

# 甘肃黑方台坡面冻融特征及冻结滞水效应分析<sup>\*</sup>

李广<sup>1</sup>, 张明礼<sup>1,2</sup>, 叶伟林<sup>2</sup>, 王得楷<sup>2</sup>, 马昭<sup>1</sup>, 安亚鹏<sup>2</sup>

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 兰州 730050; 2. 甘肃省科学院 地质自然灾害防治研究所, 兰州 730000)

**提 要:** 灌溉与冻融作用诱发黄土滑坡是西北地区常见的滑坡灾害类型, 该类滑坡形成过程不易察觉, 危害巨大。以甘肃永靖黑方台滑坡区季节冻土层水热变化和地下水位监测数据为基础, 分析灌溉诱发滑坡区土体冻融特征和地下水位的季节变化特征, 讨论土体冻结过程与地下水位波动和坡体稳定性的关系。结果表明: 1) 坡面非饱和区域土体从11月上旬开始冻结, 2月初开始融化, 而地下水溢出带土体从11月中旬发生第一次冻结, 1月末开始融化。2) 地下水位从11月份开始上升, 2月初达到峰值, 坡体滑移带的冻结滞水效应显著。3) 相对于未滑移区域和滑带边缘, 黑方台滑坡区地下水溢出带植被丰茂、土体含盐量大, 冻结持续时间短、冻结深度浅, 冻结滞水引起的水分聚集诱发坡体再次失稳。

**关键词:** 冻融特征; 季节冻土; 现场监测; 冻结滞水效应; 黑方台

**中图分类号:** P642.22

**文献标识码:** A

我国是世界上黄土面积最广的国家之一, 黄土区约占国土总面积的6.6%<sup>[1,2]</sup>, 在修建水利工程过程中诱发了大量的黄土灾害<sup>[3]</sup>。被称作“现代滑坡天然实验室”的甘肃黑方台地区由于长期的农业灌溉孕育了黄土灾害滑坡群<sup>[4,5]</sup>, 但近年来黑方台冻融期滑坡灾害不断发生。例如1995年1月30日永靖黄茨滑坡引起 $600 \times 10^4 \text{ m}^3$ 土体滑动, 威胁1350位村民的生命财产安全<sup>[6]</sup>; 2012年2月7日永靖焦家滑坡造成4名人员伤亡<sup>[7]</sup>。通过对冻融期滑坡数量统计和现场监测, 认为除农业灌溉外, 冻融作用也是诱发黑方台地区滑坡的重要因素: 冻结期间, 坡面地下水溢出带发生冻结导致地下水不断向坡内聚集(即“冻结滞水效应”), 产生水平向水压力, 推动坡体滑移<sup>[8,9]</sup>。

冻结滞水现象诱发黄土滑坡灾害不易察觉, 潜在致灾风险大, 但冻融致灾机理研究相对薄弱。赵鲁庆等<sup>[10]</sup>、李双好等<sup>[11]</sup>在研究冻融循环对黄土微观结构与强度参数的影响规律时指出, 冻融使得黄土颗粒的排列方式改变, 粘聚力、胶结力衰减迅速, 土体的冻融特征对坡体稳定性有重要影响; 王念秦等<sup>[12]</sup>、王掌权等<sup>[13]</sup>将冻融引起黄土参数的改变规律应用于边坡稳定性分析, 通过数值模拟表明随着冻融次数的增加黄土边坡稳定性降低, 坡面表层冻结导致坡内地下水积聚是诱发坡体滑移的主要因素之一; 许强等<sup>[14]</sup>、史绪国等<sup>[15]</sup>利用裂缝仪、位移计等监测手段, 现场监测黑方台地区边坡的变形位移, 对黄土滑坡的识别以及预警防护发挥了重要作用。

