

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2019.03.020

# 黑方台滑坡群控制因素与外动力条件分析

朱立峰

(中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心,自然资源部黄土地质灾害重点实验室,陕西 西安 710054)

**摘 要:**甘肃黑方台滑坡群沿台塬周边发育密集,发生频次高。从地形地貌及坡体几何特征、地质结构与控滑结构面、岩土体组合及其工程性质和水文地质条件等内在因素分析了滑坡发生的控制条件;从灌溉和冻融作用方面分析了滑坡的外动力驱动因素。新构造运动的间歇性抬升所塑造的现今黄土台塬与黄河二级阶地陡坎相接的地貌格局,以及四周台缘较大的地势高差为滑坡的形成奠定了地形条件,由黄土-基岩组成的多层坡体结构中不仅存在易滑地层,且下伏基岩存在顺向软弱夹层,从而在灌溉及冻融等因素共同作用下引发了众多滑坡,因斜坡几何形态和坡体岩土组合、控滑结构面的出露位置、水文地质条件的差异,不同区段滑坡发育特征及成灾模式也不尽相同。

**关键词:**滑坡;控制因素;外动力;冻融

**中图分类号:**P694

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-6248(2019)03-0217-06

## Analysis of Control Factors and External Force for the Landslides in Heifangtai Area

ZHU Lifeng

(Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MNR, Xi'an Center of China Geological Survey/  
Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** Heifangtai landslides are concentrated in the surroundings of Loess Platform, Gansu province, with high occurrence frequency. The internal control factors for landslides have been analyzed in this paper, including the topography and geomorphology, geometrical characteristics of landslides body, geological structure, landslides controlling structure surface, rock and soil group of slope body, engineering and hydrological conditions. The external force has also been researched from the aspects of irrigation and freeze-thaw. The intermittent neotectonic uplift movement has shaped the geomorphic pattern of the loess platform connected with the second terrace of the Yellow River and the large elevation difference at the edge of the platform, all of these have been established as the geomorphic basis for the formation of landslides. Multi-slope structure of loess and rock exists in the easily sliding stratum and consequent soft interlayer. So, the combined action of irrigation and freeze-thaw has induced the landslides. The development and disaster mode is different due to the various geometrical characteristics of landslides body, rock and soil group of slope, the position of the landslide controlling structure surface, hydrological conditions.

**Keywords:** landslide; control factors; external force; freeze-thaw

收稿日期:2019-01-10;修回日期:2019-04-24

基金项目:国土资源公益性行业专项经费项目“黑方台黄土滑坡多参数综合监测示范”(201511056-4),基础性公益性地质调查项目“新疆阿拉尔-图木舒克-昆玉综合地质调查”(DD20179605)

作者简介:朱立峰(1973-),男,高级工程师,从事水工环地质调查和研究工作。E-mail:397871699@qq.com

甘肃黑方台地区为黄河与湟水河夹持地带,由黄河四级阶地组成四周被沟谷切割的黄土台塬,长期引水灌溉引发台塬周缘 40 余处滑坡(王志荣等, 2004),滑坡左右相接连绵 10 余 km,多期原位继承性滑动之后上下叠置,滑坡不仅数量多,频次高,且每年均有发生,年均滑坡 3~5 次,堪称“现代滑坡天然实验室”。近年来,滑坡发生频次居高不下,如“2015. 01. 29”陈家东滑坡、“2015. 04. 29”党川罗家坡滑坡(许强等, 2016; 吴玮江等, 2016)。黑方台滑坡群灌溉及冻融双重驱动成因机制典型,已被众多研究者所公认(王家鼎, 1992; 金艳丽等, 2007; 武彩霞等, 2011; 吴昊宇等, 2015; 段钊等, 2018; 吴玮江, 1997),但黑方台特定地质环境条件下诱发了不同类型及规模的滑坡(许领等, 2008),也就是说类似的孕灾条件及诱发机制下滑坡形成机制及成灾模式不尽相同,各类型滑坡的孕灾控制条件是什么? 笔者在野外调查的基础上,着重对黑方台滑坡群密集发育的内在控制条件和外动力诱发因素进行研究,以资后续研究者借鉴。

