

黑方台黄土滑坡类型与发育规律

许领¹, 戴福初¹, 邝国麟², 闵弘³

(1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029 2. 香港大学, 香港 999077

3. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 20世纪60年代末期, 为了安置刘家峡、盐锅峡库区移民, 在黑方台建成了提水灌溉工程, 造成地下水位上升, 诱发了大量黄土滑坡。作者于2006-04~2007-09先后对黑方台黄土滑坡进行了野外调查。利用KONOS影像对黄土滑坡进行了遥感解译, 将其与研究区数字高程模型(DEM)进行叠加再现了滑坡场景。基于以上工作, 首先对黑方台黄土滑坡进行了较为系统的分类, 包括黄土泥流、黄土滑动、黄土-泥岩接触面滑坡、黄土-泥岩顺层滑坡和黄土-泥岩切层滑坡。黄土泥流集中发育于野狐狗北部凹地形处; 黄土-泥岩滑坡受基岩倾向控制, 分布于坡向150°~200°的塬边地段。农业灌溉补给地下水的增湿、软化作用是黑方台黄土滑坡的根本诱发原因。对黑方台黄土滑坡机制的研究进行了展望。

关键词: 黄土滑坡; 滑坡类型; 分布规律; 农业灌溉; 黑方台

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

黑方台位于甘肃省永靖县盐锅峡、八盘峡库区, 距兰州市约40 km。20世纪60年代末期, 为了安置刘家峡、盐锅峡水库区的移民, 在黑方台建成了提水灌溉工程。根据王志荣等^[1]2004年研究资料, 黑方台灌溉面积为753 hm², 年提水总量为600~800×10⁴ m³。自1968年以来, 黑方台黄土滑坡频发, 经甘肃日报^[2]、兰州晨报^[3]、甘肃经济报^[4]等多家媒体报道后, 其作为库区移民诱发生态环境问题受到国内外的广泛关注。

上世纪90年代, 对黑方台黄土滑坡进行了一定的研究^[5-8]。但随着问题的深入, 研究难度加大, 近年来黑方台黄土滑坡研究进展缓慢。然而, 黑方台滑坡发生次数和频率却逐年增多, 作者仅2007-09的野外调查较2006-04又发现数起新的滑坡。因此, 本次调查对于黑方台滑坡类型和发育规律的重新认识, 对黑方台滑坡机制的深入研究具有重要意义。

基于黑方台滑坡实地调查及KONOS影像滑坡

解译, 本文较为全面地分析了黑方台黄土滑坡发育类型和发育规律。初次发现了以往研究中未提及的黄土-泥岩接触面滑坡以及黄土-泥岩切层滑坡, 并且确定了研究区72处地貌特征保存较为完整的滑坡场地, 如图1所示。

1 环境地质概况

黑方台地区是祁吕贺山字型构造与陇西旋卷构造的复合部位, 区内新构造运动强烈, 以差异性上升为主要特征, 由于受黄河侵蚀, 形成了多级阶地地貌。黑方台属黄河Ⅳ级基座阶地。盐锅峡镇附近的虎狼沟将黑方台切割成2块(见图1), 西侧面积较小的为方台, 约为2 km², 东侧面积较大的为黑台, 东西长约6 km, 南北宽1~3 km, 面积约11 km²。黑台北部发育有近E-W向的磨石沟, 切割至阶地基座以下, 东侧前缘直接与黄河Ⅱ级阶地相接, 形成高差达120 m左右的斜坡地形。

收稿日期(Received date): 2007-11-20; 改回日期(Accepted): 2008-03-05.

基金项目(Foundation item): 香港研究资助局项目(RGC-HKU 7176/05E)资助。[Supported by Research Grants Council (RGC) of Hong Kong (RGC-HKU 7176/05E).]