黑方台地区在相对平缓、植被茂密的已滑坡面上不断有二次滑坡出现, 冬春交替之际尤为显著。苗天德、马崇武等人<sup>[16,17]</sup>通过数学灾变理论以及边坡渐进破坏力学模型揭示了边坡发生二次滑坡的历时演化过程。已有研究发现<sup>[18,19]</sup>: 土体冻融过程与植被、土壤含水量等密切相关, 不同地表类型的土体冻融特征差异显著。黑方台滑坡区土体含水量和地表覆盖类型差异巨大, 故推测滑坡区植物和土体含水量的差异导致的冻融特征差异加剧了已滑移区水分聚集, 诱发坡体二次失稳。目前, 下垫面差异引起土体的冻融特征差异及其对坡体稳定性的影响尚不清楚。本文以黑方台滑坡区水热和地下水位监测为基础, 分析季节冻土区黄土滑坡不同深度处地温与地下水位、土体含水量的响应关系, 讨论坡面不同位置冻融特征差异, 揭示坡面冻融特征差异对地下水位波动和坡体稳定性的影响, 为区域地质灾害防治提供参考。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-11-26; 修回日期: 2021-1-16。

基金项目: 甘肃省高等学校产业支撑计划项目(2020C-40); 甘肃省科学院青年科技创新基金(2018QN-06)和应用研究与开发基金(2018JK-13); 甘肃省基础研究创新群体项目(20JR5RA478)资助。

作者简介: 李广(1996—), 男, 汉族, 重庆南川人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治研究。E-mail: 1148803109@qq.com

通讯作者: 张明礼(1987—), 男, 汉族, 陕西安康人, 博士, 副教授, 主要从事寒旱区岩土工程研究。E-mail: mingli\_0919@126.com

## 1 试验场地与研究方法

### 1.1 试验场地位置及自然地理状况

黑方台位于甘肃省永靖县,地处黄河和湟水河交汇处的黄河左岸Ⅳ级阶地<sup>[20]</sup>。最高气温达到 40.7℃,最低气温为 -20.1℃,昼夜温差较大,属于季节性冻土区;年平均降水量约 300mm,年蒸发量 1600mm;灌溉前地下水只有极少量降水补给,其潜水分布不连续,几乎无地下水分布<sup>[21]</sup>。黑方台自上而下地质结构层依次为风积黄土层、阶地冲积层、黄河阶地基座。风积黄土层(21~50m)以粉粒为主,呈淡黄色,具有竖向发育的大孔隙,水敏性较强;阶地冲积层上部为具有弱透水性的粉质黏土层(0.3~2m),下部为砂卵石土层(2~5m);黄河阶地基座主要为泥砂岩。

### 1.2 试验设备与监测方案

在坡面非饱和区域沿深度 10、50、70、85、100cm 以及坡面地下水溢出带沿深度 40、80、100、115、130cm 布设 5TM 探头监测地温、土壤含水量,用于分析地下水溢出带土体与坡面非饱和区域土体不同深度处的冻融特征,探头温度测量幅度为 -40℃~+60℃,含水量测量幅度为 0~100%。地下水位变化通过水位计监测,现场监测实验开始前对 5TM 探头与水位计进行了调试校准,监测断面布置(图 1)。所有数据采用远程传输,数据采集频率每 10 分钟一次;监测时间段为 2018 年 10 月 16 日至 2019 年 10 月 10 日。

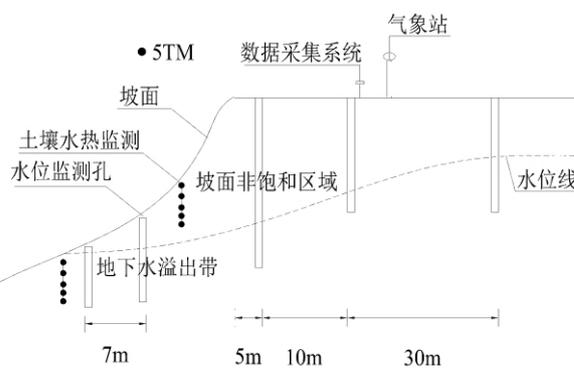


图 1 监测断面布置

Figure 1 Layout of monitoring section

## 2 结果与分析

### 2.1 季节冻土区冻融变化特征

图 2 为 2018 年 10 月~2019 年 10 月的气温变化,可以看出:黑方台地区季节温度差异明显,气温从 11 月初开始出现负温,1 月底气温达到最低,最低气温可达 -14.5℃;2 月初气温开始缓慢回升,到 3 月中下旬气温回升到正温,直至 7 月下旬达到最高值,超过 35℃。