## 1 滑坡群控制因素

滑坡群形成主要受控于地质构造、地形地貌、坡体结构、岩土工程性质、地下水等因素,以斜坡几何特征、坡体结构、地下水等内在因素影响尤为显著。

### 1.1 地质构造

黑方台台塬周边无大的区域性断裂。新构造运动以间歇性差异隆升,伴随黄河的强烈下切,沿黄河两岸多级阶地并存,但分布不对称,左岸缺失 III 级阶地,造成四级阶地与二级阶地直接以高差百余米的高陡陡坎相接的地貌特征是滑坡形成的根本所在。

### 1.2 地势地貌

黑方台系黄土堆积于黄河左岸 IV 级基座阶地之上所成的黄土台塬,南缘与 II 级阶地以高差 100~120 m 的陡坎衔接(图 1),高陡临空面奠定了滑坡多发的地势基础,因坡体几何特征的差异滑坡发育特征不尽相同。

坡向:坡向与下伏基岩产状决定了滑坡类型,顺向坡段以黄土-基岩顺层滑坡为主;逆向坡段则多为黄土滑坡。黄土-基岩滑坡包括水管所和黄茨 2 个滑坡群,分布于台缘南侧黄茨至虎狼沟口之间顺向坡段,滑坡规模多为大型,多为低速滑动;其余坡段

坡向与地层倾向夹角多在 20°以上,多以中、小型黄土滑坡为主。

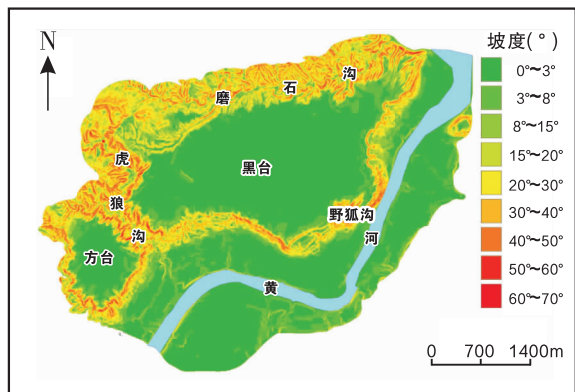


图 1 黑方台地区坡度因子图

Fig. 1 Slope factors of Heifangtai

坡度:台缘四周坡度以焦家崖头坡段最为陡峭(图 2), 30°~40°坡段占比达 69.06%, 滑坡剪出口出露位置高出黄河左岸 II 级阶地阶面约为 60~70 m,高速滑动后具有高势能,脱离高位剪出口时产生抛射飞行进入八盘峡库区激起涌浪;党川及焦家段<30°的坡段占比达 74.78%~77.34%,滑坡发育最为密集,频繁发生的滑坡致坡体中下部被多期滑体所覆盖,坡体被塑造为以<20°的顺直缓坡为主,高位启动的后继性黄土滑坡借助坡势加速运移产生远程滑动,致灾范围更大,如“2015. 04. 29”党川滑坡最远滑距达 782 m。方台南缘和磨石沟坡度以 20°~40°为主,斜坡上部黄土段坡度总体与前述相近,下部基岩段坡体坡度介于前述之间,滑坡以中、

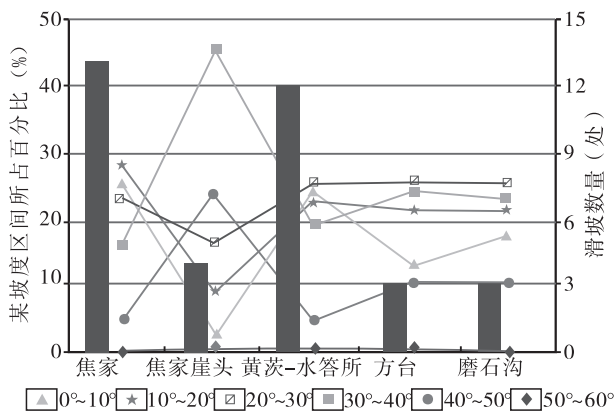


图 2 黑方台坡度与滑坡关系曲线图

Fig. 2 Relationship curves between slopes and landslides in Heifangtai

小型黄土滑坡为主,因滑体就地堆积于坡体之下后堵塞了地下水排泄通道,泉水溢出后长期浸润滑体底部,由滑体底部向前缘产生舌状阵性间歇黏性流动,直至滑体侵蚀殆尽,故台缘多见圈椅状滑床形态残存,而滑体几无保存。

