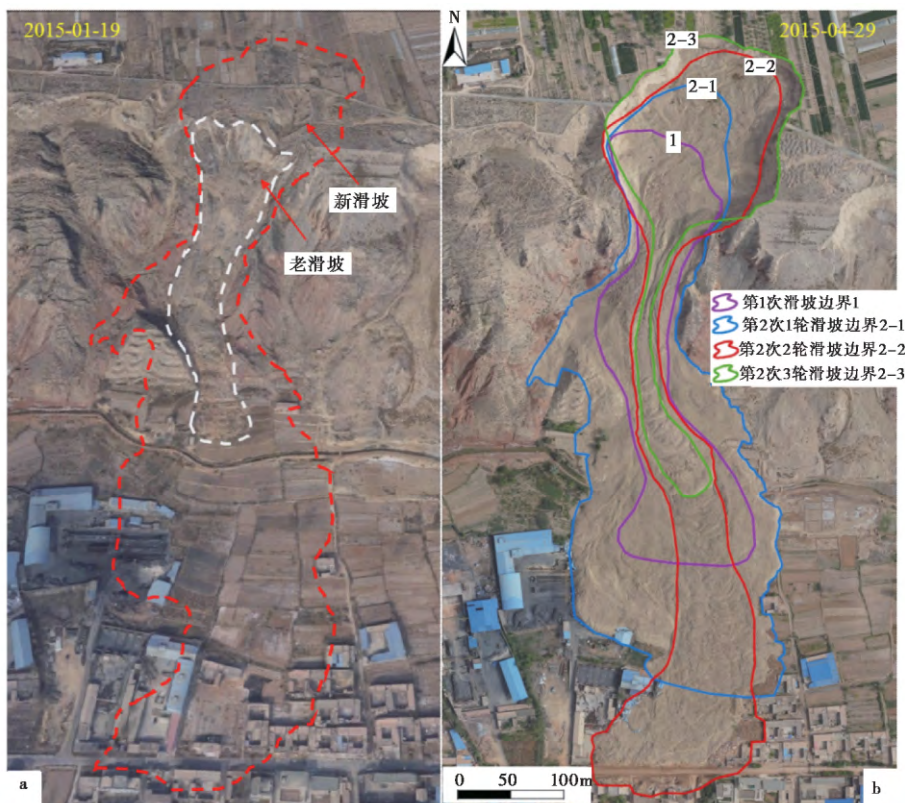


图5 党川2#滑坡前后特征

Fig. 5 Remote sensing images before and after Dangchuan 2# landslide

这种地下水明显差异化雍高的现象在地下水集中渗出的台塬东侧非常常见,如焦家黄土滑坡群,滑坡后壁与两侧的地下水位差超过 10m (图 1 图 6)。图 7 为黑台东北侧陈家 7# 黄土滑坡后壁和两侧黄土剖面含水率现场测试结果。该图表明,黄土剖面含水率总体上随深度的增加逐渐增大,滑坡后壁黄土在高程 1685m 以下含水率基本饱和,最大质量含水率为 35%,而两侧含水率到 1670m 高程才出现明显增高,接近饱和状态,地下水局部雍高达 15m。可见,地下水的局部雍高引发的孔隙水压力上升,是导致滑坡产生突发性破坏的重要原因,这也从宏观上证实了室内试验的结论(金艳丽等,2007,2008)。