作者简介(Biography): 许领(1982-), 男, 汉族, 安徽人, 博士生, 主要研究领域: 黄土滑坡机理及防治技术。[Xu Ling(1982-), male, the Han nationality. Mostly field Loess landslide mechanism and control Technical.] Tel 010-82998319, E-mail: xuy820@163.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

黑方台为典型的黄土塬, 其上堆积有中、晚更新世离石黄土和 马 兰 黄 土。 据 野 外 调 查 及 有 关 资 料^[1], 黑 方 台 地 层 (图 2) 由 新 到 老 可 分 为: ① 上 更 新 统 黄 土 (Q_3^{col}): 灰 黄 色, 成 份 以 粉 粒 为 主, 土 质 均 一、疏 松 多 孔, 厚 度 30~40 m; ② 中 更 新 统 冲 积 物 (Q_2^{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 粉 细 砂 层, 厚 度 在 1~10 m 不 等, 下 部 为 砂 卵 石 层, 厚 度 2~3 m; ③ 白 垩 系 河 口 群

(K_{hk}): 为 紫 红 色—暗 红 色 泥 岩、砂 质 泥 岩, 产 状 约 为 $180\sim 190^\circ\angle 8\sim 22^\circ$ 。

2 黄土滑坡类型

2.1 黄土泥流

如图 2(a)所示, 黄土泥流主滑面发育于均质的 Q_3 黄土层内, 剪切出口位于 Q_2 与 Q_3 接触处。黄土

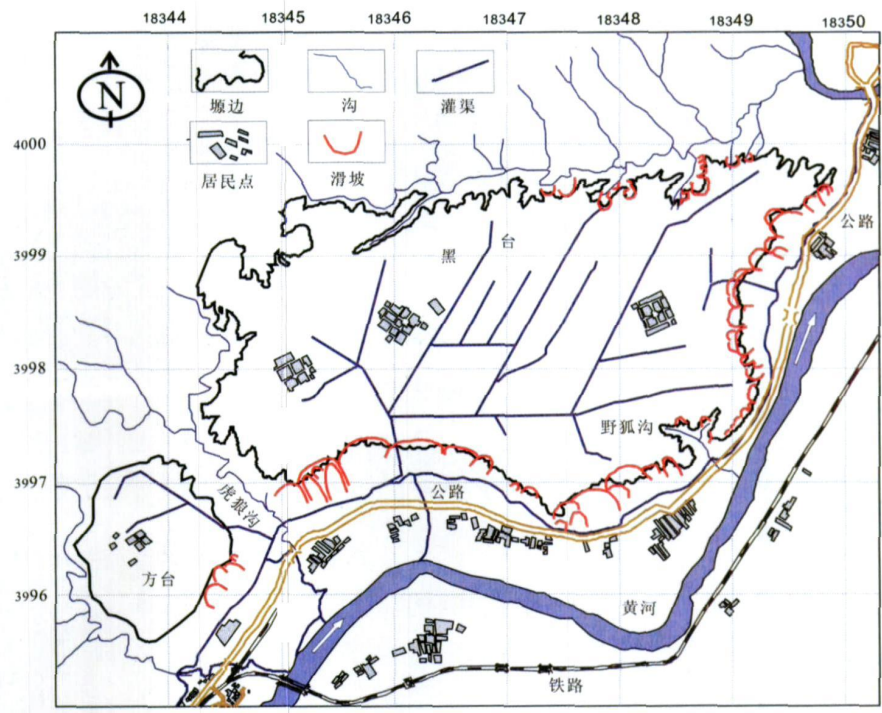


图 1 黑方台黄土滑坡分布图

Fig. 1 Distribution of loess landslides at Heifangtai Loess Plateau

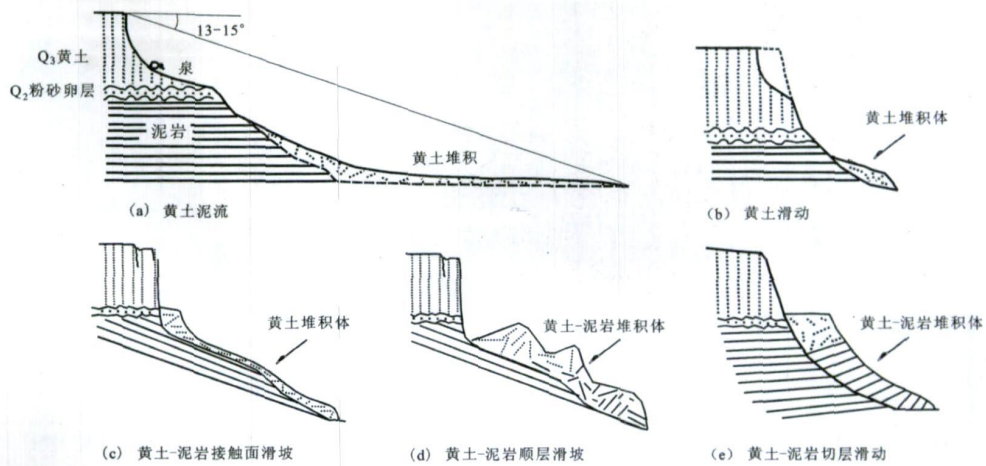


图 2 黑方台黄土滑坡类型示意图