### 1.3 坡体结构

台缘坡体自上而下依次为上更新统风积黄土、上更新统冲积物和下白垩统河口群砂泥岩。因坡体结构的差异,不同区段滑坡发育特征不尽相同。

坡体结构除野狐沟、磨石沟上游为黄土单层结构之外,众多沟缘均为黄土-基岩双层结构斜坡。沟谷上游的黄土单层结构斜坡多发育体积 $<1\,000\text{ m}^3$ 的小型黄土崩滑。土岩双层结构坡体中基岩出露位置总体较高,高悬于坡体中部 $60\sim 80\text{ m}$ 高度,黄土滑坡剪出口位置高,虽多为中小型滑坡,但高位滑动后具较大势能,加之斜坡中下部基岩段坡度多为 $<30^\circ$ 的顺直缓坡,故常产生高速远程滑动,如焦家滑坡群。焦家崖头一带斜坡下部基岩段陡峻近于直立,八盘峡库区位于坡脚之下,加之该段坡体黄土出露厚度最大达 $50\text{ m}$ ,多为中型黄土滑坡,高位滑动之后因高势能产生抛射,从而抛物线飞行落入八盘峡库区激起破坏力更大的次生涌浪灾害,如“2012.02.07”滑坡涌浪高达 $6\text{ m}$ ,波及黄河南岸达 $270\text{ m}$ 。

白垩系河口群砂泥岩互层岩性的工程性质表现为软硬相间,灌溉水入渗致泥岩软化泥化后成为黄土-基岩滑坡的控滑结构面,结构面贯穿整个泥岩层面,孕育的黄土-基岩顺层滑坡启动所需动能较大,剪出口多位于坡脚或顺层面延伸进入二级阶地阶面之下,较大的前缘压脚阻力致低速近程滑动,如“2006.05.14”黄茨滑坡自启动至停止历时长达 $7\text{ h}$ ,滑坡前缘最大滑动距离仅 $20\text{ m}$ 。

### 1.4 岩土工程性质

湿陷和崩解是水敏性黄土遇水后的独有特征,尽管黑方台历经近 $50$ 年大水漫灌,灌溉造成台面湿陷下沉 $2.8\text{ m}$ ,残余湿陷量仍高达 $1.68\text{ m}$ ,而且随着土体灌溉增湿乃至饱和,力学强度锐降。黄土增湿试验表明,黏聚力随着黄土增湿表现为对数减少,内摩擦角线性降低。另据原位直剪试验,未灌区黄土黏聚力 $c=44.65\text{ kPa}$ ,内摩擦角 $\phi=14.18^\circ$ ;灌区黏聚力 $c=37.31\text{ kPa}$ ,内摩擦角 $\phi=14.21^\circ$ 。表明黄土灌溉增湿后黏聚力显著降低,饱和状态较天然状态锐降约为 $61\%$ ,而对内摩擦角影响较小,降幅不足 $4\%$ 。

### 1.5 地下水

与台缘地质结构相对应,地下水类型按含水介质和水力特征依次为黄土孔隙潜水、砂砾石层间无压水和基岩裂隙潜水3类,以黄土孔隙潜水对滑坡生成影响尤为显著。但在不同的坡段,地下水出露特征不尽相同,其对滑坡分布的控制作用也有所差异。

焦家、方台及磨石沟坡段黄土孔隙下降泉点出露较多,沿粉质黏土层顶面线状溢出,流量一般为 $0.1\sim 0.2\text{ m}^3/\text{h}$ ,相对应的是黄土滑坡发育亦较为集中,每个滑坡均对应1至数处泉点,地下水溢出后浸润已发生滑坡的滑床呈饱和状态,致滑坡原位溯源后退式继承型再次累进式扩展滑动的同时,后发滑体冲击饱水滑床产生超孔隙水压力,超孔隙水压力因下部粉质黏土滑床相对隔水无法消散而产生强烈液化,形成所谓的“西瓜皮”效应,加之剪出口位置较高,从而使滑体脱离剪出口部位时产生加速和抛射,并借助高速临界脱离状态滑体底部所产生的汽化、气垫等持速效应实现远程滑动。再或发生原位后继性小规模滑动时滑体就地堆积于圈椅状滑壁之下,堵塞地下水排泄通道,地下水浸润滑体使之沿滑床或中下部坡体产生间歇阵性黏性舌状流动。

其余坡段无黄土孔隙泉点出露,坡脚处二级阶地后缘偶见基岩裂隙水下降泉溢出,在流量多不足 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$ ,但地下水沿泥岩层面渗流过程中致泥岩软化泥化,从而诱发黄土-基岩滑坡。

