



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：甘肃黑方台黄茨2号滑坡复活机制与稳定性趋势预测

作者：窦晓东，李玉山，孟亚腾，丛凯，张永军，贾强

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026014

投稿时间：2026-01-28

录用时间：2026-04-15

预出版时间：2026-04-29

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

甘肃黑方台黄茨2号滑坡复活机制与稳定性趋势预测

窦晓东^{1,2}, 李玉山^{1,2}, 孟亚腾^{1,2}, 丛凯^{1,2}, 张永军^{1,2}, 贾强^{1,2}

Dou Xiaodong^{1,2}, Li Yushan^{1,2}, Meng Yateng^{1,2}, Cong Kai^{1,2}, Zhang Yongjun^{1,2}, Jia Qiang^{1,2}

1. 兰州城市地质灾害野外科学观测研究站, 甘肃 兰州 730000

2. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730000

1. Lanzhou Urban Geological Disaster Field Scientific Observation and Research Station, Lanzhou 730000, Gansu, China

2. Gansu Institute of Geological Environment Monitoring, Lanzhou 730000, Gansu, China

Reactivation Mechanism and Stability Trend Prediction of the Huangci 2# Landslide

Abstract: [Objective] To investigate the disaster-causing mechanism, dynamic evolution process, and post-disaster stability trend of the reactivation of the Huangci No. 2 landslide in Heifangtai, Gansu Province on December 10, 2025. [Methods] Field surveys and the Transient Electromagnetic Method (TEM) were comprehensively applied to analyze the deep structure of the landslide. A back-analysis was conducted based on Massflow numerical simulation, and the 3D limit equilibrium method was utilized to perform quantitative stability evaluation for the post-disaster deposit and the high-steep rear wall. [Results] (1) The landslide reactivation is the result of toe excavation, long-term irrigation, and special meteorological conditions. The freezing-induced water retention effect acted as the direct trigger, where surface freezing blocked seepage channels, causing an accumulation of pore water pressure and inducing a loess-mudstone bedding slide. (2) The entire sliding process lasted for 22 hours, with a cumulative displacement of 310 m. The Massflow analysis reproduced the four-stage evolution process of "creep-acceleration-deceleration-consolidation", and the IoU of the deposition morphology reached 85.85%. (3) Quantitative calculations show that the current deposit has a safety factor greater than 1.15, indicating a stable state of settlement and consolidation; however, under extreme saturation conditions, the potential collapse volume of the high-steep rear wall could reach $40.9 \times 10^4 \text{ m}^3$, with a maximum sliding distance of approximately 640 m. [Conclusion] The analysis suggests that the reactivation of the landslide is controlled by freezing-retained water and multiple disturbance mechanisms. Although the main body has currently stabilized, secondary instability of the high-steep rear wall is highly likely to occur, necessitating the establishment of a long-term dynamic monitoring system to strictly prevent high-position disasters. [Significance] The understanding of the reactivation mechanisms of loess landslides in seasonal freeze-thaw zones was deepened, providing a scientific basis and technical support for prevention and mitigation of such landslides.

Keywords: Huangci Landslide; Frozen Stagnant Water; Massflow; Resurrection Mechanism; Stability Evaluation

摘要: 为探究2025年12月10日甘肃黑方台黄茨2号滑坡复活滑动的致灾机制、动力演化过程及灾后稳定性发展趋势,综合采用野外地质调查与瞬变电磁法解析滑坡深部结构,基于Massflow数值模拟进行三维动力学全过程反演,并运用三维极限平衡法对灾后堆积体与高陡后壁开展定量稳定性评价与运动学预测。得到以下结果:滑坡复活是坡脚开挖、长期灌溉与气象条件耦合的结果,冬季“冻结滞水促滑效应”为直接诱因,表层冻结封堵渗流通道致使深部孔隙水压力积聚,诱发黄土-泥岩顺层滑动;滑坡整体历时22时10分,累计滑移310m,Massflow反演重现了“蠕滑-加速-减速-压密”四阶段演化过程,堆积形态交并比达85.85%;定量计算

基金项目:甘肃省自然资源厅地质灾害防治项目(甘资勘函(2025)109号)

第一作者:窦晓东,男,1984年5月,正高级工程师,主要从事地质灾害防治工作。297455517@qq.com.

通信作者:李玉山,男,1978年5月,正高级工程师,主要从事地质灾害防治工作。493746288@qq.com.

表明,当前堆积体安全系数大于 1.15,处于沉降压密的基本稳定状态;但在极端饱和工况下,高陡后壁潜在滑塌方量可达 $40.9 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大滑移距离约 640m。分析表明滑坡的深层复活受控于冻结滞水及多重扰动机制,当前主体虽已趋于稳定,但极易发生高陡后壁次生失稳,必须建立长期动态监测体系以防高位灾害。

关键词: 黄茨滑坡; 冻结滞水; Massflow; 复活机制; 稳定性评价

0 引言

中国黄土高原是世界上黄土覆盖面积最大、地层最厚的区域,也是地质灾害最为频发的地区之一。黄土具有特殊的大孔隙结构和水敏性,在水动力作用下极易发生结构崩解和强度衰减(徐张建等, 2007),进而引发大规模的滑坡灾害,具有极强的破坏性(黄润秋, 2007; 彭建兵等, 2014)。近年来,国内外学者针对不同触发因素与地层结构下的滑坡机理开展了大量研究:部分学者聚焦于降雨与地震等极端工况,深入剖析了降雨型滑坡的失稳破坏概率及不同水文环境下的诱发阈值与深层力学响应(曹羽哲等, 2021; Leshchinsky et al., 2021; Fusco et al., 2022),阐释了构造活动、历史强震及降雨等多重因素叠加下的滑坡渐进破坏成因(Pei et al., 2021; 王浩杰等, 2021),并揭示了降雨与工程开挖扰动下缓倾顺层岩质滑坡的特殊失稳机制与堆积特征(崔宇寒等, 2024; 朱志明等, 2025)。特别是甘肃省永靖县的黑方台地区,自实施高扬程引黄灌溉以来,长期灌溉导致地下水位显著抬升(王志荣等, 2004),黄土体长期处于高含水甚至局部饱和状态,诱发了大量黄土滑坡与滑坡复活事件,被学界称为“黄土滑坡博物馆”(Peng et al., 2019; Xu et al., 2020a)。黑方台为黄土滑坡形成机制、复活规律等研究提供了天然的试验场地。

围绕黑方台及同类滑坡灾害的演化过程,前人已在滑坡发育分布、监测预警等方面进行了系统探讨(许强等, 2020b; 许强等, 2020c)。研究表明,古滑坡或休眠滑坡在特定扰动下极易发生复活变形(丁恒等, 2021),构建科学有效的现状评价与预警预测模型已成为灾害风险管控的重要手段(耿海深等, 2021)。灌溉入渗、地下水运移及坡脚工程扰动正是黑方台黄土滑坡形成与演化的重要控制因素(许强, 2016; 张雨晴, 2007; 马建全, 2012; 赵宽耀, 2021)。特别是地下水渗流场的变化,不仅会引发超孔隙水压力促使滑坡产生震后或灾后的长效加速(Kohler et al., 2023),还会引发滑带岩土体力学特性的显著衰减与渗流-剪切耦合破坏(Gao et al., 2025),导致底部含软弱夹层的接触带发生软化和泥化,形成坐软效应并诱发顺层滑坡的渐进后退失稳成灾(元星等, 2017; Wang et al., 2024; 田俊伟等, 2025)。然而,值得注意的是,发生在冬季的滑坡往往缺乏强降雨等直接外部诱发因素,其致灾机制常受“群蝶效应”或冻融作用等多重隐蔽因素驱动,表现得更为复杂(龚涛等, 2025)。在黑方台地区,部分学者提出坡面冻结层可作为相对隔水边界,导致坡内地下水位壅高并降低斜坡稳定性(李广, 2022)。这为解释冬季黄土滑坡的异常频发提供了新的理论视角。

随着灾害识别与数值模拟技术的进步,高密度电法、瞬变电磁法及动态力学监测系统已被有效应用于识别滑坡体内部富水结构及捕捉破坏全过程(彭大雷, 2018; 赵凯悦, 2021; 陶志刚等, 2022)。同时,基于动态演化规律与数值模拟方法揭示滑坡机理已成为研究热点(董健麟等, 2025)。学者们广泛采用离散元等数值模拟方法,深入剖析了大型山体滑坡的运动过程特征、能量转化及冲击强度(陈兴等, 2021; 孟桓羽等, 2023; 陈建强等, 2024);特别是利用深度积分连续介质力学模型分析复合型滑坡的固液耦合演化过程(张晗等, 2022),并结合统计模拟法与统计分析探讨滑坡影响成因及堆积层滑坡视摩擦系数的运动学特性(张燕云等, 2024; 王冉等, 2021; 明成涛等, 2024),在滑坡全过程动力学复演与潜在堵江危险性评价中发挥了关键作用(邸勇等, 2025)。然而,当前针对特定单体黄土-泥岩顺层滑坡在冬季低温条件下的复活机制,以及结合高精度物探与三维动力学模拟的全过程复演研究仍显不足。鉴于此,以黄茨 2 号滑坡为研究对象,综合采用地质调查、瞬变电磁法(TEM)、Massflow 数值模拟及三维极限平衡分析等方法,对其复活机制、运动过程及灾后稳定性趋势进行系统研究。突破单一水动力成因的局限,定量揭示了冬季“冻结滞水促滑效应”在黄土滑坡复活中的核心致灾机制;并实现了该类复合型滑坡从“蠕滑-加速”到“减速-堆积”全过程的高精度三维动力

学复演。研究结果旨在深化对季节性冻融区黄土滑坡复活机理的认识，为黑方台乃至整个黄土高原地区类似滑坡的防灾减灾提供关键的科学依据和技术支撑。

1 研究区概况

2025年12月10日11时20分，临夏州永靖县盐锅峡镇黄茨村黄茨2号滑坡出现蠕滑；15时，滑坡发生整体滑动，滑坡体中心位置地理坐标：东经103°19'45"，北纬36°05'21"（图1）。群测群防员在现场巡查中发现滑坡出现变形迹象，第一时间上报永靖县自然资源局及盐锅峡镇政府，盐锅峡镇政府迅速组织受威胁的120户378人紧急避险转移。因险情发现及时、灾害预警及时、避险转移及时，未造成人员伤亡。

