

甘肃黑方台罗家坡滑坡演化过程及运动机制分析

郭富, 张龙生, 王 信, 宋晓玲

Analysis on evolution process and movement mechanism of the Luojiapo landslide in Heifangtai, Gansu Province

GUO Fuyun, ZHANG Longsheng, WANG Xin, and SONG Xiaoling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202201006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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, 张文纶, 张国华 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 7-14

堰塞坝堆积演化过程及开发利用研究进展

Research progress on the evolution and utilization of the barrier dam accumulations

王环玲, 屈晓, 徐卫亚, 王如宾, 刘士奇 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 84-94

基于RBF神经网络信息量耦合模型的滑坡易发性评价

Landslide susceptibility assessment by the coupling method of RBF neural network and information value: A case study in Min Xian, Gansu Province

黄立鑫, 郝君明, 李旺平, 周兆叶, 贾佩钱 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 116-126

甘肃舟曲亚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

贵州纳雍“8·28”崩塌破坏过程与变形破坏机理初探

肖锐铨, 陈红旗, 冷洋洋, 魏云杰, 王文沛 中国地质灾害与防治学报. 2018, 29(1): 3-9

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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202201006

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 Fuyun, 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.

甘肃黑方台罗家坡滑坡演化过程及运动机制分析

郭富赞, 张龙生, 王 信, 宋晓玲

(甘肃省地质环境监测院, 甘肃兰州 730050)

摘要: 2015 年 4 月 29 日 7 时 50 分, 甘肃省永靖县黑方台发生了大规模的滑坡, 滑坡体积达 $1.27 \times 10^6 \text{ m}^3$, 摧毁了 14 户民房和 3 家工厂, 造成直接经济损失 5 460 万元。在对灾害现场进行大量地质调查的基础上, 结合遥感、三维激光扫描等综合调查手段和现场视频监控资料, 对罗家坡滑坡演化滑动特征进行了详细描述, 对滑坡高速远程机制进行了解析。研究结果表明: 罗家坡滑坡从时间线上先后经过 5 个阶段 5 种滑动形态, 分别是黄土错落-碎屑流、黄土泥岩-碎屑流、黄土-碎屑流、黄土泥流和黄土错落滑动阶段。滑坡运动模式可分为块体碎屑流和黄土泥流两种类型, 其中块体-碎屑流高速远程形成机制与先期滑体的“填凹造床效应”和高含水的下垫面土体密切相关。研究结果对于进一步加深对黑方台地区高速远程滑坡的形成机制的认识和风险控制具有积极的指导意义。

关键词: 黑方台; 黄土滑坡; 碎屑流; 泥流; 高速远程; 机制

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)02-0011-10

Analysis on evolution process and movement mechanism of the Luojiapo landslide in Heifangtai, Gansu Province

GUO Fuyun, ZHANG Longsheng, WANG Xin, SONG Xiaoling

(Institute of Geo-environmental Monitoring of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: At 7:50 on April 29, 2015, a large-scale landslide occurred in Heifangtai, Yongjing County, Gansu Province, with a landslide volume of $126.88 \times 10^4 \text{ m}^3$, destroying 14 houses and three factories, resulting in a direct economic loss of 54.6 million yuan. Based on a large number of geological investigations on the disaster site, combined with comprehensive investigation means such as remote sensing, three-dimensional laser scanning and on-site video monitoring data, this paper evolution and sliding characteristics of Luojiapo landslide in detail, and analyzes the high-speed remote mechanism of the landslide. The results show that Luojiapo landslide has gone through five stages and five sliding forms from the timeline: loess staggered debris flow, loess mudstone debris flow, loess debris flow, loess mudflow and loess staggered sliding. The landslide movement mode can be divided into two types: block debris flow and loess mud flow. The high-speed and long-distance formation mechanism of block debris flow is closely related to the “concave bed filling effect” of the previous landslide and the underlying surface soil with high water content. The research results have positive guiding significance for further deepening the understanding of the formation mechanism and risk control of high-speed and long-distance landslides in the Heifangtai area.

Keywords: Heifangtai; loess landslide; debris flow; mud flow; high-speed remote; mechanism

收稿日期: 2022-01-07; 修订日期: 2022-05-05

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 甘肃省科技重大专项(19ZD2FA002)

第一作者: 郭富赞(1970-), 男, 甘肃景泰人, 博士, 正高级工程师, 主要从事地质灾害防灾减灾方面的研究工作。

E-mail: fyg51913@163.com

通讯作者: 张龙生(1984-), 男, 甘肃陇南人, 学士, 工程师, 主要从事地质灾害防灾减灾方面工作。E-mail: 312073027@qq.com

0 引言

甘肃永靖黑方台地处干旱少雨的西北黄土高原地区,原本是旱塬,降水稀少。1968年,刘家峡水库修建导致库区大量移民搬迁至黑方台,并开始引水灌溉,至1984年开始报道该地区由于灌溉引发滑坡100余起^[1]。截至2021年9月,该区域已发生滑坡154次,造成38人死亡,100余人受伤,450户群众、1所中学、2所小学和1处加油站被迫搬迁,近 $2.0 \times 10^6 \text{ m}^2$ 耕地弃耕, $33 \times 10^4 \text{ m}^2$ 农田被毁,并多次埋没通往盐锅峡化工厂和盐锅峡电厂的公路,滑坡造成直接经济损失超过4亿元。许多学者对黑方台滑坡特征进行了大量的研究,吴玮江等^[2]研究认为黑方台滑坡类型包括黄土滑坡、黄土-泥岩滑坡两种类型,并指出黄土滑坡具有高速远程和继发性强的特点,黄土-泥岩顺层滑坡具有低速近程和复活性的特点。许领等^[3]对黑方台滑坡进行了系统

