引文格式:张明钰,郑光,刘震东,等.堆积体滑坡内部变形与表层宏观形变特征的对应耦合关系及其应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(6):1235-1250.DOI:10.13203/j.whugis20240345

Citation:ZHANG Mingyu,ZHENG Guang,LIU Zhendong,et al.Coupling Mechanism Between Internal Deformation and Macroscopic Deformation Characteristics of Accumulation Landslides and Its Application[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(6):1235-1250.DOI:10.13203/j.whugis20240345

堆积体滑坡内部变形与表层宏观形变特征的对应耦合关系及其应用

张明钰[1,2] 郑 光[1,2] 刘震东[1,2] 李为乐[1,2] 刘 奇[1,2]
杨金宁[1,2] 陈 俊[1,2]

1 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都,610059
2 成都理工大学环境与土木工程学院,四川 成都,610059

摘 要:综合遥感技术可以捕捉滑坡地表变形迹象,但无法准确获得斜坡内部变形特征,从而限制了其评估当前斜坡所处阶段或滑动风险的能力。为克服这一问题,开展大型离心模型试验,利用多角度相机和图像处理技术收集堆积体斜坡地表和内部的变形数据,建立内部变形和宏观变形特征之间的联系。利用合成孔径雷达和激光雷达等技术,为早期滑坡识别提供了一个半定量框架。研究表明,滑坡后缘的裂缝水平延伸,形成出现近似平行于坡体走向的弧形拉裂缝的发展趋势;堆积体滑坡破坏通常始于坡顶,由后向前逐步发展。所提的滑坡阶段划分方法将位移-加速度曲线与土壤的超固结比相结合,以超固结比突变点为界,突变前为土体固结沉降阶段以及应力重分布阶段,突变后为斜坡发生破坏阶段。选取两个典型案例进行对比分析,证明运用模型试验结果可以提高遥感技术识别滑坡变形阶段的能力,使用堆积体滑坡内部形变与表层形变特征的对应图谱对利用遥感解译结果判释滑坡体的变形阶段有一定的指导意义。

关键词:堆积体滑坡;离心模型试验;形变特征;早期识别;遥感解译

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-10-26

DOI:10.13203/j.whugis20240345 **文章编号**:1671-8860(2025)06-1235-16

Coupling Mechanism Between Internal Deformation and Macroscopic Deformation Characteristics of Accumulation Landslides and Its Application

ZHANG Mingyu[1,2] *ZHENG Guang*[1,2] *LIU Zhendong*[1,2] *LI Weile*[1,2] *LIU Qi*[1,2]
YANG Jinning[1,2] *CHEN Jun*[1,2]

1 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
2 School of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: **Objectives**: Integrated remote sensing technology primarily captures deformation indicators on the surface of the slope but fails to delineate the internal deformation characteristics clearly. Consequently, it can only facilitate preliminary identification without accurately determining the current stage of the slope or assessing the risk of sliding. **Methods**: To investigate these issues, a centrifugal model test of a large-scale accumulation landslide was performed. Deformation characteristic data for both the surface and interior of the slope were obtained through multi-angle imaging, image processing, and observational deduction. This approach established a correlation between the internal deformation and the macroscopic deformation characteristics of the accumulation landslide. The resulting data provide a semi-quantitative reference framework for the early identification and warning of landslides using technologies such as aperture radar, light

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3000401)。

第一作者:张明钰,硕士生,主要从事边坡失稳破坏与宏观形变特征对应关系研究。mingyu11zhang@163.com

通信作者:郑光,博士,高级实验师。flywing140@163.com

detection and ranging, and optical remote sensing to ascertain the deformation stage of landslides. **Results:** The results show that during the development of the accumulation landslide, cracks at the trailing edge extend significantly in the horizontal direction, while cracks on the back wall exhibit an arc-shaped tensile development trend, approximately parallel to the slope's alignment. Slip failure in homogeneous soil slopes typically initiates at the slope crest, with overall failure occurring as the sliding surface gradually advances from back to front. A novel method for classifying landslide stages is proposed, which combines the displacement-acceleration curve of the accumulation landslide with the soil's over-consolidation ratio. A sudden change in the over-consolidation ratio serves as a segmentation point, with the soil consolidation settlement stage and stress redistribution stage preceding the change, and the slope failure stage following it. **Conclusions:** By comparing and analyzing typical cases, the results indicate that model test outcomes can aid remote sensing technology in distinguishing the deformation stages of landslides for early identification. This suggests that utilizing the correspondence mapping between the internal deformation of the accumulation landslide and the surface deformation characteristics offers valuable guidance for interpreting the deformation stage of the landslide through remote sensing.

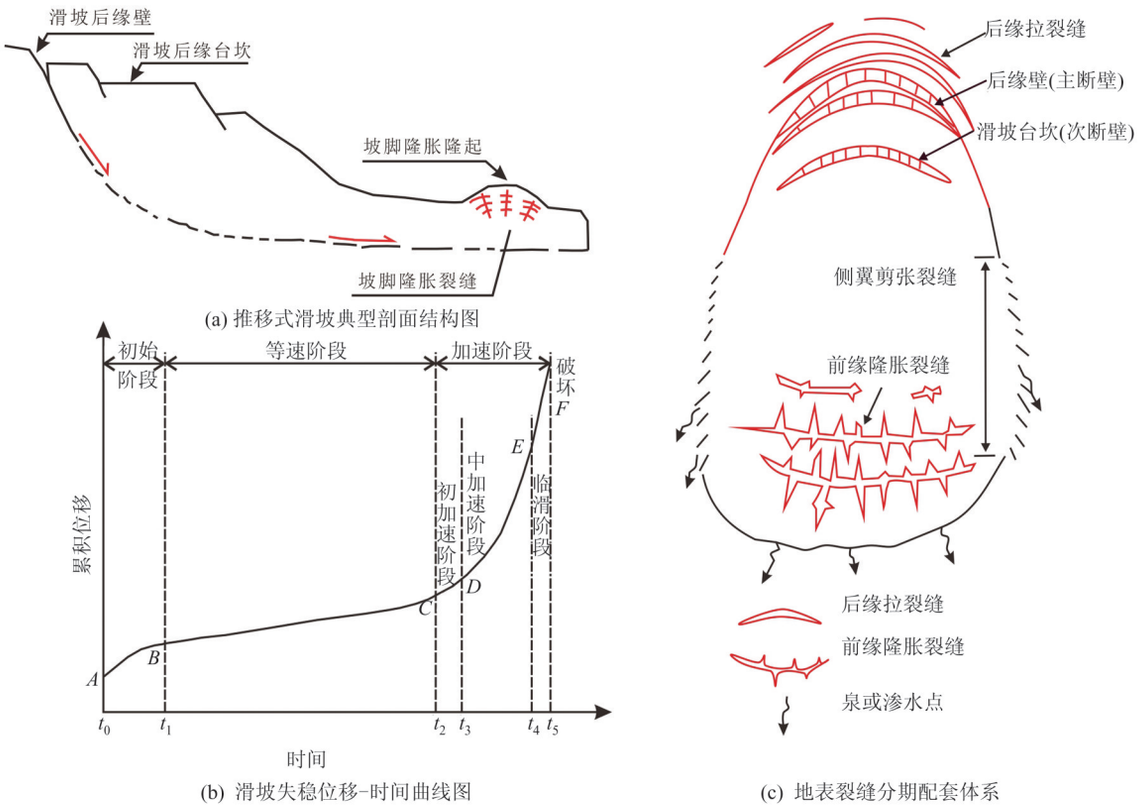
Key words: accumulation landslides; centrifuge model test; deformation characteristics; early identification; remote sensing interpretation

中国幅员辽阔,人口众多,地形复杂多样,含有大量天然斜坡和人工边坡,滑坡灾害频发,边坡失稳所产生的地质灾害层出不穷[1-3]。滑坡发生是由于安全系数从稳定值向不稳定值降低,也包括地质因素、地形因素以及人为干扰等因素[4]。

虽然堆积体滑坡的失稳过程从宏观上看是突发且防不胜防的,但多数滑坡并非瞬间发生失稳滑移,而是经渐进力学演化的结果,这提供了对滑坡进行监测预警的时间。文献[5]运用动力学的基本定律,探讨滑坡动态规律,分析缓动式低速滑坡失稳机理。文献[6]论证了圈闭地形内斜坡破坏的多期性和规律性问题。文献[7]揭示牵引式滑坡后退式渐进破坏过程、推移式滑坡前进式渐进破坏过程、复合式滑坡混合式渐进破坏过程,提出临界状态条块的确定方法。文献[8]深入分析了堆积体变形失稳典型破坏特征,并建立推移式斜坡变形时空演化规律,如图1所示。

中国现在已有相对完善的滑坡破坏预测体系,相关部门在全国范围内开展了多轮详细的地质灾害调查,检测出滑坡灾害隐患点高达30余万处,但仍有85%以上的灾难性滑坡未得到良好的预测[9],未发现的滑坡灾害点所占比例较高,滑坡监测预警研究遇到瓶颈。近年来,遥感技术被广泛应用到滑坡灾害调查研究中[10],相比传统的人工实地考察方式,遥感技术具有效率高、范围广、安全性高等特点。2017年,基于天-空-地一体化的"三查"体系被提出并用于重大地质灾害隐患早期识别与监测预警,取得良好成效[11]。文献[12]利用"三查"技术对滑坡标志三维空间形态、滑坡水平方向及沿雷达视线方向时空变形演化规律的综合四维特征展开精准解译;文献[13]以滑坡灾害频发的大渡河流域丹巴县段为研究区,开展基于"三查"体系的滑坡隐患识别与监测具体实践;文献[14]通过合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术和对更高分辨率光学影像进行解译,获取地表同震形变信息和震中附近详细的同震滑坡以及建筑损毁信息,进行灾情评估。小基线集InSAR(small baseline subset InSAR, SBAS-InSAR)技术能以毫米级精度监测山区滑坡的大范围变形,对山区滑坡隐患点进行早期的灾害识别[15-18]。虽然InSAR遥感技术已经被熟知,并广泛运用于地质灾害防治与早期识别[19],但滑坡灾害表征复杂,运用单一的技术手段很难对其进行准确的隐患识别。2018年金沙江白格滑坡发生前,其斜坡的变形过程至少经历了50年[20]。虽然早期已获取滑坡相关遥感影像数据,但由于其宏观与内部形变对应关系存在观察盲点,仅通过遥感手段无法判断识别滑坡所处形变演化阶段,因此遥感技术存在观测盲点仍是防灾治理工作中待解决的难题。