黄茨2号滑坡地处黄河左岸IV级阶地边缘地带，斜坡前后缘高差约120 m，地形坡度上陡下缓，平均坡度约35°。地层结构自上而下依次为36 m厚的第四系上更新统马兰黄土，质地均匀、疏松多孔且垂直节理发育，遇水易软化并具自重湿陷性；13 m厚的第四系上更新统冲积物（上部6 m为具水平层理的致密黄土状土；下部7 m为砂质充填、胶结密实的砾卵石层）；基底为出露厚度71 m的白垩系泥质砂岩与泥岩，属软弱岩体，呈泥质结构、层状构造，产状 $130^{\circ}\angle 12^{\circ}$ （图2）。地下水类型主要分为三类：黄土层潜水（灌溉水经裂缝、裂隙、落水洞等优势通道垂向补给）、砾卵石孔隙水（上部黄土层潜水经黄土状土层补给），以及赋存于泥质砂岩、泥岩节理裂隙中的碎屑岩类孔隙裂隙水（主要接受上部砾卵石孔隙水补给）。前两类地下水均以泉点形式向塬边径流排泄，碎屑岩类孔隙裂隙水沿基岩节理裂隙排泄至前缘黄河II级阶地。人类工程活动以农业灌溉和坡脚开挖为主，自20世纪60年代起黑方台塬区的大水漫灌，使地表水沿塬面黄土优势通道渗入地下，造成地下水位逐年上升、土体饱和度提高、自重增加且内摩擦角与黏聚力等力学参数显著降低；坡脚开挖则直接破坏坡体原始应力平衡，增大前缘临空面并引发应力集中，为滑坡发生创造了有利空间条件。

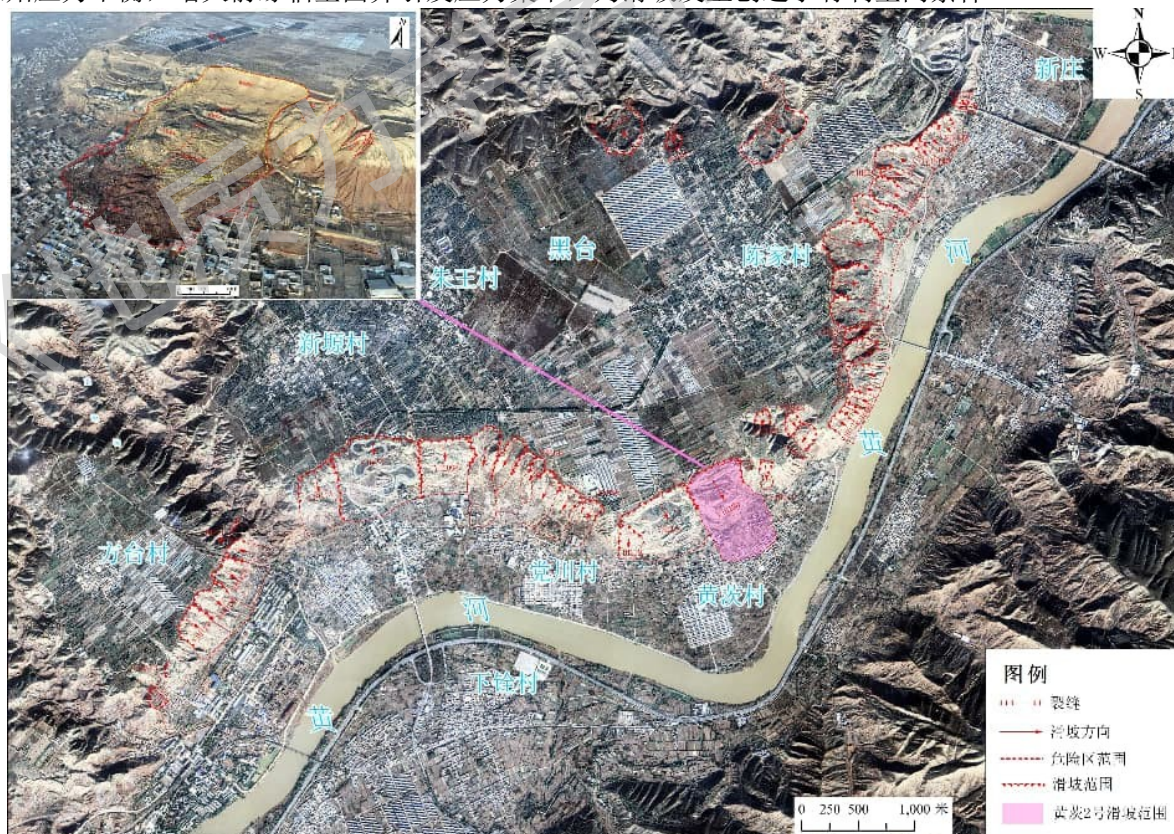


图1 黄茨滑坡地理位置图

Figure 1. Geographical location of the study area

2 滑坡特征

2.1 形态与结构特征

黄茨2号滑坡平面形态呈“簸箕型”（图2），剖面形态呈折线型，主滑方向150°，滑坡长722 m，宽390 m，面积 $28.19 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，平均厚度24 m，滑坡方量 $677 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，为大型黄土-泥岩顺层滑坡。

滑坡后缘因下错滑动形成高陡的黄土后壁，平面形态呈“圈椅型”，后壁宽440 m，高40~60 m，坡度 $60^\circ \sim 75^\circ$ ，呈上陡下缓状，局部近直立。滑坡中后部下错形成滑坡平台和洼地。滑坡中部受后部推移挤压隆起，呈反坡隆岗地形，地形坡度 $35^\circ \sim 45^\circ$ ，推测剪出口位于坡脚县道附近，埋藏于地面以下，至上两侧地面鼓胀抬升1~2 m，公路隆起。滑坡堆积区位于南侧坡面及II级阶地，呈扇形堆积，形状较规则，扩散角度 25° ，堆积体表面平均坡度 $3^\circ \sim 8^\circ$ ，有大量相间排列的洼地和向后倾倒的隆岗。

黄茨2号滑体厚度纵向呈现“中后部厚、中前部次之、前缘滑舌部较薄”的特点（图3），滑体后部堆积物主要以马兰黄土组成，滑动造成土体裂解，顶部土体呈粉末状态，局部有地下水溢出，土体含水率较高；中部堆积体成分主要由马兰黄土及泥岩、砂岩碎屑组成，平均厚度34 m；滑体前部堆积体受后部持续传递应力影响，呈“扇状”堆积，呈流塑状向前缘及两侧扩散，覆盖于黄河左岸II级阶地上，主要成分为黄土、卵砾石、泥岩、砂岩团块、碎屑混杂堆积，平均厚度7 m。滑坡体在滑动过程中，由于两侧及底部所受滑床阻力存在差异，导致沿滑动方向的速度不一，进而发生纵向解体，致使整体结构极为破碎。

滑坡上部滑带土成分主要混杂了黄土、黏土层及原滑坡堆积物，下部滑带土混杂了II级阶地砂砾卵石，滑带土结构破碎，土体松散、饱和，强度低。滑床主要为白垩系紫红色泥岩、砂岩互层，岩层产状 $130^\circ \angle 12^\circ$ ，层状构造，胶结程度低，易软化，岩体抗剪强度低。

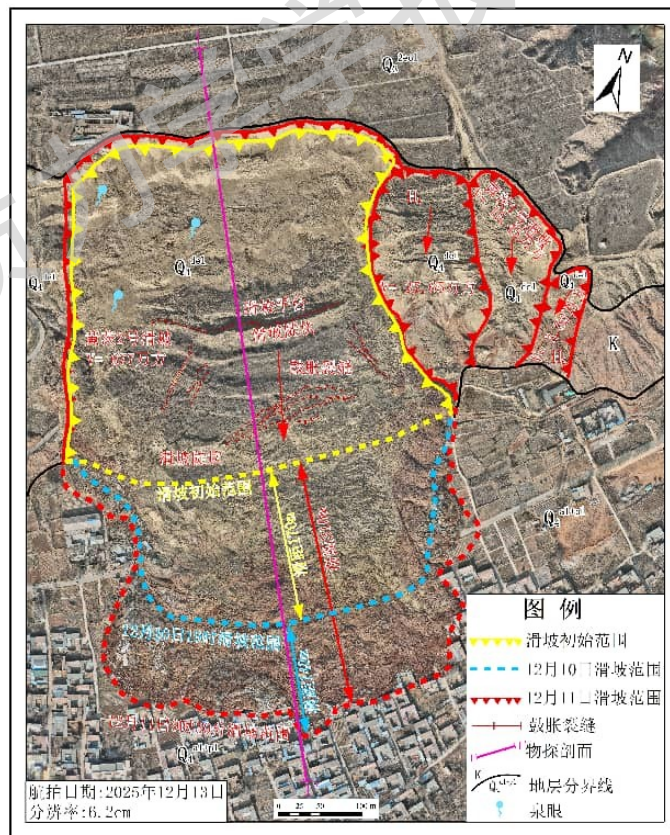


图2 黄茨2号滑坡正射影像图

Figure 2. Orthophoto of the Huangci 2# landslide



图 4 滑坡正射影像图（灾前）

Figure 4. Pre-disaster orthophoto of the landslide



图 5 滑坡体 10 日 16 时航拍图

Figure 5. UOM view of the landslide mass at 16:00 on December 10th

(3) 减速滑动与堆积阶段

第三阶段为减速滑动与堆积阶段（2025 年 12 月 10 日 19 时—11 日 9 时 30 分），滑坡体不断向前推挤，进入下伏的开阔缓坡地带，在此过程中，滑体发生解体，前部含水量高的土体在后部土体的推挤作用下，部分转化为黄土泥岩碎屑流，继续向前流动。主要表现为滑坡滑速减慢，前缘堆积体向两侧扩散堆积。随着滑体持续向前运动，其能量不断耗散，滑动速度进一步降低。滑体内部因受力不均及与滑床的摩擦作用，发生显著的碎