的分类,划分为黄土泥流,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。武彩霞等^[4]通过试验研究指出,黄土泥流滑坡呈流态化运移特征,滑距可达300m以上,是黑方台危害最为严重的一类滑坡。近年来,随着国家对地质灾害防治的重视,对黑方台滑坡研究成果层出不穷^[5-10],推动了黑方台滑坡的综合研究和治理工作。

2015年4月29日07时55分—11时15分,甘肃省永靖县盐锅峡镇党川村罗家坡段发生滑坡(图1),造成生辉碳化硅厂、碳素化工厂、广利铸造厂厂房、设备被压埋;盐锅峡—中庄乡道阻断;盐锅峡镇110kV输电塔、输电线路破坏,供电中断;盐锅峡、西河镇人饮供水管道破坏,两镇近7000人的供水受影响,直接经济损失5600万元,形成特大滑坡灾害,引起了社会的广泛关注。

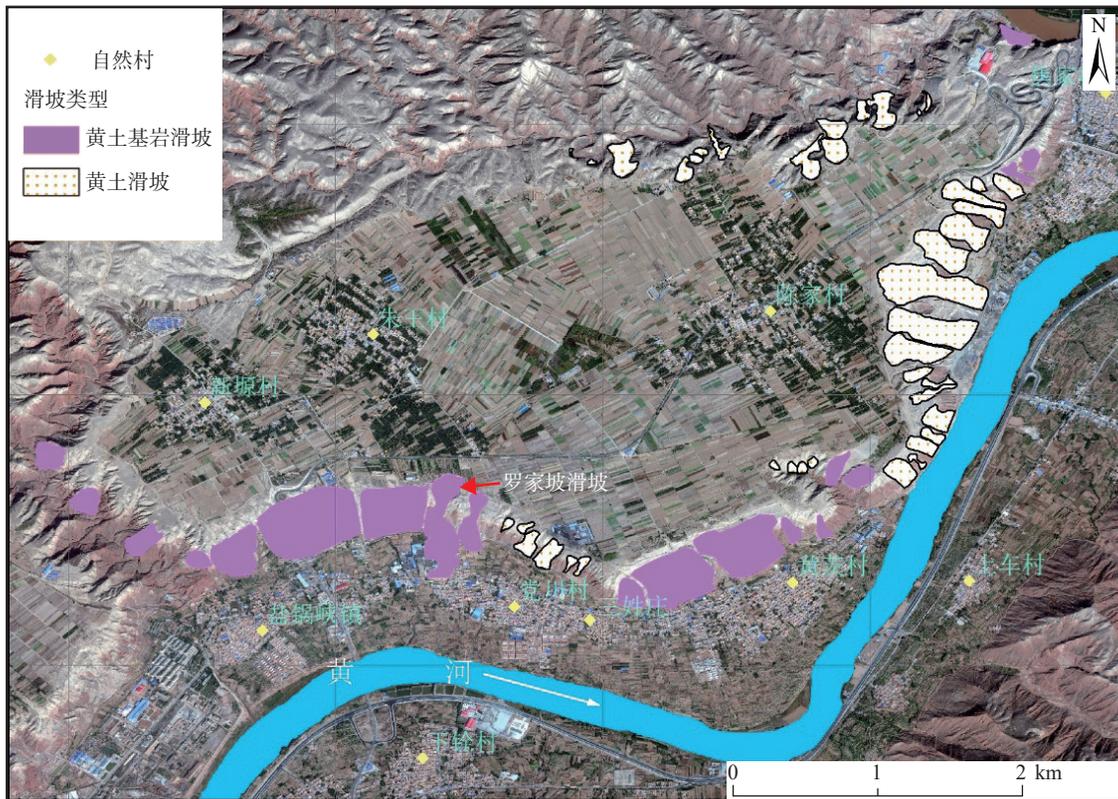


图1 罗家坡滑坡位置图

Fig. 1 Location of Luojiapo landslide

滑坡演化特征揭示了滑坡从孕育、发展、致灾直至消亡的全过程,是滑坡灾害预防、预测、预报和有效防治的理论基础,但由于滑坡自身的复杂性,其形成多因素性及诱发因素多样性,而使得滑坡发生具不确定性,因此成为国内外工程地质界研究的热点^[11]。罗家坡

滑坡发生后,吴玮江等^[12]、许强等^[13]对该滑坡进行了调查研究,认为滑坡滑动总体分为两阶段,均为黄土高速远程滑坡。忽略了第一阶段为黄土泥岩滑坡、第三阶段黄土泥流的发生及后期滑坡后壁的小型滑坡滑动阶段,未能反映滑坡全生命周期的演化特征。为了进一步

厘清黑方台“4·29”特大滑坡灾害特征,本文研究了滑坡活动全生命周期基本特征和高速远程形成机制。作为滑坡现场亲历者,本文在勘查资料基础上,结合视频资料分析、历史遥感资料分析,从时间线上对黑方台“4·29”滑坡的演化特征进行了进一步划分,将该滑坡的演化划分为5个阶段,这5个阶段也刚好对应了5种滑坡形态,并对滑坡的运动特征进行分析,对其中的黄土-碎屑流高速远程滑坡机制做了研究。总体认为该滑坡在黑方台滑坡中具有典型代表性,对其开展研究有助于对黑方台地区滑坡灾害的认识,并有助于防灾减灾工作的开展。