若不考虑土壤含盐量与表面能等因素对临界冻结温度的影响,认为 0℃ 为研究区黄土的临界冻结温度。从坡面非饱和区域土体地温变化的等值线图(图 3(a))可以看出:坡面非饱和区域土体从 11 月上旬开始冻结,第一次冻结深度达到 10cm,第二次冻结深度达到 20cm,但冻结时间持续较短;到 12 月初,外界温度持续降低促使土壤表层完全冻结,到 1 月下旬,最大冻结深度近 40cm;2 月初,地温升高,冻结土壤逐渐融化,冻结持续时间达 2 个月。

从坡面地下水溢出带土体地温变化的等值线图(图 3(b))可以看出:土壤在 11 月中旬出现一次冻结,冻结时间极短;从 12 月初开始持续冻结,冻结深度超过 20cm;在冻结期内,随温度的降低,冻结深度不断增加,并在 1 月下旬达到最大冻结深度近 30cm;至 1 月末,地温开始逐渐升高,土体由表及里开始融化;冻结持续时间近 50 天。

对比图 3(a)与图 3(b)可以发现:地下水溢出带土体初始冻结时间比坡面非饱和区域土体滞后约 10 天;其次,坡面非饱和区域土体最大冻结深度比地下水溢出带土体最大冻结深度厚约 10cm,且坡面非饱和区域土体温度更低;就土壤冻结时长而言,坡面非饱和区域土体比地下水溢出带土体冻结持续时间长约 15 天。

### 2.2 冻结滞水效应特征分析

由于冻结前灌溉影响水位变化不会持续到 2 月份,因此排除冻结期台塬灌溉水下渗对地下水位高度的影响。为验证黑方台地区冻结滞水效应的存在性,选取地下水溢出带土体地下 115cm 地温分别与地下水位高度、坡面非饱和区域土体地下 85cm 处含水量的对比关系,绘制地下水溢出带土体地下 115cm 地温-地下水位高度关系图(图 4(a))、地下水溢出带土体地下 115cm 地温-坡面非饱和区域土体地下 85cm 处含水量关系图(图 4(b))。

如图 4(a)所示,在冻结期无灌溉水时,当 12 月份地温下降,地下水溢出带土体坡面发生冻结,冻结后

坡面土壤强度增加,渗透系数减小,地下水位向坡内不断雍高,地下水位快速升高到一定高度后再缓慢增加;2月初,地下水位高度达到最大后,由于地温随气温的升高而升高,坡面冻结区域逐渐融化,地下水重新从溢出带流出,雍高的地下水位开始下降,此时地下水位下降速率较快,至4月份下降速率开始趋于平缓。在冻结融化的过程中,地下水位曲线呈现先上升后下降的状态。该曲线初步证明黑方台地区存在冻结滞水效应。

如图4(b)所示,12月份地温随着气温下降,坡面土壤达到临界冻结温度,地下水溢出带冻结使地下水位增高,在基质吸力与毛细力的作用下,地下水位上升会促使坡面非饱和区域土体含水量增加;2月初,地温升高,坡面冻结带的融化让雍高的地下水不断向坡面外排出,地下水位高度下降,致使坡面非饱和区域土体含水量降低。故在冻融过程中,坡面