## 2 滑坡群外动力条件

### 2.1 灌溉

黑方台原为四周被深切沟谷隔绝的“孤岛状”无人旱台,1963年黄河三峡库区移民迁安于此,1969年开始灌溉以来,年均灌溉量在20世纪80年代为 $722\times 10^4\text{ m}^3$ ,90年代为 $576\times 10^4\text{ m}^3$ 。近年来,大幅增加了草莓、林果等经济作物种植面积,灌溉需求大幅提高,年均灌溉次数由 $3\sim 5$ 次增至 $5\sim 7$ 次,仍沿袭大水漫灌方式,仅黑台年均灌溉量达 $590.91\times 10^4\text{ m}^3$ 。按照水热条件估算,现有作物结构正常生长需补充灌溉 $657.6\text{ mm}$ ,即年引灌量为 $498\times 10^4\text{ m}^3$ 。换句话说,不含方台的提灌量,仅黑台现状灌溉量就超灌整个灌区理论量达 $20\%$ 。长年超灌改变了地下水均衡场,地下水补给量较灌溉前增加 $9.4$ 倍,泉排量增加 $5.3$ 倍,长期正均衡造成黄土潜

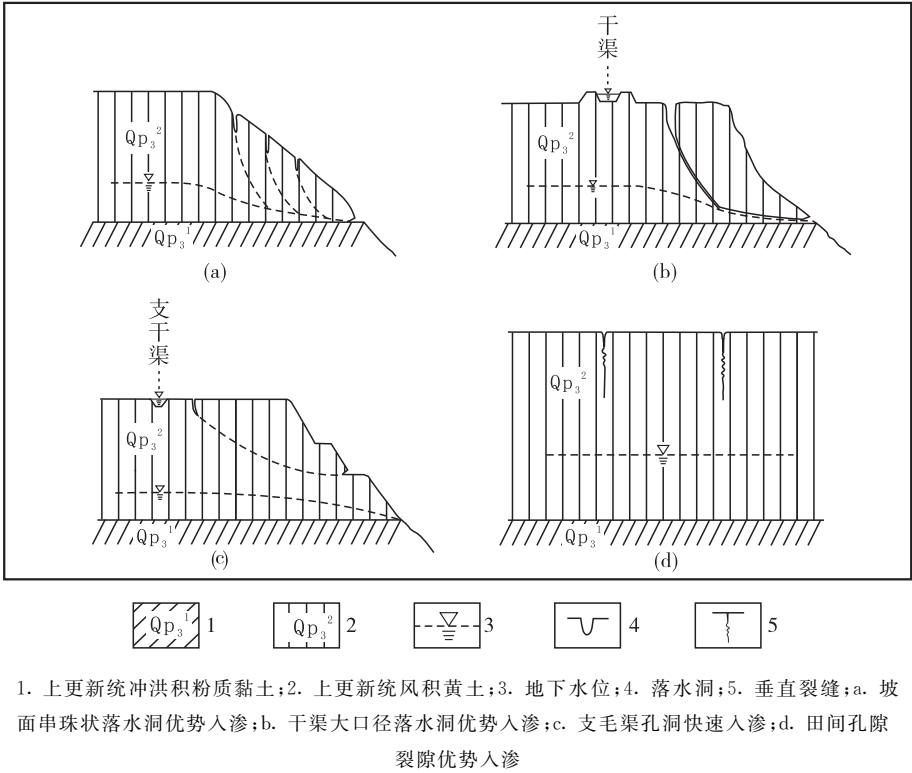
水以 0.27 m/a 的平均升幅逐年升高,继而在塬边引发大规模滑坡。

灌溉入渗形式包括优势通道点源快速入渗(图 3)、塬面面源活塞式脉冲补给和灌溉渠系线状渗漏补给等,对滑坡促发作用较大的为坡面落水洞和干渠落水洞快速入渗模式。

坡面串珠状落水洞快速入渗模式(图 3a):沿坡面冲沟发育,沿冲沟自下而上串珠状落水洞的洞径渐增,一般 1 m,大者达 2~3 m,上部可见深度 2~3 m,下部多被充填,多由短时强降水超渗产流冲蚀或灌溉跑水潜蚀而成,形成时水动力作用较强,水体入渗后对区域地下水动力场无影响,但常引发冲沟两侧坡体失稳。

