

甘肃灵台县南店子滑坡活动特征及成因分析

唐家凯, 吴玮江, 刘 韬, 宿 星, 万朝东, 张国信, 安亚鹏, 李祖刚

Characteristics and causes of Nandianzi landslide in Lingtai County, Gansu Province

TANG Jiakai, WU Weijiang, LIU Tao, SU Xing, WAN Chaodong, ZHANG Guoxin, AN Yapeng, and LI Zugang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202305042>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

融雪诱发黄土滑坡活动特征与应急响应模式——以新疆伊犁则克台滑坡为例

Kinematic characteristics and emergency response model of loess landslide driven by snowmelt: take the Zeketai Landslide in Yili, Xinjiang as an example

魏学利, 陈宝成, 赵龙, 赵楠, 李宾 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 78–90

基于BA-LSSVM模型的黄土滑坡致灾范围预测

Prediction of the disaster area of loess landslide based on least square support vector machine optimized by bat algorithm

吴博, 赵法锁, 贺子光, 段钊, 吴韶艳 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 1–6

青海尖扎盆地寺门村滑坡发育特征及成因分析

Characteristics and formation of Simencun Landslides in Jianzha Basin of Qinghai Province

史立群, 魏刚, 殷志强, 袁材栋, 武新宁, 李振超 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 15–21

甘肃舟曲垭豁口滑坡复活机理及成因探讨

Mechanism and causal analysis on the Yahuokou landslide reactivation and causes (Zhouqu County, Gansu, China)

窦晓东, 张泽林 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 9–18

甘肃舟曲江顶崖滑坡成因分析与综合治理措施

Causative analysis and comprehensive treatment of the Jiangdingya Landslide in Zhouqu County of Gansu Province

张卫雄, 翟向华, 丁保艳, 张文伦, 张国华 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 7–14

喜德县中坝村火后泥石流发育特征及预警避险

Study on the development characteristics of post-fire debris flow and its early warning risk aversion in Zhongba Village, Xide County

殷万清, 金涛, 胡卸文, 曹希超, 杨相斌, 黄健 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 61–69



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202305042

唐家凯, 吴玮江, 刘韬, 等. 甘肃灵台县南店子滑坡活动特征及成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(6): 20-29.

TANG Jiakai, WU Weijiang, LIU Tao, et al. Characteristics and causes analysis of Nandianzi landslide in Lingtai County, Gansu Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(6): 20-29.

甘肃灵台县南店子滑坡活动特征及成因分析

唐家凯¹, 吴玮江¹, 刘 韬¹, 宿 星¹, 万朝东², 张国信¹, 安亚鹏³, 李祖刚¹

(1. 甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃煤田地质局一四六队, 甘肃 平凉 744000; 3. 甘肃省农业大学水利水电学院, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 2021 年 10 月 3 日甘肃灵台南店子发生大型推移式黄土—泥岩接触面滑坡, 因成功预警而未造成人员伤亡。为探明南店子滑坡发生机理, 对滑体地形地貌、地层岩性、水文地质条件以及人类工程活动等进行了基础调查, 根据滑坡裂缝发育特征和差异, 将该滑坡体分为 5 个滑块, 并对每个滑体特征进行深入研究, 定性定量分析了不同滑坡部位的具体滑动情况, 并为滑坡分级分块的客观合理性和滑坡机理分析进一步提供证据。最终分析得出滑坡灾害的发生主要是: (1) 斜坡中下部和坡脚抗滑段不合理的大规模挖坡取土等人为活动使斜坡变陡、抗滑力减小; (2) 坡面洼坑, 导致排水不畅, 长期大量入渗软化了岩层接触面, 降低了斜坡的稳定性; (3) 长时间的强降雨。研究成果对于相似区域监测预警、风险评价和工程治理工作具有很好的借鉴意义。

关键词: 黄土滑坡; 滑移特征; 成因; 成功避险; 群测群防

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)06-0020-10

Characteristics and causes analysis of Nandianzi landslide in Lingtai County, Gansu Province

TANG Jiakai¹, WU Weijiang¹, LIU Tao¹, SU Xing¹, WAN Chaodong²,
ZHANG Guoxin¹, AN Yapeng³, LI Zugang¹

(1. Geological Hazards Prevention Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China;

2. 146th Team of Gansu Coalfield Geology Bureau, Pingliang, Gansu 744000, China;

3. College of Water Resources and Hydropower, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730030, China)

Abstract: On October 3, 2021, a large landslide occurred at the loess-mudstone interface in Nandianzi, Lingtai, its successful early warning measures preventing casualties. In order to investigate the occurrence mechanism behind the Nandianzi landslide, a basic investigation was conducted, covering the topography, lithology, hydrogeological conditions, and human engineering activities related to the landslide. Based on the characteristics and differences of the crack development of the landslide, the landslide mass was divided into five blocks. The characteristics of each block were thoroughly analyzed through qualitative and quantitative analysis. The specific sliding situation of different parts of the landslide was analyzed, and further evidence was provided for the objective rationality of landslide classification and zoning, as well as the analysis of landslide mechanisms. Ultimately, it is concluded that the main causes of landslide disasters are as follows: (1) Large-scale excavation and earthwork activities at the lower and middle parts of the slope and the toe, leading to slope steepening and reduced resistance to sliding; (2)

收稿日期: 2023-05-27; 修订日期: 2023-11-07

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42067066); 甘肃省科学院应用研究与开发项目(2022JK-04)

第一作者: 唐家凯(1981-), 男, 甘肃榆中人, 副研究员, 主要从事工程地质与地质灾害防治研究。E-mail: chinatjk@163.com

通讯作者: 吴玮江(1963-), 男, 甘肃天水人, 研究员, 主要从事工程地质与地质灾害防治研究。E-mail: wuj0408@163.com

Formation of slope depressions, causing inadequate drainage and softening of the rock layer contact surface, thereby diminishing slope stability; and (3) Prolonged heavy rainfall that leads to instability and causes significant loss. While the Nandianzi landslide in Lintai county represents a successfully averted disaster, it serves as a noteworthy case study and a cautionary example for scientifically and standardizedly approaching urban construction and rural revitalization in China. This study holds significance value for monitoring, early warning, risk assessment, and engineering treatment in comparable regions.