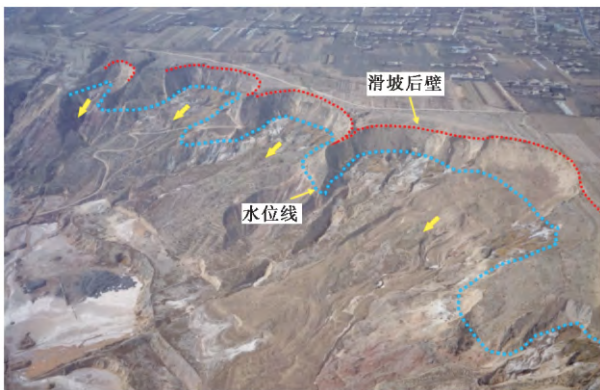


图 6 焦家黄土滑坡地下水位线差异

Fig. 6 Jiaojia loess landslide of water level difference

3.2 渐进后退式黄土滑坡成因模式

黑方台渐进后退式黄土滑坡具有沿已有滑坡后侧多次发生滑坡的特点,其形成过程可概化成图 8 的示意图。由于台塬黄土底部存在较厚的饱水黄土层,地下水的长期浸泡使饱水黄土层变得非常软弱,提供了一个封闭围压下的不排水环境,相当于一个软弱基座支撑着上覆黄土层。受软弱基座效应的影

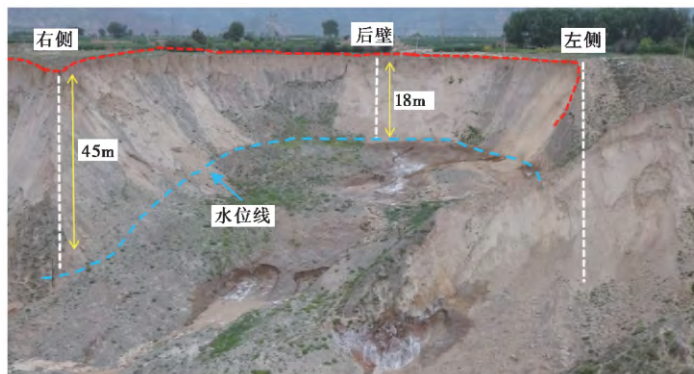


图 7 典型黄土滑坡剖面含水率特征

Fig. 7 Water content value of typical loess landslide

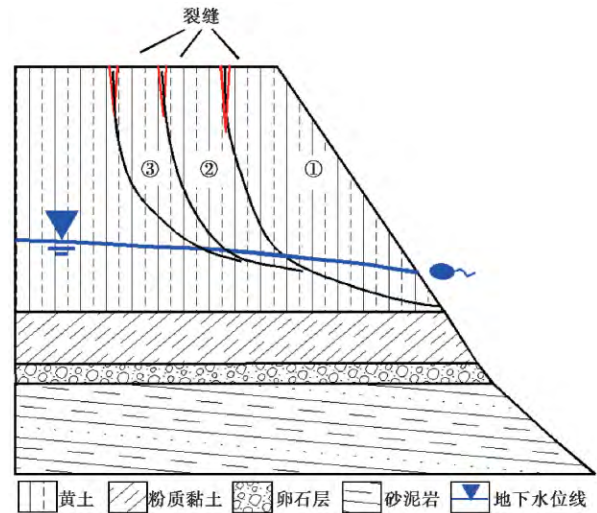


图 8 渐进后退式黄土滑坡滑动过程

Fig. 8 Sliding process of the gradual retreat landslide

响,其上的黄土层在重力作用下在根部产生张应力,并由此形成张裂缝。随着时间的延续,张裂缝不断向下延伸,而地下水作用下的饱水黄土在非强烈扰动下即可产生静态液化,使上部黄土以底部软弱基座为底滑面,顶部拉张裂缝为后侧边界,产生滑坡①,并激发起孔隙水压力引起黄土解体形成流态化堆积。滑坡①发生后,台塬边形成弧形凹槽,形成新的局部临空面。滑坡后缘的应力继续发生改变,并产生新的近直立的拉张裂缝,形成滑坡②,如此往复继续产生滑坡③、④,在同一部位形成渐进后退式滑坡(图 9)。值得注意的是,在实际过程中,往往会形成多级拉张裂缝,并分次沿某级裂缝发生滑坡。