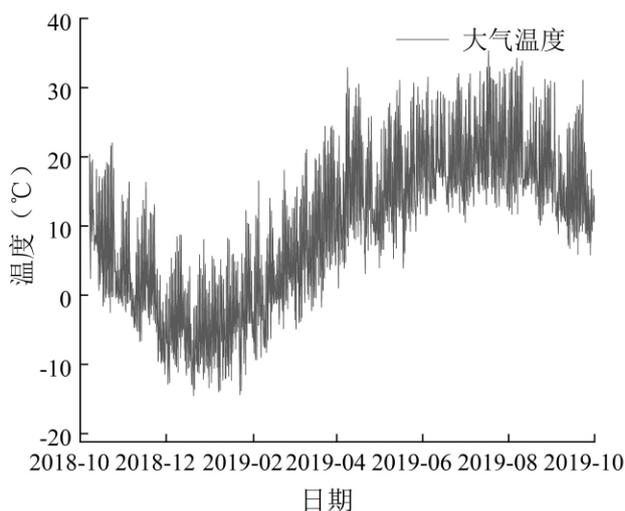


图2 气温变化

Figure 2 Air temperature variation

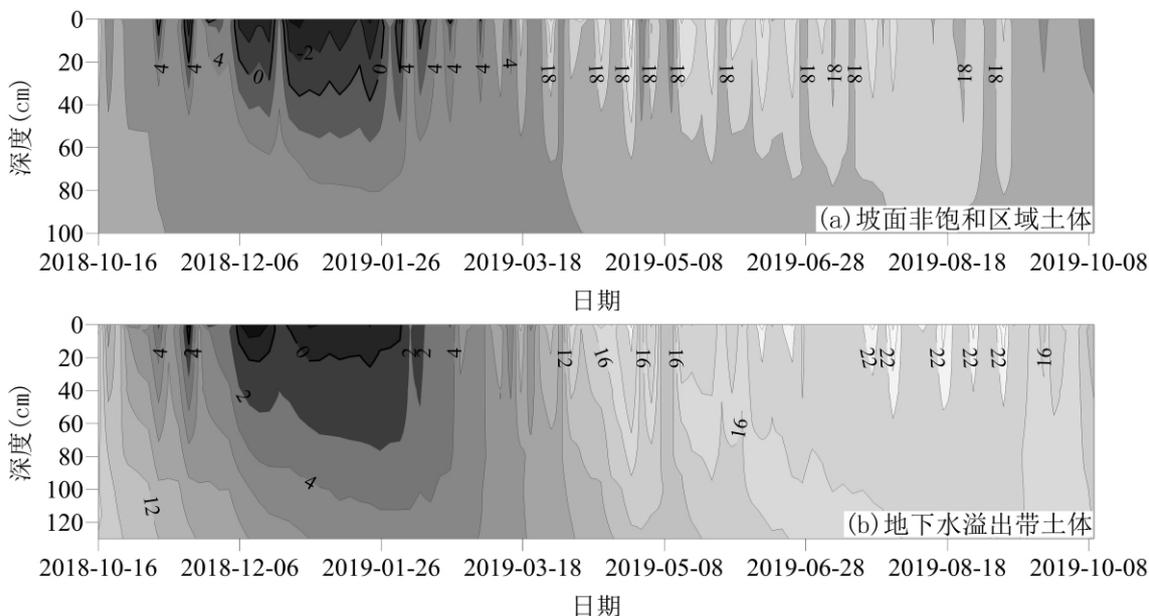


图3 土体地温等值线图

Figure 3 Contour of soil temperature

非饱和区域土体含水量曲线呈先升高后下降的状态,冻结时期内,坡面非饱和区域土体在地下85cm处含水量增加了约1%。该曲线再一次证明了黑方台地区存在冻结滞水效应。

### 3 讨论

黑方台地区长期的农业灌溉导致地下水位上涨近20m<sup>[22]</sup>,由灌溉和冻结滞水效应诱发了多次滑坡已得到诸多学者认可<sup>[7, 23]</sup>。本文通过现场监测,阐述了黑方台季节冻土区地下水溢出带土体与坡面非饱和区域土体的冻融特征,发现坡面非饱和区域土体相对于地下水溢出带土体,在冻结期地温更低,融化期地温更高,并且冻结深度更大、首次冻结时间更早、冻结持续时间更长。分析其原因,是由于地下水溢出带土体含水量远大于坡面非饱和区域土体,含水量的差异导致土体在冻结和融化过程中释放和吸收的热量不同,土体含水量高,在冻结过程中需要释放的相变潜热更多,土体温度也更高,最大冻结深度较小,首次冻结时间较晚;同样,含水量高的土体在融化期相变吸收的热量更多,土体温度更低。此外,本文通过现场监测数据分析表明:地下水溢出带土体地温在冻结期降低后,土壤发生冻结,土壤最大冻结深度达到40cm,

