

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0122

严东东,马建秦,高重阳,等.黄土塬滑坡地貌演化与水文过程响应机理研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(5):156-165.
YAN D D, MA J Q, GAO C Y, et al. The response mechanism of geomorphological evolution and hydrological process in Loess Platform[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 156-165. (in Chinese)

黄土塬滑坡地貌演化与水文过程响应机理

严东东¹, 马建秦¹, 高重阳², 毛峰³, 樊柱军³

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 西安交通大学, 西安 710049;
3. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 西安 710075)

摘要:中国黄土高原地区农业灌溉面积较大,使得地下水位显著上升。在甘肃省黑方台地区,因灌溉引起的黄土滑坡灾害达几十起,通过野外调查和数值模拟对黑方台滑坡灾害与地下水的响应规律进行研究。黑台地区滑坡具有明显的地貌演化特征,在此基础上,建立黑台水文地质数值模型。模拟结果表明,黄土泥流型滑坡的发生会影响地下水系统的边界条件,通过不断扩大的渗透面增加黑台地下水系统的排泄量,同时,因为塬面面积的变小进而减小地下水系统总的补给量。在给定的补给量的条件下,黑台地下水位首先随着滑坡的持续发生达到峰值,然后降低到接近2004年的水位,达到近似稳定状态,此时滑坡的累计体积达到了4 600万 m³。考虑到2004年的地下水位仍然高到足够引发泥流型滑坡灾害,此时黑台的塬面面积将会减少至7.8 km²以下。如果不采取有效的措施,滑坡还会继续发生,研究区的滑坡灾害风险将会持续很长时间。

关键词:黄土滑坡;水文平衡;地貌演化;数值模拟;黄土塬;黑台

中图分类号:P641 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The response mechanism of geomorphological evolution and hydrological process in Loess Platform

YAN Dongdong¹, MA Jianqin¹, GAO Chongyang², MAO Feng³, FAN Zhujun³

(1. School of highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Northwest Electric

Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China)

Abstract: Due to the large area of agricultural irrigation in the Loess Plateau, the groundwater table in the plateau has been greatly increased and a large number of landslides have been induced. In the Heifangtai region of Gansu Province, dozens of loess landslides caused by irrigation has occurred. This paper studies the response law of landslide hazard and groundwater in Heifangtai region through field investigation and numerical simulation. The landslide in Heifangtai region has obvious geomorphological evolution characteristics. On this basis, the numerical model of Heitai platform hydrogeology is established. The simulation results show that the occurrence of loess landslide will affect the boundary conditions of the groundwater system, and increase the drainage of the Heitai groundwater system through the expanding seepage face. At the same time, because the irrigated area becomes smaller, the total recharge of the groundwater system is reduced. For a fixed recharge amount, the groundwater phreatic level first peaked with the continuation of the landslide, and then decreased to a level close to the 2004 level, and the cumulative volume of the landslide reached $4\,600 \times 10^4 \text{ m}^3$. Considering that the groundwater level in 2004 is still high enough to cause landslides, the area of the Heitai will be reduced by less than 7.8 km^2 . If effective measures are not taken, the landslide will

收稿日期:2019-03-13 修回日期:2019-04-26 网络出版时间:2019-05-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20190508.1805.004.html>

基金项目:国家自然科学基金(41472276)

作者简介:严东东(1993—),男,陕西商州人,主要从事岩土工程方面研究。E-mail:yan_dongg@163.com

通信作者:马建秦(1969—),男,副教授,博士,主要从事岩土工程方面研究。E-mail:majq@gl.chd.edu.cn

continue to occur and the risk of landslide disasters in the study area will continue for a long time.

Key words: loess landslide; hydrological balance; landform evolution; numerical simulation; Loess Platform; Heitai

中国黄土分布面积约 64 万 km²,其中一半分布在黄土高原^[1]。由于黄土特殊的性质,其在渗水条件下极易引发滑坡灾害。在黄土地区,地震、降雨和农业灌溉都会引发大量的滑坡灾害^[2-5],其中降雨和灌溉引起的黄土滑坡通常具有滑动速度快,滑移距离远的特点。例如 2013 年延安的高强度降雨引发了数千个黄土浅层滑坡。在陕西省泾阳南塬,甘肃省永靖县黑方台,灌溉诱发了几十个滑坡^[6-9],国内学者彭建兵、许领、许强等人针对黄土塬边灌溉诱发的黄土滑坡进行了较为全面的研究^[10-12],但是这些研究成果多是集中在滑坡特征和滑坡机理之上的。

随着滑坡的不断发生,学者们认识到黄土滑坡发生后,相比较于滑坡体侧缘边坡,滑坡形成的凹地形的后缘具有更高的危险性,因此在滑坡后壁往往会形成新的滑坡,从而使得滑坡整体呈现出地貌演化的特点^[13-14]。黄土塬浅层地下水位集中在凹形地形中导致滑坡体后缘水位增幅比侧缘更快。然而,上述研究主要集中在单个滑坡场地。滑坡灾害的复发表明老滑坡的后缘比其侧边坡更容易发生滑坡。此外,未来泥流型滑坡的复发还要看黄土层内是否仍有较高的地下水位,这取决于灌溉强度与整个黄土塬的水力边界之间的关系。

近年来,黄土泥流型滑坡的发生频率越来越高^[15]。水土流失是黑方台黄土塬所面临的严重问题,目前黑方台滑坡复发表明该地区仍存在较高的滑坡风险。那么黄土塬是如何发展的,它是否会消失?顶部宽阔平坦的黄土塬的土地是非常宝贵的。考虑到地下水位上升是泥流型滑坡的诱发原因,因此评估地下水对泥流滑坡的响应对于上述问题的解答就显得非常重要。这对于预估黑方台滑坡灾害的长期风险也是一项非常重要的工作。因此,本研究通过数值模拟方法研究了地下水水位与黑方台滑坡灾害的响应规律。

1 研究区概况

黑台位于甘肃省兰州市以西 40 km 处,由于青藏高原的剧烈隆起,早期的沟谷和黄河被侵蚀至更新世前期的基岩而形成河流阶地。在上更新世,西北季风带来黄土颗粒沉积在河床沉积物上,日积月累形成了现在的黑台和方台黄土塬^[1,16],其中黑台面积约为 12 km²,方台面积仅有 1.7 km²,因为多年