Keywords: loess landslide; sliding characteristics; cause; successful risk aversion; group measurement and mass prevention

0 引言

2021 年 10 月 3 日 22 时, 甘肃省灵台县城达溪河右岸的中台镇南店子村因暴雨引发大型推移式黄土—泥岩接触面滑坡灾害, 体积约 $3.65 \times 10^6 \text{ m}^3$ (图 1)。滑坡破坏房屋 443 间、G244 国道等道路 450 m 和 10 千伏输电线路 500 m, 农田 $73.9 \times 10^4 \text{ m}^2$, 直接经济损失 7 970 万元。由于预警及时, 未造成人员伤亡, 被评为 2021 年度全国地质灾害成功避险十大典型案例。



图 1 南店子滑坡全景

Fig. 1 Panoramic view of the Nandianzi landslide

西北黄土高原是我国滑坡灾害最为发育的地区之一^[1-2], 黄土滑坡分布广泛, 危害严重^[3-4]。长期以来, 许多学者和部门开展了黄土高原滑坡的研究: 彭建兵等^[5-6]对黄土高原滑坡的空间发育分布、抗滑因素等进行了全面系统的研究; 吴玮江等^[7-10]对甘肃东部滑坡发育分布、黄土滑坡类型与活动特征进行了深入研究; 李同录等^[11]对黄土滑坡类型、降水入渗引发滑坡开展了研究; 张国信^[12]对灵台地质灾害分布及发育特点进行了研究; 孙秀娟等^[13]通过对簸箕湾滑坡的研究提出了对灵台地质灾害防治的建议; 杨秀元等^[14]对灵台西塘湾滑坡根据勘查结果进行了深入的研究, 对此次研究具有较好借鉴作用。南店子滑坡与以上滑坡发生有很多不同之处, 是我们此次研究的重点, 对黄土区域类似情况有很好的警示和指导意义。

灵台县中台镇南店子滑坡具有规模大、影响因素和成因复杂、滑体稳定性差、造成的经济损失和潜在威

胁严重等特点, 非常具有代表性。在现场调查、勘探、无人机测量的基础上, 对南店子滑坡形成的地质环境、滑坡分级分块与滑移特征、影响因素与成因、滑坡稳定性与危害进行了系统研究, 取得了一些重要成果, 供类似滑坡灾害的科学防治和研究参考。

1 地质环境条件概况

1.1 气象水文

灵台县多年平均降水量 654.4 mm, 最大降水量 812.2 mm (1975 年), 降水多集中于 7—9 月。近年来极端性降水事件频发, 如 2010 年 7 月 22—25 日, 灵台县城降雨达 189.4 mm, 7 月 23 日一天降水 156.1 mm, 朝那一带达到降水 314 mm, 创有气象记录以来的极值。2013 年 7 月 21 日 16 时至 22 日 6 时, 全县 10 个乡镇降水超过 100 mm, 中台等 3 个乡镇超过 200 mm, 其中, 中台镇东王沟村达到 287.8 mm, 1 h 最大降水 82.3 mm, 为历史极值。

1.2 地形地貌

灵台县地处陇东黄土高原东南部, 主要为黄土残塬、黄土梁状丘陵构成的典型黄土高原地貌景观, 并受达溪河、黑河等河谷及沟谷切割^[15-17]。中台镇南店子滑坡位于达溪河南岸黄土斜坡的中下部, 斜坡近东西向延伸, 地势南高北低, 高差 150 m, 上陡下缓, 平均坡度 15° 。滑坡区自然地形较为完整, 为台阶状梯田, 植被较茂密, 两侧冲沟发育。前部达溪河 I、II 阶地宽度 600 ~ 1 000 m, 为县城新开发建设区。

1.3 地层岩性

滑坡区出露地层由老到新主要有:

(1) 下白垩统泾川组 (K_j): 棕褐—棕红色泥质砂岩和砂质泥岩, 薄—中厚层状构造, 层理发育, 产状近水平。遇水易软化, 属产状软弱岩组。

(2) 第四系: ①中更新统离石黄土 (Qp_2^{eol}): 浅黄、浅棕黄色, 土质均匀, 结构较致密, 夹杂数层褐红色古土壤和钙质结核层; 厚度 10 ~ 60 m, 分布于黄土梁中下部。②上更新统马兰黄土 (Qp_3^{eol}): 浅黄色, 质地均匀, 结构疏松, 一般厚度 10 m 左右, 广泛披覆于黄土梁地表。③全

新统冲洪积物(Qh^{apl}):上部为浅黄色粉质黏土,厚度约 10 m,下部为卵石层,厚度 5 m 左右,分布于达溪河 I、II 级阶地区。

1.4 水文地质

灵台县地下水主要有第四系松散岩类孔隙水、新生界碎屑岩类孔隙裂隙水两大类型。其中第四系松散岩类孔隙水包括河(沟)谷区砂砾卵石孔隙潜水;黄土残塬区、丘陵区黄土孔隙裂隙潜水,在黄土残塬区较为丰富^[18]。

1.5 人类工程活动

南店子村地处灵台县城区,随着近年来县城规模的迅速扩大,人类工程活动强烈,达溪河南北两岸开挖坡脚、扩大建设用地的现象较为普遍,对斜坡稳定性产生不利影响。

2 滑坡与分级分块特征

2.1 滑坡总体特征

南店子滑坡发育在达溪河南岸黄土斜坡的中下部,滑坡平面形态牡丹花状(图 2),长约 342 m,后缘宽约 365 m,前缘宽约 530 m,中部最宽处约 635 m,滑坡面积 $15.9 \times 10^4 \text{ m}^2$,据钻探资料滑体平均厚度约 23 m,体积约 $3.65 \times 10^6 \text{ m}^3$,滑体主要有原马兰黄土、离石黄土组成,下部带动了少量白垩系强风化泥岩,为大型中层推移式黄土—泥岩接触面滑坡,主滑向 5° (图 3)。滑坡后缘高程 1 018 m,前缘高程 935 m,高差 83 m,平均坡度 13° ,滑坡体由 3~4 级平台构成,并在后部滑体与滑壁之间形成深 3~5 m、长 100 m 的滑坡洼地,中部形成反坡地形和错台;滑体表面各种滑坡裂缝发育。