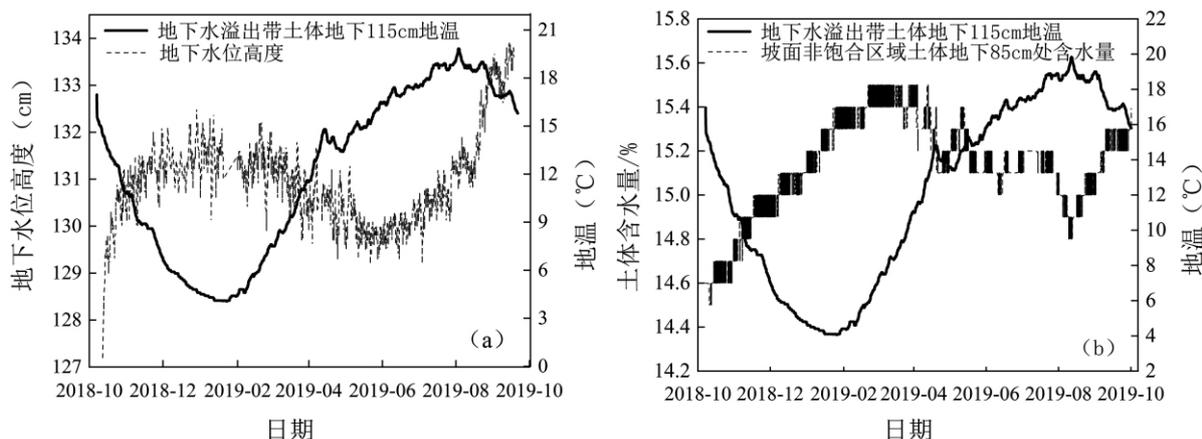


图 4 地温与地下水位、含水量变化

Figure 4 Variations of the soil temperature , groundwater level and water content

冻结时间长达 50 天 ,土壤强度增加 ,渗透系数减小 ,造成坡内地下水位上涨以及坡面非饱和区域土体含水量增加;当地下水溢出带土体地温在融化期升高后 ,冻结土壤逐渐融化 ,渗透系数增大 ,坡内地下水位下降以及坡面非饱和区域土体含水量减小 ,从而证明了研究区存在冻结滞水效应。



图 5 滑坡面植被分布

Figure 5 Vegetation distribution at the landslide site

现场调查发现坡面地下水溢出带土体区域植被丰富(图 5),其中植被覆盖最厚处超过 1m。由于植被密集根系层和有机质,减小了气温对地温的影响,从而使得活动层土壤冻结时间滞后,融化时间提前,植被作为下垫层减小了气温对地温的影响,改变了土壤热状况和能量迁移,导致地下水溢出带土体冻结深度减小,若在无植被覆盖区,土壤冻结深度会更深;并且地下水溢出带土体含水量接近饱和,也降低了地下水溢出带土体在冻结期的冻结深度;由于黄土中含有一定量的盐分,在灌溉、地表水渗流等作用下,盐分随着地下水运移到地下水溢出带外,当水分蒸发后,地下水溢出带析出大面积白色盐渍。已有研究表明,黄土临界冻结温度随土中含盐量的增加而降低<sup>[24]</sup>,进一步减小地下水溢出带冻结深度。以上三方面使得土体冻结壳变薄,不利于研究区冻结滞水现象的发生,故冻结滞水现象引起坡内在冻结期地下水上升的高度较低且坡面非饱和区域土体含水量的增加幅度不大。地下水溢出带土体植被的存在及其含盐量高、含水量接近饱和降低了该处的冻结深度,而含水量少、无植被覆盖的滑带边缘与未滑移区域土体冻结深度较厚,将进一步促进水分往地下水溢出带土体渗流。水流不断往旧滑坡弧形凹槽底部位置渗流,导致滑坡两侧与后壁凹槽底部含水量差异巨大,冻结滞水现象引起后壁凹槽底部的雍水诱发滑坡处再次发生渐近后退式滑坡<sup>[25]</sup>。由于冻结期坡面发生冻结,地下水溢出带土体渗透系数减小,产生滞水位,导致地下水位上升(图 6c),随着黄土层孔隙水压力不断增大,在长期浸润条件下,诱发黄土滑坡(图 6d);当第一次滑坡达到