裂解体，形成大小不一的块体，其中前缘流塑状土体在惯性作用下继续向前延伸，而中后部相对完整的块体则逐渐停滞堆积。至11日9时30分，滑坡体整体运动基本停止，前缘滑舌最远延伸至距离后缘约310 m处，并在前缘形成了扇形堆积区。堆积体表面可见多条平行于滑动方向的波状起伏垄岗，垄岗之间为不规则洼地，部分洼地因地下水渗出形成积水。同时，在堆积体中后部形成了明显的挤压鼓丘和剪切裂缝，显示出滑动末期仍存在局部的挤压变形。依据实地调查（对比了10日19时和11日9时30分滑坡前缘位置）和前后无人机航拍影像对比，10日19时至11日9时30，滑坡累计滑移距离约140 m，平均滑速为每小时10 m。

(4) 停滞与压密阶段

第四阶段为停滞与压密阶段（2025年10月11日9时30分后），在前部地表阻力作用下，滑体运动能量逐渐耗散，滑速显著降低并趋于平缓，地表变形活动减弱，未再出现明显的裂缝扩展和土体坍塌现象，饱和堆积体状物质逐渐压密固结，反映出滑坡体逐渐沉降压密，趋于稳定，累计滑移距离310 m。

滑坡后缘因滑坡滑动形成高陡的黄土后壁，滑坡后壁平面形态呈“圈椅型”，呈上陡下缓状，局部近直立，滑坡后壁表面光滑，擦痕明显，本次后壁在原后壁的基础上向后滑移近30 m，西侧坡面局部有地下水渗出；滑坡后壁顶部台塬发育串珠状落水洞（图6a）。滑坡后部因下错形成东西宽440 m、南北长145 m的滑坡平台，平台上局部有地下水溢出。滑坡中上部受后缘土体推移，坡体上发育大量的鼓胀裂缝（图6b），走向与滑向垂直，呈反坡弧形分布，裂缝延伸长度70~80 m，宽20~40 cm，可见深度50~120 cm，裂缝贯通性好，呈张开状，利于降水入渗。

滑坡中下部受后部土体推移、底部滑床的抗滑阻力，因滑速的不同，坡体向前部滑移的同时两侧扩展，形成明显的隆起和鼓丘（图6c），两侧地面及道路受剪出口反翘剪出而隆起，西侧道路受滑体侧向挤压隆起（图6d），高度1.5~1.8 m，耕地也有不同程度的隆起变形；东侧道路隆起高度较小，耕地无明显隆起变形。滑坡前缘以堆积、掩埋为主，滑坡堆积物呈扇状堆积于黄河Ⅱ级阶地上，局部受房屋阻挡有逆冲抬高现象。滑坡快速运动过程中底部土层处于完全不排水或不完全排水状态，孔隙水压力释放受到抑制，导致局部升高，甚至出现底部土层表面液化现象，从而使摩擦阻力减小，在堆积体前缘中部及侧缘缓坡（坡度约为2°）出现多处类似液体流动的饱和流塑体。



(a) 滑坡体后缘落水洞

(b) 滑坡体中上部鼓胀裂缝

(c) 滑坡体中下部隆起

(d) 滑坡体下部道路隆起

图6 黄茨2号滑坡变形破坏特征

Figure 6. Deformation and failure characteristics of the Huangci 2# landslide

3 滑坡复活机制分析

黄茨2号滑坡于2006年5月14日发生复活滑动后，坡体势能未彻底释放，长期处于欠稳定状态。在高陡地形、易滑地层结构及地下水作用的影响下，最终引发滑坡再次复活，其复活机制初步分析如下：

(1) 前缘高陡的地形

前缘滑体作为维持坡体稳定的抗滑段，承担主要的抗滑功能（邹宗兴等，2012）。2006年黄茨2号滑坡复活后，当地对滑坡前缘抗滑段进行了大规模开挖（宽200 m，深50~60 m），使坡体形态显著改变，形成“中后部平缓、前缘高陡”的地形。直接削弱了抗滑段的支撑能力，并导致滑坡体重心上移，使应力向坡脚区域集中。同时，开挖为滑体提供了充足的临空空间，改变坡体应力平衡，从而大幅提高了滑坡再次复活的危险。

(2)坡体结构

根据历史调查资料（魏丽娟，2012），区域内基岩倾向约为 180° ，本次黄茨2号滑坡主滑向约为 150° ，属典型的黄土-泥岩顺层滑坡。该类地层结构为滑坡发育提供了有利的内在地质条件。坡体上部为马兰黄土(Q_3^{2col})，疏松多孔、垂直节理发育，渗透性强，遇水易软化、湿陷并易发生变形；下部为白垩系泥质砂岩(K_{1nk})与砂砾岩，遇水易软化崩解，岩体强度及抗剪性能显著降低。此外，坡体整体呈顺向坡结构，上部黄土层发育拉裂面，下部沿泥岩软弱面形成主滑面，共同构成上部拉裂、下部顺层滑动的典型破坏模式，进一步增加了滑坡发生的可能性。

(3)水的作用

水是本次滑坡复活的关键控制因素。黑方台台塬上部黄土疏松多孔，孔隙、裂隙、垂直节理和落水洞发育，为灌溉水入渗提供了良好通道。长期过量的灌溉水致使黄土层内地下水持续抬升，岩土体在反复浸润下不断软化，导致塬边地段滑坡活动频繁。对黄茨2号滑坡而言，这一过程不仅削弱了上覆黄土的强度，也使下伏基岩软弱层长期处于受水软化状态，为后期复活提供了基础水文地质条件。

2019年8月以来，黑方台台塬区大面积农业灌溉显著减少，区域地下水总体开始缓慢回落，台缘滑坡发生频率也有所降低，但黄茨2号滑坡内部并未因此完全摆脱高含水背景。其原因在于，该滑坡属于黄土-基岩顺层滑坡，且经历多次滑动后，滑带与滑体结构已明显破碎、松散化，坡体内部形成了更有利于水向深部运移的优势渗流通道。地下水不再主要滞留于黄土层内部，而是可沿裂隙和既有滑动通道继续下渗，持续软化下伏泥岩、泥质砂岩及其软弱夹层，并逐步形成贯通上部黄土与下部基岩的深部软弱带。因此，即使灌溉强度下降，坡体内部地下水的消散仍具有明显滞后性，滑坡长期处于欠稳定状态。

此外现场调查表明，滑坡后部台塬区地下水位虽较前期有所回落，但整体仍处于相对高位。同时，同时，受区域暖湿化背景影响，盐锅峡镇2025年降雨量达到456 mm，较常年明显偏多；叠加坡脚排水渠渗漏影响，地表水和浅层地下水持续向坡体中下部及坡脚段补给，使岩土体长期保持较高含水状态，局部甚至接近饱和，黄土层和下伏基岩的软化范围进一步扩大，滑坡在入冬前已具备较强的水敏失稳条件。

12月黑方台地区进入季节性冻结期后，负温持续累积。根据滑坡发生前气温变化资料（图7），12月上旬最低气温持续低于 $0^{\circ}C$ ，表明坡体浅表层已具备形成季节性冻结层的气象条件。结合黑方台地区既有冻土研究成果，可推测滑坡体表层形成了一定厚度的低渗透冻结层，并在坡体表层形成相对隔水边界，可能诱发冻结滞水效应（李广，2021）。受其影响，坡体前缘及剪出口附近地下水排泄受阻，内部地下水在冻结层下方进一步聚集，局部地下水位壅高，孔隙水压力增大，最终在前缘支撑减弱、坡体结构不利、岩土体长期软化的共同背景下触发了本次整体深层复活滑动。需要指出的是，上述认识主要依据区域气象资料、灾后现场调查和瞬变电磁法探测结果作出，目前仍缺乏滑坡发生时原位地温和灾前地下水位连续监测资料的直接支撑。

综上，黄茨2号滑坡的再次复活是前缘开挖、不利地层结构和多阶段水文过程共同耦合作用的结果。前缘开挖削弱了抗滑段支撑，打破了坡体原有应力平衡；黄土-泥岩顺层结构控制了深层滑动方式；长期灌溉入渗构成了基础孕灾条件；2019年后虽然灌溉减量，但由于坡体内部优势渗流通道已经形成，地下水仍维持较高背景；2025年降雨偏多和排水渠渗漏进一步提高了坡体含水水平；进入冬季后，地表冻结导致地下水排泄受阻，形成冻结封堵、水位壅高、孔隙水压力积聚的促滑过程，最终诱发了规模明显大于2006年的整体深层复活滑动最终引发规模远超2006年的整体深层复活滑动（图8）。

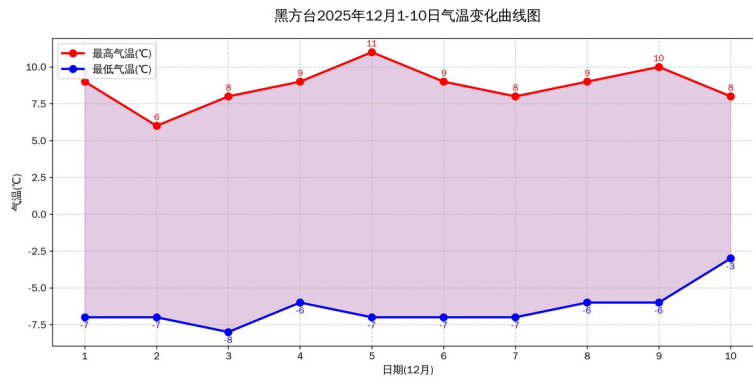
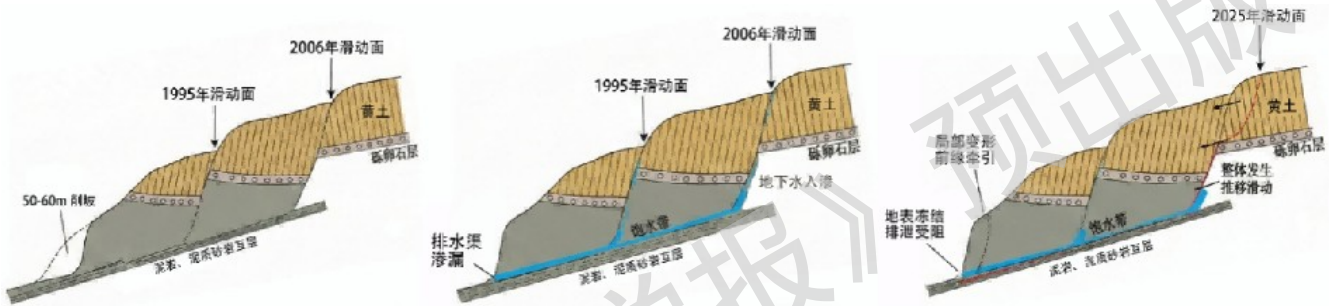