Fig. 2 Forming mode of different type's loess landslide at Heifangtai Loess Plateau

泥流是研究区主要滑坡类型, 占滑坡总数的 41% (图 3)。该类滑坡具有较为规则的弧形后缘和高陡后壁(平均 35 m 左右), 整体呈“座椅”状, 且底部有泉水出露(图 4)。图 5 为黄土泥流滑坡场景及其对应的 KONOS 影像特征, 滑坡启动后即转化为泥流, 呈流态化运动特征, 具有远程高速的特点, 破坏力强、危害大, 见表 1。

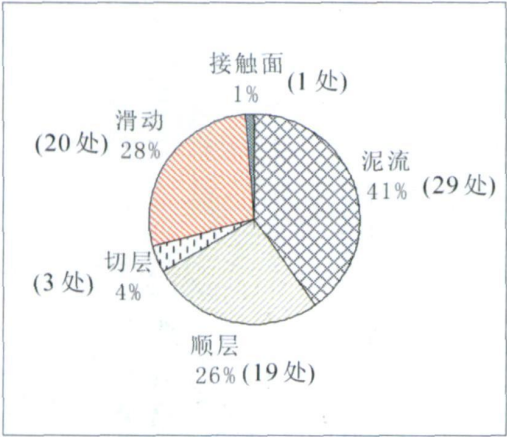


图 3 滑坡类型分布图

Fig. 3 Percentage of different types loess landslides

2.2 黄土滑动

黄土滑动滑坡剪出口发育于非饱和黄土层内, 多在塬边坡脚形成堆积(图 2(b))。图 6 为黑方台北部磨石沟黄土滑动场景。近年来, 随着塬边地质条件的演化, 滑动滑坡数量显著增加, 占研究区滑坡总数的 28% (见图 3), 特征如表 1 所示。



图 4 泥流滑坡后缘特征

Fig. 4 Backscarp features of earth-flow

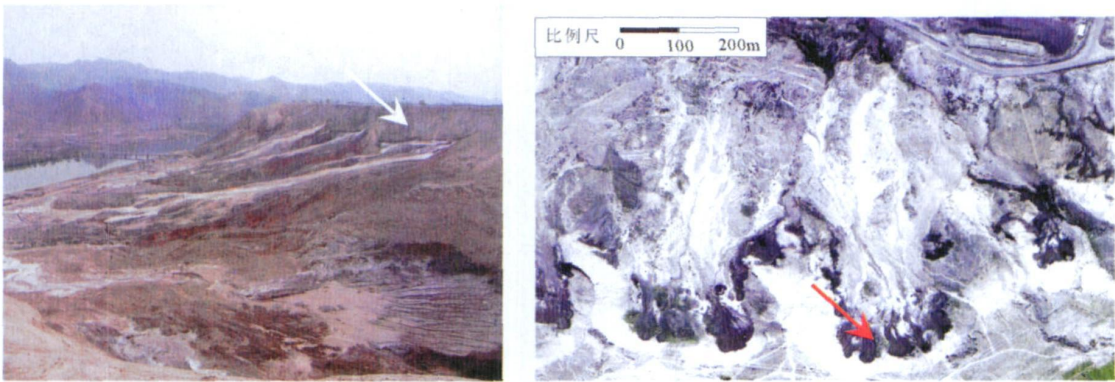


图 5 黑方台桥头黄土泥流滑坡

Fig. 5 Loess earth-flow near the bridge of Heifangtai Loess Plateau

表 1 三类典型黄土滑坡发育特征

Table1 Developing characteristics of three typical bess landslides

滑坡类型	滑面特征	发育规模	活动特征
黄土泥流	发育于黄土层内	几千~几万 m ³ , 除部分滑坡前缘受阻或者后期滑坡改造, 滑距 150~ 615 m	滑动较为突然, 具有高速远程的特征, 滑距坡度 13°~ 15°
黄土-泥岩顺层滑坡	沿倾向坡外的泥岩软弱层面及夹层发育	上 100×10 ⁴ m ³ , 滑距较短, 10~ 100 m 不等, 滑体没有脱离初始滑床	滑速较低, 滑动缓慢, 具有复发性
黄土滑动	黄土层内	数 10 m ³ , 在坡脚形成堆积	短程, 危害较小