重力作用下斜坡变形破坏过程随时间演化的三阶段规律是根据大量滑坡监测实例所提出的,并且地表裂缝的圈闭是滑坡发生的前提[21]。但是对于滑坡宏观变形迹象与内部破裂面发展的关系,及何种滑坡表层宏观变形迹象对应何种变形阶段尚未提出定量化的参考指标。离心机模型试验是研究滑坡变形机理的手段。文献



(a) 推移式滑坡典型剖面结构图

(b) 滑坡失稳位移-时间曲线图

(c) 地表裂缝分期配套体系

图 1　推移式滑坡时空演化规律

Fig. 1　Spatial and Temporal Evolution Patterns of Thrust-Type Landslides

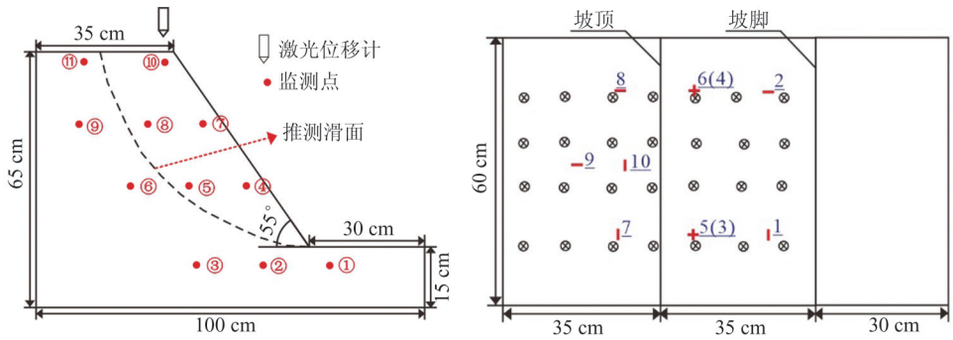
[22]运用离心模型试验模拟了大型均质土坡在地震条件下的行为;文献[23]利用离心模型试验研究了大型均质土坡在不同荷载条件下的稳定性问题;文献[24]开展了离心模型试验监测不同振幅正弦波下的动态响应。

本文聚焦于堆积体滑坡,开展大型离心模型试验,总结堆积体滑坡变形演化形式与宏观形变特征的关系以及相应图谱。本文提出了一种新的堆积体滑坡阶段划分方法,即利用堆积体滑坡的位移-加速度曲线并结合土体超固结比,以超固结比发生突变为分段点,突变前为土体固结沉降阶段以及应力重分布阶段,突变后为斜坡发生破坏阶段,打破了传统的开始即破坏的观点。此外,本文收集了多个典型滑坡的多期光学遥感影像,用于监测表面裂缝的发展情况;将观测结果与离心机试验得出的模式进行关联,验证滑坡所处阶段并判断滑动面的连通性;根据上述过程,对滑坡阶段形成相应的识别体系。运用多种方法将模型试验结果与典型案例进行对照,证明研究思路的可行性。研究结果表明,堆积体滑坡内部变形演化形式与宏观形变特征的对应图谱可辅助遥感技术对滑坡进行阶段识别,对利用遥感技术进行非接触式解译有一定的指导意义。

1　离心模型试验设计

离心模拟试验技术是将人工堆砌的小尺寸模型放置在可高速旋转的大型离心机中,通过高速旋转,在模型上施加 N 倍重力加速度的离心加速度,模拟实际尺寸为模型 N 倍的地质滑坡原型。为了将斜坡表层出现的宏观变形特征与渐进性滑坡失稳演化的变形阶段进行相对应的定量化研究,本文采用成都理工大学的 TLJ-500 型土工离心机开展大型堆积体离心模型试验。

天然条件下含黏粒地表土层的含水率值约在 5%～20%[25],为尽量再现自然条件下土体的变形特征,考虑制作模型过程中土中水分蒸发造成含水率降低,本文选择含水率值为 20% 开展试验,并就地取材,选择烘干重塑而成的成都黏土制作模型。模型尺寸确定为坡脚 55°,底长、宽、高分别为 100 cm、60 cm、65 cm,如图 2(a)所示,位移传感器的横纵向布设如图 2(b)所示。本次试验采用离心逐级加载方案,首先稳步将离心加速度提高到 20g,稳定 5 min 后,以 20g 为一阶段稳步提升,各阶段稳定 5 min,最终达到设计的最大加速度 80g,稳定 5 min 后减速停机。



(a) 侧视图 (b) 俯视图

图2 离心模型设计

Fig. 2 Centrifugal Model Design

2 堆积体斜坡离心模拟的变形演化特征分析

2.1 基于位移-加速度曲线的离心模拟阶段划分

位移和加速度关系是离心模拟中分析和理解滑坡变形和破坏行为的先决条件[26]。本文分析11个监测点的位移-加速度曲线后发现各曲线趋势相近,其中2、4、7、10点位的曲线形变量较大。考虑到点位10位于坡顶和陡缓交接处,位置较为特别,因此在离心模型试验中,选取该点进行分析。利用位移传感器、高速照相及图像数字化处理等手段获得点位10的总位移量与加速度关系曲线,如图3(a)所示。

文献[27]认为,用离心加速度的增加过程来模拟斜坡逐步填筑升高的过程的方法,即在不同加速度下量测同一斜坡模型顶部变形的方法,也可以近似模拟土体斜坡分层逐步提高的填筑过程。该方法同样能用来模拟堆积体斜坡逐步填筑升高的过程。本文根据斜坡堆积过程的离心模拟方法,设定每当离心加速度增加5g时,离心模型向上砌筑一层,共计16层,并绘制点位10的沉降曲线,如图3(c)、图3(d)所示。沉降曲线上每条线代表不同的加速度,而曲线的物理意义表示沉降量从0开始达到沉降峰值最后完成沉降。由图3(c)、图3(d)可以看出,斜坡在[0,10g)竖向位移量较小;[10g,50g)竖向位移变形增长量较为均匀;[50g,60g)竖向位移发生大规模突发性变形;[60g,80g]竖向位移变形量增加明显。

将土体先期固结压力与现有覆盖土重之比定义为超固结比R,其计算式为:

$$R=\frac{p_c}{p_1} \tag{1}$$

式中,p_c为根据土体密度计算的先期固结压力;p_1为土压力传感器得到点位10的土压力数据。由图3可以看出,超固结比在50g~55g产生明显的突变,因此以50g为分界线进行阶段划分。

结合上述点位10的总位移量与加速度的关系曲线、总位移量与时间的关系曲线、沉降过程线以及超固结比,将推移式堆积体斜坡变形阶段分为三大阶段六小阶段。三大阶段分别为将斜坡前期稳定阶段称为斜坡固结沉降阶段Ⅰ[0,10g)、将滑坡破坏前的位移变化被称为由固结沉降引起的应力重分布阶段Ⅱ[10g,50g)、将滑坡的破坏或破坏后位移变化被称为斜坡破坏阶段Ⅲ[50g,80g];六小阶段分别为Ⅰ$_1$稳定阶段[0,4g)、Ⅰ$_2$沉降阶段[4g,10g)、Ⅱ匀速变形阶段[10g,50g)、Ⅲ$_1$加速破坏阶段[50g,55g)、Ⅲ$_2$匀速破坏阶段[55g,77g)、Ⅲ$_3$剧烈破坏阶段[77g,80g]。由于Ⅰ$_1$稳定阶段和Ⅰ$_2$沉降阶段的变形迹象并不明显,所以在后续分析中将二者合并,统称为Ⅰ斜坡固结沉降阶段。

2.2 离心模型试验表层宏观变形特征分析

离心模型试验过程中,通过高速相机观察模型在超重力环境下的拉裂-蠕滑-剪断过程,并进行图像处理,如图4~图8所示,其中位移变化图反映了各观测点在每个阶段的运动轨迹和位移累积量。由图4~图8可以看出,模型在离心作用下先发生整体沉降,后在坡表出现张拉裂缝;随着时间的推移,裂缝进一步加长加深,坡体变形加剧;试验后期,坡面逐渐失稳,滑动面形成。

1) Ⅰ斜坡固结沉降阶段[0,10g)

斜坡变形:滑坡土体在该阶段发生应力调整,滑坡整体保持稳定,坡表无裂隙,坡脚轻微蠕滑,其余部分无明显变形。

速率云图:无明显变化。各观测点无位移形变数据,遂以此为初始稳定阶段。在该阶段,在超重力作用下土体被压至紧密,制作模型时人工分层夯实产生的不均匀误差在此时调整完毕。