图7 黑方台黄茨2号滑坡前气温变化曲线图

Figure 7. Pre-failure air temperature variation curve of the Huangci 2# landslide in Heifangtai



(a)前缘削坡打破坡体应力平衡 (b)地下水沿已有滑面长期入渗软化岩土体 (c)地下水位上升，前缘牵引后缘推移

图8 黄茨2号滑坡复活机制示意图

Figure 8. Schematic diagram of the reactivation mechanism of the Huangci 2# landslide

4 基于 Massflow 的滑坡动力过程复演

4.1 数值模拟方法

为定量揭示黄茨2号滑坡复活后的全过程运动特征，深入分析其在滑动-堆积过程中的速度、堆积厚度及运移距离等动力学参数演化规律，采用基于深度积分的连续介质力学分析软件 Massflow 进行全过程复演。该数值模拟平台已被广泛应用于滑坡、泥石流及堰塞湖等链式地质灾害的动力过程分析中，其可靠性已在诸多典型灾害案例中得到验证（Ouyang et al, 2015; Fan et al, 2020）。Massflow 基于广义浅水波方程组，遵循质量守恒与动量守恒定律，能够有效模拟具有自由表面的复杂流体运动；在数值求解方面，采用二阶精度的 MacCormack-TVD 有限差分格式，这种方法在保证计算精度的同时，极大地提高了计算效率，能够有效模拟流体在复杂地形上的动态演化过程（Ouyang et al, 2017; Ouyang et al, 2019）。假设滑体为不可压缩流体，其质量守恒和动量守恒方程在深度方向积分后可表示为：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial\left(hu^2 + \frac{1}{2}kgh^2\right)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = S_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial\left(hv^2 + \frac{1}{2}kh^2\right)}{\partial y} = S_x \quad (3)$$

其中， h 为流体厚度(m)； (u,v) 为深度平均速度(m/s)； k 为土压力系数； S_x ， S_x 为源项（包含重力、基底摩擦等）。

4.2 本构模型选择与参数设置

考虑到黄茨2号滑坡物质组成主要为非饱和黄土，在运动过程中表现出明显的摩擦流变特性，本次模拟选取 Coulomb 摩擦模型作为基底流变本构方程。该模型通过摩擦系数和孔隙水压力系数等参数来描述滑体与基底之间的剪切阻力，能够较好地反映黄土滑坡在启动、加速及堆积阶段的力学行为（Zhou et al, 2020），其计算基底剪切应力 τ_b 公式为：

$$\tau_b = c + \bar{\rho}gh(1-\lambda)\tan\varphi \quad (4)$$

式中： c 为黏聚力（Pa）； $\bar{\rho}$ 为平均密度（ kg/m^3 ）； λ 为孔隙水压力系数； φ 为内摩擦角（ $^\circ$ ）。

选取 Massflow 数值模拟参数时，依据已有学者在黑方台地区实验获得的岩土力学实验参数（周琪等，2019），采用的天然状态下的黄土和泥岩、砂岩混杂堆积体，密度 2000 kg/m^3 ，黏聚力范围为 $1000 \sim 5000 \text{ Pa}$ ，内摩擦角 $\varphi = 25^\circ$ 。本计算孔隙水压力系数 λ 无法由物理实验获取，通过已有滑坡反演结果为 0.3 到 0.6 ，且不同位置饱和状态下的黄土力学参数与实验获得的误差也相对较大。通过多次模拟实验，最终确定主要物理参数取值如下表：

表1 核心物理力学性质参数

Table. 1 Key physico-mechanical parameters

密度(ρ) kg/m^3	黏聚力(c) Pa	内摩擦角(φ) $^\circ$	孔隙水压力系数 λ
1400	5000	25	0.3

4.3 计算模型构建

基于2025年7月11日无人机航测获取的高精度 DEM 数据构建计算网格，网格尺寸设定为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ 。对于已发生的黄茨2号滑坡，其滑源区范围及厚度依据滑后调查数据及瞬变电磁法（TEM）探测反演的滑面位置采用 SLBL 法插值确定（图9），通过 ArcGIS Pro 空间插值计算滑体厚度分布（图10），计算得滑体总体积约为 $670 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

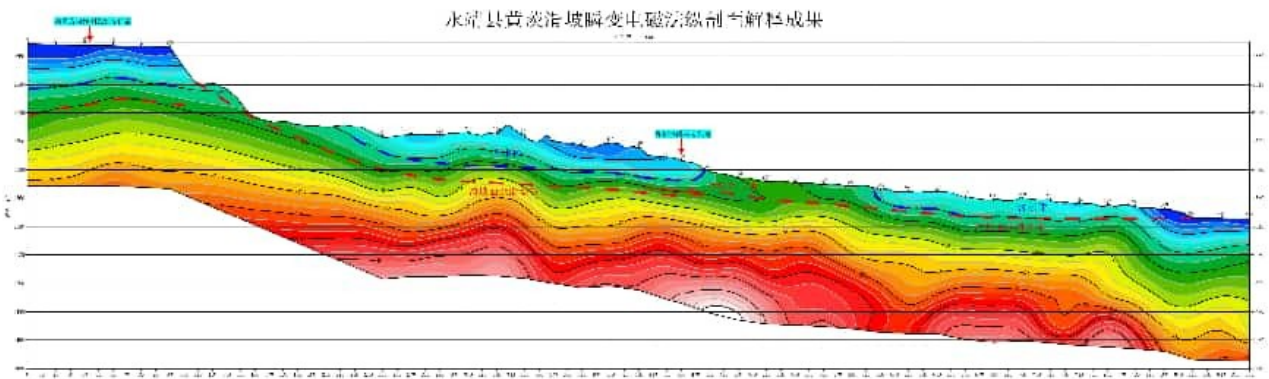


图9 TEM反演剖面图

Figure 9. TEM inversion profile

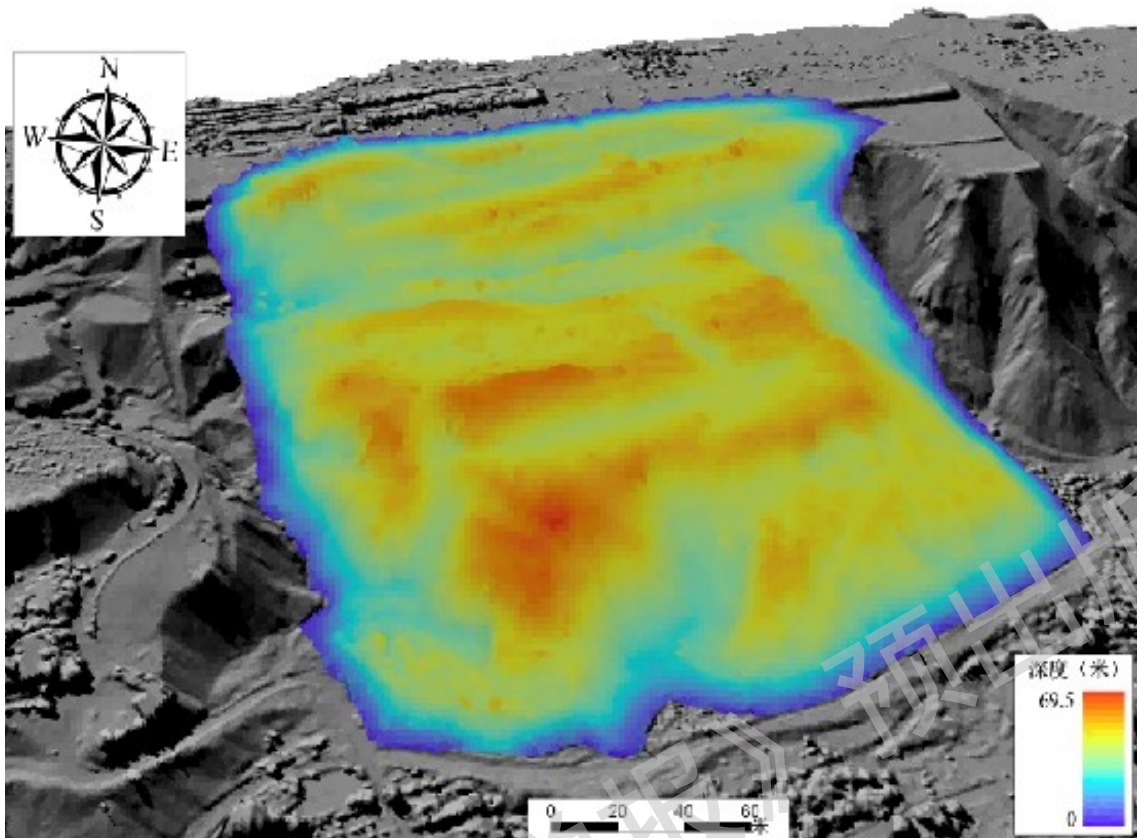


图 10 黄茨 2 号滑坡滑体厚度分布图

Figure 10. Thickness distribution of the sliding mass of the Huangci 2# landslide