稳定后,坡边缘形成新的临空面(图 6e),冻结期再次来临,台塬边弧形凹槽发生冻结,阻止地下水向坡外排出,使其再次发生冻结滞水过程,黄土层在浸润条件下导致坡顶形成多条张拉裂缝,达到极限稳定状态后,边坡沿着裂缝产生渐进后退式滑坡(图 6f)。坡体在周期性的冻融和灌溉作用下产生多次滑坡,在同一滑坡面形成渐进后退式滑坡,形成过程(图 6)。

本次野外监测数据仅为地温、土壤含水量以及地下水位三方面,由于监测时间较短,并且由冻结滞水现象引起的边坡灾害监测还缺少力学、变形等方面的监测,如对台塬边缘裂缝发展情况的监测等,对冻融期黄土滑坡问题的认识还较浅。因此下一步计划开展对台塬边缘裂缝的变形监测,收集更多监测资料,并通过数值模拟重现冻结滞水过程以及冻融期黄土滑坡稳定性分析、黄土边坡渐进破坏过程,深入分析认识季节冻土区黄土滑坡问题,对黑方台边坡稳定性分析提供参考。

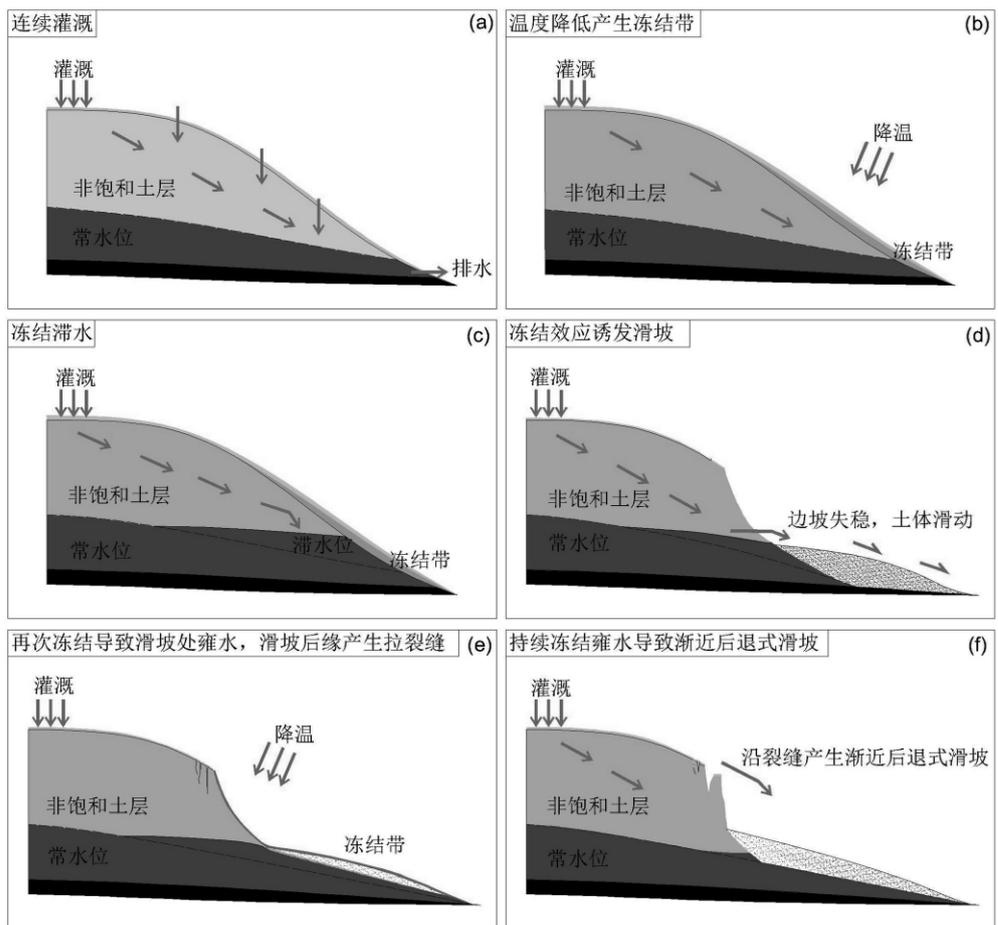


图 6 冻结滞水诱发坡体渐进破坏示意图

Figure 6 Schematic diagram of progressive failure of slope induced by frozen stagnant water