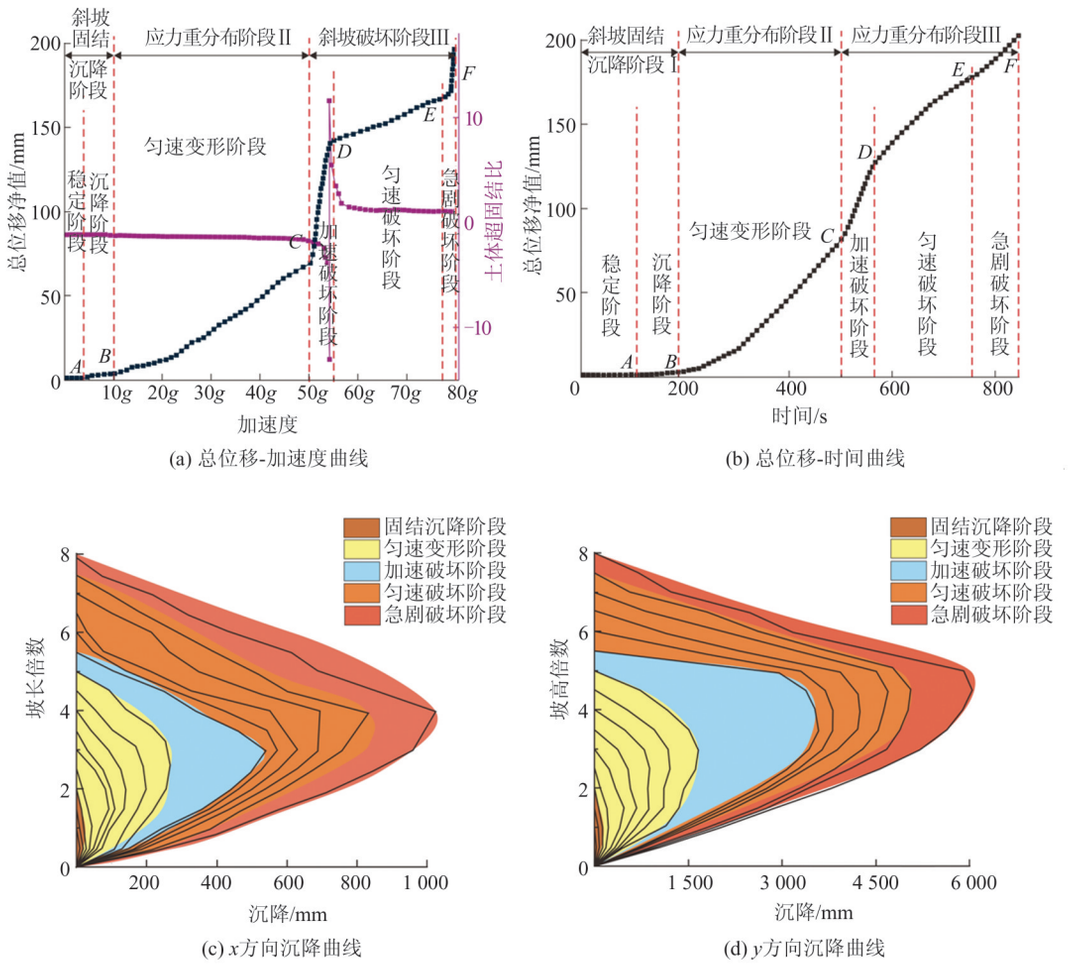


图 3　斜坡离心模型模拟变形、位移-时间曲线

Fig. 3　Slope Centrifugal Model Test Simulates Deformation, Displacement-Time Profile

2) Ⅱ匀速变形阶段[10g,50g)

斜坡变形:加速度不断增加,破坏首先发生在坡体中后部,滑坡后缘出现两条基本平行于坡体走向的、断续的细微拉张裂纹并有贯通的趋势。滑坡中后部推力增加,挤压下方土体。坡顶前部完整性较好,无明显裂缝产生,坡脚前移,伴随轻微鼓胀,出现少量纵横裂纹。

速率云图:坡顶出现光斑,由顶部向中下部发展。该阶段各观测点斜坡在下座力作用下,整体沉降,坡顶形变直观,位移累积量增长,点位 10 的累积变形为 16.2 mm。

3) Ⅲ$_1$加速破坏阶段[50g,55g)

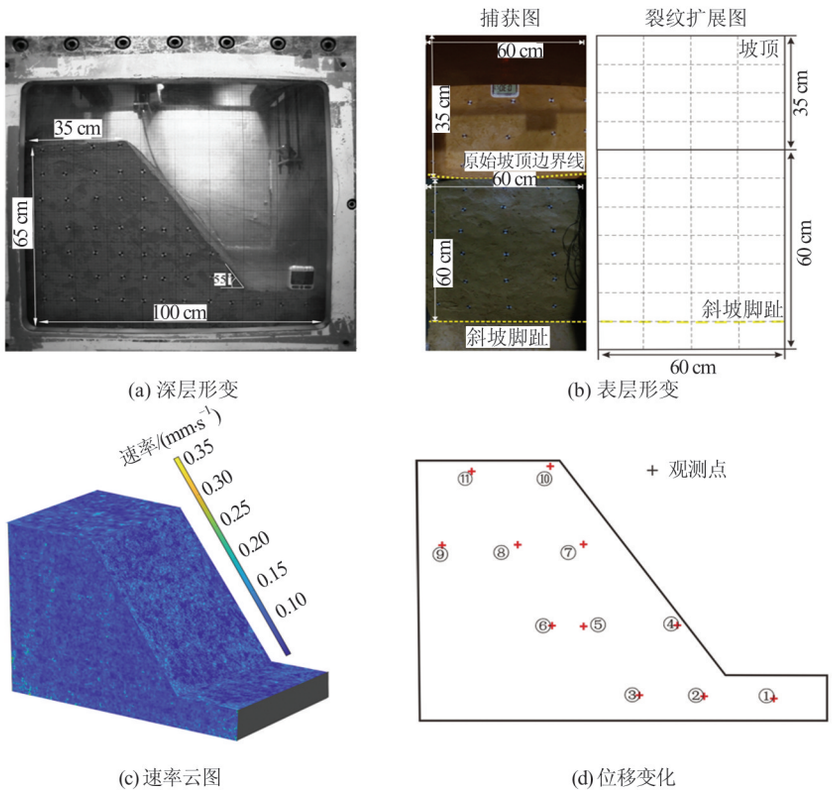
斜坡变形:坡顶张拉裂纹在离心力的作用下进一步扩张成张拉裂缝,并趋于贯通,这两条裂缝逐渐发育成主要裂缝,并持续向坡体内部发育。张拉裂缝数量增多,发育多条新生裂缝,长度延长深度加大,在坡顶有贯通的趋势。紧邻陡缓交界处裂缝发育,并向深层扩展,坡脚隆起,鼓胀裂缝首先出现在靠近玻璃板一侧,随着离心力的增加逐步向另一侧发展。

速率云图:光斑加剧,变形区由上向下发展。该阶段斜坡各观测点运动轨迹显著,位移累积量持续增长,斜坡潜在滑移面逐步贯通,坡顶下座变形持续,点位 10 的累积变形为 7.8 mm。

4) Ⅲ$_2$匀速破坏阶段[55g,77g)

斜坡变形:坡体前缘的土体随着剪切破坏区域的增大而持续向临空面方向变形,后缘出现次级拉裂缝,拉裂缝间近似平行。坡顶裂缝全部贯通,后部主裂缝主导的滑面先发生下挫。斜坡中后部首先被拉开,进而逐层由后壁向坡前推进,形成坡地后缘弧形拉裂缝。由于后部滑移变形量不断增大,其产生的推力也不断增大,在推移作用下坡脚土体前缘弯曲变形而形成隆胀裂缝,同时靠近箱壁的土体前倾。

速率云图:大变形区集中于坡前中部和坡顶的前部,坡表形变速率较为强烈。该阶段斜坡坡顶点位 10 的累积变形增至 149.8 mm,同时点位 1、2、3 的位移开始缓慢增长,竖直方向出现代表

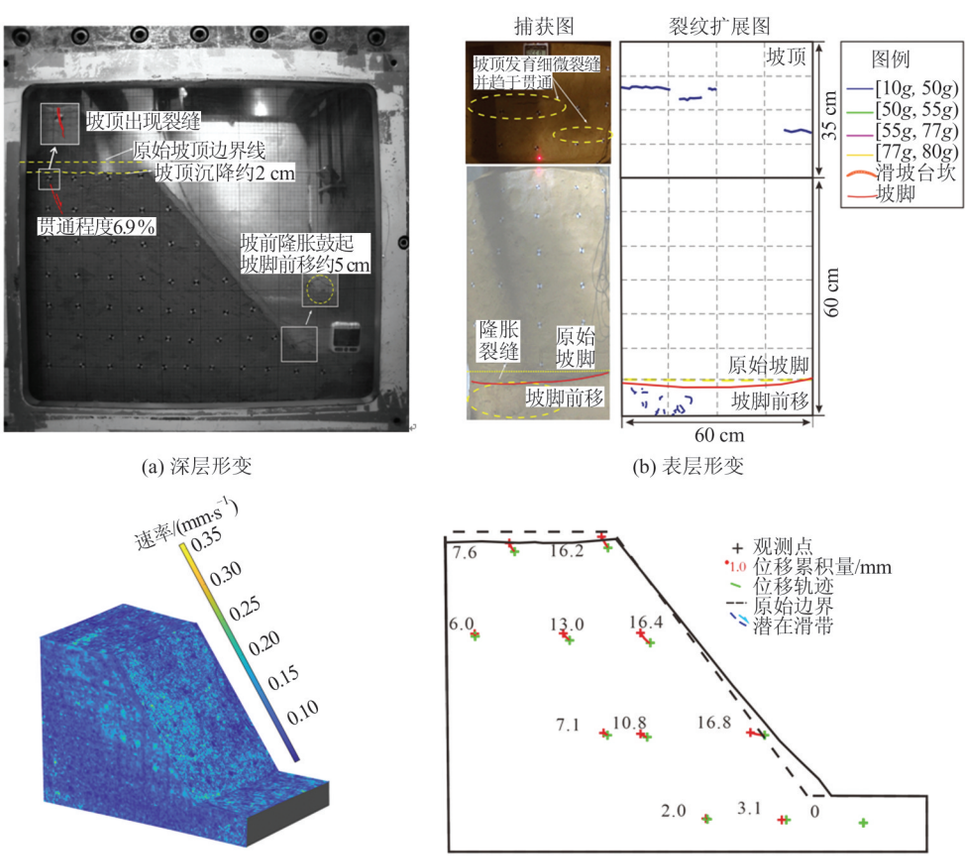


(a) 深层形变 (b) 表层形变

(c) 速率云图 (d) 位移变化

图4 第1阶段斜坡深层变形与表层宏观变形的关系分析

Fig. 4 Analysis of Relationship Between Deep Deformation and Surface Macroscopic Deformation of Slope in Stage 1