干渠大口径落水洞快速入渗模式(图 3b):多发

育于靠近既有滑坡后壁的台面灌溉干渠附近,多为单个独立落水洞,洞径多大于 1 m,大者达 3~4 m,可见深度 4~5 m,为干渠跑水冲蚀所成。形成时水动力作用强,潜蚀楔裂坡体形成洞穴,出口位于黄土底部与粉质黏土接触面,洞穴上覆土体在重力作用下坍塌沿洞穴延伸方向的地表正上方形成串珠状落水洞,甚或塌陷成 3~5 m 的陷穴,在沟缘附近被灌溉跑水或强降水汇水贯通表现为冲沟,冲沟两侧拉张裂缝密布。该入渗模式快渗快排,对区域地下水动力场影响小,但对滑坡区地下水动力场影响大,快速排泄过程中较强的水动力潜蚀楔裂坡体内部排泄通道不断扩大,加快滑坡区地下水向排泄出口汇集,增大了滑体内部动水压力,引发高陡圈椅状滑坡后壁失稳。同时,促发原有滑坡再次或多次继承性滑动。



1. 上更新统冲洪积粉质黏土;2. 上更新统风积黄土;3. 地下水位;4. 落水洞;5. 垂直裂缝;a. 坡面串珠状落水洞优势入渗;b. 干渠大口径落水洞优势入渗;c. 支毛渠孔洞快速入渗;d. 田间孔隙裂隙优势入渗

图 3 快速通道优势入渗模式示意图

Fig. 3 A schematic diagram of the dominant infiltration pattern of fast channel

2.2 冻融

黑方台冬季酷寒,自 11 月下旬至来年 2 月下旬产生季节性冻结,最大冻深约为 0.92 m。冻融对黄土工程性状及水理性质影响较大,地下水溢出冻结壅高了坡体内部地下水位,动水压力增大成为冻融期滑坡发生频率年内最高的外动力因素。据原位

地温与地下水动态监测,冻结造成地下水溢出带附近地下水位壅高 1.0 m,坡体内部 30 m 范围之内最大地下水位壅高 2.5 m。

当气温降至 20℃ 以下时,水的黏滞系数气温变化较为敏感,随气温下降而下降,降至冰点时因水份冻结而阻塞黄土孔隙,致渗透系数迅速下降,渗透系

数随温度呈正相关关系(图 4、图 5),函数关系式为:  
 $K_x=0.000579t+0.0156, K_y=0.00378t+0.103$ 。

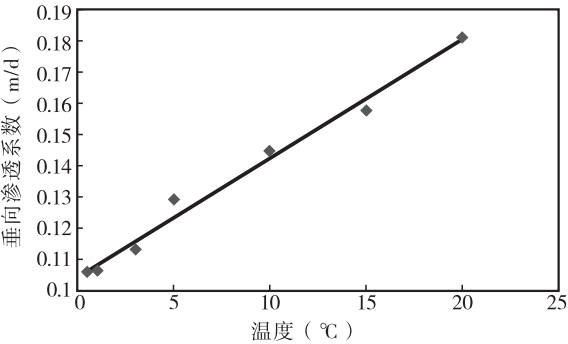


图 4 变温度下黄土垂向渗透系数

Fig. 4 Vertical hydraulic conductivity of loess at the variable temperature

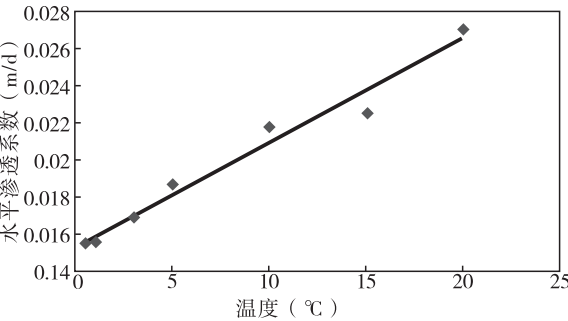


图 5 变温度下黄土水平渗透系数

Fig. 5 Horizontal hydraulic conductivity of loess at the variable temperature

来年 2 月份冻融期时,随着冻融循环次数的增加,垂向渗透系数大幅降低约为 60%(图 6),水平方向渗透系数则影响较小(图 7)。究其原因,黄土为发育垂直节理和大孔结构为特征的特殊类土,孔隙中水份冻结成冰后使得孔隙体积增大,冰融化后孔隙结构失去支撑而局部下沉,反复冻融胀缩破坏土颗粒原始结构并重新固结,致大孔隙体积就减小从而渗透性降低。