4.4 模拟结果分析

模拟结果表明，动力演化过程与实际观测到滑坡贯通面形成后的“加速滑动-减速堆积-停滞压密”三阶段具有高度一致性（图 11），具体分析如下：

加速破坏阶段对应 $t = 0 \sim 4$ h，0h 时滑体瞬间启动并快速加速，至 4 h 左右滑体已通过中部陡坡段，动能达到峰值。这一过程与现场调查中 12 月 10 日 15 时至 19 时的加速滑动阶段吻合，对应了前缘临空面牵引下的应力剧烈释放过程。

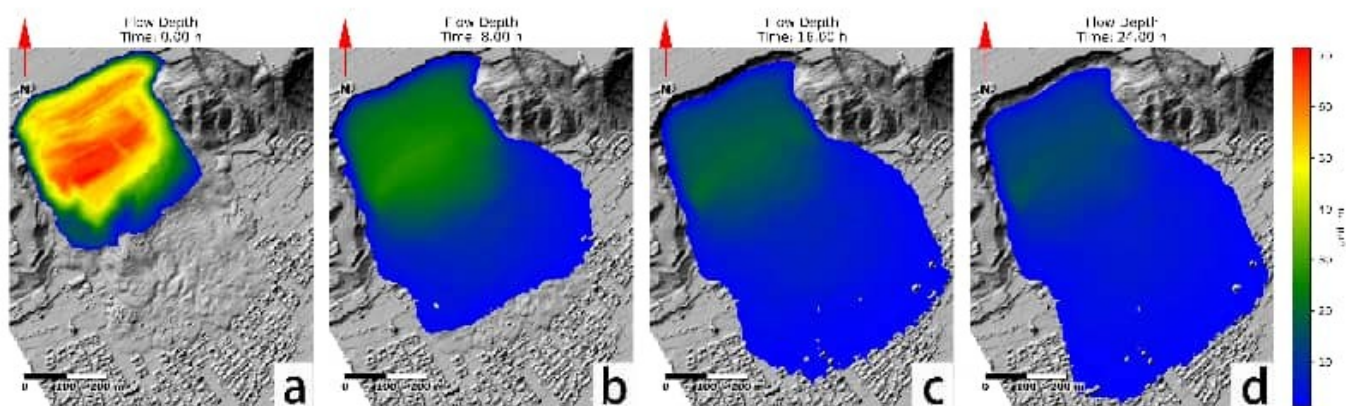
减速与堆积阶段对应 $t = 4 \sim 16$ h，4 h 后，随着滑体进入前缘平缓的 II 级阶地，受地形阻力影响，模拟流速逐渐衰减，滑体开始发生明显的侧向扩散。此阶段对应观测的 12 月 10 日 19 时至次日 30 分的减速滑动与堆积阶段，模拟再现了滑体在低速状态下由推移转为扇状扩散的运动学特征。

停滞阶段对应 $t > 20$ h，滑体速度趋近于零，整体形态不再变化。这与实际灾情中滑坡历时约 22 小时（包含前期蠕滑）后于次日上午趋于静止的观测结果基本一致。

以 2025 年 12 月 10 日实际发生的黄茨滑坡堆积范围与模拟结果对比，堆积体后缘高程略低于实测值，且中前部侧向扩散范围偏大。这主要是由于在反演过程中，为了准确捕捉滑坡的最大运动距离和主要堆积特征，选取的流变参数在一定程度上弱化了滑体的抗剪强度与黏滞性，导致模拟中的流体化特征较实际情况更为显著。根据公式计算交并比 IoU ：

$$IoU = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (5)$$

本次模拟重合像元数（TP）为 28612 个，误报像元数（FP）为 3031 个，漏报像元数（FN）为 1683 个（图 12）。 IoU 值越接近 1，模拟形态与实际越吻合（Sun et al, 2024），计算得本次模拟结果的交并比为 0.8585，模拟准确度高，形态吻合优秀。



(a)t=0 h

(b)t=8 h

(c)t=16 h

(d)t=24 h

图 11 黄茨 2 号滑坡动力过程复演

Figure 11. Simulation of the dynamic process of the Huangci 2# landslide



图 12 模拟准确性分析图

Figure 12. Analysis of simulation accuracy

4.5 再次失稳运动学预测

滑坡后壁土体松散，裂隙发育，临空面较大，存在局部滑移失稳的可能，已于 12 月 12 日和 13 日发生共计 1495.45 m³ 的垮塌，对下游地区造成潜在威胁。为实现对滑坡发展趋势更加科学准确的分析，同样采用 Massflow 软件，对黄茨 2 号滑坡后壁在饱和状态下失稳滑动开展数值模拟。由于本次模拟选取后壁饱和和液化下的极端工况，孔隙水压力取值 0.6，内摩擦角取值 15°，不考虑黏聚力，模拟时长 1h。

模拟结果显示，滑坡体后壁参与滑移的土方量为 $40.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，剪出口位置位于黄土层和砾卵石层接触面，滑体呈“流塑状”滑动后，受前缘反坡平台阻挡后，会沿两侧侧壁低洼处外溢，在平缓处扩散。运动距离 639.98 米，覆盖面积为 $2.77 \times 10^5 \text{ m}^2$ （图 13），可能对前缘民房造成威胁，需开展持续监测工作。

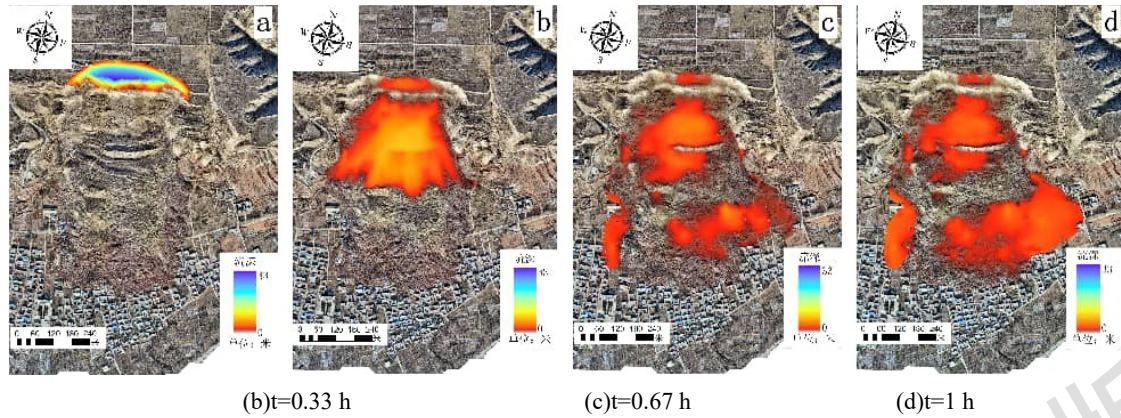


图 13 滑坡后壁失稳动力过程模拟

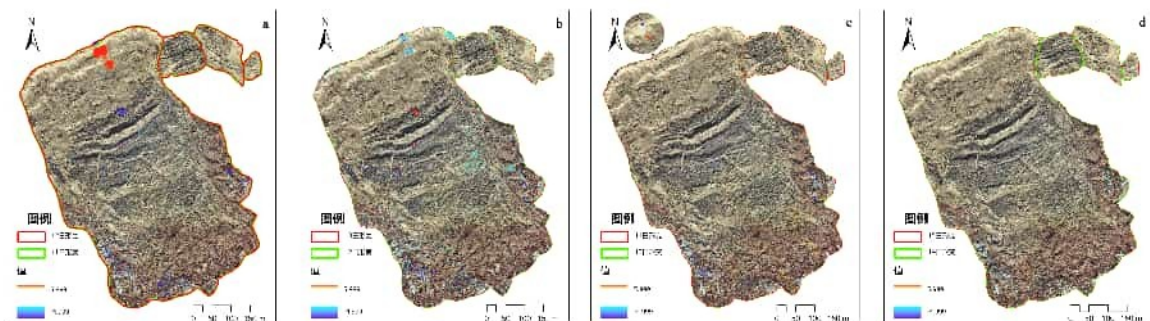
Figure 13. Simulation of the dynamic instability process of the landslide rear wall

5 滑坡堆积体稳定性定性分析

5.1 定性分析

黄茨 2 号滑坡此次滑动后，内部势能与应力显著释放，重心下移，前缘出现多处饱和土液化现象，反映出滑体的排水系统正在逐渐重建，后期再次发生大规模整体性滑动的可能性较低。但滑坡前缘土体松散、含水率高、抗剪强度低，极端或连续降水条件下可能因地表水入渗引发前缘两侧松散、高陡的边坡局部滑移失稳。

依据 12 月 11 日-15 日四期无人机航测数据（分辨率小于 6 cm）差分对比分析，黄茨 2 号滑坡后壁中部发生局部垮塌，方量 1493.45 m^3 ，堆积体整体变化不明显，处于基本稳定状态；黄茨 1 号、H1 和 H2 滑坡无明显变化。其中，12 日较 11 日后缘局部形变量 1~2 m，后壁存在小范围垮塌（图 14a）；13 日较 12 日滑坡中上部存在小范围变形，同时有树木倾倒现象，滑坡堆积体整体周界无明显变化（图 14b）；14 日较 13 日仅在滑坡后壁底部洼地处存在局部变形，滑坡堆积体整体周界无变化（图 14c），15 日较 14 日堆积体整体几乎无变化（图 14d）。



(a)12 日变形量

(b)13 日变形量

(c)14 日变形量

(d)15 日变形量

图 14 灾后四日形变量分析图

Figure 14. Deformation analysis four days post-disaster

2025年12月13日，在堆积体及其周边布设了22台GNSS位移计（含2台基站）和3台声光报警器（图15）。依据监测数据分析，黄茨2号滑坡后壁顶部（GNSS1、GNSS2、GNSS3）累计位移0.2~38.6 mm；滑坡中上部（GNSS4、GNSS5、GNSS6、GNSS7、GNSS8、GNSS9）累计位移5.1~58.5 mm；滑坡中部（GNSS10、GNSS11、GNSS12）累计位移2.1~26.9 mm；滑坡前缘（GNSS13、GNSS14、GNSS15）累计位移23.8~48.7 mm。滑坡后壁顶部数据反映出滑坡滑动后形成的高陡后壁处于应力调整、局部变形阶段，易发生局部黄土层内滑动；滑坡中上部及前缘位移以垂向为主，反映出滑坡堆积体正在沉降压密，整体处于基本稳定状态。