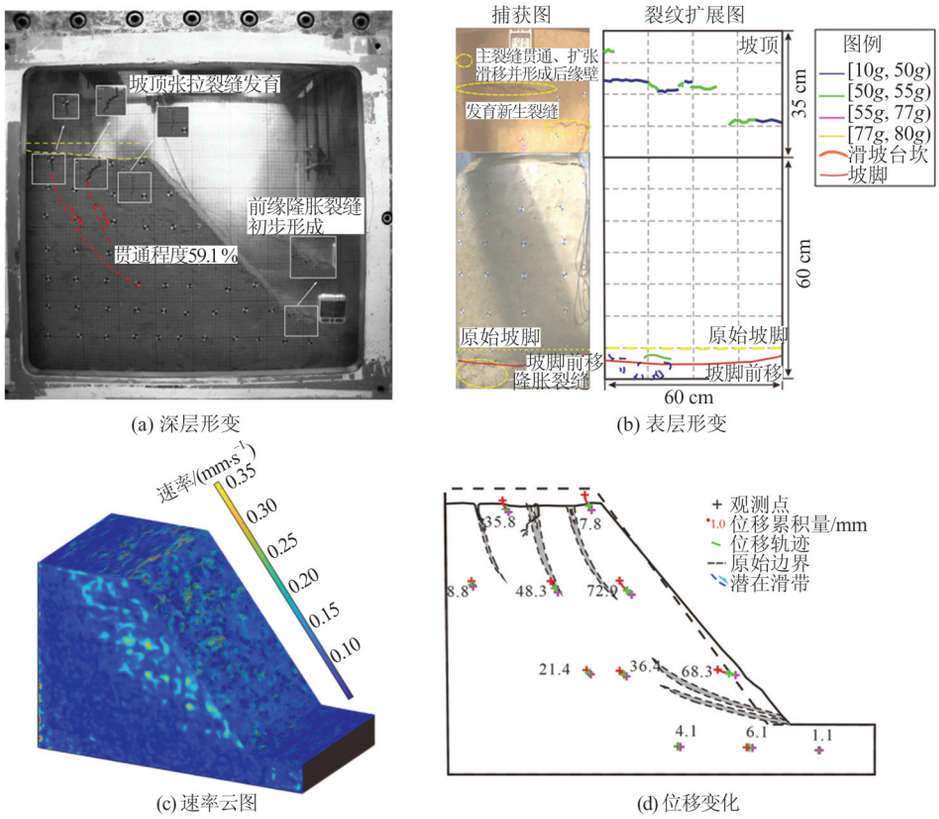


(a) 深层形变 (b) 表层形变

(c) 速率云图 (d) 位移变化

图5 第2阶段斜坡深层变形与表层宏观变形的关系分析

Fig. 5 Analysis of Relationship Between Deep Deformation and Surface Macroscopic Deformation of Slope in Stage 2

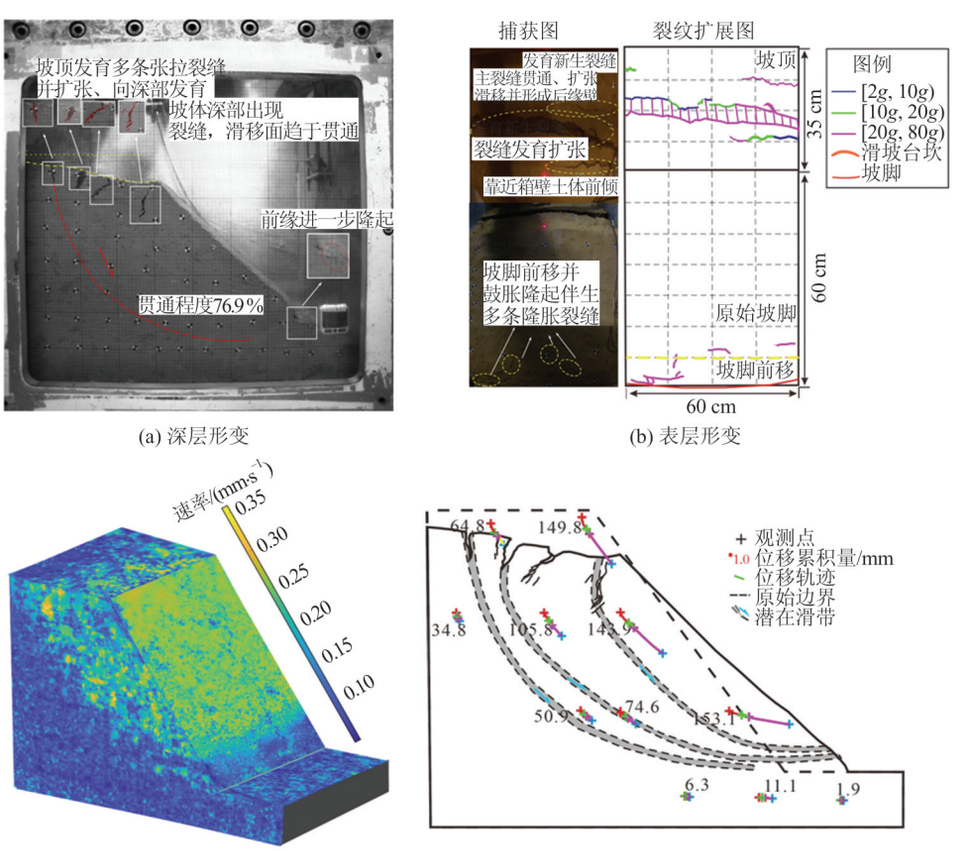


(a) 深层形变　(b) 表层形变

(c) 速率云图　(d) 位移变化

图 6　第 3 阶段斜坡深层变形与表层宏观变形的关系分析

Fig. 6　Analysis of Relationship Between Deep Deformation and Surface Macroscopic Deformation of Slope in Stage 3

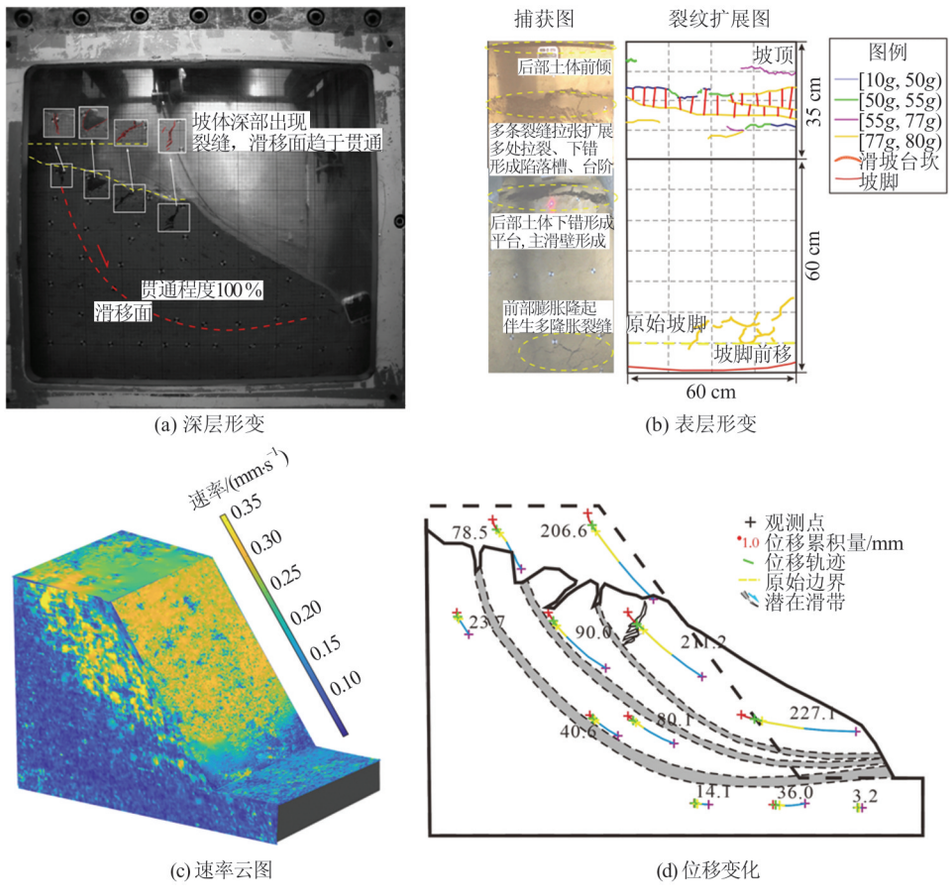


(a) 深层形变　(b) 表层形变

(c) 速率云图　(d) 位移变化

图 7　第 4 阶段斜坡深层变形与表层宏观变形的关系分析

Fig. 7　Analysis of Relationship Between Deep Deformation and Surface Macroscopic Deformation of Slope in Stage 4



(a) 深层形变 (b) 表层形变

(c) 速率云图 (d) 位移变化

图8 第5阶段斜坡深层变形与表层宏观变形的关系分析

Fig. 8 Analysis of Relationship Between Deep Deformation and Surface Macroscopic Deformation of Slope in Stage 5

坡脚隆起的正向位移。坡面点位7的累积位移量为143.9 mm,点位4的累积位移量为153.1 mm,为变形累积最大点位,大位移区域主要集中在坡体表部。

5) Ⅲ$_3$剧烈破坏阶段[77g,80g]

斜坡变形:滑坡从局部变形发展到整体失稳阶段。坡顶后部土体沿裂缝逐级向下错动,并相继在后缘出现多级弧形拉裂缝和下错台坎,主滑壁形成。坡脚前缘临空条件不好在滑移过程中受到模型箱的遮挡,所以在模型箱边缘堆积。陷落槽形成,多级台坎出现,最终滑面迅速贯通,短时间内坡体完成滑动。

速率云图:潜在滑动面明显,速率云图显示滑坡强变形区主要集中分布在滑坡中后部,证明该堆积体模型属于典型的推移式滑坡。该阶段,滑移面贯通,斜坡整体失稳破坏,坡顶点位10的累积位移量达到206.6 mm,坡面点位7的累积位移量为211.2 mm,点位4的累积位移量为227.1 mm,为变形累积最大点位。其变形规律为坡体下部位移相对平缓,其位移累积量远小于坡顶和坡体中部,大变形区域主要集中在坡体中上部。