冻结状态下,土体强度增高,每年初春冻融期昼融夜冻的往复循环引起冻胀与融陷造成岩土损伤致强度锐降。据测试,天然状态黄土( $w=3.27\%$ )冻结后,黏聚力  $c$  由 126.5 kPa 增加至 210 kPa,增幅达 66%。经 15 次冻融循环土体损伤后,黏聚力  $c$  骤降至 69.06 kPa。也就是说大致在当地短短的 15 天冻融期之内土体强度快速锐降达 67%(图 8)。因地下水常年浸润,剪出口部位饱和状态黄土( $w=$

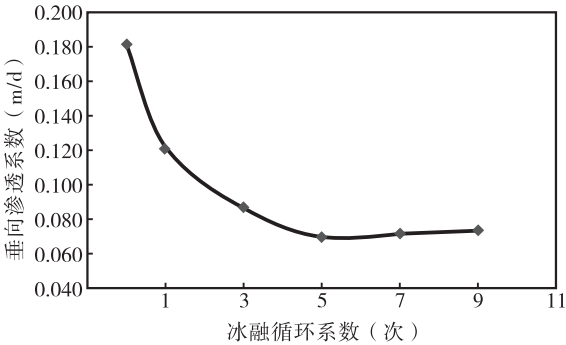


图 6 冻融循环下饱和黄土垂向渗透系数变化图

Fig. 6 Variation of vertical hydraulic conductivity of saturated loess under freeze - thaw cycle

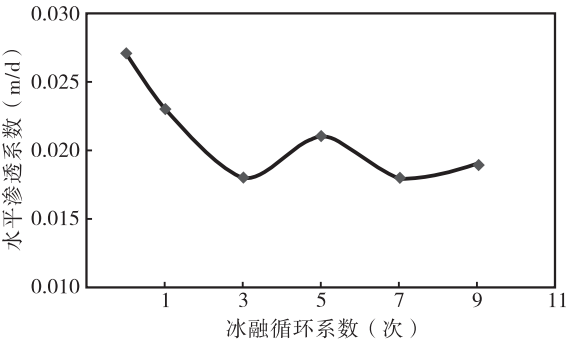


图 7 冻融循环下饱和黄土水平渗透系数变化图

Fig. 7 Variation of horizontal hydraulic conductivity of saturated loess under freeze - thaw cycle

28.05%)因冻结粘聚力  $c$  由 18.3 kPa 骤升至 1480kPa,强度增加达 80 倍,冻融循环 15 次后又骤降至 16.36 kPa,降幅达 99%(图 9)。换句话说,冻结相当于在滑坡前缘剪出口天然修建了一道抗滑挡墙,而冻融期反复冻结融化循环过程造成挡墙溃屈,