1 滑坡区地质背景

罗家坡滑坡位于黑台台塬党川村罗家坡段。黑台台塬为黄河Ⅳ级基座阶地,其南部前缘与黄河Ⅱ级阶地相接,中间缺失Ⅲ级阶地。黑台台塬海拔 1 710 m,Ⅱ

级阶地海拔 1 590 m,相对高差达 120 m。坡体上陡下缓,上部坡度 40°左右,下部坡度 20°~35°,平均坡度约 35°,台塬边缘多滑坡、坍塌堆积物,边坡地形破碎,由于受滑坡、坍塌的影响,塬下多土丘,地面起伏不平。

滑坡区出露地层主要有第四系上更新统风积马兰黄土、冲积粉土、卵石及白垩系砂质泥岩等(图 2)。其中 0~24 m 为 Qp 马兰黄土,结构疏松;24~44 m 为 Qp 冲积次生黄土,较上部黄土致密;44~52 m 为冲积粉质黏土,有层理,含粉砂,致密坚硬;该层之下为 5 m 厚的卵石层,为黄河四级阶地堆积;卵石层之下为缓倾的白垩系紫红色砂泥岩,基岩产状为 161°∠10.5°。

黑方台高出现代河床 120 余米,且四周临空孤立,具有特殊的水文地质结构,由于冲积粉质黏土隔水层分割了黄土含水层和卵石含水层,因此形成了上部黄土富含水,而下部卵石弱含水,白垩系系基岩裂隙局部含水的特殊含水的的多层含水岩组结构。

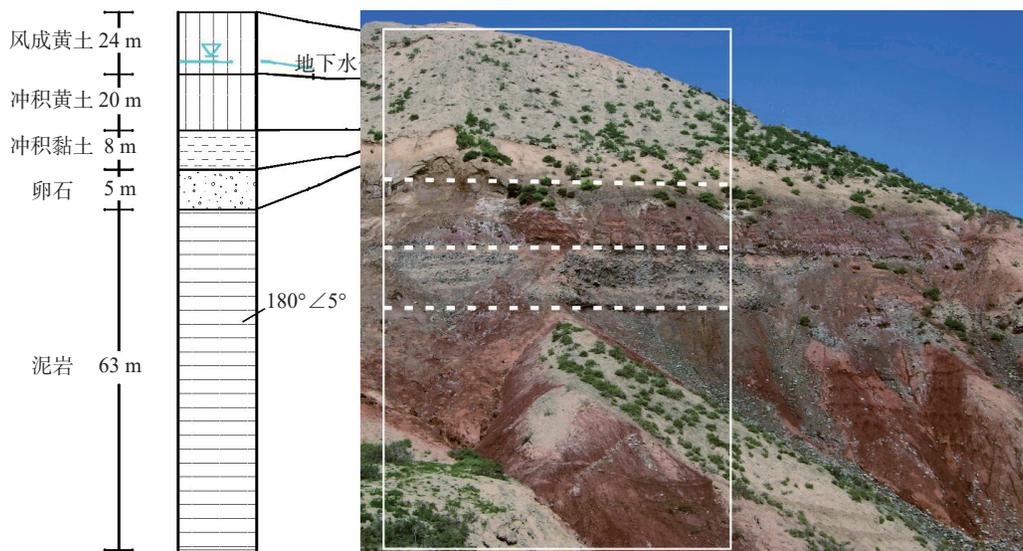


图 2 罗家坡滑坡地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of Luojiapo landslide

黑方台黄土含水层的形成以 1968 年为时间节点,前后经历了天然状态和人工灌溉状态两个阶段。1968 年前,天然状态大气降水是地下水的唯一补给来源,黄土含水层很薄,在台缘带存在少量泉水分布,年总排泄量约为 $3.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。1968 年以后,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,灌溉面积为 753 ha,年提水总量为 $6 \times 10^6 \sim 8 \times 10^6 \text{ m}^3$,2018 年达到 $11 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。长期的灌溉导致台塬区的地下水迅速抬升,中心区地下水埋深最浅至 0.3 m,塬边水位埋深 17~24 m,2018 年测得泉水溢出量达 $1.92 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$,

是天然状态下泉水溢出量的 60 倍。根据近期的观测资料,塬面地下水位形成了春季灌溉高水位期和滑坡多发期重合的特征,地下水成为滑坡形成的主要动力因素。

2 罗家坡滑坡基本特征

罗家坡滑坡为一大型黄土泥岩高位、高速、远程牵引式滑坡,滑体物质组成为马兰黄土(粉土)、粉质黏土和泥岩,滑床为粉质黏土及白垩系泥岩。滑坡区总长度 870 m,宽度 125~170 m,平均宽 135 m,总面积 $10.15 \times 10^4 \text{ m}^2$,滑体厚度 6~15 m,平均厚度 12.5 m,滑坡

总体积 $1.27 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。滑坡自下部白垩系泥岩高位剪出，高速滑动，主滑方向受地形控制呈近“S”的特征，上、中、下段主滑方向分别为 201° 、 165° 和 181° 。高速远程