3 斜坡表层的宏观形变与内部破裂变形的配套耦合关系

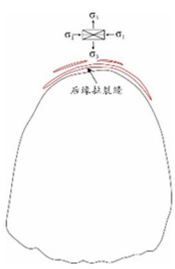
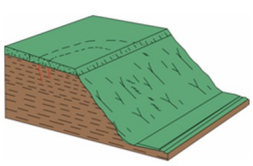
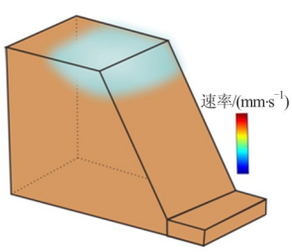
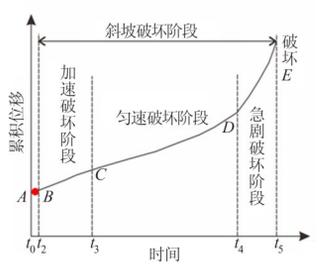
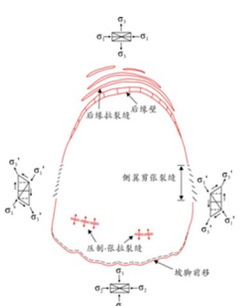
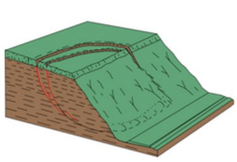
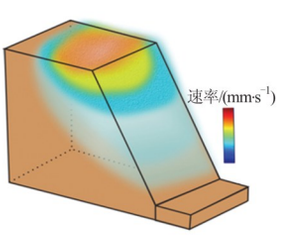
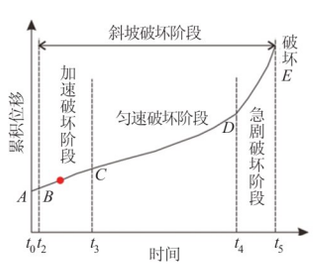
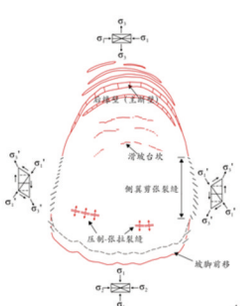
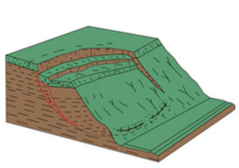
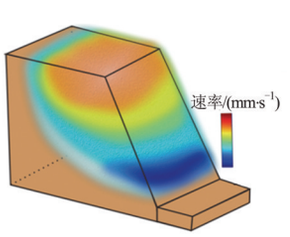
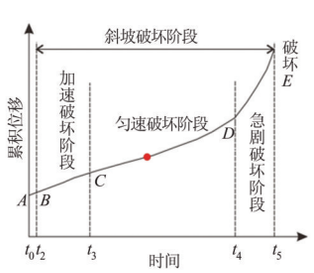
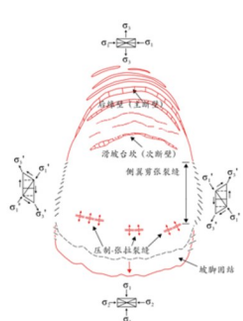
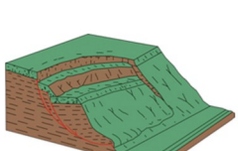
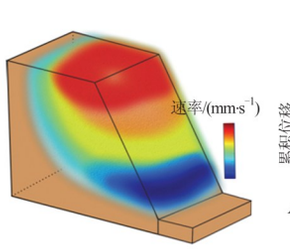
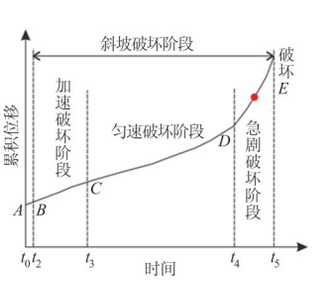
推移式堆积体滑坡从开始出现变形到最终失稳破坏,一般需经历稳定阶段、沉降阶段、匀速变形阶段、加速破坏阶段、匀速破坏阶段以及剧烈破坏阶段共6个阶段,总结土质滑坡变形演化形式与宏观形变特征的关系如下:(1)稳定阶段及沉降阶段:斜坡整体稳定,表层宏观和内部细节均无明显形变,时间-位移曲线变化微小;(2)匀速变形阶段:宏观上坡顶拉裂缝发育、坡脚轻微前移,内部细节裂缝向深处发展,滑动面由后向前发育,时间-位移曲线变化幅度稳步上升;(3)加速破坏阶段:宏观上坡顶裂缝贯通、多级台坎形成,两侧雁型裂缝出现,坡脚轻微隆起,隆胀裂缝发育强烈。滑动面已经出现,并且有坡顶与坡脚两头向中介扩张的趋势;(4)匀速破坏阶段:两侧雁型裂缝持续发展,坡脚剧烈隆起,并发生前移,隆胀裂缝数量变多,宽度加剧,同时内部主滑带形成;(5)剧烈破坏阶段:圈椅状地貌出现,主滑壁形成,坡脚处应力集中,鼓起强烈,此阶段内部

潜在滑动面贯通,时间-位移曲线斜率逐渐增长至坡体剪出,斜坡破坏。

由于大型堆积体滑坡在长期地质历史时期的推移下,经历了固结沉降阶段和应力重分布阶段,斜坡正式由稳定走向失稳是从时间-位移曲线中的C点逐步开始的,本文着重分析Ⅲ$_1$加速破坏阶段[$50g$,$55g$)、Ⅲ$_2$匀速破坏阶段[$55g$,$77g$)、Ⅲ$_3$剧烈破坏阶段[$77g$,$80g$]3个阶段的宏观变形与内部破裂变形的配套耦合关系,如表1所示。

表1　斜坡表层的宏观形变与内部破裂变形的配套耦合关系

Table 1　Coupling Mechanism Between Macro-Deformation and Internal Rupture Deformation of Slope Surfaces

阶段	表层宏观变形示意图	滑坡破坏模式图	速率云图模式图	位移-时间曲线
匀速变形阶段				
加速破坏阶段Ⅲ$_1$				
匀速破坏阶段Ⅲ$_2$				
剧烈破坏阶段Ⅲ$_3$				

注:云图模式图中设定红色代表向下陷落变形,蓝色代表向上鼓胀变形。

大型堆积体滑坡启动前应具有圈椅状的地貌特征。滑坡后壁裂缝的发展趋势为坡体后部出现近似平行于坡体走向的弧形拉裂缝,随着坡体的变形,裂缝数量增多,分布范围增大,宽度深度增加,逐步圈闭,最终沿滑动面下滑错动。随着后部滑体前移推挤中部滑体,导致应力集中,雁形裂缝出现。坡脚有一定抗滑作用,在坡体无法继续前行的情况下产生鼓胀裂缝,根据上述堆积体离心机试验所反映的形变规律,可以将离心机试验得出的斜坡表层的宏观形变与内部破裂

变形的配套耦合关系运用于推移式堆积体滑坡的早期识别中。

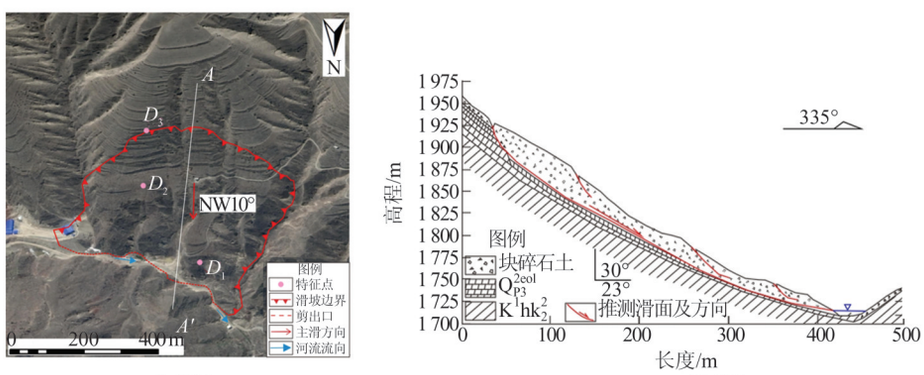
4 基于模型试验的堆积体滑坡实例光学影像分析

通过分析多阶段高分辨图像,可以精确地掌握研究区地形特征、边坡边界和坡表变化情况,从宏观层面定量地调查滑坡变形演化规律[28]。本文通过谷歌地球收集研究区域滑坡的多期高分辨率历史光学遥感影像,对滑源区的变形发展迹象和滑坡的失稳过程进行解译。

4.1 甘肃省永靖县红壑岘滑坡

4.1.1 红壑岘滑坡基本概况

甘肃省永靖县红壑岘滑坡地处青藏高原与黄土高原的过渡地带,距黑方台阶地5.8 km,坐标为103°18′18.3″E,36°02′46.1″N。研究区处于黄河河谷区域,大部分被黄土覆盖,堆积体从上至下分别为风成黄土(Q_{P3}^{2eol})和粉质粘土层($K^1hk_2^2$)[29]。滑坡平面形态呈扇形,前缘高程约为1 746 m,后缘高程约为1 980 m;南北向长约380 m,东西向宽约360 m,体积约130×10^4 m^3,为一大型滑坡,其全貌图和剖面图如图9所示。



(a) 全貌图 (b) *AA*′剖面图

图9 红壑岘滑坡全貌图和坡面图

Fig. 9 Panoramic View and Geological Profile of Honghexian Landslide

4.1.2 红壑岘滑坡历史变形阶段分析

本文收集了红壑岘滑坡2015-10-16、2017-05-16、2019-02-05、2021-02-26共4期历史高精度卫星光学影像,如图10所示。对上述历史图像进行空间位置校正后,对该区域的历史变形迹象进行分析研究。从光学影像图上可以明显观测到左右两条长约50 m、宽约2.9 m、深约3.8 m的较大的沟渠,将滑坡与山体其他部位分割,形成了天然的排水集水区。