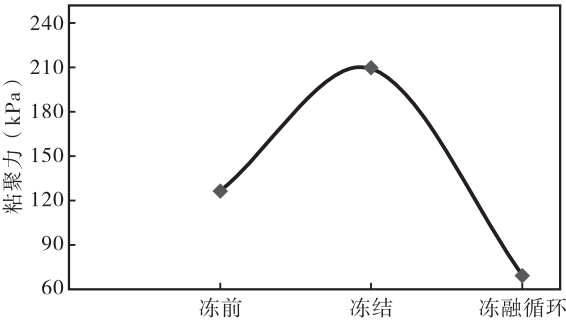


图 8 天然状态黄土冻结与融化黏聚力变化图

Fig. 8 The cohesion fluctuations curve of the freeze - thaw for natural loess

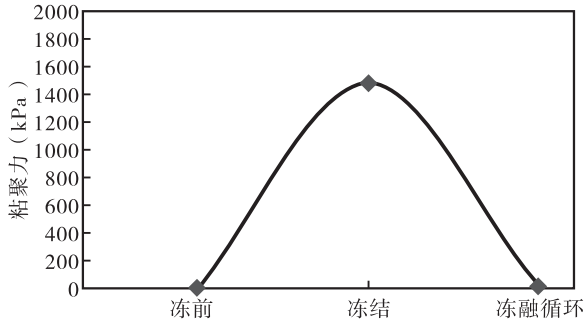


图9 饱和状态黄土冻结与融化黏聚力变化图

Fig. 9 The cohesion fluctuations curve of the freeze - thaw for saturated loess

这是冻融期该区滑坡发育密度最高的根本所在。

### 3 结论

黑方台地区新构造运动强烈,间歇性隆升塑造了现今的地貌格局,较大的地势高差为滑坡的形成奠定了地形条件,引水灌溉改变了原生水文地质条件,因沿袭粗放的大水漫灌方式,长期的地下水正均衡引起了黄土含水系统地下水位不断升高,进而造成黄土强度弱化和下伏基岩泥质夹层的软化泥化,从而引发了台缘周边的滑坡密集发育。因台缘斜坡坡体几何形态和不同坡段岩土组合的差异,控滑结构面的出露位置不同,在不同区段发育不同类型不同规模的滑坡,黄土-基岩滑坡多集中发育在焦家崖头—虎狼沟口一带的顺向坡,其余大部均以黄土滑坡为主,因控制黄土滑坡的粉质黏土层出露位置较高,故黄土滑坡多为高速远程滑坡。对此,应结合滑坡孕灾条件,因地制宜,以水为主线,首先在推广节水灌溉模式及改变高耗水作物结构基础上,从水均衡的角度出发扭转地下水长期正均衡现状。然后,在滑坡剪出口附近实施虹吸或泄水廊道,有效疏排黄土含水系统储存的地下水,从而实现滑坡灾害风险防控。

### 参考文献(References):

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):43-46.

WANG Zhirong, WU Weijiang, ZHOU Ziqiang. Landslide induced by overirrigation in loess platform areas in Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard

and Control,2004,15(3):43-46.

许强,彭大雷,亓星,等. 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,2016,24(2):167-180.

XU Qiang, PENG Dalei, Qi Xing, et al. Dangchuan 2# landslide of april 29,2015,in Heifangtai area of Gansu province;Characteristics and failure mechanism[J]. Journal of Engineering Geology,2016,24(2):167-180.

吴玮江,叶伟林,姚正学,等. 甘肃永靖黑方台4.29罗家坡黄土滑坡的特征[J]. 冰川冻土,2016,38(3):662-670.

WU Weijiang, YE Weilin, YAO Zhengxue, et al. Characteristics of the Luojiapo loess landslides at Heifangtai, burst on April 29, 2015, in Yongjing County, Gansu Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016,38(3):662-670.

王家鼎. 高速黄土滑坡的一种机理—饱和黄土蠕动液化[J]. 地质论评,1992,38(6):532-539.

WANG Jiading. A mechanism of high-speed loess landslides-saturated loess creeping liquefaction[J]. Geological Review,1992,38(6):532-539.

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.

JIN Yinli, DAI Fuchu. The mechanism of irrigation-induced landslides of loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2007,29(10):1493-1499.

武彩霞,许领,戴福初,等. 黑方台黄土泥流滑坡及发生机制研究[J]. 岩土力学,2011,32(6):1767-1773.

WU Caixia, XU Ling, DAI Fuchu, et al. Topographic features and initiation of earth flows on Heifangtai loess plateau [J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(6):1767-1773.

吴昊宇,裴向军,崔圣华. 灌溉型黄土滑坡变形破坏特征的离心机模型研究[J]. 建筑安全,2015,(5):40-44.

WU Haoyu, PEI Xiangjun, CUI Shenghua. Deformation and failure characteristics of irrigated loess landslides study on centrifuge model[J]. Construction Safety,2015,(5):40-44.

段钊,彭建兵,陈伟,等. 泾河下游黄土台塬区滑崩灾害空间分异研究[J]. 西北地质,2018,51(3):214-222.

DUAN Zhao, PENG Jianbing, CHEN Wei, et al. Distribution difference of landslide and collapse in the loess tableland area at the downstream of Jing River [J]. Northwestern Geology,2018,51(3):214-222.

吴玮江. 季节性冻结滞水促滑效应[J]. 冰川冻土,1997,19(4):359-365.

WU Weijiang. Slide accelerated by water entrapment due to seasonal freezing[J]. Construction Safety,1997,19(4):359-365.

许领,戴福初,邝国麟,等. 黑方台黄土滑坡类型与发育规律[J]. 山地学报,2008,26(3):364-371.

XU Ling, DAI Fuchu, KUANG Guolin, et al. Types and characteristics of loess landslides at Heifangtai Loess Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science,2008,26(3):364-371.