图 15 黄茨滑坡应急监测部署图

Figure 15. Deployment of emergency monitoring for the Huangci landslide

5.2 定量计算

根据 GB/T 32864-2016《滑坡防治工程勘察规范》推荐，采用三维极限平衡分析方法对黄茨2号滑坡的堆积体进行稳定性评价。其核心原理是将传统的二维条分法扩展至三维空间，通过将潜在滑坡体离散化为一系列紧密排列的垂直土柱，从而建立整体的静力平衡方程。

基于上述原理，三维极限平衡法的主控公式如下：

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n [c_i A_i + (N_i - u_i A_i) \tan \phi_i]}{\sum_{i=1}^n (W_i \sin \alpha_i)} \quad (6)$$

式中， F_s 为安全系数； c_i 和 ϕ_i 分别为该土柱底面接触土层的有效黏聚力（Pa）和有效内摩擦角（°）； A_i 为 i 第个土柱底面在滑动面上的真实面积（ m^2 ），等于土柱的水平截面积除以滑动面倾角的余弦值； W_i 为第 i

个土柱的自重 (N)； α_i 为第 i 个土柱底面滑动面的倾角 ($^\circ$)； N_i 为作用在滑面上的总法向力 (N)，近似取值为重力在法线方向的分量，即 $N_i = W_i \cos \alpha_i$ ； u_i 为作用在滑面处的孔隙水压力 (Pa)，近似取值为压力水头乘以地下水容重，即 $u_i = \gamma_w \times h_i$ 。

本次计算中的地表高程数据由无人机航测获得，滑动面深度与前文相同，由 TEM 探测结果采用 SLBL 法插值确定 (图 16)；黏聚力与内摩擦角取值也与前文数值模拟部分保持一致；滑坡区域地下水位的绝对高程的空间变化率较大，地下水位面难以确定，计算难度较大且不利于后期预警，故取地下水位的平均高程进行计算。根据瞬变电磁法探测结果，滑面最低点高程为 1545.1m，当地下水位绝对高程低于该界限时，水位完全位于滑面以下；当地下水位绝对高程为 1665.9m 时，地下水位接近地表，不考虑地表积水的外部荷载，此时整个堆积体处于完全饱和状态。在这两个高程值之间平均取 40 个地下水位高程，将堆积体划分为 226×253 个土柱，计算每个水位所对应的堆积体安全系数。

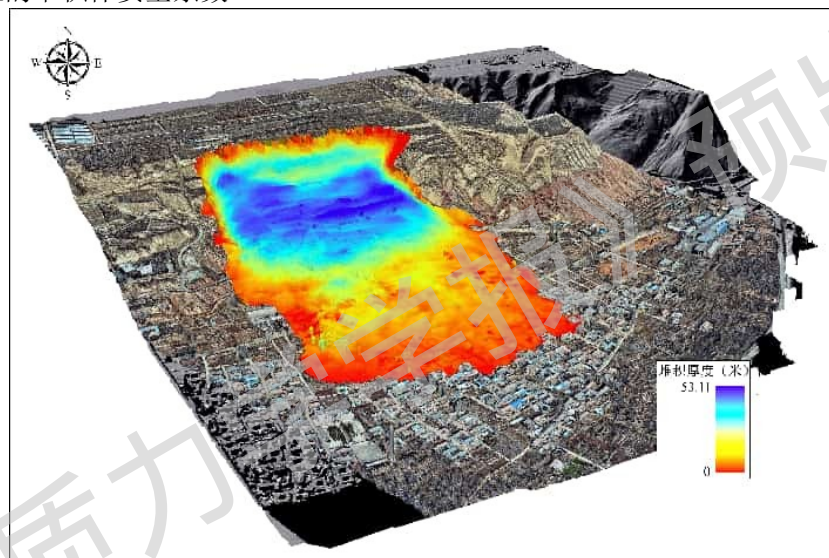


图 16 滑坡堆积体安全系数计算模型

Figure 16. Calculation model for the F_s of the landslide accumulation body

由计算结果分析可知 (图 17)，当地下水位高程低于 1596.83 m 时，安全系数大于 1.15，堆积体处于稳定状态；当地下水位高程上升至 1596.83 ~ 1593.29 m 之间时，安全系数大于 1.05，堆积体处于基本稳定状态；当地下水位高程上升至 1593.29 ~ 1598.71 m 之间时，安全系数大于 1，堆积体处于欠稳定状态；当地下水位高程高于 1596.83 m 时，安全系数小于 1，堆积体处于不稳定状态，此时滑坡极易再次复活，需及时发出预警；目前，滑坡区地下水位深度基本位于滑面以下，堆积体处于稳定状态，失稳概率较低。

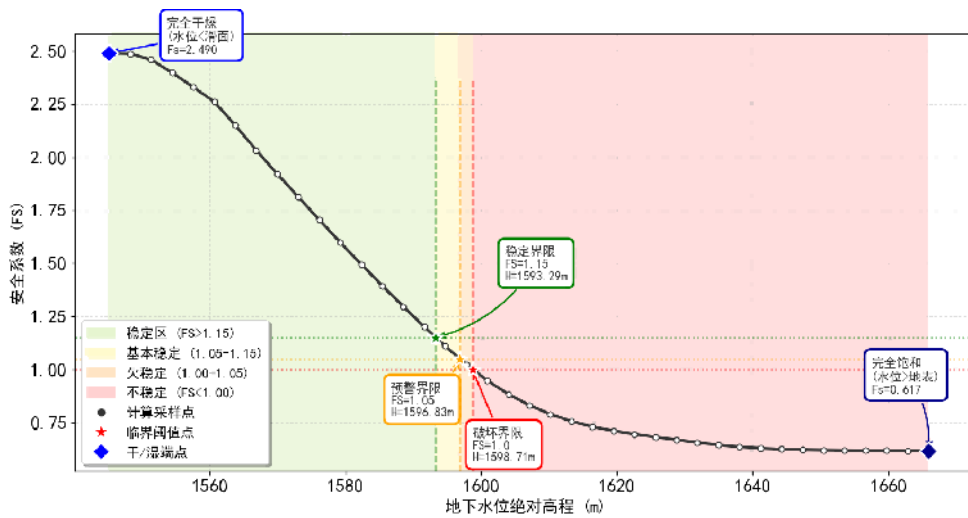


图 17 地下水高程变化-安全系数分析图

Figure 17. Analysis of safety factors versus groundwater level variations

6 讨论

此次研究是在黄茨 2 号滑坡发生后，基于应急抢险与灾害调查需求迅速开展的。尽管通过多源数据融合揭示了滑坡的复活机制与动力过程，但受限于突发性地质灾害的现场条件与数据获取难度，在以下几个方面仍存在局限性，需在后续工作中予以深化：

(1) 缺乏滑坡发生时的原位地温实测数。“冻结滞水促滑效应”是基于区域气象资料与灾后现场踏勘进行的理论推断。由于滑坡发生突然，未能在滑动关键期获取滑坡体深部的实测地温剖面数据，因此无法定量刻画冻结锋面的下移过程及其与地下水位升高的时空对应关系。使得地表冻结层的具体厚度及其对土体渗透性的封堵效率更多停留在定性分析层面，缺乏直接的物理观测证据支撑。

(2) 缺少滑坡发生前地下水位的连续监测记录。地下水位的异常抬升是诱发本次深层滑动的关键驱动力。由于滑坡体内部在灾前未布设地下水自动监测设备，研究缺乏滑坡启动前夕地下水位瞬态变化的直接数据。文中关于“水位壅高”的结论主要依据灾后瞬变电磁法的高导异常反演结果以及当地村民的走访调查推导而来。虽然间接证据链条完整，但未能精细重现冻结滞水效应的完整动态响应曲线。

(3) 冻结层水力参数的定量化不足。在分析冻结层作用时，参考了黑方台地区已有的冻土研究成果，认为表层冻结会形成相对隔水边界。但尚未开展针对该滑坡的低温渗透性试验，缺乏不同负温条件下土体渗透系数衰减的定量实验数据，需更多室内土工试验与数值模拟的耦合验证。

(4) 数值模拟参数选取。在利用 Massflow 软件复演滑坡动力过程时，虽然反演结果与实际堆积形态吻合度较高，但模型中的孔隙水压力系数是基于反分析选取的定值。实际上，滑坡运动过程中涉及复杂的土体破碎、液化及基底铲刮效应，其物理力学参数是动态变化的。未来的研究可进一步考虑参数的空间变异性与时变特性，以提高模拟的物理真实性。

针对上述不足，后续研究建议建立长效的“水-热-力”耦合监测体系，重点关注冬季冻融期的深部地温与地下水动态，并辅以室内冻土力学试验，以进一步验证冻结滞水促滑机理。根据现阶段的研究成果，提出以下防灾减灾措施建议：

(1) 基于本次评估结果，建议进一步精细划定黄茨 2 号滑坡的危险区与潜在影响区，为后续地质灾害避险搬迁及风险管控提供精准的地质科学依据，从地质环境容量角度支撑隐患的根源性消除。

(2) 当前已临近冻融期，需持续加密监测预警频次，重点监测黄茨 2 号滑坡后壁及侧壁陡坎的变形、裂缝发育与渗水情况，建立空天地一体化监测预警体系，特别是在冬季冻融期，重点监测深部孔隙水压力及地温变

化, 利用 TEM 定期巡测地下水位, 结合 GNSS 和 InSAR 对潜在滑坡进行形变监测, 可在堆积体上及后缘重点监测地下水位和深部孔隙水压力, 对可能发生的灾害及时预警确保隐患早发现、早研判、早处置。

(3)黄茨 2 号滑坡前缘堆积体系滑坡阻滑关键区段, 在后续防治工程设计与周边开发中, 应重点保护该区域的整体力学平衡, 避免因工程开挖引发卸荷效应而导致滑体失稳。对局部不稳定的前缘, 建议利用现有堆积体进行反压或修建抗滑桩, 以提升边坡整体的安全储备。