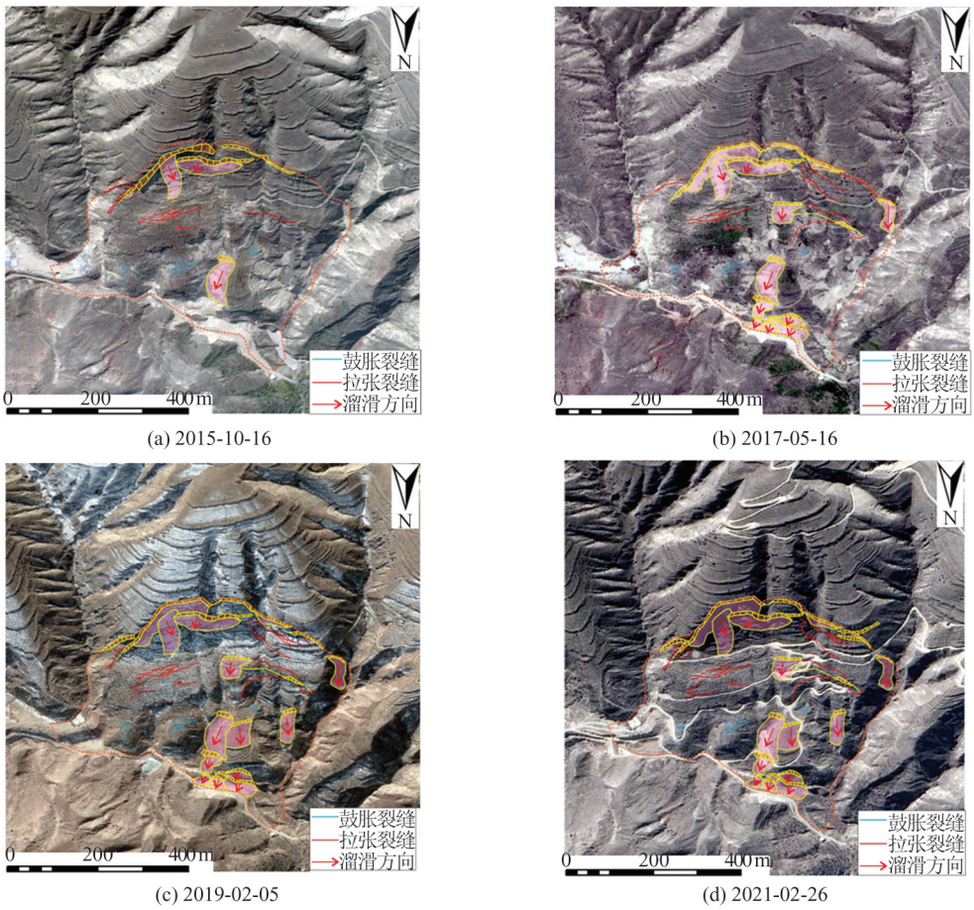
1)从图10(a)可以清楚地看出,滑坡后缘出现了一条长约350 m、高差约20 m的主裂缝,向下约45 m处平行发育一次级拉裂缝。在卸荷作用下,边坡应力发生变化,中部平台出现几条大型的张拉裂缝,坡脚受到侵蚀,坡体上有一处明显的局部溜滑,滑坡前缘发育鼓胀裂缝。

2)2015—2017年间,随着坡体下滑力的增大,边坡中部的张拉裂缝持续发育、增多并扩张,坡体右侧出现了多处垮塌,同时右侧中部一裂缝张拉明显,逐步发育成陡坎。坡脚被侵蚀的面积持续增加,在重力作用下,上述溜滑部位逐级下滑,滑动范围扩大,此时滑坡表层宏观变形迹象符合表1宏观变化模式图中的Ⅲ_1阶段。

3)由图10(c)可以看出,主裂缝西向扩张,同时主、次两级裂缝已贯通,后壁右侧出现一系列走向相互平行的张拉裂缝,这说明滑坡主体持续向前移动。

4)2019—2021年,坡体左上方增加两处与主裂缝方向一致的拉裂缝。图10(d)显示其余裂缝未见明显的扩展延伸,垮塌范围未见显著变化,所以判定红壑岘滑坡暂时处于稳定状态。

通过4期历史图像可以看出,红壑岘滑坡坡体东部相对稳定;坡体西部为潜在危险区,其裂缝较多,局部失稳面积较大,可能会发生连续垮塌,进而影响整个滑坡的稳定性。但是由于红壑岘滑坡在后续的光学影像图上未有新增的明显变形,所以认为红壑岘滑坡处于匀速变形阶段。根据物理模型试验结论判定该滑坡发生推移式渐进破坏,滑坡强变形区主要集中分布在滑坡中后部,由于滑坡向前推移,会造成滑坡前缘出现大量小型垮塌和局部滑动,覆盖滑坡整个中前部,多集中于滑坡前缘剪出口附近。



(a) 2015-10-16　(b) 2017-05-16

(c) 2019-02-05　(d) 2021-02-26

图 10　红壑岘历史影像图

Fig. 10　Historical Images of Honghexian Landslide

4.1.3　红壑岘滑坡变形阶段验证

红壑岘滑坡为一大型黄土滑坡,在2015—2019年期间,红壑岘滑坡经历了从活跃到停止再到重新活跃的3个阶段,本文选取图9中3个代表性点D_1、D_2、D_3进行时间序列分析,并与图像与离心模型试验中位移-时间曲线进行对比分析,两者曲线变化趋势一致,如图11所示。

从位移-时间曲线层面看,红壑岘滑坡总共发生过3次明显的变形:(1)2015年6月—8月,所有观测点都开始出现微弱的变形,滑坡进入初始变形阶段;(2)2016年12月至2018年4月,滑坡中部平台累积位移量持续增大,其他点位变形累积量增加缓慢;(3)2018年5月,滑坡累积位移量突增,滑坡复活,持续变形,滑坡主裂缝向西扩张,主裂缝周围出现多处平行裂缝,坡体处于滑动状态。

文献[8]在滑坡演化变形曲线基础上将坐标变换进行无量纲处理,提出切线角变化曲线,并进行阶段划分。切线角变化曲线可以作为滑坡临滑预警的判据,其切线角速率的计算式为:

$$\alpha = \arctan\left(V_1 / V\right) \tag{2}$$

式中,α为切线角;V_1为滑坡实时演化速率;V为滑坡等速演化阶段的形变速率。将α转换为角度γ,当$\gamma \approx 45^\circ$时,斜坡处于等速变形阶段;当$45^\circ < \gamma < 80^\circ$,斜坡变形进入加速破坏阶段;当$80^\circ \leqslant \gamma < 85^\circ$,斜坡变形进入匀速破坏阶段;当$\gamma \geqslant 85^\circ$,斜坡变形进入急剧破坏阶段;当$\gamma \approx 89^\circ$,滑坡进入临滑状态。

根据上述原理,利用文中的红壑岘滑坡位移-时间曲线,对横纵坐标轴进行无量纲处理,经过计算得出红壑岘滑坡D_1、D_2、D_3 3点的切线角。由于位移-时间曲线是从InSAR中获取的数据,曲线较为跳跃,将曲线平滑后得出如图11(b)~图11(d)所示的红壑岘滑坡切线角-时间曲线。由图11可以看出,直到2019年,红壑岘滑坡切线角α仍小于65°,同时结合离心模型试验所得的位移-时间曲线,可以验证红壑岘滑坡此时处于Ⅲ$_1$加速破坏阶段。