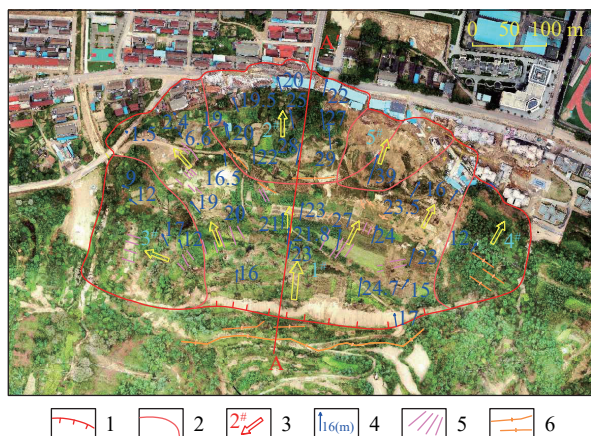


图 2 南店子滑坡分级分块与地物位移矢量图

Fig. 2 Classification and zoning of the Nandianzi landslide and vector map of terrain displacement

1—滑坡后壁;2—分块界线及编号;3—滑动方向;4—位移矢量;
5—放射状裂缝;6—拉张裂缝

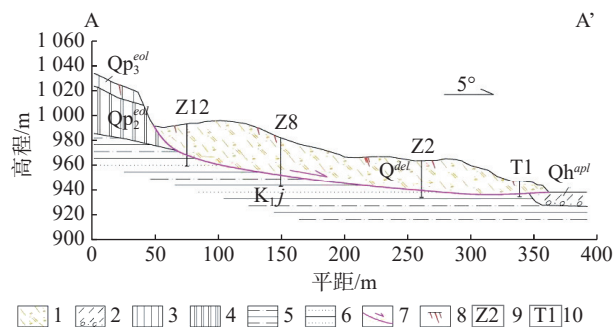


图 3 南店子滑坡 A-A'剖面图

Fig. 3 A-A' profile of Nandianzi landslide

1—滑坡堆积物;2—冲洪积粉土;3—马兰黄土;4—离石黄土;
5—泥岩;6—砂岩;7—滑动面;8—裂缝;9—钻孔;10—探井

根据钻探资料,南店子滑坡的主滑面发育于含水率高、抗剪强度低的强风化白垩系泥岩顶部,其形状主要受黄土与泥岩接触面控制,总体较为平缓,平均倾角 6° ,后部主滑段 10° ,中前部抗滑段倾角 3° ,前缘部分呈反翘状,倾角 -2° ,前部滑面平均倾角只有 1° 。剪出口位于 G244 公路南侧一带,受推挤影响形成鼓胀隆起,羽状裂缝发育,破坏坡脚道路,房屋开裂、倾斜、倒塌(图 4)。滑坡后部滑动面为发育于黄土层中的陡直拉裂面。



图 4 滑坡前缘破坏情况

Fig. 4 Damage situation at the front edge of the landslide

南店子滑坡整体滑动后,后部拉裂面形成高陡的滑坡壁,由马兰黄土和离石黄土组成,高差 20~35 m,坡度约 65° ,近东西向延伸,滑壁较为平直,其上条带状擦痕清晰(图 5)。滑坡壁后部 20~35 m 范围有 2~3 条平行后壁的牵引性拉张裂缝,长度 50~100 m,宽 20~50 cm,下错 30~100 cm,为本次滑坡大规模滑动时牵引滑坡壁后部土体变形的结果。其东侧部分宽 100 m 的范围于 10 月 10 日失稳滑动,体积约 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

2.2 滑坡分级分块特征

南店子滑坡的分级分块特征明显,利用滑坡前后影像资料对比,根据滑坡裂缝发育分布、滑壁形态、滑坡体地物位移等特征和差异,将该滑坡体分为 5 个滑块(图 2)。主要特征及相互关系见表 1。

表 1 各滑体特征及相互关系
Table 1 Characteristics and interrelationships of sliding body

滑体编号	基本特征	各滑体特征	相互关系
1#滑块	体积约 $2.55\times 10^6\text{ m}^3$, 滑动方向基本正北, 裂缝延伸方向与滑动方向大体一致(图5)	为本次滑坡的主推滑体, 后部与滑坡壁相接, 中间为滑坡洼地, 该滑块中前部发育平面呈弧形展布的放射状鼓胀裂缝带, 反映出该滑块的前部受到后部滑体推挤变形的特点。前部东、西两侧为尖角状滑舌向前伸出	受前部2#滑块的阻挡, 地形相对低洼且有积水, 抗滑能力弱
2#滑块	近东西向展布, 平均长度270 m, 中间宽160 m、东西两侧宽50 m左右, 体积约 $50\times 10^4\text{ m}^3$	与南部为1#滑块主体之间为挖方平台, 发育一条基本连续的向南凸出的弧形裂缝带, 长度280 m, 宽度2~5 m(图6-7), 裂缝表现出鼓胀的特点, 这一带原近水平地面有鼓起和反翘10°的现象(图8), 是挖坡取土和洼地渗水软化形成的薄弱部位	受1#滑块的推挤而滑动, 为本次滑坡的前部被推动体, 最前部鼓胀、剪张裂缝发育, 变形强烈, 破坏G244、商铺和居民住宅等, 为本次滑坡破坏和损失最严重的部位(图9)
3#滑块	位于滑坡西侧后部, 前缘临沟, 平面呈不规则三角形, 前缘北侧在小桥附近。滑块长度160 m, 平均宽160 m, 体积约 $25\times 10^4\text{ m}^3$	3#滑块位于滑坡西侧后部, 前缘临沟, 平面呈不规则三角形, 前缘北侧在小桥附近。滑块中前部发育与沟道近于平行展布的放射状裂缝带, 单条裂缝宽0.3 m左右。其滑坡后壁与主滑壁相连	主滑壁向西延伸部分实际上为3#滑块的北侧侧壁。该滑块后部受到1#滑块滑动时的侧向推挤作用, 向西侧沟道临空方向滑动, 其总体滑动方向约310°, 与主滑差异较大, 为一相对独特的滑块
4#滑块	滑块长度155 m, 平均宽80 m, 体积约 $25\times 10^4\text{ m}^3$	4#滑块位于滑坡东侧, 与3#滑块基本呈对称状分布, 平面为较规则等腰三角形, 4#滑块为夹于两条小冲沟之间的高平台, 西侧因人工开挖, 使得4#滑块西侧地势呈陡崖状, 高出1#滑块5~15 m, 也是4#滑块的西侧界, 近东西向拉张裂缝发育, 单条裂缝宽1~2 m左右, 东侧边缘地带也发育剪张裂缝。其滑动距离相对较小, 前缘15 m高的黄土陡坡发生滑塌, 摧毁挡土墙, 滑体前缘堆压在前部天泰嘉苑2栋在建住宅楼外墙	该滑块后部受到西侧1#滑块滑动时的牵引和推挤作用, 向西北临空方向滑动, 滑动方向约30°, 与主滑差异较大, 说明为一相对独立的滑块。
5#滑块	平面形态呈簸箕状, 滑块长度100 m, 平均宽80 m, 体积约 $10\times 10^4\text{ m}^3$	位于其上的输电线路铁塔滑移39 m, 是本次滑坡滑动最远的一块特殊滑块, 滑动方向约30°, 其原因与坡脚大规模开挖和顶部洼坑积水下渗有关	5#滑块位于滑坡前部东侧, 1#滑块与2#滑块之间, 实为1#滑块中的滑动更剧烈的一块, 为一相对独立的滑块