(4)针对黄茨 2 号滑坡具有水敏性强、后壁高陡破碎等复杂特征, 建议构建地表截排水渠与深部排水孔组成的立体排水系统, 适当降低黄土层水位, 提高滑坡体及滑坡后壁的稳定性。同时, 建议深化黑方台台塬区灌溉型黄土滑坡成因机制研究, 系统分析致灾规律, 针对性提出灌溉型黄土滑坡的综合防治技术措施与方案。

7 结论

以黄茨 2 号滑坡为研究对象, 综合运用地质调查、地球物理勘探 (TEM)、Massflow 数值模拟及三维极限平衡法, 对其复活机制、运动过程及灾后稳定性进行了系统研究, 主要得出以下结论:

(1)黄茨 2 号滑坡是灌溉入渗、坡脚开挖与冬季冻结滞水协同作用引发的深层黄土-泥岩顺层滑坡复活事件。坡脚开挖破坏应力平衡、长期灌溉软化岩土体为滑坡提供了基础条件, 而地表冻结导致的渗水通道封堵与地下水排泄受阻, 形成“冻结滞水促滑效应”是本次滑坡大规模复活的直接诱因——地表冻结导致渗水通道堵塞, 深部地下水位迅速壅高及孔隙水压力积聚, 最终导致坡体失稳。

(2)滑坡运动经历了“蠕滑-加速滑动-减速堆积-停滞压密”四个阶段, 持续时长约 22 小时。蠕滑阶段 (11:20-15:00) 缓慢变形, 加速阶段 (15:00-19:00) 平均滑速 28 m/h、累计滑距 170 m, 减速堆积阶段 (19:00 - 次日 9:30) 平均滑速 10m/h、新增滑距 140m, 最终停滞压密阶段累计滑移 310 m。基于 Massflow 的动力学反演结果显示, 模拟的堆积范围与实际滑坡形态吻合度极高 (交并比为 0.8585), 成功再现了滑坡远程滑移特征, 并根据反演所得力学参数, 对后壁可能失稳区域进行了运动学预测。

(3)综合多期无人机影像差分、GNSS 位移监测及三维极限平衡计算表明, 目前滑坡堆积体正在经历沉压实过程, 整体处于稳定状态 (安全系数 $F_s > 1.15$)。但滑坡后缘形成的近直立高陡后壁仍存在局部变形迹象, 受特殊的水文地质条件影响, 滑坡区黄土层土体长期饱和, 在极端天气或冻融工况下可能发生 $40.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 规模的次生滑动, 沿两侧低洼处运移 639.98 m, 对坡脚居民区构成潜在威胁。

致谢

本研究基于滑坡应急调查与灾后监测工作开展, 在资料获取和野外调查条件受限的情况下, 依托团队协作及多源技术手段顺利完成。感谢《地质力学学报》提供的学术交流平台, 感谢匿名审稿专家提出的宝贵意见。上述建议已充分吸收到修改完善之中, 对提升论文的学术严谨性和表达规范性发挥了重要作用。

References

- CAO Y Z, CAO Y J, 2021. Analysis of instability and destruction of rainfall type landslide based on failure probability[J]. Research of Soil and Water Conservation, 28(5): 387-393. (in Chinese with English abstract)
- CHEN J Q, SHEN H, FENG W K, 2024. Characteristics and movement process of Zhonghaicun landslide in Hanyuan County, Sichuan Province[J]. Science Technology and Engineering, 24(17): 7448-7454. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X, ZHAO Z, WEI J B, et al, 2021. Numerical study of Mabian landslide kinematics and impact intensity[J]. Coal Geology & Exploration, 49(4): 234-241. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Z, SONG D, 2021. Numerical investigation of the recent Chenhecun landslide (Gansu, China) using the discrete element method[J]. Natural Hazards, 105: 717-733.

- CUI Y H, GU D M, YU H B, et al, 2024. Stability and accumulation characteristics of translational rock landslides induced by rainfall and excavation[J]. *Yangtze River*, 55(9): 156-164. (in Chinese with English abstract)
- DI Y, WEI Y J, TAN W J, et al, 2025. Risk assessment of landslide-induced river blockage based on RAMMS[J]. *Earth Science Frontiers*, 32(5): 546-556. (in Chinese with English abstract)
- DING H, LI H J, ZHAO J J, et al, 2021. Analysis on the reactivation deformation characteristics and genesis of Jianshanying ancient landslide[J]. *Science Technology and Engineering*, 21(7): 2626-2631. (in Chinese with English abstract)
- DONG J L, LU Y F, 2025. Study on landslide mechanism based on dynamic evolution law and numerical simulation method[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 56(12): 174-188. (in Chinese with English abstract)
- FAN X, YANG F, SUBRAMANIAN S S, et al, 2020. Prediction of a multi-hazard chain by an integrated numerical simulation approach: the Baige landslide, Jinsha River, China[J]. *Landslides*, 17(1): 147-164.
- FUSCO F, BORDONI M, TUFANO R, et al, 2022. Hydrological regimes in different slope environments and implications on rainfall thresholds triggering shallow landslides[J]. *Natural Hazards*, 114: 907-939.
- GAO M B, HE B B, LI W H, et al, 2025. Study on mechanical properties of rock and soil mass in the slip zone of shibanping landslide[J]. *Frontiers in Earth Science*, 13: 1675192.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2016. Code for geological investigation of landslide prevention: GB/T 32864-2016[S]. Beijing: China Standards Press, 14-15.
- GENG H S, LYU W B, LI S, et al, 2021. Analysis of landslide instability mechanism and research on early warning and prediction[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 57(6): 103-109. (in Chinese with English abstract)
- GONG T, QIAN J P, ZHANG J, et al, 2025. Discussion on the mechanism of winter landslide induced by "butterfly effect" in Wumeng mountainous area based on Jinping village landslide in Junlian county, Sichuan[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 44(11). (in Chinese with English abstract)
- HUANG R Q, 2007. Large-scale landslides and their sliding mechanisms in China since the 20th century[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 433-454. (in Chinese with English abstract)
- KOHLER M, PUZZIN A M, 2023. Mechanics of coseismic and postseismic acceleration of active landslides[J]. *Communications Earth & Environment*, 4: 122.
- LESHCHINSKY B, LEHMANN P, OR D, 2021. Enhanced rainfall-induced shallow landslide activity following seismic disturbance-from triggering to healing[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(2): e2020JF005669.
- LI G, 2021. Analysis of freeze-thaw characteristics and freezing stagnant water effect on slopes in Heifangtai, Gansu[J]. *Shanxi Architecture*, 47(16): 117-122. (in Chinese)
- LI G, 2022. Study on frozen stagnant water effect of loess landslide group in Heifangtai, Gansu Province[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- LI X F, WEI Y X, YANG H M, 2013. Time forecast for Huangci landslide by back analysis[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 35(4): 52-54. (in Chinese with English abstract)
- MA J Q, 2012. Stability analysis of loess landslides in loess tableland edge of Heifangtai irrigation area[D]. Changchun: Jilin University. (in Chinese with English abstract)
- MENG H Y, ZHAN J W, LU Q Z, et al, 2023. Kinematic characteristics and numerical simulation analysis of "8-12" giant landslide in Shanyang County, Shaanxi Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 31(6): 1910-1928. (in Chinese with English abstract)
- MING C T, ZHANG J X, GUO F, 2024. Research on the dynamic characteristics of colluvium landslides based on Massflow software[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 55(S2): 678-684. (in Chinese with English abstract)
- OUYANG C, AN H, ZHOU S, et al, 2019. Insights from the failure and dynamic characteristics of two sequential landslides at Baige village along the Jinsha River, China[J]. *Landslides*, 16(7): 1397-1414.
- OUYANG C, HE S, TANG C, 2015. Numerical analysis of dynamics of debris flow over erodible beds in Wenchuan earthquake-induced area[J]. *Engineering Geology*, 188: 56-72.
- OUYANG C, ZHOU K, XU Q, et al, 2017. Dynamic analysis and numerical modeling of the 2015 catastrophic landslide of the construction waste landfill at Guangming, Shenzhen, China[J]. *Landslides*, 14(2): 705-718.