4 结 论

渐进后退式黄土滑坡是黑方台最典型的一类黄土内部滑坡,台塬长期灌溉引发地下水的逐年上升

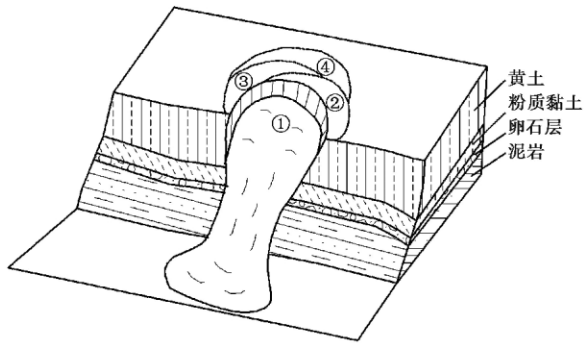


图9 渐进后退式滑坡形成过程

Fig. 9 Process of formation of gradual retreat landslide

是诱发这类滑坡的重要原因。受底部饱水软弱黄土层的软基效应作用,上部黄土在重力作用下不断变形产生连续滑坡。该类滑坡的分布受到地下水发育分布的控制,主要集中在台塬东侧,而黄土底部的地下水在滑坡处的汇流排泄、局部雍高作用使滑坡在同一位置反复发生。

随着今后长期的农业灌溉,研究区深部黄土在地下水的长期作用下,将持续弱化,饱水厚度亦增加,导致滑坡灾害在未来很长时期都处于较高的风险范围,其前期预警,可根据渐进后退式滑坡的基本特征,结合台塬边已有滑坡的渗水和雍高现象进行判识。后续进一步研究其成因机理,对这类滑坡的预警工作具有重要意义。

参 考 文 献

- Hu W, Zhu L F, Sun P P, et al. 2013. An analysis of the time-dependent properties of loess in the formation of landslides at Heifangtai area, Yongjing County, Gansu Province [J]. *Geological Bulletin of China*, **32**(6): 910~918.
- 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.
- Lin X Y, Li T L, Zhao J F, et al. 2014. Permeability characteristics of loess under different consolidation pressures in the Heifangtai platform [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, **41**(1): 41~47.
- Lin X Y. 2013. Failure and motion mechanisms of a rapid loess flowslide triggered by irrigation in Heifangtai Platform, Gansu Province [D]. Xi'an: Chang'an University.
- 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 L, Dai F C, Gong Q M, et al. 2012a. Irrigation-induced loess flow failure in Heifangtai Platform, North-West China [J]. *Environmental Earth Sciences*, **66**(6): 1707~1713.
- Xu L, Qiao X J, Wu C X, et al. 2012b. Causes of landslide recurrence in a loess platform with respect to hydrological processes [J]. *Natural Hazards*, **64**(2): 1657~1670.
- Peng J B, Lin H Z, Wang Q Y, et al. 2014. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards [J]. *Journal of Engineering Geology*, **22**(4): 684~691.
- Wang G X, Xu J L, Liu G D, et al. 2004. The theory and control technique of landslide [M]. Beijing: China Railway Publishing House.
- 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, Liu Y. 1999. A further study on the mechanism of high speed loess landslide in state of creeping and sliding liquefaction [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, **29**(1): 79~82.
- 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, Kwong A K L, et al. 2008. Types and Characteristics of loess Landslides at Heifangtai loess Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, **26**(3): 364~371.
- Xu Q, Peng D L, Qi X, et al. 2016. Dangchuan 2# landslide of April 29, 2015 in Heifangtai area of Gansu province: Characteristics and failure mechanism [J]. *Journal of Engineering Geology*, **24**(2): 167~180.
- Yang J R, Fang D, Cheng Z Y, et al. 2003. Studied Landslide of Heifangtai Platform [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, **17**(5): 172~174.
- Zhang M S, Li T L. 2011. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides [J]. *Journal of Engineering Geology*, **19**(4): 530~540.
- 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.
- Zhang M S, Cheng X J, Dong Y, et al. 2013. The effect of frozen stagnant water and its impact on slope stability: A case study of Heifangtai, Gansu Province [J]. *Geological Bulletin of China*, **32**(6): 852~860.
- Zhao S X, Li H L, Ma D T. 1995. Study on the landslides at the edge of loess terrace in Yanguoxia reservoir region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, **15**(1): 19~23.
- 胡炜, 朱立峰, 孙萍萍, 等. 2013. 甘肃永靖黑方台地区滑坡形成的黄土时效特性 [J]. *地质通报*, **32**(6): 910~918.
- 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.