以来滑坡灾害多发生在黑台黄土塬边地带,因此本文以黑台为研究对象(图 1),针对黑台建立水文地质模型。



图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the Heifangtai loess platform

黑台为典型的黄土塬地貌,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],黑台地层由老到新可分为 3 种。(1)白垩系河口群:为紫红色-暗红色泥岩、砂质泥岩。(2)中更新统冲积物:可分为 2 层,上部为厚 4~17 m 的黏土层,下部为卵石层,厚度约 2~5 m。(3)上更新统黄土:灰黄色,成分以粉粒为主,土质均一旦疏松多孔,厚度约为 25~50 m(图 2)。透水性差的黏土层构成了上更新统黄土的底部隔水层,因此以黄土层底部作为模型的下边界,只对黄土层水位进行数值模拟。

近年来在黑方台发生的所有泥流型滑坡几乎都位于过去的滑坡地点。图 3 显示了沿黑方台塬边的一些典型的滑坡,由于滑坡复发,形成凹形地貌。值得注意的是,在滑坡的后缘陡壁处,地下水渗流面非常清晰,远高于下伏的黏土层。图 4 显示了研究区党川滑坡群的遥感图像,可以发现它在区域尺度或单个滑坡场地中都具有明显的演化过程。随着滑坡的继续发生,地下水排泄面积将变得越来越大,因此,滑坡发生后的凹形地形有助于地下水的排出。如图 3、4 所示,将黑台斜坡地带作为水文过程数值模拟中的渗流排水边界。

长期灌溉导致的地下水位上升是黑方台黄土滑坡频发的原因^[9,11-12],黄土具有强烈的应变软化行为,随着地下水位的上升,黄土层强度损失可能首先在排水条件下触发,在黄土层的下部饱和部分导致土壤的不排水荷载,在上部非饱和黄土层施加的重力荷载作用下,最终引起不排水的剪切破坏^[11],所以说,地下水响应是评估未来滑坡风险的决定性因

素。如前所述,具有相对低渗透性的粉质黏土层可以作为黑台潜水层中的隔水层。因此,在长期以来

的灌溉条件下,黄土层中的地下水位抬升是滑坡发生的主要因素。



图 2 黑台地层剖面

Fig. 2 Lithological profile of Heitai



图 3 黑台泥流型滑坡现场

Fig. 3 The scene of flowslide in Heitai

2 数值模型

研究区滑坡灾害的发生与地下水水位有着密切的联系,黑台滑坡风险评价的关键是如何建立地下水与滑坡发生之间的响应规律。研究区内滑坡灾害密度较大,利用遥感影像分析多期次滑坡形成的地貌演化规律,并以此来预测未来黄土泥流型滑坡发生后塬边斜坡地貌的状态。基于预测的未来的地貌演化特征,在给定的塬区农业灌溉强度下,利用数值模拟软件开展水文过程与地貌演化的规律研究。因此选择黑台建立如图 5 所示的水文地质数值模型。

2.1 起始条件

水文过程模拟的初始条件非常重要,其决定了模拟结果的准确性和可靠性。20 世纪 60 年代初期,黄河流域修建了刘家峡,盐锅峡水坝和水电站,大量居民被安置在黑方台。西北气候干旱,灌溉是开展农业生产必不可少的措施。黑台塬面的农业灌溉始于 1968 年。20 世纪 80 年代的年灌溉量为 $7.2 \times 10^6 \text{ m}^3$,而 20 世纪 90 年代为 $5.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。2008 年和 2009 年的灌溉用水量增加到 $8.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。在此之前,黑方台地区的唯一的地表水来源为降雨,因此模拟的起始条件是年平均降雨量为 $276.8 \text{ mm/a}^{[18]}$ 。