- PEI X J, CUI S H, ZHU L, et al, 2021. Sanxicun landslide: an investigation of progressive failure of a gentle bedding slope[J]. *Natural Hazards*, 109: 1391-1419.
- PENG D L, 2018. Study on early recognition for potentially loess landslides: A case study at Heifangtai terrace, Gansu Province, China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- PENG D, XU Q, ZHANG X, et al, 2019. Hydrological response of loess slopes with reference to widespread landslide events in the Heifangtai terrace, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 171: 259-276.
- PENG J B, LIN H Z, WANG Q Y, et al, 2014. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards[J]. *Journal of Engineering Geology*, 22(4): 684-691. (in Chinese with English abstract)
- PU X, WAN L, WANG P, 2021. Initiation mechanism of mudflow-like loess landslide induced by the combined effect of earthquakes and rainfall[J]. *Natural Hazards*, 105: 3079-3097.
- QI X, XU Q, PENG D L, et al, 2017. Mechanism of gradual retreat loess landslide caused by groundwater: a case study of the irrigation loess landslide in Heifangtai, Gansu province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 25(1): 147-153. (in Chinese with English abstract)
- SUN W, JI L, 2024. Remote sensing object detection based on fusion of spatial and channel attention[C]// 2024 14th International Conference on Information Science and Technology (ICIST). Piscataway, NJ: IEEE: 474-483.
- TANG Y, FENG F, GUO Z, et al, 2020. Integrating principal component analysis with statistically-based models for analysis of causal factors and landslide susceptibility mapping: A comparative study from the loess plateau area in Shanxi (China)[J]. *Journal of Cleaner Production*, 277: 124159.
- TAO Z G, LUO S L, ZHU C, et al, 2022. Dynamic mechanical monitoring of landslide and case analysis of failure process[J]. *Journal of Engineering Geology*, 30(1): 177-186. (in Chinese with English abstract)
- TIAN J W, JIANG X Y, LI Y C, et al, 2025. Analysis of disaster mechanism and instability process of bedding landslide with weak interlayer in Triassic strata of Guizhou[J]. *Science Technology and Engineering*, 25(9): 3593-3603. (in Chinese with English abstract)
- WANG G X, 1997. Sliding mechanism and prediction of critical sliding of Huangci landslide in Yongjing County, Gansu Province[J]. *Journal of Catastrophology*, 12(3): 24-27. (in Chinese with English abstract)
- WANG H J, SUN P, HAN S, et al, 2021. Failure mechanism of the Changhe landslide on September 14 2019 in Tongwei Gansu[J]. *Geoscience*, 35(3): 732-743. (in Chinese with English abstract)
- WANG J J, LIANG Y, ZHANG H P, et al, 2014. A loess landslide induced by excavation and rainfall[J]. *Landslides*, 11: 141-152.
- WANG Q Y, TANG H M, AN P J, et al, 2024. Shear strength and permeability in the sliding zone soil of reservoir landslides: Insights into the seepage-shear coupling effect[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17: 2031-2040.
- WANG R, WANG X L, YUAN H H, et al, 2021. Influence factors and characteristics of apparent friction coefficient of landslide based on statistical analysis and numerical simulation[J]. *Journal of Engineering Geology*, 29(3): 825-833. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z R, WU W J, ZHOU Z Q, 2004. Landslide hazards induced by excessive agricultural irrigation in the loess platform area of Gansu[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 15(3): 43-46. (in Chinese)
- WEI L J, 2012. Analysis of causes and sliding distance on loess landslides in Heifangtai area[D]. Lanzhou: Lanzhou University. (in Chinese with English abstract)
- WU W J, WANG N Q, 2002. Basic types and activity characteristics of loess landslides[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 13(2): 36-40. (in Chinese)
- XU Q, 2020a. Understanding the landslide monitoring and early warning: consideration to practical issues[J]. *Journal of Engineering Geology*, 28(2): 360-374. (in Chinese with English abstract)
- XU Q, PENG D L, HE Z Y, et al, 2020b. Theory and method of monitoring and early warning for sudden loess landslides: A case study of Heifangtai terrace[J]. *Journal of Engineering Geology*, 28(1): 111-121. (in Chinese with English abstract)
- XU Q, PENG D L, QI X, et al, 2016. Dangchuan #2 landslide of April 29, 2015 in Heifangtai area of Gansu province: characteristics and failure mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 24(2): 167-180. (in Chinese with English abstract)
- XU Q, PENG D, ZHANG S, et al, 2020c. Successful implementations of a real-time and intelligent early warning system for loess landslides on the Heifangtai terrace, China[J]. *Engineering Geology*, 278: 105817.
- XU Z J, LIN Z G, ZHANG M S, 2007. Loess in China and loess landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(7): 1297-1312. (in Chinese with English abstract)

- ZHANG H, GAO Y, LI B, et al, 2022. Numerical simulation analysis of the solid-liquid coupling process in a hybrid landslide: A case study of the Wushanping landslide[J]. Journal of Geomechanics, 28(6): 1104-1114. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG X L, 2019. Application Research of ERT in the Exploration of Groundwater System in Heifangtai[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Q, 2007. Systematic analysis on loess landslides in Heifangtai, Gansu, China[D]. Xi'an: Northwest University. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y Y, ZHOU J W, 2024. Analysis of influencing factors and causes of landslide based on statistical simulation method[J]. China Mining Magazine, 33(S2): 88-91. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO K Y, 2021. Study on groundwater system and its effects on landslides in Heifangtai loess terrace, north China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU Q, XU Q, ZHOU S, et al, 2019. Study on the movement process of sudden loess landslides based on numerical simulation: A case study of Chenjia #8 landslide in Heifangtai[J]. Mountain Research, 37(04): 528-537. (in Chinese)
- ZHOU S, OUYANG C, AN H, et al, 2020. Comprehensive study of the Beijing Daanshan rockslide based on real-time videos, field investigations, and numerical modeling[J]. Landslides, 17(5): 1217-1231.
- ZHU Z M, OUYANG J S, ZHANG Z L, et al, 2025. Mechanism of gently dipping bedding rock landslide-A case study of Zhongliang Village landslide in Cangxi County, Guangyuan City[J]. Safety and Environmental Engineering, 32(1): 233-243. (in Chinese with English abstract)
- ZOU Z X, TANG H M, XIONG C R, et al, 2012. Geomechanical model of progressive failure for consequent bedding rockslide and its stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(11): 2222-2231. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 曹羽哲, 曹运江, 2021. 基于破坏概率法的降雨型滑坡失稳破坏分析[J]. 水土保持研究, 28(5): 387-393.
- 陈建强, 沈鹤, 冯文凯, 2024. 四川省汉源县中海村滑坡特征与运动过程分析[J]. 科学技术与工程, 24(17): 7448-7454.
- 陈兴, 赵洲, 魏江波, 等, 2021. 马边滑坡运动特征及冲击强度的数值研究[J]. 煤田地质与勘探, 49(4): 234-241.
- 崔宇寒, 顾东明, 余海兵, 等, 2024. 降雨开挖诱发顺层岩质滑坡稳定性与堆积特征[J]. 人民长江, 55(9): 156-164.
- 邸勇, 魏云杰, 谭维佳, 等, 2025. 基于 RAMMS 的滑坡堵江危险性评价[J]. 地学前缘, 32(5): 546-556.
- 丁恒, 李海军, 赵建军, 等, 2021. 尖山营古滑坡复活变形特征及成因分析[J]. 科学技术与工程, 21(7): 2626-2631.
- 董健麟, 卢应发, 2025. 基于动态演化规律及数值模拟方法的滑坡机理研究[J]. 水利水电技术(中英文), 56(12): 174-188.
- 耿海深, 吕文斌, 栗桑, 等, 2021. 滑坡失稳机理分析及预警预测研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 57(6): 103-109.
- 龚涛, 钱江澎, 张继, 等, 2025. 从四川筠连县金坪村滑坡论乌蒙山区“群蝶效应”致冬季滑坡机制[J]. 岩石力学与工程学报, 44(11).
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会, 自然资源部, 2016. 滑坡防治工程勘察标准: GB/T 32864-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 14-15.
- 黄润秋, 2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J]. 岩石力学与工程学报, 26(3): 433-454.
- 李广, 2021. 甘肃黑方台坡面冻融特征及冻结滞水效应分析[J]. 山西建筑, 47(16): 117-122.
- 李广, 2022. 甘肃黑方台黄土滑坡群冻结滞水效应研究[D]. 兰州: 兰州理工大学.
- 李先福, 魏雨溪, 杨红梅, 2013. 黄茨滑坡时间预报反分析[J]. 武汉工程大学学报, 35(4): 52-54.
- 马建全, 2012. 黑方台灌区台缘黄土滑坡稳定性研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 孟桓羽, 詹捷伟, 卢全中, 等, 2023. 陕西山阳“8·12”大型山体滑坡运动特征及数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 31(6): 1910-1928.
- 明成涛, 张晶鑫, 郭飞, 2024. 基于 Massflow 的三峡库区堆积层滑坡运动特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 55(S2): 678-684.
- 彭大雷, 2018. 黄土滑坡潜在隐患早期识别研究——以甘肃黑方台为例[D]. 成都: 成都理工大学.
- 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等, 2014. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报, 22(4): 684-691.
- 亓星, 许强, 彭大雷, 等, 2017. 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, 25(1): 147-153.
- 陶志刚, 骆森林, 朱淳, 等, 2022. 滑坡动力学监测及破坏过程案例分析[J]. 工程地质学报, 30(1): 177-186.
- 田俊伟, 江兴元, 李阳春, 等, 2025. 贵州三叠系含软弱夹层顺层滑坡成灾机理与失稳过程分析[J]. 科学技术与工程, 25(9): 3593-3603.
- 王恭先, 1997. 甘肃省永靖县黄茨滑坡的滑动机理与临滑预报[J]. 灾害学, 12(3): 24-27.
- 王浩杰, 孙萍, 韩帅, 等, 2021. 甘肃通渭“9·14”常河滑坡成因机理[J]. 现代地质, 35(3): 732-743.
- 王冉, 王学良, 袁宏虎, 等, 2021. 基于统计分析和数值模拟方法的滑坡视摩擦系数影响因素及特征研究[J]. 工程地质学报, 29(3): 825-833.

- 王志荣, 吴玮江, 周自强, 2004. 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, 15(3): 43-46.
- 魏丽娟, 2012. 黑方台黄土滑坡成因与滑距分析[D]. 兰州大学.
- 吴玮江, 王念秦, 2002. 黄土滑坡的基本类型与活动特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 13(2): 36-40.
- 徐张建, 林在贯, 张茂省, 2007. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 26(7): 1297-1312.
- 许强, 彭大雷, 何朝阳, 等, 2020a. 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, 28(1): 111-121.
- 许强, 彭大雷, 元星, 等, 2016. 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, 24(2): 167-180.
- 许强, 2020b. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报, 28(2): 360-374.
- 张晗, 高杨, 李斌, 等, 2022. 复合型滑坡固液耦合过程数值模拟分析——以无山坪滑坡为例[J]. 地质力学学报, 28(6): 1104-1114.
- 张先林, 2019. 高密度电法在黑方台地下水系统探究中的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 张燕云, 周金文, 2024. 统计模拟法在滑坡影响因素分析与成因研究中的应用[J]. 中国矿业, 33(S2): 88-91.
- 张雨晴, 2007. 甘肃黑方台黄土滑坡系统分析[D]. 西安: 西北大学.
- 赵宽耀, 2021. 甘肃黑方台地下水系统及其对滑坡的影响研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 周琪, 许强, 周书, 等, 2019. 基于数值模拟的突发型黄土滑坡运动过程研究——以黑方台陈家8#滑坡为例[J]. 山地学报, 37(04): 528-537.
- 朱志明, 欧阳继胜, 张子龙, 等, 2025. 缓倾顺层岩质滑坡机理研究——以广元市苍溪县中梁村滑坡为例[J]. 安全与环境工程, 32(1): 233-243.
- 邹宗兴, 唐辉明, 熊承仁, 等, 2012. 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 31(11): 2222-2231.