- 蔺晓燕,李同录,赵纪飞,等. 2014. 甘肃黑方台黄土固结-渗透特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 41(1): 41~47.
- 蔺晓燕. 2013. 甘肃黑方台灌区黄土滑坡-泥流形成机理研究[D]. 西安: 长安大学.
- 彭建兵,林鸿州,王启耀,等. 2014. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报, 22(4): 684~691.
- 王恭先,徐俊岭,刘光代,等. 2004. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社.
- 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,刘悦. 1999. 高速黄土滑坡蠕、滑动液化机理的进一步研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 29(1): 79~82.
- 武彩霞,许领,戴福初,等. 2011. 黑方台黄土泥石流滑坡及发生机制研究[J]. 岩土力学, 32(6): 1767~1773.
- 许领,戴福初,邝国麟,等. 2008. 黑方台黄土滑坡类型与发育规律[J]. 山地学报, 26(3): 364~371.
- 许强,彭大雷,元星,等. 2016. 2015年4.29甘肃黑方台党川2#滑坡基本特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 24(2): 167~180.
- 杨具瑞,方铎,成自勇,等. 2003. 黑方台滑坡灾害研究[J]. 水土保持学报, 17(5): 172~174.
- 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.
- 张茂省,程秀娟,董英,等. 2013. 冻结滞水效应及其促滑机理——以甘肃黑方台地区为例[J]. 地质通报, 32(6): 852~860.
- 赵尚学,李鸿琰,马东涛. 1995. 盐锅峡库区黄土台塬滑坡研究[J]. 水土保持通报, 15(1): 19~23.

2017 年全国工程地质学术年会 (第 1 号通知 征集论文)

会议主题: 岩溶区绿色生态与工程地质

主办单位: 中国地质学会工程地质专业委员会

承办单位: 桂林理工大学

会议议题: (1) 岩溶工程地质与环境 (2) 生命线工程与工程地质 (3) 地下空间开发利用
(4) 特殊岩土体工程地质特性 (5) 地质灾害成因与防控 (6) 海洋和近海工程地质
(7) 工程地质新理论与新技术 (8) 工程地质教育与学科发展 (9) 其他

秘书长: 汤斌 15676384598 Email: gut2017gcdznh@163.com

会议时间安排: 2017年10月中下旬,具体时间见会议第2号通知

会议论文征集: 论文题目请根据大会主题和议题自由选定。会议论文应为未正式发表过的最新成果,篇幅尽量控制在6页以内。部分论文择优在《工程地质学报》和《桂林理工大学学报》正刊发表,其余论文经评审后在《工程地质学报》增刊发表。论文格式请严格按《工程地质学报》编排格式编排,具体见网站: <http://www.gcdz.org>。

论文请通过电子邮件发送到: gcdz@mail.igcas.ac.cn,邮件主题请注明“2017年全国工程地质学术年会投稿”。

论文摘要截止时间: 2017年4月15日 论文全文截止时间: 2017年5月31日

联系地址: 100029 北京朝阳区北土城西路十九号 《工程地质学报》 郭静芸(收)

联系电话/传真: 010-82998121

大会秘书处

秘 书: 周健红 13977328373、宋宇 18877335968

地 址: 广西桂林市建干路12号桂林理工大学(工程地质大会会务组)(541004)

联系电话: 0773-5896348、0773-5895253 电子邮箱: gl2017gcdznh@163.com 传真: 0773-5896348