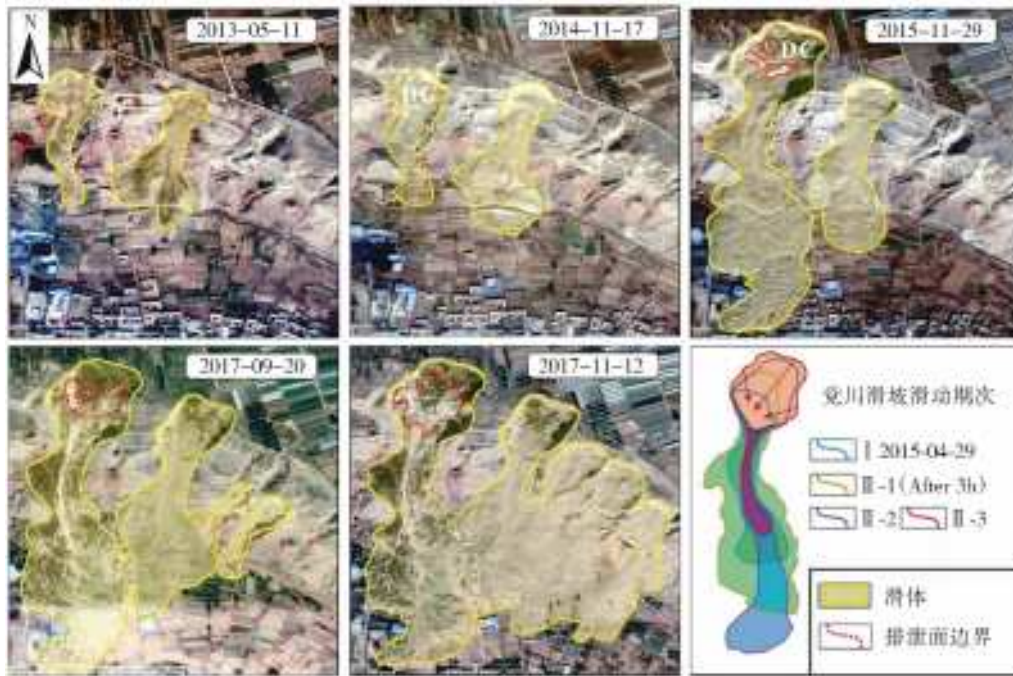
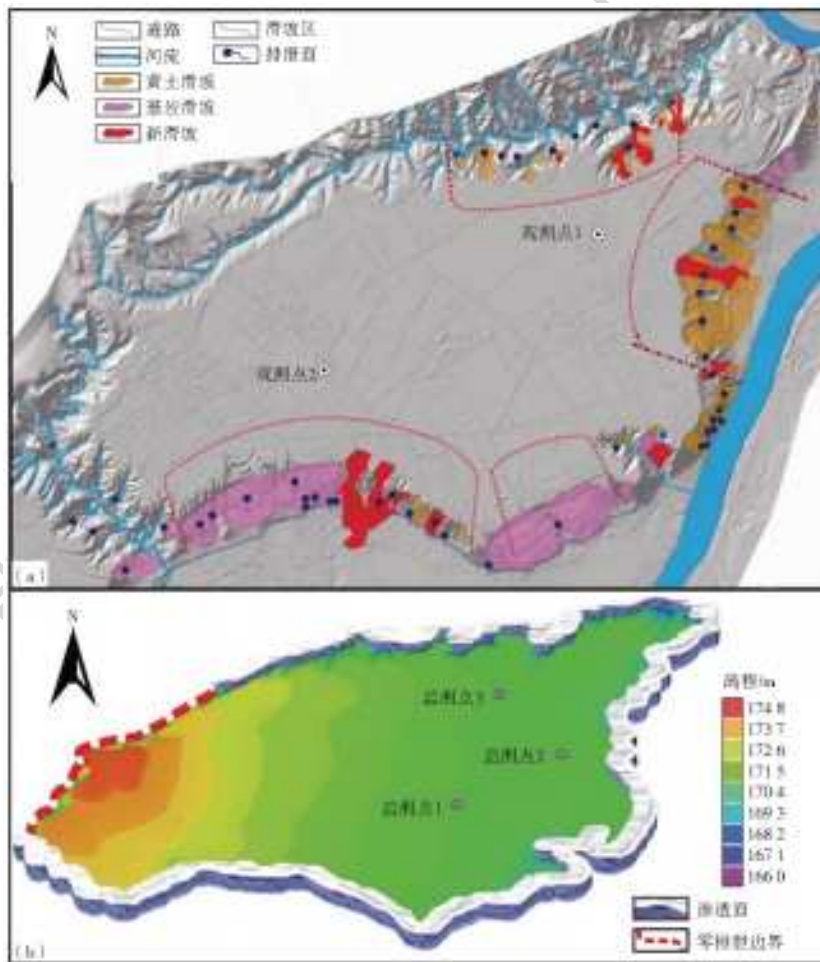


图4 黑方台滑坡群遥感影像

Fig. 4 Remote sensing image of a loess flowslide group in the Heifangtai platform



注:(a)图中观测点为黑方台朱王村和陈家村的现场水位监测点,(b)图中的监测点为2010年之后,模型在计算不同地形条件下水位响应时的模型水位监测点。

图5 (a)黑台滑坡分布^[17] (b)黑台黄土地下水数值模型

Fig. 5 (a) Distributions of landslides in Heitai^[17]; (b) numerical model for the groundwater simulation in the Heitai loess platform

2.2 边界条件

地下水系统平衡受其边界条件控制。黄土滑坡的密集发生改变了塬边地貌,滑坡形成的渗透面变大的同时导致了台塬面积较少,从而导致农业灌溉水量的较少,但是地下水的排泄量反而增大。滑坡灾害的不断发生总体抑制了地下水位的上升。

在数值模拟中,将黄土层底部的黏土层作为不透水层,黑台西北部与北山相连,被磨石沟轻微切割,此外,黑台台塬区域地下水水流为自西向东流动,其受下覆黏土层地形控制。综上,将西北部与山相

连的边缘设定为零流量边界,其他塬边边坡设为自由渗透边界,研究区的地下水来源全部为降雨和农业灌溉,因此将台塬上表面概化为补给边界。

2.3 模型计算参数

黄土的水平 and 垂直渗透系数分别为 2.32×10^{-2} m/d 和 0.12 m/d。黄土的孔隙度为 0.45^[18]。此外,使用土壤 SWCC(土壤水特征曲线)曲线计算不饱和渗透模拟所需的参数。通过 Fredlund 压力板仪器测量从黑方台取回的原状黄土。使用 Van-Genuchten 模型式(1)拟合测量数据。拟合曲线见图 6。

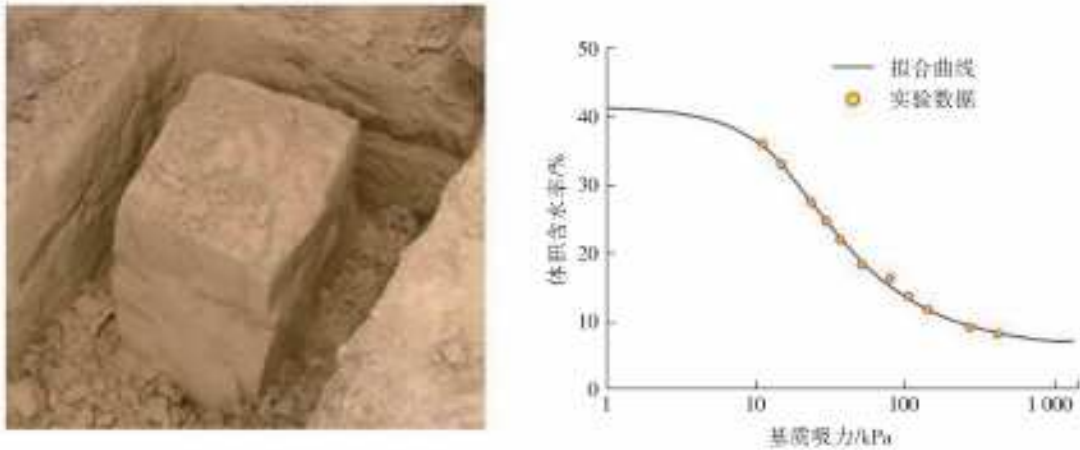


图 6 原状黄土样及土水特征曲线(SWCC)曲线

Fig. 6 Undisturbed soil sample and soil water characteristic curve

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (1)$$

式中: θ_w 为体积含水量; θ_r 为残余含水量; θ_s 为饱和含水量; ψ 为基质吸力; α 、 n 和 m 为拟合系数,并且 $m = (n-1)/n$ 。