图 6 黄土滑动
Fig 6 Loess slide

2.3 黄土 – 泥岩接触面滑坡

如图 2(c)所示, 该类滑坡滑动物质为坡面堆积黄土, 滑面为黄土与泥岩接触面^[9]。图 7 中滑坡为黑方台仅有的 1 处黄土 – 泥岩接触面滑坡, 其滑坡

后缘垂直错落达 5~ 8 m, 主滑方向 185°与该处泥岩倾向一致 (产状为 185°∠ 15°)。

2.4 黄土 – 泥岩顺层滑坡

如图 2(d)所示, 黄土 – 泥岩顺层滑坡主滑方向与泥岩岩层倾向一致, 滑面为泥岩层面, 滑动物质为黄土和泥岩组成。黄土 – 泥岩顺层滑坡是研究区黄土 – 泥岩滑坡的主要类型, 占研究区滑坡总数的 26%, 为泥岩滑坡总数的 86% (见图 3)。

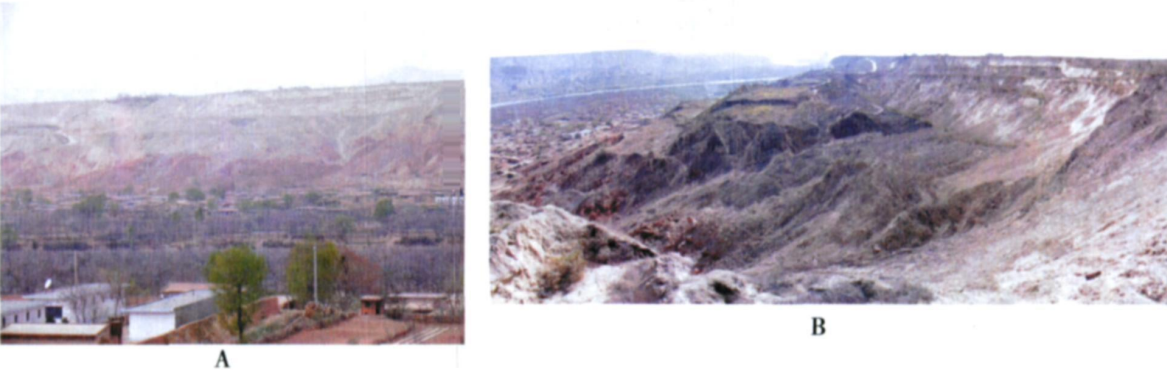
黄土 – 泥岩顺层滑坡具有低速短程特点, 且具有复发性, 见表 1。图 8A、B 为黄茨滑坡照片, 该滑坡于 1996 年滑动后于 2006 年在再次滑动。黄茨滑坡规模较大, 2006 年该滑坡顺层面滑动后, 滑体后部形成多级错落台阶, 如图 8B 所示。

2.5 黄土 – 泥岩切层滑坡

如图 2(e)所示, 黄土 – 泥岩切层滑坡发生在下



图 7 黄土 – 泥岩接触面滑坡和黄土 – 泥岩切层滑坡
Fig. 7 Loess-mudrock interface landslide and loess-mudrock incising landslide at Heifangtai Loess Plateau



A. 整体特征; B. 滑体台阶

图 8 黄茨滑坡
Fig. 8. Huangci landslide at Heifangtai Loess Plateau)