滑坡从其平面特征可分为滑源区、流通区和堆积区三部分^[14-15]，罗家坡滑坡也具备三个分区(图 3)。

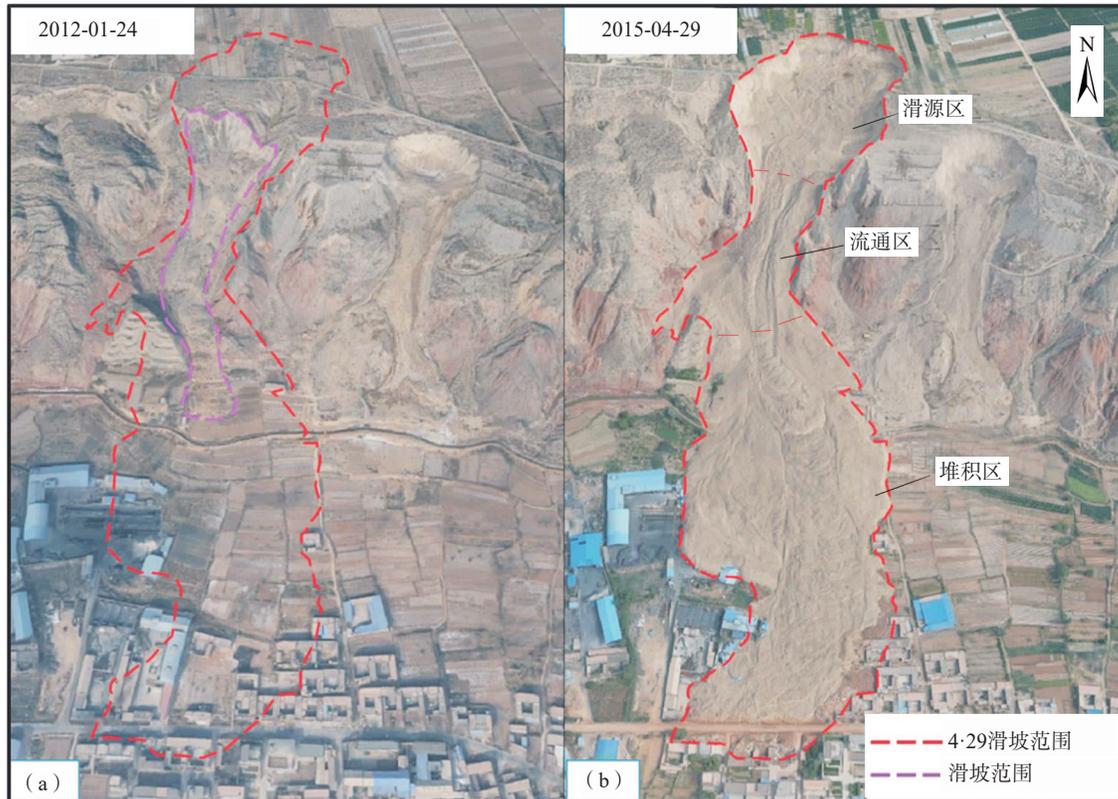


图 3 罗家坡滑坡前后地貌对比图

Fig. 3 Comparison of landform before and after Luojiapo landslide

滑源区经历多次滑动后，滑源区形成长 186 m，宽 158 m，最小深度 24 m，最大深度约 75 m，平均深度约 50 m 斗状洼地。环状后壁坡度约 62° ，残留高度 24 ~ 65 m。沿坡缘距离 20 m 内发育明显的环状拉张裂缝，西侧为一组 4 条，间距 0.35 ~ 1.50 m；东侧为两组，一组为 2 条，长度大于 20 m，走向为 55° ，宽 0.06 ~ 0.08 m；另一组为 2 条，延伸长度 15 m 左右。

流通区可见多次滑动在滑床上形成的线型拉槽和陡坎，很好的反映了不同期次滑坡的运动轨迹。其长度

约 150 m，宽度约 80 ~ 125 m，面积约 0.017 km^2 。

堆积区分布于黑台下部坡体及二级阶地上。后期滑坡堆积体越过前期滑坡堆积体，前后滑动的堆积扇逐次叠加，形成扇加扇的套叠堆积地形，不同期次的扇缘基本呈圆弧状。前期滑坡的扇相对较短，但扩散宽度较大；后期滑坡堆积的扇相对较长，但扩散宽度较小。也可见不同期次滑动的线型拉槽和推挤形成的弧形隆起。堆积区长度 337 m，宽度 175 m，堆积区面积约 0.059 km^2 (图 4)。