选择 2010 年至 2011 年一个完整水文年来验证建模。年内降雨和灌溉情况见表 1,模型中使用的计算参数见表 2。图 7 显示了模拟结果与观测数据

较好的一致性。地下水位在模拟和现场观测数据之间上升的一致结果清楚地表明,该地下水流域模型可用于评价黑方台台塬地下水对黄土泥流型滑坡的响应。其次当采用模年内时段灌溉量和采用年内均匀灌溉强度的曲线表明不同补给条件概化下,对年内水位趋势有影响,但是针对年际水位变化幅度没有影响,考虑到模拟时间跨度 40 a,因此在后续的模拟中采用年均灌溉强度作为补给条件。

表 1 验证期内降雨量与灌溉量

Tab. 1 Rainfall and irrigation schedule in validation period

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降雨量 /mm	0	0	8.2	16.4	26.7	41.1	59.7	69.8	39.3	16.3	1.8	0
灌溉强度 / $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^2)$	0	0	0	0.09	0.14	0.15	0.16	0.17	0.13	0	0.16	0

表 2 模型计算参数

Tab. 2 Model calculation parameters

参数	K_{xx}	K_{yy}	K_{zz}	n	S_s	S_r	α	N
黄土层	0.024	0.024	0.120	0.4	0.45	0.03	2	1.8

3 结果和分析

水文过程模拟可分为三个阶段。第一个是基于

本研究中建立的数值模型的稳态模拟。在稳态模拟中,只考虑了黑方台的降雨入渗。模拟结果可以显示 1968 年灌溉工程建设前的地下水位分布。然后,将稳态模拟的地下水位作为 20 世纪 70 年代至 2010 年瞬态模拟的初始条件。通过瞬态模拟,了解黑台地下水在农业灌溉条件下的上升情况。第三部分是利用 2010 年的地下水位作为模拟黑方台地下

水对黄土滑坡响应研究的起始条件。由于滑坡发生改变了黑方台台塬的地貌条件。因此,本研究利用滑坡的多期性演化特征,预测未来黄土台塬地貌和坡面地形;在地形预测的基础上,模拟了未来不同地形地貌条件下的地下水响应。

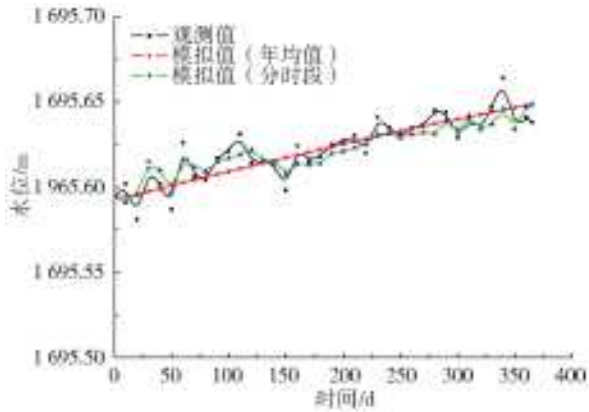


图7 观测数据验证数值模型

Fig. 7 Validation of the numerical modelling using observation data

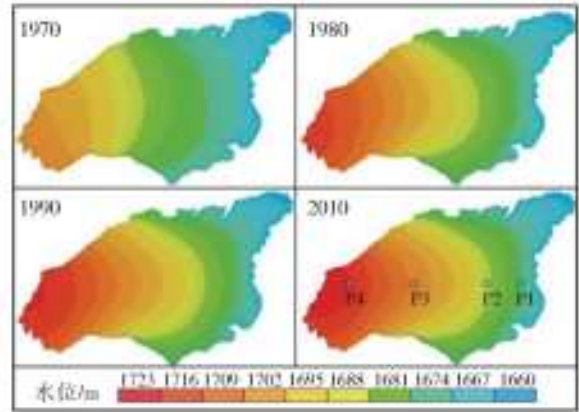
3.1 灌溉前的初始地下水位

起始地下水位是开展灌溉条件下地下水水流场模拟的前提。在20世纪70年代之前,该地区没有灌溉,地下水补给主要是由大气降水引起的。通过稳态模拟得到了20世纪70年代以前研究区的地下水分布。可以看出,饱和区仅存在于黑台东部的中心。塬边基本上没有地下水渗出。这与20世纪70年代之前少有发生滑坡事件相一致,即斜坡在没有灌溉的情况下在自然条件下处于稳定状态。

3.2 1970—2010年水动力场

图8显示了不同时期的瞬态地下水位分布。研究区20世纪70年代、80年代、90年代和21世纪初的平均灌溉量分别为600万、722万、576万和554万 m^3/a ^[19]。从1970年到1980年,地下水位增加了约14 m,而黑台西部则增加了更多。从1980年到2010年,地下水位的涨幅变得越来越小,水位上升速率越来越慢。图9显示了监测点位1970—2010年的地下水位。台塬东部的地下水位比西部台塬增加得快。这主要是由于黑台底层黏土层地层西高东低,使得地下水向东流动。该模拟结果也与观测结果相一致,即黑台东部塬边地带带有大量的泉水渗出。图10显示了黑方台地下水位的一些现场观测数据,监测孔的位置见图5(a),监测时间为2010年6月至2011年3月和2012年11月至2013年4月。前述模型中2010年模拟水位的上升幅度降至0.15 m/a以下,在图9中显示近水平的曲线,在图10中2010年现场观测水位的上升幅度

也近似为0.15 m,但是由于模型中年灌溉量采用年均值,因此模拟水位没有显示出年内波动性。观测时间个模拟时间没有完全重叠,但是在整体年际变化趋势上,模拟水位和观测水位具有良好的一致性。