#### 4 结论

通过在黑方台地区监测近一年的坡面地温、含水量、地下水位等水热参量,分析了黑方台滑坡区土体冻融特征和地下水位的季节变化特征,讨论了土体冻结过程与地下水位波动和坡体稳定性的关系,得到以下结论:

(1) 坡面非饱和区域土体在 11 月上旬初次冻结,12 月初完全冻结,到 2 月初开始融化;而地下水溢出带土体在 11 月中旬第一次冻结,12 月初开始持续冻结,到 1 月末开始融化,冻结时间比坡面非饱和区域土体短约 10 天,开始融化时间比坡面非饱和区域土体早约 5 天。

(2) 地下水位从 11 月份开始上升,2 月初达到峰值,地下水位变化与地下水溢出带土体的冻融状态呈正相关;地下水溢出带土体冻结期发生冻结现象,坡内地下水位上涨以及坡面非饱和区域土体含水量增加,融化期冻结土体融化,坡内地下水位下降以及坡面非饱和区域土体含水量减小,从而证明坡体滑移带存在冻结滞水效应,但地下水溢出带生长的植被削弱了冻结滞水效应。

(3) 相对于未滑移区和滑带边缘,黑方台滑坡区地下水溢出带植被茂盛,土壤含盐量高、含水量高,导致地下水溢出带土体冻结持续时间短、冻结深度浅,从而促进水分往滑坡弧形凹槽底部处渗流,冻结滞水引起的水分聚集诱发坡体再次发生失稳。