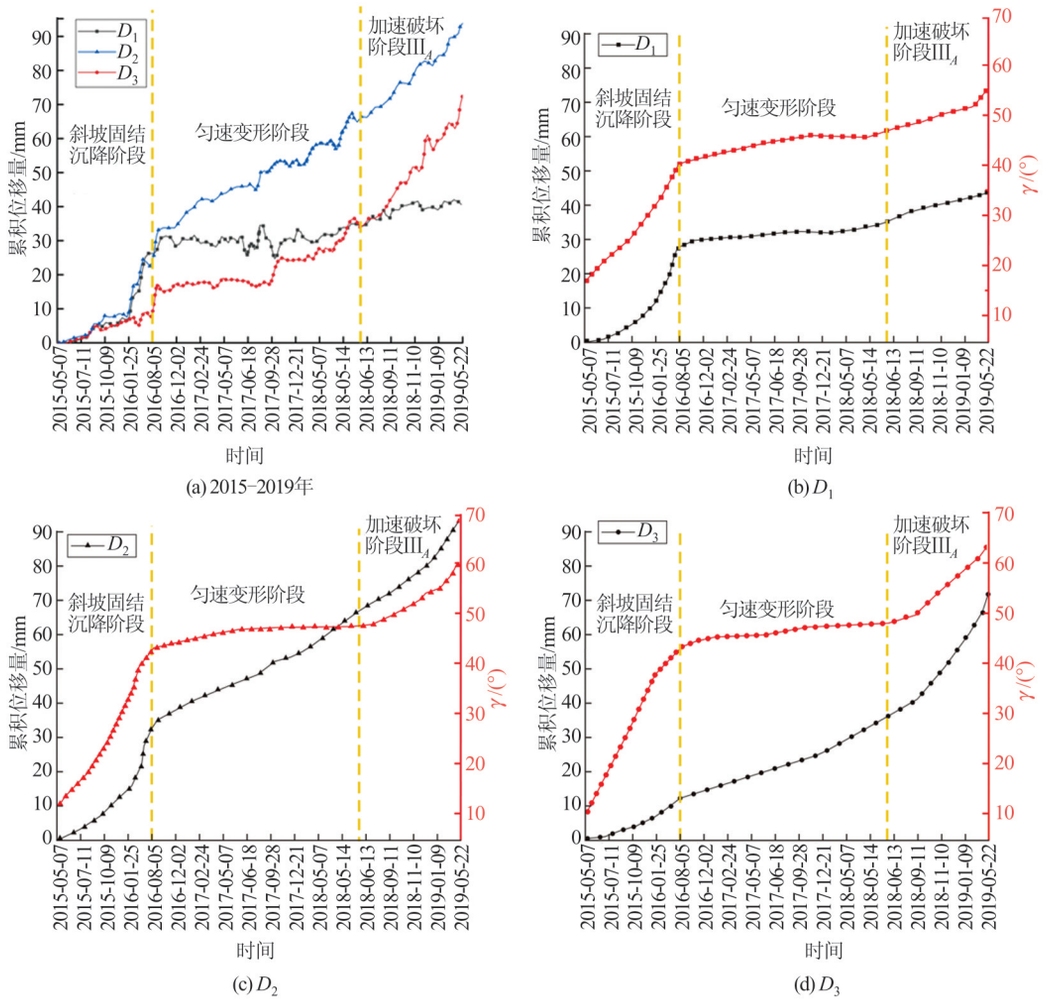


图11 红壑岘滑坡位移-时间曲线

Fig. 11 Displacement-Time Curves of Honghexian Landslide

4.2 四川省巴塘县贡伙村滑坡

4.2.1 贡伙村滑坡基本概况

贡伙村堆积体位于金沙江左岸，坐标为99°08′15.66″E，29°11′27.37″N。堆积体上覆第四系滑坡堆积物（Q_h^{del}）及部分残破积物（Q_h^{el}），下伏基岩以三叠系下统中心绒群茨岗群灰（$T_{1\text{-}2}zh^1$、$T_{1\text{-}2}zh^2$）为主，夹杂变质砂岩。滑坡为一单斜顺向坡，整体坡度约为35°。滑坡平面形态呈马蹄形，前缘高程约为2 480 m，后缘高程约为3 430 m；南北向长约1 676 m，东西向宽约1 958 m，体积约为822×10^4 m^3，为一大型滑坡，光学影像和剖面图如图12所示。

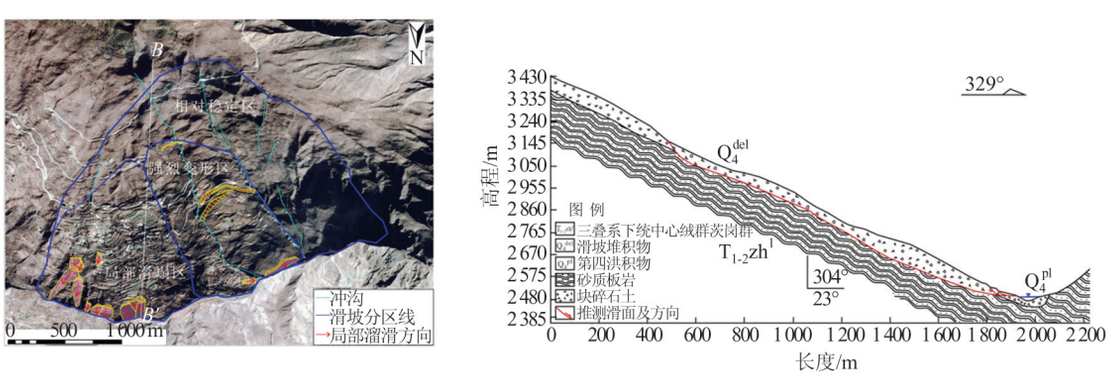


图12 贡伙村滑坡光学影像和剖面图

Fig. 12 Optical Image and Geological Profile of Gonghuocun Landslide

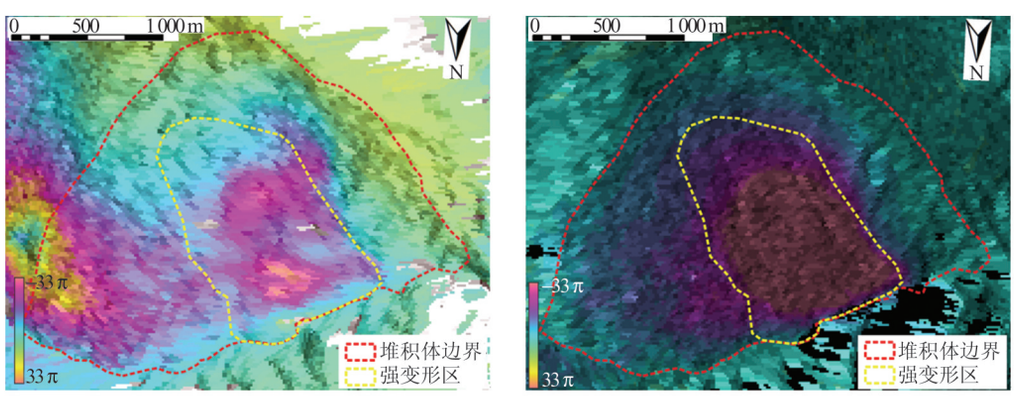
4.2.2　贡伙村滑坡历史变形演化阶段分析

本文通过谷歌地球收集了贡伙村滑坡2021-01-18的卫星影像,如图12(a)所示。根据图像进行遥感解译,对贡伙村滑坡进行分区:(1)相对稳定区:该区域在流水侵蚀的作用下发育3条冲沟,贯穿整个坡体,变形区域主要位于冲沟及公路附近。(2)局部垮塌区:坡体形态呈凸字形,该区域为居民住宅耕种区,人类活动明显。前缘挤压沟道,坡脚有多处小规模垮塌,内部有小规模溜滑,其余位置无明显的大规模变形。(3)强烈变形区:后部有一陡坎,沿东北-西南方向发育。该区域内有一处次级滑坡,左右边界分别为左右两条冲沟,平面形态呈圈椅状,后缘发育四级下挫陡坎。该区域前缘由于流水冲刷导致局部小规模溜滑,坡内明显变形区域集中在两条大的冲沟附近。

贡伙村滑坡整体稳定,坡体并无明显的变形迹象。经观测,坡体左侧的次级滑坡地表变形明显,后缘裂缝已圈闭,多级台坎发育,两侧冲沟包围坡体。根据滑坡离心机试验得出的地堆积体滑坡内部变形演化形式与宏观形变特征的对应图谱,判断该次级滑坡为推移式堆积体滑坡,并已处于Ⅲ$_2$匀速破坏阶段,极易进一步发展,引发滑动导致整个坡体的失稳破坏。

4.2.3　贡伙村滑坡变形阶段验证

为了对上文判断的滑坡所处变形阶段进行验证,本文利用Stacking-InSAR技术对贡伙村堆积体区域的SAR影像数据进行分析处理,得到升轨、降轨两组干涉影像,结合现场调查进行解译。Sentinel-1卫星由A/B两颗极轨卫星组成,每6天可对整个地球进行一次成像,本次研究共采集升轨影像409景,降轨影像308景,解译得到年均形变速率如图13所示。



(a) 升轨　　(b) 降轨

图13　贡伙村滑坡年均形变速率

Fig. 13　Deformation Velocity Rate of Gonghuocun Landslide

解译结果表明,降轨识别效果相对更显著,滑坡整体未见明显滑动,由于滑坡向前推挤,坡体前缘出现局部鼓胀滑移导致变形区主要变形部位为坡体中前部,集中于坡内两条长大冲沟之间和附近区域。经野外调查发现坡体中前部的变形是由于切坡修建公路,坡体稳定性降低,导致多处发生局部范围的垮塌,灰绿色基岩出露。次级滑坡的InSAR解译结果符合离心模型试验中表1提出的Ⅲ$_B$阶段的速率云图模式图,可以初步判断贡伙村滑坡处于加速破坏阶段早期,并具有继续发展的趋势。贡伙村滑坡为推移式滑坡,变形区主要发生在斜坡右后部次级滑坡处,此阶段坡体表层宏观特征主要表现为张拉裂纹进一步发展成张拉裂缝,长度延长深度增加,坡脚前移,破裂面产生并向下发育,坡体前缘出现鼓胀和小型垮塌。

4.3　归纳推移式滑坡的影像识别标志

红壑岘滑坡经历了从活跃到停止再到重新活跃3个阶段,其后缘裂缝发展丰富,滑坡强变形区主要集中分布在滑坡中后部,分析比对表1发现,红壑岘滑坡处于Ⅲ$_1$加速破坏阶段但变形速率逐步变缓,并趋于稳定,同时由于坡体前移导致坡体剪出口附近出现大量小垮小塌,覆盖滑坡整个中前部。贡伙村堆积体整体处于长期蠕滑状态,坡体整体比较稳定,但是由于滑坡向前推挤,坡体前缘出现局部鼓胀滑移导致变形区主要变形部位为坡体中前部,坡体后部较为稳定,前中部的次级滑坡后缘拉裂缝已经贯通,结合InSAR解译的结果,次级滑坡已处于Ⅲ$_2$匀速破坏阶段。

综上,本文所得的堆积体滑坡内部变形演化形式与宏观形变特征的对应关系图谱对利用光学遥感解译滑坡,判定滑坡所处阶段具有一定指

导意义。堆积体滑坡在孕育过程中,滑坡裂缝首先出现于坡体后部,其后缘裂缝在水平方向上延伸明显,滑坡后缘常出现在陡壁附近。大型堆积体斜坡的变形特征和演化规律基本相似,主要表现为后缘裂缝不断延伸直至圈闭前缘变形、鼓胀裂缝不断增加、在滑坡剪出口附近逐渐扩大规模的小型垮塌和局部滑动。

5 结 语

本文研究了堆积体滑坡表层宏观变形迹象与内部破裂面发展的关系,开展大型离心模型试验总结推移式堆积体滑坡的变形规律特征和变形阶段,以6个阶段划分滑坡失稳过程,判定滑移面的贯通程度,引入典型滑坡案例,利用模型所得规律对案例进行分析总结,得到结论如下:

1)堆积体滑坡发生拉裂-蠕滑-剪断。在滑坡发育过程中,其后缘裂缝在水平方向延伸明显,滑坡后缘裂缝近乎圈闭但滑坡主体相对稳定;堆积体滑坡符合滑坡启动前应具有圈椅状的地貌特征,坡体后部出现近似平行于坡体走向的弧形拉裂缝,且随着坡体的变形,裂缝数量增多、分布范围增大、宽度深度增加,逐步圈闭,直至沿滑动面下滑错动;当堆积体边坡发生推移式破坏时,破坏往往始于坡顶,而后向斜坡中下部发展,随着滑动面从后向前逐步贯通,斜坡整体破坏。推移式堆积体滑坡裂缝首先出现在坡体后部,滑坡后缘常出现在陡壁附近。