图 4 罗家坡滑坡全景

Fig. 4 Panorama of Luojiapo landslide

3 滑坡的时间演化过程

从时间线上分析, 罗家坡滑坡先后经历了黄土错落-碎屑流、黄土-泥岩碎屑流、黄土-碎屑流、黄土泥流

和黄土错落等五个阶段, 分别对应了五种类型的滑坡, 在一个滑坡演化周期历程中基本涵盖了黑方台滑坡的类型, 这在以往滑坡中非常罕见(图 5—6)。

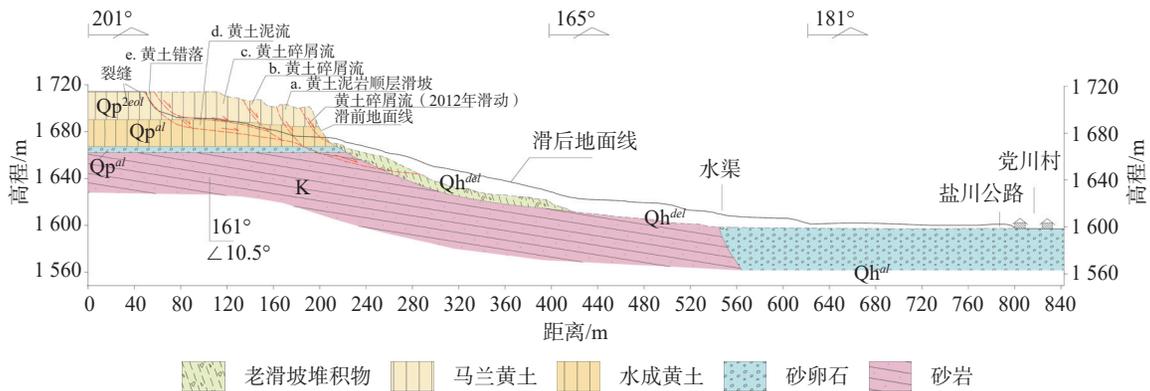


图 5 罗家坡滑坡演化模式图

Fig. 5 Evolution model of Luojiapo landslide

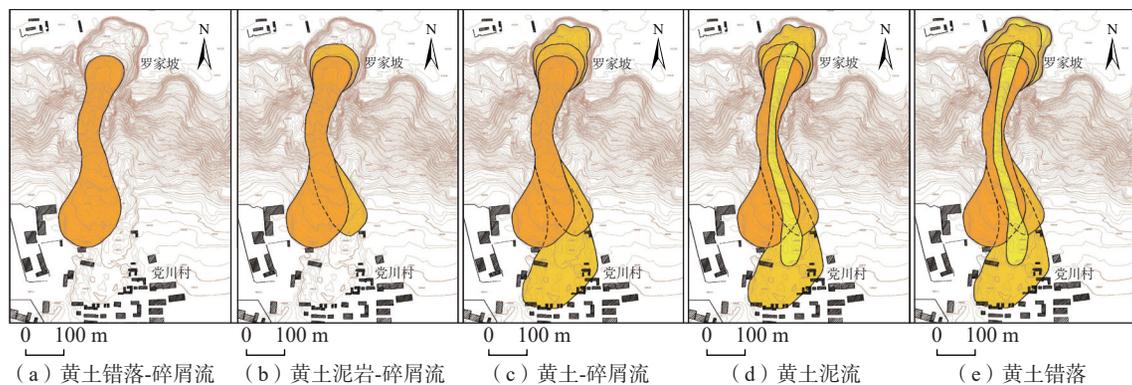


图 6 罗家坡滑坡不同阶段堆积形态图

Fig. 6 Accumulation form of Luojiapo landslide at different stages

3.1 黄土错落-碎屑流

黄土错落-碎屑流是罗家坡滑坡演化的早期阶段。该阶段的主要特征是沿黄土塬边产生的多次小型浅层黄土滑坡, 滑坡规模小, 滑程短, 未形成灾害。现场调查资料表明, 罗家坡滑坡的变形特征和前兆是十分明显的, 且具有较长的变形发展史。2009 年罗家坡段即产生了小规模黄土错落性-碎屑流滑坡, 体积约 $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。其中 2012 年的滑坡规模较大, 其堆积体已到达坡脚。由于黄土具有崩解性, 滑坡发生后随即解体转变为碎屑流, 堆积于塬边斜坡上, 披覆于白垩系砂泥岩之上形成覆盖层。同时部分堆积体堵塞泉水下泄通道, 导致局部地下水位升高, 不利于斜坡的整体稳定^[6], 如图 6(a) 所示。

3.2 黄土泥岩-碎屑流

根据调查资料, 罗家坡滑坡发生前, 该地段地下水位埋深为 24 m, 下部黄土已形成了 25 m 的饱和带^[16]。

前期的斜坡变形形成的裂隙使得坡缘带上部卵砾石含水层和下部白垩系基岩裂隙水上下联通, 地下水下渗到达粉砂岩软弱夹层, 水-岩作用显著降低了粉砂质泥岩的强度^[17], 导致强度急剧降低, 斜坡蠕动变形加剧, 引发了黄土泥岩顺层滑坡。2015 年 4 月 29 日上午 7 时 55 分发生的第一次滑坡其类型即为黄土-泥岩顺层滑坡。这一点可以从实测地形资料证实, 滑坡剪出口处深度约 75 m, 而第四系总厚度在该地段为 57 m, 说明在第一次滑动时剪出口部位有厚度达 18 m 的泥岩参与到滑坡中。这一阶段滑动体积为 $17.49 \times 10^4 \text{ m}^3$, 主滑方向为 180° , 滑坡堆积区呈长扇状堆积于坡体前缘, 滑动距离为 373 m, 最大扩散宽度 140 m, 将碳化硅厂部分厂房压埋, 如图 6(b) 所示。

3.3 黄土-碎屑流

黄土-碎屑流高速远程滑坡是破坏性最强的滑坡类

型,其主要特征是滑动速度快,滑程长,滑坡刮铲和推挤效应显著,破坏力强。依据视频监控资料,滑坡经历 2 次大的滑动,滑动时间分别为 10 时 45—48 分和 10 时 55 分。

10 时 45—48 分期间,该阶段黄土高位滑坡呈脉冲状分块从滑床滑出后,进入加速通道,滑坡在滑动中解体形成碎屑流,碎屑流在流动过程中刮铲前期堆积体,至坡脚形成冲击挤压先期滑坡体,导致先前的滑坡堆积体向前及两侧扩散,由于受到第一次滑坡堆积体的阻挡,滑坡滑动方向向左偏转。这一次的滑距较小,未超过第一次滑动,滑动体积约 $15.79 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

10 时 55 分观测到的最大一次滑坡开始,高速滑坡形成的碎屑流和前次滑动类似,在加速通道形成刮铲效应,形成明显的拉槽,滑坡解体后形成的碎屑流越过前 3 次滑坡堆积物,直接摧毁 2 座工厂并将 14 户居民房屋压埋,前缘直达盐中公路,最后堆积于盐中公路南边,最大滑距达 625 m,这也是有记录以来黑方台滑坡滑程最长的一次滑动。滑坡体积约 $77.32 \times 10^4 \text{ m}^3$,其类型属黄土-碎屑流高位、高速、远程滑坡,如图 6(c)所示。

3.4 黄土泥流

黄土泥流型滑坡在焦家崖头以东多见,焦家崖头以西则很少发生^[3]。11 时 56 分,由于当时灌溉水尚未关停,在水流激发下,观测到饱和黄土直接转化为黄土泥流的现象。黄土泥流从滑源区启动,沿着先前的运动路径缓慢前进,泥流在流动中形成的龙头产生拉槽效应,将前期堆积的滑坡松散堆积物剪切形成拉槽,饱水泥流沿沟槽缓慢流动,并在滑坡堆积体上加积形成了泥流堆积扇(图 7)。堆积体积较小,约 $13.67 \times 10^4 \text{ m}^3$,如图 6(d)所示。