图 5 滑坡后壁擦痕与次级滑坡
Fig. 5 Scratches on the back wall of the landslide and secondary landslides



图 7 1#、2#滑块之间裂缝及地面拱起
Fig. 7 Cracks and ground arch between sliders 1# and 2#



图 6 1#、2#滑块之间裂缝及相对错动
Fig. 6 Cracks and relative mismovements between sliders 1# and 2#



图 8 1#、2#滑块部位平台反翘
Fig. 8 Reverse warping of the platform at the locations of sliders 1# and 2#

2.3 滑坡滑移特征

据现场目击者介绍南店子滑坡滑动时间约 30 min, 滑动速度较为缓慢。利用南店子滑坡发生前 2021 年

6 月和发生后 2021 年 10 月 4 日的两期无人机正射影像资料, 根据滑坡区建筑物、道路、电杆、铁塔、独立树木



图 9 2#滑块前部拱起及破坏楼房

Fig. 9 Upward arching and damaged buildings at the front of slide 2[#]

等 30 多处明显标志物滑动前后的位置, 确定本次滑坡的水平滑动距离和方向(图 2), 分析不同滑坡部位的具体滑动情况, 并为滑坡分级分块的客观合理性和滑坡机理分析进一步提供证据。

南店子滑坡 1#滑块的水平滑距中后部为 16~27 m, 东部滑距大于西部, 最大垂直滑距也就是后壁高度 20~36 m, 虽然后部的水平滑距较小, 但是垂直滑距最大的区域, 因此, 总滑距较大, 是滑动最为剧烈的部位之一, 总体滑动方向 5°; 西侧滑舌区水平滑距 5~19 m, 其后部滑距也大于前部, 滑动方向 317°。东侧滑舌水平滑距 9.5~23 m, 其后部滑距大于前部, 滑动方向 32°。说明东西两个滑舌区滑动时滑块内部处于挤压状态, 为典型的推移式滑动。2#滑块的水平滑距为 19~29 m, 也是东部滑距大于西部, 后部滑距大于前部, 滑动方向总体向北。从地物相对位置判断, 2#滑块的地面总体垂直拱

起, 一般 1~5 m。在 1#滑块的推力作用下失去稳定, 该滑块阻滑作用明显, 前部道路、楼房部分拱起 1~3 m。3#滑块的水平滑距为 9~17 m, 也是后部滑距大于前部, 因此, 在滑块中前部发育放射状裂缝带, 滑动方向总体向北西 310°。4#滑块为东侧滑距相对最小的侧向牵引部分, 中部水平滑距约 10 m, 前部 8~9 m, 滑距也是后部大于前部, 滑动方向总体向北东 32°, 滑块中前部发育数条规模较大的垂直滑动方向的拉张裂缝。5#滑块为东侧滑距相对最大的滑移部分, 中部一处输电线路铁塔水平滑距约 39 m, 是本次滑坡滑动最远的块体, 滑动方向约 30°。受其影响, 相邻的 2#滑块西侧的滑距也较大。南店子滑坡的滑距约 30 m, 平均滑速 1 m/min, 总体滑距较短、滑速较低。为滑坡区居民及时转移、安全避险提供了时间。

3 滑坡影响因素与成因分析

3.1 滑坡影响因素

南店子滑坡发育发生原因是斜坡中下部和坡脚抗滑段不合理的大规模挖坡取土等人为活动使斜坡变陡、抗滑力减小, 并地面留有洼坑, 导致排水不畅, 长期大量入渗软化, 人为降低了斜坡的稳定性, 再由暴雨直接引发, 并造成重大灾害损失。

(1) 斜坡中下部和坡脚大规模挖坡取土: 据多期卫星影像资料(图 10), 自然状态下南店子村南侧为平均坡度约 13°的黄土缓坡, 冲沟不甚发育, 坡面完整, 其上



(a) 2000年



(b) 2014年



(c) 2018年



(d) 2021年

图 10 滑坡区中下部、坡脚开挖取土历史影像

Fig. 10 Historical image of soil excavation in the middle and lower part of landslide area and at the foot of slope