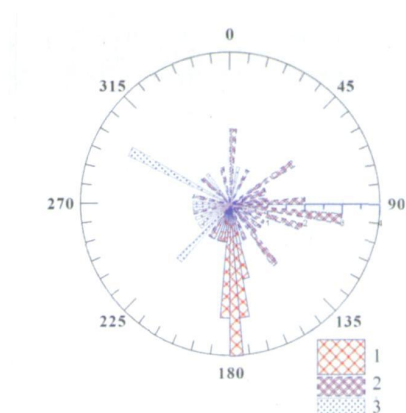
伏岩层向坡内倾或近水平状的斜坡地带,滑动方向与泥岩倾向以高角度相交,滑面与泥岩层面相切。研究区黄土-泥岩切层滑坡仅发育3处,占研究区滑坡总数的4%(图3)。图7 2#滑坡为研究区1较典型的黄土-泥岩切层滑坡,该滑坡两侧出露泥岩地层产状正常,右侧泥岩产状为 $185^{\circ}\angle 15\sim 18^{\circ}$,而该滑坡主滑动方向 110° 。

3 黄土滑坡发育规律

3.1 滑坡空间分布

受滑前地形和地质条件的控制,黄土滑坡空间分布具有一定的规律性。通过 IKONOS影像对不同类型滑坡主滑方向进行了统计(图9),分析了主滑方向与泥岩倾向的关系。利用 IKONOS遥感影像与数字高程模型(DEM)叠加,构建了研究区3维滑坡场景(图10)。

如图10所示,黄土泥流主要沿野狐沟以北凹岸发育,主滑方向集中在 $45^{\circ}\sim 150^{\circ}$ 间(图9)。从地形上看,该处塬面海拔在1700m,为塬面海拔最低点,西南、西北塬面高程都 $>1720\text{m}$ 。由于没有下伏泥岩高程信息,仅此还不能说明泥流发生区为黑方台泥岩上层滞水汇流出口,但是基于以下三点考虑,初步认为泥流发生区为局部地下水排泄出口:①泥流发生区大面积泉水出露而其余塬边则很少见;②泥流大面积发生本身亦说明地下水径流强烈;③泥流发生区的凹地形有利于地下水汇流(径流途径短)。



注:1 黄土-泥岩顺层滑坡;2 黄土泥流;3 黄土滑动

图9 滑坡主滑方向玫瑰花图

Fig. 9 Rose diagram of sliding directions

亦如图10所示,黄土-泥岩顺层滑坡主要发育在野狐沟以南,面向黄河一侧塬边地带,海拔在1735m以上,总体坡向位于 $150^{\circ}\sim 200^{\circ}$ 间。由黄土-泥岩顺层滑坡发生机制可知,该滑坡滑面为泥岩层面,因此主滑方向与泥岩倾向一致。由图9可见,黑方台黄土-泥岩顺层滑坡的主滑方向为 $170^{\circ}\sim 190^{\circ}$,与泥岩倾向($180^{\circ}\sim 190^{\circ}$)基本一致。考虑到塬边坡向对滑坡主滑方向的制约,黄土滑坡在野狐沟以南坡向 $150^{\circ}\sim 200^{\circ}$ 地段发生正是黄土-泥岩顺层滑坡滑动规律的反映。