注:图中点位为模型1970—2010年水位变化观测点。

图8 黑台历史地下水流场

Fig. 8 History of groundwater table in Heitai

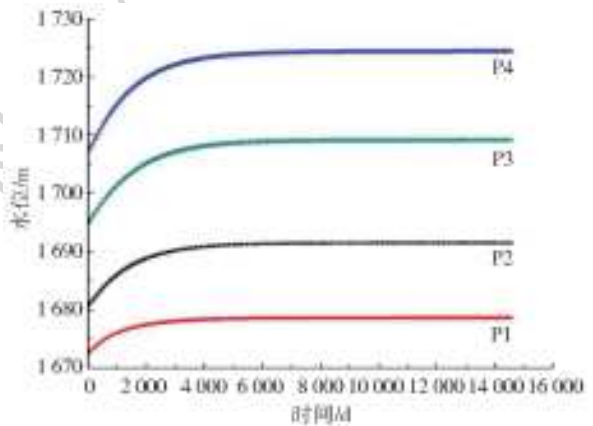


图9 1970—2010年监测点位水位变化

Fig. 9 Increasing groundwater table at the monitoring wells during 1970-2010

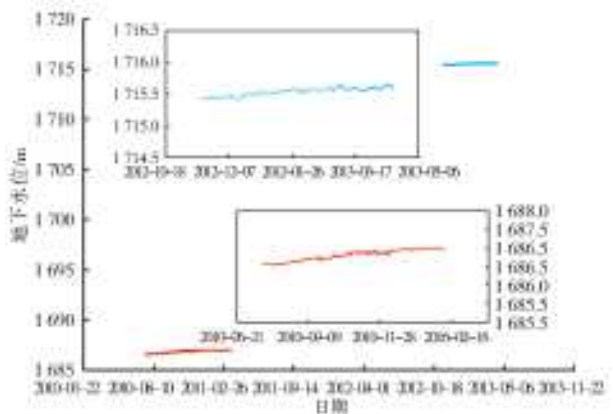


图10 黑台现场监测孔数据

Fig. 10 Field observation data in the Heitai platform

3.3 水文过程与滑坡灾害响应

3.3.1 历史滑坡体积与水位变化

20世纪80年代至今,黑方台发生了几十次滑

坡。图 11 显示了从文献中收集的累积滑坡体积和滑坡数量的统计图^[20]。1990 年至 1995 年期间出现了黄土滑坡危险的最高状态。从 2005 年到 2010 年,为另一个滑坡灾害较为严重的时期,滑坡数量及其累积体积显著的增加。虽然滑坡频率随时间变化,但滑坡灾害越来越严重。图 12 显示地下水位的上升速度随着滑坡的持续发生而减缓,表明早期滑坡的演变对当前边坡稳定性的潜在影响。

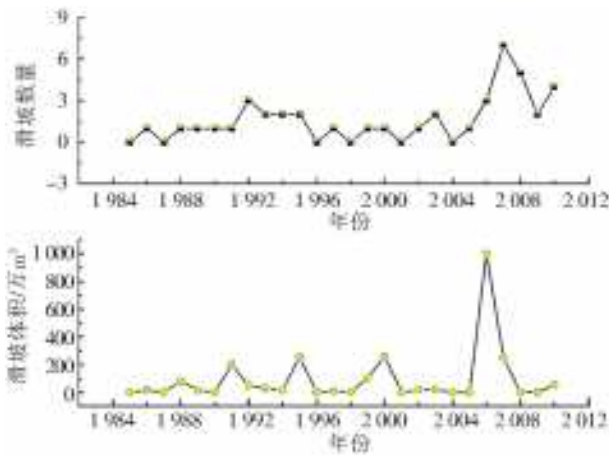


图 11 1985—2010 年的泥流型滑坡数量与体积
Fig. 11 Flowslide number and their total accumulative volume during 1985-2010

用许领^[15]等人研究的滑坡的演化规律预测未来滑坡地貌,从而建立数值模拟的物理模型。由于黄土泥流型滑坡的多期性,作者预测了黑台的两个演化过程(图 13)。滑坡堆积体构成了滑坡后缘与早期斜坡坡脚之间的过渡。根据现场调查的滑坡堆积体沉积特征,利用 GIS 软件编辑这些过渡斜坡的地形(图 13)。将这些编辑过的过渡斜坡渗流面作为模型的排水边界。为了便于比较,两个滑坡演化模式下,滑坡方量的累积在每个步骤都是相同的。根据先前建立的水文地质模型,采用相同的计算参数(表 2)。

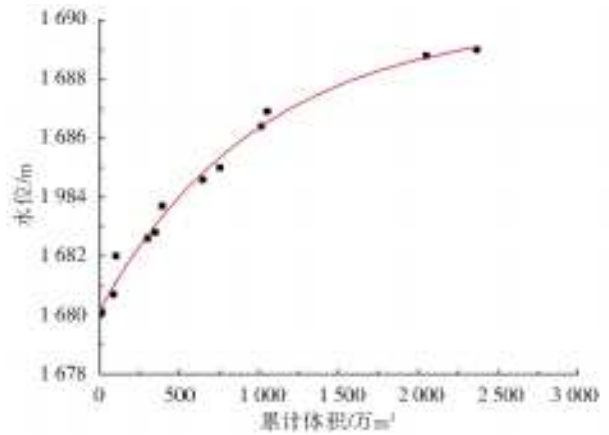


图 12 地下水位和滑坡累计方量之间的关系(1985—2010 年)
Fig. 12 Relationship between groundwater table and landslide volume during 1985-2010