## 参考文献

- [1] 彭大雷. 黄土滑坡潜在隐患早期识别研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018: 1-2.
- [2] ZHOU Y F, THAM L, YAN R W M, et al. The mechanism of soil failures along cracks subjected to water infiltration [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 55(1): 330-341.
- [3] 王得楷, 张满银, 叶伟林, 等. 黄土地质灾害相关科学研究问题探讨[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(1): 197-204.
- [4] 赵纪飞, 黄嘉悦, 侯晓坤, 等. 灌溉诱发的黑方台黄土滑坡泥流机理分析[J]. *灾害学*, 2017, 32(4): 60-66.
- [5] 谷天峰, 朱立峰, 胡炜, 等. 灌溉引起地下水位上升对斜坡稳定性的影响 - 以甘肃黑方台为例[J]. *现代地质*, 2015, 29(2): 408-413.
- [6] 王恭先. 甘肃省永靖县黄茨滑坡的滑动机理与临滑预报[J]. *灾害学*, 1997, 12(3): 23-27.
- [7] 张茂省, 程秀娟, 董英, 等. 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*, 2013, 32(6): 852-860.
- [8] 吴玮江, 宿星, 冯乐涛, 等. 甘肃黑方台滑坡类型与活动特征研究[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(6): 1483-1495.
- [9] 程鹏, 杨军海, 张亚卿. 黄土地区季节性冻融触发滑坡的机理分析[J]. *中外公路*, 2017, 37(1): 6-9.
- [10] 赵鲁庆, 杨更社, 吴迪, 等. 冻融黄土微观结构变化规律及分形特性研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(6): 1680-1690.
- [11] 李双好, 李元勋, 高欣亚, 等. 冻融作用对原状黄土抗剪强度的影响规律[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(1): 48-55.
- [12] 王念秦, 罗东海. 黄土斜(边)坡表层冻结效应及其稳定响应[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(5): 760-765.
- [13] 王掌权, 许健, 郑翔, 等. 反复冻融条件下黄土边坡稳定性分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2017, 28(2): 15-21.
- [14] 许强, 彭大雷, 何朝阳. 突发型黄土滑坡监测预警理论方法研究 - 以甘肃黑方台为例[J]. *工程地质学报*, 2020, 28(1): 111-121.
- [15] 史绪国, 张路, 许强. 黄土台塬滑坡变形的时序 InSAR 监测分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7): 1027-1034.
- [16] 苗天德, 艾南山. 滑坡发育的灾变模型[J]. *兰州大学学报*, 1988, 24(4): 45-50.
- [17] 马崇武, 刘忠玉, 苗天德. 关于滑坡及其预测预报的力学研究[C]. //中国力学学会“力学2000”学术大会论文集: 2000年卷, 北京: 中国力学学会, 2000: 736-737.
- [18] 王庆锋, 金会军, 张廷军, 等. 祁连山区黑河上游高山多年冻土区活动层季节冻融过程及其影响因素[J]. *科学通报*, 2016, 61(24): 2742-2756.
- [19] 原黎明, 赵林, 胡国杰, 等. 青藏高原中部典型下垫面活动层水热动态及其热扩散率研究[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(2): 378-389.
- [20] 赵超英, 刘晓杰, 张勤, 等. 甘肃黑方台黄土滑坡 InSAR 识别、监测与失稳模式研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7): 996-1007.
- [21] 张茂省. 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*, 2013, 32(6): 833-839.
- [22] HOU X K, VANAPALI S K, LI T L. Water infiltration characteristics in loess associated with irrigation activities and its influence on the slope stability in Heifangtai loess highland, China [J]. *Engineering Geology*, 2018, 234: 27-37.
- [23] 赵纪飞, 黄嘉悦, 侯晓坤, 等. 灌溉诱发的黑方台黄土滑坡泥流机理分析[J]. *灾害学*, 2017, 32(4): 60-66.
- [24] 郝慧, 马巍. 盐渍土冻结温度的试验研究[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(5): 1106-1113.
- [25] 元星, 许强, 彭大雷, 等. 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[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(1): 147-153.

## Analysis on freezing - thawing characteristics and frozen stagnant water effect of Heifangtai slope in Gansu province

LI Guang<sup>1</sup>, ZHANG Mingli<sup>1,2</sup>, YE Weilin<sup>2</sup>, WANG Dekai<sup>2</sup>, MA Zhao<sup>1</sup>, AN Yapeng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050;  
2. Geological Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Loess landslides induced by irrigation and freeze - thaw are common type of landslide disasters in Northwest China. The landslides are not easy to detect and cause great harm. Based on the monitoring data of seasonal frozen soil water and heat changes and groundwater level in the Heifangtai landslide area in Yongjing, Gansu, the characteristics of soil freezing and thawing and the seasonal variation of groundwater level in the landslide area induced by irrigation were analyzed, the relationships between soil freezing process and groundwater level fluctuation and slope stability were discussed. The results show that: 1) The soil above the groundwater level froze since early November and began to melt at the end of January, while the soil near the groundwater level froze for the first time since mid - November and began to melt in early February. 2) The groundwater level began to rise in November and reached a peak in early February. Effect of the frozen stagnant water in the slope slip zone was still significant. 3) Compared with the non - slip area and the edge of the sliding zone, the vegetation at the groundwater seepage outlet of the Heifangtai landslide area is luxuriant and the soil has high salinity, which leads to short freezing duration and shallow freezing depth, and the water accumulation caused by effect of frozen stagnant water is more likely to induce slope instability again.

**Key words:** freezing - thawing characteristics; seasonally frozen soil; on - site monitoring; effect of frozen stagnant water; Heifangtai