3.2 滑坡群

研究区黄土滑坡具有群体性分布特征^[10]。如图10、11所示,在黄土泥流集中发生区,黄土泥流左

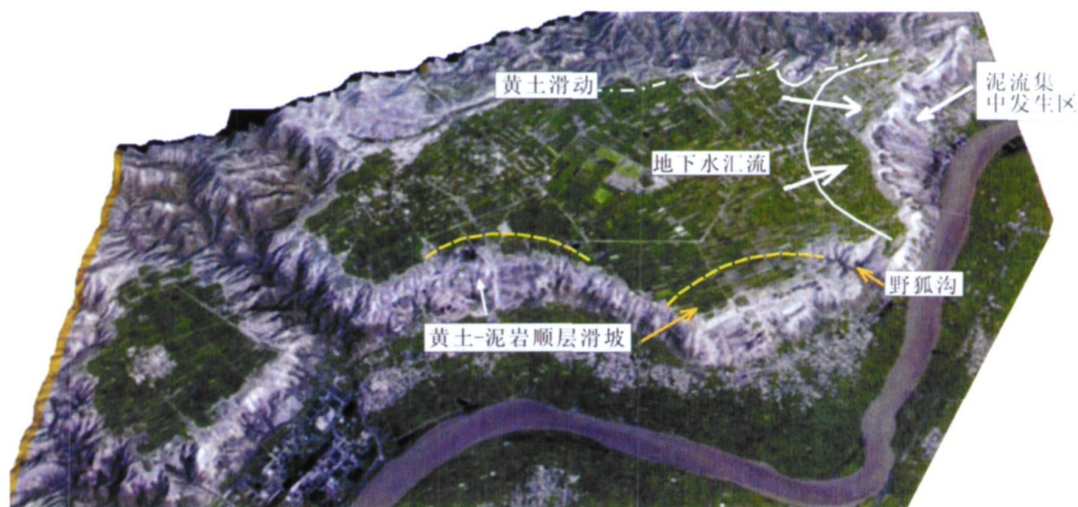


图10 IKONOS遥感影像与DEM叠加场景重建

Fig. 10 3D field scene overlapped by IKONOS image with DEM

右镶嵌,彼此相连,从而形成了典型的黄土滑坡群景观。该处为局部地下水汇流出口,径流强烈,从而造成滑坡集中分布。随着塬边凹地形不断发展,汇水作用将更加明显,同时,前期滑坡的发生,也使得塬边地质条件恶化,因此,随着农业灌溉的继续,塬边地形、地貌条件的演变,滑坡群体性发育特征将越来越突出。

3.3 滑坡演化

黑方台黄土滑坡具有演化特征。滑坡演化是指在时间尺度上发生过滑坡的地方,滑坡后壁再次发生滑坡。图 12A 拍摄于 2007-09 比较 2007-04 调查资料,该处为一起新的黄土泥流滑坡,发生于 2007-04~09 期间。图 12B 为 KONOS 卫星 2004 年拍摄的此处滑坡点影像,可见,该处至少发生 2 起黄土泥流滑坡,具有典型的黄土泥流演化特征,并形成深向塬内的凹地形。

如图 12A 所示,泥流滑坡后缘弧形特征典型,凹向塬内,能够汇集地下水,加大了径流强度。同时,泥流滑坡具有高陡的后壁,坡度达 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$,因此,高陡的后壁以及滑坡后缘对于地下水径流增强作用,是此类黄土滑坡演化的重要机制。

4 黄土泥流成因讨论

黄土泥流因其高速远程特点,且发生突然,危害最为严重,本文对其进行初步讨论。根据饱和黄土具有强烈的应变软滑特征^[11]。综合考虑黑方台黄土滑坡发育条件,将黑方台滑坡成因概括如下:首先,农业灌溉造成黑黄台顶部黄土含水量增加,基质吸力降低,而底部黄土则达到完全饱和;其次,随着地下水位的升高,底部黄土超孔隙水压力产生、发展,但黄土结构完整;最后,随着顶部黄土增湿作用

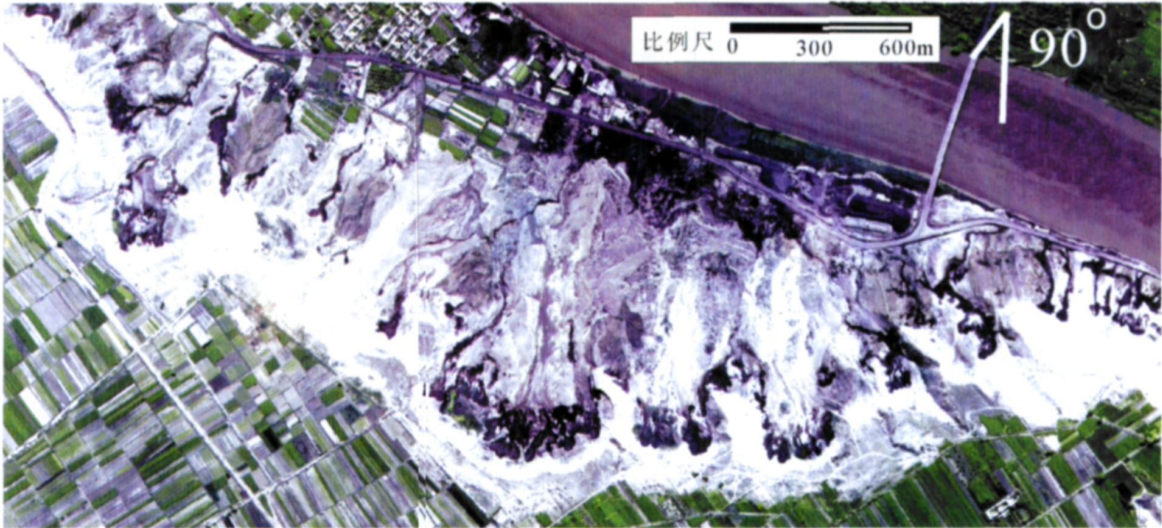


图 11 黄土泥流滑坡群 Ikonos 影像特征
Fig. 11 IKONOS image characteristics of earth-flow group