图 12 预示了未来黑方台地下水位的状态。利

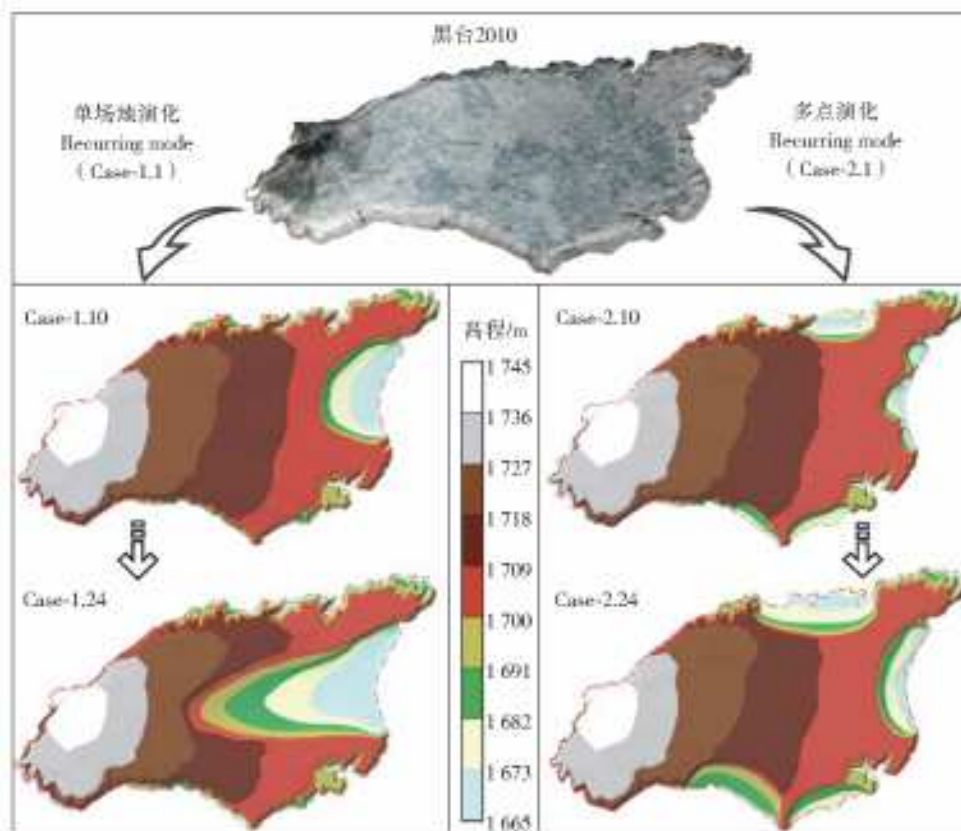


图 13 塬边地貌改变 TIN 图
Fig. 13 TIN map of plateau topography change

黑方台 2010 年农业灌溉水量在 600 万 m³ 左右(表 3),因此,在模型中以该值作为预测地貌条件下水文过程模拟中的农业灌溉强度值,在该部分模拟中考虑的是水位变化的最终稳定状态,因此不考虑灌溉量在年内的变化波动。

表 3 研究区 2009—2010 年农业灌溉水量

Tab. 3 Irrigation volume in the study area in 2009 and 2010
单位:万 m³

年份	月份					
	4	6	7	8	10	12
2009	72.07	100.71	135.34	86.53	93.56	116.55
2010	61.55	102.17	115.33	120.70	94.84	113.95

3.3.2 水文过程响应规律

图 14 显示了在工况 1.24 和 2.24(图 13)的稳定模拟下的地下水压力场。工况 1.24 是单点多次演化模式。从该图中可以看出,凹地形为能增减渗流面,进而增加排泄量(图 14(a))。对于工况 2.24,最终地下水与工况 1.24 类似。由于黄土泥流型滑坡形成之后,滑坡堆积体会转移较远的距离,不会堆积在坡脚形成滞水,滑坡形成的新的凹地形就会增加地下水的排泄量。滑坡的发生会减小研究区的耕地面积,在灌溉强度不变的情况下,研究区总的灌溉量就会减少,进而减少了渗入地下水量。可见泥流型滑坡改变研究区地下水的补给和排泄条件,这两个方面都在抑制地下水位的上升。

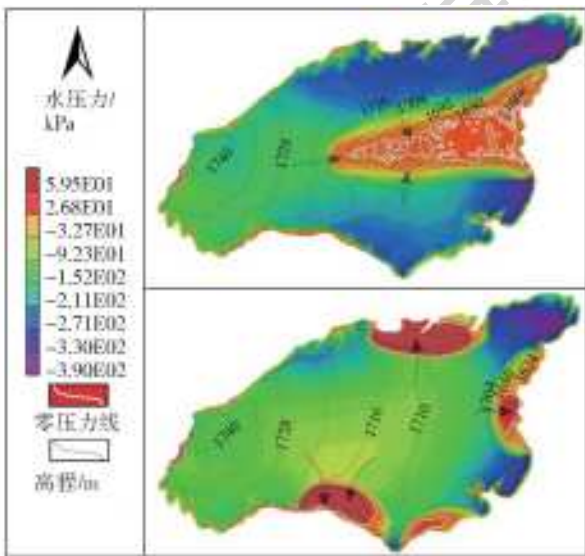


图 14 地下水压力分布

Fig. 14 Pore water pressure distribution at Heitai loess platform

图 15 显示在不同工况模拟条件下,地下水水位与滑坡体累计方量的响应变化模式,见图 12。可以确定地下水系统的 3 个响应阶段。对于第一个,地下水位的上升在累积滑坡体积约 2 000 万 m³ 时增加到

峰值。在此之前,地下水位增加的速度变得越来越慢。这表明滑坡发生对地下水位上升的负面影响。对于峰后值或第二阶段,地下水位倾向于加速减少过程。与 2010 年地下水位相比较,在累积体积约为 3 300 万 m³ 时出现拐点。此后,地下水响应转变为第三阶段,地下水位下降速度再次变慢。尽管地下水对滑坡发生的响应对于不同的演化模式显示出少许差异(见图 15 中的工况 1 和 2),但总体趋势非常相似。图 15 中情况 1 的点 2 和 3 的缺失是由于监测点被滑坡侵蚀。

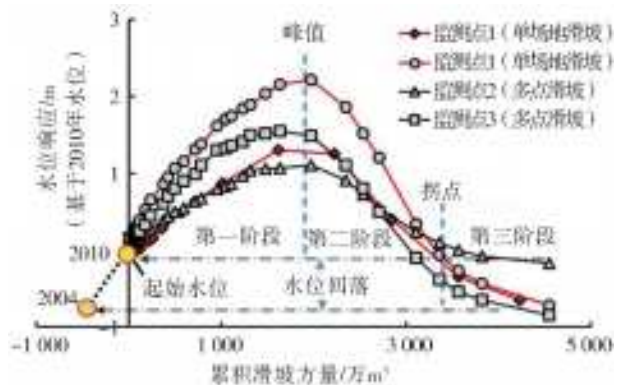


图 15 多场地滑坡演化模式(case2)与单场地演化模式(case1)对水位动态规律影响对比

Fig. 15 Influence of multiplatform landslide evolution and single field evolution on the dynamic law of water level