3.5 黄土错落

这是滑坡演化的末期阶段产生的现象。这一阶段持续时间较长,从 10 时 58 分一直持续至 11 时 15 分,沿着环状的滑坡壁产生多次小型滑坡,滑距不超过 50 m,均未超出滑坡洼地。这一阶段的滑坡特征是规模小,每次的滑动规模数十到数百立方米,均为黄土错落性滑坡,计算其累计滑动体积为 $2.61 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。滑坡堆积体将前期滑动后形成的负地形逐步掩埋,形成最终的地形。很多研究者会认为该堆积体是滑坡残留体。滑坡堆积体将泉水出露点掩埋,坡面可见泉水以线状渗出,如图 6(e)所示。

4 滑坡运动特征

本次滑坡的按滑坡性质基本可分为两大类型,其一



图 7 黄土泥流拉槽现象(前期堆积体形成明显的侧坎,最大高度 1.1 m)

Fig. 7 Loess mud flow trough phenomenon (obvious side sill formed by early accumulation, maximum height 1.1 m)

是黄土泥岩-碎屑流和黄土-碎屑流,可称为块体-碎屑流运动;其二是现场观察到的黄土泥流。

4.1 块体碎屑流运动特征

滑坡的运动路径可分为滑源区启动区、滑动加速区和减速堆积区。显然,由于经历多次滑动,每次滑动的分区明显不一致;同时由于滑床下垫面条件变化,不同期次的滑坡其滑动距离和滑动速率也是不同的(表 1)。根据现场视频资料分析,第一次黄土泥岩-碎屑基本呈整体滑动,滑动后随即解体转变为碎屑流,平均滑动速度为 4.20 m/s,最大速度为 9.3 m/s,其滑动距离相对较短,为 435 m。第二次黄土碎屑流由 3 次脉冲式快速滑动组成,整个滑动历时 180 s,滑动距离约 489 m,平均滑动速度为 5.71 m/s,最大速度达到 15.0 m/s;第三次黄土碎屑流也由 2 次脉冲式滑动组成,滑动距离 625 m,历时 208 s,平均速度 6.01 m/s,最大速度达到 18.6 m/s。

表 1 不同期次滑坡的运动特征参数

Table 1 Motion characteristic parameters of landslides in different stages

滑坡分期	滑源区长度/m	加速区长度/m	减速堆积区/m	滑动距离/m	平均速度/(m·s ⁻¹)	最大速度/(m·s ⁻¹)
黄土泥岩滑坡	99	221	115	435	4.20	9.3
第一次黄土碎屑流	137	230	122	489	5.71	15.0
第二次黄土碎屑流	186	290	335	625	6.01	18.6
黄土泥流	155	277	184	461	10.70	13.2

块体-碎屑流是黑方台“4·29”滑坡的主要滑动方式^[18-19]。其主要特征是多次滑坡的滑源区依次扩大范

围, 滑坡在运动过程中的路径在启动阶段有继承性, 数次滑动的路径均呈“S”型。但在滑动路径上由于下垫面的改变, 最终不同阶段的滑坡、碎屑流、泥流的路径稍有不同, 形成了不同的滑坡舌部地形。滑坡在运动过程中由于受到地面构筑物的影响产生在最终形成堆积扇时滑动方向都有所偏移。早期滑坡的滑床阻力较大,

横向扩展现象更加显著; 而后期滑块由于滑床变为前期滑坡堆积物, 因此滑床阻力减小, 后期滑动的横向扩展现象减小。后期滑坡对前期滑坡形成拉槽-挤压效应, 促使前期滑坡堆积物缓慢移动, 压埋范围不断扩大(图 8)。