为农田及少量植被,形状较为规则,前缘阶地区有少量居民院落和道路,人类活动对斜坡的影响轻微。自2010年以来,在斜坡中前部长期进行了大规模的挖坡取土,挖土范围东西长近400 m、南北宽50~180 m,挖土面积约 $4.4 \times 10^4 \text{ m}^2$,特别是在东部的挖土规模最大,参照挖土现场残留地形估算,平均开挖深度7 m,估算挖方量约 30 m^3 。同时,前缘中部坡脚下楼房建设也对坡脚进行开挖,挖方体积约 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。2017年以来,位于斜坡东部前缘的天泰嘉苑住宅东部坡脚又进行了开挖,估算挖方量约 $9 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图11)。



图11 滑坡前地表积水洼地

Fig. 11 Surface water depression before landslide

以上总计开挖土体积达 $40 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右,约占本次滑坡方量的11%,沿斜坡中下部及坡脚平均每延米宽度的开挖量达 $800 \text{ m}^3/\text{m}$,使斜坡变陡、抗滑段抗滑能力大幅减小。因此,挖方取土对斜坡稳定性产生严重不利影响。本次滑坡的滑移特征也与挖方情况密切相关,挖方规模越大的部位,滑移越强烈。如5#滑块前缘开挖成为30多米高的陡坡,临空条件最好,是本次滑坡的最大滑移部位,水平滑距达39 m。前部滑动面的反翘也可能与开挖较深的取土坑有关。

(2)斜坡中部积水下渗软化土体:斜坡中下部开挖取土后地面留有洼坑,且未进行平整,导致地表排水不畅,形成多处积水洼地,汇集斜坡上部 and 周围大面积的地表径流。据影像资料,积水面积约 1000 m^2 (图12)。洼地积水长期大量渗入、软化斜坡深部土体,降低土体抗剪强度和斜坡稳定性。

(3)连阴雨及暴雨引发:2021年9月以来陇东地区阴雨连绵,降水量高于同期平均值,9—10月的降水量达400 mm以上,占全年降水量的一半左右(图12)(2021年4月开始观测),大量降水入渗地下软化土体,据调查,2021年9月灵台县平均累计降雨296.6 mm,其中15~28日除21日无降雨外,其余12 d均有降水,该段时间累计降雨258.8 mm^[19]。10月3日陇东南地区出现罕见的大面积暴雨,灵台县平均降雨量为116 mm,其中灵台县城降水量97.5 mm,坡体中部洼地区大量积水并

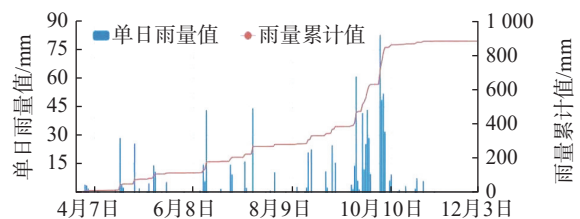


图12 灵台县2021年4—11月降水量分布图

Fig. 12 Precipitation distribution map of Lingtai County from April to November 2021

下渗(图13),部分地段发育落水洞,更使大量水体渗入斜坡深部,土体强度和斜坡稳定性降低。最终引发斜坡整体大规模失稳滑动,发生严重的滑坡灾害。



图13 滑坡期间地表积水洼地

Fig. 13 Surface water depression during landslide

由上可见,在斜坡中下部及前缘不合理的大规模挖坡、挖方区地面洼坑导致地表排水不畅,多处洼地长期积水下渗降低了斜坡稳定性,埋下了重大隐患和苦果,是本次滑坡灾害发生的重要原因。

3.2 滑坡成因分析

(1)定性分析

根据南店子滑坡发育的斜坡地质结构、滑坡结构、分级分块特征和滑移矢量分析,该滑坡为推移式黄土—泥岩接触面滑坡,其成因具有特殊性和特点。斜坡中下部的大规模挖坡使上部斜坡坡度和临空面增大,形成主动下滑段,并减小了中部斜坡的抗滑力。其前部挖方区为多处洼地积水下渗区,长期入渗软化深部岩土界面处,由于下部泥岩的隔水作用,地下水在此富集,黄土和泥岩顶部强风化层软化后,抗剪强度大幅降低,使斜坡的稳定性大大降低。2021年9月以来的连阴雨和10月3日的暴雨引发上部1#滑块首先沿坡度 10° 抗剪强度低的白垩系顶部强风化层向北发生滑动,是本次滑坡的主动推滑体,产生巨大的推滑作用。2#滑块是被动推滑体,西侧3#滑块的形成相对更为特殊,因其西侧沟道切割,临空条件好,1#后部主滑块对其产生北西向的侧向推挤作用,使3#滑块向西侧沟道方向滑动。东侧4#滑块地势较高,相对独立,受1#主滑块的后部推挤和侧向牵引作用,产生滑动,其滑距较小。5#滑块滑距达39m,其

形成也有特殊原因。一是近年来前缘开挖强烈,临空条件最好;二是 5#滑块后部是洼地长期积水最严重地区,土体含水率高,钻探时钻孔严重缩径,深部土体软化,抗剪强度低,因此 5#滑块稳定性差,后部又受 1#主滑块的推挤作用,滑动较远,滑体填满了前部取土洼坑。

(2) 定量分析

对滑坡稳定性进行定量分析,本次计算以 A-A'剖面作为计算模型。

根据现场勘查取样试验和相关资料,综合考虑滑体

的组成和特征,滑坡在天然状态下为基本稳定状态,稳定系数取 1.10,天然容重为 19.0 kN/m^3 ,饱和容重取 20.0 kN/m^3 。黏聚力的取值范围为 $10 \sim 13 \text{ kPa}$,内摩擦角的取值范围为 $14^\circ \sim 17^\circ$ 。经过对恢复原始地形的 A-A'剖面反演分析后,选取黏聚力 11 kPa ,内摩擦角 15.5° 作为天然状态抗剪强度的反演值。

南店子滑坡为中层土质滑坡,潜在滑动面按折线考虑。滑坡稳定性定量计算采用折线型滑动面计算公式进行计算(图 14)。其计算模型如下:

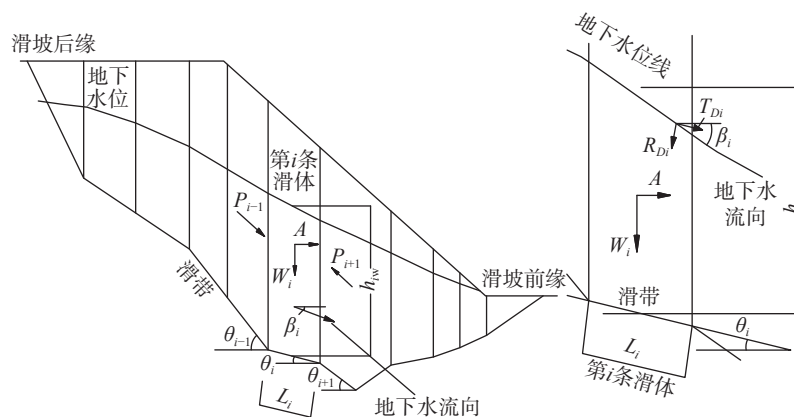


图 14 传递系数法(折线型滑面)计算模型

Fig. 14 Calculation model using the transfer coefficient method (piecewise sliding surface)

计算公式

$$K_f = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left((W_i (1 - r_u) \cos \alpha_i) \tan \varphi_i + c_i L_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left(W_i (\sin \alpha_i + A \cos \alpha_i) \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j \right) + T_n}$$

式中:

$$R_n = (W_n ((1 - ru) \cos \alpha_n - A \sin \alpha_n) - R_{Dn}) \tan \varphi_{in} c_n L_n$$

$$T_n = W_n (\sin \alpha_n + A \cos \alpha_n) + T_{Dn}$$

$$\prod_{j=i}^{n-1} \psi_j = \psi_i \psi_{i+1} \cdots \psi_{n-1}$$

式中: ψ_j ——第 i 块段的剩余下滑力传递至第 $i+1$ 块段时的传递系数($j=i$), $\psi_j = \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1}) - \sin(\alpha_i - \alpha_{i+1}) \tan \varphi_{i+1}$

W_i ——第 i 条块的重量/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$;

c_i ——第 i 条块黏聚力/ kPa ;

φ_i ——第 i 条块内摩擦角/ $^\circ$;

L_i ——第 i 条块滑带长度/ m ;

α_i ——第 i 条块滑带倾角/ $^\circ$;

β_i ——第 i 条块地下水线与滑带的夹角/ $^\circ$;

A ——地震加速度(重力加速度 g);

K_f ——稳定系数。

本次滑坡稳定性计算工具采用理正岩土计算 6.0 软件 Excel 手工计算相结合,在各工况条件下的计算结果见表 2。

表 2 A-A'滑坡稳定性计算结果

Table 2 Calculation results of landslide stability

工况	稳定系数
自重	1.02
自重+持续强降雨	0.89

计算结果表明,滑坡在自重工况下计算的稳定系数为 1.02,处于欠稳定状态;在自重+持续强降雨情况下,稳定系数为 0.89,处于不稳定状态。

(3) 数值分析方法

采用有限差分法软件 FLAC3D 进行滑坡发生后的斜坡数值分析,斜坡稳定性系数计算采用强度折减法。

结果显示,不同工况下,水平方向最大位移均集中

在滑体上(图 15),垂直方向位移最大值以及总位移最大值均集中在滑体顶部(图 16、图 17)。自重+持续强降雨工况下,由于土体饱和度增加,坡体位移量增加,但主要集中在滑体上,从坡体顶部向坡脚处延伸。

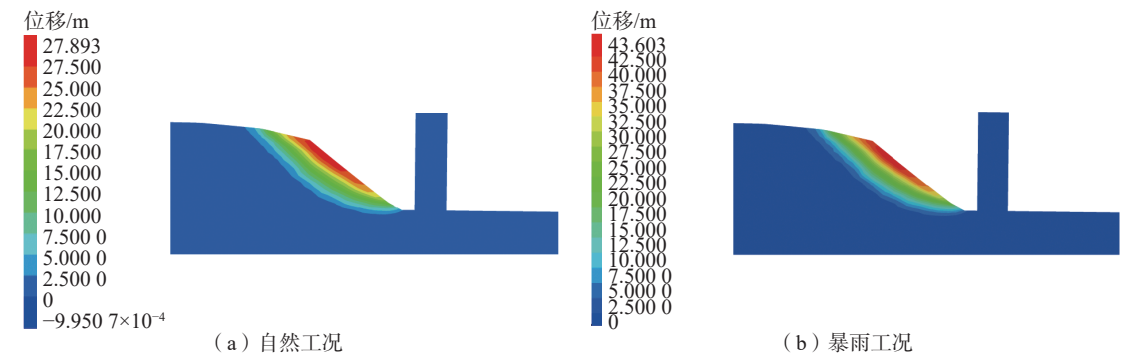


图 15 不同工况下斜坡水平位移云图
Fig. 15 Horizontal displacement contour map of slopes under different working conditions

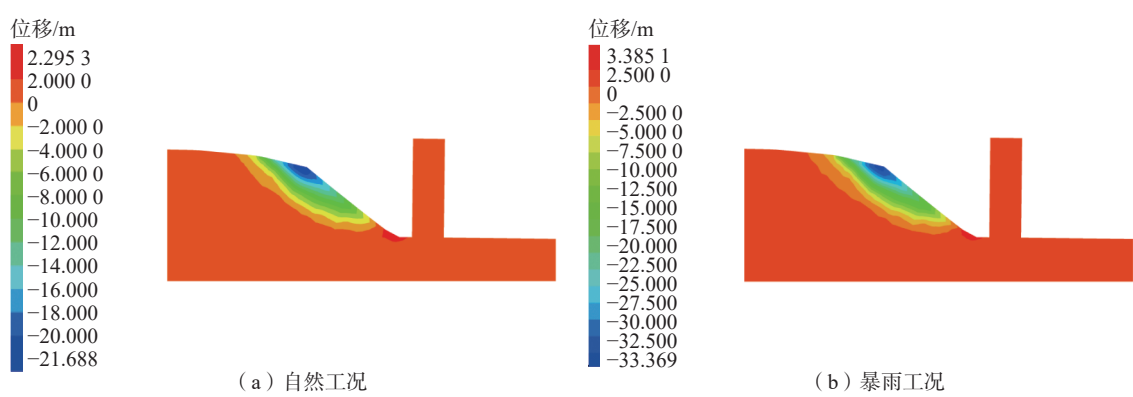


图 16 不同工况下斜坡垂直位移云图
Fig. 16 Vertical displacement contour maps of slopes under different operating conditions