3.4 模拟结果讨论

模拟结果表明,黄土滑坡发生确实改变了黑方台黄土台塬对农业灌溉的地下水响应。滑坡的发生又会影响滑坡的触发条件。众所周知,地下水位上升是黑方台黄土泥流滑坡发生频繁的原因^[22-26]。因此,滑坡对地下水系统的影响规律可以用来预测未来地貌演化与水文过程的平衡状态。

黄土泥流型滑坡对地下水系统的影响是通过改变台塬的地形实现的。图 16 显示了塬面的剩余面积与台塬边缘的长度的关系。灌溉面积和渗流面积影响了滑坡如何作用于地下水水位。前者控制地下水系统的补给,后者决定了从塬边排出水的水量。它们对地下水系统的影响清楚地显示在图 16 中,图中多场地滑坡凹地形排泄面具有更高的水压力值,说明该类演化模式下更有利于地下水的排泄,这也与图 15 中监测点 3 水位下降较快相对应。图 17 显示了剩余面积,边缘周长和地下水位变化之间的关系。图 17 再次显示出峰值状态,滑坡的发生确实对地下水上升产生了负面影响。

地下水位首先增加到峰值,然后随着连续发生的滑坡而下降(图 16 和 17)。如图 13 和 14 所示,在模拟的最终阶段,地下水位比 2010 年减少约 1 m。

观测到的地下水位变化率约为 0.15m/a(图 8),推

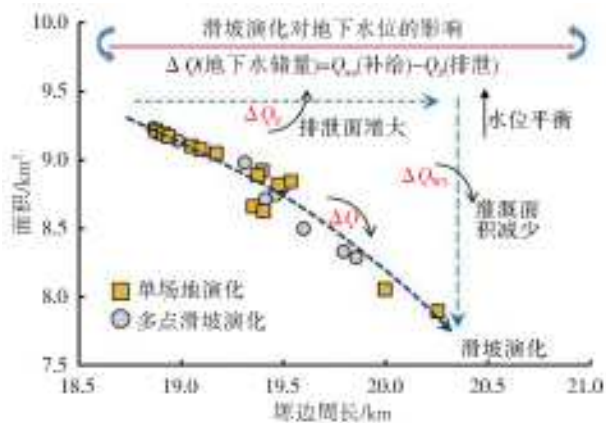


图 16 塬边周长与剩余面积关系

Fig. 16 Relationship between the length of platform margins and platform area with landslides occurring

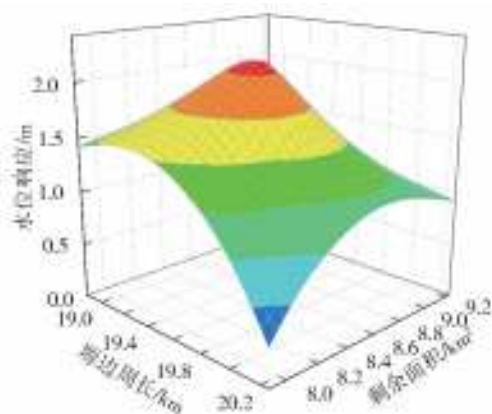


图 17 水位变化与塬区剩余面积及塬边周长的关系

Fig. 17 Relationship between the change of water level and the remaining area as well as the circumference of the platform

断出地下水位最终下降至 2004 年的水位(图 15)。但是 2004 年地下水位仍然高到足以引发黄土滑坡(图 11)。因此,在数值模拟结束阶段,台塬塬面将减少至 7.8 km² 以下即黑台台塬的面积将继续减少。

当地下水位重回到 2004 年的水平时,新滑坡的累积体积将达到 4 600 万 m³。如果平均滑坡量为 50 万 m³,将发生 92 次滑坡。如果每年发生 5 次滑坡,则需要至少 18 年才能达到高达 4 600 万 m³ 的滑坡量。因此,虽然滑坡发生对地下水位上升有负面影响,但未来黑台的滑坡风险仍然很高。

4 结 语

通过模拟黄土塬边不同的滑坡地貌演化模式,旨在揭示黑方台黄塬的未来,泥石流型滑坡的发生确实通过改变水文边界对研究区地下水系统产生影响,地下水位反过来影响新滑坡的发生。以 2010 年模拟起始年,随着滑坡的持续发生,地下水位也将继续上升,当滑坡的累计方量达到 1 800 万 m³ 时,研究

区地下水位的上升达到峰值,边坡处于高滑坡风险状态。峰值过后水位开始下降,当滑坡方量达到 3 200 万 m³ 时,地下水位降低至 2010 年的水平。然后水位继续降低到近似稳定的状态,此时,新滑坡的累积量将达到 4 600 万 m³,地下水位将下降到 2004 年的水平,这仍然足以引发新的滑坡。在本研究中模拟的最终演变阶段,滑坡风险仍然非常高。在模拟的最终滑坡体积下,黑台黄土塬剩余面积将小于 7.8 km²,并且会不断减少。本研究着眼于滑坡体积与塬边地形改变对水文过程的影响,而没有从时间尺度上考虑,在后续的研究工作中,需要将水文地质模型的边界条件更加细化,同时考虑在时间尺度上加强对塬边地貌演化过程的模拟与预测。

参考文献(References):