2)提出新的滑坡阶段划分方法。利用堆积体滑坡的位移-加速度曲线并结合土体超固结比,以超固结比发生突变处为分段点,进行阶段划分,即土体固结沉降阶段、应力重分布阶段、斜坡破坏阶段。同时将斜坡破坏阶段细分为3个小阶段:Ⅲ$_1$加速破坏阶段,坡顶裂缝出现趋于贯通、坡脚前移,伴随轻微鼓胀,出现少量纵横裂纹;Ⅲ$_2$匀速破坏阶段,坡顶裂缝全部贯通,多级台坎形成、两侧雁型裂缝出现,主滑壁形成,隆胀裂缝发育强烈;Ⅲ$_3$剧烈破坏阶段,圈椅状地貌出现,坡脚处应力集中,鼓起强烈,斜坡内部潜在滑移面由上至下逐渐贯通,整体破坏失稳。此方法指出:在离心模型试验过程中,土体超固结比发生突变后才真正进入斜坡变形破坏阶段;土体超固结比可以作为堆积体斜坡进入变形破坏阶段的判定标准,而非像传统观点一样划分堆积体变形阶段,以离心机运转开始(重力加速度为0时)划分斜坡的初始变形阶段。

3)将离心模型试验所总结的滑坡表层宏观变形迹象与内部破裂面发展的关系和典型案例破坏模式、变形阶段进行对比分析。对比红壑岘滑坡上3个不同位置特征点的位移-时间曲线的与离心模型试验点位10的位移-时间曲线;对比贡伙村滑坡的InSAR的形变速率图与离心模型试验的速率云图,验证了离心试验结论的可靠性,证明离心模型试验所总结的滑坡表层宏观变形迹象与内部变形特征的对应图谱可以辅助遥感技术对滑坡进行早期识别,对利用遥感技术进行非接触式解译有一定的指导意义。

参 考 文 献

[1] NGECU W M, ICHANG'I D W. The Environmental Impact of Landslides on the Population Living on the Eastern Footslopes of the Aberdare Ranges in Kenya: A Case Study of Maringa Village Landslide[J]. *Environmental Geology*, 1999, 38(3): 259-264.

[2] GUZZETTI F, CARDINALI M, REICHENBACH P, et al. Comparing Landslide Maps: A Case Study in the Upper Tiber River Basin, Central Italy[J]. *Environmental Management*, 2000, 25(3): 247-263.

[3] 文海家,张永兴,柳源. 滑坡预报国内外研究动态及发展趋势[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004,15(1):1-4.
WEN Haijia, ZHANG Yongxi, LIU Yuan. A Home and Abroad Investigative-Tendency of Landslide Forecast[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(1): 1-4.

[4] CRUDEN D, VARNES D. Landslides: Investigation and Mitigation. Chapter 3 - Landslide Types and Processes[R]. Transportation Research Board Special Report, Gothenburg, Sweden, 2016

[5] 胡广韬,文宝萍,赵法锁. 铜川市缓动式低速滑坡的动态规律[J]. 中国地质灾害与防治学报,1991,2(4):36-46.
HU Guangtao, WEN Baoping, ZHAO Fasuo. Law of the Dynamic State of Slowmoving and Low-Speed Landslides in Tongchuan City[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1991, 2(4): 36-46.

[6] 杨建宏,胡广韬,文宝萍. 圈闭地形内斜坡破坏的多期性和规律性[J]. 地球科学与环境学报,1988,10(2):78-89.
YANG Jianhong, HU Guangtao, WEN Baoping. The Multiple Phases of Slope Failure and Its Reoccurence in Trap Topography[J]. *Journal of Earth*

Science and Enivronmental, 1988, 10(2): 78-89.

[7] 谭福林, 胡新丽, 张玉明, 等. 不同类型滑坡渐进破坏过程与稳定性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 597-606.
TAN Fulin, HU Xinli, ZHANG Yuming, et al. Study of Progressive Failure Processes and Stabilities of Different Types of Landslides[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(S2): 597-606.

[8] 许强, 汤明高, 黄润秋, 等. 大型滑坡监测预警与应急处置[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
XU Qiang, TANG Minggao, HUANG Runqiu, et al. Monitoring, Early Warning, and Emergency Response for Large Landslides [M]. Beijing: Science Press, 2015.

[9] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966.
XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated Space-Air-Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957-966.

[10] 朱静, 唐川. 遥感技术在我国滑坡研究中的应用综述[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(3): 458-464.
ZHU Jing, TANG Chuan. An Overview of Remote Sensing Applications for Landslide Research in China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2012, 27(3): 458-464.

[11] 许强, 陆会燕, 李为乐, 等. 滑坡隐患类型与对应识别方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(3): 377-387.
XU Qiang, LU Huiyan, LI Weile, et al. Types of Potential Landslide and Corresponding Identification Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 377-387.

[12] 闫开云, 李江, 许强, 等. 综合遥感精准解译红层岩质滑坡四维特征: 以垮梁子滑坡为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230118.
YAN Kaiyun, LI Jiang, XU Qiang, et al. Accurate Interpretation of Four-Dimensional Characteristics of Red Bed Rock Landslide by Comprehensive Remote Sensing: A Case Study of Kuoliangzi Landslide [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20230118.

[13] 付豪, 李为乐, 陆会燕, 等. 基于"三查"体系的丹巴县滑坡隐患早期识别与监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(5): 734-746.
FU Hao, LI Weile, LU Huiyan, et al. Early Detection and Monitoring of Potential Landslides in Danba County Based on the Space-Air-Ground Investigation System [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(5): 734-746.

[14] 陈鹏, 邱梁才, 姚宜斌, 等. 基于InSAR和光学影像解译的2023年甘肃积石山Ms 6.2震后地表形变和灾害分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(2): 257-270.
CHEN Peng, QIU Liangcai, YAO Yibin, et al. Surface Deformation and Hazard Analysis After the 2023 Ms 6.2 Earthquake in Jishishan, Gansu Province Based on InSAR and Optical Imagery Interpretation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(2): 257-270.

[15] GUO H Y, MARTÍNEZ-GRAÑA A M. Susceptibility of Landslide Debris Flow in Yanghe Township Based on Multi-Source Remote Sensing Information Extraction Technology (Sichuan, China) [J]. *Land*, 2024, 13(2): 206.

[16] DONG J H, NIU R Q, LI B Q, et al. Potential Landslides Identification Based on Temporal and Spatial Filtering of SBAS-InSAR Results[J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2023, 14(1): 52-75.

[17] 马博, 朱杰勇, 刘帅, 等. 联合时序InSAR和滑坡灾害易发性的元阳县滑坡灾害隐患识别[J]. 地质灾害与环境保护, 2023, 34(3): 8-14.
MA Bo, ZHU Jieyong, LIU Shuai, et al. Hidden Landslide Disaster Identification in Yuanyang County with Combined Time-Series InSAR and Landslide Disasters Susceptibility[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2023, 34(3): 8-14.

[18] 李宗仁, 沙永莲, 辛荣芳, 等. 基于时序InSAR的青海同仁市滑坡隐患早期识别与特征解析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(35): 15158-15170.
LI Zongren, SHA Yonglian, XIN Rongfang, et al. Early Identification and Characteristic Analysis of Landslide Hidden Danger in Tongren City of Qinghai Province Based on Time Series InSAR [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(35): 15158-15170.

[19] 葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 949-956.
GE Daqing, DAI Keren, GUO Zhaocheng, et al. Early Identification of Serious Geological Hazards with Integrated Remote Sensing Technologies: Thoughts and Recommendations[J]. *Geomatics and*

Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 949-956.

[20] 许强, 郑光, 李为乐, 等. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1534-1551.
XU Qiang, ZHENG Guang, LI Weile, et al. Study on Successive Landslide Damming Events of Jinsha River in Baige Village on Octorber 11 and November 3, 2018 [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6): 1534-1551.

[21] 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1104-1112.
XU Qiang, TANG Minggao, XU Kaixiang, et al. Research on Space-Time Evolution Laws and Early Warning-Prediction of Landslides[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(6): 1104-1112.

[22] ZHANG L, HUANG Y. Centrifuge Modeling of Large Homogeneous Soil Slopes Under Seismic Loading [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 138: 106-125.

[23] ZHOU H., ZHANG Y. Centrifuge Tests on the Behavior of Large Homogeneous Soil Slopes Under Monotonic and Cyclic Loading [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2023, 45(3): 251-263.

[24] XU C, WANG Z. Dynamic Response of Large-Scale Homogeneous Soil Slopes in Centrifuge Tests [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2022, 27(1): 45-62.

[25] 卢宁, William J Likos, 韦昌富, 等. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
LU Ning, LIKOS W J, WEI Changfu, et al. Unsaturated Soil Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.

[26] FANG K, TANG H M, LI C D, et al. Centrifuge Modelling of Landslides and Landslide Hazard Mitigation: A Review[J]. *Geoscience Frontiers*, 2023, 14(1): 101493.

[27] 章为民, 徐光明. 土石坝填筑过程的离心模拟方法[J]. 水利学报, 1997, 28(2): 8-13.
ZHANG Weimin, XU Guangming. Study on Modeling the Construction Process of Embankment Dams in Centrifugal Test[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, 28(2): 8-13.

[28] HERVÁS J, BARREDO J I, ROSIN P L, et al. Monitoring Landslides from Optical Remotely Sensed Imagery: The Case History of Tessina Landslide, Italy[J]. *Geomorphology*, 2003, 54(1/2): 63-75.

[29] MENG Q K, LI W L, RASPINI F, et al. Time-Series Analysis of the Evolution of Large-Scale Loess Landslides Using InSAR and UAV Photogrammetry Techniques: A Case Study in Hongheyan, Gansu Province, Northwest China[J]. *Landslides*, 2021, 18(1): 251-265.