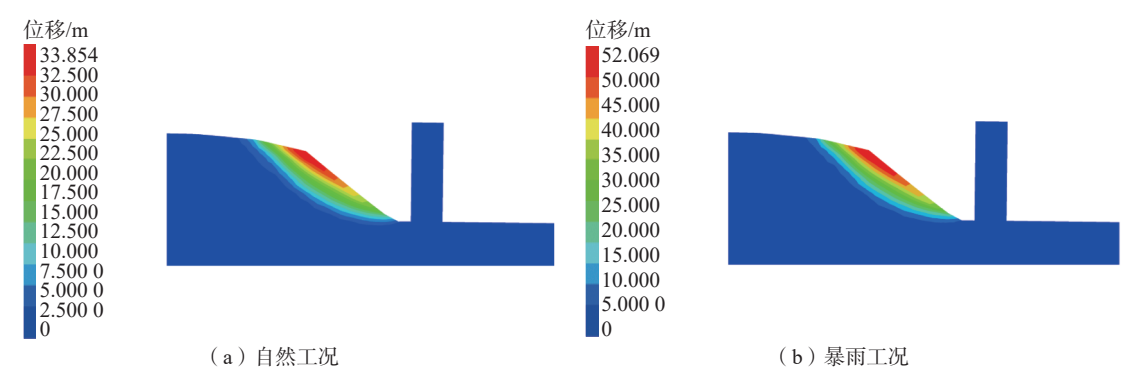


图 17 不同工况下斜坡总位移云图
Fig. 17 Total displacement contour map of slopes under different operating conditions

4 滑坡现状稳定性与危险性

南店子滑坡经过本次大规模滑动,目前滑体整体较为稳定,但前缘东侧天泰嘉苑住宅小区段、滑坡后壁等部位的稳定性差,裂缝发育,降水易入渗软化土体,局部再次失稳复活滑动的可能性大,危害严重。

滑坡前缘东侧天泰嘉苑住宅小区段主要包括 4#滑块至 5#滑块及之间的滑坡前缘,其中 4#滑块为本次滑坡推挤牵引部分,重心位置高,滑距短,能量释放不彻底,地表拉张裂缝发育,稳定性差,严重威胁前缘紧临住宅楼的安全。5#滑块尽管本次滑动较为剧烈,但前部地形高陡,临空条件好,滑体结构破碎,稳定性也差;4#滑块

至 5# 滑块之间为 1# 滑块东侧滑舌, 地势低洼, 易汇集地表水, 滑体含水率高, 稳定性差。均对前部天泰嘉苑住宅小区的建设和运营造成严重威胁。

西侧 3# 滑块前缘位于冲沟沟底, 直接受洪水冲刷, 可能再次失稳滑动, 并转化为泥石流, 形成链式灾害, 威胁沟口县城安全。

另外, 南店子滑坡后壁高陡, 后部拉张裂缝发育且规模大, 上部坡面径流很易沿其渗入, 稳定性差, 局部已发生小规模失稳滑动, 还可能再次发生小规模失稳滑动。

南店子滑坡发生后, 对滑坡进行了后壁削坡、滑体上部减载, 并对西侧前缘回填反压, 使滑坡险情得到很大缓解, 并形成了三级宽平台, 有利于今后开发利用(图 18)。滑坡东侧天泰嘉苑一带将采取以抗滑桩为主的永久性支挡工程进行综合治理。



图 18 应急治理后的滑坡状况

Fig. 18 Landslide condition after emergency treatment

5 结论与建议

灵台县城南店子滑坡位于达溪河南岸, 滑坡长 342 m、宽 365 ~ 650 m、面积 $15.9 \times 10^4 \text{ m}^2$, 平均厚度约 23 m, 体积约 $3.65 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。主滑向 5°, 滑动面受土岩界面控制, 为大型中层推移式黄土—泥岩接触面滑坡。通过对滑坡活动特征和成因分析, 主要得出以下结论:

(1) 南店子滑坡是一个典型的黄土-基岩接触面滑坡, 整个滑坡滑动时间约 30 min, 总体滑速较为缓慢, 分析认为由于坡脚开挖作用导致边坡稳定性降低, 强降雨直接诱发滑坡产生, 该滑坡的产生和发育机理受到降雨和开挖作用的共同影响。

(2) 南店子滑坡发育于黄土斜坡中下部平均坡度 13° 的缓坡区, 坡体主要有马兰黄土和离石黄土组成, 基底为近水平状白垩系泥岩和砂岩, 在降雨、地震和人类工程活动等条件诱发下可能发生崩塌或者滑坡, 斜坡变形破坏过程表现为开挖卸荷—蠕滑—拉裂、降雨入渗—蠕滑—拉裂和地下水补给—蠕变—液化破坏三种

模式相互影响、相互作用的结果。

(3) 灵台县南店子滑坡由于预警及时, 未造成人员伤亡, 是地质灾害群测群防的成功事例, 值得庆幸。但不合理的大规模挖坡活动在该滑坡的形成中扮有重要角色, 造成了严重的经济损失, 也又一次为今后山区城镇建设、乡村振兴等工程建设活动的更加科学规范提供了典型案例和警示, 应深刻汲取惨重的经验教训。

(4) 针对同类型黄土滑坡研究, 通过定性定量、参数反演等方式探明南店子滑坡的主要致灾因子是降雨和前期的坡脚挖土, 这一结论可以应用到黄土滑坡风险评价中, 为黄土地区滑坡灾害监测预警、风险评价及工程治理提供一定科学参考。

参考文献(References):