- [1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985. (LIU D S. Loess and the environment[M]. Beijing: Science Press, 1985. (in Chinese))
- [2] GAO G R, Formation and development of the structure of collapsing loess in China[J]. Engineering Geology, 1988, 25(2-4): 235-245. DOI: 10. 1016/0013-7952(88)90029-4.
- [3] LIN Z G, WANG S J. Collapsibility and deformation characteristics of deep-seated loess in China [J]. Engineering Geology, 1988, 25(2-4): 271-282. DOI: 10. 1016/0013-7952(88)90032-4.
- [4] ZHANG F, WANG G, KAMAI T, et al. Undrained shear behavior of loess saturated with different concentrations of sodium chloride solution[J]. Engineering Geology, 2013, 155: 69-79. DOI: 10. 1016/j. enggeo. 2012. 12. 018.
- [5] ZHOU Y F, THAM L G, YAN W M, et al. Laboratory study on soil behavior in loess slope subjected to infiltration[J]. Engineering Geology, 2014, 183: 31-38. DOI: 10. 1016/j. enggeo. 2014. 09. 010.
- [6] 马鹏辉, 彭建兵, 王启耀, 等. 泾阳南塬典型黄土滑坡成因、堆积及运动特征分析[J]. 工程地质学报, 2018, 26(4): 109-117. (MA P H, PENG J B, WANG Q Y, et al. 2018. Formation mechanism, deposits and motion characteristics of the typical loess landslide in south Jingyang platform[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(4): 930-938. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: GCDZ. 0. 2018-04-013.
- [7] 段钊, 彭建兵, 王启耀. 泾阳南塬多序次黄土滑坡特征参数与成因[J]. 山地学报, 2016, 34(1): 71-76. (DUAN Z, PENG J B, WANG Q Y. Characteristic parameter and formation mechanism of repeatedly failure Loess Landslides[J]. Mountain Research. 2016, 34(1): 71-76. (in Chinese)) DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008-2786. 000102.
- [8] 许元珺, 谷天峰, 王家鼎, 等. 黄土裂隙的漫灌效应对斜

- 坡稳定性的影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4):153-159. (XU Y J, GU T F, WANG J D, et al. An analysis of the influence of the loess fissures flooding effect on slope stability [J]. Hydrogeology&Engineering Geology, 2017, 44(4): 153-159. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665. 2017. 04. 23.
- [9] XU L, DAI FC, TU XB, et al. Landslides in a loess platform, North-West China[J]. Landslides, 2014, 11(6):993-1005. DOI:10.1007/s10346-013-0445-x.
- [10] PENG J B, MA P H, WANG Q Y, et al. Interaction between landsliding materials and the underlying erodible bed in a loess flowslide[J]. Eng Geol. 2018, 234(21): 38-49. DOI:10.1016/j.enggeo. 2018. 01. 001.
- [11] 许强, 彭大雷, 亓星, 等. 2015年4月29日甘肃黑方台党川2号滑坡基本特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(2):167-180. (XU Q, PENG D L, QI X, et al. Dangchuan 2 # landslide of April 29, 2015 in Heifangtai Area of Gansu Province; Characteristics and failure mechanism [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 167-180. (in Chinese)) DOI: 10.13544/j.cnki.jeg. 2016. 02. 001.
- [12] XU L, DAI F C, GONG Q M, et al. Irrigation-induced loess flow failure in Heifangtai Platform, North-West China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(6): 1707-1713. DOI:10.1007/s12665-011-0950-y.
- [13] MIRUS B B, SMITH J B, BAUM R L. Hydrologic impacts of landslide disturbances: Implications for remobilization and hazard persistence [J]. Water Resources Research, 2017, 53: 8250-8265, DOI: 10.1002/2017WR020842.
- [14] QIU H J, CUI P, REGMI AD, et al. The effects of slope length and slope gradient on the size distributions of loess slides: field observations and simulations[J]. Geomorphology 2018, 300: 69-76. DOI: 10.1016/j.geomorph. 2017. 10. 020.
- [15] ZHUANG J Q, PENG J B, WANG G H, et al. Distribution and characteristics of landslide in Loess Plateau: A case study in Shaanxi province [J]. Engineering Geology, 2017: S0013795217303538. DOI:10.1016/j.enggeo. 2017. 03. 001.
- [16] DERBYSHIRE E. Landslides in the thick loess terrain of north-west China[M]. DOI: 10.1046/j.1365-2451.2002.03438.x.
- [17] 张茂省, 李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4):530-540. (ZHANG M S, LI T L. Triggering factors and forming mechanism of loess landslides [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 530-540. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665. 2011. 04. 014.
- [18] 张茂省, 朱立峰, 胡炜, 等. 灌溉引起的地质环境变化与黄土地质灾害——以甘肃黑方台罐区为例[M]. 北京: 科学出版社, 2017. (ZHANG M S, ZHU L F, HU W, et al. Geological environment changes and loess disaster caused by irrigation: A case study of Heifangtai irrigation district in Gansu province[M]. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese))
- [19] 董英, 贾俊, 张茂省, 等. 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, 2013, 32(6):893-898. (DONG Y, JIA J, ZHANG M S, et al. An analysis of the inducing effects of irrigation and the responses of loess landslides in Heifangtai area [J]. Geological Bulletin of China. 2013, 32(6): 893-898. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1671-2552. 2013. 06. 011.
- [20] QI X, XU Q, LIU FZ. Analysis of retrogressive loess flowslides in Heifangtai, China [J]. Engineering Geology, 2018, 236(26): 119-128. DOI: 10.1016/j.enggeo. 2017. 08. 028.
- [21] 许领. 灌溉诱发黄土滑坡机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2010. (XU L. The mechanism of irrigation triggered loess landslide [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese))
- [22] 许领, 戴福初, 邝国麟, 等. 台缘裂缝发育特征、成因机制及其对黄土滑坡的意义[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 85-90. (XU L, DAI F C, KUANG G L, et al. Characteristics and forming mechanisms of the plateau-edge cracks and their significance to loess landslides[J]. Geologica l Review, 2009, 55(1): 85-90. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0371-5736. 2009. 01. 010.
- [23] 许领, 戴福初, 邝国麟, 等. 黄土滑坡典型工程地质问题分析[J]. 岩土工程学报. 2009, 31(2): 287-293. (XU L, DAI F C, KUANG G L, et al. Analysis of some special engineering-geological problems of loess landslide [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering. 2009, 31(2): 287-293. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:1000-4548. 2009. 02. 024
- [24] 王念秦, 张倬元. 黄土滑坡灾害研究[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006. (WANG N Q, ZHANG Z Y. Study on loess landslide [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006. (in Chinese))
- [25] 吴伟江, 王念秦. 甘肃滑坡灾害[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2006. (WU W J, WANG N Q. Gansu landslide disaster[M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006. (in Chinese))
- [26] FAN X M, XU Q, SCARINGI GV, et al. A chemo-mechanical insight into the failure mechanism of frequently occurred landslides in the loess plateau, Gansu Province, China [J]. Engineering Geology, 2017(228): 337-345. DOI: 10.1016/j.enggeo. 2017. 09. 003.