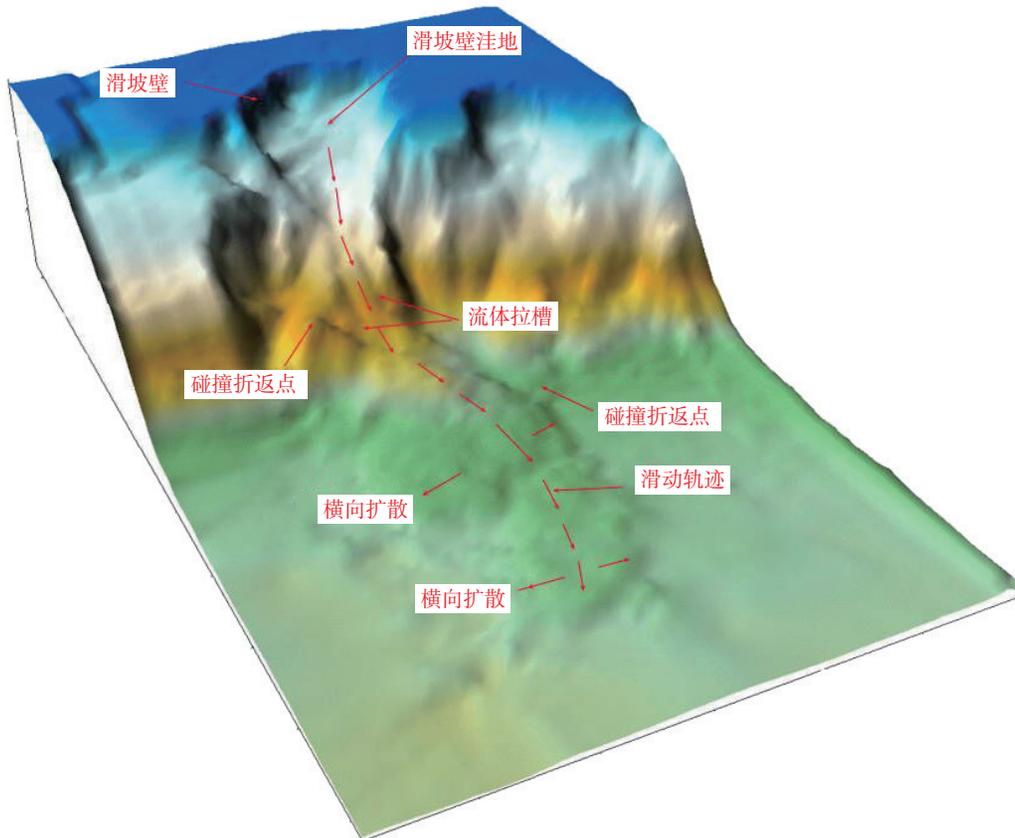


图 8 滑坡区三维地形图

Fig. 8 3D topographic map of landslide area

黄土碎屑流从滑床高速滑出后发生解体形成碎屑流, 高速滑动的碎屑流刮铲前次滑坡堆积体, 并从前次滑坡形成的堆积体舌部越过, 直接将 14 户居民房屋压埋, 前缘直达盐中公路, 并停积于盐中公路南边。黄土滑坡的滑动距离高达 625 m, 最大扩散宽度 120 m, 滑坡在滑动后受右侧凸起山坡和左侧滑坡堆积体影响, 产生“S”型的滑动路线, 综合滑动主滑方向为 181° (图 5)。

4.2 黄土泥流

从现场观察来看, 饱水的黄土在滑源区呈泥流启动后, 呈缓慢流动状态, 其前缘龙头刮铲和推挤现象明显, 导致前期堆积的滑坡体缓慢启动滑移。黄土泥流的运动路线依然沿袭了黄土-碎屑流滑坡的运动路线, 在滑动过程中拉槽效应显著。在堆积区受到滑床阻力逐

渐停止滑动。其流动速度远小于黄土-碎屑流的滑动速度。现场观测到流动距离为 461 m, 流动时间为 5 min, 平均速度为 10.70 m/s, 最大速度 13.2 m/s。

5 块体-碎屑流高速远程运移机制分析

从罗家坡滑坡的滑前地形来看, 其相对高差达 120 m, 形成了高临空面, 因而使滑体具有高势能。滑坡地形坡度在 $30^\circ \sim 35^\circ$, 在山坡坡脚由先前滑动的滑坡形成的堆积体。因此, 地形条件有利于形成高速远程滑坡。

通过现场调查发现, 由于滑坡的堆积物的逐次叠加, 使得原始坡面地形由折线型演变为流线型, 由起伏地面变成较为均一的平顺地面, 形成了较为平顺的滑

床,十分有利于滑坡的高速滑动(图 9)。本文将这一现象命名为“填凹造床效应”,这一效应在其他类型的滑坡中也存在^[15]。

最先活动的块体运动距离最短,而新滑坡的滑动距离越来越远。这充分反映了“填凹造床效应”对滑坡滑移距离的影响。从图 3 可以看出,滑床区原始地形为四

级阶地斜坡和二级阶地阶面组成的折线型地形,由于先期滑坡堆积使滑床逐渐演变为流线型地形,从而使得滑床更为平顺,滑坡运动过程中的撞击、磨阻消能效应被减弱,为滑坡的高速远程滑动创造了条件。新滑坡由于加速距离变长,因此滑动速度往往较先前滑动块体快,相应的滑动距离也逐渐变大。



图 9 滑坡“填凹造床效应”照片

Fig. 9 “Effect of filling depression and forming bed” of landslide

同时,罗家坡滑坡最大滑距达到 625 m,远远超过了前期发生的 150 余次滑坡。其原因除了先期滑动的滑坡“填凹造床效应”形成的有利地形条件外,高含水的下垫面也起到了助推作用。早期滑动黄土泥岩滑坡其所携带或刮铲的斜坡堆积物具有高含水量特征,滑动过程中产生了光滑的镜面。再次是渠道破坏后形成的泥水混合物以及接近饱水的灌溉后的农田,使得黄土滑坡在其滑动路径上具备了部分饱水或完全饱水有利下垫面,这对于该滑坡最终创造最远滑距也产生了重要作用。

罗家坡滑坡高速远程滑动机制可解析为:滑坡在灌溉水瞬时压力作用下启动,受黄土节理裂隙和基岩层面的控制,滑坡体在快速运动中解体形成碎屑流,从而使起初的滑动状态变为流动状态,碎屑流作用于滑床的压力较之整体滑动的压力大大减小,滑床摩阻力亦随之减小,从而使得滑动速度远高于整体滑动的块体。前期滑坡的“填凹造床效应”使得后期滑坡的滑床从折线型演化为缓弧线型,加之前期滑体高含水,使得滑床摩阻力减小,为后期滑坡的高速远程滑动创造了条件。

罗家坡属灌溉水引发的高位高速远程滑坡,其破坏效应体现在滑坡体运动过程中碰到地面阻挡后逐渐减速堆积,其前部龙头形成刮铲和推挤破坏效应,导致沿途地面建筑物形成剪切破坏。罗家坡在黑方台地区具有典型性,滑坡全生命周期演化分段特征明显,不同滑坡类型均有发生,其高速远程特征尤为显著,体现了黑

方台地区滑坡多样性和复杂性。针对这类滑坡,应控制灌溉,改变原有灌溉方式;并加强早期预警,降低灾害风险。

6 结论

罗家坡在黑方台地区具有典型代表性,本次以滑坡全生命周期演化着手,从时间线上进行分析,研究结果充分体现了黑方台地区滑坡多样性和复杂性。综合研究成果,得出以下结论:

(1)罗家坡滑坡演化归结为五个阶段:黄土错落-碎屑流、黄土泥岩-碎屑流、黄土-碎屑流、黄土泥流、黄土错落等五个滑动阶段,也对应了五种滑坡类型。这也基本代表了黑方台地区滑坡的生命演化周期和类型特征。

(2)罗家坡滑坡的运动特征可分为块体运动—碎屑运动和饱和泥流两种流态。第一种类型属黄土泥岩滑坡和黄土滑坡形成的块体—碎屑流运动,其中黄土碎屑流平均滑动速率为 4.20 ~ 6.01 m/s,最大速度为 9.3 ~ 18.6 m/s;第二种类型则是观察到的饱和土泥流,其平均速度 10.70 m/s,最大速度 13.2 m/s。

(3)陡峻的地形是罗家坡滑坡产生高速远程滑坡的基础,“填凹造床效应”对块体-碎屑流滑坡滑移距离的影响十分显著,同时高含水的下垫面使得罗家坡滑坡创造黑方台地区最远滑距。这也为该地区滑坡的预防提出了警示。

(4)灌溉引起的黄土高速远程滑坡破坏效应十分显著,其高速运动中前部龙头形成刮产和推挤破坏效应,导致沿途渠、耕地被毁,地面建筑物形成剪切破坏,具有极强的灾害效应,应引起当地政府重视。建议进一步加强滑坡早期预警,并控制灌溉,降低灾害风险。

参考文献(References):

- [1] 余志山. 黄河三峡移民区黑方台滑坡群稳定性分析 [J]. *水电能源科学*, 2010, 28(5): 43-46. [YU Zhishan. Stability analysis of Heifangtai landslide group of Three Gorges zone of migration in Yellow River [J]. *Water Resources and Power*, 2010, 28(5): 43-46. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 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)]
- [3] 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, A, 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. (in Chinese)]
- [4] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 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. [ZHANG Maosheng. Formation mechanism as well as prevention and controlling techniques of loess geo-hazards in irrigated areas: A case study of Heifangtai immigration area in the Three Gorges Reservoir of the Yellow River [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(6): 833-839. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 唐军峰, 唐雪梅, 周基, 等. 滑坡堆积体变形失稳机制——以贵州剑河县东岭信滑坡为例 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(2): 503-516. [TANG Junfeng, TANG Xuemei, ZHOU Ji, et al. Deformation and instability mechanism of landslide accumulation: A case study of Donglingxin landslide accumulation in Jianhe County, Guizhou Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(2): 503-516. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张田田, 杨为民, 万飞鹏. 浑河断裂带地质灾害发育特征及其成因机制 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(1): 149-161. [ZHANG Tiantian, YANG Weimin, WAN Feipeng. Characteristics and formation mechanism of geohazards in Hunhe fault zone [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(1): 149-161. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 方汕澳, 许强, 修德皓, 等. 基于斜率模型的突发型黄土滑坡失稳时间预测 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 169-179. [FANG Shanao, XU Qiang, XIU Dehao, et al. A study of the predicted instability time of sudden loess landslides based on the SLO model [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 169-179. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王雪冬, 张超彪, 王翠, 等. 基于 Logistic 回归与随机森林的和龙市地质灾害易发性评价 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(6): 1957-1970. [WANG Xuedong, ZHANG Chaobiao, WANG Cui, et al. Geological disaster susceptibility in Helong City based on Logistic regression and random forest [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(6): 1957-1970. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 胡炜, 张茂省, 朱立峰, 等. 黑方台灌溉渗透型黄土滑坡的运动学模拟研究 [J]. *工程地质学报*, 2012, 20(2): 183-188. [HU Wei, ZHANG Maosheng, ZHU Lifeng, et al. Kinematic simulation of irrigation-induced loess landslide in Heifangtai [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(2): 183-188. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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 Yanli, DAI Fuchu. The mechanism of irrigation-induced landslides of loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(10): 1493-1499. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 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. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 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. (in

- Chinese with English abstract)]
- [14] 高杨, 卫童瑶, 李滨, 等. 深圳“12·20”渣土场远程流化滑坡动力过程分析 [J] . *水文地质工程地质*, 2019, 46(1): 129 – 138. [GAO Yang, WEI Tongyao, LI Bin, et al. Dynamics process simulation of long Run-out catastrophic landfill flowslide on December 20th, 2015 in Shenzhen, China [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(1): 129 – 138. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 李浩, 乐琪浪, 孙向东, 等. 巫溪县西溪河北岸高位高危碎屑流滑坡特征与机理研究 [J] . *水文地质工程地质*, 2019, 46(2): 13 – 20. [LI Hao, LE Qilang, SUN Xiangdong, et al. A study of the characteristics and mechanism of high-risk debris flow landslide on the northern bank of the Xixi River in Wuxi County [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(2): 13 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 边世强, 杨云鹏, 马建花, 等. 黄土斜坡内部水分二维成像研究——以黑方台罗家坡滑坡为例 [J] . *工程地质学报*, 2020, 28(4): 840 – 851. [BIAN Shiqiang, YANG Yunpeng, MA Jianhua, et al. Two-dimensional imaging study of internal moisture in loess slope: A case study of the Luojiapo landslide in Heifangtai Terrace [J] . *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(4): 840 – 851. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李安润, 邓辉, 王红娟, 等. 水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型 [J] . *水文地质工程地质*, 2021, 48(2): 106 – 113. [LI Anrun, DENG Hui, WANG Hongjuan, et al. Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 106 – 113. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 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)]
- [19] 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)]