- [1] 王磊, 李荣建, 杨正午, 等. 强降雨作用下黄土陡坡开裂特性测试 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(5): 1338 - 1346. [WANG Lei, LI Rongjian, YANG Zhengwu, et al. Experimental study on cracking characteristics of loess steep slope under intensive rainfall [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(5): 1338 - 1346. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 刘凡, 邓亚虹, 慕焕东, 等. 基于最大熵-无限边坡模型的降雨诱发浅层黄土滑坡稳定性评价方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 146 - 158. [LIU Fan, DENG Yahong, MU Huandong, et al. A study of the stability evaluation method of rainfall-induced shallow loess landslides based on the Maxent-Sinmap slope model [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 146 - 158. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 郭富赞, 张龙生, 王信, 等. 甘肃黑方台罗家坡滑坡演化过程及运动机制分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(2): 11 - 20. [GUO Fuzun, ZHANG Longsheng, WANG Xin, et al. Analysis on evolution process and movement mechanism of the Luojiapo landslide in Heifangtai, Gansu Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(2): 11 - 20. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 尹玉玲, 徐素宁, 王军, 等. 典型黄土丘陵区地质灾害隐患识别与时序监测 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 141 - 149. [YIN Yuling, XU Suning, WANG Jun, et al. Identification and time series monitoring of hidden dangers of geological hazards in the typical loess hilly regions [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 141 - 149. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 彭建兵, 王启耀, 庄建琦, 等. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制 [J]. 地质力学学报, 2020, 26(5): 714 - 730.

- [PENG Jianbing, WANG Qiyao, ZHUANG Jianqi, et al. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26(5): 714 – 730. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 彭建兵,王启耀,门玉明.黄土高原滑坡灾害 [M]. 北京:科学出版社,2019. [PENG Jianbing, WANG Qiyao, MEN Yuming. Landslide disaster in loess plateau [M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)]
- [7] 吴玮江,王念秦.甘肃滑坡灾害 [M]. 兰州:兰州大学出版社,2006. [WU Weijiang, WANG Nianqin. Landslide hazards in Gansu [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2006. (in Chinese)]
- [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. [WU Weijiang, SU Xing, FENG Letao, et al. The study on landslide types and activity characteristics in Heifangtai, Gansu Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(6): 1483 – 1495. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 吴玮江,宿星,刘伟,等.黄土-泥岩接触面滑坡的特征与成因 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1167 – 1175. [WU Weijiang, SU Xing, LIU Wei, et al. Loess-mudstone interface landslides: Characteristics and causes [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(5): 1167 – 1175. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 吴玮江,宿星,叶伟林,等.饱和黄土滑坡形成中的侧压力作用——以甘肃黑方台为例 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊1): 135 – 140. [WU Weijiang, SU Xing, YE Weilin, et al. Lateral pressure in formation of saturated loess landslide—case study of Heifangtai, Gansu Province [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(Sup1): 135 – 140. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李同录,李颖喆,赵丹旗,等.对水致黄土斜坡破坏模式及稳定性分析原则的思考 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(2): 25 – 32. [LI Tonglu, LI Yingzhe, ZHAO Danqi, et al. Thoughts on modes of loess slope failure triggered by water infiltration and the principals for stability analysis [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(2): 25 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张国信,周自强,李高平,等.滑坡地质灾害风险防控与应急处置——以灵台县城南店子村滑坡地质灾害成功避险为例 [J]. *甘肃科技*, 2023, 39(5): 20 – 25. [ZHANG Guoxin, ZHOU Ziqiang, LI Gaoping, et al. Risk prevention and emergency treatment of landslide geological disasters—taking the successful avoidance of landslide geological disasters in Dianzi Village, south of Lingtai County as an example [J]. *Gansu Science and Technology*, 2023, 39(5): 20 – 25. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 孙秀娟,杨强,田运涛,等.陇东某黄土滑坡地质灾害成因、特征分析及防治对策 [J]. 勘察科学技术, 2010(4): 28 – 31. [SUN Xiujuan, YANG Qiang, TIAN Yuntao, et al. Cause of formation, characteristic analysis of loess landslides geological hazards in east of Gansu and its preventive countermeasures [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2010(4): 28 – 31. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 杨秀元,田运涛,王爱军.西塘湾滑坡成因分析及稳定性评价 [J]. *山西建筑*, 2010, 36(25): 84 – 86. [YANG Xiuyuan, TIAN Yuntao, WANG Aijun. Causes analysis and stability assessment of Xitang Bay landslide [J]. *Shanxi Architecture*, 2010, 36(25): 84 – 86. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 冉林,马鹏辉,彭建兵,等.甘肃黑方台“10·5”黄土滑坡启动及运动特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 1 – 9. [RAN Lin, MA Penghui, PENG Jianbing, et al. The initiation and motion characteristics of the “10·5” loess landslide in the Heifangtai platform, Gansu Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(6): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 孙萍萍,张茂省,江睿君,等.降雨诱发浅层黄土滑坡变形破坏机制 [J]. 地质通报, 2021, 40(10): 1617 – 1625. [SUN Pingping, ZHANG Maosheng, JIANG Ruijun, et al. Deformation and failure mechanism of rainfall-induced shallow loess landslide [J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(10): 1617 – 1625. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 毛正君,张瑾鸽,仲佳鑫,等.梯田型黄土滑坡隐患发育特征与成因分析——以宁夏南部黄土丘陵区为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 142 – 152. [MAO Zhengjun, ZHANG Jingge, ZHONG Jiaxin, et al. Analysis of basic characteristics and deformation mechanism of loess potential landslide of terrace: Taking loess hilly region in southern Ningxia as an example [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(6): 142 – 152. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 李拴虎,亓越,王晓荣,等.黄土-泥岩滑坡渐进滑动失稳的模型试验研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 200 – 207. [LI Shuanhu, QI Yue, WANG Xiaorong, et al. Physical modelling of progressive sliding instability of loess-mudstone landslide [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2023, 43(2): 200 – 207. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 冯海奎.浅谈灵台县山洪地质灾害现状及成因分析 [J]. 科技风, 2020(35): 122 – 123. [FENG Haikui. Discussion on the present situation and cause analysis of geological disasters of mountain torrents in Lingtai County [J]. *Technology Wind*, 2020(35): 122 – 123. (in Chinese with English abstract)]