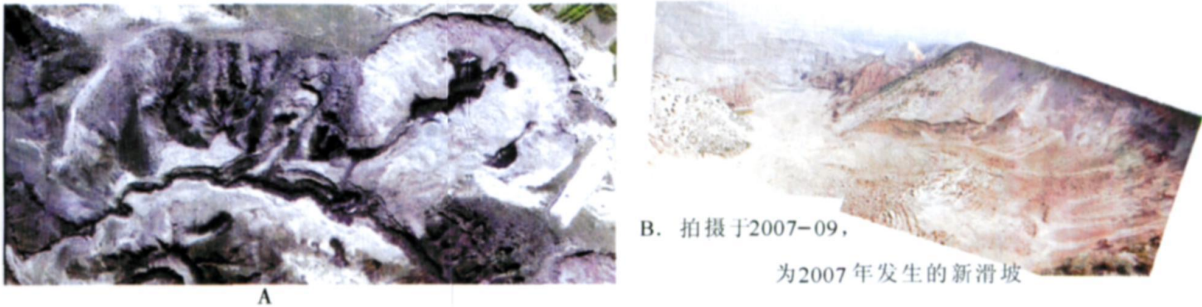


图 12 黄土滑坡演化
Fig. 12 Loess landslide evolvement

的加强以及底部饱水黄土孔隙水压力的增加,黄土结构完全破坏,从而形成黄土泥流。

根据现场实测,黑方台黄土泥流滑距坡度^[12 13]为 $13^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。如果不考虑滑动液化,根据能量守恒,假设重力势能完全克服摩擦阻力做功,则滑距坡度应等于内摩擦角,而实际上饱和黄土内摩擦角要大于 $13^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。因此,泥流滑坡滑动过程中也发生了液化。

5 小结与展望

1. 黑方台黄土滑坡可分为如下 5 类: 黄土泥流, 黄土滑动, 黄土-泥岩接触面滑坡, 黄土-泥岩顺层滑坡, 黄土-泥岩切层滑坡, 其中黄土泥流危害最大、分布范围最大, 是研究区最主要的滑坡类型。

2. 基于 IKONOS 影像滑坡主滑方向统计和现场调查资料, 分析了黄土滑坡发育规律。认为黄土泥流集中发育于野狐狗北部凹地形处; 黄土-泥岩滑坡受基岩倾向控制, 分布于坡向 $150^{\circ} \sim 200^{\circ}$ 的塬边地段。

长期农业灌溉补给地下水是黑方台黄土滑坡根本的诱发因素。土的力学性质决定于其应力路径^[14 15], 针对性开展黑方台非饱和-饱和黄土增湿路径试验, 模拟泥流滑坡发生机制, 应成为今后该类型黄土滑坡研究重点; 同时, 对于黄土-泥岩顺层滑坡开展泥岩蠕变力学实验研究应是一项重要的工作。

参考文献 (References)

- [1] Wang Zhi-rong, Wu Wei-jiang, Zhou Zi-qiang. Landslide induced by over-irrigation in loess platform areas in Gansu Province[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(3): 43~47 [王志荣, 吴玮江, 周自强. 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, 2004, 15(3): 43~47]
- [2] <http://www.gansudaily.com.cn/20031029/4/2003A29A00211002.htm>, 甘肃日报, 2003/10/19
- [3] <http://kcb.big5.gansudaily.com.cn/system/2006/05/15/010031228.shtml> 兰州晨报, 2006/05/15
- [4] http://gsjhb.big5.gansudaily.com.cn/system/2006/06/29/010062892_02.shtml 甘肃经济日报, 2006/06/29
- [5] Wang Jia-ding. A mechanism of high-speed loess landslides Lique-

- faction of saturated loess due to creep [J]. *Geological Review*, 1992, 38(6): 532~539 [王家鼎. 高速黄土滑坡的一种机理——饱和黄土蠕动液化; 地质论评 [J]. 1992, 38(6) 532~539]
- [6] Wang Jia-ding. A further study on the mechanism of high-speed loess landslide in state of creeping and sliding liquefaction [J]. *Journal of Northwest University*, 1999, 29(1): 79~82 [王家鼎, 刘悦. 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), 1999, 29(1): 79~82]
- [7] Zhao Shang-xue, Li Hong-lian, Ma Dongtao. Study on the landslides at the edge of loess terrace in Yanggouxi reservoir region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1995, 15(1): 19~23 [赵尚学, 李鸿琰, 马东涛. 盐锅峡库区黄土台缘滑坡研究 [J]. 水土保持通报, 1995, 15(1) 19~23]
- [8] Xu Junling. Recent study on the presumption of slide valve and movement character of rapid landslides [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1997, 8(4): 23~27 [徐峻岭. 再论高速滑坡的闸门效应及其运动特征 [J]. 中国地质灾害防治学报, 1997, 8(4): 23~27].
- [9] Wu Wei-jiang, Wang Nian-qin. Basic types and active features of loess landslide [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2002, 13(2): 36~40 [吴玮江, 王念秦. 黄土滑坡的基本类型与活动特征 [J]. 中国地质灾害与防治学, 2002, 13(2): 36~40].
- [10] Le zhen, Han Qing-xian. Group-distribution features of Loess Plateau [A]. In 1987 National Landslide Technicality Symposium Paper's' Volume of C]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Sciences & Technology, 1989, 123~128 [勒泽先, 韩庆宪. 黄土高原滑坡分布的“群体性” [A]. 1987年全国滑坡学术讨论会滑坡论文选集 [C]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989, 123~128]
- [11] Jin Yan-li, Dai Fu-chu. The mechanism of irrigation-induced landslides of loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(10): 1493~1499 [金艳丽, 戴福初. 灌溉诱发黄土滑坡机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1493~1499]
- [12] Corninias J., The angle of reach as a mobility index For small and large landslides [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33, 260~271
- [13] R. Fell, G. Hunter. Travel distances angle for rapid landslides in constructed and natural soil slopes [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, 40, 1123~1141
- [14] Brand E. W. Some thoughts on rain-induced slope failures [A]. In Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. Stockholm [C]. 1981, 3, 373~376
- [15] Anderson, S. A. & Rimer M. F. Collapse of saturated soil due to reduction in confinement [J]. *J. Geotech. Engng Div.*, 1995, 121(2): 216~220

Types and Characteristics of Loess Landslides at Heifangtai Loess Plateau, China

XU Ling¹, DAI Fuchu¹, A . K . L . KWONG², M IN H ong³

1. *Institute of Geology and Geographic, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;* 2. *University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;*

3. *Institute of Rock and Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)*

Abstract The Heifangtai Loess Plateau, which has a total area of 13 km^2 , is located in Gansu Province, China. Groundwater table in this loess plateau have been significantly raised since 1968 when the loess cover began to be artificially irrigated. Up to now, landslide events at 72 sites have occurred not only resulting in large economic loss but also exacerbating water and soil erosion that reduced plateau area badly. After several field visits at Heifangtai Plateau from April 2006 to September 2007 and landslide Interpretation using KONOS image, the following types of loess landslides there can be recognized: loess slide, loess earth-flow, loess-mudrock interface landslide, loess-mudrock bedding landslide and loess-mudrock incising landslide. The paper analyzed the developing characteristics of loess landslide based on the three dimension field scene overlapped by KONOS image with DEM and the statistics for sliding directions. It is concluded that loess earth-flow took place along concave-terrain edge, north of Yehugou gully and loess-mudrock bedding landslides, controlled by mudrock incline of $180^\circ \sim 190^\circ$, developed at sites which slope directions between $150^\circ \sim 200^\circ$. The most important mechanisms of the loess landslides were wetting and softening induced by agricultural irrigation. In the last part, some research aspects for the future also been discussed.

Key words loess landslide, landslide types, distribution, characteristics, agricultural irrigation, Heifangtai Loess Plateau